



الجمهورية العربية السورية
جامعة البعث
كلية الهندسة المدنية
قسم هندسة المواصلات والنقل

دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي السوري في خواص المجبول البيتوميني

دراسة أعدت لنيل درجة الدكتوراه في الهندسة المدنية
(هندسة المواصلات والنقل)

إعداد

المهندس محمود علي عبد الله

المشرف المشارك

الدكتور باسم علي

مدرس في كلية الهندسة المدنية
بالجامعة العربية الدولية الخاصة

المشرف العلمي

الأستاذ الدكتور فايز سليمان

أستاذ في قسم هندسة المواصلات والنقل
بكلية الهندسة المدنية في جامعة البعث

2022م

1443هـ

ملخص البحث

يهدف البحث إلى دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي السوري في الخواص الفيزيائية والريولوجية للرابط البيتوميني، وتحسين خواص المجبول البيتوميني الساخن، بالإضافة إلى البحث في إمكانية استخدامه كمعدل لإنتاج المجبول الدافئ، وذلك لتحقيق أهداف اقتصادية وبيئية من خلال الوفرة الحاصل في كلفة الإضافات المطلوبة للإنتاج من جهة، والتقليل من كمية الطاقة المستهلكة والغازات المنبعثة من جهة أخرى.

تم في هذه الدراسة توصيف الزيوليت الطبيعي السوري باستخدام طريقة الأشعة السينية المفلورة (XRF)، وقياسات حيود الأشعة السينية (XRD)، وإجراء التحليل الوزني الحراري (TGA)، وتحليل الأشعة تحت الحمراء الطيفي (FTIR).

تم في المرحلة الأولى دراسة خواص الرابط البيتوميني غير المعدل والمعدل بإضافات الزيوليت الطبيعي وفق أربعة نسب وزنية % (3, 4, 5, 6)، عن طريق إجراء اختبارات الرابط البيتوميني التقليدية قبل وبعد التعرض للتعيب قصير الأمد وفق اختبار RTOFT. وأشارت نتائج هذه المرحلة إلى تحسن خواص الرابط البيتوميني المعدل بالزيوليت الطبيعي وزيادة مقاومته للتعيب، وإلى عدم إمكانية التنبؤ بقابلية تشغيل المجبول البيتوميني المعدل بإضافات الزيوليت الطبيعي وفقاً لاختبارات الرابط البيتوميني، وضرورة دراسة تأثير الإضافة المباشرة للزيوليت الطبيعي في خواص المجبول البيتوميني.

تضمنت دراسات المجبول البيتوميني الساخن إنتاج نوعين من الخلطات البيتومينية وفق طريقة مارشال: الخلطات الساخنة المرجعية، والخلطات الساخنة المعدلة بنسب وزنية مختلفة من الزيوليت الطبيعي % (0.3, 0.6, 0.9). وأشارت نتائج هذه المرحلة إلى تحسن الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخلطات البيتومينية المعدلة بالزيوليت الطبيعي عند جميع النسب المدروسة، مع عدم حدوث تغيرات هامة في نسبة الرابط البيتوميني المثلى، وإلى أن النسبة المثلى لاستخدام الزيوليت الطبيعي في تحسين خواص المجبول البيتوميني الساخن هي % 0.6 من الوزن الكلي للحصويات، والتي تم الحصول عندها على أعلى ثبات وأعلى مقاومة للتشوه الدائم، وقيم انسياب وفراغات هوائية جيدة وضمن حدود المواصفات المحلية والعالمية المسموحة.

وبهدف البحث في إمكانية استخدام الزيوليت الطبيعي السوري في إنتاج المجبول البيتوميني الدافئ، تم تخفيض درجات حرارة إنتاج المجبول البيتوميني بمقدار 25°C ، وإنتاج خلطات دافئة معدلة بالزيوليت الطبيعي وفق عدة نسب % (0, 0.6, 0.9, 1.2) من الوزن الكلي للحصويات. وأشارت النتائج إلى أن النسبة المقترحة لهذا الاستخدام هي % 0.9 من الوزن الكلي للحصويات، والتي اقتربت عندها الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمجبول الدافئ إلى حد كبير من خواص المجبول الساخن، باستثناء مشكلة انخفاض مقاومة المجبول الدافئ ضد خطر الرطوبة. ولضمان مقاومة جيدة ضد خطر الرطوبة، كان لابد من تعديله باستخدام موانع الانسلاخ.

اعتمدت دراسات تقييم حساسية الرطوبة على استخدام الكلس المطفأ كمانع انسلاخ لتحسين مقاومة المجلول الءافئ ضء خطر الرطوبة كبءل جزئى عن المواد المائلة وفق عءة نسب وزنية % (1.5, 2, 2.5) من الوزن الكلى للءصوئات، وتوصلت إلى أن النسبة المقترءة لاستءءام الكلس المطفأ فى ءءسن ءساسفة المجلول البفءومفنى الءافئ ضء خطر الرطوبة هى % 2 من الوزن الكلى للءصوئات.

وبالءءفءة تم ءءوصل إلى ءءسن ءواص المجلول البفءومفنى الساخن المعدل بالزفولفء الطبففى، وإلى نءاء الزفولفء الطبففى فى ءءففص ءرءاء ءءارة ءءءا ء المجلول البفءومفنى بمءءار 25°C عءء نسبة إءافءة % 0.9، مع الءاءة لءءءل المجلول بالكلس المطفأ بنسبة % 2 لءمان مقاومة ءفءة ضء خطر الرطوبة.

الكلمات المفتاآفة: المجلول البفءومفنى الساخن، المجلول البفءومفنى الءافئ، الزفولفء الطبففى/الصناعى، مقاومة الشء عفر المباشر، ءساسفة الرطوبة، موانع الانسلاخ.

فهرس المحتويات

I	ملخص البحث
III	فهرس المحتويات
VII	فهرس الأشكال
XIII	فهرس الجداول
XVI	الرموز المستخدمة في البحث
1	الفصل الأول: المنهجية العامة للبحث
2	1.1 مقدمة Introduction
3	2.1 إشكالية البحث Research Problem
3	3.1 مجال البحث وأهدافه Scopes and Objectives
4	4.1 الجديد في البحث
4	5.1 منهجية البحث Research methodology
5	6.1 البنية الهيكلية للأطروحة
6	الفصل الثاني: الروابط البيتومينية والمجبول البيتوميني
7	1.2 مقدمة عامة
7	2.2 التعريف الهندسي للبيتومين
8	3.2 استخدامات البيتومين
9	4.2 مصادر البيتومين
9	4.2.1 بحيرات الإسفلت Lake asphalt
10	4.2.2 الإسفلت الصخري Rock asphalt
10	4.2.3 الجلسوناييت Gilsonite
10	4.2.4 القطران Tar
10	4.2.5 البيتومين المكرر Refined bitumen
11	5.2 أنواع الروابط البيتومينية
11	5.2.1 المستحلبات البيتومينية Bitumen emulsions
14	5.2.2 البيتومين السائل Cut-back bitumen and fluxed bitumen
17	5.2.3 البيتومين الصلب Hard bitumen
17	5.2.4 البيتومين المؤكسد Oxidised bitumen
18	6.2 مكونات البيتومين Bitumen composition

19	7.2 تصنيف البيتومين Bitumen classification
19	1.7.2 حسب الغرز:
22	2.7.2 حسب اللزوجة:
22	3.7.2 حسب التركيب المجموعي للبيتومين:
23	4.7.2 حسب نظام السوبر بيف:
24	8.2 تكنولوجيا المجلول البيتوميني:
24	9.2 المجلول البيتوميني الساخن Hot Mix Asphalt:
24	1.9.2 المجلول البيتوميني كثيف التدرج الحبي Dense-Graded Mixes:
25	2.9.2 المجلول البيتوميني ذي الهيكل الحجري Stone Matrix Asphalt:
27	3.9.2 المجلول البيتوميني مفتوح التدرج الحبي Open -Graded Mixes:
27	10.2 المجلول البيتوميني البارد Cold Mix Asphalt:
27	11.2 المجلول البيتوميني الدافئ Warm Mix Asphalt:
27	1.11.2 مقدمة:
28	2.11.2 مزايا المجلول البيتوميني الدافئ:
30	3.11.2 عيوب المجلول البيتوميني الدافئ:
30	4.11.2 الإضافات العضوية Organic additives:
33	5.11.2 الإضافات الكيميائية Chemical additives:
36	6.11.2 التقنيات الرغوية Foaming Technologies:
53	الفصل الثالث: الزيوليت (أنواعه، خواصه، تطبيقاته)
54	1.3 مقدمة عامة:
57	2.3 الزيوليت الطبيعي في الجمهورية العربية السورية:
57	3.3 الخواص العامة للزيوليت:
57	1.3.3 التركيب الهيكلي:
60	2.3.3 التركيب الكيميائي:
62	4.3 تطبيقات الزيوليت:
62	1.4.3 في مجال إنتاج المجلول البيتوني:
65	2.4.3 في مجال تثبيت التربة:
65	3.4.3 استخدام الزيوليت في إنتاج المجلول البيتوميني الدافئ WMA:
72	4.4.3 تطبيقات أخرى للزيوليت الطبيعي:

73	5.3. طرائق توصيف الزيوليت:
73	1.5.3. الأشعة السينية المفلورة X-Ray Fluorescence:
76	2.5.3. حيود الأشعة السينية X-Ray Diffraction:
76	3.5.3. طيف الأشعة تحت الحمراء Fourier Transfer Infrared:
77	4.5.3. التحليل الوزني الحراري Thermal Gravimetric Analysis:
78	الفصل الرابع: الدراسة التجريبية
79	1.4. البرنامج الاختباري:
79	1.1.4. المسار الأول: توصيف الزيوليت الطبيعي السوري
79	2.1.4. المسار الثاني: دراسة خواص الرابط البيتوميني.
80	3.1.4. المسار الثالث: دراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمجبول البيتوميني.
82	4.1.4. المسار الرابع: دراسات حساسية المجبول البيتوميني ضد خطر الرطوبة.
83	2.4. مواد البحث:
83	3.4. العمل المخبري:
85	4.4. تحديد خصائص الزيوليت الطبيعي السوري:
85	1.4.4. قياسات الأشعة السينية المفلورة (XRF):
86	2.4.4. قياسات حيود الأشعة السينية (XRD):
87	3.4.4. التحليل الوزني الحراري (TGA):
88	4.4.4. تحليل الأشعة تحت الحمراء الطيفي (FTIR):
90	5.4. دراسات الرابط البيتوميني:
90	1.5.4. إنتاج الرابط البيتوميني الرغوي:
91	2.5.4. تحديد خواص الرابط البيتوميني:
92	3.5.4. دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي في خواص الرابط البيتوميني:
101	6.4. تحديد خواص الحصويات المستخدمة في تصميم الخلطات البيتومينية:
101	1.6.4. التركيب الحبي للحصويات:
102	2.6.4. الخواص الفيزيائية للحصويات المدروسة:
103	7.4. دراسات المجبول البيتوميني الساخن:
103	1.7.4. تصميم الخلطات البيتومينية الساخنة المرجعية:
106	2.7.4. دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي السوري في خواص المجبول البيتوميني الساخن:
112	8.4. دراسات المجبول البيتوميني الدافئ:

112	1.8.4. إنتاج المجبول البيتوميني الدافئ باستخدام الزيوليت الطبيعي:
112	2.8.4. التغيرات الحاصلة في خواص الخلطات البيتومينية الدافئة:
118	3.8.4. دراسة حساسية الخلطات البيتومينية الدافئة لتأثير الرطوبة:
126	9.4. الاستنتاجات والتوصيات:
129	المراجع العلمية:
156	الملحق A
167	الملحق B

فهرس الأشكال

- الشكل (1-2): الاستخدام العالمي للبيتومين 9
- الشكل (2-2): طريقة إنتاج المستحلبات البيتومينية 11
- الشكل (3-2): المستحلبات البيتومينية الكاتيونية والآنيونية الشائعة الاستخدام في الطرق 13
- الشكل (4-2): صورة مكروسكوبية للمستحلب البيتوميني 13
- الشكل (5-2): طريقة توضع المستحلبات البيتومينية الكاتيونية على سطح الحصى 14
- الشكل (6-2): تأثير إضافة الديزل في قيم غرز الرابط البيتوميني 40/60 14
- الشكل (7-2): استخدام العوامل النشطة الموجبة الشحنة لتقليل زاوية التماس بين البيتومين وسطح الحصى السالبة الشحنة للسماح للماء بالخروج وتحسين تغطية الحصى بالرابط 15
- الشكل (8-2): تصنيف المجلول البيتوميني وفقاً لدرجات حرارة الإنتاج والطاقة المستهلكة 24
- الشكل (9-2): سطح المجلول البيتوميني كثيف التدرج الحبي 25
- الشكل (10-2): عينة SMA 26
- الشكل (11-2): الفرق بين المجلول البيتوميني الساخن والدافئ (في مجابل البيتومين) 29
- الشكل (12-2): تقليل انبعاث الغازات خلال مرحلة إنتاج المجلول البيتوميني الدافئ 29
- الشكل (13-2): أشكال إضافة Sasobit® المتوفرة 32
- الشكل (14-2): صور المسح الإلكتروني المكروسكوبي للبيتومين 50/70 المعدل بالشمع بنسبة 4% 32
- الشكل (15-2): آلة حقن Sasobit® في الخلط 32
- الشكل (16-2): إضافة Cecabase RT® مع خزان لتخزينها 34
- الشكل (17-2): الشكل الهيكلي لإضافة Evotherm (ET) 34
- الشكل (18-2): المضخة النموذجية المستخدمة لإيصال Evotherm®(DAT) إلى خط البيتومين 35
- الشكل (19-2): حبيبات Rediset® الصلبة 35
- الشكل (20-2): طريقة تصنيع البيتومين الرغوي 36

37	الشكل (21-2): تقنية WMA System
38	الشكل (22-2): تقنية Accu-Shear®
39	الشكل (23-2): تقنية Aquablack
40	الشكل (24-2): نظام Double Barrel Green مع توضيح آلية العمل
41	الشكل (25-2): معدات Ecofoam-II (الخلاط، المضخة، لوحة التحكم)
42	الشكل (26-2): الاضطرابات المتولدة داخل تقنية Ecofoam-II
42	الشكل (27-2): تفاصيل الحقن بالماء بواسطة تقنية Ecofoam-II
43	الشكل (28-2): خط البيتومين، حجرة تمديد البيتومين، أجهزة التحكم، خطوط نقل البيتومين الرغوي وفق تقنية WAM-Foam
44	الشكل (29-2): مراحل إنتاج البيتومين منخفض الطاقة
44	الشكل (30-2): نظام التحكم بالرطوبة وفق تقنية LEA
45	الشكل (31-2): تقنية البيتومين منخفض الانبعاث Low Emission Asphalt
46	الشكل (32-2): تقنية Meeker – Acqua Foam
47	الشكل (33-2): تقنية Terex® WMA
48	الشكل (34-2): تقنية Ultrafoam GX2
49	الشكل (35-2): إضافة ADVERA (الشكل، الصور الميكروسكوبية)
50	الشكل (36-2): طريقة تقديم الـ ADVERA إلى الرابط البيتوميني في مجايل البيتومين
50	الشكل (37-2): طرق تخزين الـ ADVERA (أكياس، عربات سكك حديدية، صوامع)
51	الشكل (38-2): الرصف بالمجبول البيتوميني الدافئ باستخدام إضافة Advera
52	الشكل (39-2): إضافة Aspha-Min
52	الشكل (40-2): طريقة تخزين الـ Aspha-Min (أكياس كبيرة، صوامع)
54	الشكل (1-3): بنية الزيوليت والماء المتوضع داخل المسامات الصغيرة
56	الشكل (2-3): تشكل الزيوليت الطبيعي

56	الشكل (3-3): طريقة تصنيع الزيوليت الصناعي
58	الشكل (4-3): التركيب الجزيئي للزيوليت
58	الشكل (5-3): التركيب الهيكلي للزيوليت
59	الشكل (6-3): وحدات البناء الثنائية في الزيوليت
59	الشكل (7-3): التركيب البنائي الهيكلي لزيوليت الفليبسايت
60	الشكل (8-3): بنية أشهر أنواع الزيوليت الطبيعي
63	الشكل (9-3): البنية الميكروسكوبية للبيتون: (a) عينة بيتون محتوية 100% إسمنت
67	الشكل (10-3): صور المسح الإلكتروني SEM للزيوليت الصناعي A والزيوليت HS
68	الشكل (11-3): نتائج اختبارات اللزوجة عند درجات حرارة $^{\circ}C$ (120, 135) (Akisetty وآخرون، 2007)
71	الشكل (12-3): نتائج اختبار مسار العجلة عند درجة حرارة $^{\circ}C$ 50 وفقاً لـ (Vidal وآخرون) ...
72	الشكل (13-3): انتقائية الشكل في قنوات الزيوليت
74	الشكل (14-3): آلية تحليل العينة باستخدام مطياف XRF
75	الشكل (15-3): العملية الفيزيائية لتقنية XRF
75	الشكل (16-3): طيف الأشعة السينية المفطورة لمختلف أنواع العناصر
76	الشكل (17-3): قياسات حيود الأشعة السينية وفق طريقة Laue
77	الشكل (18-3): منحنى طيف الأشعة تحت الحمراء (IR) للسيلكا
79	الشكل (1-4): المخطط النهجي لمسار توصيف الزيوليت الطبيعي السوري
80	الشكل (2-4): المخطط النهجي لمسار دراسة خواص الرابط البيتوميني
81	الشكل (3-4): المخطط النهجي لمسار دراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمجبول البيتوميني (ساخن- دافئ)
82	الشكل (4-4): المخطط النهجي لمسار تقييم حساسية المجبول البيتوميني ضد خطر الرطوبة
85	الشكل (5-4): التركيب الكيميائي للزيوليت الطبيعي المدروس

الشكل (4-6): مخطط انحراف بودرة الخام الزيوليتي (XRD)	86
الشكل (4-7): مخطط طيف الأشعة السينية للخام الزيوليتي بعد معالجته باستخدام برنامج HighScore Plus	86
الشكل (4-8): مخطط TGA للزيوليت الطبيعي السوري	87
الشكل (4-9): نتائج تحليل FTIR للزيوليت الطبيعي المدروس	88
الشكل (4-10): الزيوليت الطبيعي المار	90
الشكل (4-11): وحدة الخلط المستخدمة لإنتاج البيتومين الرغوي	90
الشكل (4-12): الرغوة الحاصلة بعد إضافة الزيوليت الطبيعي	91
الشكل (4-13): (مزيج البيتومين- الزيوليت الطبيعي) عند درجات حرارة مختلفة	91
الشكل (4-14): تغيرات الغرز عند الدرجة 25°C لأنواع البيتومين المدروسة قبل وبعد اختبار التعرض للتعب قصير الأمد	94
الشكل (4-15): تغيرات درجة حرارة تمييع البيتومين المعدل وغير المعدل بالزيوليت الطبيعي قبل وبعد التعب قصير الأمد	95
الشكل (4-16): تغيرات قيم دليل الغرز لأنواع البيتومين المدروسة	96
الشكل (4-17): تغيرات الاستطالة للبيتومين المعدل وغير المعدل بالزيوليت الطبيعي قبل وبعد التعب قصير الأمد	98
الشكل (4-18): اختبار فرن الطبقة الرقيقة الدوار RTOFT	98
الشكل (4-19): الخسارة في الكتلة لأنواع البيتومين المدروسة	99
الشكل (4-20): تغيرات لزوجة الرابط البيتوميني المعدل وغير المعدل بالزيوليت الطبيعي وفق درجة الحرارة	101
الشكل (4-21) منحنى التدرج الحبي للخصائص المستخدمة	102
الشكل (4-22): منحنيات مارشال (الثبات، الكثافة، الانسياب، الفراغات الهوائية، الفراغات الحصى، الفراغات المليئة بالبيتومين) للخلطات المرجعية المصممة باستخدام بيتومين 60/70	105
الشكل (4-23): إضافة البيتومين الساخن لمزيج (الخصائص الساخنة-الزيوليت الطبيعي)	106
الشكل (4-24): درجة حرارة دمك العينات	106

الشكل (4-25): الخلطات البيتومينية المعدلة بالزيوليت الطبيعي	107
الشكل (4-26): تغير قيم ثبات الخلطات البيتومينية الساخنة بدلالة نسب الزيوليت الطبيعي	108
المضافة	108
الشكل (4-27): تغير قيم انسياب الخلطات البيتومينية الساخنة بدلالة نسب الزيوليت الطبيعي	109
المضافة	109
الشكل (4-28): تغير قيم صلابة الخلطات البيتومينية الساخنة بدلالة نسب الزيوليت الطبيعي	109
المضافة	109
الشكل (4-29): تغير نسب الفراغات الهوائية في الخلطات البيتومينية الساخنة بدلالة نسب الزيوليت	110
الطبيعي المضافة	110
الشكل (4-30): قيم كثافة الخلطات البيتومينية الساخنة وفق محتوى البيتومين بدلالة نسب الزيوليت	111
الطبيعي المضافة	111
الشكل (4-31): محتوى البيتومين المثالي في الخلطات البيتومينية الساخنة بدلالة نسب الزيوليت	111
الطبيعي المضافة	111
الشكل (4-32): تغير ثبات الخلطات البيتومينية الدافئة بدلالة نسب الزيوليت المضافة	113
الشكل (4-33): تغير قيم انسياب الخلطات البيتومينية الدافئة بدلالة نسب الزيوليت المضافة	114
الشكل (4-34): تغير قيم صلابة الخلطات الدافئة بدلالة نسب الزيوليت المضافة	115
الشكل (4-35): تغير نسب الفراغات الهوائية في الخلطات الدافئة بدلالة نسب الزيوليت المضافة	116
الشكل (4-36): قيم كثافة الخلطات البيتومينية الدافئة بدلالة نسب الزيوليت المضافة	117
الشكل (4-37): محتوى البيتومين المثالي في الخلطات البيتومينية المدروسة بدلالة نسب الزيوليت	117
الطبيعي المضافة	117
الشكل (4-38): العلاقة بين نسب الفراغات الهوائية و طاقة الرص	118
الشكل (4-39): عينات الخلطات البيتومينية المشروطة (الحالة الرطبة)	119
الشكل (4-40): اختبار الشد غير المباشر	120
الشكل (4-41): بعض قيم حمولات الكسر في اختبار مقاومة الشد غير المباشر	121
الشكل (4-42): مقاومة الشد غير المباشر للخلطات المدروسة	122

الشكل (4-43): معدل مقاومة الشد غير المباشر للخلطات المدروسة	122
الشكل (4-44): إضافة الماء إلى الحصويات (قبل إضافة الكلس المطفأ)	124
الشكل (4-45): مقاومة الشد غير المباشر في الحالة الجافة بدلالة محتوى الخلطات من الكلس المطفأ	125
الشكل (4-46): مقاومة الشد غير المباشر في الحالة الرطبة بدلالة محتوى الخلطات من الكلس المطفأ	125
الشكل (4-47): معدل مقاومة الشد غير المباشر للخلطات المعدلة بالكلس المطفأ	126
الشكل (A-1): منحنيات مارشال (الثبات، الكثافة، الانسياب، الفراغات الهوائية، الفراغات الحصوية، الفراغات المليئة بالبيتومين) للخلطات البيتومينية المصممة عند درجة حرارة إنتاج 135°C (بدون إضافات)	158
الشكل (A-2): منحنيات مارشال (الثبات، الكثافة، الانسياب، الفراغات الهوائية، الفراغات الحصوية، الفراغات المليئة بالبيتومين) للخلطات البيتومينية %0.6WMANZ عند درجة حرارة إنتاج 135°C	160
الشكل (A-3): منحنيات مارشال (الثبات، الكثافة، الانسياب، الفراغات الهوائية، الفراغات الحصوية، الفراغات المليئة بالبيتومين) للخلطات البيتومينية %0.9WMANZ عند درجة حرارة إنتاج 135°C	162
الشكل (A-4): منحنيات مارشال (الثبات، الكثافة، الانسياب، الفراغات الهوائية، الفراغات الحصوية، الفراغات المليئة بالبيتومين) للخلطات البيتومينية %1.2WMANZ عند درجة حرارة إنتاج 135°C	164

فهرس الجداول

الجدول (1-2): المواد الداخلة في إنتاج المستحلبات البيتومينية	12
الجدول (2-2): الطرق الشائعة لصيانة وإكساء الطرق	16
الجدول (3-2): تصنيف البيتومين الصلب	17
الجدول (4-2): تصنيف البيتومين المؤكسد	17
الجدول (5-2): تصنيف الرابط البيتوميني حسب درجة الغرز وفق المواصفات البريطانية العالمية BSI	20
الجدول (6-2): تصنيف الرابط البيتوميني حسب درجة الغرز وفق المواصفات البريطانية العالمية BSI	21
الجدول (7-2): تصنيف الرابط البيتوميني وفق للزوجة	22
الجدول (8-2): تصنيف البيتومين وفق نتائج التركيب المجموعي	23
الجدول (9-2): مقارنة بين المجلول البيتوميني كثيف التدرج DGM والمجلول الحجري SMA ..	26
الجدول (10-2): الإضافات العضوية المستخدمة في إنتاج المجلول البيتوميني الدافئ	31
الجدول (11-2): الإضافات الكيميائية المستخدمة في إنتاج الخلطات البيتومينية الدافئة	33
الجدول (1-3): إنتاج الدول من الزيوليت	55
الجدول (2-3): الصيغ الكيميائية لأشهر أنواع الزيوليت الطبيعي	61
الجدول (3-3): مراحل تصميم المجلول البيتوميني الدافئ باستخدام معادن الزيوليت	66
الجدول (4-3): درجات حرارة الخلط المستخدمة في دراسة (Alonso وآخرون)	71
الجدول (1-4): التجارب المخبرية المعتمدة في البحث	83
الجدول (2-4): الرموز المعتمدة في الدراسة التجريبية	84
الجدول (3-4): نتائج التحليل الكيميائي للزيوليت الطبيعي السوري	85
الجدول (4-4): الأطوار البلورية لعينات الزيوليت المدروسة	87
الجدول (5-4): ترددات قمم الامتصاص للزيوليت الطبيعي وفق اختبار FTIR	89

الجدول (4-6): نتائج اختبارات الرابط البيتوميني قبل وبعد التعب قصير الأمد	92
الجدول (4-7): نتائج تجارب غرز الرابط البيتوميني قبل وبعد التعب قصير الأمد	93
الجدول (4-8): قيم معدل الغرز لأنواع البيتومين المستخدمة قبل وبعد التعب قصير الأمد	94
الجدول (4-9): نتائج اختبارات درجة حرارة التميع قبل وبعد التعب قصير الأمد	95
الجدول (4-10): نتائج اختبارات الاستطالة قبل وبعد التعب قصير الأمد	97
الجدول (4-11): الخسارة في الكتلة لأنواع البيتومين المدروسة بعد التعب قصير الأمد	99
الجدول (4-12): نتائج اختبارات اللزوجة عند درجات حرارة °C (135, 120, 110)	99
الجدول (4-13): التركيب الحبي والحزمة النظامية للحصويات المستخدمة في تصميم الخلطة البيتومينية	101
الجدول (4-14): الخصائص الفيزيائية للمواد المدروسة	102
الجدول (4-15): الخصائص الفيزيائية لأنواع البيتومين المستخدمة قبل وبعد التعرض للتعب قصير الأمد	103
الجدول (4-16): حساب عناصر مارشال لتحديد نسبة البيتومين المثالية للخلطات المرجعية المصممة باستخدام بيتومين 60/70	104
الجدول (4-17): عناصر مارشال عند نسبة البيتومين المثالية 5.4%	106
الجدول (4-18): عناصر مارشال للخلطات البيتومينية الساخنة المعدلة وغير المعدلة بالزيوليت الطبيعي	107
الجدول (4-19): درجات حرارة خلط ودمك عينات المجبول البيتوميني	112
الجدول (4-20): عناصر مارشال للخلطات البيتومينية الساخنة والدافئة عند نسب البيتومين المثالية	113
الجدول (4-21): نتائج اختبار مقاومة الشد غير المباشر	121
الجدول (4-22): نتائج اختبار مقاومة الشد غير المباشر بدلالة محتوى الخلطات من الكلس المطفأ	124
الجدول (A-1): حساب عناصر مارشال لتحديد نسبة البيتومين المثالية للخلطات البيتومينية عند درجة حرارة إنتاج °C 135 (بدون إضافات)	157

الجدول (2-A): حساب عناصر مارشال لتحديد نسبة البيتومين المثالية للخلطات البيتومينية	159
WMANZ0.6% عند درجة حرارة إنتاج 135°C	
الجدول (3-A): حساب عناصر مارشال لتحديد نسبة البيتومين المثالية للخلطات البيتومينية	161
WMANZ0.9% عند درجة حرارة إنتاج 135°C	
الجدول (4-A): حساب عناصر مارشال لتحديد نسبة البيتومين المثالية للخلطات البيتومينية	163
WMANZ1.2% عند درجة حرارة إنتاج 135°C	
الجدول (5-A): تحديد الوزن النوعي للحصويات المارة من المنخل 3/4 والمحموزة على المنخل	165
N04	
الجدول (6-A): تحديد الوزن النوعي للحصويات المارة من المنخل N04 والمحموزة على المنخل	165
N0.200	
الجدول (7-A): تحديد الوزن النوعي للحصويات المارة من المنخل N0.200	165
الجدول (8-A): تحديد الوزن النوعي الفعال لمجمل الحصويات	166
الجدول (1-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية	168
الساخنة HMA	
الجدول (2-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية	169
HMA _{HL} 1.5%	
الجدول (3-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية	170
HMA _{HL} 2%	
الجدول (4-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية	171
HMA _{HL} 2.5%	
الجدول (5-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية	172
HMANZ0.6%	
الجدول (6-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية	173
الدافئة WMA	
الجدول (7-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية	174
WMANZ0.9%	

الجدول (8-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية	WMANZ0.9%+HL1.5%	175
الجدول (9-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية	WMANZ0.9%+HL2%	176
الجدول (10-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية	WMANZ0.9%+HL2.5%	177

الرموز المستخدمة في هذا البحث

الجمعية الأمريكية لاختبارات المواد	ASTM
الاتحاد الأمريكي لمسؤولي الطرق والنقل	AASHTO
المجبول البيتوميني الساخن	HMA
المجبول البيتوميني الدافئ	WMA
صور المسح الإلكتروني	SEM
المجبول البيتوميني ذي الهيكل الحجري	SMA
المجبول البيتوميني كثيف التدرج الحبي	DGM
المجبول البيتوميني مفتوح التدرج الحبي	OGFC
أنجستروم (10^{-10}m)	Å
وحدات البناء الرئيسية	BBUs
وحدات البناء الثانوية	SBU _s
فلورة الأشعة السينية	XRF
حيود الأشعة السينية	XRD
التحليل الوزني الحراري	TGA
الأشعة تحت الحمراء	FTIR
بيتومين 50/70 إنتاج مصفاة بانياس	A
البيتومين 50/70 إنتاج مصفاة بانياس والمعدل بالزيوليت الطبيعي بنسبة 3% من وزن الرابط البيتوميني	A _{NZ3%}
البيتومين 50/70 إنتاج مصفاة بانياس والمعدل بالزيوليت الطبيعي بنسبة 4% من وزن الرابط البيتوميني	A _{NZ4%}
البيتومين 50/70 إنتاج مصفاة بانياس والمعدل بالزيوليت الطبيعي بنسبة 5% من وزن الرابط البيتوميني	A _{NZ5%}
البيتومين 50/70 إنتاج مصفاة بانياس والمعدل بالزيوليت الطبيعي بنسبة 6% من وزن الرابط البيتوميني	A _{NZ6%}
عينات المجبول البيتوميني الساخن	HMA

عينات المجبول البيتوميني الساخن المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.3% من الوزن الكلي للحصويات	HMA _{NZ0.3%}
عينات المجبول البيتوميني الساخن المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.6% من الوزن الكلي للحصويات	HMA _{NZ0.6%}
عينات المجبول البيتوميني الساخن المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.9% من الوزن الكلي للحصويات	HMA _{NZ0.9%}
عينات المجبول البيتوميني الدافئ (حالة تخفيض درجة حرارة الإنتاج من دون استخدام أية إضافة)	WMA
عينات المجبول البيتوميني الدافئ المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.6% من الوزن الكلي للحصويات	WMA _{NZ0.6%}
عينات المجبول البيتوميني الدافئ المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.9% من الوزن الكلي للحصويات	WMA _{NZ0.9%}
عينات المجبول البيتوميني الدافئ المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 1.2% من الوزن الكلي للحصويات	WMA _{NZ1.2%}
عينات المجبول البيتوميني الساخن المعدلة بالكلس المطفأ بنسبة 1.5% من الوزن الكلي للحصويات	HMA _{HL1.5%}
عينات المجبول البيتوميني الساخن المعدلة بالكلس المطفأ بنسبة 2% من الوزن الكلي للحصويات	HMA _{HL2%}
عينات المجبول البيتوميني الساخن المعدلة بالكلس المطفأ بنسبة 2.5% من الوزن الكلي للحصويات	HMA _{HL2.5%}
عينات المجبول البيتوميني الدافئ المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.9% وبالكلس المطفأ بنسبة 1.5%	WMA _{NZ0.9%+HL1.5%}
عينات المجبول البيتوميني الدافئ المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.9% وبالكلس المطفأ بنسبة 2%	WMA _{NZ0.9%+HL2%}
عينات المجبول البيتوميني الدافئ المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.9% وبالكلس المطفأ بنسبة 2.5%	WMA _{NZ0.9%+HL2.5%}

الفصل الأول

المنهجية العامة للبحث

مقدمة Introduction

مجال البحث وأهدافه Scopes and Objectives

إشكالية البحث Research Problem

الجديد في البحث

منهجية البحث Research methodology

1.1. مقدمة Introduction:

تتمتع شبكات الطرق بأهمية حاسمة في تطور حياة الأمم والشعوب، وذلك من خلال الدور الأساسي الذي تلعبه في تلبية حاجات المجتمع اليومية لجهة نقل الأفراد والبضائع في أي وقت كان ولأهداف مختلفة. وتعتبر المواصلات الطرقية شريان الحياة في الجمهورية العربية السورية، ووسيلة النقل الأكثر استخداماً. وبناءً عليه يجب إيلاء أهمية كبرى لجودة الطرق وطبقات رصفها، لأن أي ضرر أو أذى يلحق بها يؤدي إلى ضعف خواصها الاستثمارية، وبالتالي تخفيض مستوى الخدمة بالنقل.

يعتبر الرصف البيتوميني النوع الأكثر انتشاراً في إنشاء الطرق، ويستخدم بشكل واسع في كافة مناطق العالم، وذلك بسبب سهولة وسرعة إنشائه وصيانته [1]. ويستخدم المجلول البيتوميني في رصف الطبقات السطحية العليا المعرضة للحمولات المرورية والتغيرات المناخية. وتعتبر هذه الطبقات جزءاً هاماً من أجزاء الطريق، كونها تتطلب جزءاً كبيراً من الموارد الاقتصادية، ولها تأثير كبير على سلامة مستخدميها [2]، لكن تعرض هذه الطبقات للعجز مع مرور الزمن، دفع الباحثين إلى تركيز دراساتهم على مكونات المجلول البيتوميني وخواصه وإمكانية تعديله باستخدام البولييميرات (المرنة أو اللدنة) أو الألياف الصناعية (الألياف الزجاجية، البوليسترين...)، وغيرها من الإضافات المختلفة لتحسين خواص المنتج النهائي [3].

تترافق عملية إنتاج المجلول البيتوميني الساخن عند درجات حرارة مرتفعة $^{\circ}\text{C}$ (150-180) بانبعاث كميات كبيرة من الغازات والدخان والروائح خلال مرحلة الخلط والنقل والتنفيذ [4]. وبسبب هذه العيوب، ومع ازدياد الحاجة لإنشاء شبكات طرق جديدة، فقد ازداد مؤخراً التركيز على النواحي البيئية خلال مرحلة إنتاج المجلول البيتوميني، واقتُرحت الأبحاث الحديثة تقليل انبعاث الغازات المرافق لعملية إنتاجه، وتقليل استهلاك الطاقة والوقود اللزمين لذلك، مع تحسين قابلية تشغيله ومقاومته وديمومته، عن طريق الحد من درجات الحرارة اللازمة لخلطه ودحيه [5,6,7]، وصولاً إلى إنتاج المجلول البيتوميني الدافئ عند درجات حرارة $^{\circ}\text{C}$ (100-140)، أو المجلول نصف الدافئ عند درجات حرارة أقل من $^{\circ}\text{C}$ 100. وهذا يؤدي بالتالي إلى استهلاك أقل للطاقة وأمان أكبر وانبعاثات أقل للغازات، وإلى تقادم أبطأ للرابط البيتوميني [8,9]. ونظراً للأهمية تقتضي الضرورة البحث عن حلول جديدة، ومواكبة لأحدث الإجراءات التكنولوجية العالمية، والاتجاه نحو استخدام المجلول البيتوميني الدافئ، مع المحافظة على مستوى الأداء المطلوب للرصف.

يعود أصل المجلول البيتوميني الدافئ إلى استخدام البيتومين الرغوي، وقد كانت أول محاولة في هذا المجال في الولايات المتحدة الأمريكية عام 1956. وتعتمد فكرة البيتومين الرغوي على ادخال الماء إلى بنية الرابط ميكانيكياً أو تحت الضغط أو بإضافة معادن الزيوليت الصناعي، حيث يتحول الماء إلى بخار، ويزداد حجم الرابط مؤقتاً، وتنخفض لزوجته، وبالتالي تتحسن قابلية تغطية وتغليف الحصويات بالرابط وتتحسن قابلية التشغيل [10]. وكان العام 2006 هو بداية إنتاج المجلول البيتوميني الدافئ واستخدامه في رصف الطرق في الولايات المتحدة الأمريكية، حيث بلغت كمية إنتاجه 5% من إجمالي المجلول

البيتوميني المنتج في العام 2009، ثم شهد نمواً متسارعاً لتبلغ كمية الإنتاج 30% في العام 2013 و39% في العام 2017 [11,12].

يناقش هذا البحث تأثير الزيوليت الطبيعي السوري في خواص الرابط والمجبول البيتومينيين، ويهدف لتحسين خواصهما، والبحث في إمكانية إنتاج المجبول البيتوميني الدافئ باستخدامه كمعدل، مع المحافظة على ديمومة جيدة.

2.1. إشكالية البحث Research Problem:

ازداد مؤخراً الاتجاه نحو استخدام المجبول البيتوميني الدافئ في رصف الطرق بسبب مزاياها الاقتصادية والبيئية والصحية المتعددة. ويوجد حالياً أكثر من 22 تقنية لإنتاج المجبول الدافئ (البيتومين منخفض الطاقة، الإضافات الكيميائية والعضوية، التقنيات الرغوية باختلاف أنواعها... الخ) [13]. ويعتبر العائق الرئيسي لإنتاج المجبول البيتوميني الدافئ في سوريا هو عدم توفر الإضافات المطلوبة لتصنيعه وصعوبة استيرادها من الخارج، بالإضافة لسعرها المرتفع، في حال تم استيرادها، بالمقارنة مع الزيوليت الطبيعي. وبناءً عليه يعتبر البحث في إمكانية استخدام الزيوليت الطبيعي السوري كمادة رخيصة ومتوفرة في إنتاج أنواع جديدة من المجبول البيتوميني موضوعاً بحثياً جديراً بالاهتمام، مع ضرورة التركيز على إيجاد حل لمشكلة انخفاض مقاومة المجبول الدافئ ضد خطر الرطوبة.

3.1. مجال البحث وأهدافه Scopes and Objectives:

يقع هذا البحث في مجال هندسة المواصلات والنقل، ويتخصص في تحسين وتطوير خواص المجبول البيتوميني.

ويهدف هذا البحث إلى:

1. دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي المحلي في خواص الرابط البيتوميني.
2. تحسين الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمجبول البيتوميني الساخن.
3. تخفيض درجات حرارة خلط ودمك المجبول البيتوميني باستخدام مواد محلية قليلة التكلفة.
4. معالجة مشكلة حساسية المجبول البيتوميني الدافئ ضد خطر الرطوبة، الناتجة عن انخفاض الطاقة الحرارية أثناء الإنتاج، باستخدام الكلس المطفأ كمانع انسلاخ.

4.1. أهمية البحث:

تكمن أهمية هذا البحث بالآتي:

- **هندسياً:** باستخدام الزيوليت الطبيعي كمادة متوفرة ورخيصة التكلفة في تحسين خواص المجبول البيتوميني، وإنتاج أنواع جديدة منه محلياً.

- **اقتصادياً:** بتقليل استهلاك الطاقة اللازمة لإنتاج المجلول الساخن، دون الحاجة لاستيراد إضافات باهظة الثمن.
- **بيئياً:** عن طريق الحد من انبعاث الغازات والدخان والروائح الصادرة من المجلول البيتومينية.
- **صحيحاً:** من خلال المحافظة على صحة العمال، وتحسين ظروف العمل في المجلول ومواقع الرصف.

5.1. الجديد في البحث:

يتلخص الجديد في البحث بالآتي:

1. يعتبر البحث الأول في الوطن العربي حول استثمار معادن الزيوليت الطبيعي في إنتاج المجلول البيتوميني.
2. يمثل دراسة مبتكرة محلياً وعالمياً حول استثمار الفلپسايت في تحسين خواص المجلول البيتوميني وإنتاج الدافئ منه.

6.1. منهجية البحث Research methodology:

تم العمل في هذا البحث وفق المنهجية التالية:

(1) دراسة نظرية مرجعية تضمنت أهم الدراسات المرجعية والتقارير المخبرية المتعلقة بتكنولوجيا إنتاج المجلول البيتوميني وخواصه الفيزيائية والميكانيكية، مع بناء قاعدة معلومات تخص مادة الزيوليت وأنواعها وخواصها وتطبيقاتها المختلفة.

(2) دراسة تجريبية تم اعدادها وفق أربعة مسارات:

➤ **المسار الأول:** توصيف الزيوليت الطبيعي السوري حرارياً وكيميائياً وطيفياً، وذلك باستخدام أحدث الطرق والتقنيات المعاصرة.

➤ **المسار الثاني:** دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي السوري في الخواص الفيزيائية والريولوجية للرابط البيتوميني.

➤ **المسار الثالث:** تحسين الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمجلول البيتوميني الساخن باستخدام الزيوليت الطبيعي السوري، والتحقق من إمكانية استخدام الزيوليت المحلي في إنتاج المجلول الدافئ.

➤ **المسار الرابع:** تقييم وتحسين حساسية المجلول البيتوميني ضد خطر الرطوبة وفق المواصفة AASHTO T283.

7.1. البنية الهيكلية للأطروحة:

نُظِّمَت هذه الأطروحة وفق أربعة فصول يتناول كل منها مفاهيم مختلفة ومتكاملة، بالإضافة إلى الاستنتاجات والتوصيات ونورد فيما يأتي ملخص عن كل فصل.

■ الفصل الأول: المنهجية العامة للبحث

■ الفصل الثاني: الروابط البيتومينية والمجبول البيتوميني

تم في هذا الفصل تقديم شرح مفصل للروابط البيتومينية ومصادرها وأنواعها وتركيبها الكيميائي وطرق تصنيفها، بالإضافة إلى التوسع في الدراسات النظرية حول تكنولوجيا المجبول البيتوميني وطرق إنتاجه وأنواعه، مع التركيز في عرض تكنولوجيا إنتاج المجبول الدافئ ومزاياها وعيوبها وأهم الإضافات والتقنيات المستخدمة لإنتاجه.

■ الفصل الثالث: الزيوليت (أنواعه، خواصه، تطبيقاته)

يعرض هذا الفصل مقدمة عن الزيوليت وأنواعه وتركيبه البلوري والكيميائي وأهم تطبيقاته الهندسية، ويناقش أحدث الأبحاث المتعلقة باستخدام الزيوليت في إنتاج المجبول البيتوميني الدافئ.

■ الفصل الرابع: الدراسة العملية التجريبية ومناقشة النتائج

يعرض المواد المستخدمة في هذا البحث، مع تحديد البرنامج المخبري المطلوب لدراسة تأثير الزيوليت الطبيعي في خواص الرابط والمجبول البيتوميني لتحقيق أهداف هذا البحث. وتضمنت الدراسة التجريبية توصيف عينات الزيوليت الطبيعي المدروسة، وعرض نتائج الاختبارات الفيزيائية والريولوجية للرابط البيتوميني المعدل وغير المعدل بالزيوليت الطبيعي، بالإضافة لتقديم عرض مفصل لنتائج اختبارات مارشال للخلطات البيتومينية الساخنة والدافئة المعدلة وغير المعدلة بالزيوليت الطبيعي المحلي، ودراسة مفصلة لنتائج اختبارات مقاومة الشد غير المباشر لعينات المجبول البيتوميني المدروسة، وتقييم حساسية الخلطات المصممة ضد خطر الرطوبة، بالإضافة إلى عرض الاستنتاجات التي تم التوصل إليها في هذا البحث والاقتراحات والتوصيات الواجب أخذها بعين الاعتبار خلال الدراسات اللاحقة.

الفصل الثاني

الروابط البيتومينية والمجبول البيتوميني

Bituminous binders and Bituminous concrete

البيتومين (مكوناته، مصادره استخدامه، تصنيفه)

أنواع الروابط البيتومينية

تكنولوجيا المجبول البيتوميني

المجبول الدافئ (مزاياه، عيوبه)

إضافات المجبول الدافئ (العضوية، الكيميائية، الرغوية)

1.2. مقدمة عامة:

يُعرف البيتومين، وفقاً لقاموس أوكسفورد الإنكليزي Oxford English Dictionary، بأنه خليط من الهيدروكربونات المشتقة من النفط بشكل طبيعي أو باستخدام التقطير، ويستخدم لرصف الطرق أو لطلاء السقوف [14]. ويُعتقد بأن مصطلح البيتومين يعود في الأصل إلى اللغة القديمة المقدسة للهندوس في الهند (السنسكريتية). وهو مشتق من الكلمة "jatu (pitch)" التي تعني البيتومين الطبيعي، والكلمة "jatu-krit (pitch producing)" التي تعني إنتاج البيتومين. وتشير هذه المصطلحات إلى البيتومين المنتج من الأشجار الراتجية والصنوبرية التي تفرز المواد الهيدروكربونية، إلا أن متطلبات اللغة اللاتينية استدعت تغيير الكلمة الأصلية لتصبح "gwitu-men"، ولاحقاً تم تعديلها لتصبح "pixtu-men"، ليتم اختصارها أخيراً إلى كلمة bitumen، قبل أن يتم نقلها من اللغة الفرنسية إلى الإنكليزية [14].

هناك العديد من الإشارات للبيتومين في الكتاب المقدس "الإنجيل"، كطلاء نوح (عليه السلام) لخشب سفينه بالبيتومين، وطلاء الصندوق المصنوع من ورق البردي الذي وضع فيه موسى (عليه السلام) بالبيتومين، بالإضافة إلى أوصاف برج بابل المصنوع من الطوب كحجارة ومن البيتومين كملاط، وفقاً لما ذكر في الكتاب المقدس الإنكليزي الجديد. واستمر استخدام البيتومين الطبيعي لأغراض مختلفة في المناطق المأهولة بالسكان التي يتوفر فيها بشكل رواسب ويسهل استخدامه. ومع ذلك، لم يكن هناك استخدامات رئيسية للبيتومين في العديد من البلدان حتى نهاية القرن التاسع عشر، حيث بدأت تنتشر المعرفة بتواجد كميات كبيرة من البيتومين الطبيعي بشكل بحيرات كبحيرة ترينداد. وبدأ العمل على استثمار البيتومين الصخري الأوروبي في رصف الطرق في منتصف القرن التاسع عشر، واستمر التطور البطيء لاستثمار هذا المنتج الطبيعي، تبعه فيما بعد ظهور قطران الفحم، وفي مرحلة لاحقة ظهور البيتومين كناتج لتكرير النفط الخام في المصافي [14].

2.2. التعريف الهندسي للبيتومين:

يُعرف البيتومين، كما ورد في المواصفات الأوروبية للعام 2015، بأنه مادة هيدروكربونية تنتج عن عملية تكرير النفط الخام واستخراج المركبات الأخف وزناً منه (الغاز، البنزين، الديزل). ويسمى في أمريكا الشمالية بالإسفلت. ويعتبر تعريف معهد الإسفلت هو الأشمل، حيث ورد تعريف البيتومين بأنه مادة هندسية يتم إنتاجها لتحقيق مجموعة متنوعة من المواصفات وفقاً لخواصه الفيزيائية [14,15]. ويطلق عليه أحياناً "straight run"، ويستخدم مباشرة لرصف الطرق وفقاً للمواصفة CAS# [16] 4-42-8052. كما يمكن معالجته عن طريق الحقن بالهواء عند درجات حرارة مرتفعة، لتعديل خواصه الفيزيائية وإنتاج البيتومين المؤكسد، بهدف استخدامه في تطبيقات تجارية مختلفة وفقاً للمواصفة CAS# 4-93-64742. هذا وتدرج معظم أنواع البيتومين ضمن النوعين السابقين [16].

يتم إنتاج الرابط البيتوميني وفق درجات غرز مختلفة، إما في المصفاة مباشرة، أو من خلال مزجه مع رابط آخر أو مركبات أخرى. وهنا ينبغي التمييز بين البيتومين إنتاج المصافي من جهة، وبين المنتجات المشتقة من الفحم كالقطران من جهة أخرى، والتي يتم إنتاجها باستخدام التحلل الحراري (Pyrolysis)

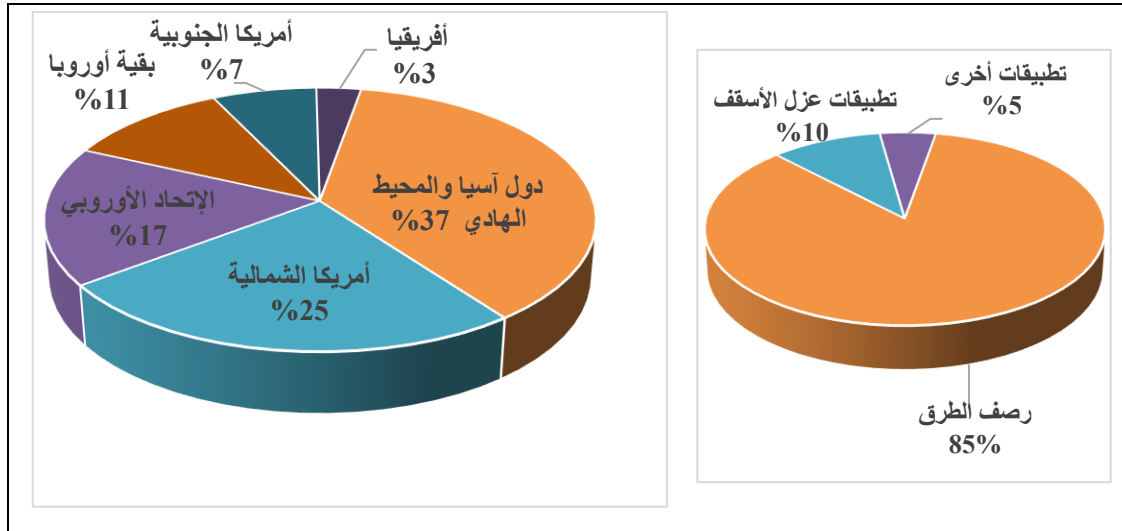
عند درجات حرارة مرتفعة (800°C) للفحم البيتوميني bituminous coal. ويختلف بشكل كبير عن البيتومين من ناحية الخواص الفيزيائية [14]. كما ينبغي التمييز بينهما وبين البيتومين البترولي Petroleum pitches وفقاً للمواصفة CAS# 68187-58-6، والذي غالباً ما يتكون من مركبات جانبية عطرية أروماتية aromatic residues يتم إنتاجها بالتحلل الحراري، أو الأكسدة لمركبات بترولية محددة (زيت الغاز الثقيل)، وتختلف مكوناته تماماً عن البيتومين، حيث يتشكل خلال مرحلة تكسير زيت الغاز الثقيل مركب ثانوي يسمى زيت ديكانت Decant oil، والذي غالباً ما يستخدم كمادة مزج لوقود السفن. ونتيجة ارتفاع خاصيته الأروماتية يمكن أن يتحلل حرارياً لبيتومين بترولي ذي نسبة إسفلتين مرتفعة [17,18,19]. بالإضافة إلى ذلك، يجب التمييز بين البيتومين ناتج تكرير البترول والإسفلت الطبيعي المتواجد بشكل بحيرات أو بشكل صخور إسفلتية، والذي يحتوي على نسبة عالية من المواد المعدنية والمواد الخفيفة (حتى 37%)، الأمر الذي يفسر خسارته الكبيرة لكتلته خلال مرحلة تسخينه [14].

3.2. استخدامات البيتومين:

يستخدم معظم البيتومين المنتج في رصف الطرق وإنتاج المجبول البيتوميني. وتسمح خواصه العازلة للماء وسلوكه الحراري باستخدامه في مجموعة واسعة من التطبيقات التجارية. ويسمح تصرفه كسائل لزج، عند درجات حرارة تتراوح بين $100-200^{\circ}\text{C}$ ، بخلطه مع مكونات ومركبات أخرى لإنتاجها بالشكل المطلوب، بالإضافة إلى أنه يتصرف عندما يبرد كمادة صلبة تسمح بعزل المياه [14].

تُستخدم مصطلحات مختلفة لوصف البيتومين التقليدي المنتج في مصفاة تقليدية بطريقة بسيطة (straight run, paving grade, penetration grade)، ومعظم البيتومين المستخدم في رصف الطرق هو بيتومين تقليدي، وهذا ما يفسر تسميته أو تصنيفه أحياناً وفقاً لدرجة الرصف paving grade، في حين يتم تصنيفه وفقاً لدرجة الغرز في أوروبا وبعض بلدان آسيا. أما مصطلح straight run، فيعكس حقيقة أن البيتومين المنتج في المصافي، غالباً ما يتم باستخدام تقنية التقطير بالتفريغ دون أي تعديل (إفراغ الهواء الموجود فوق النفط إلى ضغط يقل عن ضغط البخار، مما يسمح بتبخر معظم المواد الطيارة ذات درجات الغليان المنخفضة) [14].

بلغت كمية البيتومين العالمية المنتجة سنوياً خلال العام 2015 حوالي 87 مليون طن [3]، وارتفعت خلال العام 2018 لتصبح 122 مليون طن [20] كما هو موضح في الشكل (1-2)، ويستخدم حوالي 85% من هذه الكمية كإرباطٍ لرصف الطرق والمطارات ومواقف السيارات، ويستخدم حوالي 10% منها لتطبيقات عزل الأسقف البيتونية والخشبية ضد تأثير الرطوبة (البيتومين، الرقائق البيتومينية، اللفائف البيتومينية)، في حين يستخدم الباقي لتطبيقات مختلفة: كطلاء الأنابيب وعزل مواد البناء ومنع تسرب المياه، وصناعة الدهانات... الخ [21,22].



الشكل (1-2): الاستخدام العالمي للبيتومين

4.2. مصادر البيتومين:

يختلف مصطلح الإسفلت والبيتومين بين أوروبا وأمريكا الشمالية، حيث يشير مصطلح الإسفلت في أوروبا إلى خليط الرابط البيتوميني والحصويات أو المجلول البيتوميني وطبقة التغطية السطحية، في حين يشير مصطلح الإسفلت في أمريكا الشمالية إلى الرابط البيتوميني. ونوضح فيما يلي المصادر المختلفة للبيتومين والتي تساعد في فهم استخداماته المختلفة.

4.2.1. بحيرات الإسفلت Lake asphalt:

وهي الشكل الأكثر انتشاراً للإسفلت الطبيعي، حيث يتواجد الإسفلت بأشكال متنوعة من البحيرات الإسفلتية الطبيعية على سطح الأرض وبشكل رواسب سطحية، وشبه سطحية، وتعتبر بحيرة ترينيداد الأكثر شهرة. ويعتقد بأن هذه الرواسب البيتومينية اكتشفت عام 1595 من قبل Walter Raleigh، إلا أنه بات معروفاً في عصرنا الراهن، بأن البرتغاليين والإسبان قد اكتشفوها قبل هذا التاريخ [14].

يوجد العديد من رواسب الإسفلت في جزيرة ترينيداد، لكن البحيرة تقع في الجزء الجنوبي منها، وتعتبر واحدة من أكبر احتياطات الإسفلت الطبيعي في العالم بمساحة تبلغ 35 هكتار وبعمق 90m وباحتياطي أكبر من 10 مليون طن من الإسفلت الطبيعي. ويتم تكرير المواد المستخرجة من البحيرة عن طريق تسخينها لدرجة حرارة 160°C، وتبخير الماء منها، ومن ثم فلترتها وتنقيتها من المواد الخسنة والرواسب النباتية. ويطلق على هذه المواد مصطلح "Epure" أو refined TLA (Trinidad lake asphalt)، وتتكون هذه المواد من 54% من الرابط و36% من المواد المعدنية و10% من المواد العضوية [14].

يصعب استخدام مواد Epure في رصف الطرق، لكن يمكن استخدامها كبديل جزئي عن الرابط البيتوميني بنسبة (20-30%) في المجلول البيتوميني، كما يمكن استخدامها في خلطات "asphalt mastic" في بعض التطبيقات التجارية كعزل الأسطح بنسبة استبدال حتى 70% [14].

4.2.2. الإسفلت الصخري Rock asphalt:

يتواجد الإسفلت الطبيعي أحياناً على شكل طبقات من الصخور المشبعة بالإسفلت. وقد استخدم الإسفلت الصخري منذ أوائل القرن السابع عشر في أوروبا لأجل العزل المائي وحماية السفن والخشب من التعفن، واستخدم في رصف الطرق في القرن التاسع عشر، أما في عصرنا الراهن فيستخدم في تطبيقات قليلة تشمل العزل المائي [14,23].

تتواجد الصخور الإسفلتية في سوريا في موقعين أساسيين هما كفرية وجبل البشري، وهي عبارة عن صخور كلسية مشبعة بالإسفلت، ويبلغ تركيز الإسفلت في هذه الصخور حوالي 11%، وتعتبر من أجود أنواع الإسفلت الصخري في العالم [24].

4.2.3. الجلسونايت Gilsonite:

وهو شكل من أشكال الإسفلت الطبيعي الذي يتواجد على شكل راتنجات كربونية صلبة ذات درجة ذوبان عالية. ويحتوي على نسبة اسفلتينات مرتفعة، ويطلق عليه أحياناً تسميات مختلفة ومتعددة (asphaltite, uintaite, asphaltum)، ويتواجد بكثرة في ولاية يوتا Utah الأمريكية، حيث تم اكتشافه في ستينات القرن الماضي، واستخدم عام 1880 كعازل للخشب. تتمتع المادة بصلابة عالية، ويتم خلطها أحياناً مع البيتومين ناتج تكرير المصافي قبل إنتاج المجبول البيتوميني، ويمكن استخدامها لعزل الجسور والأسطح [25-28].

4.2.4. القطران Tar:

وهو سائل لزج بني اللون، يتم الحصول عليه من تحليل وتقطير المواد الطبيعية العضوية كالخشب والفحم الحجري، ويتكون بشكل رئيسي من المادة الزيتية، ويظهر مقاومة أقل من بيتومين المصافي للعوامل الجوية، وحساسية أعلى تجاه درجات الحرارة. ويعتبر قطران الفحم الحجري الأكثر والأوسع انتشاراً [14,29].

4.2.5. البيتومين المكرر Refined bitumen:

يتم تصنيع البيتومين خلال مرحلة تكرير النفط الخام، ويعود أصل النفط إلى الكائنات البحرية الدقيقة والمواد النباتية المختلطة بالطين، التي تراكمت مع بعضها البعض مشكلة طبقات من الصخور الرسوبية بسماكات تصل لمئات الأمتار على مدى ملايين السنين، ثم تحولت هذه المواد إلى هيدروكربونات النفط الخام نتيجة تعرض الطبقات السفلى من هذه الصخور لضغوط هائلة من الطبقات العليا، ولتأثير الحرارة القادمة من باطن الأرض، بالإضافة لنشاط البكتيريا اللاهوائية والنشاط الإشعاعي لصخور القشرة الأرضية، وتسرب النفط للأعلى من خلال مسامات الصخور بسبب الضغط الحاصل وصولاً لسطح الأرض. لكن غالبية النفط والغاز في الصخور المسامية كان محاطاً بالطبقات الكثيفة التي يسهل اختراقها، مشكلة ما يسمى اصطلاحاً بخزانات النفط والغاز، والتي تبقى على حالها حتى يتم الكشف عنها بواسطة

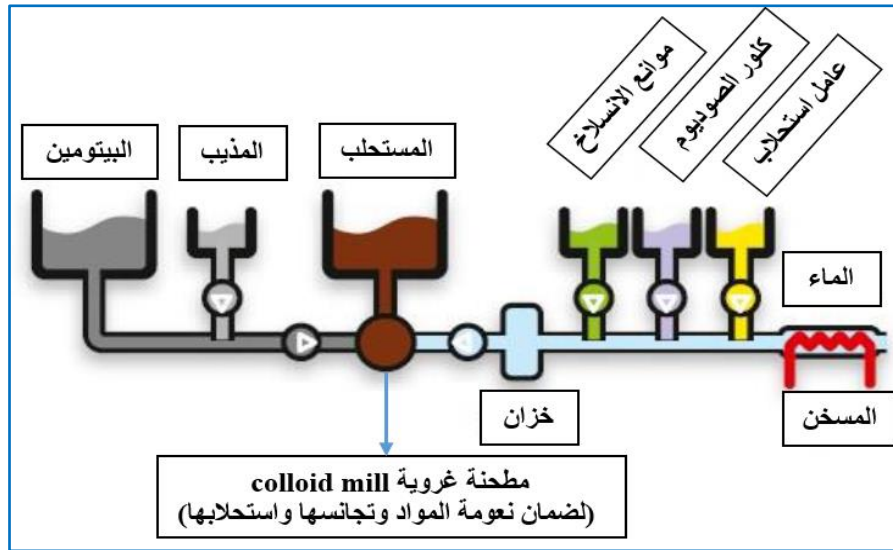
المسح الزلزالي الجيوفيزيائي، باستخدام الطرق السيزمية seismic surveys، ومن ثم استخراجها عن طريق الحفر [14].

يتركز إنتاج النفط عالمياً في أربعة مناطق رئيسية وهي: الولايات المتحدة الأمريكية ومنطقة الشرق الأوسط وروسيا ودول البحر الكاريبي، وتختلف جودة النفط المستخرج من هذه المناطق وفقاً للخواص الفيزيائية والكيميائية، ووفقاً لذلك يوجد أكثر من 1500 نوع من أنواع النفط الخام المنتج في جميع أنحاء العالم، إلا أن عدداً قليلاً يكون ملائماً لتصنيع البيتومين وفقاً لجودة المنتج النهائي [14].

5.2. أنواع الروابط البيتومينية:

1.5.2. المستحلبات البيتومينية Bitumen emulsions:

هي منتجات تكون فيها حبيبات البيتومين مبعثرة في وسط مائي، ومضاف لها عامل استحلاب للمساعدة على ثبات المزيج. وتسمح المستحلبات البيتومينية بالتعامل مع البيتومين عند درجات حرارة منخفضة. وتعتبر صديقة للبيئة، وتستخدم في تطبيقات صيانة طبقات تغطية الطرق وإكسائها، وفي إنتاج المجبول البارد. ويوضح الشكل (2-2) والجدول (1-2) طريقة إنتاج المستحلبات البيتومينية والمواد الداخلة في إنتاجها [14,30, 31].



الشكل (2-2): طريقة إنتاج المستحلبات البيتومينية

الجدول (1-2): المواد الداخلة في إنتاج المستحلبات البيتومينية

المكونات	الوظيفة
بيتومين	<ul style="list-style-type: none"> ❖ تقليدي ذي غرز 180/200. ❖ 15/25 لأجل الطبقات الرابطة tack coats. ❖ 50/100: عند استخدام نظام slurry seal لصيانة الطرق ومنع تسرب المياه (حصويات صغيرة + مستحلبات بيتومينية). ❖ بيتومين معدل بالبوليميرات.
مذيب	<ul style="list-style-type: none"> ❖ تحسين الاستحلاب. ❖ تحسين المعالجة بالمستحلبات البيتومينية عند درجات الحرارة المنخفضة. ❖ لضمان اللزوجة المناسبة للرابط بعد المعالجة. ❖ يمكن أن يستخدم لإنتاج مستحلبات أولية وتقليل محتوى البيتومين.
الماء	لأجل إنتاج المستحلب شرط أن تكون خالية من الشوائب والأوساخ.
موانع الانسلاخ	لتعزيز مقاومة الخلطات الباردة ضد الماء وتحسين التصاق الحصويات بالرابط.
كلور الصوديوم و كلور الكالسيوم	<ul style="list-style-type: none"> ❖ كمية صغيرة من الملح لضمان انتفاخ البيتومين ضمن المستحلب وسحب جزيئات الماء من البيتومين، وهذا ما يؤدي لزيادة لزوجة المستحلب. ❖ يضاف كلور الصوديوم أو الكالسيوم للمستحلبات الأنأيونية بنسبة % (0.1-0.2) لسحب الماء من البيتومين وتقليل تغيرات اللزوجة.

يمكن تصنيف المستحلبات البيتومينية إلى أربعة أنواع [14,30]:

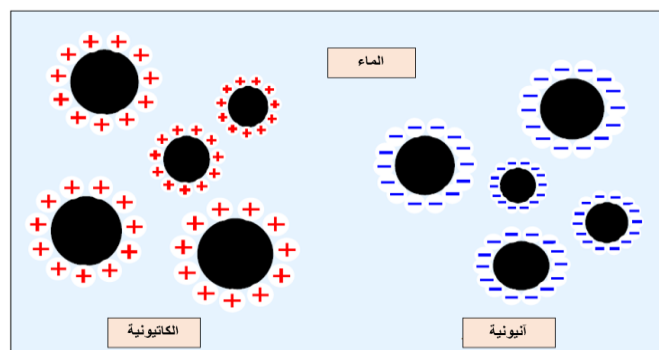
❑ **مُستحلبات كاتيونية Cationic Emulsions**: ويحمل عامل الاستحلاب فيها الشحنة الموجبة، وتستخدم مع الحصويات الحامضية سالبة الشحنة مثل الحصويات السيليسية والغرانيت.

❑ **مُستحلبات أنيونية Anionic Emulsions**: ويحمل عامل الاستحلاب فيها الشحنة السالبة، وتستخدم مع الحصويات القاعدية موجبة الشحنة كالحصويات الكلسية، ويوضح الشكل (2-3) المستحلبات البيتومينية الكاتيونية والأنأيونية الشائعة الاستخدام في الطرق [31].

❑ **مُستحلبات غير أيونية Non-Ionic Emulsions**: ويكون عامل الاستحلاب فيها متعادل الشحنة، وتستخدم مع جميع أنواع الحصويات.

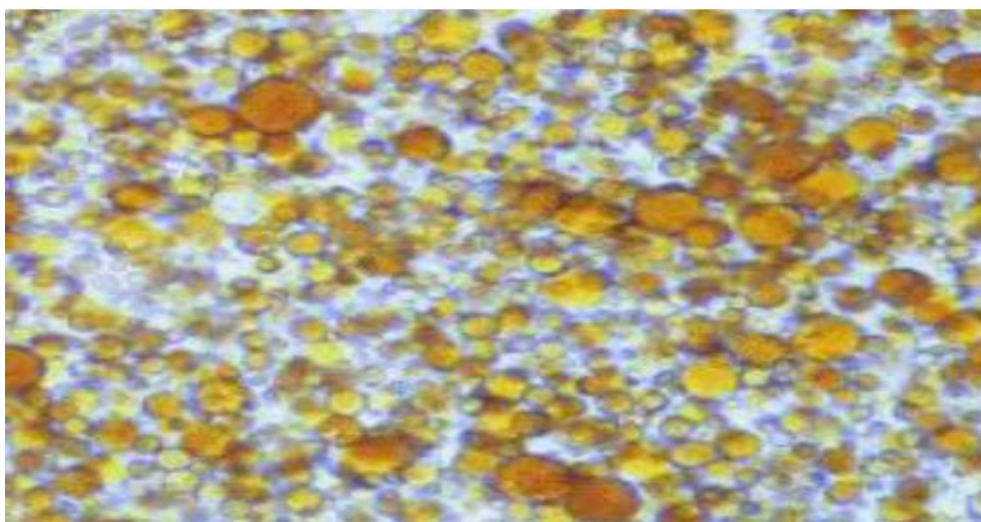
❑ **مُستحلبات غضارية Clay-Stabilized Emulsions**: ويكون عامل الاستحلاب فيها على شكل بودرة ناعمة ذات حجم أصغر بكثير من حجم جزيئات البيتومين، وتكون طبيعية أو ناتجة عن معالجة

الغضار والبنتنوايت مع بعضهما البعض، وتستخدم هذه المستحلبات في التطبيقات الصناعية أكثر من استخدامها في تطبيقات الطرق.

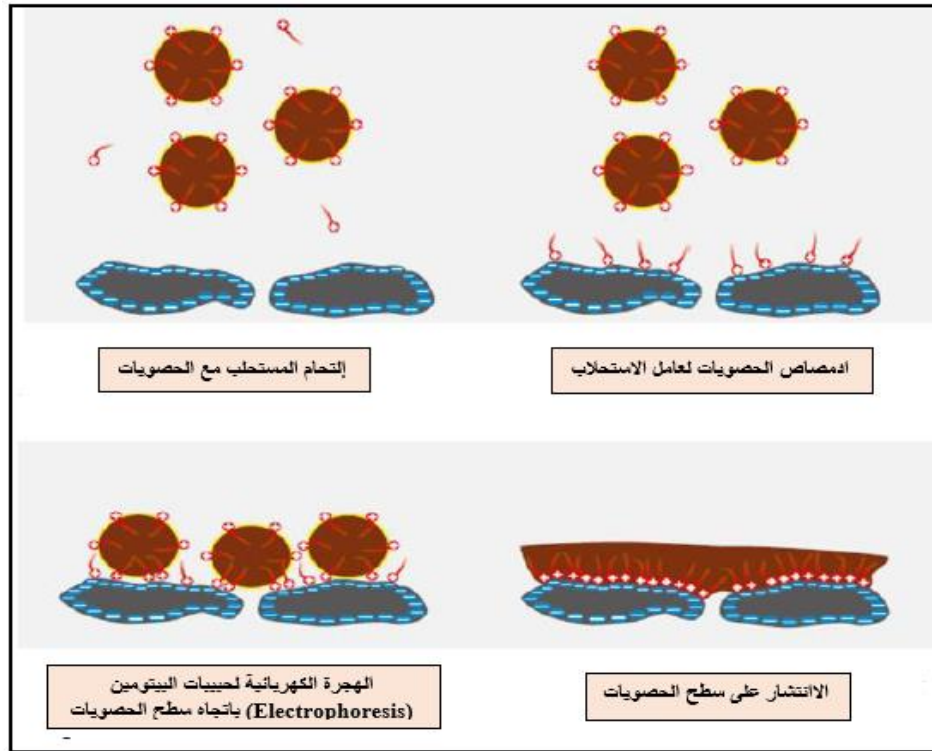


الشكل (2-3): المستحلبات البيتومينية الكاتيونية والأيونية الشائعة الاستخدام في الطرق

تتمثل وظيفة عامل الاستحلاب في المستحلبات البيتومينية في منع التلاحم كريات البيتومين مع الماء، وتخفيض الشد السطحي بينهما، ويجب أن يكون عامل الاستحلاب قابلاً للذوبان في الماء وله خواص تسمح بإحداث التوازن الصحيح بين المواد المحبة للماء hydrophilic، وبين المواد الأخرى المحبة للزيوت lipophilic (غير قابلة للذوبان في الماء أو كارهة له، لكنها تنحل في الزيوت والمذيبات العضوية). وهنا يمكن استخدام عامل استحلاب واحد أو أكثر لتحقيق أهداف ومزايا خاصة، حيث يتوضع الجزء الأيوني من المستحلب على سطح جزيئات البيتومين، بينما تُكَيِّف السلسلة الهيدروكربونية نفسها على سطح البيتومين وترتبط معه بقوة. ويظهر الشكل (2-4) صورة مكروسكوبية للمستحلب البيتوميني، بينما يوضح الشكل (2-5) طريقة توضع المستحلبات البيتومينية الكاتيونية على الحصويات [14,31,32].



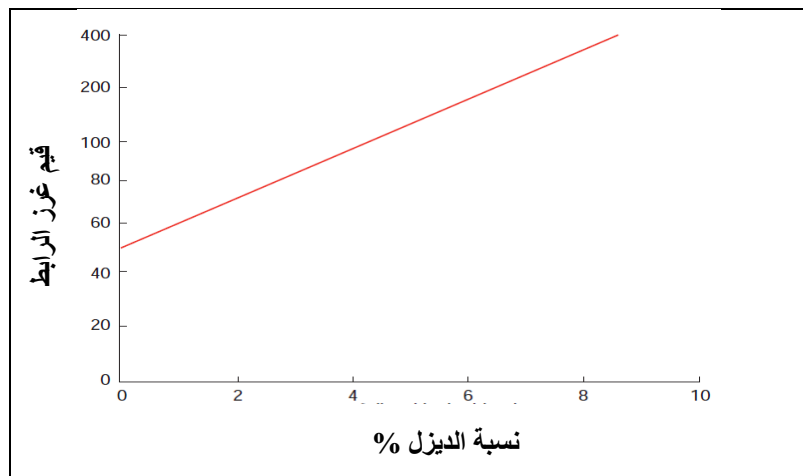
الشكل (2-4): صورة مكروسكوبية للمستحلب البيتوميني



الشكل (5-2): طريقة توضع المستحلبات البيتومية الكاتيونية على سطح الحصى

2.5.2. البيتومين السائل Cut-back bitumen and fluxed bitumen:

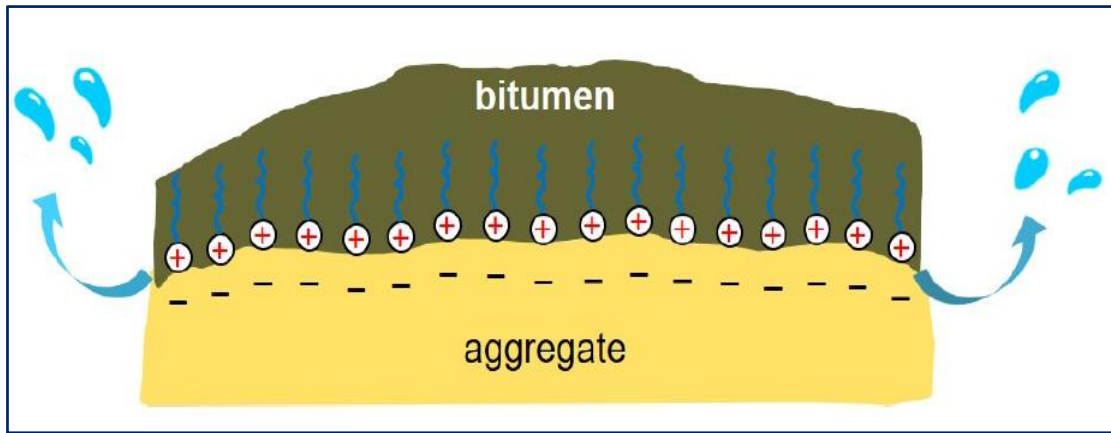
هو البيتومين الذي يتم تخفيض لزوجته عن طريق خلطه مع المذيبات البترولية المختلفة كالكيروسين والبنزين، بحيث يتم استخدامه في درجات الحرارة الطبيعية أو بعد تسخينه لدرجة حرارة مقبولة [33]. ويصنف وفقاً لسرعة تطاير المذيب المستخدم (سريع التطاير R.C ، متوسط التطاير M.C، بطيء التطاير S.C)، حيث يستخدم البنزين كمذيب سريع التطاير والكيروسين كمذيب متوسط التطاير والديزل كمذيب بطيء التطاير. وتندرج تحت هذه الأصناف عدة أنواع أخرى وفقاً لنسبة المذيب المضافة للبيتومين، ويظهر الشكل (6-2) تأثير إضافة الديزل في قيم غرز الرابط البيتوميني 40/60 [14].



الشكل (6-2): تأثير إضافة الديزل في قيم غرز الرابط البيتوميني 40/60

وعادةً ما يكون البيتومين السائل بقيمة غرز (70/100, 160/220)، وينبغي التأكيد على أهمية التعامل الآمن مع البيتومين السائل ورشه عند درجات الحرارة المطلوبة بالموصفات، التي تشترط أن تكون أقل من درجة حرارة الاشتعال، وذلك لتجنب احتمال اشتعال البخار المنبعث في الهواء في حالة وجود مصدر لهب قريب.

تُستخدم اللاحقة X لوصف البيتومين السائل في بريطانيا، ويشير المصطلح 100X على سبيل المثال إلى البيتومين السائل المعالج بالعوامل المعززة للالتصاق النشطة سلبياً *passive adhesion agent* والتي تسمى أحياناً بموانع الانسلاخ *anti-strip additives (ASAs)* كونها تساعد على ثبات الحصويات حرارياً، ومنع انسلاخ الرابط عنها في ظل وجود الماء، كما يمكن استخدام العوامل النشطة *active adhesion agent* في حالة وجود مياه على سطح الحصويات، كما هو موضح بالشكل (7-2) [34].



الشكل (7-2): استخدام العوامل النشطة موجبة الشحنة لتقليل زاوية التماس بين البيتومين و سطح الحصويات سالبة الشحنة للسماح للماء بالخروج وتحسين تغطية الحصويات بالرابط

يُستخدم البيتومين السائل غالباً في تقنيات الصيانة الوقائية للطرق (إكساء الطرق)، أو في خلطات الماكادام البارد Cold lay macadam [35]، حيث يتم رش سطح الطريق في حالة الصيانة الوقائية بطبقة رقيقة من البيتومين السائل أو المستحلب البيتوميني (درجة حرارة رش البيتومين السائل Cut-back °C 130-170) بالمقارنة مع درجة حرارة رش المستحلب °C (75-85)، يلي ذلك رش ودحي طبقة من الحصويات chippings ذات التدرج الحبي المنتظم. وتعتبر درجة انغماس الحصويات في الطبقة البيتومينية من أهم البارامترات المؤثرة في نجاح عملية إكساء سطح الطريق [36]، حيث يتبخّر حوالي 10-15% من الكيروسين خلال مرحلة رش سطح الطريق بالبيتومين السائل، ويتحلل ويتفكك حوالي 50% منه في السنوات القليلة اللاحقة [37]. حيث تعتبر ظاهرة النزف وتطاير الحصويات والرش عند درجات الحرارة العالية من أبرز عيوب البيتومين السائل [38].

توجد عدة طرق لصيانة وإكساء سطح الطرق chip seals، Surface Dressing، والتي غالباً ما يستخدم فيها البيتومين السائل أو المستحلب البيتوميني. ويوضح الجدول (2-2) أكثر التقنيات شيوعاً لإكساء الطرق وصيانتها في بريطانيا [39,40,41].

الجدول (2-2): الطرق الشائعة لصيانة وإكساء الطرق

 	<p>الإكساء المفرد Single surface dressing:</p> <p>يستخدم لأجل صيانة طبقات تغطية الطرق بهدف منع تسرب المياه وإيقاف التدهور الحاصل واستعادة مقاومة الإنزلاق وتقليل الحاجة إلى الصيانة بالمستقبل.</p>
 	<p>الإكساء المزدوج Double surface dressing:</p> <p>يستخدم من أجل إكساء طبقات الأساس الجديدة أو صيانة طبقات التغطية المتصدعة قليلاً، ويفضل السماح لحركة المرور على طبقة الإكساء الأولى لمدة لا تقل عن (2-3) أسبوع بهدف زيادة متانتها وثباتها، ومن ثم يتم تنفيذ طبقة الإكساء الثانية بعد تنظيف الطبقة الأولى من الأتربة والشوائب.</p>
 	<p>الإكساء المزدوج وفق تقنية Racked-in:</p> <p>تُستخدم فيه كمية بيتومين أكثر من تلك المستخدمة في الإكساء المفرد وأقل من المزدوج، ومن ثم تُرش طبقة حصويات كبيرة تغطي ما نسبته 90%، ويتبعها رش طبقة من الحصويات الأصغر، وتتميز هذه الطريقة بتقليل إمكانية تطاير الحصويات الكبيرة وتعزيز التعشيق الميكانيكي بين الحصويات.</p>
 	<p>الإكساء وفق تقنية Sandwich:</p> <p>يستخدم لصيانة الطرق التي تعاني من ظاهرة النزف.</p>
 	<p>الإكساء وفق تقنية Pad coats:</p> <p>يُستخدم في الحالات التي لا يمكن فيها إكساء الطرق مباشرة بسبب صلابة السطح العالية أو غير المتساوية (أساس الطرق المثبتة بالإسمنت، الترقيع الواسع)، وبالتالي يتم استخدام طبقة حصويات بقطر 6mm لتعزيز الالتصاق مع سطح الطريق، بحيث تُمهّد لوضع طبقة الإكساء الرئيسية (بأقطار 10mm أو 14mm) بعد فتح حركة المرور لعدة أشهر.</p>

3.5.2. البيتومين الصلب Hard bitumen:

ويستخدم بشكل رئيسي في تشكيل قوالب الفحم وصناعة الدهانات. ويتم تصنيفه وفقاً لاختبارات درجة حرارة التميع والغرز، حيث يشير الرمز H80/90، على سبيل المثال، إلى بيتومين قاسي ذي درجة حرارة تميع تتراوح بين $80-90^{\circ}\text{C}$. ويوضح الجدول (2-3) مواصفات وخصائص البيتومين الصلب [42].

الجدول (2-3): تصنيف البيتومين الصلب

صنف البيتومين الصلب		الخاصية
H100/120	H80/90	
110±10	85±5	درجة حرارة التميع $^{\circ}\text{C}$
6±4	9±3	الغرز عند 25°C ، dmm
0.05	0.05	الفاقد بالتسخين %، max
99.5	99.5	الانحلال بثالث كلور الإيثيلين %، min

4.5.2. البيتومين المؤكسد Oxidised bitumen:

ويعتبر أكثر أنواع البيتومين صلابةً، ويتميز بارتفاع درجة حرارة التميع وانخفاض درجة الغرز، بحيث يناسب استخدامه في العزل الحراري والمائي للأسقف والأرضيات والأنابيب. ويتم تصنيفه وفقاً لاختبارات درجة حرارة التميع والغرز، حيث يشير الرمز 85/40، على سبيل المثال، إلى بيتومين مؤكسد ذي درجة حرارة تميع بين $5\pm 85^{\circ}\text{C}$ ، ودرجة غرز $40\pm 5\text{dmm}$. ويوضح الجدول (2-4) مواصفات وخصائص البيتومين المؤكسد [42].

الجدول (2-4): تصنيف البيتومين المؤكسد

صنف البيتومين المؤكسد						الخاصية
115/15	105/35	95/25	85/40	85/25	75/30	
115±10	105±5	95±5	85±5	85±5	75±5	درجة حرارة التميع $^{\circ}\text{C}$
15±5	35±5	25±5	40±5	25±5	30±5	الغرز عند 25°C ، dmm
0.2	0.5	0.2	0.5	0.2	0.2	الفاقد بالتسخين %، max
99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	الانحلال بثالث كلور الإيثيلين %، min

6.2. مكونات البيتومين Bitumen composition:

يعرف البيتومين على أنه مواد هيدروكربونية معقدة تحتوي على مكونات مختلفة الصيغ الكيميائية، ومعظمها لها وزن جزيئي مرتفع نسبياً، ويدخل في تركيبه الكيميائي العناصر التالية:

- الكربون (C): وتتراوح نسبته بين 82-88%.
- الهيدروجين (H): وتتراوح نسبته بين 8-11%.
- الأوكسجين (O): وتتراوح نسبته بين 0-1.5%.
- الكبريت (S): وتتراوح نسبته بين 0-6%.
- الآزوت (N): وتتراوح نسبته بين 0-1%.
- كميات ضئيلة من الفاديوم والنيكل والحديد والمغنزيوم والكالسيوم.

يختلف التركيب الكيميائي للبيتومين باختلاف مصدر النفط K ويعتبر التحليل الكيميائي للبيتومين معقداً ومرهقاً، وينتج عنه كمية كبيرة من البيانات المرتبطة بخواصه الريولوجية، وبالتالي فإنه من الأفضل تقسيم البيتومين إلى مجموعتين كيميائيتين أساسيتين وهما الإسفلتين والماليتين، ويقسم الماليتين بدوره إلى مركبات مشبعة وأروماتية وراتنجية.

الإسفلتين Asphaltene: وهو عبارة عن جزيئات صلبة سوداء أو بنية اللون، تتكون من الكربون والهيدروجين وبعض الآزوت والأوكسجين، وتعتبر هذه الجزيئات عالية القطبية وذات وزن جزيئي مرتفع يتراوح بين 800-3500 g/mol في أغلب الاختبارات، وبحجم يتراوح بين 2-5 nm، وتبلغ نسبة الهيدروجين إلى الكربون فيها $(H/C=0.98-1.6)$ [14,43].

تؤثر نسبة الإسفلتين بشكل كبير على الخواص الريولوجية للربط البيتوميني، حيث يصبح الرابط البيتوميني مع ازدياد نسبة الإسفلتينات أقسى وأكثر لزوجة، وتتنخفض درجة غرزه وترتفع درجة حرارة تميعة. ويشكل الإسفلتين ما نسبته 5-25% من مجمل الرابط البيتوميني [14,43].

الراتنجات Resins: وتتكون بشكل أساسي من الهيدروجين والكربون، وتحتوي على عدد قليل من ذرات الأكسجين والهيدروجين والآزوت، لونها بني غامق، ويمكن أن تكون صلبة أو نصف صلبة، ولها طبيعة قطبية وخواص لاصقة. وتبلغ نسبة الهيدروجين إلى الكربون فيها $(H/C=1.4-1.7)$ ، ويتراوح وزنها الجزيئي بين 780-1400 g/mol. وتحدد نسبة الراتنجات/الإسفلتين صنف البيتومين [14,43].

الزيوت المشبعة Saturates: وتتكون من سلاسل هيدروكربونية أليفاتية مستقيمة ومتفرعة ومرتبطة مع المركبات الحلقية. وهي زيوت غير قطبية تبلغ نسبة الهيدروجين إلى الكربون فيها $(H/C=2)$ ، ويتراوح وزنها الجزيئي بين 470-880 g/mol، وتشكل ما نسبته 5-20% من مجمل الرابط البيتوميني [14,43].

المركبات الأروماتية Aromatics: وهي سوائل بنية داكنة اللون، تتكون من سلاسل كربونية غير قطبية مرتبطة مع بعضها وفق نظام الحلقات غير المشبعة، وتشكل ما نسبته % (40-65) من مجمل الرابط البيتوميني. وتبلغ نسبة الهيدروجين إلى الكربون فيها ($H/C=1.4-1.6$)، ويتراوح وزنها الجزيئي بين $(570-980)g/mol$ [14,43].

7.2 تصنيف البيتومين Bitumen classification:

يصنف البيتومين حسب خواصه وفق الآتي:

1.7.2. حسب الغرز:

يمكن تصنيف البيتومين وتحديد مواصفاته بالاعتماد على نتائج تجارب الغرز ودرجة حرارة التميع، حيث يقسم البيتومين إلى أصناف غرز متعددة، فعلى سبيل المثال، عندما يقال بيتومين 60/70 فهذا يعني بأن درجة غرزه تتراوح بين $(60-70)$ decimillimetre. ويوضح الجدول (2-5) والجدول (2-6) تصنيف الرابط البيتوميني حسب درجة الغرز وفق المواصفات البريطانية العالمية [44].

الجدول (5-2): تصنيف الرابط البيتوميني حسب درجة الغرز وفق المواصفات البريطانية العالمية BSI

الخاصية	المواصفة	الوحدة	20/30	30/45	35/50	60/40	50/70	70/100	100/150
الغرز عند 25°C	EN 1426	0.1 mm	20-30	30-45	35-50	40-60	50-70	70-100	100-150
درجة حرارة التميع	EN 1427	°C	55-63	52-60	50-58	48-56	46-54	43-51	39-47
نقطة الوميض	EN ISO 2592	°C	≥240	≥240	≥240	≥230	≥230	≥230	≥230
الإنحلال	EN 12592	%	≥99.0	≥99.0	≥99.0	≥99.0	≥99.0	≥99.0	≥99.0
اللزوجة الديناميكية عند 60°C	EN 12596	Pa.s	≥440	≥260	≥225	≥175	≥145	≥90	≥55
اللزوجة الديناميكية عند 135°C	EN 12595	Pa.s	≥530	≥400	≥370	≥325	≥295	≥230	≥175
درجة حرارة الإنكسار	EN 12593	°C	-	≤-5	≤-5	≤-7	≤-8	≤-10	≤-12
التغيرات الحاصلة بعد تعرض الإسفلت للتعب قصير الأمد وفقاً للمواصفة EN 12607-1									
الغرز المتبقي		%	≥55	≥53	≥53	≥50	≥50	≥46	≥43
التغير في الكتلة (بالقيمة المطلقة)		%	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.8	≤0.8
الزيادة في درجة حرارة التميع		°C	≤8	≤8	≤8	≤9	≤9	≤9	≤10
دليل الغرز	Annex A b	-	-1.5 to +0.7						≥43

الجدول (6-2): تنمة تصنيف الرابط البيتوميني حسب درجة الغرز وفق المواصفات البريطانية العالمية BSI

الخاصية	المواصفة	الواحدة	160/220	250/330	330/430	500/650	650/900
الغرز عند 25°C	EN 1426	0.1 mm	160–220	250–330	-	-	-
الغرز عند 15°C	EN 1426	0.1 mm	-	70–130	90–170	140–260	180–360
درجة حرارة التميع	EN 1427	°C	35–43	30–38	-	-	-
نقطة الوميض	EN ISO 2592	°C	≥220	≥240	≥230	≥230	≥230
الإنحلال	EN 12592	%	≥99.0	≥99.0	≥99.0	≥99.0	≥99.0
اللزوجة الديناميكية عند 60°C	EN 12596	Pa.s	≥30	≥18	≥12	≥7	≥4.5
اللزوجة الديناميكية عند 135°C	EN 12595	Pa.s	≥135	≥100	≥85	≥65	≥50
درجة حرارة الإنكسار	EN 12593	°C	≤-15	≤-16	≤-18	≤-20	≤-20
التغيرات الحاصلة بعد تعرض الإسفلت للتعب قصير الأمد وفقاً للمواصفة EN 12607-1							
الغرز المتبقي		%	≥37	≥53	≥50	≥50	≥46
التغير في الكتلة (بالقيمة المطلقة)		%	≤1	≤1.0	≤1.0	≤1.5	≤1.5
الزيادة في درجة حرارة التميع		°C	≤11	≤8	≤9	≤9	≤9

2.7.2. حسب اللزوجة:

اعتمدت الولايات المتحدة الأمريكية في سبعينات القرن الماضي نظام تصنيف للرابط البيتوميني وفق اللزوجة عند درجة حرارة 60°C ، والتي تمثل أقصى درجة حرارة يتعرض لها الرصف خلال فترة الصيف في الولايات المتحدة، حيث يقسم البيتومين وفق هذا النظام إلى خمسة تدرجات هي: AC2.5, AC5, AC10, AC20, AC40، كما هو مبين في الجدول (7-2). ويرمز للبيتومين وفق هذا التصنيف بالـ AC، حيث يشير الرقم بجانب الرمز إلى اللزوجة بالبواز مقسومة على 100 ضمن مجال $\pm 20\%$ ، فعلى سبيل المثال عندما يشار إلى AC10 فهذا يدل على أن لزوجته هي 1000 ± 200 بواز [24].

الجدول (7-2): تصنيف الرابط البيتوميني وفق اللزوجة

الخاصية	Ac-2.5 (الألين)	Ac-5	Ac-10	Ac-20	Ac-40 (الأقصى)
اللزوجة عند الدرجة 60°C (بواز)	250 ± 50	500 ± 100	1000 ± 200	2000 ± 400	4000 ± 800
اللزوجة عند الدرجة 135°C min, Cst	80	100	150	210	300
الغرز عند الدرجة 25°C	200	120	70	40	20
نقطة الوميض $^{\circ}\text{C}$	163	177	219	232	232
الانحلال بثالث كلور الايتلين min, %	99	99	99	99	99
اللزوجة الأعظمية عند الدرجة 60°C بعد اختبار TOFT، بواز	1250	2500	5000	10000	20000
الاستطالة بعد اختبار TOFT، Cm	100	100	50	20	10

3.7.2. حسب التركيب المجموعي للبيتومين:

ويسمى تصنيف كولبانوسكي وميخايوف (Kolbanwski & Michwf)، ويسمح بتوقع سلوك المواد أثناء استخدامها على سطح الطريق، ويظهر بنيتها بالإضافة إلى خواصها الريولوجية، ويقسم البيتومين وفق هذا التصنيف كما هو مبين في الجدول (8-2) إلى ثلاثة أصناف هي:

■ الصنف الأول Zel:

يقابل بنية ذات سلسلة من الحلقات الموصولة بالإسفلتين القاسي، والمثبتة بأغشية رقيقة من المالتين. ويتصف هذا الصنف بأنه سريع التأثير بالتعب، بسبب ارتفاع كمية الإسفلتين وعدم كفاية كمية المالتين. 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 ($I_p=0.6-4.4$) وتماسك قليل [24].

■ الصنف الثاني Zol:

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. ويتميز بسهولة ودرجة تليينه صغيرة، ويصبح هشاً عند انخفاض درجة الحرارة، إذ أن الكمية الكبيرة من المالتين تجعل البيتومين ذا حساسية كبيرة للحرارة، حيث تتغير لزوجته بشكل كبير معها، ويتعرض للتعب بسرعة [24].

■ الصنف الثالث Zel-Zol:

هو الصنف الوسط بين الصنفين السابقين، حيث يحتوي على سلسلة مكثفة من الإسفلتين المثبتة بالمالتين. ويتميز بممانعته الجيدة للحرارة، وبمحافظة على لدونته في درجات الحرارة المنخفضة، وبمقاومته للتشوهات في درجات الحرارة المرتفعة، وبتماسكه الكبير في حالته اللزجة المرنة، وتأثره القليل بالتعب [24].

الجدول (8-2): تصنيف البيتومين وفق نتائج التركيب المجموعي

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

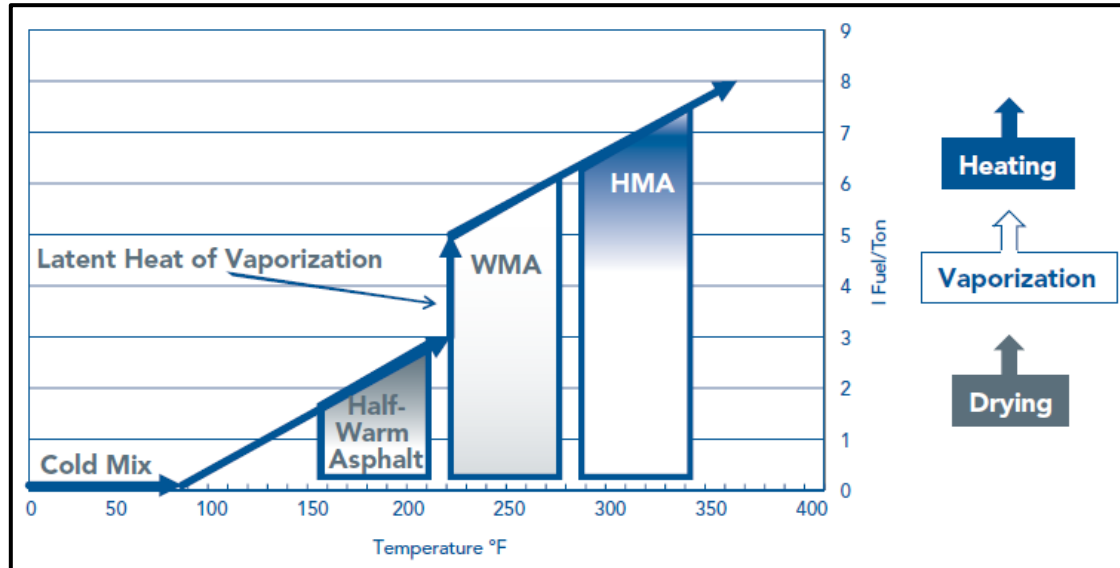
4.7.2. حسب نظام السوبر بيف:

وضع هذا التصنيف في الولايات المتحدة الأمريكية كجزء من الجهود المبذولة في برنامج البحوث الاستراتيجية للطرق (SHRP). ويعتمد على تصنيف الرابط البيتوميني وفق خصائص أدائه في ظروف بيئية مختلفة، وذلك للتحكم في إمكانية أن يكون الرابط سبباً في تشوه الرصف وتعبه وظهور الشقوق عند درجات الحرارة المنخفضة، وبالتالي يتم مراعاة الظروف المناخية وتغيرات درجات الحرارة، فعلى سبيل المثال، يصمم البيتومين ذو الصنف 52-40 PG في المناطق المناخية التي يكون فيها متوسط درجات حرارة الرصف الأعظمية لمدة 7 أيام هي 52°C والدنيا 40°C [14].

8.2. تكنولوجيا المجبول البيتوميني:

يمكن تصنيف تكنولوجيا المجبول البيتوميني اعتماداً على درجة حرارة إنتاجه كما هو موضح في الشكل (2-8) وفق الآتي [45]:

- المجلول البببومبنب البارب Cold Mixes: برباوح بارارة الإنباب ببب $^{\circ}\text{C}$ (0-30).
- المجلول البببومبنب نبف البافب Half-Warm Mix Asphalt: عببما بكون بربة إنباب المجلول البببومبنب أقل من 100°C .
- المجلول البببومبنب البافب Warm Mix Asphalt: عببما بكون بربة إنباب المجلول البببومبنب ببب $^{\circ}\text{C}$ (100-140).
- المجلول البببومبنب البابب Hot Mix Asphalt: عببما بكون بربة إنباب المجلول البببومبنب ببب $^{\circ}\text{C}$ (150-180).



الشكل (2-8): تصنيف المجهول البيتوميني وفقاً لدرجات حرارة الإنتاج والطاقة المستهلكة

9.2. المجبول البيتوميني الساخن Hot Mix Asphalt:

وهو خليط من الحصىيات الخشنة والناعمة والمواد المالئة للفراغات والرابط البيتوميني، حيث يتم خلط وفرش ودحي هذا الخليط عند درجات حرارة مرتفعة، ويمكن أن يكون ذو تراكيب حبية مفتوحة OGM أو كثيفة DGM أو SMA [46].

1.9.2. المجبول البيتوميني كثيف التدرج الحبي Dense-Graded Mixes:

يتصف هذا المجلول الموضح في الشكل (2-9)، بأنه جيد التدرج ويحتوي على نسبة جيدة من جميع المكونات، ويسمى أحياناً بالماكادام البيتوميني الكثيف Dense bituminous macadam. وعندما يصمم هذه المجلول بشكل صحيح، فإنه يكون كثيفاً وغير نفوذ نسبياً. ويشار إلى هذا المجلول من خلال

الحجم الاسمي الأعظمي للحصويات، حيث يصنف إلى خشن أو ناعم التدرج. وهو مناسب لجميع طبقات الرصف ولكل ظروف حركة المرور، ويتمتع بمقاومة جيدة على الضغط، ويمكن أن يستخدم فيه الرابط البيتوميني المعدل أو غير المعدل [46].



الشكل (2-9): سطح المجدول البيتوميني كثيف التدرج الحبي

8.1.2. المجدول البيتوميني ذو الهيكل الحجري Stone Matrix Asphalt:

تم وضع التدرجات الحبية لهذا المجدول في أوروبا لزيادة مقاومة التحدد قدر المستطاع ، ولتأمين المتانة المطلوبة للطرق ذات الحركة المرورية الكثيفة. ويسمى أيضاً بحجر الماستيك بيتومين Stone Mastic Asphalt، حيث يحتوي على نسبة عالية من الحصويات الخشنة التي تتماسك مع بعضها، مشكلةً هيكلًا حجرياً شبيهاً بالهيكل العظمي للإنسان، بهدف مقاومة التشوه الدائم. ويتم ملء هذا الهيكل وبالمواد المالئة والبيتومين المثبت بالألياف [46].

يتكون هذا المجدول عادةً من الحصويات الخشنة بنسبة (70-80%)، ومن المواد المالئة بنسبة (8-12%)، ومن الرابط البيتوميني بنسبة (6-7%)، بالإضافة إلى الإضافات المثبتة للبيتومين (الألياف مثلاً) بنسبة 0.3%. ويتميز هذا المجدول بمقاومة التشوهات الدائمة بسبب الهيكل الحجري الخشن، الذي يزيد من مساحة اتصال وتماس الحصويات مع بعضها البعض أكثر، مما هي عليه في حالة المجدول البيتوميني كثيف التدرج، وتكون متانة الرابط البيتوميني في هذا المجدول أعلى بسبب استخدام الإضافات المثبتة والنسبة المنخفضة للفراغات الهوائية، الأمر الذي يحسن من مرونته أيضاً [46].

لا يوجد دليل دقيق لتصميم هذا المجدول، إلا أنه عالي المتانة، ويحسن من مقاومة الرصف للتحدد والشد والتعب. ويستخدم حصراً في الطبقات السطحية للطرق ذات الحجم المروري المرتفع، حيث يساهم في التقليل من الشقوق الانعكاسية، وتخفيض ضجيج الإطارات. يمثل الشكل (2-10) عينات المجدول الحجري SMA، ويوضح الجدول (2-9) الفروق الرئيسية بين المجدول البيتوميني كثيف التدرج DGM والمجدول الحجري SMA [46,47].



الشكل (2-10): عينة SMA

الجدول (2-9): مقارنة بين المجبول البيتوميني كثيف التدرج DGM والمجبول الحجري SMA

المجبول كثيف التدرج DGM	المجبول الحجري SMA	الخصائص
يتألف من: الحصىيات الخشنة، الحصىيات الناعمة، الفيلر، الرابط البيتوميني	يحتوي على كمية مرتفعة من الحصىيات الخشنة التي تتماسك مع بعضها لتشكل هيكل حجري قوي ويحتوي كذلك على الحصىيات الناعمة، الفيلر، الرابط البيتوميني، والإضافات المثبتة للبيتومين.	الوصف
50-60	75-80	الحصىيات الخشنة %
40-50	20-25	الحصىيات الناعمة %
6-10	9-13	محتوى الفيلر %
85/100 ، 60/70	60/70	الرابط البيتوميني
5-6	>6.5	محتوى البيتومين %
.....	0.3-0.5	الإضافات المثبتة % (من وزن المجبول)
3-6	3-4	الفراغات الهوائية %
30-65	25-75	سمائة الطبقات mm

9.2.3. المجبول البيتوميني مفتوح التدرج الحبي Open-Graded Mixes:

على عكس الأنواع السابقة، يصمم المجبول البيتوميني مفتوح التدرج الحبي بحيث يسمح للمياه بالتسرب. ويستخدم فيه الحجارة المكسرة مع نسبة قليلة من الرمال المصنعة، ويكثر استخدامه في الطبقات التالية [46]:

- طبقة الاحتكاك مفتوحة التدرج (Open-graded friction course (OGFC): وتستخدم كطبقة تغطية سطحية فقط، وتتمتع بنسبة فراغات هوائية عادةً 15% (ولا يوجد هناك حد أعلى لهذه النسبة)، حيث تقلل هذه النسبة المرتفعة للفراغات الهوائية من ضجيج العجلات بمقدار 50%.

- الأساس المعالج بالبيتومين النافذ للمياه (Asphalt treated permeable bases (ATPB): وتكون المواصفات أقل تشدداً، ويستخدم فقط تحت (طبقات التغطية السطحية كثيفة التدرج DGM، طبقات SMA، طبقات الرصف الصلب)، وذلك لأجل التصريف المياه.

يعتبر المجبول البيتوميني مفتوح التدرج OGFC أعلى سعراً من المجبول كثيف التدرج DGM، لكن وزنه أقل بالنسبة للمساحة التي يشغلها المجبول كثيف التدرج، وبذلك يتم تعويض جزءاً من التكلفة المرتفعة [46].

10.2. المجبول البيتوميني البارد Cold Mix Asphalt:

ويتكون من الأحجار المكسرة والرمل والبيتومين السائل، وأحياناً تضاف المواد المائلة، ونظراً لاستعمال البيتومين السائل، يتوجب أن يحتوي على نسبة كبيرة من الفراغات لضمان سرعة تطاير المذيب. وتغطي الطبقات المنفذة من هذا المجبول عادةً بطبقة دهان من البيتومين السائل والرمل بعد بضعة أسابيع من فرشها، وذلك لمنع تسرب مياه الأمطار من السطح إلى طبقات الأساس. ولا يسمح بوضع طبقة الدهان قبل أن تتماسك خلطات المجبول البيتوميني البارد بشكل جيد [48].

يستخدم هذا المجبول في أعمال الصيانة وتغطية الطرق المستصلحة أو الصحراوية أو الداخلية بين القرى، وفي الطرق ذات حجم المرور المتوسط، وأحياناً في بعض الطرق ذات المرور الثقيل عند الضرورة [48].

11.2. المجبول البيتوميني الدافئ Warm Mix Asphalt:

1.11.2. مقدمة:

تعود أول محاولة لخلط البيتومين عند درجات حرارة منخفضة إلى العام 1956 عندما أنتج البروفسور Ladis Csanyi من جامعة أيوا (Iowa State University)، البيتومين الرغوي لاستخدامه في تثبيت التربة. ومنذ ذلك الحين بدأت تقنية البيتومين الرغوي بالانتشار، وتعتمد هذه التقنية في الأصل على حقن البخار ضمن الرابط البيتوميني الساخن، وجرى تطويرها عام 1968 من قبل الشركة الأسترالية Mobil Oil Company، التي حصلت على براءة اختراع "Csanyi" لتوليد البيتومين الرغوي باستخدام الماء البارد بدلاً من البخار [49,50].

وفي أوائل السبعينات طورت شركة Chevron منهجية تصميم الخلطات البيتومينية المستخدمة في طبقتي الأساس وفي طبقة التغطية السطحية (كثيفة التدرج الحبي، مفتوحة التدرج الحبي) باستخدام

المستحلبات البيتومينية، ونشرت في العام 1977 دليلاً عملياً لإنتاج المستحلبات البيتومينية " Bitumuls Mix Manual" [51]. وفي العام 1995 اختبر Maccarone الخلطات البيتومينية المحتوية على البيتومين الرغوي ونسبة عالية من المستحلب، حيث شكل ذلك بداية الانطلاق نحو الرصف على البارد [52].

وفي تلك الفترة، ومع ازدياد الاهتمام العالمي بالبيئة عند رصف الطرق، بدأت وزارة العمل الألمانية بدراسة خطورة تعرض العمال العاملين في مجال الرصف لأبخرة البيتومين، والعمل على تطوير المجلول البيتوميني منخفض درجات الحرارة استجابةً لضرورة الحد من انبعاث الغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري، واقترحت إمكانية تعديل الرابط بالإضافة العضوية وتحديدًا الشمع الهيدروكربوني الأليفاتي Sasobit® والذي تم تسويقه من قبل شركة Sasol Wax International. وتم رصف أول طريق بالمجلول البيتوميني الدافئ في هامبورغ في ألمانيا عام 1997 [50].

وفي العام 1999 قدم Jenkins وآخرون تقنية إنتاج المجلول البيتوميني نصف الدافئ باستخدام البيتومين الرغوي، مع تسخين الحصويات إلى درجات حرارة أقل من 100 °C [53]. وانتشر المجلول البيتوميني الدافئ المعتمد على البيتومين الرغوي في كل من النروج والمملكة المتحدة وهولندا، وجرى تقييمه من قبل Koenders وآخرون عام 2000 [54]. وفي العام 2004 قدم Barthel وآخرون الزيوليت الصناعي كإضافة لتصميم المجلول البيتوميني الدافئ [55].

حظي المجلول البيتوميني الدافئ بالاهتمام، ولاقى رواجاً كبيراً في أوروبا وأستراليا منذ العام 2000، في حين بدأ الاهتمام به في شمال أمريكا عام 2005 عندما نشر المركز الوطني لتكنولوجيا البيتومين تقريراً حول استخدام إضافة Sasobit والشموع والزيوليتات الصناعية في إنتاج المجلول البيتوميني الدافئ [56,57]. وانطلقت الدراسات والأبحاث اللاحقة لدراسة خواص المجلول الدافئ الذي يمتلك متانة أكبر من المجلول البارد، والعمل على زيادة ثباته وديمومته، للاقتراب من خواص المجلول الساخن أو حتى التفوق عليه في الجودة [58].

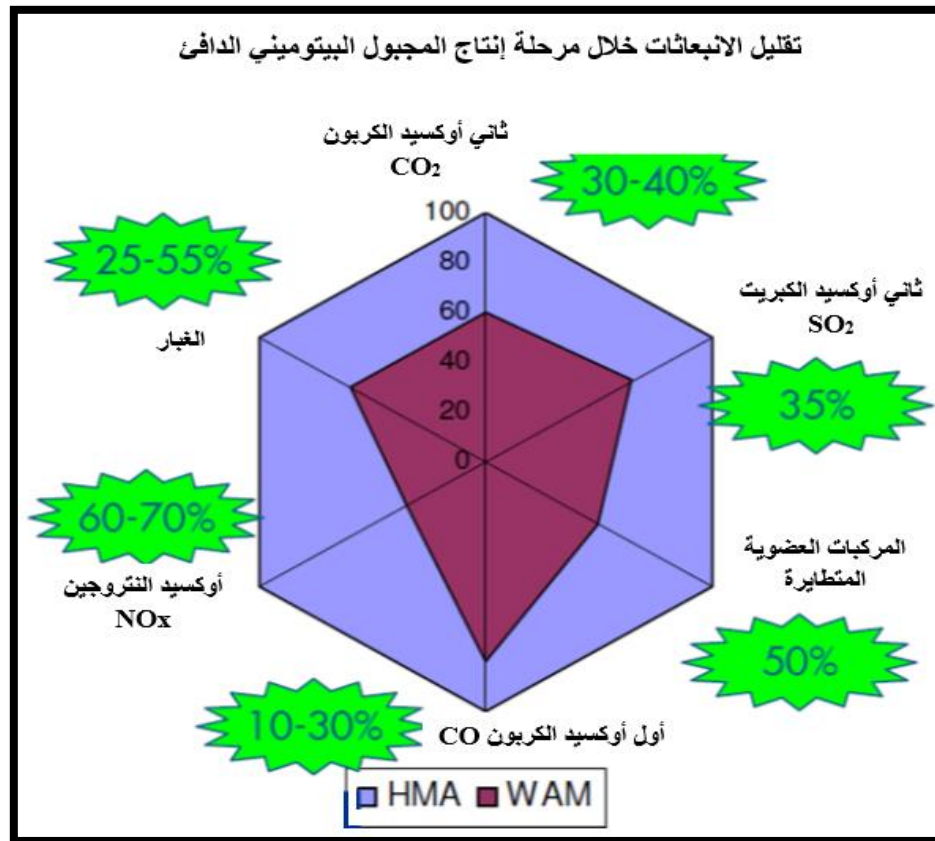
2.11.2. مزايا المجلول البيتوميني الدافئ:

استُخدم المجلول البيتوميني الدافئ خلال العقود الماضية كبديلٍ عن المجلول الساخن، بهدف تحقيق مجموعة من المزايا التي تشمل تقليل درجة حرارة المجلول البيتوميني خلال مرحلة إنتاجه ونقله ودحيه، وتقليل انبعاث الغازات [59]. ويمكن إيجاز هذه المزايا بالآتي:

1.2.11.2. فوائد بيئية وصحية واقتصادية:

تسمح تكنولوجيا المجلول البيتوميني الدافئ بتقليل درجات حرارة خلط ودحي المجلول البيتوميني، من خلال تقليل لزوجة الرابط البيتوميني، الأمر الذي سيؤدي بالضرورة إلى تقليل الطاقة اللازمة لإنتاج المجلول الساخن، والحد من الانبعاثات والروائح الصادرة من المجاليل البيتومينية، وجعل ظروف العمل في المجاليل ومواقع الرصف أفضل، مما ينعكس إيجاباً على صحة العمال [59].

تعتبر هذه التقنية واعدة اقتصادياً وبيئياً بالمقارنة مع المجدول الساخن، نظراً لأنها تُقلل من انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 بنسبة 30%، وتستهلك طاقة أقل بنسبة 30% [24]، ويوضح الشكلان ((11-2)، ((12-2)) المزايا التي يوفرها المجدول البيتوميني الدافئ لجهة تقليل انبعاث الغازات والغبار خلال مرحلة إنتاج المجدول البيتوميني [59,60].



الشكل (11-2): تقليل انبعاث الغازات خلال مرحلة إنتاج المجدول البيتوميني الدافئ



الشكل (12-2): الفرق بين المجدول البيتوميني الساخن والدافئ (في مجال البيتومين)

2.2.11.2. فوائد تتعلق بالرصف المرن:

يتمتع الرصف المرن ذو الطبقات السطحية المرصوفة بالمجبول الدافئ بالقدرات التالية [10,61]:

- إمكانية تنفيذ الرصف في درجات حرارة أكثر برودة وبنفس الكثافة المطلوبة.
- نقل المجبول البيتوميني لمسافات أطول، مع المحافظة على قابلية التشغيل للفرش والدحي.
- رص ودحي المجبول البيتوميني بطاقة أقل (في الظروف النموذجية وليس في الطقس البارد أو عند النقل لمسافات طويلة).
- فرش طبقات بسماكات كبيرة، مع إمكانية فتح حركة المرور في فترة زمنية قصيرة.
- استخدام نسب مرتفعة من المجبول البيتوميني المُعاد تدويره RAP: تسمح تقنيات الخلطات البيتومينية الدافئة باستخدام نسب عالية من الرصف المعاد تدويره RAP، حيث أن تخفيض اللزوجة يُساعد على الدمك بسهولة أكبر، وعلى انخفاض تعب وتقدم الرابط البيتوميني، بسبب انخفاض درجة حرارة الإنتاج.

3.11.2. عيوب المجبول البيتوميني الدافئ:

- 1- الوفرة في تكلفة الوقود يُقابله السعر المرتفع لإضافات الخلطات الدافئة [62].
- 2- احتمال بقاء الرطوبة ضمن الخلطات الدافئة نتيجة انخفاض الطاقة الحرارية أثناء الإنتاج، وهذا ما قد يؤدي إلى حدوث التخذد وازدياد حساسية الخلطات تجاه الرطوبة [63,64].

4.11.2. الإضافات العضوية Organic additives:

تستخدم الإضافات العضوية لتخفيض درجات حرارة تسخين البيتومين عن طريق تخفيض لزوجته، وهذا ما ينعكس لاحقاً على زيادة صلابة البيتومين وتحسن مقاومته ضد التشوهات [7].

وتتكون هذه الإضافات من البارافين الذي يمكن إذابته في الرابط البيتوميني عند درجات حرارة $80-120^{\circ}\text{C}$ ، وذلك حسب نوع الإضافة. حيثُ تعرفُ شموع البارافين بأنها سلاسل هيدروكربونية تأخذ الصيغة العامة $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ ، ويكون هذا الشمع صلباً بدرجة حرارة الغرفة عندما تكون عدد ذرات الكربون $n > 20$. وتحتوي الشموع المستخدمة كإضافات في تصميم الخلطات الدافئة على أكثر من 45 ذرة كربون، وبالتالي تكون درجة انصهارها أعلى من 70°C . ويتعلق الوزن الجزيئي للكربون بعدد ذرات الكربون المشاركة في السلسلة الكربونية [10,11]. ويوضح الجدول (2-10) أهم الإضافات العضوية المستخدمة في إنتاج المجبول البيتوميني الدافئ [10].

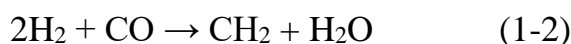
الجدول (10-2): الإضافات العضوية المستخدمة في إنتاج المجلول البيتوميني الدافئ

نوع الإضافة	الشركة المنتجة	درجة حرارة الإنتاج في المجلول °C	مكان الاستخدام
Sasobit® (Fischer-Tropsch wax)	Sasol	تسمح بتخفيض درجة الحرارة بمقدار °C (20-30)	ألمانيا وأكثر من 20 بلد آخر
Asphaltan-B (Montan wax)	Romonta	تسمح بتخفيض درجة الحرارة بمقدار °C (20-30)	ألمانيا
Licomont BS 100 (additive) or Sübit (Binder) (fatty acid amides)	Clariant	تسمح بتخفيض درجة الحرارة بمقدار °C (20-30)	ألمانيا
3E LT or Ecoflex (proprietary)	Colas	تسمح بتخفيض درجة الحرارة بمقدار °C (30-40)	فرنسا

1.4.11.2. إضافة Sasobit®:

تُعتبر إضافة Sasobit® الأكثر شهرةً، وهي عبارة عن شمع هيدروكربوني أليفاتي طويل السلسلة، يذوب عند درجة حرارة 100°C، وهي من إنتاج شركة SASOL WAX التي لديها فروع في أوروبا وأمريكا وإفريقيا وآسيا [59].

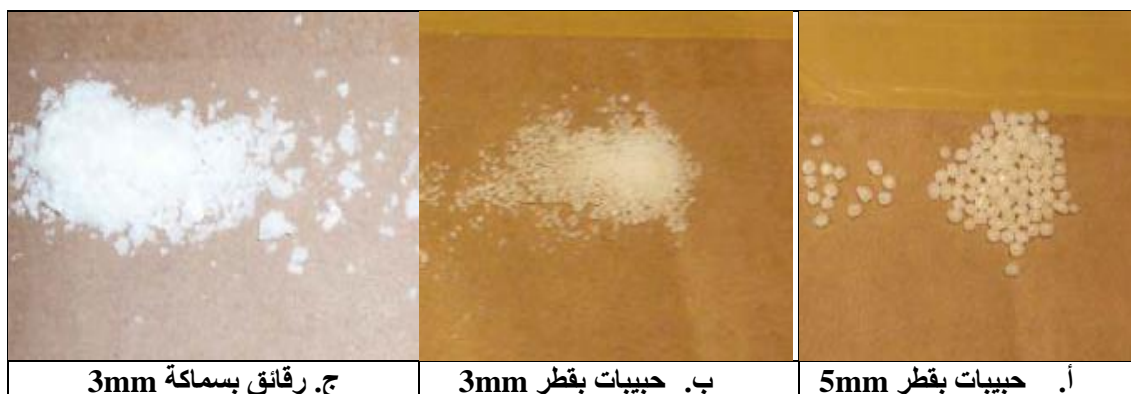
وتعتمد هذه الطريقة على تحويل الغاز المركب صناعياً إلى هيدروكربونات سائلة، وذلك عن طريق تفاعل كيميائي بين أول أكسيد الكربون والهيدروجين [61]:



تنتج السلسلة المطلوبة اعتماداً على نوع المحفز ودرجة الحرارة والضغط ونسبة H₂/CO، وذلك عند معالجة الهيدروكربونات السائلة في مفاعل فيشر عند ضغط معتدل (20-40 bar). ويتم إنتاج الكازولين عند إجراء المعالجة بدرجات حرارة عالية تتراوح بين °C (330-350) باستخدام الحديد Fe كمحفز، بينما تنتج النافثا والشموع عند المعالجة بدرجات حرارة °C (220-250) باستخدام الحديد Fe أو الكوبالت Co كمحفز [61,62].

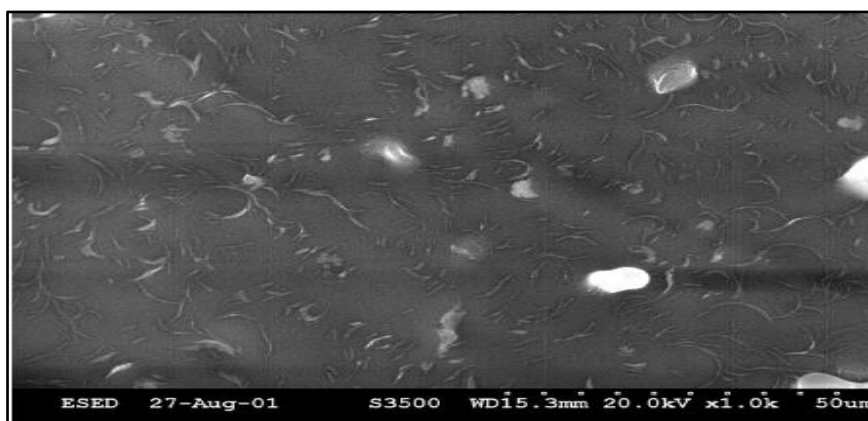
تتواجد هذه الإضافة بشكل حبيبات بقطر 5mm، أو بقطر أصغر 1mm، أو بشكل رقائق بسماكة 3mm، وتعمل على تخفيض لزوجة الرابط، ويمكن إضافتها إلى البيتومين باستخدام خلاط عادي أو إلى حجرة الخلط (هنا يجب استخدام آلة حقن خاصة لضمان تجانس الشمع ضمن الخلط). ويوصى باستخدامها بنسبة (1.5%) من وزن الرابط البيتوميني لأجل تخفيض درجات الحرارة. وتسمح بتخفيض درجة حرارة إنتاج المجلول البيتوميني بمقدار °C (10-30)، مع إمكانية استخدام نسب مرتفعة من مواد

الرصيف المعاد تدويره (35-45%) [26]. ويمكن زيادة النسبة إلى % (3-4) لأجل زيادة القسوة، حيث تُشكل جزيئات الشمع هيكلًا مرناً متشابكاً صلباً كما هو موضح في الشكل (2-13) [62,63].



الشكل (2-13): أشكال إضافة Sasobit® المتوفرة

يظهر الشكل (2-14) صور المسح الإلكتروني الميكروسكوبي للبيتومين 50/70 المعدل بالشمع بنسبة 4%، ويوضح الشكل (2-15) آلة حقن Sasobit® [63,64].



الشكل (2-14): صور المسح الإلكتروني الميكروسكوبي للبيتومين 50/70 المعدل بالشمع بنسبة 4%



الشكل (2-15): آلة حقن Sasobit® في الخلاط

2.4.11.2. إضافة SonneWarmix™:

ويتم إنتاج هذه التقنية من قبل شركة SONNEBORG INC في ولاية نيوجيرسي الأمريكية. وتتكون من الشموع الهيدروكربونية البارافينية، وتشبه الإضافة السابقة Sasobit من جهة آلية التأثير. ويتم إضافتها إلى الرابط البيتوميني قبل الخلط مع الحصى، ويوصى باستخدامها بنسبة (0.5-1.5) % من وزن الرابط البيتوميني [65].

5.11.2. الإضافات الكيميائية Chemical additives:

تعمل هذه الإضافات على تعديل البيتومين كيميائياً، وتتكون من موانع الانسلاخ، بالإضافة إلى مواد تعمل على تخفيض الشد السطحي، وتعزيز التصاق الرابط البيتوميني مع الحصى. وتعتبر إضافتا (Rediset®, Evotherm™) أحد أهم هذه الإضافات، التي تسمح بتخفيض درجات حرارة إنتاج الخلطات البيتومينية بمقدار 55°C [10,66]. ويوضح الجدول (11-2) أبرز الإضافات الكيميائية المستخدمة في إنتاج المجلول البيتوميني الدافئ [10,13,15].

الجدول (11-2): الإضافات الكيميائية المستخدمة في إنتاج الخلطات البيتومينية الدافئة

نوع الإضافة	الشركة المنتجة	مكان الاستخدام
Rediset® WMX	AkzoNobel Corporate	الولايات المتحدة الأمريكية
Evotherm™	MeadWestvaco	فرنسا- كندا- الصين- الولايات المتحدة الأمريكية
Revix TM	Mathy Technology and Engineering Services, Inc.	الولايات المتحدة الأمريكية
Cecabase RT	CECA	الولايات المتحدة الأمريكية- فرنسا
Iterlow T	IterChimica	إيطاليا

1.5.11.2. إضافة Cecabase RT®:

تم تصنيع هذه الإضافة في شركة CECA التابعة لمجموعة ARKEMA المتخصصة في إنتاج المواد الكيميائية المنتشرة في أوروبا واليابان وشمال أفريقيا. وتسمح هذه الإضافة، الخالية من الماء، بتقليل درجات حرارة إنتاج وتنفيذ المجلول البيتوميني بمقدار 30-40°C، مما يؤدي إلى توفير كبير في الطاقة وتقليل انبعاث الغازات والدخان، وتحقيق قابلية تشغيل أفضل وسهولة أكبر في رصه، مع إمكانية استخدام نسب عالية من مواد الرصف المعاد تدويرها [67].

تتم إضافة Cecabase RT® إلى الرابط البيتوميني مباشرةً، ولا تحتاج إلى خلط مسبق كونها سريعة الذوبان وفق نسبة خلط (0.2-0.5) % من وزن الرابط. وتعتبر هذه الإضافة خطرة كغيرها من المواد الكيميائية، وينبغي التعامل معها بحذر وارتداء المعدات الواقية قفازات ونظارات واقية لتجنب الحروق

الناتجة عن لمسها [67]. ويوضح الشكل (2-16) خزان تخزين هذه المادة بالقرب من مجال البيتومين [68].

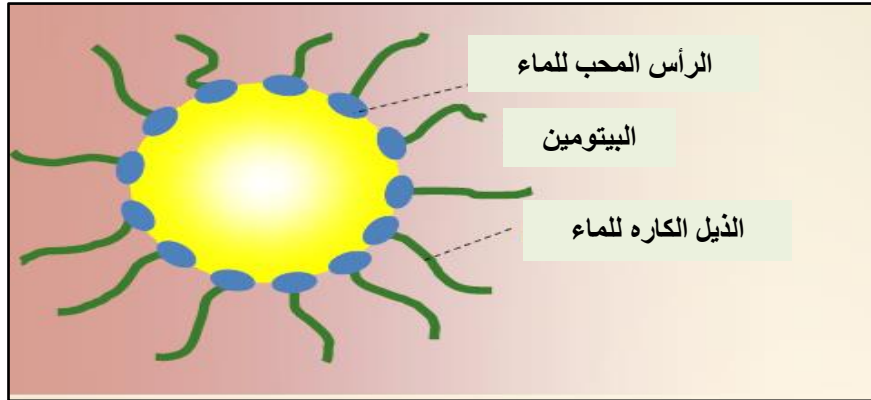


الشكل (2-16): إضافة Cecabase RT® مع خزان لتخزينها

2.5.11.2. إضافة Evotherm®:

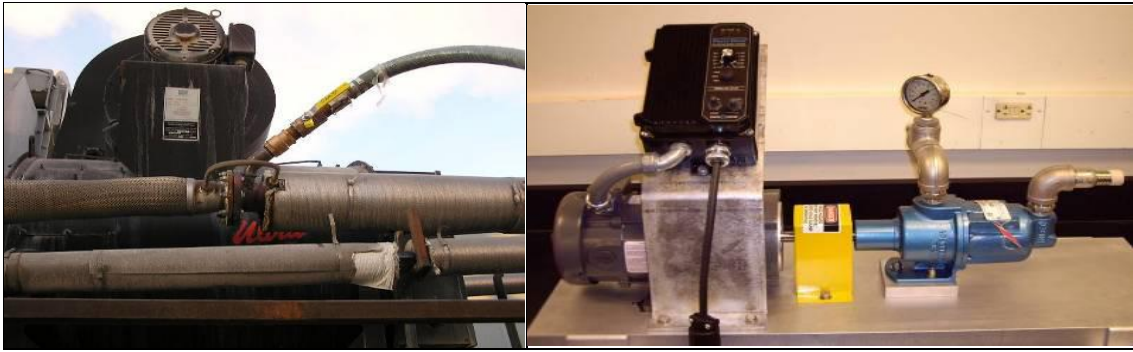
يتم تصنيع هذه الإضافة في شركة MEADWESTVACO CORPORATION، ومقرها مدينة ريتشموند في ولاية فرجينيا الأمريكية. وتنتج هذه الشركة ثلاثة أنواع من الإضافات الكيميائية، بالاعتماد على استخدام المستحلبات: Evotherm® (ET)، Evotherm® (DAT)، والجيل الثالث منها (Evotherm® (3G/Revix) [69].

تعتمد آلية إنتاج المجبول البيتوميني الدافئ باستخدام إضافة Evotherm® (ET) على إضافة المستحلب المائي إلى الحصويات الساخنة أثناء الخلط مع البيتومين، حيث تؤدي عملية الخلط والاحتكاك إلى تحول الماء إلى بخار وتمدد الرابط البيتوميني. وتستخدم هذه الإضافة المواد الكيميائية الطبيعية المشتقة من أشجار الصنوبر، التي تعمل على تقليل الشد السطحي للسائل (surfactants)، والتي تتكون بدورها من جزأين هما: الرأس المحب للماء والذيل الكاره للماء، كما هو موضح في الشكل (2-17). وقد جرى تطوير هذه المواد لتحقيق الثبات الحراري للبيتومين ورفع درجة وميضه والتخفيف من الروائح الصادرة عنه [65].



الشكل (2-17): الشكل الهيكلي لإضافة Evotherm (ET)

تشبه إضافة Evotherm®(DAT) النوع السابق Evotherm®(ET) من ناحية استخدام المستحلبات، وتعتمد هذه التقنية على حقن المستحلب مباشرة في خط إنتاج البيتومين قبل الدخول إلى حجرة الخلط بنسبة 5% من وزن الرابط البيتوميني. أما الجيل الثالث من هذه الإضافة فيعتمد على استخدام المواد الكيميائية الخالية من الماء التي لا تؤدي إلى تخفيض لزوجة البيتومين، وإنما تعمل فقط على تقليل الاحتكاك الداخلي أثناء الخلط لدرجة يصبح عندها سلوك البيتومين مشابه لما هو عليه عند تسخينه لدرجات حرارة مرتفعة. والنسبة المثلى لاستخدام هذه الإضافة هي % (0.4-0.7) من وزن الرابط البيتوميني. وتسمح هذه الإضافة بتخفيض درجة حرارة إنتاج المجلول البيتوميني بمقدار (28-56°C). ويوضح الشكل (18-2) المضخة النموذجية المستخدمة لإيصال Evotherm®(DAT) إلى خط إنتاج البيتومين [65,69].



الشكل (18-2): المضخة النموذجية المستخدمة لإيصال Evotherm®(DAT) إلى خط البيتومين

3.5.11.2. إضافة Rediset®LQ:

وهي مادة كيميائية متوفرة على شكل حبيبات صلبة كما هو موضح في الشكل (19-2)، أو على شكل سائل، وتنتجها شركة AKZO NOBEL المتعددة الجنسيات والمنتشرة في الولايات المتحدة الأمريكية والسويد والصين. وتسمح بتنفيذ الرصف عند درجات حرارة أقل بمقدار (22-33)°C، حيث تعمل على تحسين قابلية التشغيل، وتقليل الشد السطحي للبيتومين وتعزيز التصاقه مع الحصى الجافة بشكل غير كامل وتعزيز تماسكها، مما يحسن من مقاومة الرطوبة. وتتمتع الطرق المرصوفة باستخدامها بمقاومة أكبر لخطر الرطوبة وبعمر أطول. ويوصى باستخدامها بنسب تتراوح بين % (0.25-0.75) من وزن الرابط البيتوميني [70].



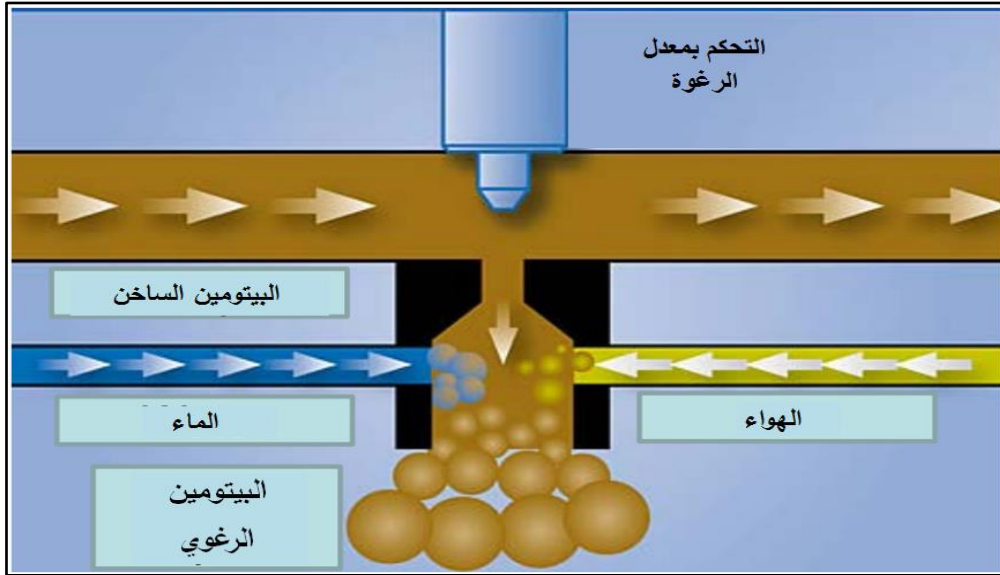
الشكل (19-2): حبيبات Rediset® الصلبة

6.11.2. التقنيات الرغوية Foaming Technologies:

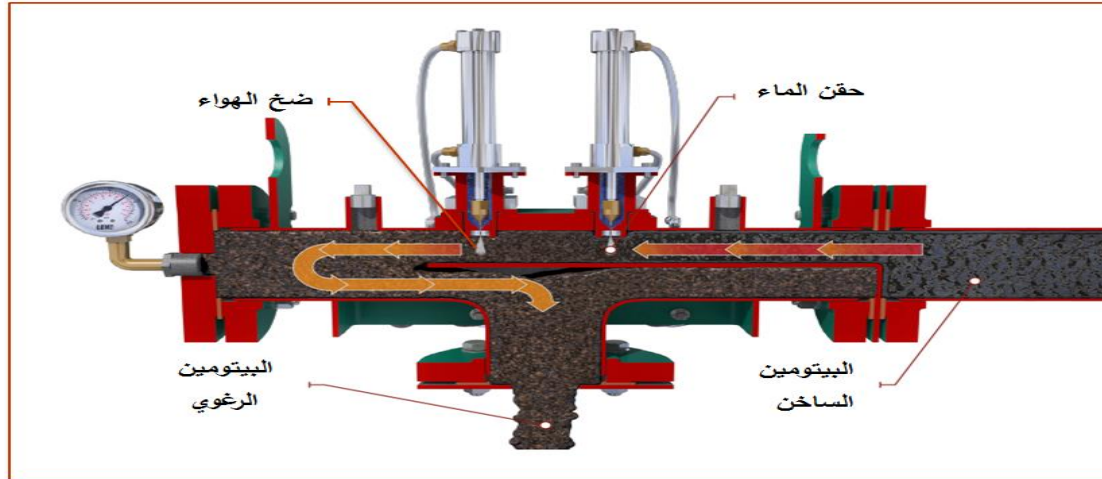
هناك العديد من التقنيات الرغوية التي يمكن تصنيفها إلى مجموعتين رئيسيتين: تقنيات تركز على إضافة الماء بشكل مباشر، وأخرى تركز على استخدام إضافات محتوية للماء [71,72].

1.6.11.2. التقنيات المرتكزة على إضافة الماء بشكل مباشر Water-Based Processes:

تعتمد التقنيات الرغوية على حقن كميات صغيرة من الماء داخل الرابط الببتوميني باستخدام معدات وتجهيزات خاصة، تولد كمية كبيرة من الرغوة بعد أن يتحول الماء إلى بخار، نتيجة حرارة الرابط الببتوميني، كما هو موضح في الشكلين ((20-2)، (21-2)). وينتج عن ذلك ازدياد حجم الببتومين مؤقتاً وانخفاض لزوجه بشكل يسمح بتغطية جميع الحصى بالحصىات بالرابط الببتوميني وتحسين قابلية تشغيل المبول. وهنا يجب التحكم بكمية الماء المضافة بحيث تكون كافية لإحداث الرغوة، دون أن تكون زائدة تجنباً لحصول مشاكل الانسلاخ [67,73]. ولضمان ذلك يُمكن إضافة موانع الانسلاخ، بحيث تكون الحساسية لتأثير المياه في حدها الأدنى. ويُوصى باستخدام موانع الانسلاخ السائلة بنسبة 0.5% من وزن الرابط الببتوميني [10,15]. وتُعرف موانع الانسلاخ السائلة على أنها مواد كيميائية تتكون بشكل أساسي من الأمينات، التي تعمل على تعزيز الالتصاق بين الحصىات والرابط الببتوميني. وبالعموم هي مواد كاتيونية (موجبة الشحنة) تستخدم مع الحصىات الحامضية سالبة الشحنة. ويوجد أنواع منها تحتوي على مكونات أنيونية، وكاتيونية تستعمل مع جميع أنواع الرابط الببتوميني والحصىات [74,75,76].



الشكل (20-2): طريقة تصنيع الببتومين الرغوي

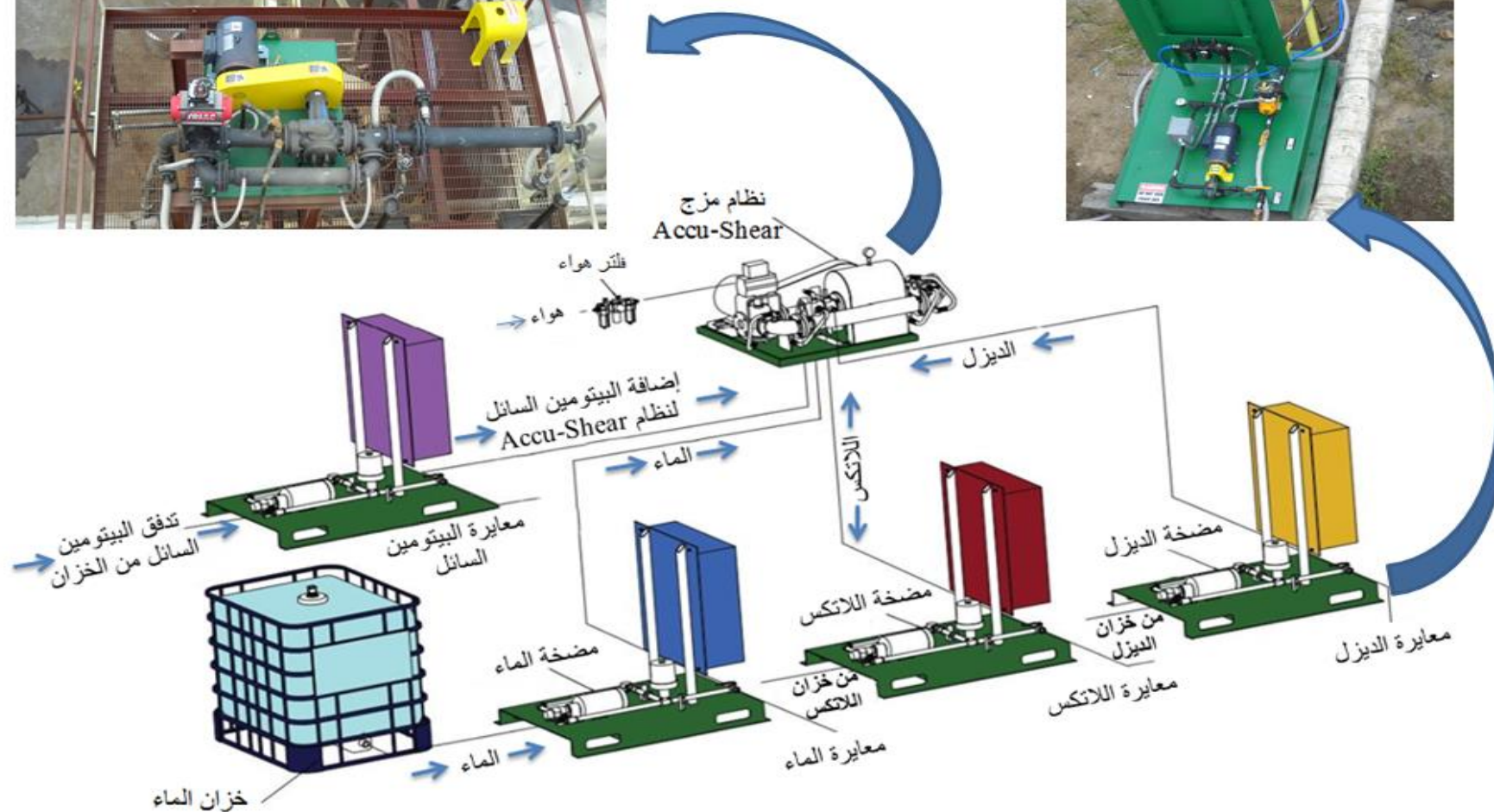


الشكل (21-2): تقنية WMA System

ونوضح فيما يلي أهم التقنيات المرتكزة على إضافة الماء بشكل مباشر.

1. تقنية Accu-Shear®:

وهي عبارة عن جهاز تم تطويره من قبل شركة STANSTEEL الأمريكية ومقرها مدينة لويزفيل في ولاية كنتاكي. ويقدم هذا الجهاز مزايا حقن الماء أو الإضافات السائلة بدقة ضمن الرابط البيتوميني، نظراً لأن البيتومين والماء لا يمتزجان مع بعضهما في الحالة الطبيعية. ويعتمد مبدأ Accu-Shear® على عمليات القص لإجبار سائلي على الامتزاج مع بعضهما البعض. ويمزج هذا النظام ميكانيكياً نوعين أو ثلاث أو أربع أو خمس أو أكثر من السوائل معاً، بالإضافة إلى خلط البيتومين والبوليميرات مع بعضهما البعض، مما يؤدي لتغير درجة أداء المادة. ويوفر هذا النظام بالتالي إمكانية إنتاج البيتومين الرغوي عن طريق المزج الميكانيكي بدلاً من مجرد الحقن، وتخفيض درجات حرارة خلط الرابط البيتوميني مع الحصى وإنتاج المجبول البيتوميني الدافئ [77]. ويظهر الشكل (22-2) مزج أربعة أنواع من السوائل وفق هذا النظام [78,79].



الشكل (22-2): تقنية Accu-Shear®

2. تقنية AQUABLACK®:

تم تطوير هذه التقنية من قبل شركة (MAXAM Equipment, Inc.) في مدينة كانساس بولاية ميزوري الأمريكية. وتعتمد هذه التقنية على إدخال كمية صغيرة من الماء إلى بنية الرابط البيتوميني الساخن تحت الضغط، فيتوسع الرابط البيتوميني ويزداد حجمه نتيجة تبخر الماء. وتتكون هذه التقنية من غرفة خلط صغيرة (الشكل (2-23)) مزودة بفوهة للحقن بالماء بسرعة عالية لأجل توليد البيتومين الرغوي، ولوحة تعمل باللمس للتحكم في كمية الحقن بالماء، ونظام لقياس سرعة تغير الضغط، بالإضافة إلى فوهة nozzle لضخ البيتومين الرغوي. ويتم صناعة هذه الأجزاء من الفولاذ المقاوم للصدأ، ويتراوح ضغط الماء الأمثل بين $(700-1000) \text{ Lb/in}^2$ [80].

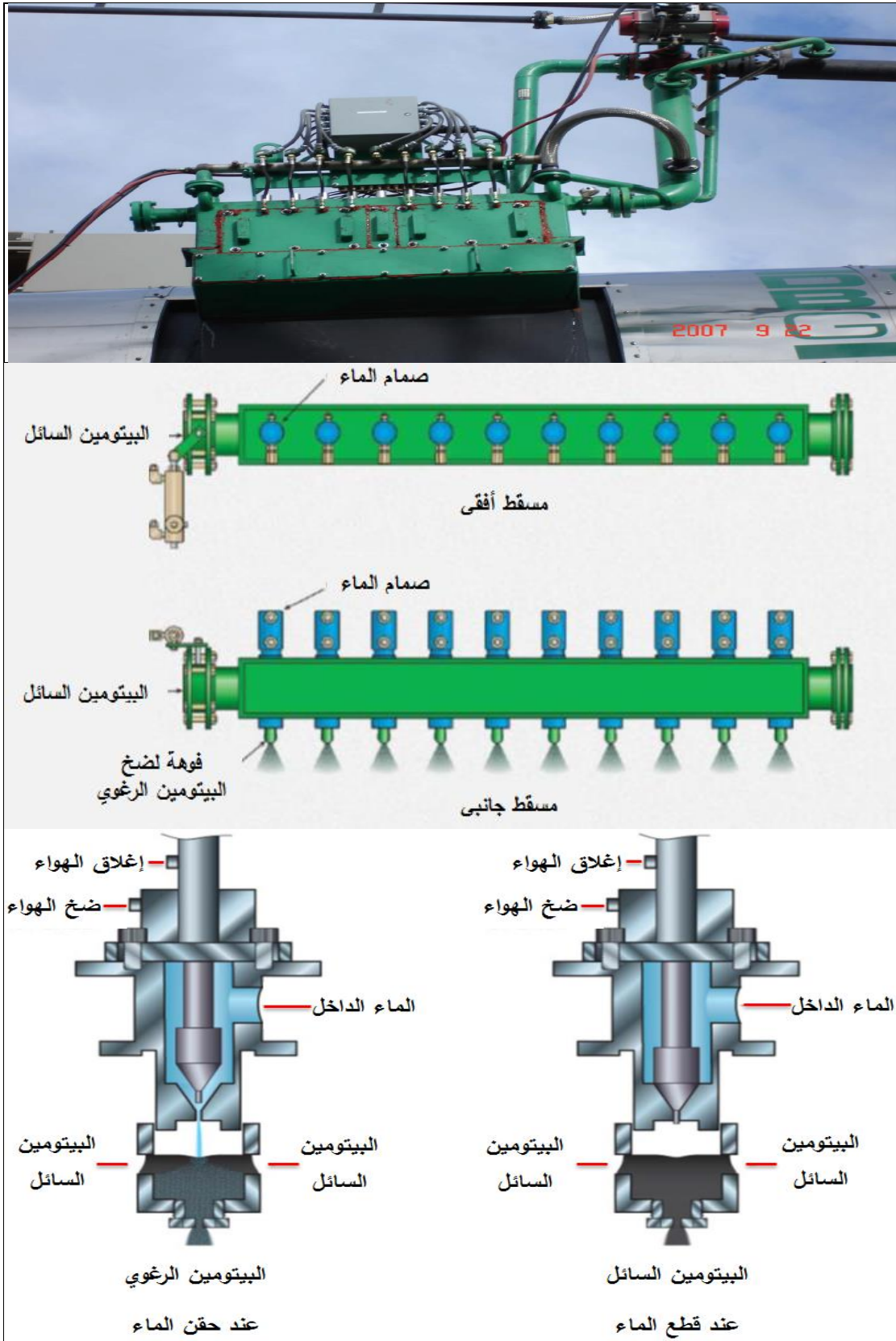
عندما تتشكل الرغوة يزداد حجم الرابط البيتوميني في البداية بمقدار $(12-14)\%$ ، لكن يتراجع مباشرةً إلى $(65-85)\%$ من حجم الرابط. ويقوم النظام تلقائياً بحساب كمية الماء المطلوب حقنها في البيتومين، وبضبط مضخة المياه وفق معدل الإخراج المناسب، ويقوم بقياس التدفق بمراقبة معدل التدفق وإصدار تحذير إذا تجاوز الحدود المثلى [81].



الشكل (2-23): تقنية AQUABLACK

3. تقنية Double Barrel Green:

وتمثل نظام تم تطويره من قبل شركة ASTEC INC الأمريكية، ومقرها مدينة تشاتانوغا في ولاية تينيسي لإنتاج المجبول البيتوميني الدافئ بالاعتماد على إحداث الرغوة. ويعتمد نظام الخلط، وفقاً للشركة المصنعة، على حقن كميات صغيرة من الماء ضمن الرابط البيتوميني لتشكيل فقاعات ميكروسكوبية، تسمح بخلط البيتومين مع الحصويات عند درجات حرارة منخفضة. ويتم التزويد بالمياه عبر مضخة قادرة على ضبط كمية الماء الداخلة إلى النظام بدقة، حيث يتم معايرة هذه المضخة من أجل الحفاظ على التدفق الملائم للماء، وبشكل يوازي تدفق الرابط البيتوميني. ويتم حقن البيتومين بالماء عبر سلسلة من الحافقات الفولاذية التي تقع فوق الغرفة المصممة لإحداث الرغوة (الشكل (2-24)). ويتم التحكم بعدد الفوهات اللازمة لحقن المياه في غرفة الخلط، وفقاً لمعدل الإنتاج المطلوب، ويتم بالتالي إنتاج البيتومين الرغوي ميكانيكياً [82,83].



الشكل (24-2): نظام Double Barrel Green مع توضيح آلية العمل

4. تقنية Ecofoam-II:

وتتكون من مجموعة معدات مصنوعة من قبل شركة AESCO / MADSEN ومقرها مدينة اوبورن في ولاية واشنطن في الولايات المتحدة الأمريكية، وهذا ما يوضحه الشكل (2-25). وهي عبارة عن خلاط ثابت يتم فيه حقن السوائل واختلاطها مع بعضها البعض بسرعة، بواسطة الجمع بين الدوامات المتناوبة (Vortex shedding) والاضطرابات الناجمة عن القص، وذلك لإنتاج سائل ممزوجة بدرجة عالية. وتُعرف ظاهرة الدوامات المتناوبة في ميكانيك الموائع بحدوث دوامات في مائع، عند مروره عبر جسم أو عائق، ويحدث التدبذب، مما يولد مناطق ضغط منخفضة تعزز عملية الخلط. والعائق في هذه التقنية هو صفيحة قطع نفائفة، تؤدي لتدفقات عالية عند عبور البيتومين منها تصل إلى خمسة أضعاف تدفق البيتومين كما هو موضح في الشكل (2-26)، وتتشكل أيضاً مناطق تدفق عكسي بالقرب منها وطبقات قص بين الصفيحة النفائفة ومناطق التدفق العكسي، وتعود فعالية القص إلى بنية وهيكل النفائفة والطبيعة اللادائرية للصفيحة [84].

يتدفق البيتومين السائل إلى الخلاط الثابت ويُجبر داخله على التدفق بسرعة عالية من خلال صفيحة القطع، ومن ثم يُحقن الماء بسرعة منخفضة وباتجاه عكسي، مما يؤدي إلى تسريع اختلاط البيتومين والماء وبفعالية عالية عن طريق زيادة مساحة الاتصال بينهما (البيتومين المتدفق بسرعة عالية والماء المتدفق بسرعة بطيئة) (الشكل (2-27)) [84].

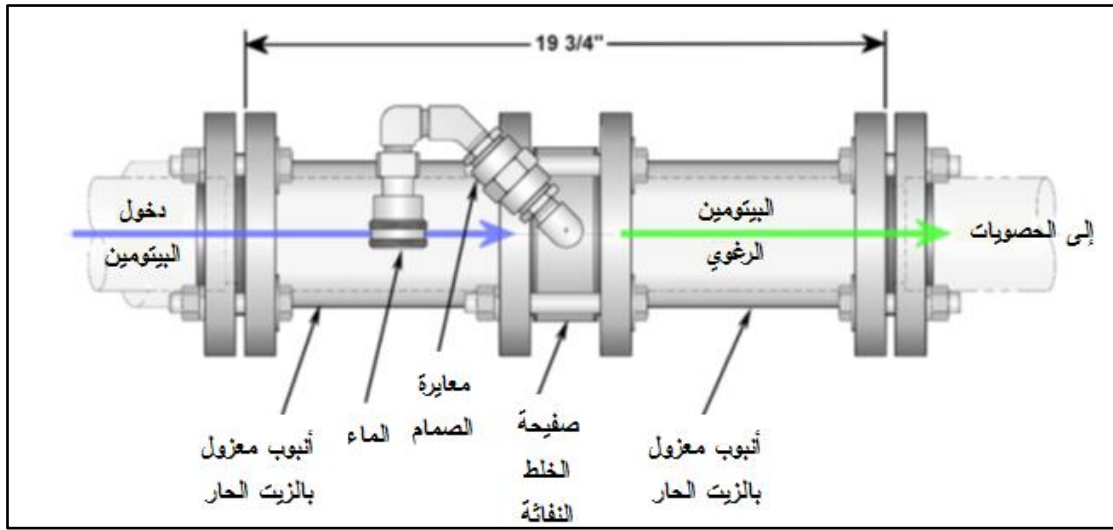
تتميز هذه التقنية بإمكانية استخدامها لحقن الماء أو الإضافات الكيميائية وبعمرها الطويل وبسهولة تركيبها وقلة الحاجة لصيانتها، وتسمح بخلط الرابط البيتوميني مع الحصى عند درجات حرارة تتراوح بين $125-135^{\circ}\text{C}$ [84].



الشكل (2-25): معدات Ecofoam-II (الخلاط، المضخة، لوحة التحكم)



الشكل (26-2): الاضطرابات المتولدة داخل تقنية Ecofoam-II



الشكل (27-2): تفاصيل الحقن بالماء بواسطة تقنية Ecofoam-II

5. تقنية WAM-Foam:

وهي نتاج مشروع مشترك بين شركة Shell International Petroleum Company Ltd البريطانية وشركة Kolo-Veidekke, Olso النرويجية. ويستخدم في هذه التقنية نوعي البيثومين الصلب واللين، واللذين يُمزجان معاً للحصول على التدرج الرابط المطلوب. وعادةً ما يُستخدم بيتومين ذو لزوجة 1500 centistokes عند درجة الحرارة 60°C كرابط لين، وآخر ذو غرز 70/100 كرابط صلب [10,81].

في المرحلة الأولى تُسخن الحصويات لدرجة حرارة 130°C ، وتُخلط مع الرابط البيثوميني اللين (نسبة الرابط اللين 20-30% من الرابط الكلي)، ويكون التركيز في هذه المرحلة على منع وصول الماء للحصويات. وفي المرحلة الثانية يمزج الرابط القاسي مع نسبة (2-5%) من الماء البارد عند درجة حرارة 180°C ، فيتمدد الماء ويتحول إلى بخار محدثاً الرغوة، ثم يضاف هذا الرابط للحصويات المغلفة بالرابط اللين، كما هو موضح بالشكل (28-2) [10].

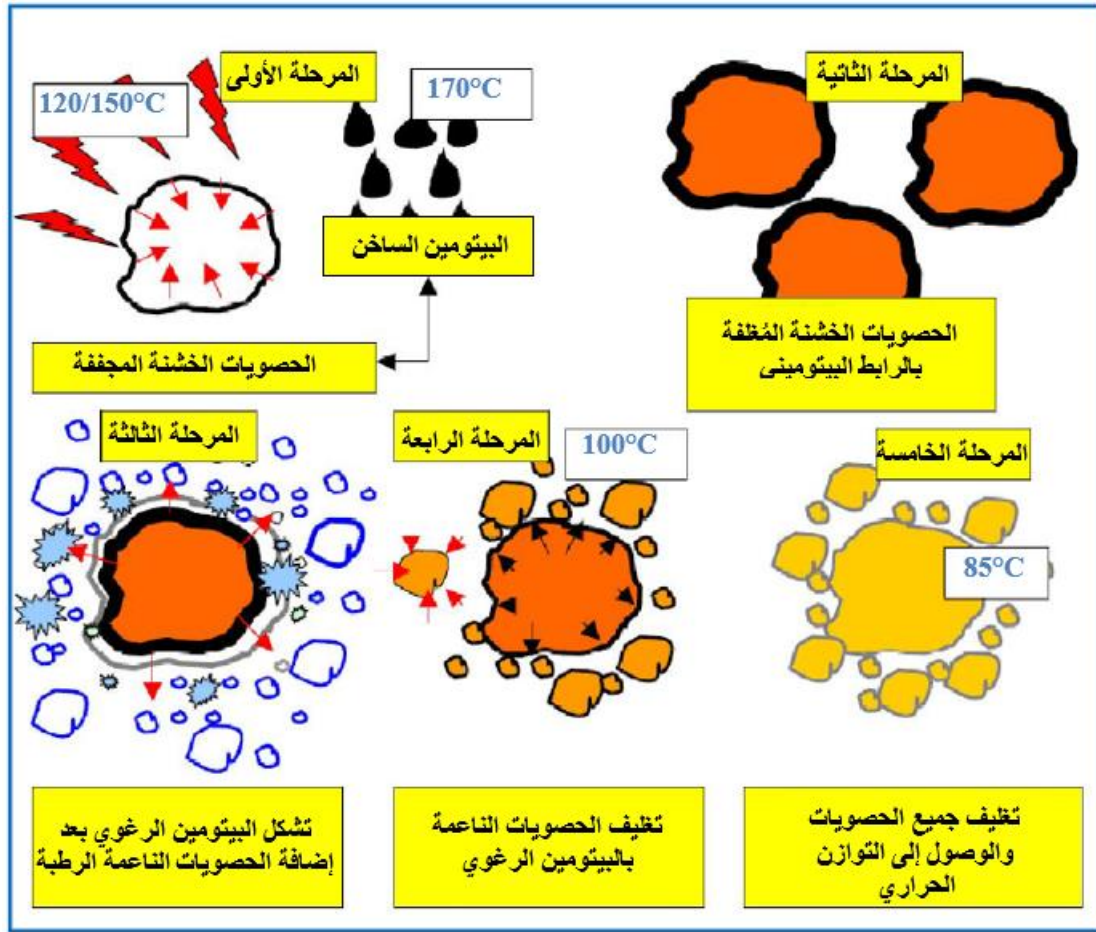


الشكل (28-2): (خط البيتومين، حجرة تمديد البيتومين، أجهزة التحكم، خطوط نقل البيتومين الرغوي) وفق تقنية WAM-Foam

6. تقنية البيتومين منخفض الطاقة Low Energy Asphalt:

تعتمد هذه التقنية على استخدام الحصى الرطبة لتوفير الطاقة، حيث يتم بدايةً تغليف الحصى الخشنة الجافة بالرابط البيتوميني الساخن، ثم تُضاف الحصى الناعمة الرطبة، بحيث تكون درجة حرارة المزيج أقل من 100°C . ويوضح كل من الشكلين ((29-2)، (30-2)) مراحل هذه العملية وفق التالي [10,85]:

- 1- تُقسم الحصى إلى مجموعتين: تتألف الأولى من الحصى الخشنة وجزء من الحصى الناعمة، من دون المواد المائلة للفراغات، وتشكل 60% من مجمل الحصى. وتتألف الثانية من الحصى الناعمة والمواد المائلة للفراغات، وتشكل 40% من مجمل الحصى.
- 2- تُسخن المجموعة الأولى من الحصى إلى درجة حرارة $(150-160)^{\circ}\text{C}$ ، وتُخلط مع الرابط البيتوميني الساخن والمعدل باستخدام إضافات لتعزيز التلاصق بين الرابط والحصى (بنسبة 0.5%).
- 3- تُخلط الحصى الساخنة المغلفة بالرابط البيتوميني مع الحصى الناعمة الباردة ذات محتوى رطوبة 3-4%، مما يؤدي إلى تشكل البيتومين الرغوي نتيجة احتكاك الحصى الناعمة مع الخشنة، وتغليف جميع الحصى الناعمة، بحيث تكون درجة حرارة المزيج النهائي أقل من 100°C .
- 4- تُساعد الرطوبة المتبقية في المزيج على الحفاظ على قابلية تشغيل المجبول عند درجات الحرارة المنخفضة.



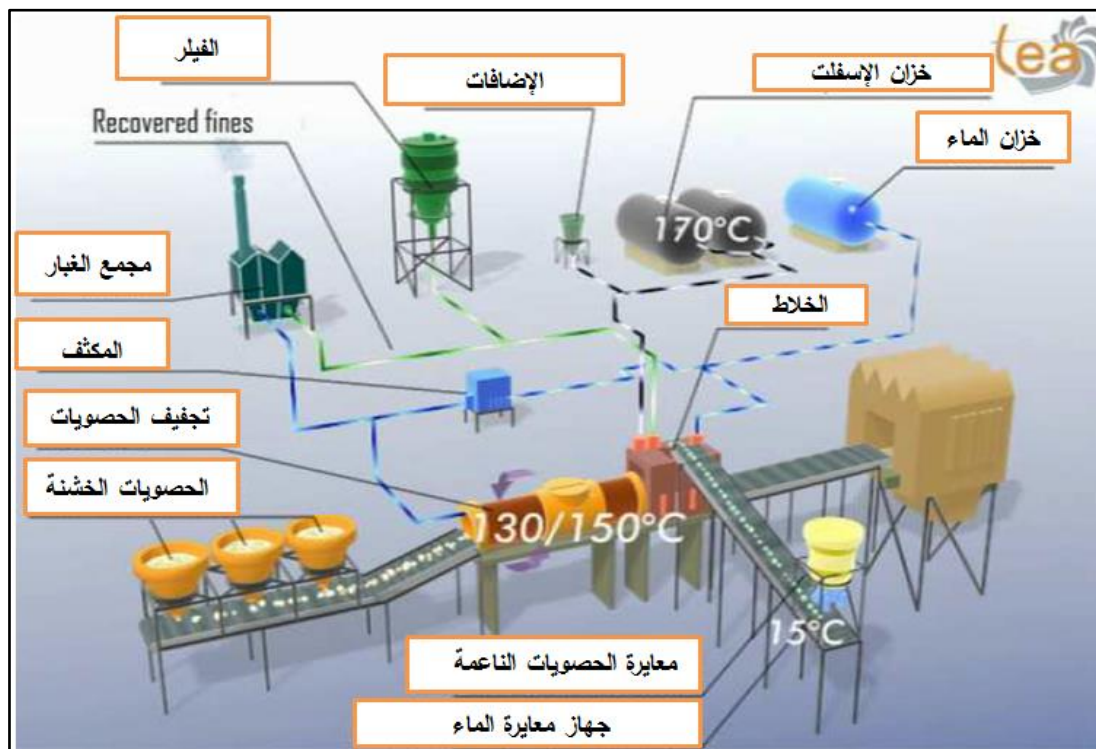
الشكل (29-2): مراحل إنتاج البيثومين منخفض الطاقة



الشكل (30-2): نظام التحكم بالرطوبة وفق تقنية LEA

7. تقنية البيتومين منخفض الانبعاث Low Emission Asphalt:

وهي تقنية من تقنيات البيتومين الدافئ تم وضعها من قبل شركة McCONNAUGHAY TECHNOLOGIES، ومقرها مدينة كورتلاند في ولاية نيويورك الأمريكية. تشبه هذه التقنية إلى حد كبير تقنية البيتومين منخفض الطاقة، إلا أنها تجمع بين التقانات الرغوية والإضافات الكيميائية، حيث يتم إضافة الإضافات الكيميائية إلى الحصويات الخشنة الساخنة في المرحلة الأولى، ثم يتم إضافة الحصويات الناعمة الرطبة لإحداث الرغوة [74]. ويوضح الشكل (2-31) تقنية البيتومين منخفض الانبعاث Low Emission Asphalt [86,87].



الشكل (2-31): تقنية البيتومين منخفض الانبعاث Low Emission Asphalt

8. تقنية Meeker – Acqua Foam

تم تطوير تقنية Acqua Foam من قبل شركة MEEKER EQUIPMENT INC ومقرها مدينة هاتفيلد الأمريكية. يعتمد هذا النظام على التقنيات الرغوية أيضاً، حيث يتم حقن الماء بضغط عالٍ مستمر في الرابط البيتوميني مسبق الضغط، ثم ينقل البيتومين الرغوي المتشكل عبر أنابيب إلى الخلاط لإنتاج المجلول البيتوميني الدافئ. وتتم معايرة الماء في عملية التصنيع بنسبة تتراوح بين 1.25-1.3% من محتوى الرابط البيتوميني. ويمر الماء عبر نظام متعدد المراحل skid metering، يتم التحكم فيه بنسبة الماء المطلوبة من خلال كومبيوتر [3].

تتراوح درجة حرارة إنتاج المجبول البيتوميني وفق هذه التقنية بين $121-135^{\circ}\text{C}$ ، وتسمح باستخدام نسب عالية من مواد الرصف المعاد تدويرها، نتيجة انخفاض لزوجة البيتومين، والحد من شيخوخة

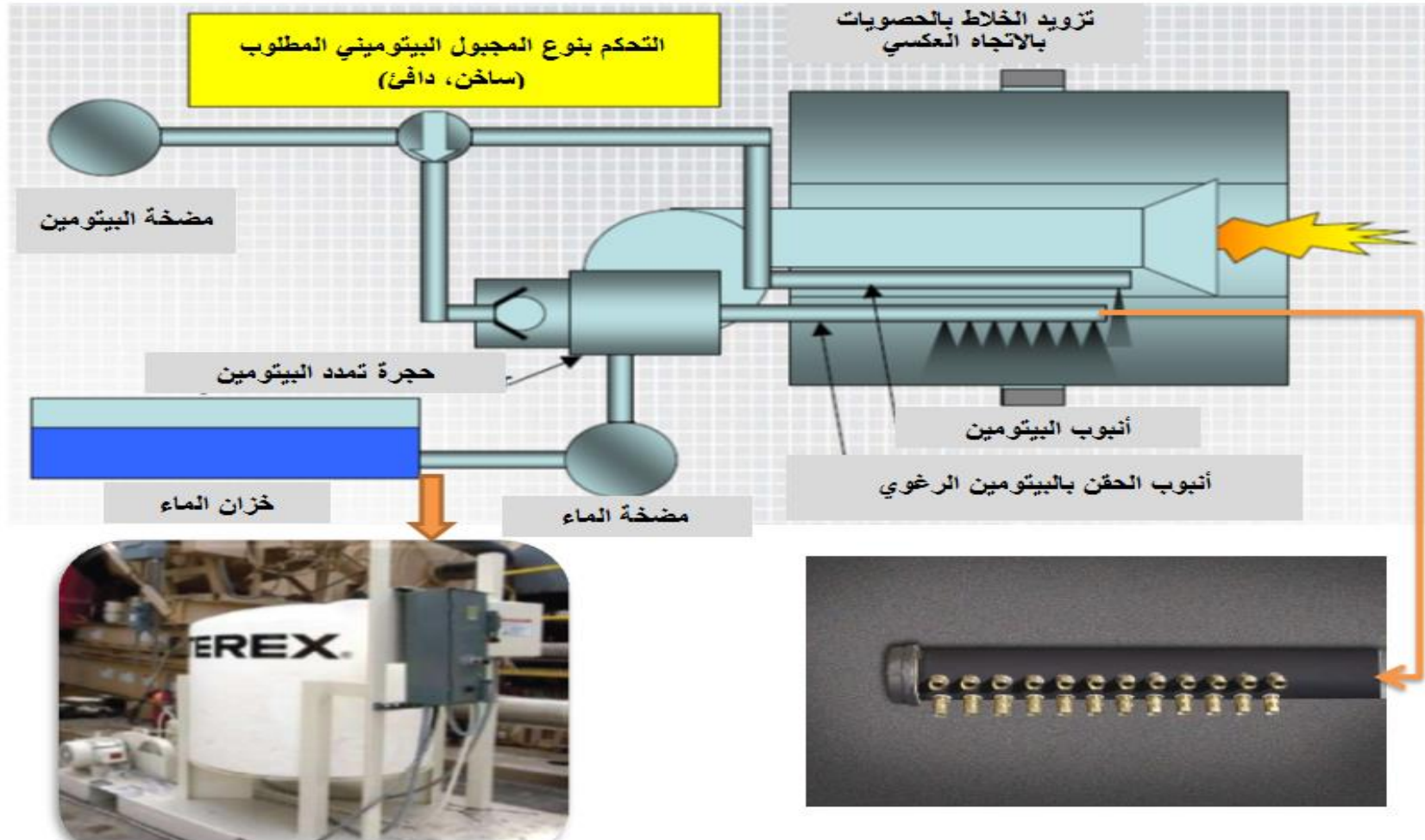
المجبول البيتوميني بفعل انخفاض درجات حرارة الإنتاج [3]. ويوضح الشكل (2-32) هذه التقنية [13,88].



الشكل (2-32): تقنية Meeker – Acqua Foam

9. تقنية Terex® WMA:

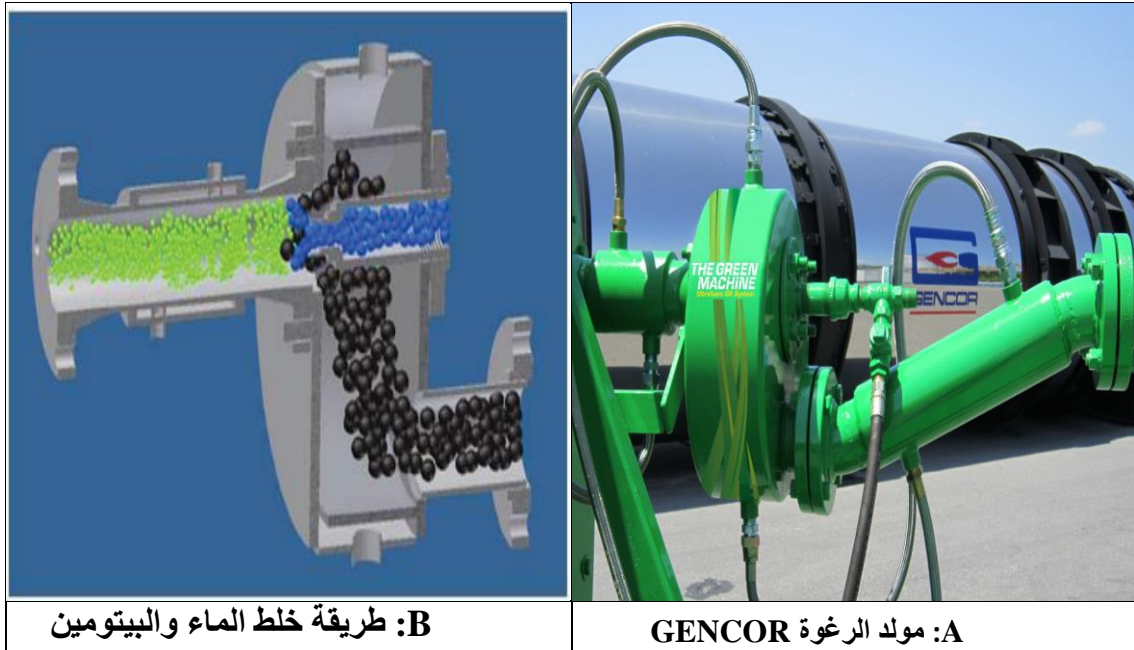
ابتكرت شركة Terex® عام 2008 نظاماً بسيطاً لاستخدام المياه في إنتاج البيتومين الرغوي، وهي شركة أمريكية مقرها مدينة ويستبورت في ولاية كونيتيكت ومنتشرة في جميع أنحاء العالم. ويتكون هذا النظام من خزان للتغذية بالماء مع نظام تحكم ومضخة وحجرة لتوليد البيتومين الرغوي، ومن ثم نقله بالأنابيب إلى الخلاط لمزجه مع الحصويات وإنتاج المجبول الدافئ. ويوضح الشكل (2-33) مخططاً لإنتاج المجبول البيتوميني الدافئ وفق نظام Terex® WMA [89].



الشكل (2-33): تقنية Terex® WMA

10. تقنية Ultrafoam GX2:

تم تطوير تقنية تصنيع المجلول البيتوميني الدافئ Ultrafoam GX إلى الجيل الثاني Ultrafoam GX2 من قبل شركة GENCOR INDUSTRIES INC ومقرها مدينة أورلاندو في ولاية فلوريدا الأمريكية. واعتمدت على مبدأ الحد من لزوجة الرابط البيتوميني باستخدام التقنيات الرغوية بهدف التقليل من درجات حرارة دمك وخط المجلول البيتوميني وتحسين قابلية تشغيله. وتم هذا التطوير بعد أن ابتكرت شركة GENCOR طريقة بسيطة وجديدة ودقيقة لحقن البخار في الرابط البيتوميني، تحقق رغوة متناسقة عند مستويات إنتاج مختلفة، بالاعتماد على طاقة الضخ فقط، دون الحاجة إلى تشغيل جهاز خلط. ويمكن بالتالي إدخال الماء والبيتومين إلى هذا النظام بمعدلات متغيرة وبدرجات حرارة مختلفة. وتبلغ كمية الماء المطلوبة لتحقيق الرغوة الكافية في هذا النظام حوالي 2-1.25% من وزن الرابط البيتوميني. وتوفر هذه التقنية الحاصلة على براءة اختراع، فتحات متغيرة لكل من الماء والبيتومين، ووسائل لضمان فعالية خلط الماء والبيتومين، حيث يتم حقن الماء في مركز تدفق البيتومين، وفتح صمام المياه المزود بنباض أوتوماتيكياً عند تطبيق ضغط الماء المطلوب. وتسمح صفيحة القطع الموجودة (diaphragm plate) بتدفق البيتومين بمعدلات مختلفة، مع الحفاظ على ضغط السائل، مما يؤدي لتشكل فقاعات بخار صغيرة وتوليد بيتومين رغوي أكثر اتساقاً كما هو موضح في الشكل (2-34) [90].



الشكل (2-34): تقنية Ultrafoam GX2

2.6.11.2. الإضافات المحتوية على الماء Water-Containing Processes:

وتعتمد هذه التقنية على استخدام المعادن الهيدروحرارية hydro-thermally كالزبوليت الصناعي، والذي هو عبارة عن سيليكات الألمنيوم الرطبة المطحونة، التي تحتوي على نسبة ماء بلوري

(18-22)% من وزنها. ويتحرر هذا الماء عند خلط الزيوليت مع البيتومين الساخن أو مع المجلول الساخن، مُسبباً حدوث الرغوة في المزيج وانخفاض في لزوجة البيتومين وتغطية أفضل للحصويات وتحسين قابلية تشغيل المجلول الناتج. وتُركز الدراسات السابقة المتعلقة بإضافة الزيوليت الصناعي للرابط البيتوميني على نوعين من الإضافات (Aspha-Min & Advera) [73].

1. ADVERA®:

وهي عبارة عن إضافات تنتجها شركة PQ Corporation في مدينة مالفيرن بولاية بنسلفانيا الأمريكية، والتي أنشئت بهدف إنتاج المجلول البيتوميني الدافئ. وتعتبر هذه الإضافات الموضحة في الشكل (2-35) نوعاً من أنواع الزيوليت الصناعي. وتتكون من سيلكات الألمنيوم الرطبة بشكل مسحوق يمر من المنخل (0.075mm) No. 200، وتحتوي على حوالي (18-21)% من الماء البلوري، ويتحرر الماء عن طريق زيادة درجة الحرارة فوق درجة الغليان، مما يؤدي إلى زيادة حجم الرابط البيتوميني وانخفاض لزوجته وتحسين قابلية تشغيل المجلول الناتج عند درجات الحرارة المنخفضة. ووفقاً للشركة المصنعة، فإن الحد الأدنى والأقصى لهذه الإضافات هو (0.1-0.3)% من الوزن الكلي للخلطة البيتومينية، وتبلغ درجات الحرارة المثلى لإنتاج المجلول (118-125) [91,92].



الشكل (2-35): إضافة ADVERA (الشكل، الصور الميكروسكوبية)

يتم إضافة ADVERA إلى الرابط البيتوميني عبر منفذ يقع أسفل المنفذ المزود بالبيتومين كما هو موضح في الشكل (2-36)، وذلك من أجل إشباعها بالبيتومين، وضمان عدم هروب أي حبيبة منها عبر العادم [93].



الشكل (2-36): طريقة تقديم ADVERA إلى الرابط البيتوميني في مجابيل البيتومين

يجب حماية هذه الإضافات من الأمطار وتخزينها بشكل صحيح. ويمكن تخزينها في أكياس أو عربات سكك حديدية للمشاريع الصغيرة والمتوسطة، و في صوامع للمشاريع الضخمة، كما هو موضح في الشكل (2-37) [91].



الشكل (2-37): طرق تخزين الـ ADVERA (أكياس، عربات سكك حديدية، صوامع)

ويظهر الشكل (2-38) تنفيذ قطاع من طريق عند المدخل الشرقي لحديقة يلستون الوطنية في الولايات المتحدة الأمريكية، باستخدام الزيوليت الصناعي Advera، كإضافة لتصميم المجبول البيتوميني الدافئ [92].



الشكل (2-38): الرصف بالمجبول البيتوميني الدافئ باستخدام إضافة Advera

2. Aspha-min®:

وهي عبارة عن زيوليت صناعي يحتوي على حوالي 21% من الماء، كما يوضحه الشكل (2-39)، والذي يتحرر في درجات حرارة $^{\circ}\text{C}$ (85-182). وتتم هذه الإضافة للرابط البيتوميني بنسبة 3.0% من الوزن الكلي للخلطة البيتومينية [94,95,96]. وتسمح هذه الإضافات بتخفيض درجة حرارة إنتاج المجبول البيتوميني بمقدار $^{\circ}\text{C}$ 30، مما يؤدي إلى توفير في الطاقة مقداره 9 كيلو واط لكل 1 طن من المجبول. وتحقق الإضافة أيضاً فوائداً بيئيةً جمة تتمثل بانخفاض انبعاث الدخان بنسبة 74 %، عند تخفيض درجات الحرارة بمقدار $^{\circ}\text{C}$ 26، علاوةً على تأمين راحة العاملين والموظفين في هذا المجال. ويتم حفظ هذه الإضافات بشكل مشابه لإضافة Advera في أكياس كبيرة أو في صوامع موضحة في الشكل (2-40) [97,98,99].



الشكل (2-39): إضافة Aspha-Min



الشكل (2-40): طريقة تخزين الـ Aspha-Min (أكياس كبيرة، صوامع)

الفصل الثالث

الزيوليت Zeolite (أنواعه، خواصه، تطبيقاته)

الزيوليت (تعريفه، أنواعه، أماكن تواجده)

البنية البلورية

التركيب الكيميائي

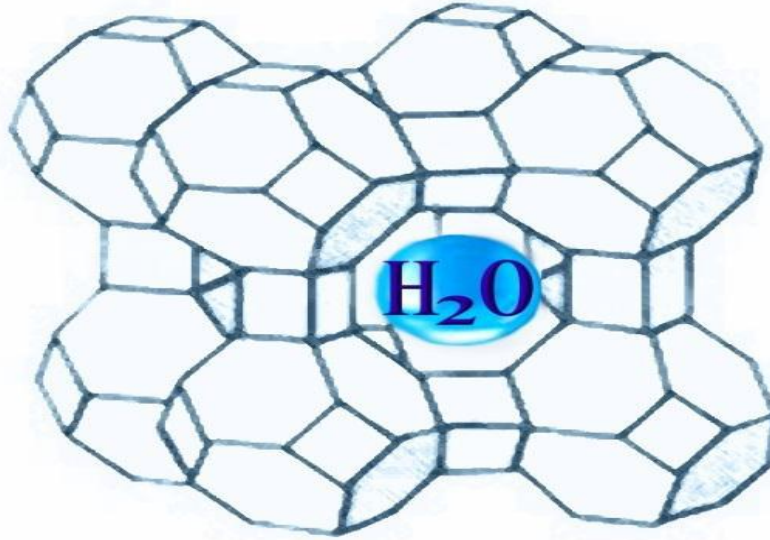
تطبيقات الزيوليت

طرائق التوصيف

1.3. مقدمة عامة:

يعود مصطلح الزيوليت (Zeolite) في الأصل إلى اللغة اليونانية، وهو مشتق من الكلمة (Zeo) التي تعني الغليان والكلمة (lithos) التي تعني الحجر. ويعود سبب هذه التسمية إلى إطلاق الزيوليت للماء بشكل بخار عند تسخينه بسرعة [100,101]. وقد تم اكتشافه عام 1756م من قبل العالم السويدي بارون أكسل فريدريخ كرونستيدت [102] Baron Axel Fredrick Cronstedt.

يوجد الكثير من معادن الزيوليت في الطبيعة ومعظمها من سيليكات الألمنيوم، وغالباً ما تُستخدم بسبب بُنيتها المسامية الصغيرة في المجالات الصناعية والزراعية والطبية والذرية والنووية والكيميائية، وفقاً لحجم المسامات [103]. وتشتهر الزيوليتات الطبيعية بكونها مرشحات طبيعية (Filter) تستطيع امتصاص الملوثات من الماء والهواء. ويوضح الشكل (1-3) بنية الزيوليت والماء المتوضع داخل المسامات الصغيرة [100].



الشكل (1-3): بنية الزيوليت والماء المتوضع داخل المسامات الصغيرة

يُعرف الزيوليت على أنه معدن سيليكات الألمنيوم المائية المحتوية على العناصر القلوية أو القلوية الترابية، وهو مادة بلورية ثلاثية الأبعاد مفتوحة البنية، تتكون من ارتباط رباعي الوجوه لكل من الألمنيوم $[AlO_4]^{5-}$ والسيليكا $[SiO_4]^{4-}$ [104]. ويمتلك الزيوليت تجاويفاً مفتوحة توفر مساحات داخلية وخارجية كبيرة، وتمثل أساس تفاعله البوزولاني العالي وحالته شبه المستقرة metastability، وذلك بسبب الشحنة السالبة التي تظهر على بنيتها [105,106,107]. ويمكن أن تعوض هذه الشحنة بواسطة كاتيونات العناصر القلوية أو القلوية الترابية، والتي بدورها يمكن أن تستبدل مع أيونات أخرى، مما يكسب الزيوليت خاصية التبادل الأيوني [100]. وتمتلك معادن الزيوليت بالإضافة إلى خاصية التبادل الأيوني، القدرة على فقدان المياه بنسبة 30% من وزنها الجاف دون حدوث أي تغير في بنيتها البلورية [107].

يقدر حجم الإنتاج العالمي من الزيوليت (2.5-3) مليون طن، وذلك وفقاً للمسح الجيولوجي الذي أجري في الولايات المتحدة الأمريكية عام 2007م، بالاستناد إلى المعلومات المتوفرة من البلدان المنتجة، حيث تنتج الصين النسبة الأكبر، كما هو موضح في الجدول (1-3) [108].

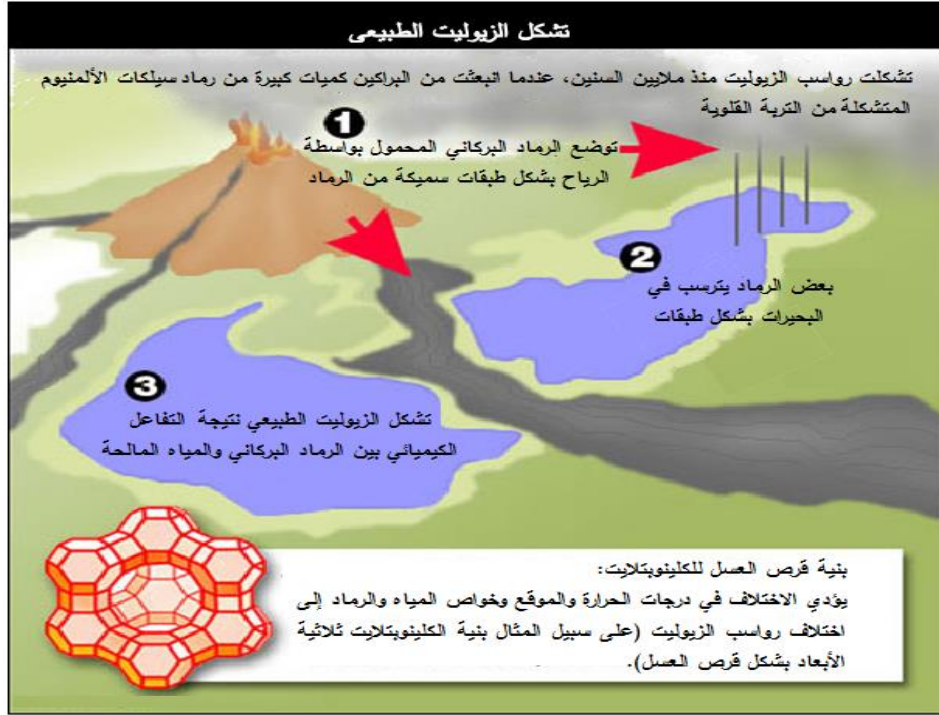
الجدول (1-3): إنتاج الدول من الزيوليت

الدولة	كمية الزيوليت المنتجة (طن)
الصين	(2.25-1.75) مليون
كوريا الجنوبية	175 ألف
اليابان	(140-160) ألف
الولايات المتحدة الأمريكية	56500
كوبا	(45-35) ألف
وهنغاريا وتركيا	(30-35) ألف
سلوفاكيا، نيوزيلاندا، بلغاريا، جنوب إفريقيا، جورجيا، استراليا، كندا، إيطاليا، اليونان	كميات قليلة

وتُقسم الزيوليتات وفقاً لنوعها إلى قسمين:

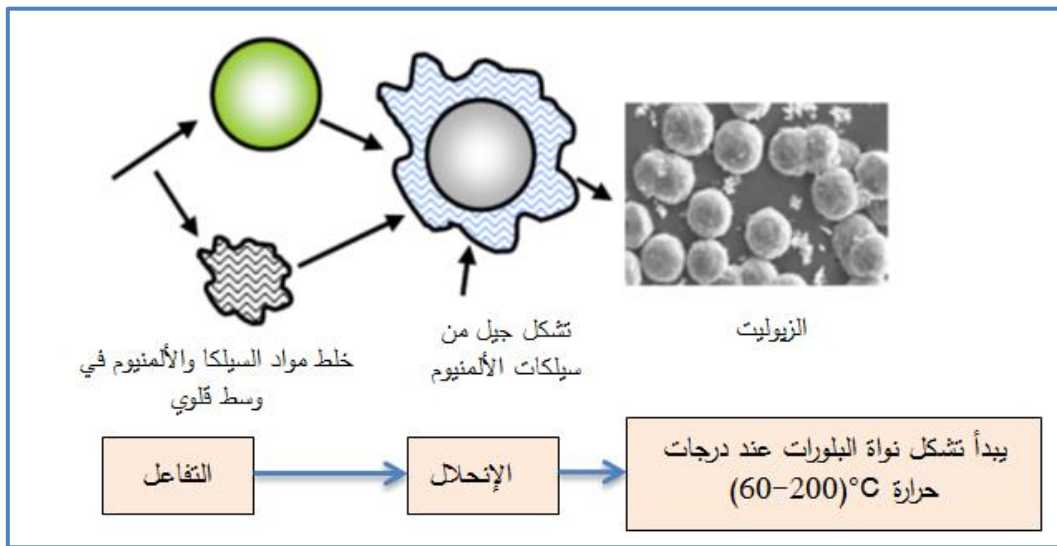
الزيوليتات الطبيعية: تكونت نتيجة العمليات الجيولوجية في الطبيعة، وتم حتى الآن التعرف على (50) نوع من الزيوليت الطبيعي، من أكثرها شهرة: الكلنوبتلايت، الشابازايت، الموردينايت، الإيرونايت، الفبرايت، والفلبسايت، وهي ذات كمية ونقاوة عالية [109].

تتشكل الزيوليتات في الطبيعة، كما هو موضح في الشكل (2-3)، نتيجة لتفاعل كيميائي بين الزجاج البركاني والمياه المالحة عند درجات حرارة مناسبة للارتفاعات الطبيعية، تتراوح بين $27-55^{\circ}\text{C}$ ودرجة حموضة (9-10). وتحتاج الطبيعة من 50-50000 سنة حتى يكتمل التفاعل المنتج لتلك الزيوليتات [103,110]. ونادراً ما تكون الزيوليتات المتواجدة في الطبيعة نقية، بل تحتوي على شوائب من معادن أخرى مثل الحديد، السافات، الكوارتز، أو زيوليت آخر، ولذلك تُستثنى من تطبيقات تجارية كثيرة عندما تكون النقاوة والتجانس من متطلباتها الأساسية [111].



الشكل (2-3): تشكل الزيوليت الطبيعي

الزيوليتات الصناعية: يتم تصنيعها عن طريق التفاعلات الكيميائية بين سيليكات الصوديوم Na_2SiO_3 ، وألومينات الصوديوم NaAlO_2 ، وأنواع مختلفة من المواد الحاملة للسيليكات والألومينات كالرماد المتطاير و معادن الطمي والبيرلايت، وذلك عند شروط محددة من درجات الحرارة المختلفة والضغط وزمن التفاعل [112,113]. وتعتبر منظمة الزيوليت العالمية هي المسؤولة عن ترقيم وتسمية الزيوليت، ومن أشهر أنواع الزيوليتات الصناعية هي: ZSM-5, X, Y, A, NaP1 [114]. ويوضح الشكل (3-3) طريقة تصنيع الزيوليت الصناعي [115].



الشكل (3-3): طريقة تصنيع الزيوليت الصناعي

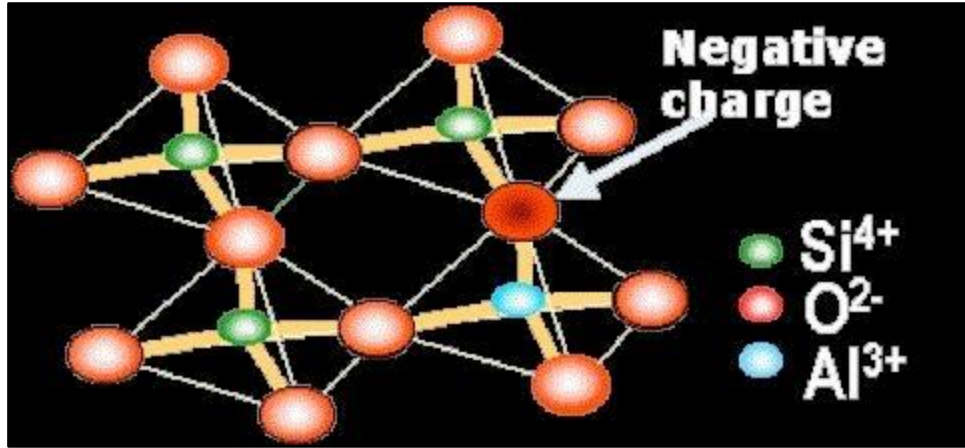
2.3. الزيوليت الطبيعي في الجمهورية العربية السورية:

تتميز الجمهورية العربية السورية بغناها بالثروات الطبيعية والمعادن الباطنية، وتعتبر إحدى ثلاث دول عربية تمتلك كنز الزيوليت الطبيعي بالتشارك مع المملكة الأردنية الهاشمية والجمهورية العربية اليمنية [116]. وقد دلت الاستكشافات الجيولوجية الهندسية التي أجرتها المؤسسة العامة للجيولوجيا عن تواجد الطبقات الصخرية الحاملة للزيوليت في المناطق الجنوبية الشرقية من البلاد وعلى بعد 220 Km (170) عند مناطق التماس بين منطقة الحماد شرقاً، والأطراف الشرقية والشمالية الشرقية لجبل العرب البركاني غرباً، ويتكشف في عدة مواقع كجبل السيس وتلال المكحيلات وتلة أم أذن في تل النجار. وأظهرت نتائج التحاليل بأن المواد الخام تتكون من الفليسيات والشابازيت والأنالسيم والهيروشيوليت، وكذلك الخامات البركانية الأخرى، كالأوليفين والإنستاتيت واللوسيت والأنوروثيت والبيروكسين، بالإضافة إلى الخامات الرسوبية كالمونتموريلونيت والكالسيت والكوارتز، التي يعود عمرها إلى العصر البليوسيني (منذ ثلاث إلى خمس ملايين عاماً مضى). ويتكشف معظمها على السطح أو بالقرب منه، وقد تكون مغطاة بالصخور الرسوبية أو التربة، مما يجعل عمليات استثمارها المنجمية بسيطةً وذات تكاليف مادية قليلة. ويقدر إجمالي الاحتياط الكلي للزيوليت في سوريا بنحو 655 مليون طن [117,118]، وأشارت بعض الدراسات أيضاً إلى تواجد الزيوليت في منطقة البسيط قرب القسطل وشمال شرقي طرطوس، إضافة إلى وجوده في المناطق البركانية جنوبية القطر مثل: تل دكوة، تل الحمر، تل كليب، وادي شبها والكسوة... الخ [119,120].

3.3. الخواص العامة للزيوليت:

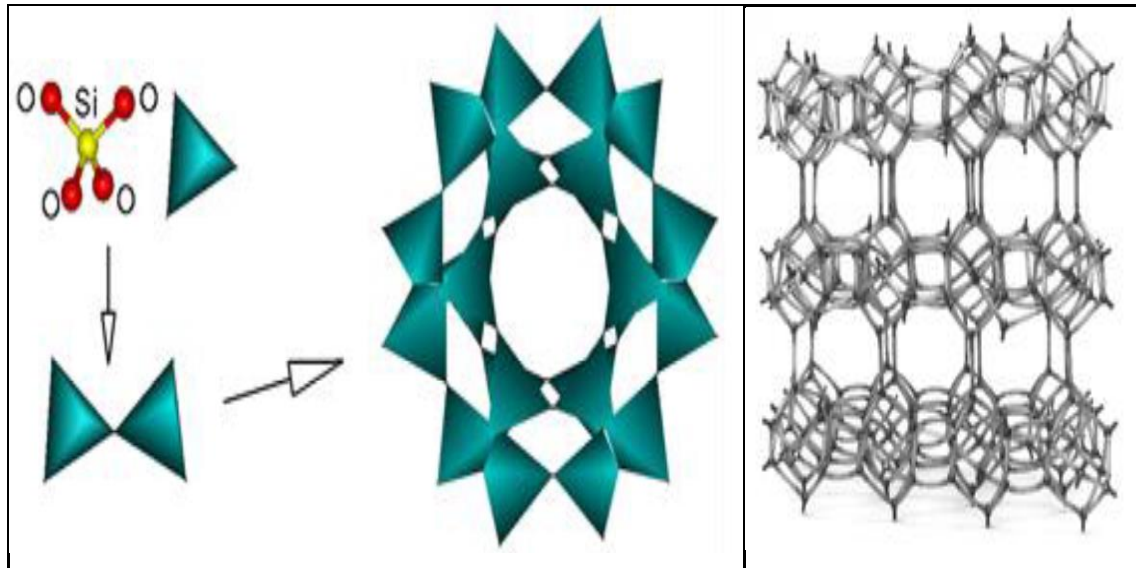
1.3.3. التركيب الهيكلي:

يكتسب الهيكل الزيوليتي شحنة سالبة بسبب وجود الألومنيا، والتي تتم معادلتها بواسطة كاتيونات العناصر الموجبة الأحادية مثل Na^+ , K^+ أو الثنائية مثل Ca^{+2} , Mg^{+2} . وتتكون البنية البلورية للزيوليت من وحدات البناء الرئيسية (PBUs) primary building units، ووحدات البناء الثانوية (SBUs) secondary building units، وتعتبر المجسمات الرباعية لكل من الألمنيوم AlO_4 والسيليكات SiO_4 وحدات البناء الرئيسية للزيوليت، كما هو موضح في الشكل (3-4)، الذي يشير إلى أن الأساس البنائي للزيوليت، هو سطح رباعي الوجوه مكون من أربع ذرات أوكسجين محيطة بذرات السيليكات والألمنيوم المركزية [121].

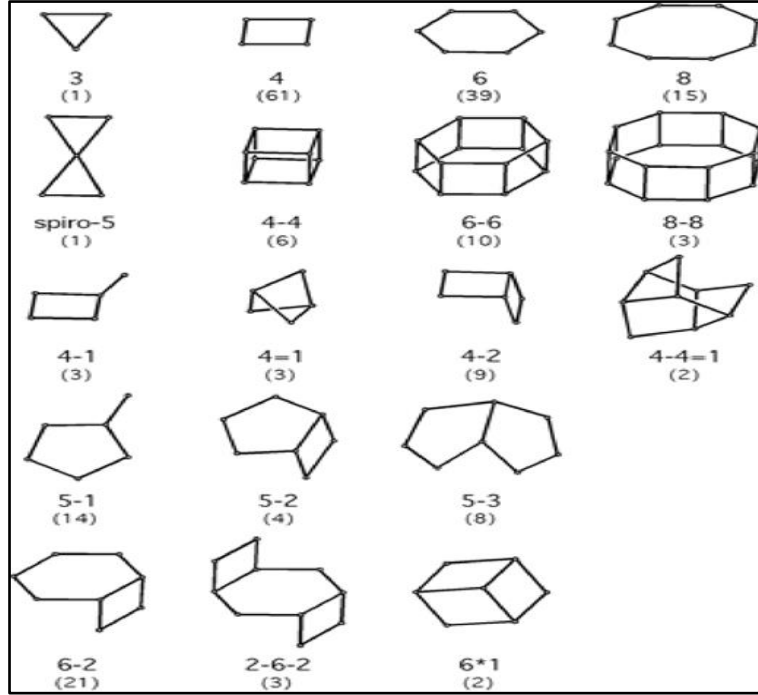


الشكل (4-3): التركيب الجزيئي للزيوليت

تتشكل وحدات البناء الثنائية في الزيوليت من خلال ارتباط مجسمات الألمنيوم والسيليكات مع بعضها البعض، عند الزوايا العائدة لبنية المجسم الرباعي، وتتصل هذه الوحدات داخلياً في نسيج متشابك متعدد السطوح، ويتصل هذا النسيج بدوره ليشكل شبكة ممتدة من التركيب البلوري للزيوليت، كما هو موضح في الشكل (5-3) [122]. ويمكن أن تأخذ وحدات البناء الثنائية المتكونة من ارتباط وحدات البناء الرئيسية أشكالاً هندسية مختلفة، كما هو موضح في الشكل (6-3) [123].

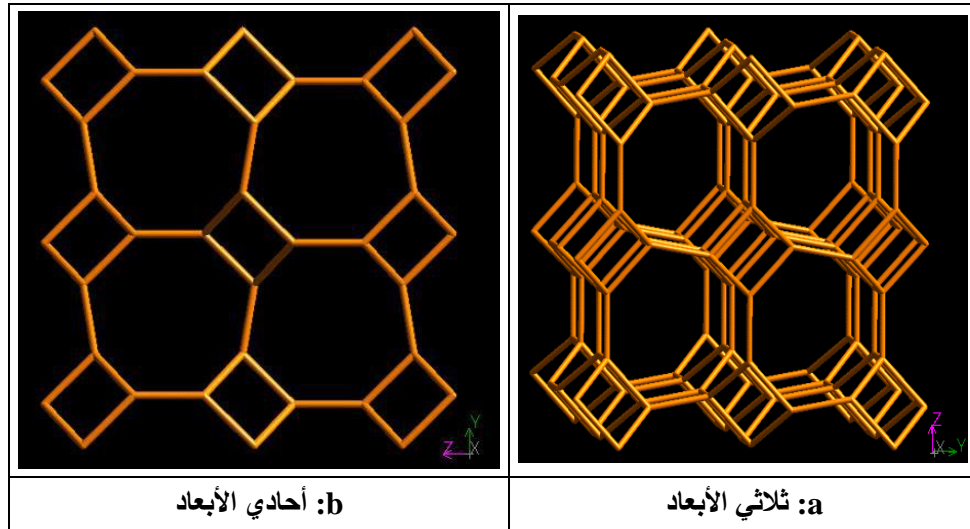


الشكل (5-3): التركيب الهيكلي للزيوليت

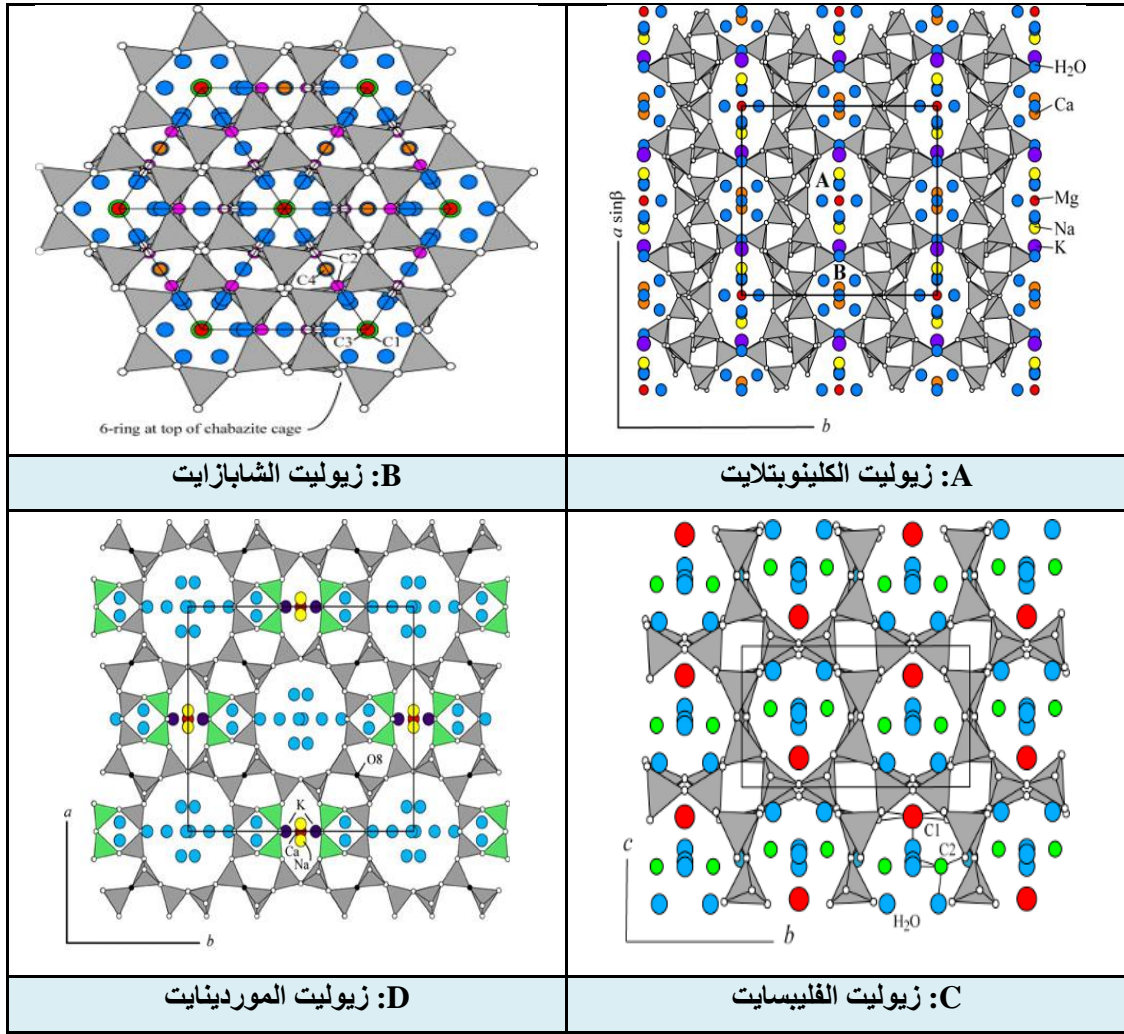


الشكل (6-3): وحدات البناء الثنائية في الزيوليت

تتشكل القنوات والفجوات الداخلية في الزيوليت من خلال ارتباط وحدات البناء الثنائية (SBUs) مع بعضها البعض كما هو موضح في الشكل (7-3)، الذي يمثل التركيب الهيكلي لزيوليت الفليبسايت المكون من 8 حلقات، ويوضح الشكل (8-3) بنية أشهر الزيوليتات الطبيعية [124].



الشكل (7-3): التركيب البنائي الهيكلي لزيوليت الفليبسايت



الشكل (8-3): بنية أشهر أنواع الزيوليت الطبيعي

2.3.3. التركيب الكيميائي:

يأخذ الزيوليت الطبيعي الصيغة الكيميائية التالية [125]:

$$M_x/n[(Al_2O_3)_x(SiO_2)_y] \cdot wH_2O$$

حيث أن:

M: كاتيونات العناصر القلوية أو القلوية الترابية.

N: تكافؤ الكاتيون

W: عدد جزيئات الماء

y/x هو نسبة السيلكا إلى الألومنيوم (Si/Al)، وتتراوح عادةً بين (1-5).

يعتمد قطر الفجوات الموجودة في بنية الزيوليت على درجة الحرارة والخصائص البنائية والكاتيونية للزيوليت ويتناسب مع عدد الذرات في الحلقات. ويمتلك الزيوليت الصناعي عادة 8،10،12 حلقة في بنائه، ويبلغ قطر الفجوات فيه 5،6،7 أنجستروم، بينما يبلغ قطر الفجوات 2.5 أنجستروم في الزيوليت الذي يمتلك 4،6 حلقات في تركيبه البنائي.

ويوضح الجدول (2-3) الصيغ الكيميائية لأشهر أنواع الزيوليت الطبيعي [126].

الجدول (2-3): الصيغ الكيميائية لأشهر أنواع الزيوليت الطبيعي

الزيوليت الطبيعي	الصيغة الكيميائية	وحدات البناء الثانوية SBU	أبعاد الفتحات (Å)	نسبة Si/Al
الموردينايت (MOR)	$(Ca, Na_2, K_2)Al_2Si_{10}O_{24} \cdot 7H_2O$	5-1	6.5×7 2.6×5.7	5.5
الكليبوبتلايت (CLI)	$(Na, K, Ca)_6(Si, Al)_3O_{72} \cdot 20H_2O$	4-4-1	3.6×4.6 3.1×7.5 2.8×4.7	6
الفيريت (FER)	$(Na, K)_2MgAl_3Si_{15}O_{36}(OH) \cdot 9H_2O$	5-1	3.5×4.8 4.2×5.4	5-10
الشابازايت (CHA)	$CaAl_2Si_4O_{12} \cdot 6H_2O$	6-6 أو 6 أو 4-2 أو 4	3.8×3.8	1-4
الإيرونايت (ERI)	$(K_2, Ca, Na_2)_2Al_4Si_{14}O_{36} \cdot 35H_2O$	6 أو 4	3.6×5.1	2-4
الفليبسايت (PHI)	$(K, Na, Ca)_{1.2}(Si, Al)_8O_{16} \cdot 6H_2O$	8 أو 4	3.8×3.8 3×4.3 3.2×3.3	1.5-4
الأنالسيم (ANA)	$NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$	6-2 أو 6 أو 4- [1,1] أو 1- 4-1 أو 4	1.6×4.2	2

4.3. تطبيقات الزيوليت:

1.4.3. في مجال إنتاج المجلول البيٲوني:

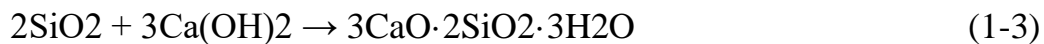
يسٲخدم البيٲون بشكل واسع في قٲاع الإنشاءات المٲنية والعسكرية بسبب خصائصه الفيزيائية والميكانيكية الجيدة [127]، إلا أنه يعاني من عدة عيوب بسبب التأثيرات السلبية في البيئة، والتي تتمثل بانبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون خلال مرحلة إنتاج الإسمنت البورتلاندي، بنسبة تقدر بحوالي 6% من مجمل الانبعاثات العالمية لهذا الغاز [128]. وتزداد احتمالات تدهور الخرسانة وتناقص ديمومتها مع مرور الوقت بسبب الصقيع والانكماش والتآكل، ويترتب عليها أضرار اقتصادية تتمثل بنفقات صيانة المنشآت الخرسانية وحمايتها وإصلاحها وإعادة تأهيلها. ولقد شكلت هذه الأسباب بيئة جذب للباحثين لتركيز دراساتهم على حل هذه المشاكل، وتوصلوا إلى اقترح مجموعة من الحلول، كتعزيز الخواص الميكانيكية والديمومة خلال مرحلة إنتاج المجلول البيٲوني، عن طريق تحسين كثافته الظاهرية [129]، وتقليل استهلاك الإسمنت البورتلاندي عن طريق استبدال جزء منه بالبوزولانا الطبيعية منها أو الصناعية، كخبث الأفران والرماد المتطاير وغبار السيلكا [130].

يعمل الزيوليت الطبيعي على تحسين ثبات المجلول البيٲوني عند استخدامه كإضافة أثناء الإنتاج، ويعزى ذلك إلى تفاعله البوزولاني وادمصاصه العالي (حتى 40% من وزنه)، ويمكن بالتالي استخدامه كعامل حامل للماء الداخلي، للمساعدة في زيادة ديمومة الخرسانة عند نسب (ماء/إسمنت) منخفضة، وفي زيادة مقاومة المجلول لهجوم الكبريتات ودورات التجمد والذوبان [131,132].

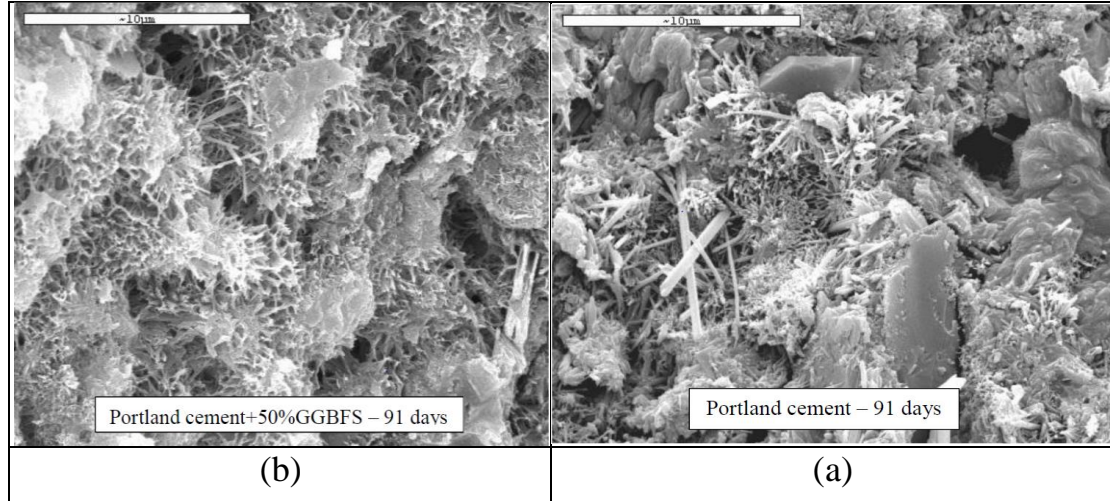
1.1.4.3. استخدام الزيوليت الطبيعي كمادة بوزولانية:

تتولد كميات كبيرة من هيدروكسيد الكالسيوم أثناء ترطيب الإسمنت عند إنتاج المجلول البيٲوني، بالإضافة إلى هيدرات سيلكات الكالسيوم وهيدرات ألومينات الكالسيوم المسؤولتين عن مقاومة ضغط البيٲون. تتشكل الرابطة CH نتيجة هدرجة الإسمنت والتي لا تمتلك أي خاصية إسمنتية، ويمكن أن تنحل بالماء، وأن تساهم في تشكيل عجينة إسمنتية عالية المسامية، ويمكن معالجة هذه المشكلة عن طريق خلط الإسمنت بالمواد البوزولانية [126].

تحتوي المواد البوزولانية على كميات كبيرة من (SiO₂, Al₂O₃) تستطيع مهاجمة الرابطة CH عند وجود الماء، وتشكيل منتجات إسمنتية مثل (3CaO·2SiO₂·3H₂O, 3CaO·Al₂O₃·6H₂O)، حيث يؤدي هذا لتشكيل عجينة إسمنتية صلبة كثيفة البنية الميكروسكوبية [126].



يؤدي التفاعل البوزولاني بين أكسيد السيليسيوم والألمنيوم (SiO_2 , Al_2O_3) في الزيوليت الطبيعي والرابطة CH، إلى تشكل هيدرات سيلكات الكالسيوم وهيدرات ألومينات الكالسيوم، مما يؤدي لزيادة كثافة الببتون. ويوضح الشكل (3-9) البنية المكروسكوبية عالية المسام لعينات الببتون المحتوية على الإسمنت فقط، والبنية المكروسكوبية على شكل شبكة من المسامات الصغيرة مع عدد كبير من بلورات هيدرات سيلكات الكالسيوم المتشكلة نتيجة ترطيب الإسمنت، لعينات الببتون المحتوية على: 50% إسمنت و 50% خبث الأفران (GGBFS) [126].



الشكل (3-9): البنية الميكروسكوبية للببتون
(a): عينة ببتون محتوية 100% إسمنت
(b): مزيج (50% إسمنت + 50% GGBFS)

تعتبر كمية المياه المنخفضة في بعض أنواع الببتون المحتوي على نسب ($W/C < 0.25$) كالبيبتون عالي الأداء، غير كافية لترطيب جميع حبيبات الإسمنت، وبالتالي لا تؤدي حبيبات الإسمنت غير المائية دورها في زيادة مقاومة الببتون. ويعتبر استبدال هذا الجزء من الإسمنت بالمواد البوزولانية، أفضل حل لتحسين بنية العجينة الإسمنتية. وفي هذا الاتجاه استخدم الزيوليت الطبيعي في العديد من الأبحاث كمادة بوزولانية خلال مرحلة إنتاج المجلول الببتوني [126,132].

2.1.4.3. استخدام الزيوليت الطبيعي كمادة حاملة للماء:

يتعرض الببتون خلال مرحلة إمالة الإسمنت إلى الانكماش الذاتي (Autogenous Shrinkage)، ويعود ذلك إلى التفاعل الحاصل بين الإسمنت والماء، والذي ينجم عنه نقصان حجم المونة الإسمنتية نتيجة نقصان الرطوبة الداخلية، مما يؤدي إلى التجفيف الذاتي للببتون، فتصبح بنيته المجهرية microstructure كثيفة مع وجود بعض المسامات الشعرية الصغيرة، وبالتالي يحدث الانكماش الذاتي بسبب الشد السطحي في المسامات الشعرية. تؤدي ظاهرة الانكماش الذاتي إلى حدوث الشقوق الببتونية، وخصوصاً عند استخدام نسب ماء منخفضة ونسب إسمنت مرتفعة ($W/C < 0.4$)، حيث تكون كميته المياه غير كافية لحدوث الإمالة [133,134].

يمكن منع حدوث الانكماش الذاتي للبيتون عن طريق المحافظة على رطوبة المسامات الشعرية، لكن المياه الخارجية المضافة لا تستطيع القيام بهذا الدور بسبب صعوبة وصولها إليها، نتيجة البنية المجهرية الكثيفة، وبالتالي لابد من اللجوء إلى المعالجة الداخلية، باستخدام معادن حاملة للمياه [135].

يمتلك الزيوليت قدرة كبيرة على امتصاص وادمصاص الماء عبر بنيته المسامية البلورية، ويمكن استخدامه كوسيلة للتحكم في الرطوبة الداخلية للبيتون، حيث تلعب جزيئات الزيوليت دور خزانات المياه المنتشرة في مختلف أنحاء البيتون، التي تزود المسامات الشعرية المتشكلة بالماء المدمص خلال مرحلة خلط البيتون [136].

أشارت العديد من الدراسات إلى أهمية الزيوليت الطبيعي في التخفيف من الانكماش الذاتي للبيتون، وتوصل Tuan وآخرون عام 2016، إلى أن إضافة الزيوليت الطبيعي إلى البيتون عالي الأداء بنسب وزنية % (5, 10, 12.5)، تؤدي إلى انخفاض قيم الانكماش الذاتي بمقدار % (64, 74, 77) بعد عمر 28 يوم [137].

يتعرض البيتون أيضاً إلى ظاهرة انكماش الجفاف، والتي تُعزى إلى تبخر الماء الموجود في المسامات والشقوق الشعرية الداخلية، مما يؤدي لارتفاع قيم إجهاد الشد وحدوث الشروخ، وينتشر هذا النوع من الانكماش في البيتون المحتوي على نسبة ماء مرتفعة $(W/C > 0.4)$ [138,139,140].

أحد الحلول المقترحة لانكماش الجفاف هي استخدام الزيوليت الطبيعي، حيث توصل Markiv وآخرون عام 2016، إلى أن استبدال الإسمنت بنسبة 10% من الكليوبتلايت، تؤدي إلى انخفاض قيم انكماش الجفاف بمقدار 2.6 مرة [141].

3.1.4.3. استخدام الزيوليت الطبيعي كحصىات وكعامل لإحداث الرغوة في البيتون الخفيف:

أشارت بعض الدراسات إلى إمكانية استخدام الزيوليت الطبيعي كحصىات خفيفة، وكعامل لإحداث الرغوة عند إنتاج البيتون الخفيف، حيث يعمل الزيوليت الطبيعي على تقليل وزن البيتون وزيادة مقدرته على العزل الحراري [142,143]. وفي هذا الاتجاه استخدم Karakurt وآخرون عام 2010 الزيوليت الطبيعي كحصىات خفيفة الوزن، وكعامل مساعد لإحداث الرغوة خلال مرحلة إنتاج البيتون الخلوي (Autoclaved Aerated Concrete (AAC)، حيث تم إنتاج البيتون الخلوي باستخدام الإسمنت والماء ومسحوق الحجر الكلسي ورمل الكوارتز، وبإضافة الزيوليت الطبيعي (الكليوبتلايت) وفق نسب وزنية % (25, 50, 75, 100) من وزن رمل الكوارتز، وذلك وفق تدرجين: الأول كحصىات ناعمة $100\mu m$ والثاني كحصىات خشنة $(0.5-1)mm$. وتوصلوا إلى أن النسبة المثلى لاستخدام الزيوليت الطبيعي كانت 50%، عند استخدامه كحصىات ناعمة و75%، عند استخدامه كحصىات خشنة، والتي تم الحصول عندها على أفضل مقاومة ضغط وأفضل عزل حراري، مع انخفاض ملحوظ في وزن البيتون [144].

2.4.3. في مجال تثبيت التربة:

يستخدم الإسمنت عادةً لتقوية الترب الرملية أو الغضارية ورفع خصائصها الميكانيكية والفيزيائية، إلا أنه يمكن استخدام الزيوليت الصناعي والطبيعي، لتحسين خواص مزيج الإسمنت والتربة الرملية، وفي تثبيت الردميات وطبقات أساس الطرق والسدود [145].

درس Abasi وآخرون عام 2016، تأثير الكليوبتلايت في مواصفات مزيج الإسمنت والتربة الرملية، حيث تمت إضافة الإسمنت للتربة وفق أربعة نسب وزنية % (2, 4, 6, 8)، وإضافة الكليوبتلايت وفق ستة نسب وزنية من وزن الإسمنت % (0, 10, 30, 50, 90, 100)، مع اعتماد عمر 28 يوم كزمن معالجة المزيج، لضمان اكتمال حدوث التفاعل البوزولاني. وأظهرت هذه الدراسة بأن استخدام الكليوبتلايت يؤدي إلى ازدياد مقاومة الضغط البسيط أياً كانت نسب الإسمنت المضافة للتربة، وإلى أن نسبة الكليوبتلايت المثالية هي 30% من وزن الإسمنت، والتي تحسنت عندها مقاومة الضغط البسيط بمقدار 78%. كما أشارت إلى أن انخفاض المسامية للمزيج المرصوص يؤدي إلى تحسن كبير في مقاومة الترب الإسمنتية، وتحسن أقل لمزيج التربة الرملية والإسمنت والزيوليت [146].

استخدم Saeed وآخرون عام 2016، الزيوليت الصناعي لتحسين خواص الترب الطينية العضوية، بالتشارك مع الكلس المطفأ، وتم في هذه الدراسة إضافة الكلس المطفأ بنسب وزنية % (5, 10)، والزيوليت الصناعي بنسب % (2.5, 5, 10)، وإجراء اختبار مقاومة الضغط البسيط على عينات (38mm, 80mm) عند فترات إنضاج (0, 7, 14, 28, 90) يوم. وأشارت نتائج هذه الدراسة إلى الدور الهام للزيوليت الصناعي في تحسين ثبات الكلس وقوة الترب الطينية العضوية، بمقدار 185% عند عمر 90 يوم لمزيج (التربة العضوية + 10% كلس مطفأ + 10% زيوليت صناعي) [147].

3.4.3. استخدام الزيوليت في إنتاج المجلول البيتوميني الدافئ WMA:

تشير الدراسات السابقة إلى إمكانية استخدام الزيوليت لإنتاج المجلول البيتوميني الدافئ بشكل مشابه لطريقة إنتاج المجلول الساخن. ويوضح الجدول (3-3) مراحل إنتاجه وفقاً للبرنامج الوطني الأمريكي لأبحاث الطرق السريعة National Cooperative Highway [148,149].

تؤدي إضافة معادن الزيوليت إلى المجلول البيتوميني، إلى إحداث فروق هامة في درجات حرارة خلطه ورصه، وتعتمد نسبة إضافة الزيوليت للمجلول البيتوميني على خصائصه ومحتواه من الماء ومعدل إطلاقه له. و تتراوح نسبة إضافته، وفقاً للدراسات المرجعية السابقة، بين % (0.25-1) من الوزن الكلي للمجلول كالتالي [150]:

- الزيوليت الصناعي A: % (0.25-0.3).
- الزيوليت الصناعي Na-P1: 0.5% .
- الكليوبتلايت: 1%

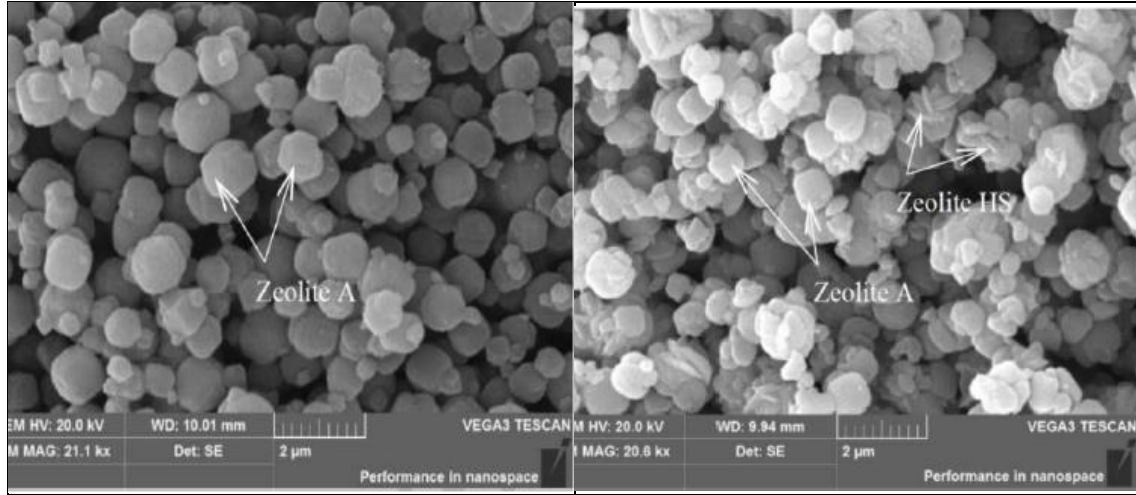
تعتمد منهجية استخدام الزيوليت في إنتاج المجلول البيتوميني الدافئ، على إجراء تخفيض تجريبي في درجات حرارة الإنتاج عند نسب مختلفة من الزيوليت، ومن ثم دراسة العلاقة بين محتوى المجلول من الزيوليت عند درجات الحرارة المفروضة وبين التغيرات الحاصلة في خواصه، وعلى الرغم من أن هذه العملية شاقة وتحتاج لزمان طويل، إلا أنه لا توجد طريقة أخرى بديلة حتى يومنا هذا [150].

الجدول (3-3): مراحل تصميم المجلول البيتوميني الدافئ باستخدام معادن الزيوليت

المرحلة تسلسل	مراحل التصميم	الفرق بين المجلول الدافئ وبين الساخن
1	توصيف الزيوليت	<ul style="list-style-type: none"> اختيار نوع الزيوليت. تحديد النسبة المثلى لاستخدامه (وفق طريقة مارشال على سبيل المثال). تحديد إمكانية الحاجة لاستخدام موانع الانسلاخ لتحسين التصاق الرابط بالحصويات.
2	توصيف الحصويات وتصميم المجلول البيتوميني	<ul style="list-style-type: none"> تصميم المجلول بدون إضافات إنتاج المجلول الدافئ المعدل بالزيوليت عند نسبة الإضافة المثلى
3	تحديد نسبة الرابط البيتوميني	نفس الطريقة المتبعة في المجلول الساخن
4	تحديد مقدار التخفيض في درجات حرارة الإنتاج	تجريبياً وفقاً لدراسات مارشال وقابلية التشغيل
5	التجارب المخبرية وتقييم المجلول النهائي	نفس الطريقة المتبعة بالمجلول الساخن

1.3.4.3. تأثير معادن الزيوليت في خواص الرابط البيتوميني:

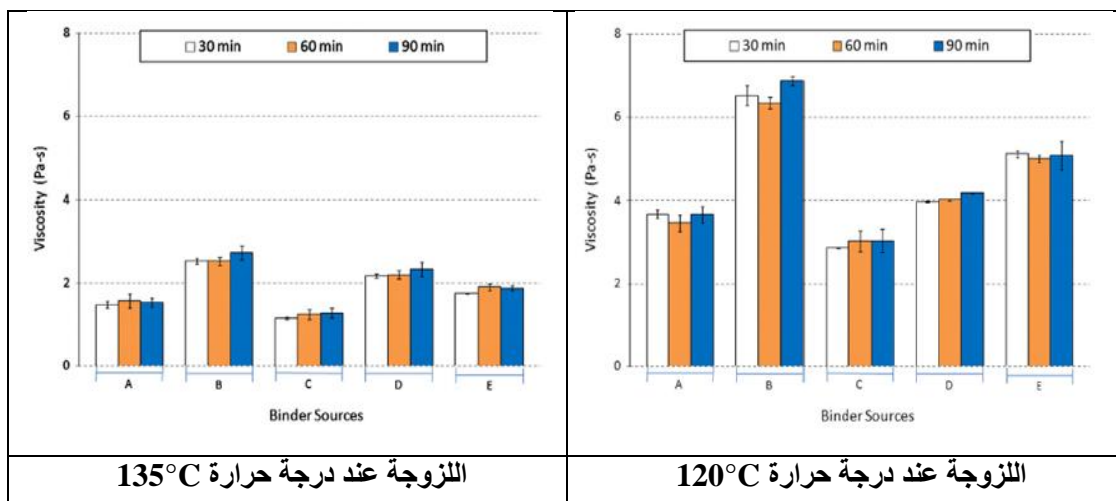
تشير نتائج الدراسات السابقة المتعلقة بتعديل خواص الرابط البيتوميني بالزيوليت إلى: ازدياد قساوة الرابط المعدل بالزيوليت وتناقص قيم غرزه، وارتفاع درجة حرارة تمييعه [151,152,153]. ومن ناحية أخرى، تعتبر عملية إجراء وتنفيذ اختبارات لزوجة الرابط البيتوميني المعدل بالزيوليت من أصعب الاختبارات، وذلك لأن الزيوليت جسم صلب لا ينحل بالبيتومين. وفي هذا الصدد أعطت الدراسات السابقة نتائج متضاربة، ففي حين أشارت بعض الدراسات إلى ثبات لزوجة الرابط أو ازديادها بعد التعديل بالزيوليت، وتوصلت أخرى إلى أن إطلاق الزيوليت للماء مع مرور الوقت، يؤدي إلى انخفاض بسيط في لزوجة الرابط. ويمكن أن يعزى اختلاف هذه النتائج إلى اختلاف البارامترات المعتمدة أثناء قياس اللزوجة، كدرجة الحرارة وزمن خلط الزيوليت بالرابط [150, 151]. ويظهر الشكل (10-3) صور المسح الإلكتروني SEM للزيوليت الصناعي A والزيوليت HS [154,155].



الشكل (3-10): صور المسح الإلكتروني SEM للزيوليت الصناعي A والزيوليت HS

درس Sağlık وآخرون عام 2016 لزوجة الرابط البيتوميني 50/70 المعدل بإضافات الزيوليت الصناعي التجارية عند نسب وزنية % (4, 6, 8, 12)، وبالإضافات العضوية بنسبة 3%، وتوصلوا إلى عدم حدوث تغيرات هامة في قيم لزوجة الرابط المعدل بالزيوليت، في حين أبدى الرابط المعدل بالإضافات العضوية K انخفاضاً ملحوظاً في لزوجة الرابط [156]. وتتفق هذه الدراسة مع نتائج الدراسة الأمريكية التي قام بها Gandhi عام 2008 حول تأثير الزيوليت الصناعي Aspha-min في خواص الرابط البيتوميني، وذلك من جهة عدم حدوث تغيرات هامة في لزوجة الرابط المعدل بالزيوليت الصناعي عند درجات الحرارة °C (135, 120) [157].

خلصت دراسة Akisetty وآخرون عام 2007 أيضاً، إلى زيادة لزوجة الرابط البيتوميني المعدل بإضافات الزيوليت الصناعي Aspha-min. ودرس فيها الباحثون تأثير الزيوليت الصناعي في قيم لزوجة خمسة أنواع من الرابط البيتوميني المعدل بإضافات المطاط بنسبة وزنية 10% من وزن الرابط البيتوميني، وذلك عند أزمنة خلط مختلفة (30, 60, 90)min، ونسبة إضافة من الزيوليت الصناعي مقدارها 0.3% من الوزن الكلي للمجبول البيتوميني (نسبة الرابط المثلى المفروضة 6%). ويوضح الشكل (3-11) نتائج اختبارات اللزوجة المنفذة عند درجات حرارة مختلفة °C (135, 120) [95,158]. وتتفق نتائج دراسة RÓG مع نتائج دراسة Amirkhanian، حيث أشارتا إلى ازدياد لزوجة الرابط 35/50 المعدل بالزيوليت الصناعي بنسب % (3.5, 5.5, 7.5) بالمقارنة مع الرابط النقي [159]. وأشار Zou وآخرون إلى نفس النتيجة، حيث توصلوا إلى زيادة لزوجة الرابط البيتوميني PG 70-28 المعدل بإضافات الزيوليت الصناعي Aspha-Min بنسبة وزنية 6% [160].



الشكل (3-11): نتائج اختبارات اللزوجة عند درجات حرارة °C (120, 135) (Akisetty وآخرون، 2007)

تتعارض نتائج دراسة Sengoz وآخرون عام 2014 مع نتائج الدراسات السابقة، والتي تضمنت دراسة تأثير الزيوليت الصناعي وزيوليت الكلينوبتلايت في خواص الرابط البيتوميني 50/70، حيث توصل الباحثون فيها إلى تناقص لزوجة الرابط عند درجتي الحرارة °C (135, 160)، بعد زمن 20 دقيقة من إضافة الزيوليت للرابط بنسبة وزنية 5% [161, 162]. وتتفق دراسة Wasiuddin وآخرون مع دراسة Sengoz من جهة حدوث انخفاض بسيط في لزوجة الرابط [163].

درس Woszuk وآخرون عام 2017 لزوجة الرابط البيتوميني المعدل بالزيوليت عند درجتي الحرارة °C (135, 160)، وبعد أربعة فترات زمنية (15, 30, 45, 60) min من إضافته للرابط، مستخدمين في دراستهم بيتومين ذي غرز 35/50 وكل من الزيوليت الصناعي (NaP1) والطبيعي (الكلينوبتلايت)، وتوصلوا إلى تناقص لزوجة الرابط البيتوميني بشكل بسيط، بعد مرور 45min على إضافة الزيوليت، بغض النظر عن نوعه ودرجة حرارة الاختبار [151].

ركز Lai وآخرون عام 2009 على شرح ظاهرة البيتومين الرغوي، وفقاً لإضافات الزيوليت. وفي هذا المنحى درسوا إطلاق الزيوليت للماء بالعلاقة مع الزمن ودرجة الحرارة، بالاعتماد على الخسارة في الكتلة، وتم التحقق من تأثير كمية الزيوليت المضافة في حجم الرابط البيتوميني. وأشارت نتائج دراستهم إلى أن الزيوليت الصناعي (Linde A) يُطلق الماء تدريجياً مع مرور الوقت، ويحدث الثبات والاستقرار بعد حوالي (20-40) min، وذلك وفقاً لدرجة الحرارة °C (76.6-121.16). كما أشارت إلى أنه كلما ازدادت درجة الحرارة كلما ازداد تبخر الماء من بنية الزيوليت، وإلى تحسن قابلية التشغيل للمجول البيتوميني المعدل بالزيوليت بعد مرور 20min على الأقل من إضافته، وأوصت هذه الدراسة بضرورة أن تكون درجات حرارة الخلط فوق °C (99) والأمثل بين °C (110-120)، وذلك لضمان فعالية الرغوة الحاصلة عند إضافة الزيوليت للبيتومين [164].

2.3.4.3. تأثير معادن الزيوليت في خواص المجلول البيتوميني:

أجرى Hurley and Prowell عام 2005 أول دراسة مخبرية حول استخدام الزيوليت الصناعي في تصميم الخلطات البيتومينية الدافئة، وتضمنت دراستهم استخدام نوعين من الحصويات (الغرانيت والحجر الكلسي) ونوعين من الرابط البيتوميني (PG 64-22, PG 58-28)، بالإضافة إلى استخدام الزيوليت الصناعي Linde A، وتم دمك العينات عند درجات الحرارة $^{\circ}\text{C}$ (149, 129, 110, 88)، أما درجات حرارة الخلط فكانت أعلى بعشرين درجة من درجات حرارة الدمك. وأشارت نتائج هذه الدراسة إلى تحسين درجة الدمك للعينات المحتوية على الزيوليت (وفقاً لقيم الفراغات الهوائية)، بغض النظر عن نوع البيتومين ونوع الحصويات ودرجة حرارة الدمك، وإلى انخفاض مقاومة المجلول الدافئ ضد تأثير المياه. وأظهرت النتائج أن مقاومة التشوه الدائم تتعلق، بشكل رئيسي، بنوع الحصويات والبيتومين وبدرجة أقل بحرارة الدمك، حيث تحسنت مقاومة التشوه الدائم للعينات المحتوية على الحصويات الكلسية والبيتومين PG 58-28 المرصوفة عند درجة حرارة 129°C [56].

أشار Mosa وآخرون عام 2020 إلى إمكانية استخدام الزيوليت الصناعي Aspha-Min لتخفيض درجات حرارة إنتاج المجلول البيتوميني بمقدار 20°C ، مع حدوث بعض التغيرات في خواصه كتناقص قيم الثبات والكثافة، وازدياد محتوى الفراغات الهوائية، مع بقاء مجمل النتائج ضمن حدود المواصفات وقريبة من خواص المجلول الساخن [165]. وفي دراسة مماثلة توصل Al-Jumaili وآخرون عام 2015 إلى نتائج مشابهة، لكن حساسية المجلول البيتوميني للرطوبة كانت خارج حدود المواصفات المسموحة، والقاضية بأن تكون مقاومة المجلول البيتوميني للرطوبة $>80\%$ [166].

يتعرض سطح الطريق لتأثير العوامل المناخية التي يمكن أن تؤدي لفقدان المجلول البيتوميني لخواصه الميكانيكية، وبالتالي فإن تخفيض درجات حرارة إنتاج المجلول البيتوميني يؤدي لعدم التجفيف الكامل للحصويات والتصاق أضعف بالرابط البيتوميني، وبالتالي إلى قصر عمره وديمومته [167,168]. ووفقاً لذلك لاحظ Sanchez-Alonso وآخرون عام 2011، انخفاض مقاومة المجلول البيتوميني الدافئ المصمم باستخدام الزيوليت ضد تأثير المياه بمقدار $5-8\%$ ، بالمقارنة مع المجلول الساخن، وذلك عند انخفاض درجات حرارة إنتاجه بمقدار 20°C [169]. وتوصلت دراسة Woszuik وآخرون عام 2016 إلى نتائج مشابهة. في حين أوصت دراسة Hurley and Prowell عام 2005 باستخدام الكلس المطفأ بنسبة 1.5% لتحسين مقاومة المجلول لتأثير المياه [56,170]. وتوصلت دراسات أخرى إلى نتائج مغايرة، حيث أشار Judycki وآخرون عام 2011، إلى تحسين معامل مقاومة الشد غير المباشر ITSR للخلطات البيتومينية الدافئة المحتوية على الزيوليت، مع تناقص درجة حرارة الإنتاج من 160°C إلى 135°C . واستخدم الباحثون في دراستهم بيتومين ذو غرز 35/50، وتوصلوا إلى ازدياد مقاومة الخلطات الدافئة المحتوية على الزيوليت ضد تأثير المياه بمقدار 6.3% ، وبمقدار 5.6% للآخرى المحتوية على البوليميرات [171].

تعتبر مقاومة المجلول البيتوميني للتخدد عاملاً هاماً ينبغي التركيز عليه خلال مرحلة إنتاج المجلول الدافئ، حيث تؤثر الأخاديد التي تظهر على سطح الطريق خلال استثماره في راحة وأمان القيادة، وتكون عرضةً لتجمع مياه الأمطار والثلوج فيها، مما يؤدي لزيادة احتمالية وقوع الحوادث المرورية [172]. ولقد أشارت الدراسات المعتمدة على استخدام الزيوليت الصناعي Na-P1 والكلينوبتلايت إلى تحسن مقاومة تخدد المجلول البيتوميني [20,28]، في حين أدت إضافة الزيوليت الصناعي Linde A إلى تناقصها [171]، ويمكن أن تعزى هذه الاختلافات في النتائج إلى اختلاف طبيعة وتركيب الزيوليتات المدروسة، وتباين معدل إطلاقها للماء، وبالتالي اختلاف فعالية الرغوة الحاصلة في المزيج. ولأجل المقارنة فقط فإن البيتومين الرغوي المصمم وفق تقنيات مختلفة معتمدة على إضافة الماء بشكل مباشر يحتوي على نسبة مياه 1-3% [172-176].

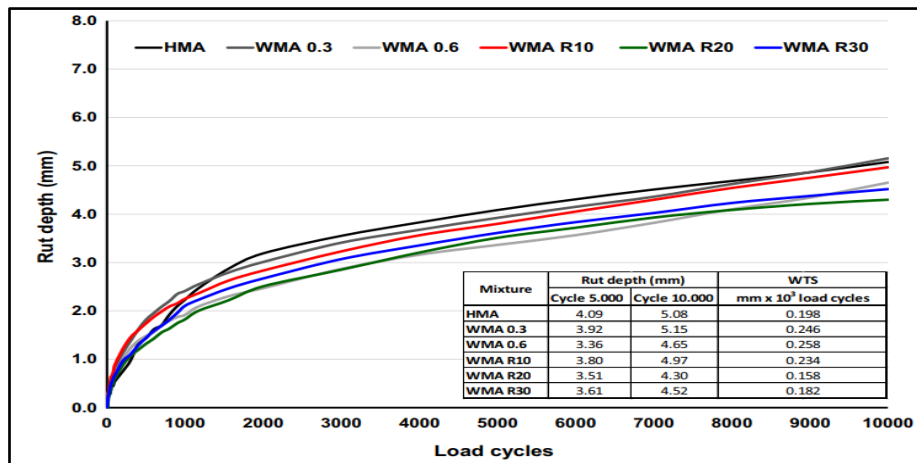
تحقق Gandhi وآخرون عام 2010 من تأثير التعب طويل الأمد في خواص المجلول البيتوميني الدافئ المنتج باستخدام إضافات الزيوليت الصناعي Aspha-Min بنسبة 0.3% من الوزن الكلي للمجلول. واستخدموا في دراستهم بيتومين من الصنف PG 64-22 ونوعين من الحصويات (الغرانيتية والرخامية)، مع إضافة الكلس المطفأ كمانع انسلاخ بنسبة 1%، حيث تم خلط عينات المجلول البيتوميني الساخن عند درجة حرارة 150 °C، وعينات المجلول الدافئ عند درجة حرارة 120 °C، في حين كانت درجات حرارة الدمك أقل بـ 5 °C، وتم تعريض عينات المجلول البيتوميني المرصوفة للتعب طويل الأمد مخبرياً، عن طريق وضعها بفرن ذي درجة حرارة 85 °C لمدة 120 ساعة (هذه الطريقة تحاكي تعب المجلول البيتوميني لمدة (10-7) سنوات). وأشارت النتائج إلى عدم حدوث تغيرات هامة في قيم معامل مرونة المجلول البيتوميني الدافئ المعدل بالزيوليت والمعرض للتعب، وإلى ازدياد مقاومته لتأثير الرطوبة، بغض النظر عن نوع الحصويات المستخدمة، وإلى تناقص مقاومة تخدد المجلول المعدل بالزيوليت قبل وبعد التعرض للتعب [177].

في دراسة مشتركة لباحثين من كوبا وإسبانيا، درس Alonso وآخرون عام 2013 إمكانية استخدام الزيوليت الطبيعي الكوبي (ذو رطوبة 14.3%)، كحصويات ناعمة وكفيلر في تصميم الخلطات البيتومينية الدافئة، ومقارنته مع الزيوليت الصناعي (Aspha-min)، وذلك لجهة التأثير في خصائص مارشال ومعاملات الصلابة والحساسية تجاه الرطوبة للخلطات المصممة. وقد أظهرت نتائج الاختبارات المنفذة على المجلول البيتوميني، عند درجات الحرارة الموضحة في الجدول (3-4) فعالية الزيوليت في الحد من درجات حرارة خلط المجلول البيتوميني. وأبدت الخلطات البيتومينية المصممة باستخدام الزيوليت الطبيعي والصناعي كفيلر عند نسبة إضافة 0.3% من الوزن الكلي للخلطة أداءً متماثلاً. وأظهرت الخلطات البيتومينية المصممة باستخدام الزيوليت الطبيعي كفيلر نتائج أفضل من حالة استخدامه كرم، وتم الحصول على أفضل النتائج وفق اختبار مارشال عند إضافته كفيلر وفق نسبة 0.6%، وأعلى قيم للمقاومة ضد تأثير المياه، مع ملاحظة أن جميع إضافات الزيوليت لم تحقق متطلبات المواصفات العامة للطرق والجسور الإسبانية، والتي تنص على أن تكون القيمة الدنيا للحساسية تجاه الرطوبة 85% [178].

الجدول (3-4): درجات حرارة الخلط المستخدمة في دراسة (Alonso وآخرون)

نوع الخلطة	المرجعية	المعدلة بالزيوليت الطبيعي
درجة حرارة الحصويات °C	150-160	130-140
درجة حرارة الرابط البيتوميني °C	150-160	150-160
درجة حرارة الخلط °C	150-160	130-140
درجة حرارة الدمك °C	145-155	120-125
زمن الخلط (دقيقة)	3	3

في بحث أجري في تشيلي عام 2018، درس Vidal وآخرون خصائص الخلطات البيتومينية المحتوية على الزيوليت الطبيعي التشيلي (ذو نسبة رطوبة 12.6%) ومواد الرصف المعاد تدويرها. وتم في هذه الدراسة تصميم خمسة خلطات بيتومينية دافئة وفق الآتي: **الأولى:** باستخدام الزيوليت الطبيعي بنسبة 0.3% من الوزن الكلي للحصويات، **والثانية:** باستخدام الزيوليت الطبيعي بنسبة 0.6%، **والثالثة والرابعة والخامسة:** باستخدام الزيوليت الطبيعي بنسبة 0.6% وبمحتوى مواد الرصف المعاد تدويره وفق نسب مختلفة (10, 20, 30%)، وتمت مقارنتها مع الخلطة البيتومينية الساخنة المرجعية (HMA). وأشارت نتائج هذه الدراسة إلى إمكانية تصنيع خلطات بيتومينية دافئة باستخدام الزيوليت الطبيعي عند درجات حرارة أقل بمقدار 20°C من الخلطات الساخنة، مع أو بدون استخدام مواد الرصف المُعاد تدويره، وإلى تحسن مقاومة الخلطات الدافئة للتخدد كما هو موضح في الشكل (3-12)، مع حساسية قليلة للرطوبة وتلاصق جيد مع الحصويات [179].



الشكل (3-12) نتائج اختبار مسار العجلة عند درجة حرارة 50°C وفقاً لـ (Vidal وآخرون)

توصل Josver وآخرون عام 2018، و Turpo وآخرون عام 2017 إلى إمكانية استخدام الكليوبتلايت ذي محتوى رطوبة 2.93% في إنتاج المجلول البيتوميني الدافئ، عند نسبة إضافة مقدارها 2% من الوزن الكلي للمجلول [180,181].

2.4.4.3. في المحفزات:

استخدم الزيوليت على نطاقٍ واسعٍ كمحفز، وذلك بفعل العديد من الأسباب مثل: طبيعة نفوذته المسامية التي تمنح الزيوليت مساحةً سطحية كبيرة تسمح للتفاعلات أن تحدث عليها، شكل وحجم أنظمة المسام المحددة التي تمارس تأثيراً فراغياً على التفاعلات، وبالتالي التحكم بمرور الكواشف المطلوبة فقط، كما هو مبين بالشكل السابق (3-13). وبسبب الطبيعة الانتقائية الشكلية للزيوليت يُشار إليها أحياناً بأنها محفزات انتقائية للشكل [183].

3.4.4.3. في تفاعلات التبادل الأيوني:

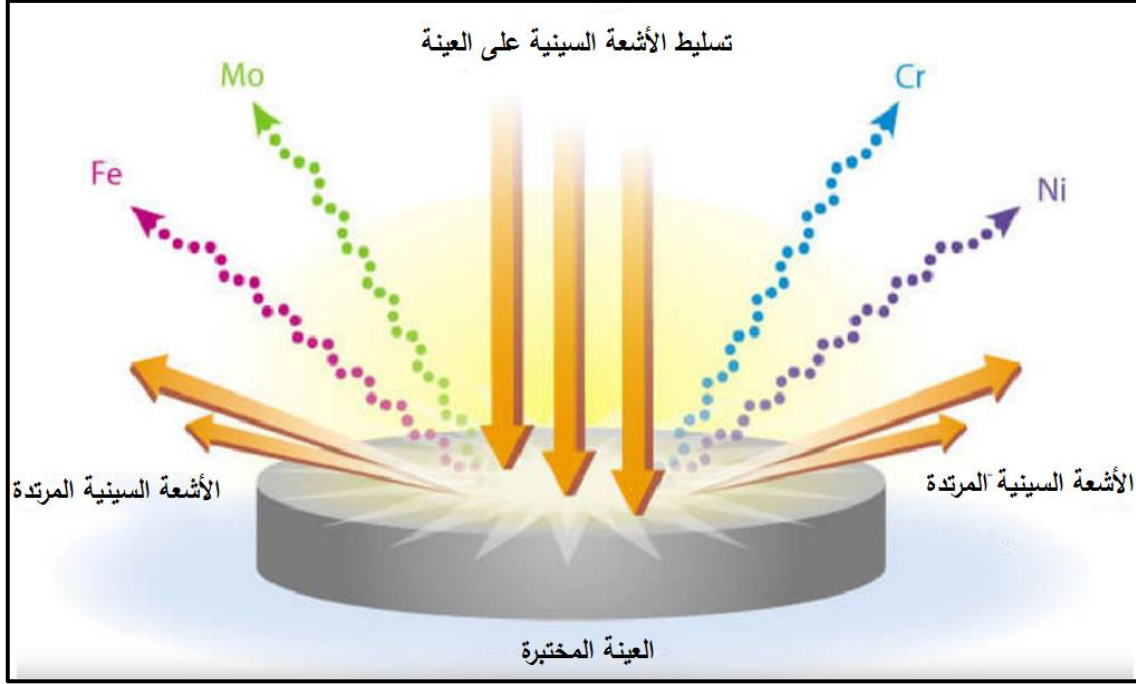
تحتوي بنية الزيوليت على بعض الشوارد التبادلية، التي تتبادل بسهولة مع أنواع أخرى من الشوارد في المحلول، واستخدمت هذه الخاصية بشكلٍ رئيسي لإزالة قساوة الماء، حيث أن المعادن القلوية مثل الصوديوم أو البوتاسيوم تميل لتفاعل تبادل للخروج من الزيوليت ويتم استبدالها بأيونات الكالسيوم والمغنيزيوم "القاسية" من الماء، كما تحتوي العديد من مساحيق الغسيل التجارية كميات كبيرة من الزيوليت. وكذلك يمكن معالجة مياه الصرف الصحي والصناعي التي تحتوي معادن ثقيلة والنفايات النووية السائلة التي تحتوي نظائر مشعة باستخدام الزيوليت. وتستخدم خاصية التبادل الأيوني للزيوليت أيضاً في التحكم بحموضة PH للتربة ومستويات المغذيات (تكييف التربة) [183].

5.3. طرائق توصيف الزيوليت:

تتعدد التقنيات التحليلية الأساسية التي تستخدم لتوصيف الزيوليت الطبيعي منها: طريقة الأشعة السينية المفلورة (XRF)، تقنية حيود الأشعة السينية (XRD)، التحليل الوزني الحراري (TGA)، بالإضافة لتقنية الأشعة تحت الحمراء (FTIR).

1.5.3. الأشعة السينية المفلورة X-Ray Fluorescence:

يعرف التفلور، بأنه الظاهرة التي تحدث عندما تمتص مركبات معينة طاقة الضوء لدى تعرضها لمصدر عالي الطاقة كأشعة جاما أو أشعة X، ثم تُعيد المادة إصدارها على شكل ضوء طويل الموجة، وذلك نتيجة لعمليات تهيج وإثارة الإلكترونات. ويشير الشكل (3-14) إلى طريقة كشف العناصر الموجودة ضمن العينة المراد تحليلها، حيث يتم قذفها بفوتونات الأشعة السينية، التي تمتلك طاقة أعلى من طاقة ارتباط الإلكترونات بذرات العينة، وكشف الأشعة السينية الصادرة عن كل عنصر [184,185]. تعطي هذه التقنية النتائج بسرعة وبدون إتلاف العينة، وتستخدم بشكل واسع في اختبارات تحديد التركيب الكيميائي لمختلف أنواع الفلزات والزجاج والخزف ومواد البناء.



الشكل (3-14): آلية تحليل العينة باستخدام مطياف XRF

ويوضح الشكل (3-15) العملية الفيزيائية لتقنية XRF، فعندما تصطدم فوتونات الأشعة السينية بذرات العينة المدروسة، فإنها تزيج إلكترونات واحداً أو أكثر من المدار الداخلي (مدار K)، ويترك الإلكترون مكانه فراغاً يتم ملؤه من قبل إلكترون المدار الخارجي (مدار L)، وينجم عن انتقال الإلكترون إلى مستوى طاقة أدنى، انبعاث طاقة إضافية على شكل فوتونات تساوي قيمتها فرق الطاقة بين المدارين، وبالتالي تطلق المادة إشعاعاً إضافياً K_{α} X-ray [186].

$$E_{Xray} = \Delta E = E_K - E_L \quad (3-3)$$

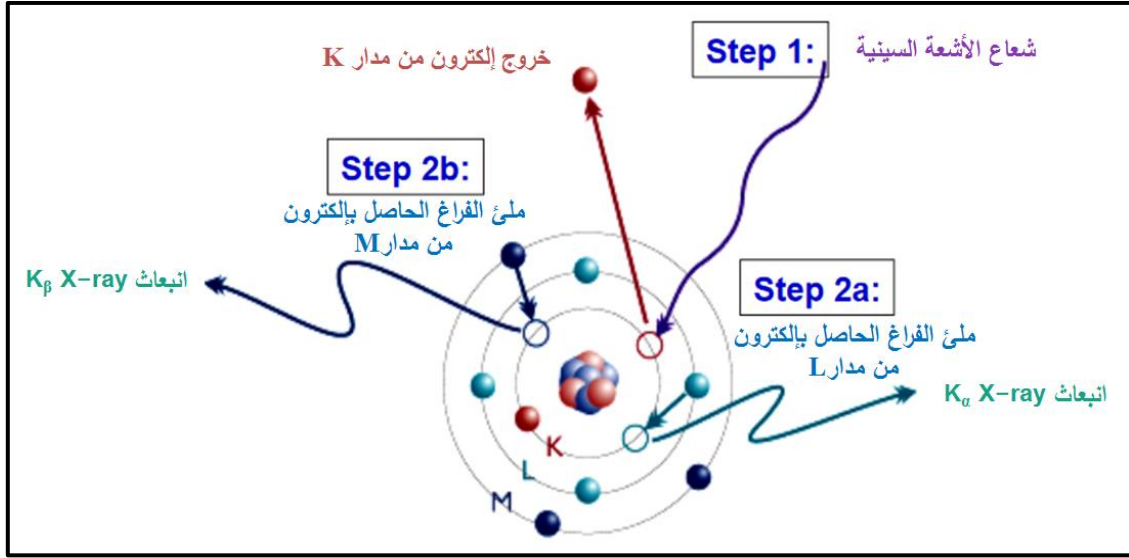
حيث أن:

E_{Xray} : طاقة الفوتونات.

ΔE : فرق الطاقة بين المدارين

E_K, E_L : طاقة المدارين K, L على التوالي

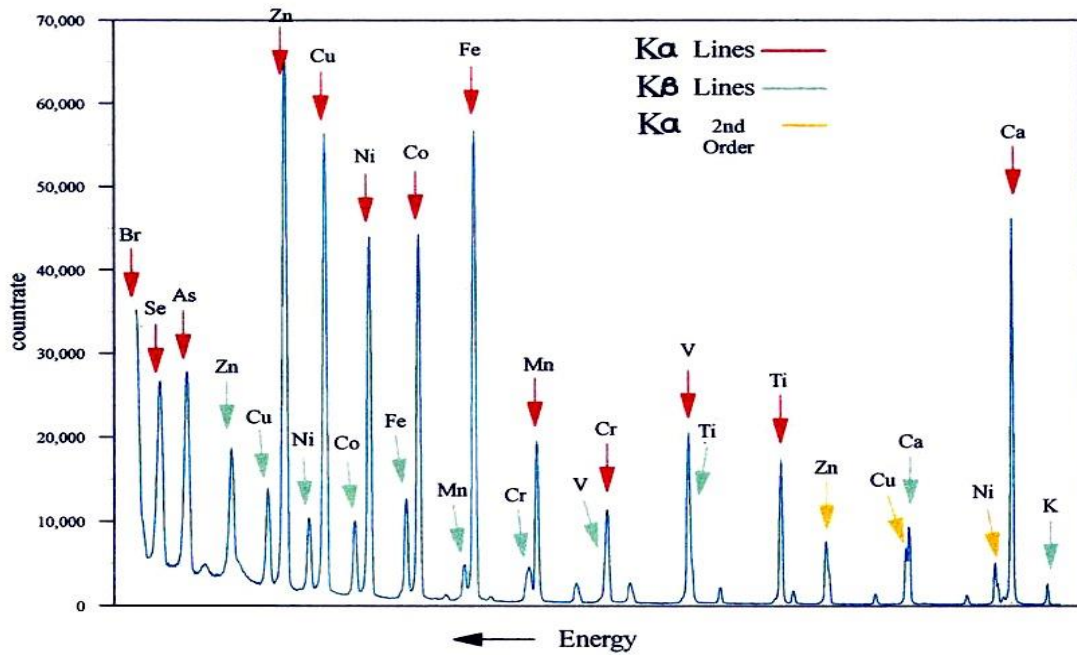
وتقوم الذرة بملء الشاغر في المدار L بالإلكترون من المدار M، ونتيجة انتقال الإلكترون إلى مستوى طاقة أخفض، تنطلق الطاقة الإضافية على شكل أشعة K_{β} X-ray [186].



الشكل (15-3): العملية الفيزيائية لتقنية XRF

يتم تزويد منظومة الأشعة السينية في تقنية XRF بمكشاف مناسب (مثلاً: Si/Li)، وذلك لقياس الطاقات المميزة للعناصر المراد تعيينها، ويتم التحكم بها آلياً بواسطة جهاز حاسوب مزود ببرامج متكاملة لقياس وحساب تراكيز عناصر العينات المراد قياسها [187].

يمكن رسم طيف الأشعة السينية المفلورة بالعلاقة بين طاقة العنصر الموجود ضمن المادة وبين شدة الأشعة السينية المنبعثة كما هو موضح في الشكل (16-3)، الذي يُظهر الطيف النموذجي للأشعة السينية المفلورة لمختلف أنواع العناصر [187].

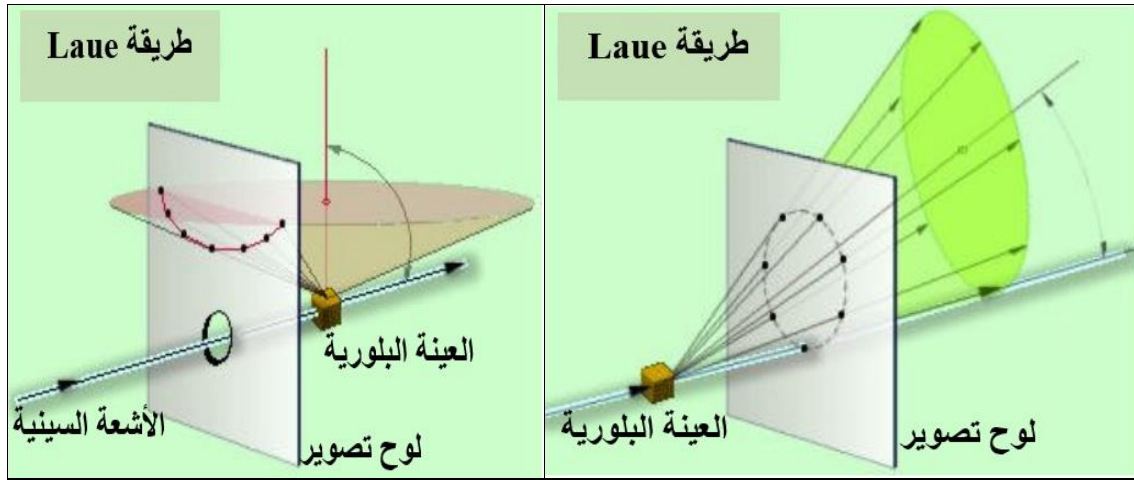


الشكل (16-3): طيف الأشعة السينية المفلورة لمختلف أنواع العناصر

2.5.3. حيود الأشعة السينية X-Ray Diffraction:

تعتبر طريقة قياسات حيود الأشعة السينية (XRD) من أكثر الطرق شهرةً في التوصيف البنائي للمواد المسامية وأفضلها، نظراً لأنها تعطي التركيب البلوري للمادة وأطوارها الكلية. وقد استخدمت بشكل واسع في لمعرفة التركيب الذري للمواد، منذ أن تم اكتشافها عام 1895 على يد العالم الألماني Rontgen [188,189].

يبدأ التحليل بوضع العينة بين مصدر وملتقط الأشعة السينية، التي تولد عن طريق خلق جهد تسارعي عالي في المادة المراد فحصها، ويعتبر النحاس أكثر المعادن استخداماً كمصدرٍ للأشعة السينية، ثم يتم التقاط الأشعة السينية على الجهة المقابلة بواسطة مكشاف موضوع لهذه الغاية [188]. وتعتمد الطرق المخبرية لحيود الأشعة السينية على مبدئين رئيسيين: يقوم المبدأ الأول على تثبيت زاوية انعراج الأشعة السينية وتغيير الطول الموجي لها، بينما يقوم المبدأ الثاني على تثبيت الطول الموجي للأشعة وتغيير زاوية انعراجها. ويوضح الشكل (3-17) قياسات حيود الأشعة السينية وفق طريقة Laue، حيث يظهر الشكل وجود لوح تصوير فيلم أمام العينة المراد اختبارها بشكل عمودي على الأشعة السينية المسلطة، ولوح تصوير آخر خلفها، ويكون لوح التصوير الأمامي مثقوباً من المنتصف لأجل مرور الأشعة السينية [189].



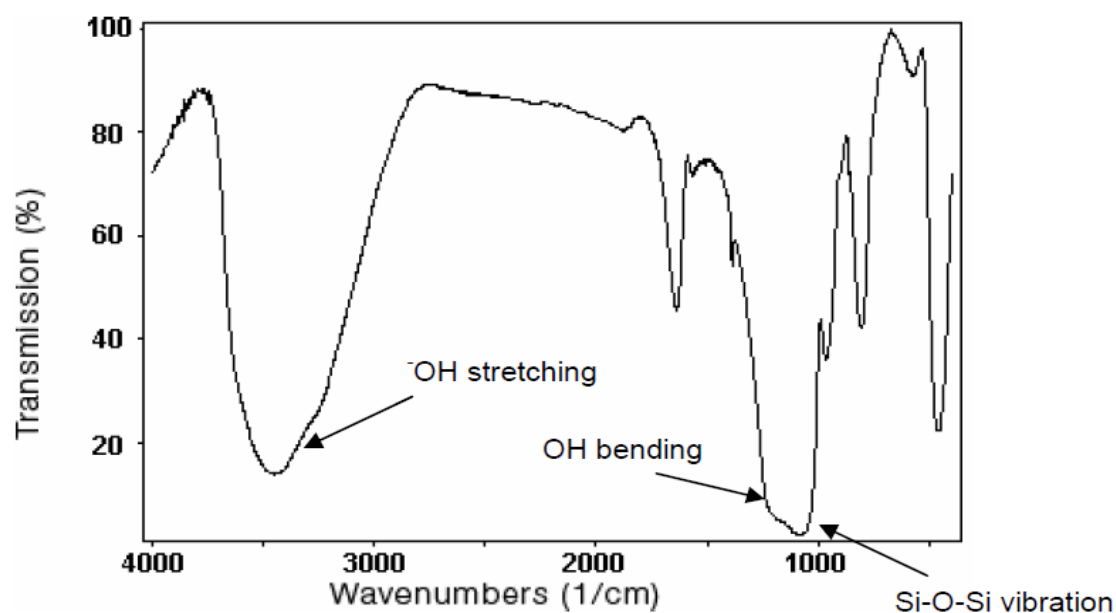
الشكل (3-17): قياسات حيود الأشعة السينية وفق طريقة Laue

3.5.3. طيف الأشعة تحت الحمراء Fourier Transfer Infrared:

يعتبر قياس طيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR) من أشهر الطرق استخداماً لتعريف وإيجاد المركبات العضوية واللاعضوية، ويستخدم لمعرفة المجموعات الوظيفية الموجودة على الجزيء، وذلك من خلال امتصاصها لترددات معينة من الضوء في المنطقة تحت الحمراء [188].

تتم عملية قياس طيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR) بوضع العينة أمام ضوء ساقط من مصدر الأشعة تحت الحمراء (IR)، وتسجيل نسبة امتصاصها للضوء أو انبعاثه منها، والشائع بأنه يتم رسم منحنى رقم

الموجة Wave number، وهو عدد الدورات لكل وحدة طول، كما هو مبين في الشكل (18-3) والذي يمثل منحنى (IR) للسيليكا [190].



الشكل (18-3): منحنى طيف الأشعة تحت الحمراء (IR) للسيليكا

4.5.3. التحليل الوزني الحراري Thermal Gravimetric Analysis:

تعطي الطرق الحرارية معلومات عن تأثير الحرارة في العينة وفقدان وزنها، ويتضمن التحليل الحراري مجموعة من التقنيات التي تعتمد على برمجة درجات الحرارة ومراقبة تغيرات العينة مع الزمن ودرجة الحرارة. ونميز تقنيات التحليل الحراري الأكثر استخداماً وهي: التحليل التفاضلي الحراري (DTA)، التحليل الوزني الحراري (TGA)، الوزن الحراري التفاضلي (DTG)، المسح الحراري التفاضلي (DSC) [188].

تبدى بعض المواد تغيرات حرارية على شكل منحنيات معينة عندما يتم تسخينها ضمن حدود حرارية معينة، ويمكن أن ينتج هذا التغير عن أسباب حرارية مثل خسارة ماء التبلور. ويفضل استخدام الوزن الحراري التفاضلي (DTG) عندما تكون الأشكال معقدة، ومن الصعب تمييز التغيرات الحرارية [188].

الفصل الرابع

الدراسة التجريبية ومناقشة النتائج

البرنامج الاختباري

مواد البحث والعمل المخبري

دراسات الرابط البيتوميني

دراسات المجبول الساخن

دراسات المجبول الدافئ

ديمومة المجبول ضد خطر الرطوبة

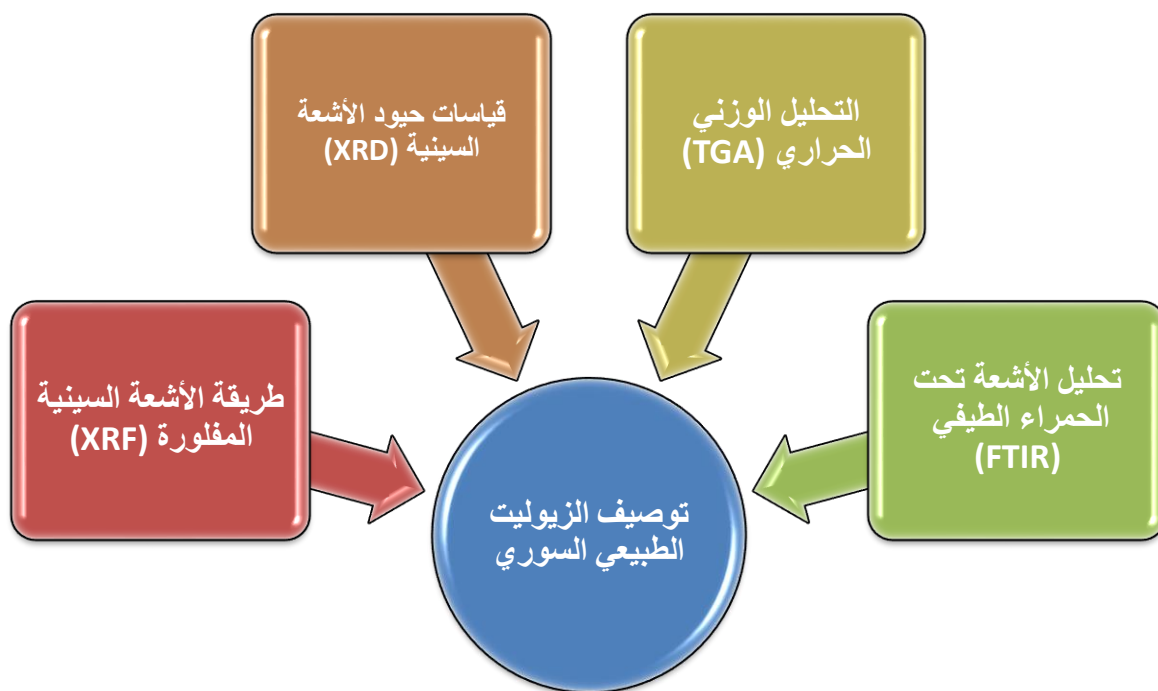
الاستنتاجات والتوصيات

1.4. البرنامج الاختباري:

يشتمل البرنامج الاختباري للدراسة على أربعة مسارات بحثية وفق الآتي:

1.1.4. المسار الأول: توصيف الزيوليت الطبيعي السوري

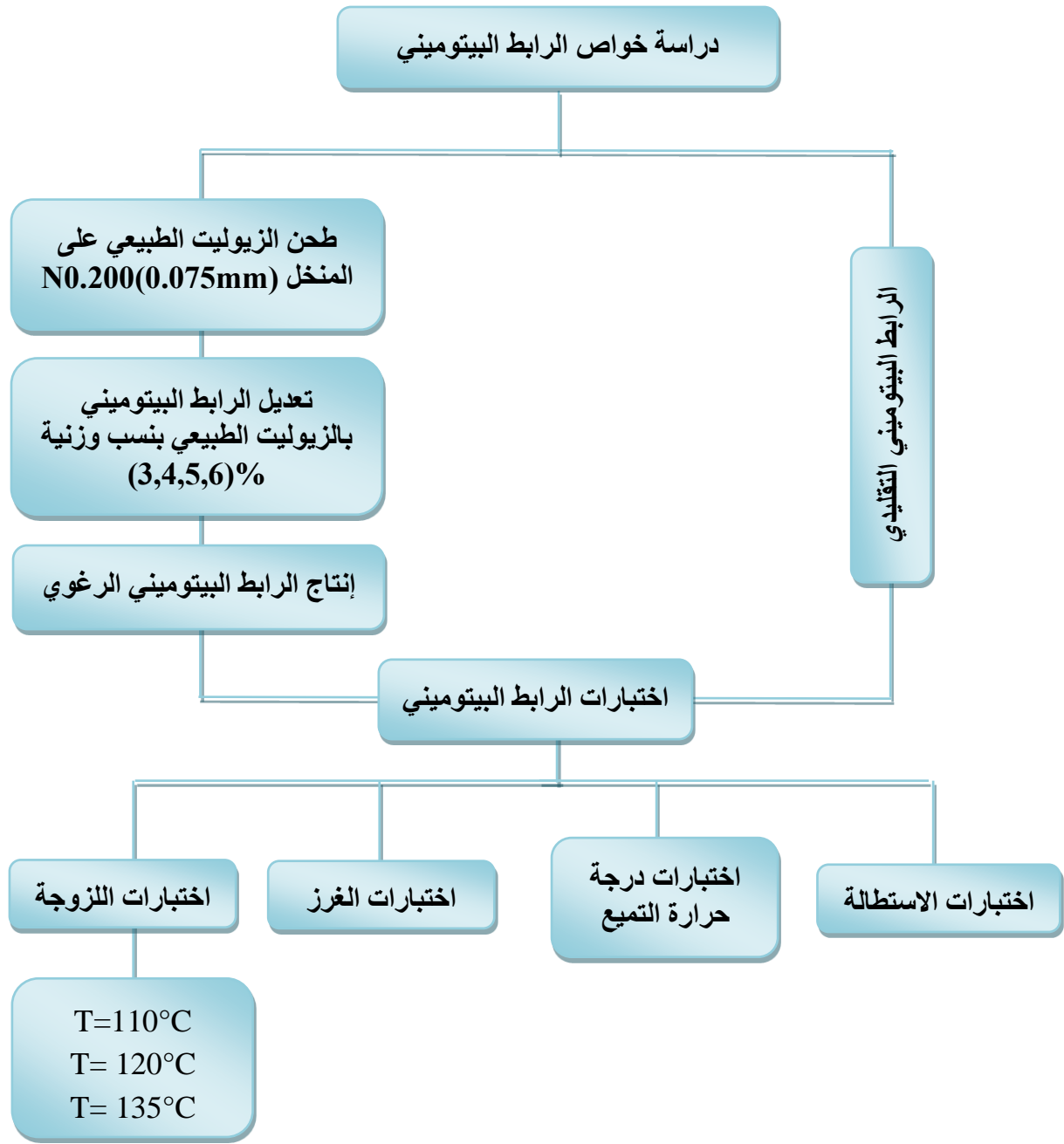
يتضمن المسار الأول توصيف الزيوليت الطبيعي السوري حرارياً وكيميائياً وطيفياً، وذلك باستخدام أحدث الطرق والتقنيات المعاصرة. ويبين الشكل (4-1) المخطط النهجي لتوصيف الزيوليت الطبيعي السوري.



الشكل (4-1): المخطط النهجي لمسار توصيف الزيوليت الطبيعي السوري

2.1.4. المسار الثاني: دراسة خواص الرابط البيتوميني

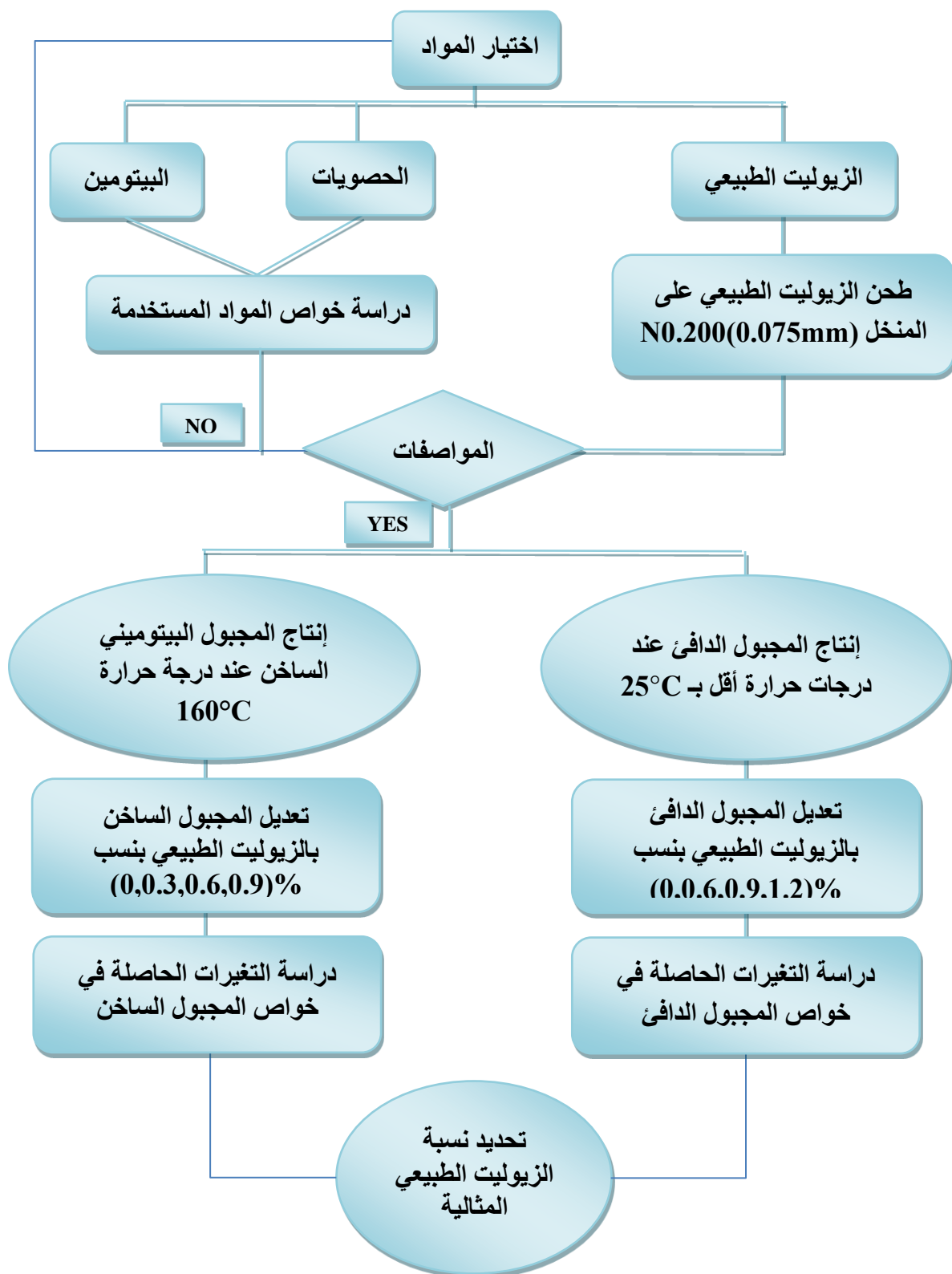
يتضمن المسار الثاني دراسة تأثير إضافة الزيوليت المحلي، وفق نسب مختلفة في الخواص الفيزيائية والريولوجية للرابط البيتوميني. ويظهر الشكل (4-2) المخطط النهجي لدراسة خواص الرابط البيتوميني.



الشكل (2-4): المخطط النهجي لمسار دراسة خواص الرابط البيتوميني

3.1.4. المسار الثالث: دراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمجبول البيتوميني

يتضمن المسار الثالث تصميم عينات المجبول البيتوميني الساخن منه والدافئ، حيث تم تصميم المجبول الساخن عند درجة حرارة خلط 160°C ودرجة حرارة دمك 150°C ، بينما تم تصميم المجبول الدافئ المعدل بالزيوليت الطبيعي عند درجات حرارة خلط ودمك أقل بـ 25°C ، مما هي عليه للمجبول الساخن. ويبين الشكل (3-4) المخطط النهجي لمسار دراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمجبول البيتوميني بنوعيه الساخن والدافئ.



الشكل (4-3): المخطط النهجي لمسار دراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمجبول البيتوميني (ساخن- دافئ)

4.1.4. المسار الرابع: دراسات حساسية المجلول البيتوميني ضد خطر الرطوبة

يتناول المسار الرابع تقييم حساسية المجلول البيتوميني ضد خطر الرطوبة، وفق المواصفة AASHTO T283، وذلك بناءً على نتائج اختبار الشد غير المباشر على عينات الخلطات في الحالتين الرطبة والجافة، ووفقاً للمواصفة يجرى هذا الاختبار على مجموعتين من العينات وفق الآتي [191]:

- المجموعة الأولى: يتم وضعها في حمام مائي بدرجة حرارة 25°C لمدة ساعتين.
 - المجموعة الثانية: يتم وضعها بالثلاجة لمدة 16 ساعة، تغمر بعدها بحمام مائي بدرجة حرارة 60°C لمدة 24 ساعة، ثم يتم وضعها في حمام مائي بدرجة حرارة 25°C لمدة ساعتين.
- ويبين الشكل (4-4) المخطط النهجي لدراسات تقييم حساسية المجلول البيتوميني ضد خطر الرطوبة.



الشكل (4-4): المخطط النهجي لمسار دراسات تقييم حساسية المجلول البيتوميني ضد خطر الرطوبة

2.4. مواد البحث:

تتضمن إحضارات البحث المواد التالية:

1. روابط بيتومينة (50/70، 60/70): إنتاج مصفاة بانياس.
2. حصويات كلسية دولوميتية مصدرها مدينة حسياء.
3. زيوليت طبيعي مصدره منطقة اللجاة بالقرب من الحدود السورية الأردنية.
4. الكلس المطفأ كمانع انسلاخ.

3.4. العمل المخبري:

تقوم الدراسات التجريبية على إجراء سلسلة من الاختبارات المحددة بالموصفات العالمية، والموضحة في الجدول (1-4) التالي:

الجدول (1-4): التجارب المخبرية المعتمدة في البحث

المواصفة	التجربة
ASTM E.1131	التحليل الوزني الحراري TGA
ASTM D.5	الغرز Penetration
ASTM D.36	درجة حرارة التميع Softening Point (Ring & Bale)
ASTM D.445	قابلية السحب (المطاوعة) Ductility
ASTM D.88	اللزوجة Kinematic Viscosity
ASTM D2872	فرن الطبقة الرقيقة الدوار RTOFT
ASTM D.70	الوزن النوعي للبيتومين Specific Gravity
ASTM C.535	الفاقد بالاهتراء للحصويات Resistance Of Abrasion
ASTM D.2419	المكافئ الرملي Sand Equivalent
ASTM (C.127- D.188)	الوزن النوعي للحصويات الخشنة والناعمة Specific Gravity
ASTM D.1559	تصميم المجبول البيتوميني وفق مارشال Marshall Test
AASHTO T283	الشد غير المباشر Indirect tensile strength (ITS)

وقد أعطيت أنواع الرابط والمجبول البيتوميني المدروسة الرموز المبينة في الجدول (2-4) التالي:

الجدول (2-4): الرموز المعتمدة في الدراسة التجريبية

بيتومين 50/70 إنتاج مصفاة بانياس	A
البيتومين 50/70 المعدل بالزيوليت الطبيعي بنسبة 3% من وزنه	ANZ3%
البيتومين 50/70 المعدل بالزيوليت الطبيعي بنسبة 4% من وزنه	ANZ4%
البيتومين 50/70 المعدل بالزيوليت الطبيعي بنسبة 5% من وزنه	ANZ5%
البيتومين 50/70 المعدل بالزيوليت الطبيعي بنسبة 6% من وزنه	ANZ6%
عينات المجلول البيتوميني الساخن	HMA
عينات المجلول البيتوميني الساخن المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.3% من الوزن الكلي للحصويات	HMANZ0.3%
عينات المجلول البيتوميني الساخن المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.6% من الوزن الكلي للحصويات	HMANZ0.6%
عينات المجلول البيتوميني الساخن المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.9% من الوزن الكلي للحصويات	HMANZ0.9%
عينات المجلول البيتوميني الدافئ (دون استخدام أية إضافة)	WMA
عينات المجلول البيتوميني الدافئ المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.6% من الوزن الكلي للحصويات	WMANZ0.6%
عينات المجلول البيتوميني الدافئ المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.9% من الوزن الكلي للحصويات	WMANZ0.9%
عينات المجلول البيتوميني الدافئ المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 1.2% من الوزن الكلي للحصويات	WMANZ1.2%
عينات المجلول البيتوميني الساخن المعدلة بالكلس المطفأ بنسبة 1.5% من الوزن الكلي للحصويات	HMAHL1.5%
عينات المجلول البيتوميني الساخن المعدلة بالكلس المطفأ بنسبة 2% من الوزن الكلي للحصويات	HMAHL2%
عينات المجلول البيتوميني الساخن المعدلة بالكلس المطفأ بنسبة 2.5% من الوزن الكلي للحصويات	HMAHL2.5%
عينات المجلول البيتوميني الدافئ المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.9% وبالكلس المطفأ بنسبة 1.5%	WMANZ0.9%+HL1.5%
عينات المجلول البيتوميني الدافئ المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.9% وبالكلس المطفأ بنسبة 2%	WMANZ0.9%+HL2%
عينات المجلول البيتوميني الدافئ المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.9% وبالكلس المطفأ بنسبة 2.5%	WMANZ0.9%+HL2.5%

4.4. تحديد خصائص الزيوليت الطبيعي السوري:

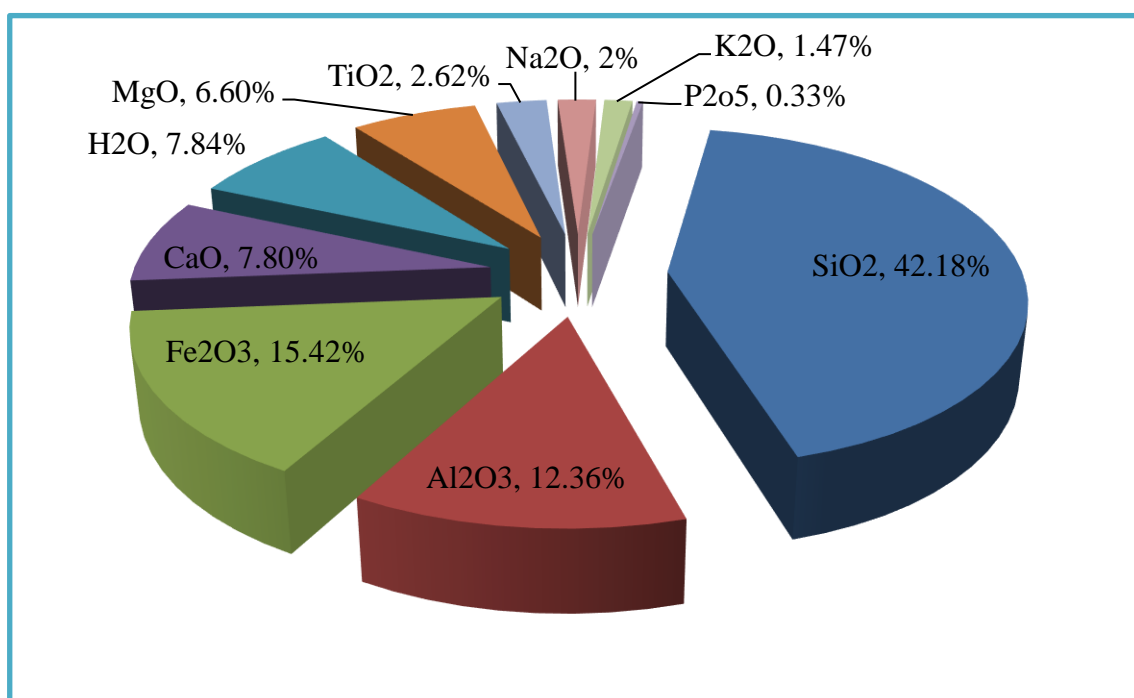
تم في هذه الدراسة توصيف الزيوليت الطبيعي باستخدام طريقة الأشعة السينية المفلورة (XRF)، وإجراء قياسات حيود الأشعة السينية (XRD)، والتحليل الوزني الحراري (TGA)، وتحليل الأشعة تحت الحمراء الطيفي (FTIR).

1.4.4. قياسات الأشعة السينية المفلورة (XRF):

تم تحديد التركيب الكيميائي للزيوليت السوري باستخدام طريقة الأشعة السينية المفلورة (XRF)، ويوضح الجدول (3-4) والشكل (5-4) نتائج التحليل الكيميائي للعينات المدروسة. ولقد أشارت النتائج إلى أن بنية الزيوليت السوري الخام تتكون بشكل أساسي من أكاسيد SiO_2 ، Al_2O_3 ، بالإضافة إلى أكاسيد أخرى مرافقة مثل: Fe_2O_3 ، CaO ، MgO .

الجدول (3-4): نتائج التحليل الكيميائي للزيوليت الطبيعي السوري

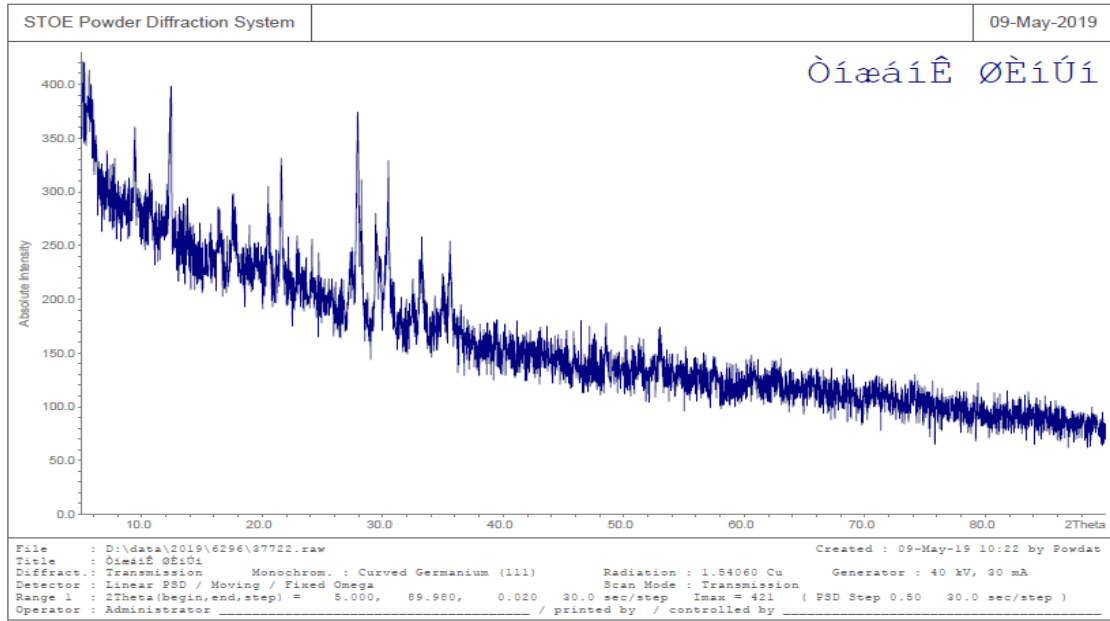
نوع الأكسيد	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	K_2O	Na_2O	P_2O_5	H_2O
النسبة النموية %	42.18	12.36	15.42	7.8	6.6	2.62	1.47	2	0.33	7.84



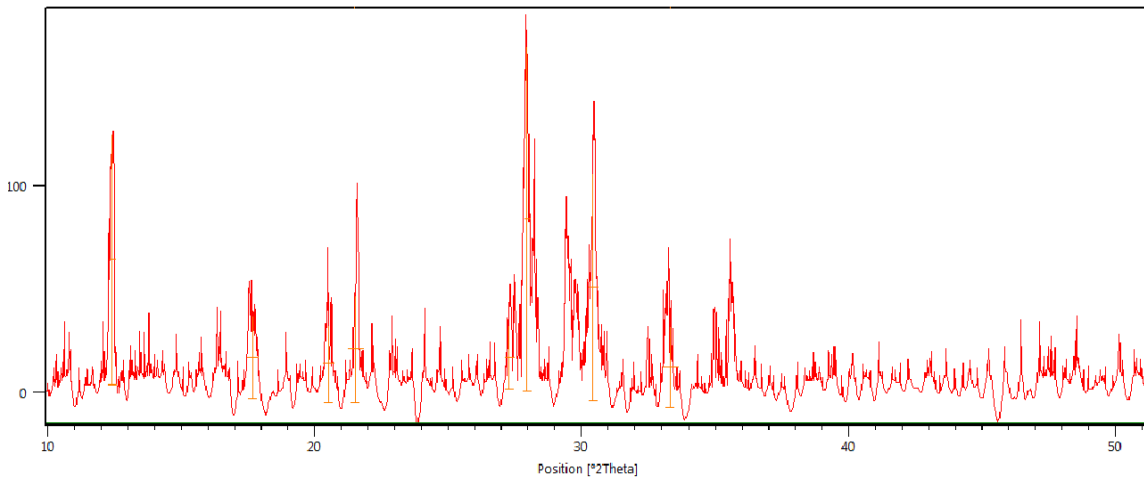
الشكل (5-4): التركيب الكيميائي للزيوليت الطبيعي المدروس

2.4.4. قياسات حيود الأشعة السينية (XRD):

أُجريت قياسات حيود الأشعة السينية (XRD) في مخابر هيئة الطاقة الذرية بدمشق. ويشير الشكل (6-4) إلى مخطط طيف الأشعة السينية لعينات الزيوليت الخام المختبرة، والذي تمت معالجته وتكبيره باستخدام برنامج PANalytical HighScore plus. وتشير النتائج الموضحة في الشكل (7-4) والجدول (4-4)، إلى أن العينات المختبرة تحتوي على أطوار بلورية من البنى الزيوليتية، تتشكل من خليط من الفلبسايت والشابازايت بشكل أساسي، بالإضافة إلى فلزات أخرى كالهيماتيت والبيروكسين. وقد حصلنا على هذه النتائج من خلال مقارنة قيم الامتصاص مع طيف الأشعة السينية للزيوليتات النقية [192].



الشكل (6-4): مخطط إنحراف بودرة الخام الزيوليتي (XRD)



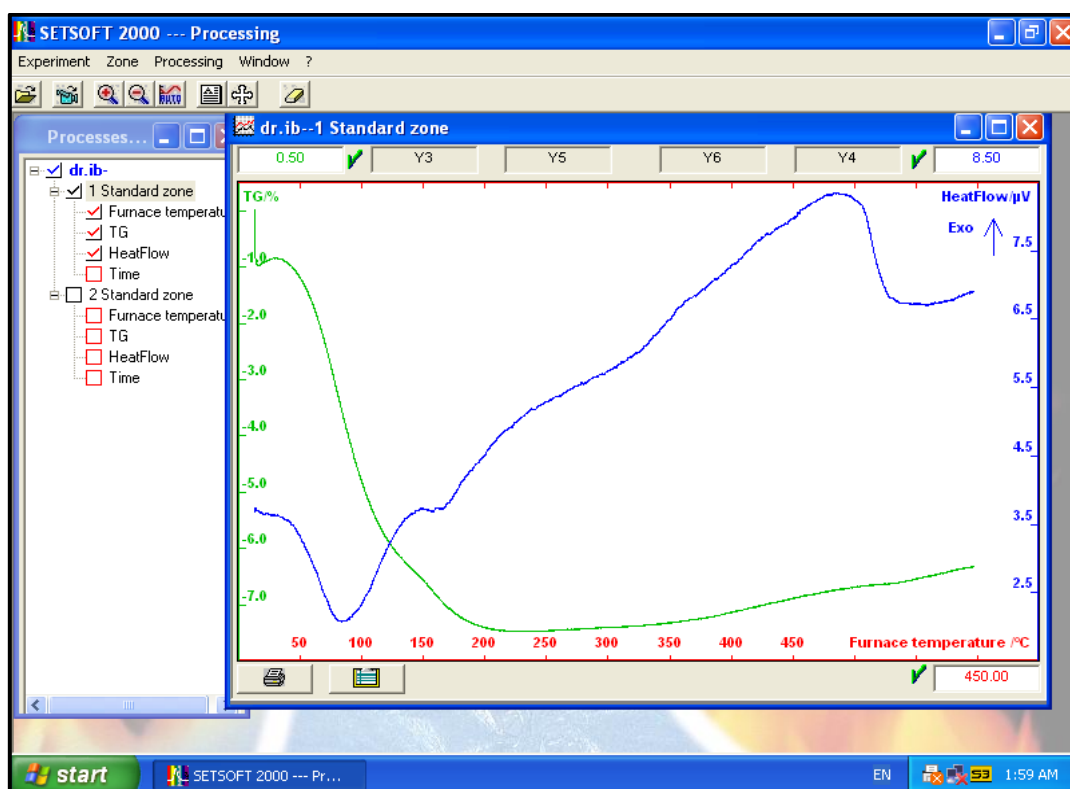
الشكل (7-4): مخطط طيف الأشعة السينية للخام الزيوليتي بعد معالجته باستخدام برنامج HighScore Plus

الجدول (4-4): الأطوار البلورية لعينات الزيوليت المدروسة

الأطوار (Phase name)	الشدة Height [cts]	زاوية الانعراج [°2Th.]
Phillipsite	123.42	12.43
Chabazite	38.68	20.52
Phillipsite	84.38	21.63
Phillipsite	31.56	27.33
Phillipsite	170.41	27.94
Chabazite	112.26	30.43
hematite	39.79	33.25
hematite	34.75	35.73

3.4.4. التحليل الوزني الحراري (TGA):

يسمح التحليل الوزني الحراري (TGA) وفقاً للمواصفة EN ISO11358، بدراسة الثباتية الحرارية للمادة، وذلك من خلال تحديد الخسارة في الكتلة بدلالة الزمن ودرجة الحرارة [193]. وقد تم التحقق من السلوك الحراري للزيوليت الطبيعي باستخدام جهاز التحليل الوزني الحراري TGA المتوفر في مخابر كلية العلوم في جامعة تشرين، كما هو موضح في الشكل (4-8).



الشكل (4-8): مخطط TGA للزيوليت الطبيعي السوري

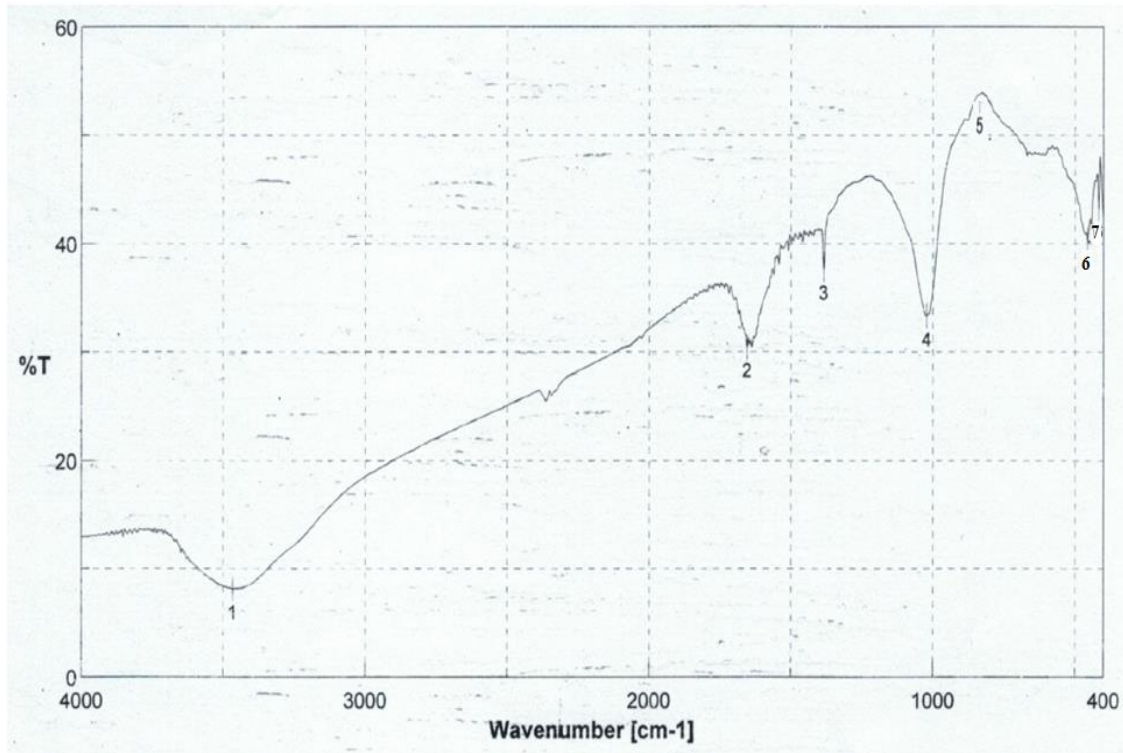
وتشير النتائج إلى أن الزيوليت يخسر محتواه من الماء بفعل الحرارة وفق الآتي:

- الماء الخارجي عند المجال الحراري $^{\circ}\text{C}$ (50-110).
- الماء المرتبط بشكل ضعيف عند المجال الحراري $^{\circ}\text{C}$ (110-350).
- الماء المرتبط بشكل قوي عند المجال الحراري $^{\circ}\text{C}$ (350-500).

وتدل هذه النتائج إلى أن تجفيف الزيوليت يحدث بشكل ثلاث مراحل متدرجة، وفقاً لطاقت الارتباط الثلاثة المختلفة بين جزيئات الماء وشوارد الزيوليت الطبيعي.

4.4.4. تحليل الأشعة تحت الحمراء الطيفي (FTIR):

تم الحصول على المعلومات البنيوية للزيوليت الطبيعي باستخدام تحليل الأشعة تحت الحمراء الطيفي FTIR، ويبين الشكل (4-9) والجدول (4-5) نتائج هذا الاختبار، الذي تم إجراؤه في مخبر كلية العلوم في جامعة تشرين. ولقد أكدت النتائج التي تم الحصول عليها على أن العينات المختبرة هي زيوليت طبيعي من نوع فلبسايت.



الشكل (4-9): نتائج تحليل FTIR للزيوليت الطبيعي المدروس

الجدول (4-5): ترددات قمم الامتصاص للزيوليت الطبيعي وفق اختبار FTIR

الذروة	طول الموجة cm^{-1}	الشدة %
1	3466.42	8.13627
2	1654.52	30.4196
3	1384.64	37.5976
4	1021.12	33.2907
5	750	44.45
6	456.082	40.4344
7	418.477	43.3174

وبتتبع قيم الذرى للعينات المختبرة نلاحظ مايلي:

- يشير القمة الأولى الموافقة لطول موجة 3466.42 cm^{-1} ، لتمدد مجموعة الهيدروكسيل.
- تُعزى القمة الثانية الموافقة لطول موجة 1654.52 cm^{-1} ، إلى جزيئات الماء المحبوسة داخل بنية الألمنيو-سيلكا.
- تدل الاهتزازات عند القمة الثالثة الموافقة لطول موجة 1384.64 cm^{-1} ، إلى وجود الكربونات أو الكالسيوم في العينة.
- يُشير الارتباط القوي عند القمة الرابعة الموافقة لطول موجة 1021.12 cm^{-1} ، إلى اهتزاز البنية الزيوليت، ويعزى لاهتزازات الرابطة Si-O-AL.
- تُعزى الاهتزازات عند القمة الخامسة الموافقة لطول موجة 750 cm^{-1} ، لأوكسيدات المعادن MO (حيث يمكن أن تكون M: Na ، Ca ، ...الخ).
- تدل اهتزازات الارتباط عند القمة السادسة الموافقة لطول موجة 456.082 cm^{-1} ، والقمة السابعة الموافقة لطول موجة 418.477 cm^{-1} على الزيوليتات المحتوية على أربعة حلقات ارتباط (الفلبسايت).

5.4. دراسات الرابط البيتوميني:

1.5.4. إنتاج الرابط البيتوميني الرغوي:

تم طحن عينات الزيوليت الخام ونخلها على المنخل (N.200 (0.075mm)، كما هو موضح في الشكل (4-10)، وإضافتها للرابط البيتوميني وفق أربعة نسب وزنية % (3, 4, 5, 6)، وخلطها باستخدام خلاط صناعي بسرعة 1000 دورة في الدقيقة. وبهدف التحكم بدرجات حرارة خلط الرابط البيتوميني مع الزيوليت، تم تصنيع وحدة خلط موضحة في الشكل (4-11)، على شكل دائرة كهربائية تتكون من سخان كهربائي، وجهاز تحكم بدرجات الحرارة ديجيتال، وحساس حراري، بالإضافة إلى ريلي Relay-30 أمبير.



الشكل (4-10): الزيوليت الطبيعي المار الشكل (4-11): وحدة الخلط المستخدمة لإنتاج البيتومين الرغوي

لوحظ خلال عملية خلط الزيوليت مع البيتومين ازدياد حجم الرابط البيتوميني (الشكل (4-12))، واختلاف معدل الرغوة الحاصلة تبعاً لاختلاف درجة حرارة البيتومين (الشكل (4-13))، حيث لوحظ ظهور المزيد من الفقاعات على سطح البيتومين عند انخفاض درجات الحرارة. ويمكن أن يعزى ذلك إلى تغيرات سلوك الرابط البيتوميني ولزوجته تحت تأثير درجات الحرارة وفق الآتي:

- تنخفض اللزوجة عند درجة الحرارة 150°C ، ويتصرف البيتومين كمادة سائلة فيتححر الهواء من الفقاعات بسهولة، وكذلك الأمر، عند درجات الحرارة 130°C ، 140°C .
- ترتفع اللزوجة عند درجات الحرارة الأقل من 120°C ، ويصبح تحرر الهواء من الفقاعات صعباً.
- يكون تحرر الهواء من الفقاعات مستحيلاً عند درجة حرارة 90°C ، بسبب اللزوجة المرتفعة للبيتومين.



الشكل (4-12): الرغوة الحاصلة بعد إضافة الزيوليت الطبيعي



الشكل (4-13): (مزيج البيتومين- الزيوليت الطبيعي) عند درجات حرارة مختلفة

2.5.4. تحديد خواص الرابط البيتوميني:

في البداية تم تحديد الخواص الأولية لعينات البيتومين المختبرة (50/70 ناتج مصفاة بانياس)، وذلك بناءً على نتائج تجارب (الغرز عند درجة الحرارة 25°C ، تحديد درجة التميع وفق اختبار الكرة والحلقة، قابلية السحب (المطاوعة)، اللزوجة عند درجات حرارة $110, 120, 135^{\circ}\text{C}$). ثم أُخضعت العينات المختبرة للتعب قصير الأمد وفق تجربة فرن الطبقة الرقيقة الدوار (RTOFT)، وأُجريت بعدها سلسلة

الاختبارات السابقة المذكورة أعلاه، وحددت التغيرات الحاصلة في الرابط بناءً على ذلك. ويوضح الجدول (6-4) خواص الرابط البيتوميني المدروس قبل وبعد التعرض للتعب قصير الأمد.

الجدول (6-4): نتائج اختبارات الرابط البيتوميني قبل وبعد التعب قصير الأمد

الخاصية	النتائج	حدود المواصفات [194-197]
قبل التعب قصير الأمد	الغرز عند درجة حرارة (ASTM D5, 25°C)	57.3
	الاستطالة (ASTM D113, cm)	160
	درجة حرارة التميع (ASTM D, 36°C)	50.2
	دليل الغرز	0.83-
	اللزوجة (Cst) (ASTM D.88)	110 °C
		120 °C
		135 °C
بعد التعب قصير الأمد	التغير في الكتلة	-0.13
	الغرز المتبقي % (ASTM D2872)	70.7
	الاستطالة المتبقية cm	119
	التغير في درجة حرارة التميع °C	+3.9

3.5.4. دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي في خواص الرابط البيتوميني:

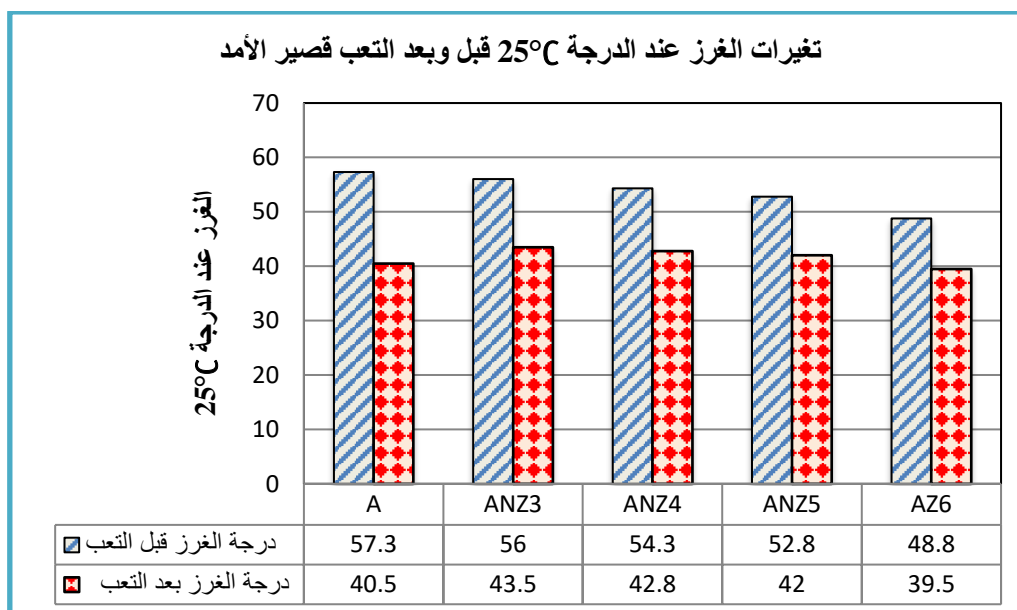
تمت إضافة الزيوليت الطبيعي عند درجة حرارة المخبر للرابط البيتوميني المسخن وفق أربعة نسب وزنية % (3, 4, 5, 6)، مع التحريك المستمر حتى الحصول على عينات معدلة متجانسة، ثم أجريت اختبارات (الغرز عند درجة حرارة 25°C)، درجة حرارة التميع، قابلية السحب، اللزوجة عند درجات حرارة 110, 120, 135°C على الرابط البيتوميني المعدل بالزيوليت الطبيعي، وحساب قيم دليل الغرز. ثم تمت دراسة التغيرات الحاصلة في خواص الرابط البيتوميني المعدل وغير المعدل بالزيوليت الطبيعي بعد إجراء اختبار فرن الطبقة الرقيقة الدوار RTOFT، وذلك لإظهار سلوك الرابط البيتوميني بعد التعرض للتعب قصير الأمد.

1.3.5.4. دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي في درجة غرز الرابط البيتوميني:

أجريت تجارب الغرز عند درجة الحرارة 25°C لأنواع الرابط البيتوميني المستخدمة في هذه الدراسة (البيتومين 50/70، البيتومين المعدل بالزيوليت الطبيعي) قبل وبعد إجراء اختبار فرن الطبقة الرقيقة الدوار RTOFT، وتحديد قيمة الغرز المتبقي أو معدل الغرز Penetration Ratio، والذي يعبر عن النسبة بين قيمة الغرز عند درجة حرارة 25°C بعد التعرض لاختبار RTOFT، إلى قيمة الغرز عند ذات درجة الحرارة قبل التعرض لاختبار RTOFT. ويظهر الجدول (7-4) والشكل (4-14) نتائج تجارب الغرز عند درجة حرارة 25°C للرابط البيتوميني المعدل بالزيوليت الطبيعي قبل وبعد التعرض لاختبار RTOFT.

الجدول (7-4): نتائج تجارب غرز الرابط البيتوميني قبل وبعد التعب قصير الأمد

بعد التعب قصير الأمد			قبل التعب قصير الأمد		نوع البيتومين
معدل الغرز (%)	المتوسط	الغرز (0.1mm)	المتوسط	الغرز (0.1mm)	
70.7	40.5	40.3	57.3	57.3	A
		40.7		57.7	
		40		56.3	
		41		57.7	
77.7	43.5	43.7	56	55.7	ANZ3%
		43		56	
		43.3		56	
		44		56.3	
78.8	42.8	42.3	54.3	54.7	ANZ4%
		43		53.7	
		42.7		54	
		43.3		54.7	
79.6	42.0	42	52.8	52.3	ANZ5%
		42.3		53	
		41.7		52.3	
		42		53.7	
81.0	39.5	39.7	48.8	49	ANZ6%
		39		48	
		40		49.7	
		39.3		48.3	



الشكل (4-14): تغيرات الغرز عند الدرجة 25°C لأنواع البيتومين المدروسة قبل وبعد اختبار التعرض للتعب قصير الأمد

أشارت نتائج تجارب الغرز عند درجة الحرارة 25°C إلى انخفاض قيمته مع ازدياد نسبة الزيوليت الطبيعي المضاف، وهذا يشير إلى ازدياد قساوة الرابط البيتوميني. ويُعزى سبب هذا التغير إلى أن الزيوليت جسم صلب لا ينحل في البيتومين، وبعد أن يقوم بدوره في إحداث الرغوة عند درجات الحرارة المرتفعة، يعود ليعمل عمل الفيلر عند درجات الحرارة العادية.

وأشارت النتائج إلى أن قيم معدل الغرز الموضحة في الجدول (4-8) تقع ضمن حدود المواصفات المسموحة لجميع أنواع البيتومين المدروسة (>50%)، وإلى ازدياد قيم معدل الغرز (الغرز المتبقي)، مع زيادة نسبة الزيوليت الطبيعي المضافة، وهذا مؤشر إلى زيادة مقاومة البيتومين للتعب.

الجدول (4-8): قيم معدل الغرز لأنواع البيتومين المستخدمة قبل وبعد التعب قصير الأمد

ANZ6%	ANZ5%	ANZ4%	ANZ3%	A	نوع البيتومين
81	79.6	78.8	77.7	70.7	معدل الغرز %

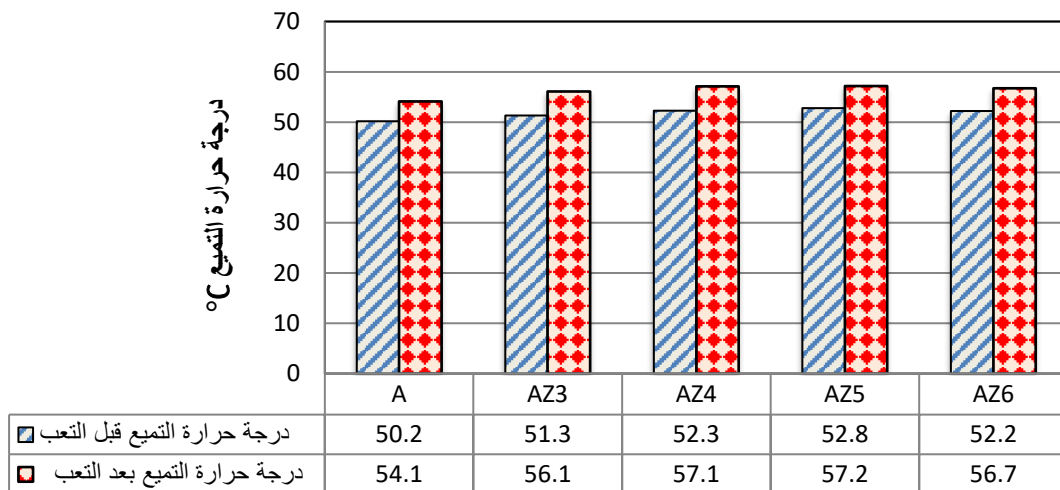
2.3.5.4. دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي في درجة حرارة تمييع الرابط البيتوميني:

أجريت تجارب درجة حرارة التمييع وفق اختبار الكرة والحلقة لأنواع البيتومين المدروسة (البيتومين 50/70، البيتومين المعدل بالزيوليت الطبيعي)، قبل وبعد إجراء اختبار فرن الطبقة الرقيقة الدوار RTOFT، وتحديد مقدار التغير في درجات الحرارة بعد التعرض للتعب. ويظهر الجدول (4-9) والشكل (4-15) نتائج تجارب درجة حرارة التمييع للرابط البيتوميني المعدل بالزيوليت الطبيعي، قبل وبعد التعرض للتعب قصير الأمد.

الجدول (4-9): نتائج اختبارات درجة حرارة التميع قبل وبعد التعب قصير الأمد

بعد التعب قصير الأمد			قبل التعب قصير الأمد		نوع البيتومين
التغير في درجات الحرارة °C	المتوسط	درجة حرارة التميع °C	المتوسط	درجة حرارة التميع °C	
3.9	54.1	53.7	50.2	50.1	A
		53.9		50.4	
		54.2		50	
		54.5		50.3	
4.7	56.1	56.1	51.3	51	ANZ3%
		56.5		51.3	
		55.6		51.4	
		56		51.6	
4.9	57.1	57.5	52.3	51.8	ANZ4%
		57.2		52	
		56.8		52.4	
		57		52.8	
4.4	57.2	57.2	52.8	53	ANZ5%
		57.4		52.3	
		57.3		53.2	
		56.8		52.7	
4.5	56.7	57	52.2	52.4	ANZ6%
		57.3		52.6	
		57.4		51.8	
		58.9		52	

تغيرات درجة حرارة التميع قبل وبعد التعب قصير الأمد



الشكل (4-15): تغيرات درجة حرارة تميع البيتومين المعدل وغير المعدل بالزئوليت الطبيعي قبل وبعد التعب قصير الأمد

لوحظ من نتائج تجارب درجة حرارة التميع للرباط البيتوميني، ازدياد قيم درجة حرارة التميع بشكل بسيط بعد التعديل بالزيوليت الطبيعي، وهذا مؤشر على تحسن الممانعة الحرارية، كما لوحظ بأن التغير في درجة حرارة التميع بعد التعرض للتعب قصير الأمد، كان ضمن حدود المواصفات ($9^{\circ}\text{C} \leq$).

تتفق نتائج اختبارات الغرز ودرجة حرارة التميع التي تم الحصول عليها، مع نتائج الدراسات السابقة المتعلقة بتعديل الرباط الإسفلتي بإضافات الزيوليت [151,159,161,198].

3.3.5.4. تأثير الزيوليت الطبيعي في قيم دليل الغرز:

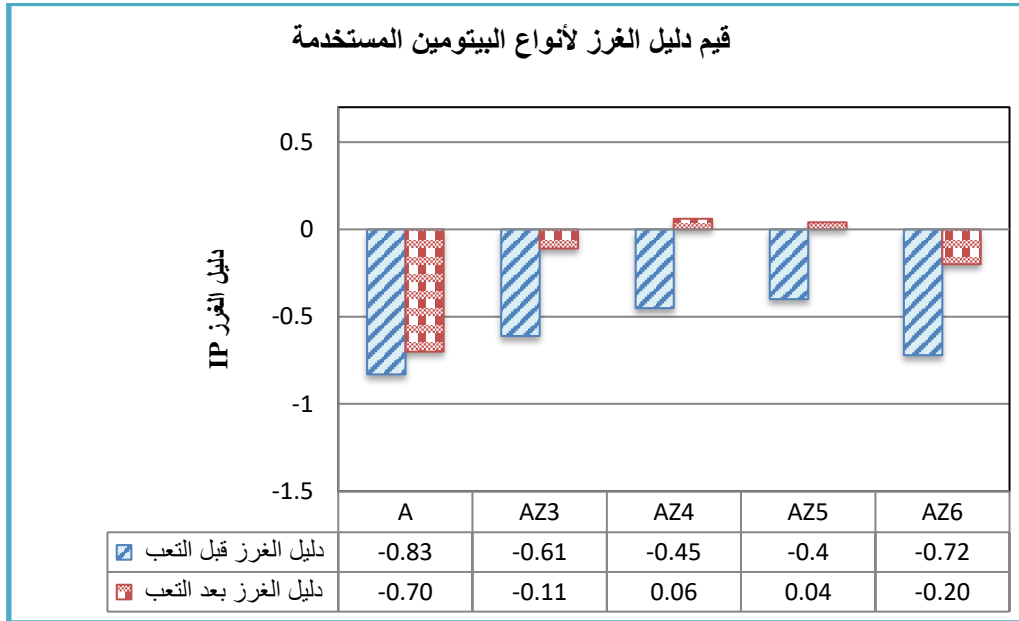
يحسب دليل الغرز Penetration Index على أساس نتائج درجة الغرز في الدرجة 25°C وذلك وفق العلاقة (1-4) [199]:

$$IP = \frac{20-500A}{1+50A} \quad (1-4)$$

حيث يتم حساب A من العلاقة:

$$A = \frac{\text{Log}(\text{pen}(25^{\circ}\text{C})) - \text{Log}(800)}{25 - \text{ASTM softening point}} \quad (2-4)$$

تم حساب قيم دليل الغرز لجميع أنواع البيتومين المدروسة، وتوضيحها في الشكل (4-16)، ويتضح من الشكل أن قيم دليل الغرز لجميع العينات المختبرة، تقع ضمن حدود المجال المسموح المختبرة $[-1.5, +0.7]$ ، كما يتضح ازدياد قيم دليل غرز الرباط المعدل المدروس، بالمقارنة مع مثيلاتها لغير المعدل.



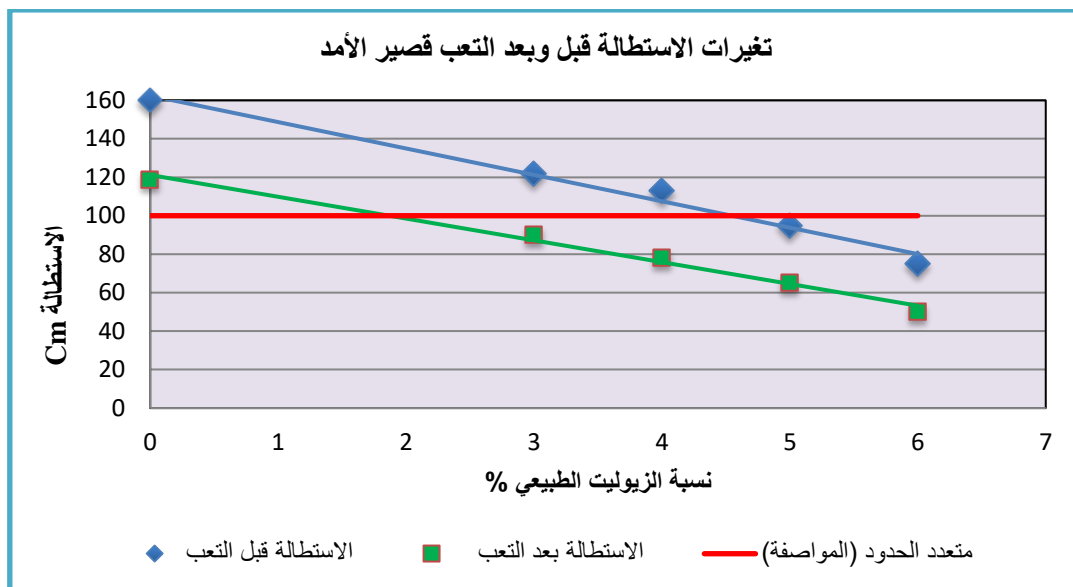
الشكل (4-16): تغيرات قيم دليل الغرز لأنواع البيتومين المدروسة

4.3.5.4. دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي في قيم قابلية السحب (المطاوعة):

يُظهر الجدول (10-4) والشكل (17-4) نتائج تجارب الاستطالة للرابط البيتوميني المعدل وغير المعدل بالزيوليت الطبيعي، قبل وبعد التعرض للتعب قصير الأمد.

الجدول (10-4): نتائج اختبارات الاستطالة قبل وبعد التعب قصير الأمد

بعد التعب قصير الأمد		قبل التعب قصير الأمد		نوع البيتومين
المتوسط	الاستطالة cm	المتوسط	الاستطالة cm	
119.0	113	160.0	160	A
	118		160	
	120		160	
	125		160	
90.0	86	122.0	118	ANZ3%
	88		120	
	92		122	
	94		128	
78.0	76	113.0	110	ANZ4%
	80		112	
	74		114	
	82		116	
65.0	67	95.0	94	ANZ5%
	71		100	
	58		90	
	64		96	
50.0	42	75.0	70	ANZ6%
	47		76	
	60		74	
	51		80	



الشكل (4-17): تغيرات الاستطالة للبيتومين المعدل وغير المعدل بالزيوليت الطبيعي قبل وبعد التعب قصير الأمد

تشير نتائج تجارب الاستطالة إلى تناقص قيم الاستطالة، مع زيادة نسبة الزيوليت الطبيعي بمقدار (24, 29, 41, 53)% عند نسب الإضافة (3, 4, 5, 6) على التوالي، وإلى تناقصها بمقدار (24, 34, 45, 58)% بعد التعرض للتعب قصير الأمد، ويعزى هذا التناقص إلى تعرض الرابط البيتوميني للإجهاد الحراري.

5.3.5.4 دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي في قيم الخسارة في الكتلة:

تم تحديد قيم الخسارة في الكتلة لأنواع البيتومين المدروسة، وفقاً لاختبار فرن الطبقة الرقيقة الدوار RTOFT الموضح في الشكل (4-18). ويبين الجدول (4-11) والشكل (4-19) التغيرات الحاصلة في كتلة البيتومين بعد التعرض للتعب قصير الأمد.

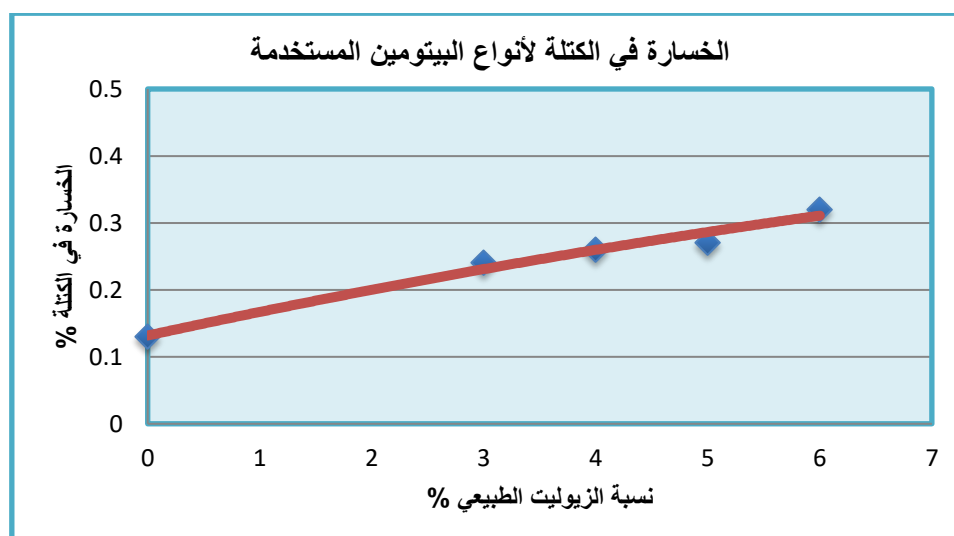


الشكل (4-18): اختبار فرن الطبقة الرقيقة الدوار RTOFT

الجدول (4-11): الخسارة في الكتلة لأنواع البيتومين المدروسة بعد التعب قصير الأمد

نوع البيتومين	وزن العلبه فارغة gr	وزن (العينة + العلبه) قبل التجربة gr	وزن (العينة + العلبه) بعد التجربة gr	الخسارة في الكتلة %	الوسطي %
A	156.32	191.4	191.35	-0.143	-0.13
	158.18	193.29	193.24	-0.142	
	158.96	194.02	193.98	-0.114	
ANZ3%	159.11	194.39	194.31	-0.227	-0.24
	156.98	192.2	192.12	-0.227	
	156.41	191.48	191.39	-0.257	
ANZ4%	158.22	193.43	193.34	-0.256	-0.26
	158.98	194.3	194.21	-0.255	
	159.15	194.44	194.34	-0.283	
ANZ5%	158.21	193.33	193.24	-0.256	-0.27
	159.18	194.34	194.24	-0.284	
	156.37	191.68	191.58	-0.283	
ANZ6%	158.26	193.4	193.28	-0.341	-0.32
	159	194.1	193.99	-0.313	
	159.14	194.42	194.31	-0.312	

أشارت نتائج اختبارات الخسارة في الكتلة بعد اختبار RTOFT، إلى ازدياد قيمتها مع زيادة نسبة الزيوليت الطبيعي، كما هو موضح في الشكل (5-15)، وذلك بسبب فقدان الماء الموجود ضمن بنية الزيوليت. كما أشارت إلى بقاء قيم الخسارة في الكتلة ضمن حدود المواصفات المسموحة [-0.5, +0.5].



الشكل (4-19): الخسارة في الكتلة لأنواع البيتومين المدروسة

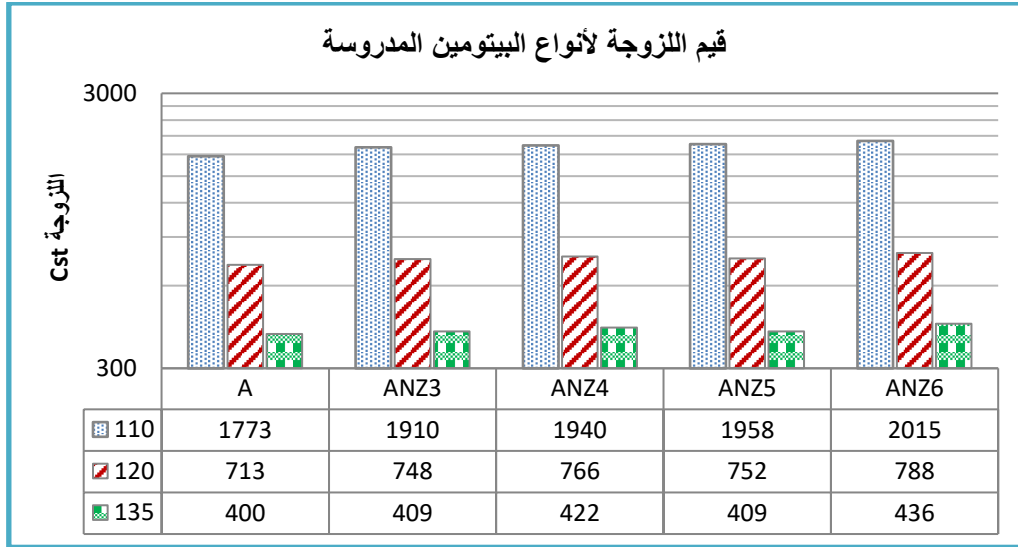
6.3.5.4. دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي في قيم لزوجة الرابط البيتوميني (قابلية التشغيل):

أُجريت اختبارات اللزوجة في هذه الدراسة بهدف تحديد طريقة الإضافة المثلى للزيوليت الطبيعي، ويظهر الجدول (4-12) والشكل (4-20) نتائج تجارب لزوجة الرابط البيتوميني المعدل وغير المعدل بالزيوليت الطبيعي عند درجات حرارة °C (110, 120, 135).

الجدول (4-12): نتائج اختبارات اللزوجة عند درجات حرارة °C (110, 120, 135)

نوع البيتومين	اللزوجة 110°C Cst	المتوسط	اللزوجة 120°C Cst	المتوسط	اللزوجة 135°C Cst	المتوسط
A	1756	1773	700	713	409	400
	1769		713		396	
	1795		726		396	
ANZ3%	1914	1910	752	748	422	409
	1940		739		409	
	1874		752		396	
ANZ4%	1954	1940	779	766	436	422
	1940		766		422	
	1927		752		409	
ANZ5%	1967	1958	739	752	409	409
	1967		752		396	
	1940		766		422	
ANZ6%	2020	2015	779	788	422	436
	2006		779		436	
	2020		805		449	

يعتبر تخفيض لزوجة الرابط البيتوميني الهدف الأساسي لإضافات المجبول البيتوميني منخفض درجات الحرارة. وأشارت بعض الدراسات السابقة إلى دور إضافات الزيوليت في تخفيض لزوجة الرابط البيتوميني بشكل بسيط، وبالتالي اعتمادها معياراً لإظهار تحسن قابلية تشغيل المجبول الكلي وتخفيض درجات حرارة إنتاجه [151,161]. في حين أشارت نتائج المؤتمر الأوروبي السادس لمواد البيتومين عام 2016 ودراسات أخرى أُجريت في الولايات المتحدة الأمريكية، إلى فشل اختبارات اللزوجة في إظهار تحسن قابلية تشغيل المجبول البيتوميني المعدل بإضافات الزيوليت تحديداً، باعتبارها من الإضافات الحاملة للماء، وإلى ضرورة دراسة التأثير المباشر لهذه الإضافات في خواص المجبول الكلي، علماً بأن الشركات المصنعة للزيوليت الصناعي توصي بإضافته مباشرةً للمجبول البيتوميني بهدف زيادة قابلية تشغيله [56,156].



الشكل (4-20): تغيرات لزوجة الرابط البيتوميني المعدل وغير المعدل بالزيوليت الطبيعي وفق درجة الحرارة

تشير نتائج هذه الدراسة إلى عدم حدوث تغيرات هامة في قيم لزوجة الرابط البيتوميني، ويعزى ذلك إلى أن الزيوليت جسم صلب لا ينحل بالبيتومين. وبناءً على ذلك تبين عدم إمكانية التنبؤ بقابلية تشغيل المجبول البيتوميني المعدل بإضافات الزيوليت، وفقاً لاختبارات الرابط البيتوميني. وتقود هذه النتيجة إلى ضرورة دراسة إضافة الزيوليت الطبيعي إلى المجبول البيتوميني مباشرةً، وتأثيرها في خواصه.

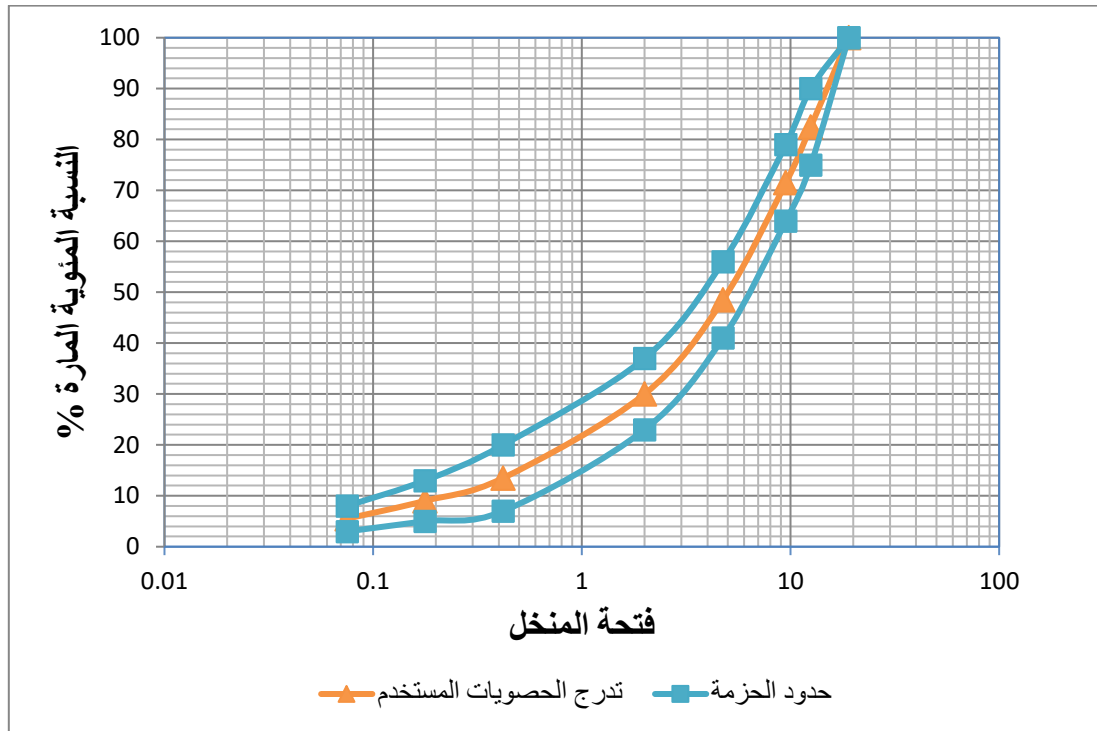
6.4. تحديد خواص الحصويات المستخدمة في تصميم الخلطات البيتومينية:

1.6.4. التركيب الحبي للحصويات:

يظهر الجدول (4-13) والشكل (4-21) التركيب الحبي للحصويات المدروسة.

الجدول (4-13): التركيب الحبي والحزمة النظامية للحصويات المستخدمة في تصميم الخلطة البيتومينية

رقم المنخل Sieve No.	فتحة المنخل mm	النسبة المئوية المارة %	التدرج المطلوب
3/4"	19	100.0	100.0
1/2"	12.5	82.5	75-90
3/8"	9.5	71.5	64-79
No. 4	4.75	48.5	41-56
No. 10	2	30	23-37
No. 40	0.42	13.5	7-20
No.80	0.177	9	5-13
No. 200	0.075	5.5	3-8



الشكل (21-4) منحنى التدرج الحبي للحصويات المستخدمة

2.6.4. الخواص الفيزيائية للحصويات المدروسة:

لقد أعطت اختبارات لوس أنجلوس والمكافئ الرملية والوزن النوعي للحصويات، النتائج المبينة في الجدول (14-4).

الجدول (14-4): الخصائص الفيزيائية للمواد المدروسة

18.7%	الفاقد بالاهتراء وفق لوس أنجلوس
74.4%	المكافئ الرملية
2.638	الوزن النوعي الفعال للحصويات
2.137	الوزن النوعي للزيوليت الطبيعي

7.4. دراسات المجبول البيتوميني الساخن:

1.7.4. تصميم الخلطات البيتومينية الساخنة المرجعية:

تم استخدام رابط بيتوميني ذي غرز 60/70 لتصميم جميع الخلطات البيتومينية، ويظهر الجدول (15-4) خصائص الرابط البيتوميني المستخدم قبل وبعد التعرض للتعب قصير الأمد، ويظهر من نتائج الاختبارات تطابق خواصه مع قيم المواصفات المسموحة [194-197].

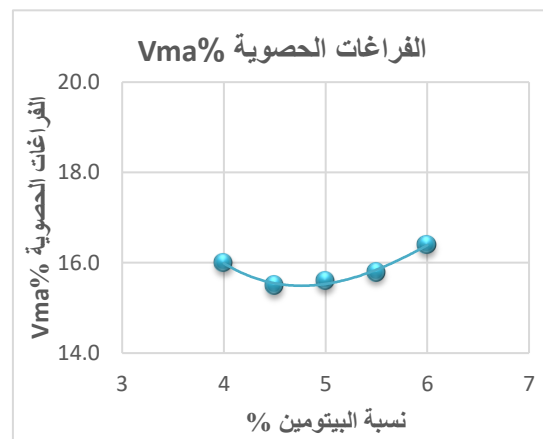
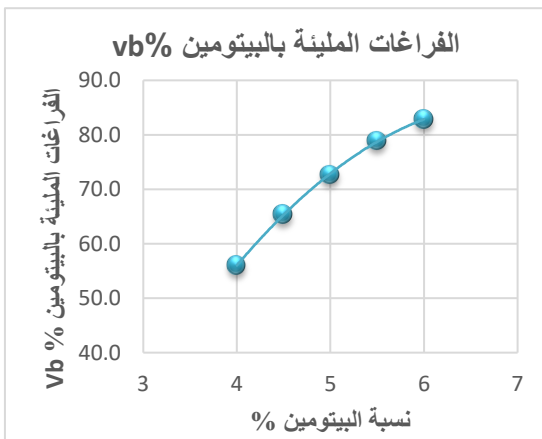
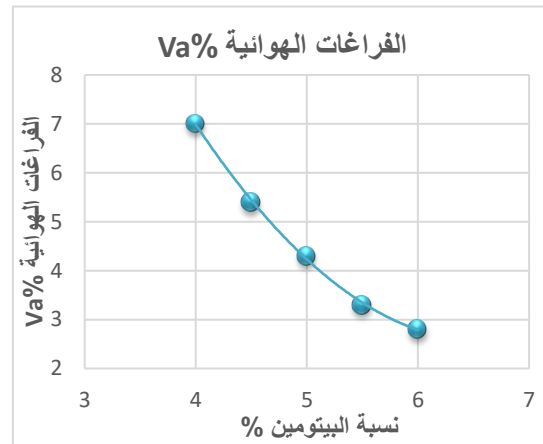
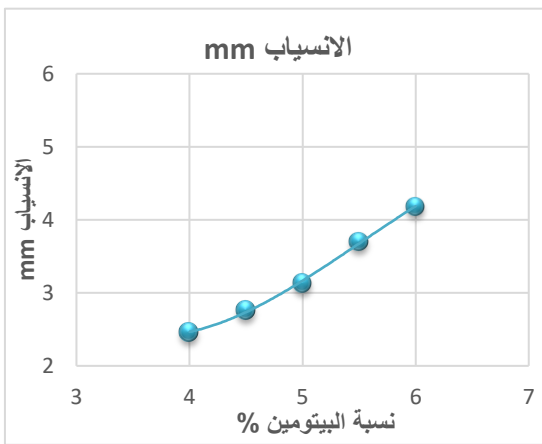
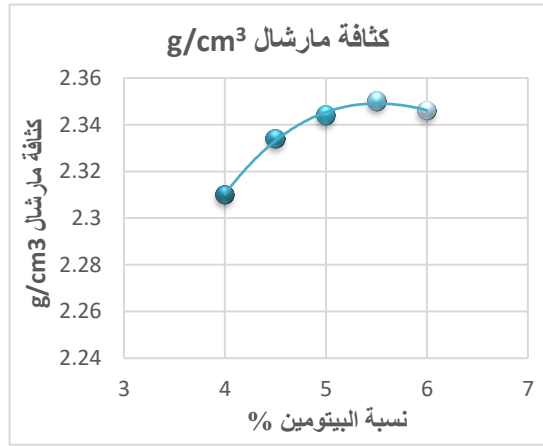
الجدول (15-4): الخصائص الفيزيائية لأنواع البيتومين المستخدمة قبل وبعد التعرض للتعب قصير الأمد

الخاصية	النتائج	حدود المواصفات [194-197]
الغرز عند درجة حرارة 25°C	61.3	60-70
الاستطالة (cm)	160	>100
درجة حرارة التميع °C	47.8	46-54
دليل الغرز	-1.3	[-1.5, +0.7]
اللزوجة (Cst)	120 °C	-
	135 °C	Min 295
الوزن النوعي (g/cm ³)	1.035	0.99 - 1.04
التغيرات بعد التعرض للعب قصير الأمد وفق اختبار RTOFT		
التغير في الكتلة %	-0.1	±0.5
الغرز المتبقي %	70.2	Min 50%
التغير في درجة حرارة التميع °C	+4.8	Max 9°C

بعد ذلك تم إضافة الرابط البيتوميني المسخن للحصويات وفق نسب وزنية % (4, 4.5, 5, 5.5, 6)، وإعداد ثلاث قوالب من قوالب مارشال لكل نسبة، وفق المتطلبات الفنية لطريقة مارشال (15 قالب بـ 75/ طرقة على كل وجه). يلي ذلك تحديد خواص مارشال (كثافة، ثبات، انسياب، فراغات هوائية)، ورسم منحنيات تغير هذه الخواص تبعاً لنسبة البيتومين المستخدم، وتحديد نسبة البيتومين على كل منحني والمحقة للكثافة العظمى والثبات الأعظمي ومتوسط المتطلبات الفنية للفراغات الهوائية. ويوضح الجدول (4-16) والشكل (4-22) نتائج تصميم الخلطة البيتومينية المرجعية.

الجدول (4-16): حساب عناصر مارشال لتحديد نسبة البيتومين المثالية للخلطات المرجعية المصممة باستخدام بيتومين 60/70

الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	وزن العينة (g)			حجم لعينة cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الكثافة العظمى gr/cm ³	الفراغات (%)			الثبات kg	عامل التصحيح الثبات	الثبات المصحح kg	الانسياب mm
		في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء				الهوائية	الحصوية	المليئة بالبيتومين				
A	4.0	1188.9	1196.6	682	514.5	2.311					980	1	980	2.33
B	4.0	1195.3	1201	684	517.1	2.312					1014	1	1014	2.45
C	4.0	1201.4	1207.9	687	520.9	2.306					1024	1	1024	2.60
متوسط نسبة الرابط 4%						2.310	2.484	56.0	16.0	7.0	1006.00		1006.00	2.46
A	4.5	1183	1187.60	681.6	506.0	2.338					1111	1.04	1155	2.78
B	4.5	1185.7	1190.10	682.0	508.1	2.334					1144	1.04	1190	2.85
C	4.5	1193.3	1197.80	685.5	512.3	2.329					1164	1	1164	2.66
متوسط نسبة الرابط 4.5%						2.334	2.466	65.4	15.5	5.4	1139.67		1169.67	2.76
A	5.0	1190	1192.5	684.8	507.7	2.344					1294	1.04	1346	3.12
B	5.0	1194.3	1195.5	685.5	510.0	2.342					1350	1	1350	3.22
C	5.0	1196.2	1200.2	690.4	509.8	2.346					1356	1	1356	3.04
متوسط نسبة الرابط 5%						2.344	2.448	72.7	15.6	4.3	1333.33		1350.67	3.13
A	5.5	1195.6	1196.6	686.8	509.8	2.345					1484	1	1484	3.64
B	5.5	1197.2	1198.4	689.8	508.6	2.354					1411	1.04	1467	3.78
C	5.5	1198.8	1199.9	689.9	510.0	2.351					1475	1	1475	3.68
متوسط نسبة الرابط 5.5%						2.350	2.431	78.9	15.8	3.3	1456.66		1475.33	3.70
A	6.0	1175.8	1176.6	676.0	500.6	2.349					1327	1.04	1380	4.12
B	6.0	1184.9	1185.9	681.3	504.6	2.348					1341	1.04	1395	4.16
C	6.0	1192.3	1193.1	683.6	509.5	2.340					1388	1	1388	4.25
متوسط نسبة الرابط 6%						2.346	2.414	82.8	16.4	2.8	1352		1387.67	4.18



الشكل (4-22): منحنيات مارشال (الثبات، الكثافة، الانسياب، الفراغات الهوائية، الفراغات الحصوية، الفراغات المليئة بالبيتومين) للخلطات المرجعية المصممة باستخدام بيتومين 60/70

لقد تم تصميم الخلطات المرجعية السابقة وفق طريقة مارشال، وتحديد درجات حرارة خلط ودمك العينات المختبرة، وفقاً لقيم لزوجة الرباط، وباعتماد على المواصفة ASTM D.2493 [200]، واعتمد بناءً على ذلك مجال درجات الحرارة $^{\circ}\text{C}$ (158-165) لخلط العينات و $^{\circ}\text{C}$ (145-150) لدمكها ورسها.

نستنتج من منحنيات مارشال بأن نسبة البيتومين المثالية المحققة للمتطلبات الفنية لطبقة اهتراء المجلول، والتي تمثل متوسط نسب البيتومين المحققة لـ (أعظم كثافة، أعظم ثبات، متوسط المتطلبات الفنية للفراغات الهوائية) هي 5.4%، ويظهر الجدول (4-17) نتائج تصميم الخلطات البيتومينية عند نسبة البيتومين المثالية. وتبين من النتائج أنها تتوافق مع المتطلبات الفنية المطلوبة لإنتاج المجلول الساخن.

الجدول (4-17): عناصر مارشال عند نسبة البيتومين المثالية 5.4%

الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	كثافة مارشال 3gr/cm	الفراغات (%)			الثبات kg	الانسياب mm
			المليئة بالبيتومين	الحصوية	الهوائية		
A	5.40	2.346				1416	3.42
B	5.40	2.346				1418	3.48
C	5.40	2.347				1428	3.56
متوسط نسبة الرابط 5.4%		2.346	77.2	15.86	3.6	1420.67	3.49

2.7.4. دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي السوري في خواص المجلول البيتوميني الساخن:

تمت إضافة الزيوليت الطبيعي المطحون والمار من المنخل No.200، وفق درجة حرارة المخبر، للحصويات الساخنة وفق ثلاثة نسب وزنية % (0.3, 0.6, 0.9)، يلي ذلك إضافة الرابط البيتوميني الساخن إلى المزيج وفق نسب % (4, 4.5, 5, 5.5, 6)، وتصميم المجلول وفق طريقة مارشال والموضحة في الأشكال (4-23, 4-24, 4-25)، ومن ثم تم دراسة التغيرات الحاصلة في خواص الخلطات البيتومينية بعد التعديل بالزيوليت الطبيعي ومقارنتها مع الخلطات المرجعية.

الهدف من إضافة الزيوليت الطبيعي وفق درجة حرارة المخبر للمزيج الساخن، هي إحداث الرغوة في المزيج وإنتاج البيتومين الرغوي، حيث يتحرر الماء الموجود بالزيوليت الطبيعي عند خلطه مع البيتومين الساخن أو مع المجلول البيتوميني الساخن، وتتشكل الرغوة في المزيج، فتتحسن قابلية التشغيل والمقاومة والديمومة.



الشكل (4-23): إضافة البيتومين الساخن لمزيج (الحصويات الساخنة-الزيوليت الطبيعي)

الشكل (4-24): درجة حرارة دمك العينات



الشكل (4-25): الخلطات البيتومينية المعدلة بالزئوليت الطبيعي

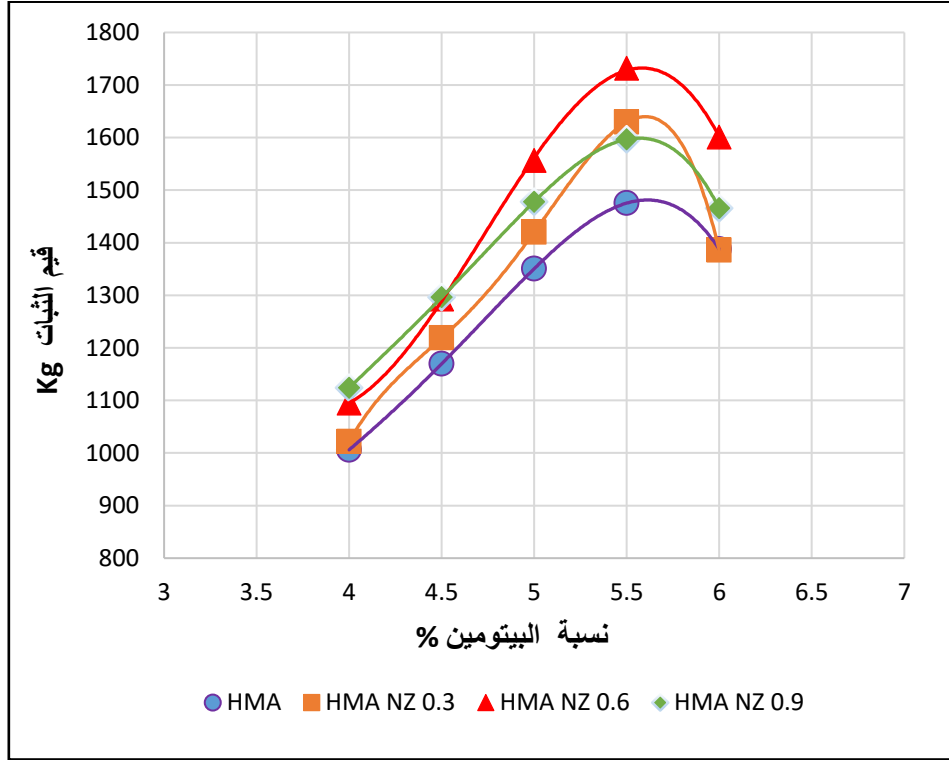
يظهر الجدول (4-18) نتائج تصميم الخلطات البيتومينية المرجعية والخلطات المحتوية على الزئوليت الطبيعي، وفق ثلاثة نسب (0.3, 0.6, 0.9) من الوزن الكلي للحصويات.

الجدول (4-18): عناصر مارشال للخلطات البيتومينية الساخنة المعدلة وغير المعدلة بالزئوليت الطبيعي

نسبة الزئوليت الطبيعي %	نسبة الرابط البيتوميني %	الثبات kg	الانسياب mm	كثافة مارشال g/cm ³	الفراغات المليئة %vfa حجما	الفراغات الهوائية %va حجما	نسبة الرابط المثالية %
0	4	1006	2.46	2.310	56	7	5.40
	4.5	1169.67	2.76	2.334	65.4	5.4	
	5	1350.67	3.13	2.344	72.7	4.3	
	5.5	1475.33	3.70	2.350	78.9	3.3	
	6	1387.67	4.18	2.346	82.8	2.8	
0.3	4	1021.67	2.38	2.314	56.8	6.8	5.35
	4.5	1218.67	2.49	2.338	66.5	5.1	
	5	1420.00	2.95	2.352	74.6	3.9	
	5.5	1629.33	3.61	2.356	80.6	3.0	
	6	1385.67	3.86	2.354	85	2.4	
0.6	4	1094.67	2.34	2.316	57.4	6.6	5.30
	4.5	1292.67	2.61	2.342	67.4	4.9	
	5	1556.33	3.20	2.357	76	3.6	
	5.5	1731.67	3.77	2.360	81.8	2.8	
	6	1600.67	4.26	2.358	86.2	2.2	
0.9	4	1123.67	2.29	2.319	58.2	6.4	5.28
	4.5	1296	2.70	2.345	68.3	4.7	
	5	1500	3.35	2.359	76.7	3.5	
	5.5	1596.67	3.87	2.362	82.6	2.7	
	6	1465.33	4.21	2.360	87	2	

1.2.7.4. دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي في قيم ثبات مارشال:

يُبين الشكل (4-26)، بالاعتماد على نتائج الجدول السابق، منحنيات الثبات للخلطات البيتومينية المعدلة وغير المعدلة بالزيوليت الطبيعي، وفقاً لنسب الرابط البيتوميني المدروسة (4-6)%. ويظهر من هذه المنحنيات بأن قيم الثبات لجميع الخلطات المصممة كانت ضمن حدود المواصفات المسموحة (أكبر من 800 kg).

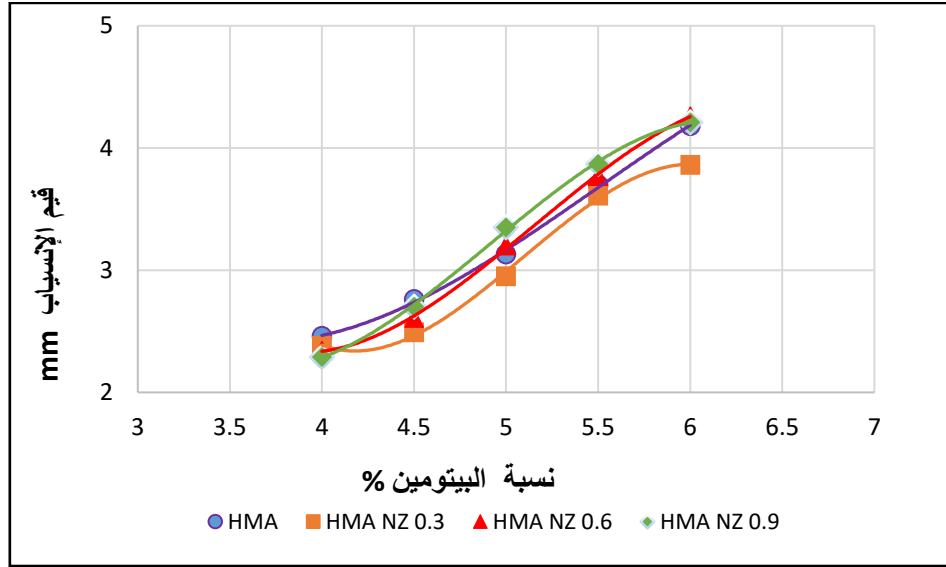


الشكل (4-26): تغير قيم ثبات الخلطات البيتومينية الساخنة بدلالة نسب الزيوليت الطبيعي المضافة

تُشير منحنيات ثبات مارشال إلى ازدياد قيم الثبات بعد التعديل بالزيوليت الطبيعي، وإلى أن هذا الازدياد يرتبط بنسبة الرابط البيتوميني المدروسة، حيث أن أعلى قيم لثبات مارشال حصلت للخلطات المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.6%. ويعزى هذا التحسن إلى دور الزيوليت الطبيعي في تحسين قابلية تشغيل المجبول البيتوميني نتيجة الرغوة الحاصلة في المزيج بعد إضافته.

2.2.7.4. دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي في قيم انسياب مارشال:

يُظهر الشكل (4-27) منحنيات انسياب مارشال وفقاً لمعطيات الجدول (4-18)، ويتضح منه بأن قيم الانسياب لمعظم الخلطات المصممة باستخدام الزيوليت الطبيعي كانت ضمن حدود المواصفات المحلية والعالمية المسموحة (2-4)mm.

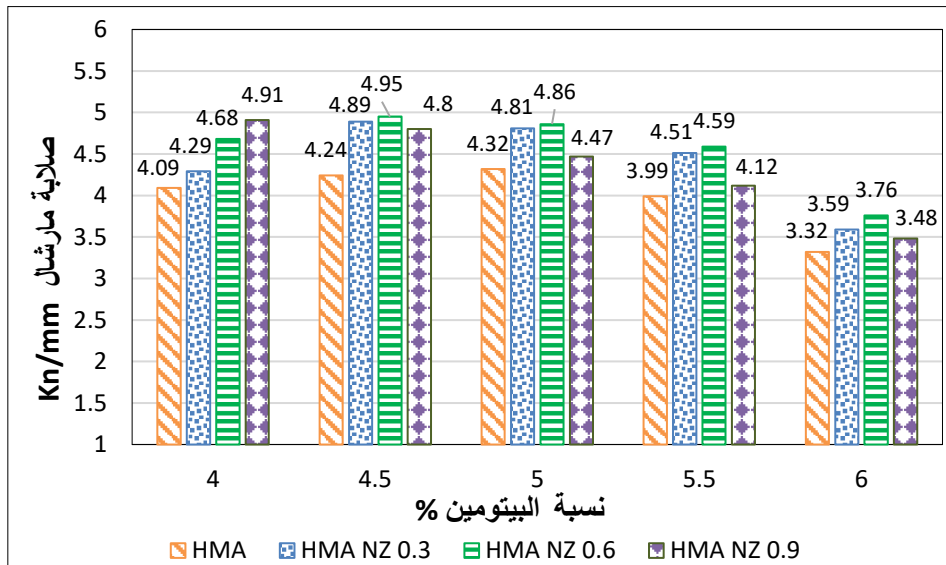


الشكل (27-4): تغير قيم انسياب الخلطات البيتومينية الساخنة بدلالة نسب الزيوليت الطبيعي المضافة

يُعبّر معيار صلابة مارشال Marshall quotient (MQ) عن النسبة بين الثبات والانسياب، ويُستخدم لتعيين مقاومة الخلطات البيتومينية للتشوه الدائم (التخدد). وكلما زادت قيمة هذا المعيار كلما كانت مقاومة الخلطات البيتومينية للتشوه الدائم أكبر، ويحسب من العلاقة التالية [201,202]:

$$MQ = \frac{\text{الثبات (Kg)}}{\text{الانسياب (mm)}} \geq 2 \text{ KN/mm} \quad (3-4)$$

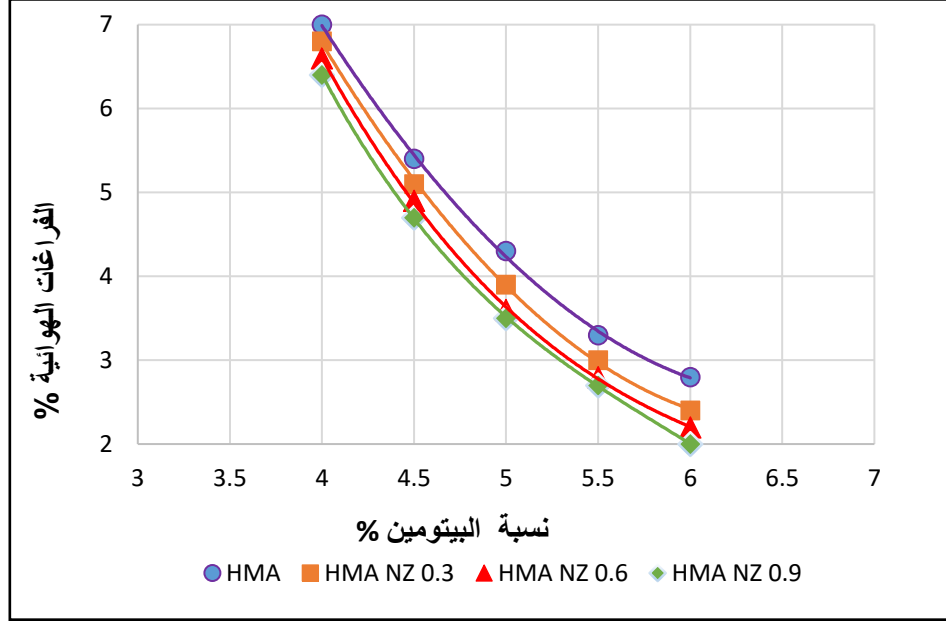
ويظهر الشكل (28-4) ازدياد قيم صلابة مارشال بعد التعديل بالزيوليت الطبيعي، حيث أبدت الخلطات المحتوية على نسبة 0.6% من الزيوليت الطبيعي أعلى مقاومة تشوه عند جميع نسب البيتومين، باستثناء النسبة 4%، والتي أظهرت عندها الخلطات HMA_{Z0.9} المقاومة الأعلى.



الشكل (28-4): تغير قيم صلابة الخلطات البيتومينية الساخنة بدلالة نسب الزيوليت الطبيعي المضافة

3.2.7.4. دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي في نسب الفراغات الهوائية:

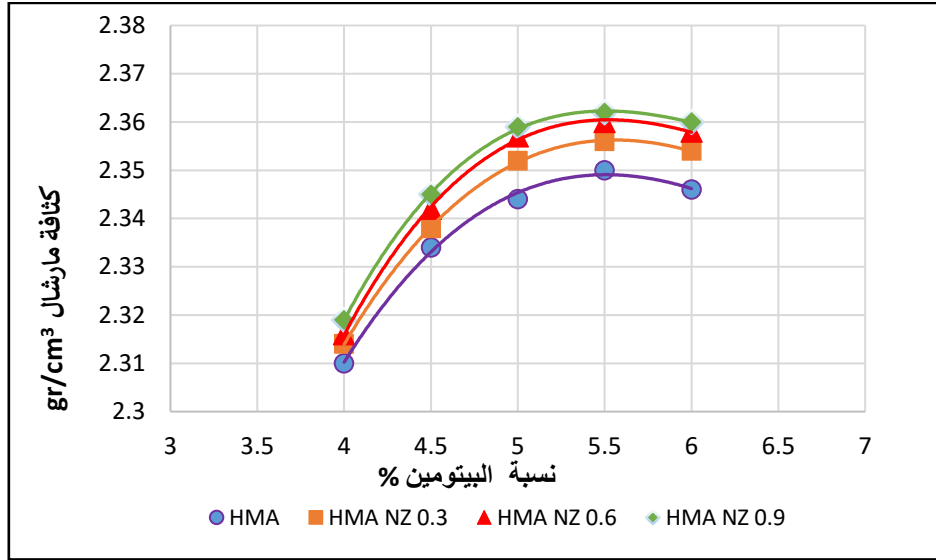
تُشير منحنيات الفراغات الهوائية الموضحة في الشكل (4-29)، والمبنية على معطيات الجدول (4-18)، إلى تناقص قيم الفراغات الهوائية للخلطات البيتومينية المصممة المحتوية على الزيوليت الطبيعي، وإلى أنها كانت ضمن حدود المواصفات المحلية والعالمية المسموحة ASTM % (3-5) عند نسب رابط بيتوميني (4.8-5.4)، بالنسبة للخلطات (HMAZ_{0.6}, HMAZ_{0.9})، وعند نسب رابط بيتوميني (4.5-5.5) للخلطات HMAZ_{0.3}.



الشكل (4-29): تغير نسب الفراغات الهوائية في الخلطات الساخنة بدلالة نسب الزيوليت الطبيعي المضافة

4.2.7.4. دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي في قيم كثافة مارشال:

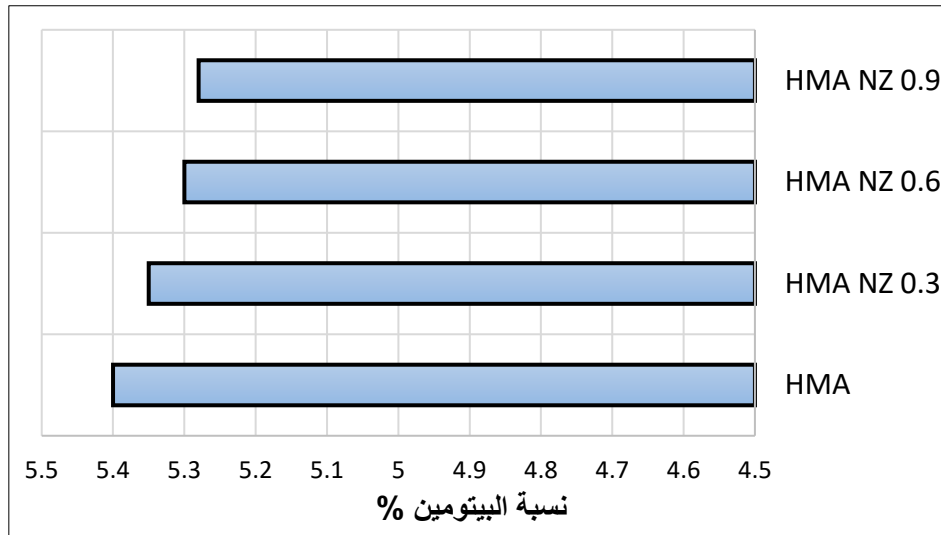
يُوضح الشكل (4-30) المبني استناداً لمعطيات الجدول (4-18)، ازدياد قيم كثافة مارشال مع زيادة نسبة الزيوليت الطبيعي. ويمكن أن يعزى ذلك إلى تحسن عملية خلط المجبول ورصه نتيجةً للتغيرات الفيزيائية الحاصلة في المزيج، والمتمثلة في ازدياد حجم الرابط البيتوميني وحدوث الرغوة في المزيج بعد التعديل بالزيوليت الطبيعي.



الشكل (4-30): قيم كثافة الخلطات الساخنة وفق محتوى البيتومين بدلالة نسب الزيوليت الطبيعي المضافة

5.2.7.4. دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي في نسبة الرابط البيتوميني المثالية:

تُشير قيم النسب المثالية للرابط البيتوميني الموضحة في الشكل (4-31)، والمبنية على معطيات الجدول (4-18)، إلى عدم حدوث تغيرات هامة في قيم الرابط المثلى بعد التعديل بالزيوليت الطبيعي، حيث تراوحت النسب بين % (5.4-5.28)، ويمكن أن يُعزى ذلك إلى ثبات درجات حرارة خلط ودمك المجبول البيتوميني المعتمدة في هذه المرحلة من الدراسة.



الشكل (4-31): محتوى البيتومين المثالي في الخلطات الساخنة بدلالة نسب الزيوليت الطبيعي المضافة

8.4. دراسات المجلول البيتوميني الدافئ:

1.8.4. إنتاج المجلول البيتوميني الدافئ باستخدام الزيوليت الطبيعي:

لا توجد مواصفات محلية لإنتاج المجلول البيتوميني الدافئ في سورية، ويعتمد مقدار التخفيض الممكن في درجات حرارة الإنتاج، على الدراسة التجريبية ونوع الإضافة المستخدمة وتوصيات الشركات المنتجة لها، حيث تسمح إضافات الزيوليت الصناعي، على سبيل المثال، بتخفيض درجات حرارة الإنتاج بمقدار $^{\circ}\text{C}$ (20-30) [166,203-207].

تم التحقق من إمكانية استخدام الزيوليت الطبيعي المحلي في إنتاج المجلول البيتوميني الدافئ، ولأجل تحقيق هذا الهدف تم دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي في خواص المجلول البيتوميني الدافئ، والذي تم إنتاجه عند درجة حرارة $^{\circ}\text{C}$ (135) وبخفيض مقداره $^{\circ}\text{C}$ 25 عن المجلول الساخن، كما هو موضح في الجدول (4-19). حيث تم إضافة الزيوليت الطبيعي المطحون والمار من المنخل No.200 وفق درجة حرارة المخبر للحصويات المسخنة لدرجة الحرارة السابقة، وفق ثلاثة نسب وزنية % (0.6, 0.9, 1.2)، تلى ذلك عملية إضافة الرابط البيتوميني الساخن إلى المزيج وتصميم المجلول البيتوميني، ومن ثم دراسة التغيرات الحاصلة في خواص الخلطات المصممة.

الجدول (4-19): درجات حرارة خلط ودمك عينات المجلول البيتوميني

الخلطات البيتومينية	درجات حرارة الخلط	درجات حرارة الدمك
HMA _{60/70}	160 $^{\circ}\text{C}$	150 $^{\circ}\text{C}$
WMA _{60/70}	135 $^{\circ}\text{C}$	125 $^{\circ}\text{C}$
WMA _{NZ} (0.6, 0.9, 1.2)%	135 $^{\circ}\text{C}$	125 $^{\circ}\text{C}$

2.8.4. التغيرات الحاصلة في خواص الخلطات البيتومينية الدافئة:

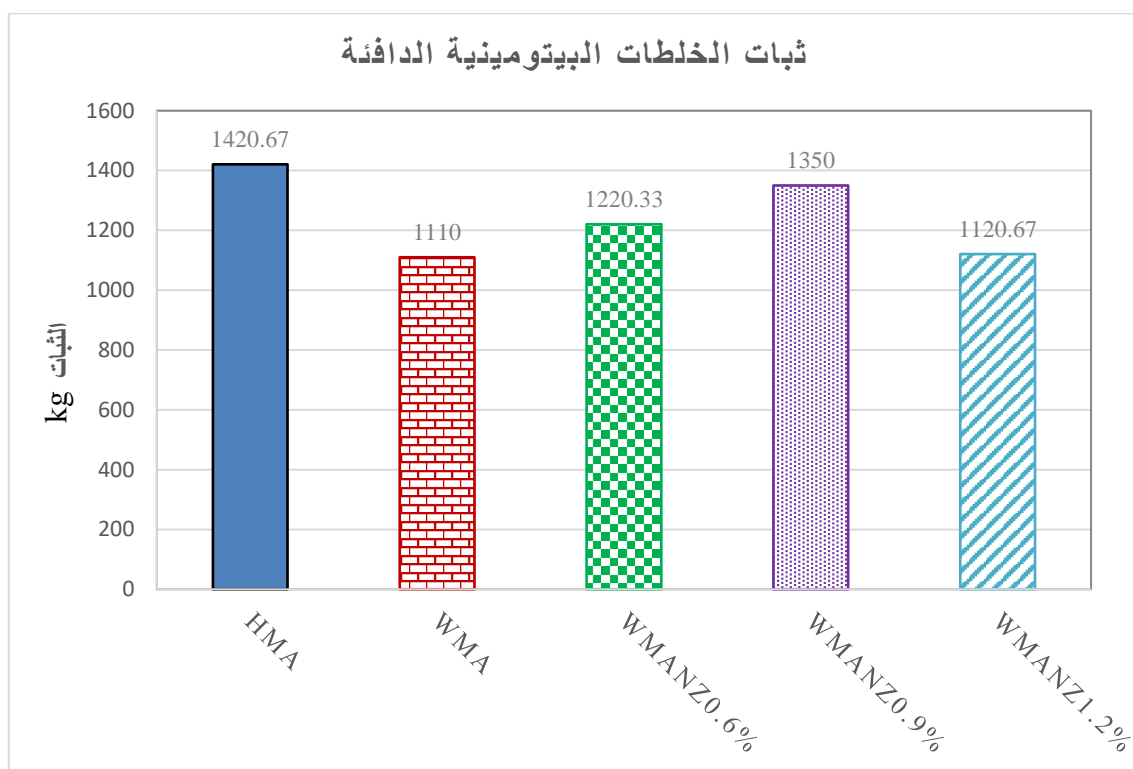
يظهر الجدول (4-20) نتائج تصميم الخلطات البيتومينية الساخنة والدافئة، وفقاً لطريقة مارشال، عند نسب البيتومين المثالية ووفقاً لنسبة الزيوليت الطبيعي المضافة، حيث تم تخفيض درجات حرارة الإنتاج بمقدار $^{\circ}\text{C}$ 25.

الجدول (4-20): عناصر مارشال للخلطات البيتومينية الساخنة والدافئة عند نسب البيتومين المثالية

الخلطة البيتومينية	درجة حرارة الإنتاج °C	نسبة الرابط المثالية %	الثبات kg	الانسياب mm	كثافة مارشال g/cm ³	الفراغات المليئة %vfa	الفراغات الهوائية %va
HMA	160	5.4	1420.67	3.49	2.346	77.2	3.6
WMA	135	5.9	1110	3.88	2.310	74.8	4.4
WMA _{NZ0.6%}		5.87	1220.33	3.81	2.307	74.5	4.5
WMA _{NZ0.9%}		5.73	1350	3.73	2.327	77.3	3.8
WMA _{NZ1.2%}		5.7	1120.67	3.57	2.315	75	4.3

1.2.8.4. التغيرات الحاصلة في قيم ثبات مارشال:

يُبين الشكل (4-32) تغير قيم ثبات مارشال للخلطات البيتومينية الدافئة بالمقارنة مع الخلطات الساخنة، عند نسب البيتومين المثالية، وفقاً لنسبة الزيوليت الطبيعي المضافة. ويتضح من هذا الشكل بأن قيم الثبات لجميع الخلطات البيتومينية الدافئة كانت ضمن حدود المواصفات المسموحة (أكبر من 800 kg)، بغض النظر عن نوع ونسبة الإضافة المستخدمة.



الشكل (4-32): تغير ثبات الخلطات البيتومينية الدافئة بدلالة نسب الزيوليت المضافة

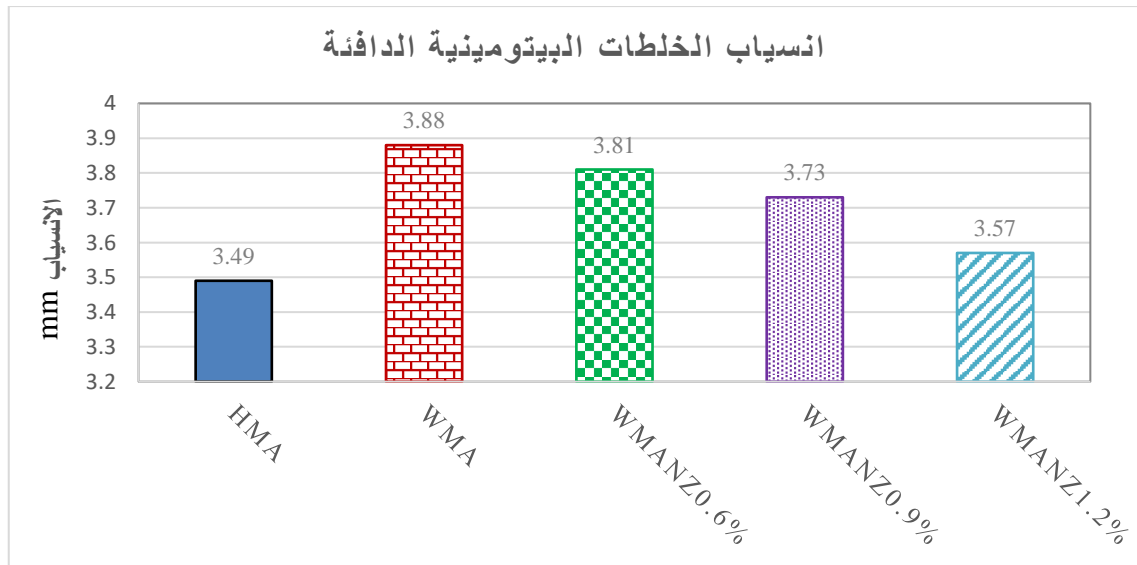
تُشير نتائج ثبات مارشال في حالة تخفيض درجة حرارة الإنتاج بمقدار 25°C إلى:

- حدوث انخفاض كبير يصل إلى 22% في قيم ثبات الخلطات البيتومينية الدافئة WMA (من دون إضافات)، بالمقارنة مع ثبات الخلطات البيتومينية الساخنة.
- الحد من انخفاض قيم ثبات مارشال الخلطات البيتومينية الدافئة بعد التعديل بالزيوليت، حيث بلغ مقدار (14, 5, 21) للخلطات الدافئة المعدلة بنسب (0.6, 0.9, 1.2) من إضافة الزيوليت الطبيعي على التوالي.
- ازدياد قيم الثبات مع زيادة نسبة الزيوليت المضافة حتى النسبة 0.9% ثم تبدأ بالتناقص.
- امتلاك الخلطات البيتومينية الدافئة المعدلة بالزيوليت الطبيعي بنسبة 0.9%، والمصنعة عند درجة حرارة 135°C، قيم ثبات مماثلة، للخلطات المرجعية الساخنة تقريباً وبانخفاض 5% فقط. ولأجل إيضاح دور الزيوليت الطبيعي تم مقارنتها مع الخلطات الدافئة المصنعة بدون استخدام أية إضافات WMA، حيث تبين تحسن قيم الثبات بمقدار 21.6%.

يتضح من النتائج السابقة انخفاض ثبات المجبول البيتوميني مع انخفاض الطاقة الحرارية المستخدمة لإنتاجه، وتحسنه بعد التعديل بالزيوليت الطبيعي، ويمكن أن يُعزى ذلك إلى دور الزيوليت الطبيعي في تحسين قابلية تشغيل المجبول نتيجة الرغوة الحاصلة في المزيج بعد إضافته. وتتفق هذه النتائج مع نتائج الدراسات السابقة المتعلقة بإنتاج المجبول الدافئ باستخدام إضافات الزيوليت [166,178,208].

2.2.8.4. التغيرات الحاصلة في قيم انسياب مارشال:

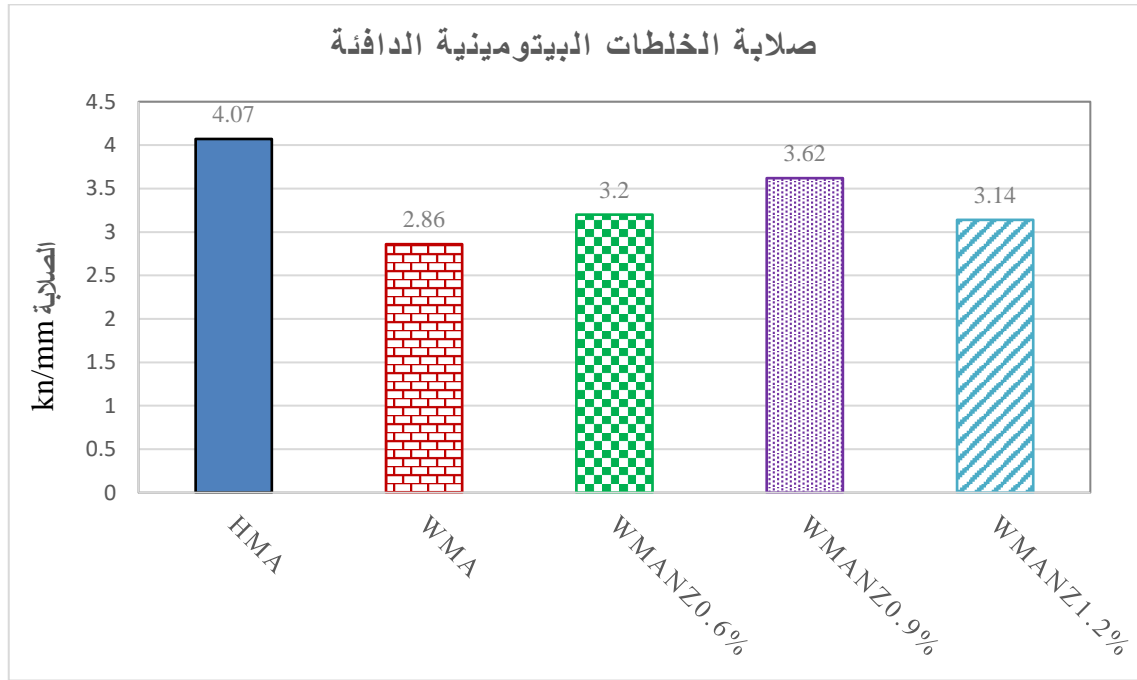
يُظهر الشكل (4-33) انسياب الخلطات البيتومينية الدافئة بالمقارنة مع الخلطات الساخنة، عند نسب البيتومين المثالية، وفقاً لنسبة الزيوليت الطبيعي. ويتضح منه بأن قيم الانسياب لجميع الخلطات الدافئة المصممة باستخدام الزيوليت تقع ضمن حدود المواصفات المسموحة mm (2-4).



الشكل (4-33): تغير قيم انسياب الخلطات البيتومينية الدافئة بدلالة نسب الزيوليت المضافة

يتضح من نتائج انسياب مارشال أيضاً، ازدياد قيم انسياب الخلطات الدافئة بالمقارنة مع الساخن وتناقصها مع زيادة نسبة الزيوليت المستخدمة، مع بقائها أعلى من مثيلاتها للخلطات الساخنة. وتتفق هذه النتائج مع نتائج الدراسات السابقة [166,178].

ويوضح الشكل (4-34) قيم معيار صلابة الخلطات البيتومينية الدافئة بالمقارنة مع الساخنة عند نسب البيتومين المثالية، وفقاً لنسبة الإضافة المستخدمة من الزيوليت الطبيعي.



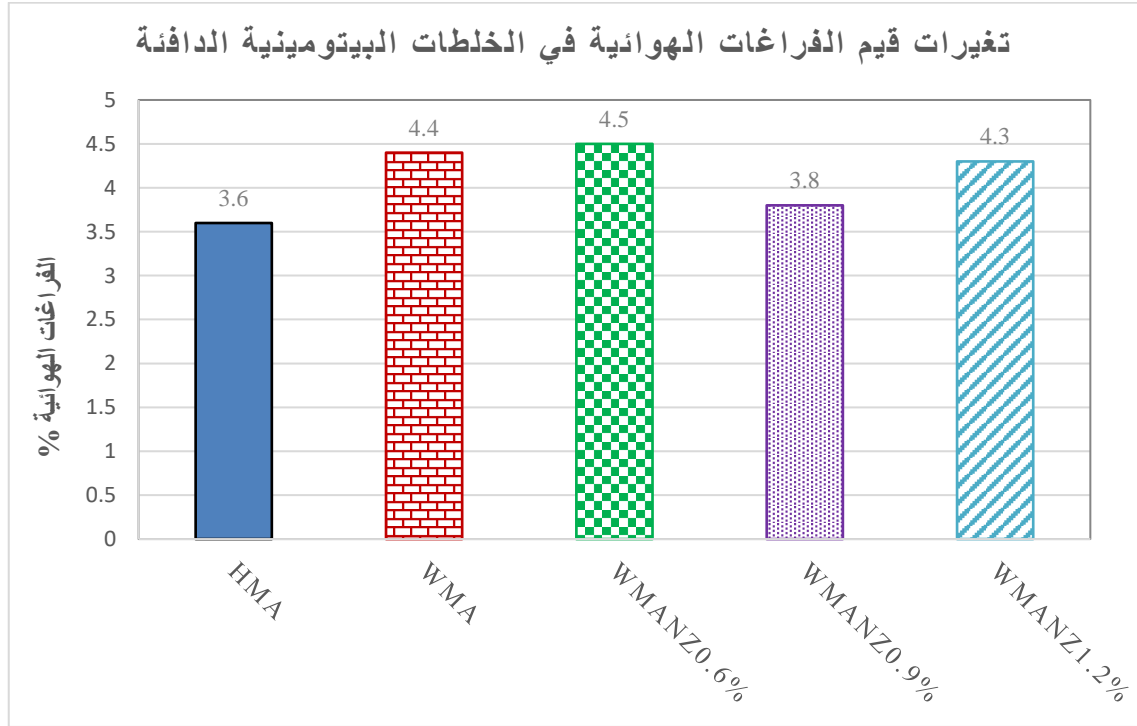
الشكل (4-34): تغير قيم صلابة الخلطات الدافئة بدلالة نسب الزيوليت المضافة

يتضح من قيم صلابة مارشال النتائج التالية:

- انخفاض مقاومة الخلطات ضد التشوه بمقدار 30% مع انخفاض درجة حرارة الإنتاج بمقدار 25°C.
- انخفاض صلابة الخلطات الدافئة المعدلة بالزيوليت الطبيعي عند نسب الإضافة (0.6, 0.9, 1.2) بمقدار (21, 11, 23) % على التوالي، بالمقارنة مع الخلطات الساخنة، وتحسنت بمقدار (12, 27, 10) %، بالمقارنة مع الخلطات الدافئة غير المعدلة WMA.
- ازدياد صلابة الخلطات الدافئة مع زيادة نسبة الزيوليت الطبيعي حتى النسبة 0.9%، التي تم الحصول عندها على أعلى مقاومة للتشوه الدائم.

3.2.8.4. التغيرات الحاصلة في نسب الفراغات الهوائية:

يبين الشكل (4-35) التغيرات الحاصلة في قيم الفراغات الهوائية للخلطات البيتومينية الدافئة، قبل وبعد التعديل بالزيوليت الطبيعي، وذلك عند درجة حرارة 135°C ، حيث يلاحظ ازدياد قيم الفراغات الهوائية للخلطات الدافئة بالمقارنة مع الخلطات الساخنة، مع بقائها ضمن حدود المواصفات المسموحة $(3-5)\%$.

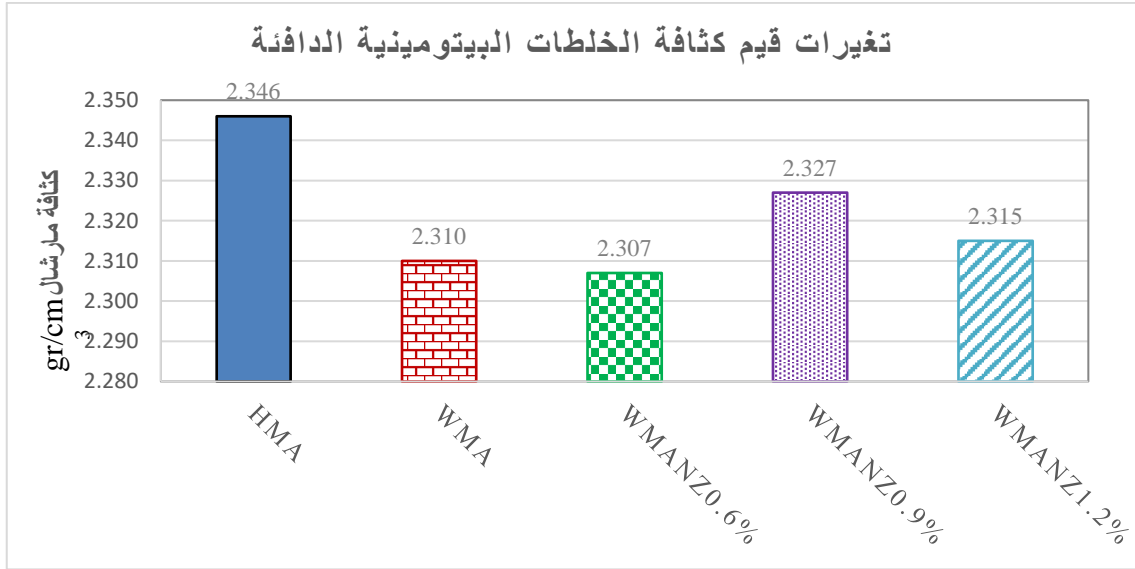


الشكل (4-35): تغير نسب الفراغات الهوائية في الخلطات الدافئة بدلالة نسب الزيوليت المضافة

يتضح من التغيرات الحاصلة في قيم الفراغات الهوائية للمجبول الدافئ المعدل بالزيوليت الطبيعي، بأن أقل قيمة للفراغات الهوائية كانت عند نسبة الإضافة 0.9% ، وهو مؤشر لتحسن قابلية الرص، بالتوافق مع تحسن قيم الثبات ومقاومة التحدد. وتتفق نتيجة دور الزيوليت في تحسين قابلية الرص مع نتائج الدراسات السابقة [56,169,209].

4.2.8.4. التغيرات الحاصلة في قيم كثافة مارشال:

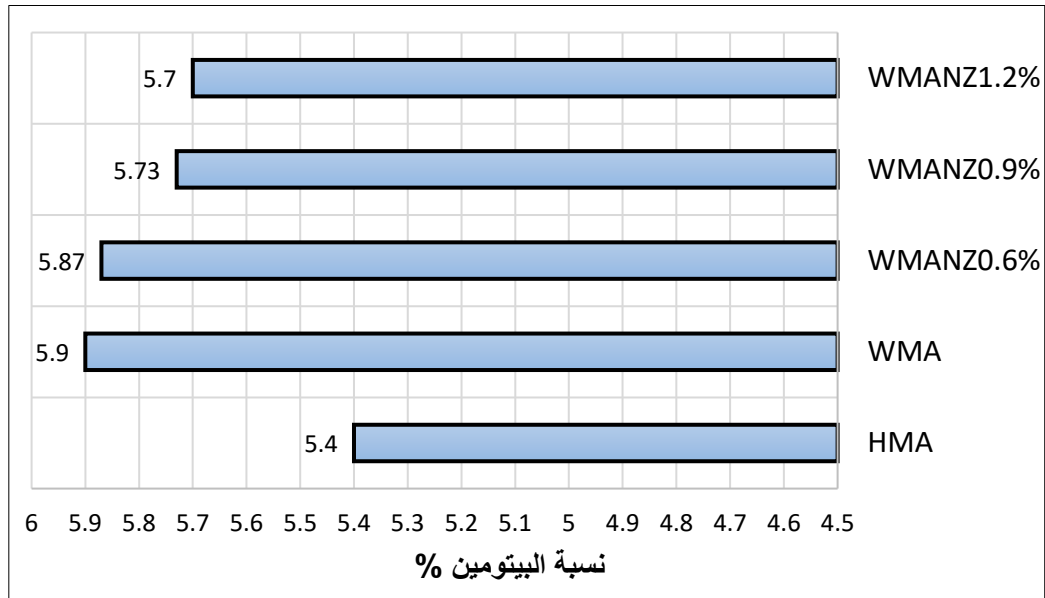
يوضح الشكل (4-36) التغيرات الحاصلة في قيم كثافة مارشال للخلطات البيتومينية الدافئة، قبل وبعد التعديل بالزيوليت الطبيعي، عند نسب الرابط البيتوميني المثلى. ويلاحظ هنا دور الزيوليت في تحسين كثافة الخلطات الدافئة، وبأن كثافة الخلطات الدافئة المحتوية على نسبة زيوليت 0.9% هي الأعلى بين مثيلاتها المعدلة بالنسب الأخرى، لكنها تبقى أقل من كثافة الخلطات الساخنة المرجعية، مما يدل على تحسن قابلية تشغيل المجبول البيتوميني الدافئ المعدل بالزيوليت، كما يتفق مع نتائج الدراسات السابقة [166,178,209].



الشكل (36-4): قيم كثافة الخلطات البيتومينية الدافئة بدلالة نسب الزيوليت المضافة

5.2.8.4. التغيرات الحاصلة في نسب الرابط البيتوميني المثلى:

تُشير قيم النسب المثالية للرابط البيتوميني الموضحة في الشكل (37-4)، إلى ازدياد النسب المطلوبة من الرابط البيتوميني للخلطات البيتومينية الدافئة بالمقارنة مع الساخنة، ويعزى ذلك إلى انخفاض درجة حرارة الإنتاج بمقدار 25°C ، في حين لم تؤدي إضافة الزيوليت الطبيعي إلى حدوث تغيرات هامة في النسب المثلى للرابط عند تثبيت درجة حرارة الإنتاج عند (135°C) ، وتتفق هذه التغيرات مع نتائج الدراسات السابقة لجهة ازدياد الحاجة للرابط مع انخفاض درجات حرارة الإنتاج [166,178,208].



الشكل (37-4): محتوى البيتومين المثالي في الخلطات المدروسة بدلالة نسب الزيوليت الطبيعي المضافة

3.8.4. دراسة حساسية الخلطات البيتومينية الدافئة لتأثير الرطوبة:

تعتبر الحساسية تجاه تأثير المياه أحد أهم العوامل المؤثرة في أداء الخلطات الدافئة، وذلك لأن انخفاض الطاقة الحرارية أثناء إنتاج المجلول البيتوميني يؤدي إلى تقليل الكثافة من جهة، وتقليل التلاصق بين البيتومين والحصى من جهة ثانية، مما يؤدي لحدوث ظاهرة الانسلاخ والتعرية.

تم استخدام المواصفة AASHTO T283 لتقييم حساسية الخلطات الساخنة والدافئة لتأثير الرطوبة، وذلك بإجراء اختبار الشد غير المباشر (Indirect tensile strength (ITS) على عينات الخلطات البيتومينية المدروسة، عند نسب البيتومين المثالية، وعند نسب الإضافات المثلى وفقاً لاختبارات مارشال، مع اعتماد نسب فراغات هوائية $1\pm 7\%$ ، والهدف من زيادة نسبة الفراغات هو إحداث تسارع في تأثير الرطوبة في خواص المجلول البيتوميني، ويتم التحكم بنسب الفراغات الهوائية المستهدفة مخبرياً من خلال التحكم بطاقة الرص المعتمدة، ويوضح الشكل (4-38) تغير نسب الفراغات الهوائية بتغير طاقة الرص.



الشكل (4-38): العلاقة بين نسب الفراغات الهوائية وطاقة الرص

أجريت اختبارات مقاومة الشد غير المباشر في الحالتين الرطبة والجافة، بعد أن تم تقسيم العينات لمجموعتين، كما هو موضح في الشكل (4-39) وفق الآتي:

- المجموعة الأولى: يتم وضعها في حمام مائي بدرجة حرارة 25°C لمدة ساعتين.
- المجموعة الثانية: يتم وضعها بالثلاجة لمدة 16 ساعة، تغمر بعدها بحمام مائي بدرجة حرارة 60°C لمدة 24 ساعة، ثم يتم وضعها في حمام مائي بدرجة حرارة 25°C لمدة ساعتين [191].



الشكل (4-39): عينات الخلطات البيتومينية المشروطة (الحالة الرطبة)

وضعت العينات بعد إخراجها من الماء في جهاز الشد غير المباشر، واستخدام جهاز مارشال لتطبيق حمولة ضغط على عينات المجبول البيتوميني بمعدل تحميل 51mm/min، وذلك باستخدام شريطي تحميل متعاكسين بعرض 12.5mm، وتطبيق إجهاد متعامد على طول السطح المحمل، مما أدى لفشل العينة وانقسامها على طول مستوي التحمل كما هو موضح في الشكل (4-40)، ومن ثم تم حساب مقاومة الشد غير المباشر في الحالتين الرطبة والجافة من العلاقة (4-4) [191]:

$$ITS = \frac{2P}{\pi.t.D} \quad (4-4)$$

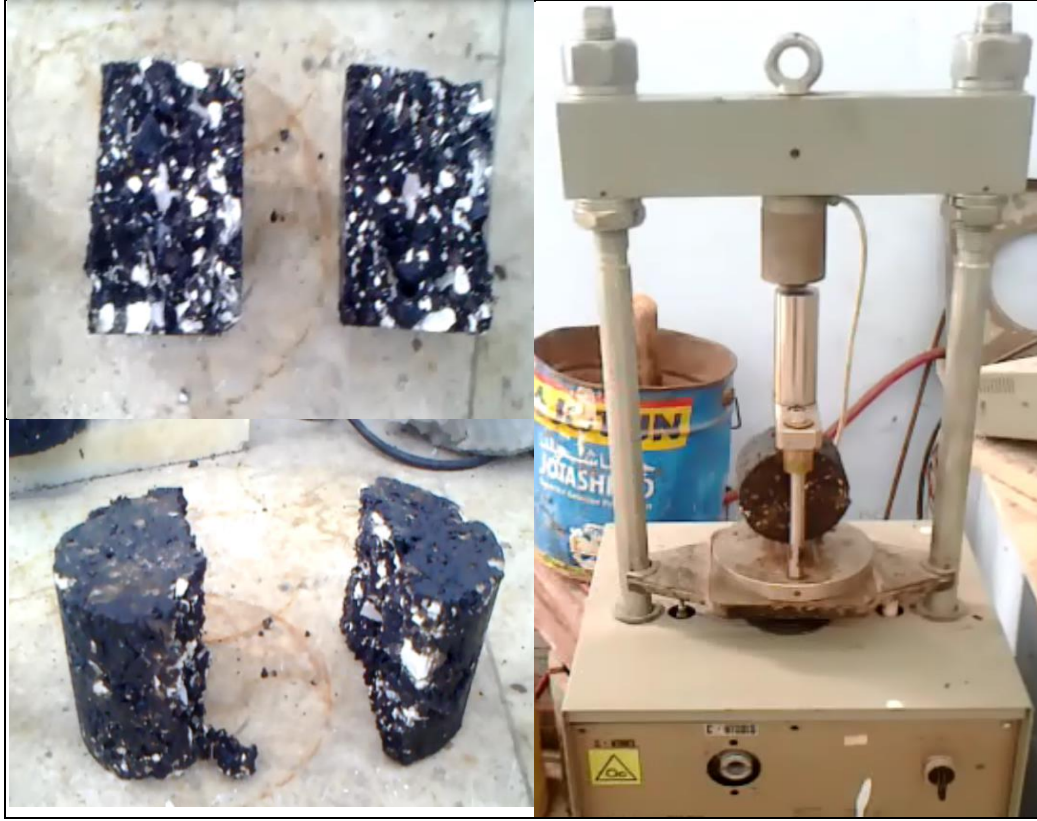
حيث أن:

ITS: مقاومة الشد (kpa)

P: الحمولة القصوى (kN)

t: ارتفاع العينة (m)

D: قطر العينة (m)



الشكل (4-40): اختبار الشد غير المباشر

وبناءً على نتائج مقاومة الشد غير المباشر للعينات الرطبة والجافة، تم حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية تجاه الرطوبة) من العلاقة (5-4) [191,213]:

$$TSR = \frac{ITS_{cond}}{ITS_{uncond}} * 100 \quad (5-4)$$

TSR: معدل مقاومة الشد غير المباشر (%).

ITS_{con} : مقاومة الشد غير المباشر بالحالة الرطبة (المشروطة).

ITS_{uncond} : مقاومة الشد غير المباشر بالحالة الجافة (الغير مشروطة).

تشتت بعض المواصفات العالمية (الأمريكية تحديداً)، ألا تقل مقاومة الشد غير المباشر للعينات المشروطة الرطبة عن 448Kpa، وللعينات الغير مشروطة عن 600Kpa [210,211,212]. وتشير نتائج اختبار الشد غير المباشر، الموضحة في الجدول (4-21) والشكلين (4-41)، (4-42)، إلى تناقص مقاومة الشد غير المباشر للخلطات الدافئة في الحالتين الجافة والرطبة مقارنةً مع الخلطات الساخنة، وانحرافها عن قيم المواصفات المطلوبة بالنسبة لعينات الخلطات الدافئة غير المعدلة بالزبوليت، وإلى

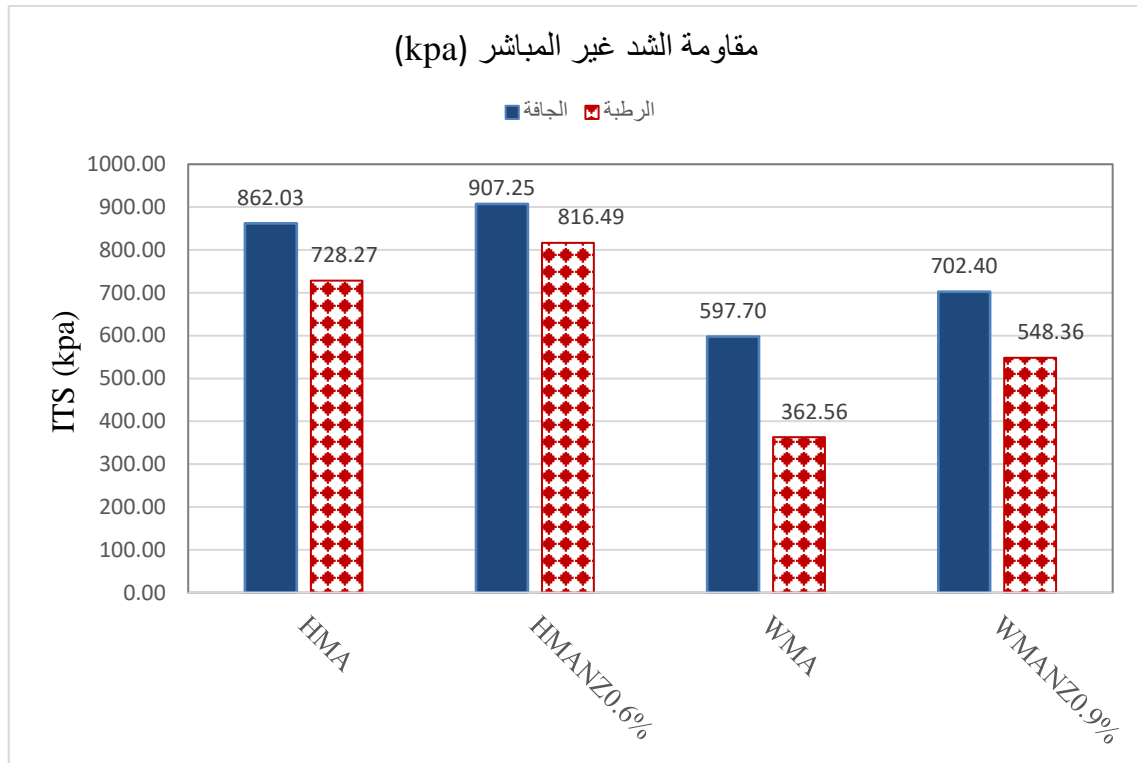
دور الزيوليت الطبيعي في تحسين هذه القيم، لتلبية شروط المواصفات المطلوبة، كما يتضح أيضاً بأن الخلطات الساخنة المعدلة بالزيوليت الطبيعي تتمتع بمقاومة أعلى للشد غير المباشر.

الجدول (4-21): نتائج اختبار مقاومة الشد غير المباشر

نوع الخلطة	P_{cond} (KN)	P_{uncond} (KN)	ITS_{con} (kpa)	ITS_{uncond} (kpa)	TSR%
HMA	7.63	9.08	728.27	862.03	84.5
HMA _{NZ0.6%}	8.49	9.41	816.49	907.25	90.0
WMA	3.85	6.35	362.56	597.70	60.7
WMA _{NZ 0.9%}	5.82	7.47	548.36	702.40	78.0

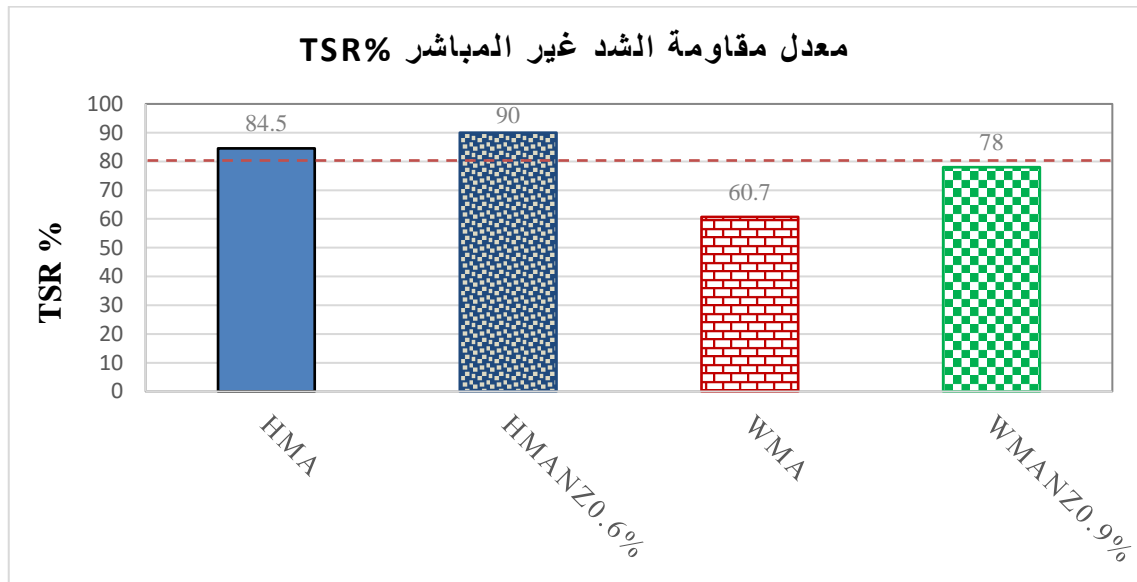


الشكل (4-41): بعض قيم حمولات الكسر في اختبار مقاومة الشد غير المباشر



الشكل (4-42): مقاومة الشد غير المباشر للخلطات المدروسة

وبين الشكل (4-43) قيم معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للعينات المدروسة.



الشكل (4-43): معدل مقاومة الشد غير المباشر للخلطات المدروسة

يتضح من معطيات الشكل السابق النتائج التالية:

- أبدأت الخلطات الساخنة المعدلة بالزبوليت الطبيعي المقاومةً الأعلى ضد تأثير الرطوبة، حيث حسنت مقاومة الخلطات الساخنة بمقدار 6.5 %
- فشلت جميع الخلطات الدافئة في تحقيق متطلبات حساسية الخلطات للرطوبة المحددة بالموصفات (80% ≥) [165,191,213,214]، ويعزى ذلك إلى انخفاض درجات حرارة إنتاج المبول الدافئ، وبالتالي احتمال بقاء نسبة من المياه نتيجة عدم التجفيف الكامل للحصويات، تؤدي لانخفاض مقاومة الشد. وتتفق نتائج هذه الدراسة مع نتائج الدراسات السابقة، والتي أشارت إلى انخفاض حساسية الخلطات الدافئة للرطوبة [216,217,218].
- ترافق الانخفاض في حساسية الخلطات الدافئة غير المعدلة بالزبوليت ضد الرطوبة، مع الانخفاض النسبي في قيم الثبات والارتفاع النسبي في قيم الفراغات الهوائية، بالمقارنة مع الخلطات الساخنة وفق نسب الإضافة، مع العلم أنه وفي كثير من الأحيان تكون الخلطات الساخنة نفسها غير محققة لمتطلبات مقاومة تأثير الماء، وخاصةً عند استخدام الحصويات السيليسية أو حتى الكلسية أحياناً [219,220].
- أهمية دور الزبوليت الطبيعي في تحسين حساسية الخلطات الدافئة لتأثير الرطوبة بمقدار 28.5% بالمقارنة مع الخلطات الدافئة غير المعدلة، مع اقتراب حساسية الخلطات الدافئة المعدلة بالزبوليت الطبيعي من قيم المواصفات المطلوبة (78%).

توصي الدراسات السابقة باستخدام موانع الانسلاخ (السائلة، الكلس المطفأ، الإسمنت)، لتحسين مقاومة المبول البيتوميني ضد تأثير المياه [221,222]. ويعتبر الكلس المطفأ أحد أكثر الإضافات استعمالاً لتحسين التصاق البيتومين بالحصويات. وغالباً ما يتم إضافة الكلس كجزء من المواد المألئة للفراغات (المارة من المنخل N0.200) بنسب تتراوح بين 1-2.5% من الوزن الكلي للحصويات، ويمكن إضافته إلى الحصويات الرطبة أو الجافة، أو خلطه مع الماء لتشكيل الطين وخط الناتج مع الحصويات، وذلك قبل أن يتم تجفيفها وخطها مع الرابط البيتوميني، كما يمكن إضافة الكلس المطفأ مباشرة إلى الرابط البيتوميني المسخن [223].

يعتبر الكلس المطفأ Hydrated Lime (HL) فعالاً في الحد من خطر الرطوبة على الرصف البيتوميني، لأنه يتفاعل مع سطح الحصويات، مشكلاً منتج كيميائي يمتص الشحنات السالبة، ويتماسك بقوة مع الرابط البيتوميني حتى في حال وجود الرطوبة، مما يؤدي لتحسن مقاومة الخلطات للشد وزيادة مقاومتها للتشوه الدائم، والإقلال من ظاهرة انسلاخ الحصويات [223,224,225].

تم في هذه الدراسة تحسين مقاومة الخلطات الدافئة ضد الرطوبة باستخدام الكلس المطفأ، كبديل جزئي عن مسحوق الحجر الكلسي، وذلك وفق عدة نسب 1.5, 2, 2.5% من وزن الحصويات الكلي، وفق الطريقة الرطبة الشائعة الاستخدام في الولايات المتحدة الأمريكية. وتعتمد هذه الطريقة على إضافة الماء بنسبة 5% من وزن الحصويات (من دون المواد المألئة) وخطها جيداً لمدة دقيقتين، كما هو موضح في

الشكل (4-44)، ومن ثم يتم إضافة الكلس المطفأ بالنسب المطلوبة من وزن الحصىات الرطبة وخلطها جيداً لمدة ثلاثة دقائق. والغاية من إضافة الماء هو ترطيب الحصىات وتنشيط الكلس المطفأ، بحيث يتم تغليفها به بعد الخلط الجيد، وتنقع العينات في أواني بلاستيكية محكمة الإغلاق لمدة 48 ساعة، شرط أن يتم الاستخدام خلال 45 يوم، وأخيراً تضاف النسب المطلوبة من المواد المائلة، ويتم تجفيف الحصىات في الفرن عند درجات الحرارة المطلوبة [223-230].

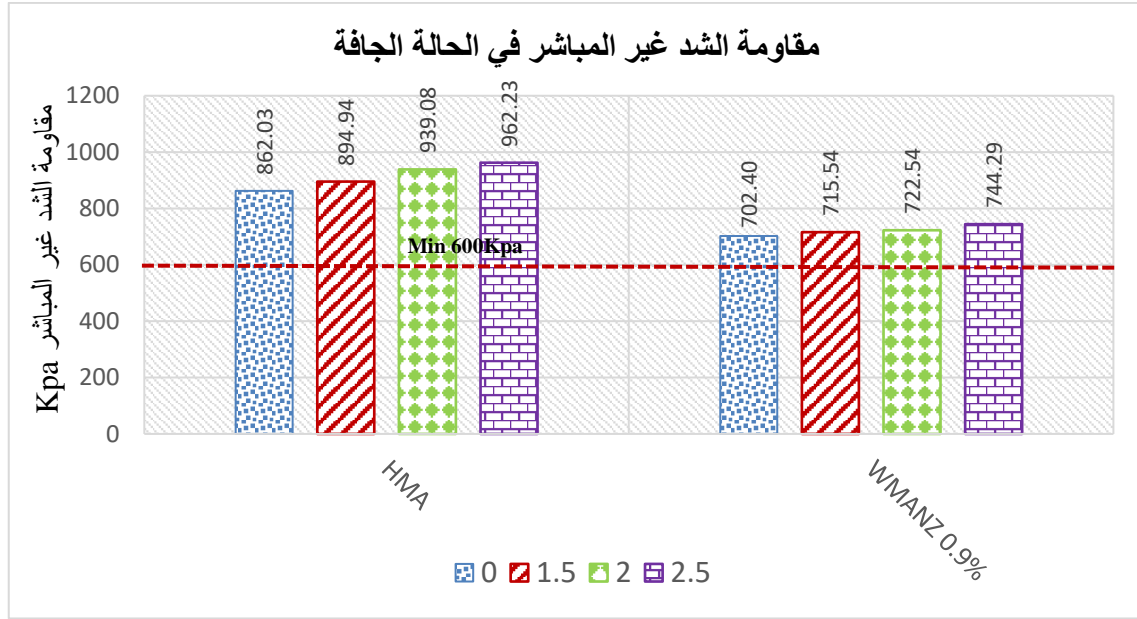


الشكل (4-44): إضافة الماء إلى الحصىات (قبل إضافة الكلس المطفأ)

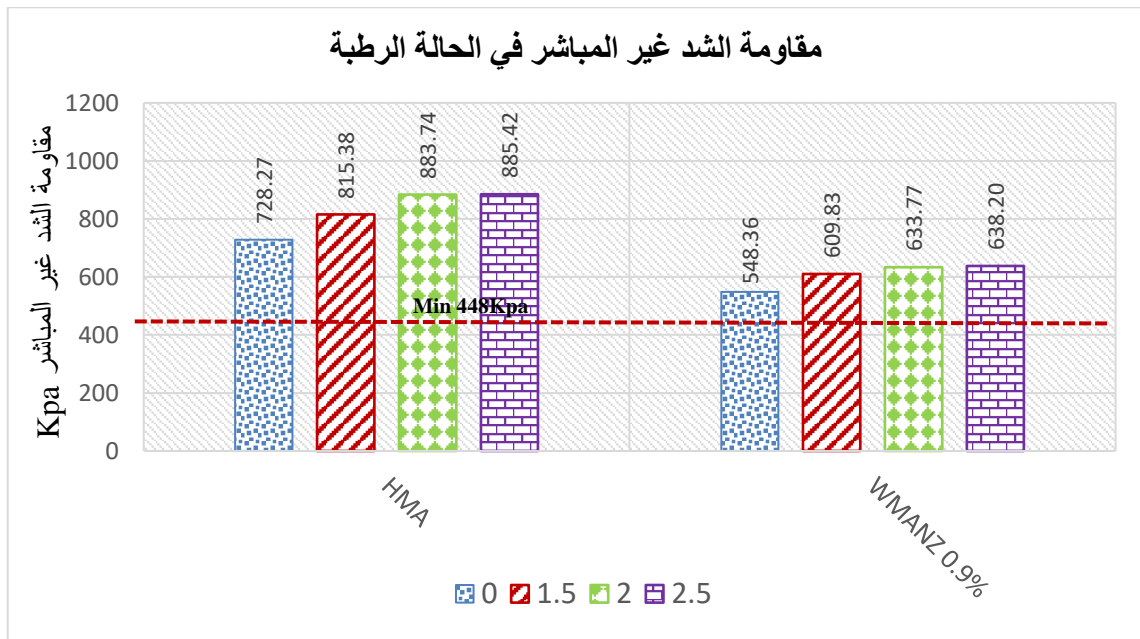
يظهر الجدول (4-22) والشكلان (4-45)، (4-46) نتائج اختبار مقاومة الشد غير المباشر في الحالتين الرطبة والجافة، بدلالة محتوى الخلطات البيتومينية من الكلس المطفأ. ويوضح الشكل (4-47) دور الكلس المطفأ في تحسين قيم حساسية الخلطات الدافئة والساخنة ضد تأثير الرطوبة.

الجدول (4-22): نتائج اختبار مقاومة الشد غير المباشر بدلالة محتوى الخلطات من الكلس المطفأ

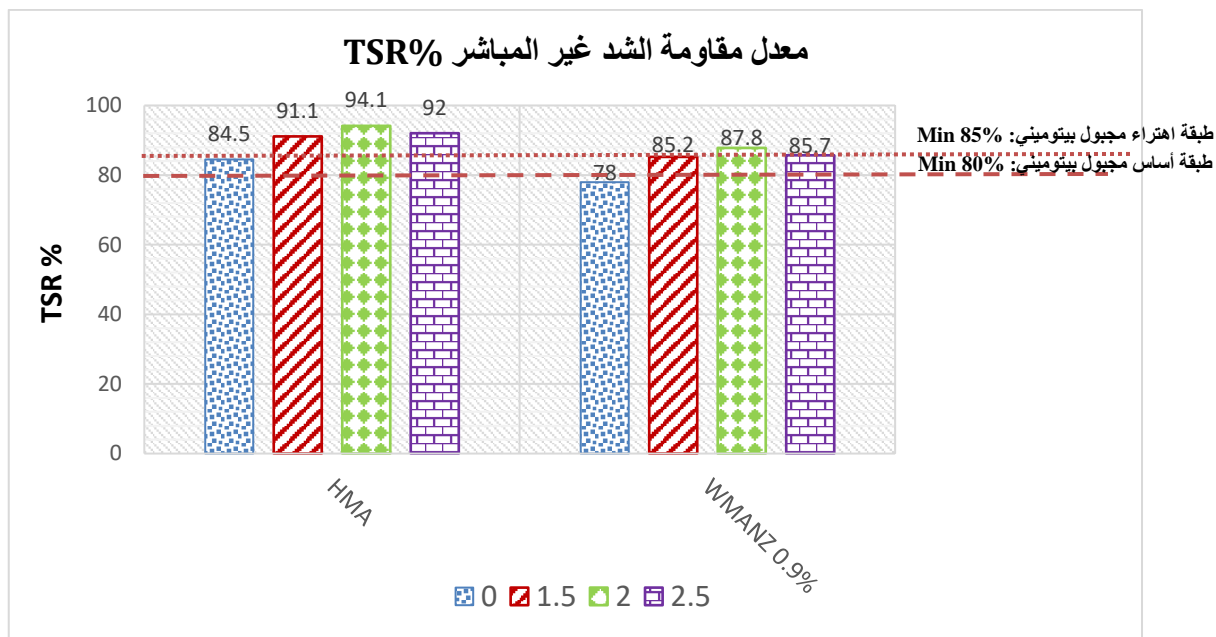
نسبة الكلس المطفأ %		HMA	WMA _{NZ} 0.9%
0%	ITS _{con} (kpa)	728.27	548.36
	ITS _{uncond} (kpa)	862.03	702.40
	TSR%	84.5	78.0
1.5%	ITS _{con} (kpa)	815.38	609.83
	ITS _{uncond} (kpa)	894.94	715.54
	TSR%	91.1	85.2
2%	ITS _{con} (kpa)	883.74	633.77
	ITS _{uncond} (kpa)	939.08	722.54
	TSR%	94.1	87.8
2.5%	ITS _{con} (kpa)	885.42	638.2
	ITS _{uncond} (kpa)	962.23	744.29
	TSR%	92.0	85.7



الشكل (4-45): مقاومة الشد غير المباشر في الحالة الجافة بدلالة محتوى الخلطات من الكلس المطفأ



الشكل (4-46): مقاومة الشد غير المباشر في الحالة الرطبة بدلالة محتوى الخلطات من الكلس المطفأ



الشكل (4-47): معدل مقاومة الشد غير المباشر للخلطات المعدلة بالكلس المطفأ

يتضح من تجارب الشد غير المباشر بعد تعديل الخلطات البيتومينية بالكلس المطفأ النتائج التالية:

- أبدت الخلطات الساخنة المعدلة بالكلس المطفأ المقاومة الأعلى ضد تأثير الرطوبة، حيث حسن الكلس المطفأ من مقاومتها ضد ضرر خطر الرطوبة بمقدار (7.8, 11.4, 8.9)٪، عند نسب الإضافة (1.5, 2, 2.5)٪.
- حققت الخلطات الدافئة المصممة باستخدام الزيوليت الطبيعي والمعدلة بالكلس المطفأ، كمانع انسلاخ، شروط المواصفات الخاصة بحساسية الخلطات ضد ضرر الرطوبة (≥80٪).
- تحسن مقاومة الخلطات الدافئة المعدلة بالزيوليت الطبيعي بمقدار (9.2, 12.6, 9.9)٪، عند نسب الإضافة (1.5, 2, 2.5)٪ من الكلس المطفأ على التوالي.
- النسبة المقترحة لاستخدام الكلس المطفأ في تحسين حساسية الخلطات البيتومينية الدافئة، ضد تأثير الرطوبة هي 2٪ من وزن الحصى.

9.4. الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- عينات الزيوليت الطبيعي المدروسة والتي مصدرها الحدود السورية الأردنية، هي خليط من الفلبسايت والشابازايت بشكل أساسي، بالإضافة إلى فلزات أخرى كالهيماتيت والبيروكسين.
- زيادة مقاومة الرابط البيتوميني للتعيب مع زيادة نسبة الإضافة، والتي يعبر عنها بارتفاع قيم معدل الغرز بعد التعرض للتعيب قصير الأمد.

3. عدم إمكانية التنبؤ بقابلية تشغيل المجبول البيتوميني المعدل بإضافات الزيوليت، وفقاً لاختبارات الرابط البيتوميني، ولابد من دراسة تأثير الإضافة المباشرة للزيوليت الطبيعي كمادة مالئة (فيلر) في خواص المجبول البيتوميني.

4. تحسن الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخلطات البيتومينية الساخنة بعد التعديل بالزيوليت الطبيعي، والنسبة المقترحة للاستخدام هي 0.6% من الوزن الكلي للحصويات، حيث تحققت عند هذه النسبة أعلى قيمة لثبات مارشال وأفضل مقاومة للتشوه الدائم، وازدادت قيم الكثافة مع بقاء قيم الانسياب والفراغات الهوائية ضمن حدود المواصفات، وحدث انخفاض طفيف في نسبة الرابط البيتوميني المثلى.

5. تحسن الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخلطات البيتومينية الدافئة المعدلة بالزيوليت الطبيعي، والنسبة المقترحة لاستخدام الزيوليت الطبيعي في إنتاج المجبول البيتوميني الدافئ هي 0.9% من الوزن الكلي للحصويات، حيث أبدت الخلطات الدافئة المصنعة عند هذه النسبة سلوكاً مشابهاً لسلوك الخلطات الساخنة.

6. فشل الخلطات البيتومينية الدافئة في تحقيق شروط المواصفات المطلوبة لمقاومة تأثير الرطوبة.

7. النسبة المقترحة لاستخدام الكلس المطفاً في تحسين حساسية الخلطات البيتومينية الدافئة، ضد تأثير الرطوبة هي 2% من وزن الحصويات الكلي.

8. نجاح الزيوليت الطبيعي في تخفيض درجات حرارة إنتاج المجبول البيتوميني بمقدار 25°C ، عند نسبة وزنية 0.9%، مع الحاجة لتعديل المجبول بالكلس المطفاً بنسبة 2%، لضمان المقاومة الجيدة لتأثير الرطوبة.

التوصيات:

1. متابعة البحث حول إمكانية استخدام الزيوليت الطبيعي السوري في إنتاج المجبول البيتوميني الدافئ وإجراء تخفيض أكبر في درجات حرارة الخلط والرص.

2. البحث في إمكانية تحسين ديمومة ومقاومة خطر الرطوبة للمجبول البيتوميني الدافئ المنتج باستخدام الزيوليت الطبيعي السوري، باستخدام موانع الانسلاخ الأخرى (السائلة، الإسمنت،...الخ).

3. دراسة التغيرات الحاصلة في خواص المجبول البيتوميني الدافئ خلال مرحلة الاستثمار.

4. دراسة تأثير الزيوليت الطبيعي المحلي في خواص طبقات الرصف الأخرى (الأساس، ما تحت الأساس، تربة المسار).
5. البحث في تأثير أنواع أخرى من الإضافات في خواص المجدول البيتوميني الدافئ، كالإضافات العضوية والكيميائية.

1. ASPHALT INSTITUTE, 2007, The Asphalt Handbook. MS-4, 7th Edition, USA, 2007.
2. HUAG, Y, 2004, Pavement Analysis and Design. 2nd Edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey.
3. Junior, L, 2014, Evaluation of warm asphalt mixtures with the use of linear traffic simulator. Federal University of Rio Grande do Sul, PHD thesis, 249p.
4. GANDHI, T, 2008, EFFECTS OF WARM ASPHALT ADDITIVES ON ASPHALT BINDER AND MIXTURE PROPERTIES. Clemson University, PHD thesis, 144p.
5. Chen, S; You, Z; Sharifi, N. P; Yao, H; Gong, F, 2019, Material selections in asphalt pavement for wet-freeze climate zones: A review. Construction and Building Materials, 201, 510-525.
6. YI-QIU, T; LIE, Z; WEI-QIANG, G; MENG, G, 2012, Investigation of the effects of wax additive on the properties of asphalt binder. Construction and Building Materials, VOL. 36, 2012, 578–584.
7. RUBIO, C; MARTINEZ, G; BAENA, L; MORENO, F, 2012, Warm mix asphalt: an overview. Journal of Cleaner Production. VOL. 24, 76–84.
8. XIAO, F; AMIRKHANIAN, S, 2010, Effects of liquid antistrip additives on rheology and moisture susceptibility of water bearing warm mixtures. Construction and Building Materials, VOL. 24, 1649–1655.
9. MO, L; LI, X; FANG, X; HUURMAN, M; WU, S, 2012, Laboratory investigation of compaction characteristics and performance of warm mix asphalt containing chemical additives. Construction and Building Materials, VOL. 37, 239–247.

- 10.D'ANGELO, G; CORRIGAN, H; HARMAN, T; GONES, W; NEWCOMB, D; PROWELL, B, 2008, Warm-Mix Asphalt: European Practice, Federal Highway Administration, Office of Policy, Office of International Programs, Report No. FHWA-PL-08-007.
- 11.CORRIGAN, M, 2014, Warm Mix Asphalt in the United States: From Evolution to Revolution. U.S. DOT – Federal Highway Administration, 32P.
- 12.Williams, A; Copeland, B; Ross, T, 2018, Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2017, Federal Highway Administration, 46P.
- 13.PROWELL, B; HURLEY, G; FRANK, B, 2012, Warm-mix asphalt: best practices. National Asphalt Pavement Association, 3rd Edition, 68.
- 14.HUNTER, R; SELF, A; READ, J, 2015, The Shell Bitumen Handbook, Sixth edition. ICE Publishing, One Great George Street, Westminster, London SW1P 3AA, 789p.
- 15.Eurobitume and the Asphalt Institute, 2011, The Bitumen Industry – A Global Perspective: Production, Chemistry, Use, Specification and Occupational Exposure. 2nd edn. Eurobitume, Brussels, Belgium; Asphalt Institute, Lexington, KY, USA.
- 16.Eurobitume and the Asphalt Institute, 2015, The Bitumen Industry – A Global Perspective: Production, Chemistry, Use, Specification and Occupational Exposure. 3rd edn. Eurobitume, Brussels, Belgium; Asphalt Institute, Lexington, KY, USA.
- 17.CHOI, J; KO, S; Jeon, Y, 2019, Preparation of petroleum impregnating pitches from pyrolysis fuel oil using two step heat treatments. Korean Carbon Society, 29:369–376.

18. CHOI, J-E; KO, S; KIM, JG; Jeon Y-P, 2018, Effect of pressure during the synthesis of petroleum pitch precursors in open and closed system. Carbon Lett, 25:1–8.
19. KERSHAW, JR; BLACK, KJT, 1993, Structural characterization of coaltar and petroleum pitches. Energy Fuels, 7(3):420–425.
20. Niir Project Consultancy Services, Production of Bitumen Emulsion. Accessed April, 2020. <<https://www.entrepreneurindia.co/Document/Download/pdfanddoc-703069-.pdf>>.
21. National Asphalt Paving Association, European Asphalt Pavement Association, 2011, The Asphalt Paving Industry: A Global Perspective. 3rd ed: National Asphalt Paving Association.
22. Asphalt Roofing Manufacturers Association, Bitumen Waterproofing Association, National Roofing Contractors Association, Roof Coatings Manufacturers Association, 2011, The Bitumen Roofing Industry - A Global Perspective. 2nd ed: Asphalt Roofing Manufacturers Association.
23. Li, L; He, Z; Liu, W; Hu, C, 2019, A Study on the Application of Rock Asphalt from Sichuan China Based on Anti-Rutting Performance. Appl. Sci, 9, 870
24. Ali, B; Sultan, B, 2002, Improving the specifications of Syrian asphalt to reduce the thermal effects resulting from the manufacture of asphalt concrete. MSc thesis, Tishreen University, Syria.
25. Nasrekani, A; Nakhaei, M; Naderi, K; Abu-Lebdeh, T; Fini, E; Aflaki, S, 2018, Gilsonite Modified Asphalt for Use in Pavement Construction. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 11 (2): 444.454
26. Quintana, H; Noguera, J; Bonells, C, 2016, Behavior of gilsonite-modified hot mix asphalt by wet and dry processes. J. Mater. Civil Eng, 28:04015114.

- 27.Nader, N; Song, S; Kim, N; Namjun, C, 2014, Chemical characterization of gilsonite bitumen. J. Petroleum Environ, Biotechnol, 5: 1-10.
- 28.Huang, B; Li, G; Shu, X, 2006, Investigation into three layered HMA mixtures. Composites Part B: Eng, 37:679-690.
- 29.Zhang, X Zhu, J Wu, C Wu, Q Liu, K Jiang, K, 2020, Preparation and Properties of Wood Tar-based Rejuvenated Asphalt. Materials, 13, 1123.
- 30.The Road Emulsion Association limited, 2015, Miscellaneous Uses of Bitumen Emulsions. REA, Storrington, UK, Technical Data Sheet No.12.
- 31.YAACOB, H; HAININ, M; AZIZ, M; WARID, M; CHANG, F; ISMAIL, C; HASSAN, N, 2013, Bitumen Emulsion in Malaysia–A Conspectus. Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering), 65:3, 97–104.
- 32.Games, A, 2006, Overview of Asphalt Emulsions, Asphalt Emulsions Technology, Figure 2(b), p.3, Transportation Research Circular E-C120, Washington DC, USA: Transportation Research Board.
- 33.BSI (2013) BS EN 15322:2013- Bitumen and bituminous binders, Framework for specifying cut-back and fluxed bituminous binders. BSI, London, UK.
- 34.Rossi, C; Teltayev, B; Angelico, R, 2017, Adhesion Promoters in Bituminous Road Materials: A Review. Applied Sciences, 7, 524.
- 35.HDABI, A, 2014, High Strength Cold Rolled Asphalt Surface Course Mixture. PHD thesis, Liverpool John Moores University, 267p.
- 36.OZDEMIR, U; KUTAY, M.E; HIBNER, D; LANOTTE, M; KUMBARGER, Y, 2018, Quantification of Aggregate Embedment in Chip Seals Using Image Processing. J. Transp. Eng, Part B: Pavements, 144(4): 04018047.

37. Nicholls, C; Baxter, J, 2008, THE DESIGN OF SURFACE DRESSINGS (CHIP SEALS) IN THE UNITED KINGDOM. 1st Sprayed Sealing Conference – cost effective high performance surfacings, Adelaide, Australia.
38. Read, J; Whiteoak, D; READ, J, 2003, The Shell Bitumen Handbook, Fifth edition. Thomas Telford Ltd, 1 Heron Quay, London E14 4JD, 463p.
39. NEAYLON, K, 2017, THE EFFECTS OF HEAVY VEHICLE SINGLE, TANDEM AND TRI-AXLES ON SPRAYED SEAL WEAR IN AUSTRALIA. PHD thesis, Faculty of Science, Engineering and Technology Swinburne University of Technology Melbourne, Australia.
40. Web Page. SURFACE DRESSING. Accessed April, 2020. <<https://wollocivil.files.wordpress.com/2014/04/chapter-8-surface-dressing.pdf>>.
41. SANRAL, 2007, TRH3 Design and construction of surfacing seals. Technical Recommendations for Highways, No.3, South African National Roads Agency.
42. BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1989, Bitumens for building and civil engineering, Specification for bitumens for industrial purposes, BS 3690-2: 1989, BSI, London.
43. Lesueur, D, 2009, The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. Advances in Colloid Interface Science, 145(1-2): 42–82.
44. BSI (2009c) BS EN 13305:2009. Bitumen and bituminous binders. Framework for specification of hard industrial bitumens. BSI, London, UK.
45. Al-Hdabi, A, 2014, High Strength Cold Rolled Asphalt Surface Course Mixture. PHD Thesis, Liverpool John Moores University, 267p.

- 46.KAL, A, 2012, Laboratory Study of Bituminous Mixes Using a Natural Fibre. National institute of technology Ro,ukela, 71P.
- 47.Bose S; Kamaraj C; Nanda P.K, 2006, Stone Mastic Asphalt (SMA) – A Long Life Pavement Surface. International Seminar on Innovations in Construction and Maintenance of Flexible Pavements, Agra, 2-4 September, Technical Papers, Volume 1, pp 17-169.
- 48.Building Research Center, 1998, Egyptian Specifications for Roads, Part IV, Egypt, 266p.
- 49.Kristjansdottir, O, 2007, Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving. University of Washington, MSc thesis, 114p.
- 50.CHOWDHURY, A; BUTTON, G, 2008, A review of warm mix asphalt. Texas A&M, University System College Station, Texas Transportation Institute, Texas 77843-3135, 61.
- 51.Chevron, 1977, Butumuls Mix Manual. Chevron USA, Asphalt Division, California.
- 52.Maccarrone, S; Holleran - G; Ky, A, 1995, Cold Asphalt Systems as an Alternative to Hot Mix. 9th AAPA International Asphalt Conference.
- 53.Jenkins, K.J; Molenaar, A.A.A; de Groot, J.L.A; van de Ven, M.F.C, 2002, Foamed Asphalt Produced Using Warmed Aggregates. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.71, 444-478
- 54.Koenders, B.G; Stoker, D.A; Bowen, C; de Groot, P; Larsen, O; Hardy, D; Wilms - K.P, 2000, Innovative processes in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures. 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona.

55. Barthel, W; Marchand, J.P; Devivere, M, 2004, Warm asphalt mixes by adding a synthetic zeolite. PROCEEDINGS OF THE 3RD EURASPHALT AND EUROBITUME CONGRESS, VIENN, Vol.1, 1241- 1249
56. Hurley, G.C; Prowell, B. D, 2005, Evaluation of Aspha-min® zeolite for use in warm mix asphalt. National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 05-04, Auburn University, USA.
57. Hurley, G.C; Prowell, B.D, 2005, Evaluation of Sasobit® for use in warm mix asphalt. National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 05-06, Auburn University, USA, June 2005.
58. NEWCOMB, D, 2007, An Introduction to Warm-mix Asphalt. National Asphalt Pavement Association, <http://www.warmmixasphalt.org/submissions/4_20071125_introduction_to_warm-mix_asphalt.pdf>. (Access, 5, Dec, 2018).
59. CHANDRA, K, 2008, Evaluation of Warm Asphalt additives on performance properties of CRM binders and mixtures. USA, Clemson University, Doctorate dissertation, Clemson University, 169.
60. CUAN, O; MEDINA, L; SANCHEZ, A, 2012, Proposal for The Implementation Of Warm Asphalt Mixtures In The City Of Medellin. University of Medellin, Medellin.
61. Leckel, D, 2005, Oxygenates in Fischer-Tropsch Waxes: A Threat or Opportunity in Fuels Hydrocracking. Sasol Technology, Research & Development, Sasolburg, South Africa, 24P.
62. REGALI, F, 2013, Hydroconversion of model Fischer-Tropsch wax over noble metal/silica-alumina catalysts. KTH Royal Institute of Technology, School of Chemical Science and Technology, Stockholm, Sweden, 97P.
63. SHAW, J, 2007, TWG – Warm Mix Asphalt. Sasobit, Sasol Wax, 38P.

64. Butz, T, Warm Mix Asphalt Pavements based on the Fischer –Tropsch Wax Sasobit®. Sasol Wax GmbH Hamburg, Germany, 20P, Accessed May, 2019.] <<http://www.petersenasphaltconference.org/download/2008/4-3--Butz.pdf>>.
65. DIETZ, G; FRANCIS, T, Warm Mix Asphalt “The Material of Today” Accessed May, 2018.< https://www.rmaces.org/docs/WMA_Presentation_-_Dietz.pdf>.
66. PROWELL, B; HURLEY, G, 2005, Starting to Warm. Roads and Bridges, Vol 42, N^o9.
67. CECA, ARKEMA GROUP, Cecabase RT®. Accessed May, 2019. <<https://www.arkema.com/en/products/product-finder/rangeviewer/Cecabase-RT/2/>>.
68. CECA, ARKEMA GROUP. CECABASE RT: Additives for warm mix asphalts. Accessed May, 2019. < http://www.warmmixasphalt.org/submissions/dec2009/Tuesa.m/03_CecabaseRTWMATWGdec09v2.pdf>.
69. ASPHALT INNOVATINS™, MEADWESTVACO BUSINESS. Evotherm warm mix asphalt technology. Accessed May, 2019. < http://www.warmmixasphalt.org/submissions/54_20080101_Jonathan%20McIver%20-%20Evotherm.pdf>.
70. Naidoo, P; Logaraj, S; James, A, 2019, Rediset™ Warm Mix Solutions, Warm Mix Addressing Moisture Sensitivity. Akzo Nobel, May. <<http://www.petersenasphaltconference.org/download/2008/4-5--Naidoo.pdf>>.
71. PERKINS, S, 2009, Synthesis of warm mix asphalt paving strategies For Using In MONTANA Highway Construction. MONTANA State University System College Station, Western Transportation Institute, FHWA/MT-09-009/8117-38.

72. INSTITUTE, ASPHALT. S, 2007, Asphalt handbook MS-4 7th edition. USA, Asphalt Institute, 765-767.
73. HURLEY, G; PROWELL, B, 2006, Evaluation of potential process for use in warm mix. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, VOL 75, 41-90.
74. TAREFDER, R; PAN, G, 2014, Field and Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt (WMA) Phase I. University of New Mexico, Department of Civil Engineering.
75. FITTS, G, Shell Sulphur Solutions, Warm Mix Asphalt Technologies. Accessed May, 2018. < [http://www.ltrc.lsu.edu/ltrc_09/pdf/Fitts,%20 Gary 2.pdf](http://www.ltrc.lsu.edu/ltrc_09/pdf/Fitts,%20Gary%20.pdf)>.
76. WARM MIX SYSTEM, product web page. Accessed May, 2018. <[http://www.astecinc.com/products/liquid-additives/warm-mix-systems .html](http://www.astecinc.com/products/liquid-additives/warm-mix-systems.html)>.
77. STANSTEEL, Accu-Shear®, product web page. Accessed May, 2019. <<https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/technical-services/technical-services-repository/details/accushear.pdf>>.
78. Accu-Shear®, product web page. Accessed May, 2019. <[http://www. hotmixparts.com/files/accushear_advanceddiagrams.pdf](http://www.hotmixparts.com/files/accushear_advanceddiagrams.pdf)>.
79. Accu-Shear®, product web page. Accessed May, 2019. < [http://www. hotmixparts.com/accushearinstallation.asp](http://www.hotmixparts.com/accushearinstallation.asp)>.
80. MAXAM EQUIPMENT INC, AQUABlack® WMA. Accessed May, 2019. <[http://maxamequipment.com/asphalt_plant_products/aquablack -warm-mix-asphalt/](http://maxamequipment.com/asphalt_plant_products/aquablack-warm-mix-asphalt/)>.

81. MAXAM AQUA Black Warm Mix Asphalt Technology. Accessed May, 2019. <<http://co-sphalt.com/wpcontent/uploads/2015/03/MaxamCaltransFinalReport.pdf>>.
82. ASTEC, DOUBLE BARREL GREEN WMA PROCESS. Accessed May, 2019. <http://www.warmmixasphalt.org/submissions/55_20080101_Norm%20Smith%20-%20Astec%20Double%20Barrel%20Green.pdf>.
83. Bennert, T, 2012, Evaluation of Warm Asphalt Technology. Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT) Rutgers, The State University of New Jersey, Report No: FHWA-NJ-2011-005, 117P.
84. AESCO MADSEN, Ecofoam II, Accessed May, 2018. < <http://www.asphaltequipment.com/documents/EcoFoamII.pdf>>.
85. HARDER, G.A, 2007, Low Energy Asphalt – A Cooler Mix. Warm Mix TWG. McConnaughay Technologies, Baltimore, Maryland, 44p.
86. VENTURA, A; MONERNO, P; JULLIEN, A; TAMAGNY, P; OLARD, F; ZAVAN, D, 2009, Environmental comparison at industrial scale of hot and half-warm mix asphalt manufacturing processes. 88th annual meeting of Transportation Research Board, Washington D.C.
87. BUTTON, G; ESTAHRI, C; WIMSATT, A, 2007, A SYNTHESIS OF WARM-MIX ASPHALT. Texas Transportation Institute, Report No. FHWA/ TX-07/0-5597-1, 83p.
88. GARRET, B, 2009, Meeker Equipament's AquaFoam Technologies for Warm-Mix Asphalt. Warm Mix "Techical Working Group". Belleville, Pennsylvania, 26p.
89. MUSIL, J, Terex® WMA System, Warm Mix Asphalt System Accessed May, 2019.:<http://www.warmmix.org/submissions/may2009/04_Terex_JoeMusil.pdf>.

90. Gencor Industries Inc, 2012, Gencor Ultrafoam GX2™. WMA technology provider – Gencor Industries, 5201 North Orange Blossom Trail, 29p.
91. PQ CORPORATION, Advera® WMA. Accessed May, 2019. < <https://www.pqcorp.com/products/zeolites/advera>>.
92. Smith, A, 2007, Advera® WMA Zeolite. Academic Journals., Conferences of Lviv Polytechnic National University, VOL. 781, 212-229.
93. NEITZKE, B; Wasill, B, 2009, Placement of Warm Mix Asphalt on the East Entrance Road of Yellowstone National Park. Report Number: FHWA-WFL/TD-09-002.
94. LARSEN, O; MOEN, Ø; ROBERTUS, C; KOENDERS, 2004, WAM-Foam Asphalt Production at Lower Operating Temperatures as an Environmental Friendly Alternative to HMA. Proceedings. 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna.
95. Akisetty C; Amirkhanian, S; Lee, S. J, 2007, High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives. Construction and Building Materials, Elsevier Ltd., No. 23, 565–573.
96. Gallelli V; Iuele, T; Vaiana. R, 2013, Warm Mix Asphalt with Synthetic Zeolite: a Laboratory Study on Mixes Workability. International Journal of Pavement Research and Technology, Chinese Society of Paving Engineering, Vol. 6 No. 5, 562–569.
97. WOSZUK, A; KUKIELKA, G; FRANUS, W, 2014, THE EFFECT OF ZEOLITE ADDITION AT A TEMPERATURE COMPACTION OF ASPHALTMIXES. Academic Journals., Conferences of Lviv Polytechnic National University, District 5 Warm Mix Asphalt Innovation Project, PQ corporation.

98. ASPHA-MIN, product web page. Accessed May, 2019. <<https://www.aspha-min.com/en/product/aspha-min/improved-working-conditions-in-asphalt-road-construction.html>>.
99. Mansfeld, R; Barth, R; Beer, F; Breitbach, P; Gogolin, D; Pass, F; Radenberg, M; Riebesehl, G; Sadzulewsky, S; Wölfe, H, 2009, Leitfaden Temperatur abgesenkte Asphalte, Deutscher Asphaltverband e.V, Bonn, Germany, 52.
100. DOKANDARI, P, 2012, EFFECTS OF WARM MIX ASPHALT ADDITIVES ON AGING CHARACTERISTICS OF BITUMINOUS MIXTURES. MSc thesis, DOKUZ EYLÜL University, Turkey, 84.
101. GHOBARKAR, H; SCHäF, O; MASSIANI, Y; KNAUTH, P, 2003, The Reconstruction of Natural Zeolites. Springer Science +Business Media Dordrecht 2003, p.p 146.
102. Faisal, A, 2016, Zeolite Adsorbents and Catalysts for the Recovery and Production of Biochemicals. PHD thesis, Chemical Technology, Lulea University OF Technology, 88P.
103. Bintibrahim, S, 2007, Synthesis and Characterisation of Zeolites from Sodium Aluminosilicates Solutions. USM University, Malaysia.
104. JANA, D, 2007, A new look to an old pozzolan: Clinoptilolite – A promising pozzolan in concrete. Proceedings of the Twenty-ninth Conference on Cement Microscopy Quebec City, PQ, Canada, p.p.168-179.
105. AHMADI, B; SHEKARCHI, M, 2010, Use of natural zeolite as supplementary cementitious material. Cement & Concrete Composites, vol. 32, p.p. 134-141.
106. PERRAKI, TH; KAKALI, G; KONTOLEON, F, 2003, The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement. Microporous and Mesoporous Materials, vol.61, p.p. 205-212.

107. MILOVIĆ, T; ŠEŠLIJA, M; ŠUPIĆ, S; VUKOSLAVČEVIĆ, S, 2015, Influence of natural zeolite on some properties of mortar/concrete. International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering 2015, Subotica, Serbia, p.p. 61-66.
108. VIRTÁ, R, 2007, Zeolites. Minerals yearbook. Science for a changing world, Geological Survey, 3p.
109. ZAMAOW, G; MURPHY, E, 2014, Removal of Metal Cations from Water Using Zeolites. Separation Science and Tech, VOL. 27, N^o14, pp.1969–1984.
110. Natural zeolite formation. Accessed jan, 2019. < https://zeoinc.com/wp-content/uploads/2013/12/zeolite_formation.jpg >.
111. Bell, R. G, 2001, Zeolites. British Zeolite Association (<http://www.bza.org>), 2019.
112. FRANUS, W; WDOWIN, M; FRANUS, M, 2014, Synthesis and characterization of zeolites prepared from industrial fly ash. Environmental Monitoring and Assessment, VOL. 186, N^o9, 5721–5729.
113. FRANUS, M; WDOWIN, M; BANDURA, L; FRANUS, W, 2015, Removal of environmental pollutions using zeolites from fly ash: A review. Fresenius Environmental Bulletin. VOL. 24, N^o3a, 854–866.
114. International Zeolite Associations (IZA). Accessed June, 2019.< www.iza-structure.com>.
115. Awuah, B, 2008, Production of silver-loaded zeolites and investigation of their antimicrobial activity. PHD thesis, University OF WOLVERHAMPTON, 231P.
116. Al-Sabri, A; Al-Jund, I; Al-Qudsi, M. Natural, 2001, Zeolite Minerals in Yemen. Geological Survey and Mineral Resources Authority, Sana'a.

117. General Establishment of Geology and Mineral Resources in Syrian Arab Republic (GEGMRS), 2011- Guide of metallic and non-metallic ores in Syrian Arab Republic. Ministry of petroleum and Mineral resources, Syria. Internal Report, 93.
118. Safarjalani, A; Massonne, H; Theye, SC, 2010, Chemical composition of zeolite ore in the Al-Sis Formation Outcropping in the Syrian Hamad Area. Alexandria Science Exchange Journal, VOL.31, N^o3, 19.
119. AL- Askare, M; AL-Faraj, K; Khalaf, I, 2010, Agricultural productivity characteristics of irrigated lands under the influence of adding soil conditioners (zeolites) in the Lower AL- Furat Valley. Journal of Aleppo University, Agricultural Sciences Series, Issue (82).
120. Sharf, M; Keganskas, K; Elias, K, 1994, The evolution of the Syrian magma during the Mesozoian and Kyanozue periods and assessing the degree of its carrying of beneficial materials, Damascus.
121. REDONDO, S; ALONSO, E, 2011, EMPLEO DE GELES DE SÍLICE COMO ZEOLITAS PARA LA FABRICACIÓN DE MEZCLAS SEMICALIENTES. VI JORNADA NACIONAL, 1-11.
122. Moshoeshoe, M; Tabbiruka, M; Obuseng, V, 2017, A Review of the Chemistry, Structure, Properties and Applications of Zeolites. American Journal of Materials Science, 7(5): 196-221.
123. Currao, A, Understanding zeolite frameworks. University of Bern, Department of Chemistry and Biochemistry, Accessed Jul, 2020. <<https://wollocivil.files.wordpress.com/2014/04/chapter-8-surface-dressing.pdf>>.
124. International Zeolite Association(IZA). Accessed May, 2019. <<http://www.iza-online.org>>.
125. Petrov, I; Michalev, T, 2012, Synthesis of Zeolite A: A Review. НАУЧНИ ТРУДОВЕ НА РУСЕНСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ.

126. Tran- Y; Lee- J; Kumar- P; Kim- K; Lee- S, 2019- Natural zeolite and its application in concrete composite production. Cement and Concrete Composites Part B.
127. Markiv, T; Sobol, K; Franus, M; Franus, W, 2016, Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 16(4), 554-562.
128. Valipour, M; Yekkalar, M; Shekarchi, M; Panahi, S, 2014, Environmental assessment of green concrete containing natural zeolite on the global warming index in marine environments. Journal of Cleaner Production, 65, 418-423.
129. Chen, JJ; Li, LG; Ng, PL; Kwan, A, 2017, Effects of superfine zeolite on strength, flowability and cohesiveness of cementitious paste. Cement and Concrete Composites, 83, 101-110.
130. Kurda, R; de Brito, J; Silvestre, JD, 2018, Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash. Cement and Concrete Composites.
131. Vejmelková, E; Koňáková, D; Kulovaná, T; Keppert, M; Žumár, J; Rovnaníková, P; Keršner, Z; Sedlmajer, M; Černý, R, 2015, Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance. Cement and Concrete Composites, 55, 259-267.
132. Stanislao, C; Rispoli, C; Vola, G; Cappelletti, P; Morra, V; Gennaro, M, 2011, Contribution to the knowledge of ancient Roman seawater concretes: Phlegrean pozzolan adopted in the construction of the harbour at Soli-Pompeopolis (Mersin. Turkey). Period Miner, 80, 3, 471-488.
133. Wu, L; Farzadnia, N; Sh, C; Zhang, Z; Wang, H, 2017, Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review. Construction and Building Materials, 149, 62-75.

134. Sobuz, H; Visintin, P; Ali, M; Singh, M; Griffith, M; Sheikh, A, 2016, Manufacturing ultra-high performance concrete utilising conventional materials and production methods. Construction and Building Materials, 111, 251-261.
135. Bentz, D; Jensen, O, 2004, Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking. Cement and Concrete Composites, 26, 677–685.
136. Liu, J; Shi, C; Ma, X; Khayat, K; Zhang, J; Wang, D, 2017, An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials. Construction and Building Materials, 146, 702-712.
137. Tuan, N; Thang, N; Hanh, P; Yen, T, 2016, Effect of zeolite on autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete. The 7th International Conference of Asian Concrete Federation: "Sustainable concrete for now and the future", Hanoi, Vietnam.
138. Mastali, M; Kinnunen, P; Dalvand, A; Firouz, M; Illikainen, M, 2018, Drying shrinkage in alkali-activated binders – A critical review. Construction and Building Materials, 190, 533-550.
139. Kim, G; Kim, J-Y; Kurtis, K; Jacobs, L, 2017, Drying shrinkage in concrete assessed by nonlinear ultrasound. Cement and Concrete Research, 92, 16-20.
140. Hu, X; Shi, Z; Shi, C; Wu, Z; Tong, B; Qu, Z; Schutter, G, 2017, Drying shrinkage and cracking resistance of concrete made with ternary cementitious components. Construction and Building Materials, 149, 406-415.
141. Markiv, T; Sobol, K; Franus, M; Franus, W, 2016, Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 16(4), 554-562.

142. Emam, E; Yehia, S, 2017, Performance of Concrete Containing Zeolite as a Supplementary Cementitious Material. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 4(12), 1619-1625.
143. Mola-Abasi, H; Shooshpasha, I, 2016, Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy soil. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8(5), 746-752.
144. Karakurt, C; Kurama, H; Topçu, İB, 2010, Utilization of natural zeolite in aerated concrete production. Cement and Concrete Composites, 32(1): 1-8.
145. Salamatpoor, Sc Jafarian, Y; Hajiannia, A, 2018, Physical and mechanical properties of sand stabilized by cement and natural zeolite. The European Physical Journal Plus, 133:205, 13.
146. Abasi, H; Shooshpasha, I, 2016, Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy soil. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.
147. Saeed, K; Atemimi, Y, 2016, The Strength Behaviour of Lime Stabilized Organic Clay Soil Modified by Catalyst Additeives. Journal of Babylon University/Engineering Sciences/, No.(4), Vol.(24), 1064-1072.
148. Pedersen, N.J; Rosenbloom, S; Skinner, R.E, 2012, Special Mixture Design Considerations and Methods for Warm-Mix Asphalt, A Supplement to NCHRP Report 673: A Manual for Design of Hot-Mix Asphalt with Commentary; Transportation Research Board: Washington, DC, USA.
149. Zaumanis, M, 2010, Warm Mix Asphalt Investigation. Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark.
150. WOSZUK, A; FRANUS, W, 2017, A Review of the Application of Zeolite Materials in Warm Mix Asphalt Technologies. Applied Sciences (2076-3417), VOL. 7, Issue 3, PP.1-15.

151. WOSZUK, A; Zofka, A; Bandura, L; Franus, W, 2017, Effect of zeolite properties on asphalt foaming. Construction and Building Materials, 139, 247–255.
152. Dubravský, M; Mandula, J, 2015, Modified Asphalt Binder with Natural Zeolite for Warm Mix Asphalt. JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, Vol. 10, Issue 2.
153. Tausif, M; Zaidi, S; Ahmad, N; Jameel, M, 2020, Influence of Natural Zeolite and Paraffin Wax on Adhesion Strength Between Bitumen and Aggregate. Civil Engineering Journal, Vol. 6, No. 4.
154. Zhang, Y; Leng, Z; Zou, F; Wang; Chen, S. S; Tsang, D. C, 2018, Synthesis of zeolite, A using sewage sludge ash for application in warm mix asphalt. Journal of Cleaner, Production, 172, 686-695.
155. Cheraghian, G Falchetto, A You, Z Chen, S Kim, Y Westerhoff, G Moon, K Wistuba, M, 2020, Warm mix asphalt technology: An up to date review. Journal of Cleaner Production, S0959-6526(20)32175-2.
156. Sağlik, M; Demir, B; Oral, H; Ozturk, T; Güngör, A, 2016- Development and performance of new additives for warm mix asphalt technologies. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague, Czech Republic, 1-3 June.
157. GANDHI, T, 2008- EFFECTS OF WARM ASPHALT ADDITIVES ON ASPHALT BINDER AND MIXTURE PROPERTIES. Clemson University, PHD THESIS, 2008.
158. Akisetty, C, 2008, Evaluation of warm asphalt additives on performance properties of CRM binders and mixtures, Clemson: Ph.D. Dissertatio Clemson University.
159. RÓG, Z, 2015, The Influence of the Synthetic Zeolite on the Properties of Asphalt Binder 35/50, Kielce University of Technology, 7p.

160. Zou, Y, 2013, Research on Rheological Properties of warm mix asphalt binders. Advanced Materials Research, Vol 689, pp 363-367, © (2013) Trans Tech Publications, Switzerland.
161. Sengoz, B; Topal, A; Gorkem, C, 2013, Evaluation of natural zeolite as warm mix asphalt additive and its comparison with other warm mix additives. Constr. Build. Mater, 43, 242–252.
162. TOPAL, A; SENGOZ, B; KOK, B.V; YILMAZ, M; DOKANARI, P. A; ONER, G; KAYA, D, 2014, Evaluation of mixture characteristics of warm mix asphalt involving natural and synthetic zeolite additives. Construction and Building Materials, VOL. 57, 2014, 38-44.
163. WASIUDDIN, N; SELVAMOHAN, S; ZAMAN, M; Guegan, M, 1998, A comparative laboratory study of Sasobit® and Aspha-min ® in warm mix asphalt. TRB: Journal of the Transportation Research Board, 82–88.
164. LAI, B; BARROS, C; YIN, H, 2009, Investigation of rheological behaviour of asphalt binder modified by the Advera® additive. Poromechanics IV. In Proceedings of the Fourth biot conference on poromechanics, Columbia University, New York, NY, USA, 8–10 June 2009; DEStech Publications©: Lancaster, PA, USA.
165. Mosa, A; Salem, L; Waryosh, W, 2020, New Admixture for Foamed Warm Mix Asphalt: A Comparative Study. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering.
166. Al-Jumaili, M; Al-Jameel, H, 2015, Influence of Selected Additives on Warm Asphalt Mixtures Performance. Kufa Journal of Engineering, Vol 6, No. 2, June, P.P.49-62.
167. Jaskuła, P; Judycki, J, 2016, Durability of asphalt concrete subjected to deteriorating effects of water and frost. Journal of Performance of Constructed Facilities, Volume 30 Issue 1.

168. Zofka, A; Braham, A, 2009, Comparison of Low-Temperature Field Performance and Laboratory Testing of 10 Test Sections in the Midwestern United States. TRR J. 2009, 2127, 107–114.
169. Sanchez-Alonso, E; Vega-Zamanillo, A; Castro-Fresno, D; DelRio-Prat, M, 2011, Evaluation of compactability and mechanical properties of bituminous mixes with warm additives. Constr. Build. Mater, 25, 2304–2311.
170. Woszuk, A; Franus, W, 2016, Properties of the Warm Mix Asphalt involving clinoptilolite and Na-P1 zeolite additives. Constr. Build. Mater, 114, 556–563.
171. Judycki, J; Stienss, M, 2011, Research on Warm mix asphalt at lower Temperature, Gdansk University of Technology, Gdańsk, Poland.
172. Walubita, L.F; Zhang, J; Das, G; Hu, X; Mushota, C; Alvarez, A.E; Scullion, T, 2012, Hot-mix asphalt permanent deformation evaluated by Hamburg wheel tracking, dynamic modulus, and repeated load tests. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2296(-1):46-56.
173. You, L; You, Z; Yang, X, 2018, Laboratory testing of rheological behavior of water-foamed bitumen. Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 30, Issue 8.
174. Yin, F Arambula, E Newcomb, D, 2014, Workability and coatability of foamed Warm-Mix Asphalt. Asphalt Pavements, London, 721-730.
175. Arega, Z Bhasin, A Li, W, 2015, Parametric Analysis of Factors That Affect Asphalt Binder Foaming Characteristics. Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 27, Issue 12.
176. Hasan, M You, Z, 2019, Comparative study of ethanol foamed asphalt binders and mixtures prepared via manual injection and laboratory foaming

- device. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), Volume 6, Issue 4, Pages 383-395.
177. Gandhi, T; Rogers, W; Amirkhanian, S, 2010, Laboratory evaluation of warm mix asphalt ageing characteristics. International Journal of Pavement Engineering, Volume 11, 2010 - Issue 2, 133–142.
 178. ALONSO, A; TEJEDA, E; MORENO, F; RUBIO, M; MEDEL, E, 2013, A comparative study of natural zeolite and synthetic zeolite as an additive in warm asphalt mixes, Materiales de Construcción, VOL. 63, 310, 195-217.
 179. VIDAL, G; FLOODY, A; ALONSO, E, 2018- Performance evaluation of warm mix asphalt involving natural zeolite and reclaimed asphalt pavement (RAP) for sustainable pavement construction, Construction and Building Materials, VOL. 174, 576-585.
 180. Josver, D; Gianpier, E, 2018, Influencia De La Zeolita En La Elaboración De Mezclas Asfálticas En Caliente Mediante La Metodología Marshall. Universidad Señor de Sipán, PERU, 147p.
 181. TURPO, W; MENDOZA, A, 2017, Comportamiento Del Diseño De Mezcla Asfáltica Tibia, Con Adición De Zeolita Para La Pavimentación De La Ciudad De Juliaca. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO, PERU, 228p.
 182. SHINZATO, M. C, 2008, Caracterização tecnológica das zeólitas naturais associadas às rochas eruptivas da Formação Serra Geral, na região de Piraju-Ourinhos (SP). Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, VOL. 38, NO3, 525-532.
 183. Khallouf, N, 2017, Removing some heavy metal elements from the wastewater from the desalination unit of Baniyas Refinery using natural zeolite. Tishreen University, PHD thesis, 118p.

184. Khalid, A; Khan, A; Alam, G; Anwar, M, 2015, X-Ray Fluorescence (XRF) spectrometry for materials analysis and “discovering” the atomic number. LUMS School of Science and Engineering, Version 2015-1.
185. Portable XRF. Accessed Jun, 2019. <<https://www.911metallurgist.com/blog/portable-xrf-analyzer-price#post/0>>.
186. Palmer- P, 2019- Introduction to Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence (XRF) – An Analytical Chemistry Perspective. San Francisco State University, Department of Chemistry & Biochemistry.
187. X-Ray Fluorescence. Accessed Jun, 2019. <<https://colourlex.com/project/x-ray-fluorescence/>>.
188. Almjadleh, M, 2014, Study the Performance of Jordanian Natural and Modified Zeolitic Tuff for Removal of Heavy Metals from Ground Water. Tishreen University, PHD thesis, 103p.
189. X-ray Diffraction (XRD). Accessed Sep, 2020. < <http://web.pdx.edu/~pmoeck/phy381/Topic5a-XRD.pdf>>.
190. Solberg, S, 2008, Synthesis and Characterization of New Mesoporous Materials and their Application in Catalysis and Adsorption. PhD Thesis, The faculty of Graduate College of the University of Vermont, 2008, 230p.
191. Hicks, R.G; Scholz, T.V, 2003, Life cycle costs for lime in hot mix asphalt National Lime Association, (Vol. 3). Arlington, VA.
192. Alberty, D; Farrington, R. A, 1978- Physical chemistry. John Wiley and Sons, fifth edition, New York, Chichester, Brisbane, Toronto P. 598
193. ASTM E.1131, ISO 11358, 2014, Thermogravimetry thermal analysis (TGA) testing. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.

194. British Standards Institution, 2000, Bitumen and bituminous binders, Specifications for paving grade bitumens, BSEN 12591, BSI, London.
195. ASTM, 2003. Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures. Annual Book of ASTM Standard, D3515-01, Vol. 04.03
196. Transportation Ministry, 2002, Standard Specifications for Roads and Bridges, Damascus, Syria.
197. ASTM D2872 - 12e1, 2012, Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). American Society for Testing and Material: Philadelphia, USA, 2012.
198. MARINKOVIĆ, M; MILOVIĆ, T; MATIĆ, B, 2017, ZEOLITE AS ADDITIVE IN WARM MIX ASPHALT, in 5th International Conference, Subotica, SERBIA, 2017.
199. Read, J; Whiteoak, D, 2003- The shell bitumen handbook, Fifth Edition. In: s.u.o. Products, editor. Heron Quay. London: Thomas Telford Publishing.
200. ASTM D2493/D2493M-16, 2016, Standard Practice for Viscosity-Temperature Chart for Asphalt Binders. ASTM International, West Conshohocken, PA.
201. Masoudi- S; Abtahi- S.M; Goli- A, 2017, Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging. Constr. Build. Mater., 135, 260-266.
202. Almeida- A; Sergio- M, 2019, Evaluation of the Potential of Sasobit REDUX Additive to Lower Warm-Mix Asphalt Production Temperature. Materials, 12(8), 1285, Portugal.

203. Gandhi, T; Xiao, F, Amirkhanian, SN, 2009, Estimating indirect tensile strength of mixtures containing anti-Stripping agents using an artificial neural network approach. Int J Pavement Res Technol; 2(1):1–12.
204. Kristjansdottir, O; Muench,, S; Michael, L, Burke, G, 2007, Assessing potential for warm-mix asphalt technology adoption. J Transport Res Board, vol (2040): 91–9.
205. Xiao, F; Zhao, W; Gandhi, T; Amirkhanian, SN, 2010, Influence of Anti-stripping Additives on Moisture Susceptibility of Warm Mix Asphalt Mixtures. J Mater Civil Eng. 22(10):1047–55.
206. Amirkhanian, S; Biro, S; Gandhi, T, 2009, Determination of Zero Shear Viscosity of Warm Asphalt Binders. Construction and Building Materials, Elsevier Ltd., No. 23 (5), pp. 2080–2086 .
207. Amirkhanian, S, Gandhi T, 2007, Laboratory investigation of warm asphalt binder properties – a preliminary analysis. Proceedings of 5th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV5), Park City, USA .
208. Sentosa, L; Subagio, B; Rahma, H; Yamin, R, 2018, Warm mix asphalt mixture using modified asbuton semi extraction modify and synthetic zeolite additive. MATEC Web of Conferences, 276, 03003 (2019).
209. Yang, L; Tan, Y, 2012, Compacting Properties of Zeolite Based Warm Asphalt Mixture. Advanced Engineering Forum, Vol. 5, pp 299-304.
210. AASHTO, T283-03, 2007, Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixture to Moisture Induced Damage. American Association of State Highway and Transportation Officials.
211. Tahmoressi, M; Scullion, T, 2002, A follow-up evaluation of hot-mix pavement performance in Northeast Texas. Report Number FHWA/TX-02/4104-1. College Station, TX: Texas Transportation Institute.

212. Xiao, F; Punith, V; Amirkhanian, S; Thodesen, S, 2013, Improved Resistance of Long-Term Aged Warm-Mix Asphalt to Moisture Damage Containing Moist Aggregates. JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING, 25:913-922.
213. Punith, V; Xiao, F; Putman, P; Amirkhanian, S, 2012, Effects of long-term aging on moisture sensitivity of foamed WMA mixtures containing moist aggregates. Materials and Structures, 45:251–264.
214. Khodaii, A; Kazemi Tehrani, H; aghshenas, HF, 2012, Hydrated lime effect on moisture susceptibility of warm mix asphalt. Constr Build Mater 36:165–170.
215. Ahmed, T, 2014, Investigating the rutting and moisture sensitivity of warm mix asphalt with varying contents of recycled asphalt pavement. University of Iowa, PHD thesis, 136p.
216. Vidal, G; Floody, A; Alonso, E; Díaz, C; Fonseca, C, 2020, Highway trial sections: Performance evaluation of warm mix asphalt and recycled warm mix asphalt. Construction and Building Materials, Construction and Building Materials 262 (2020) 120069.
217. HURLEY, G; PROWELL, B, 2006, Evaluation of potential process for use in warm mix. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, VOL 75, 41-90.
218. Rubio, M; Martínez, G; Baena, L; Moreno, F, 2012, Warm mix asphalt: an overview. Journal of Cleaner Production, 24, 76-84.
219. Research Project no009, 2011, Analysis of mechanical behavior of WMA with zeolitas. Laboratorio de Ingeniería de la Construcción, Universidad de Granada, Granada, Spain

220. Bagampadde, U; Isacsson, U; Kiggundu, B.M, 2004, Classical and contemporary aspects of stripping in bituminous mixes. Road Materials Pavement Design, 5, 7–43.
221. Lesueur, D; Petit, J; Ritter, H, 2012, The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state-of-the-art review. Road Materials and Pavement Design, 14:1, 1-16.
222. Sebaaly, p; Hajj, E; Hitti, E, 2012, MECHANISTIC PROPERTIES OF WARM MIX ASPHALT MIXTURES. 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 13-15th June 2012, Istanbul.
223. Santucci, L, 2010, Minimizing Moisture Damage in Asphalt Concrete, UC Berkeley, Institute of Transportation Studies, Pavement Specialist, University of California Pavement Research Center, and California LTAP Field Engineer, Technology Transfer Program.
224. Boyes, A. J, 2011, Reducing moisture damage in Asphalt Mixes using recycled waste additives. Anthony John Boyes, U. S. A, December, 122.
225. Esarwi, M. A; Hainin, M. R; Chik, A. A. (2008). Stripping resistance of Malaysian hot mix asphalt mixture using hydrated lime as filler. Universiti Teknologi Malaysia.
226. Albayati. H. A, 2011, Mechanistic Evaluation of Lime-Modified Asphalt Concrete Mixtures. Journal of Engineering, IRAG, Vol.17, N^0.6, pp.1444-1460.
227. National lime association, 2003, How to Add Hydrated Lime to Asphalt an Overview of Current Methods, pp15.
228. Guinn, K; Hunt, L, 2001, Standard specifications for road and bridge constructions. Carson City: Nevada Department of Transportation.

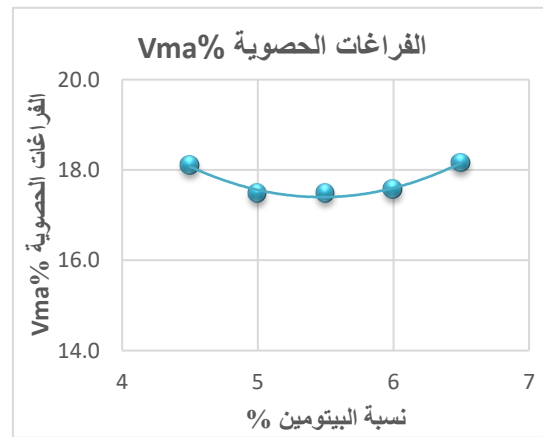
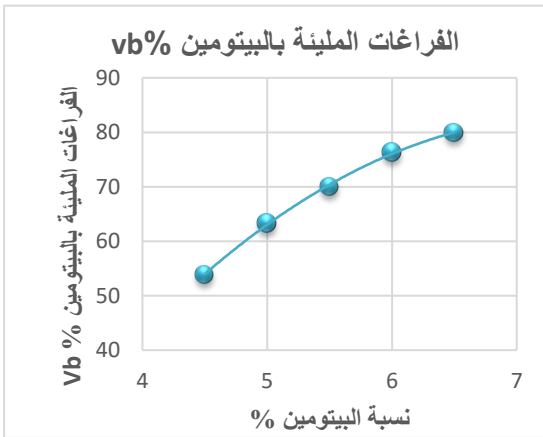
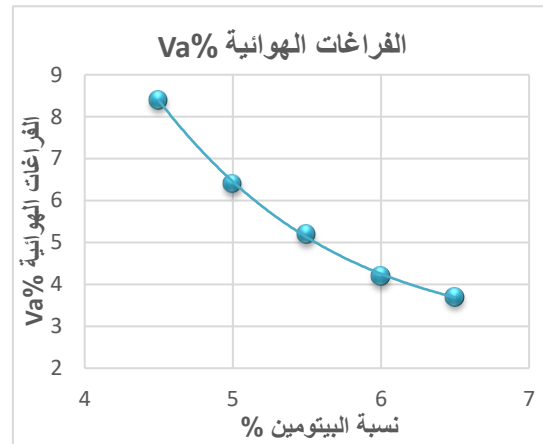
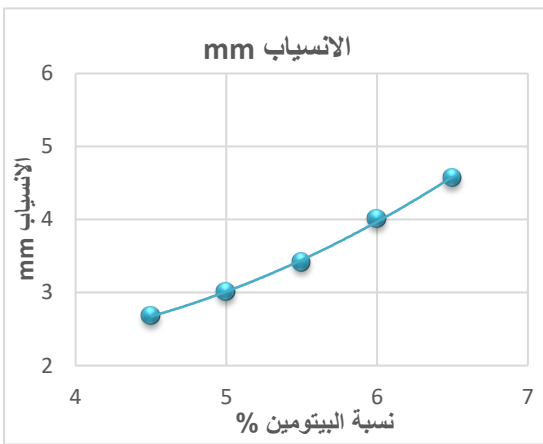
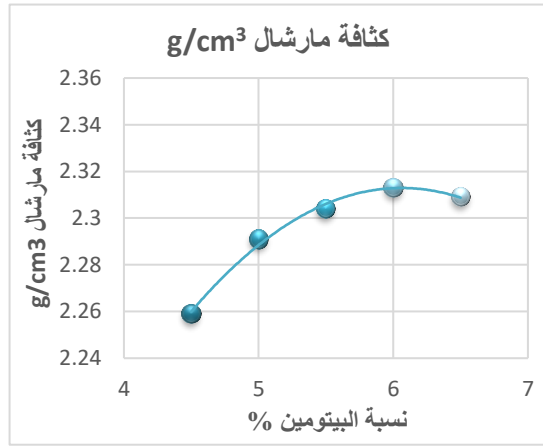
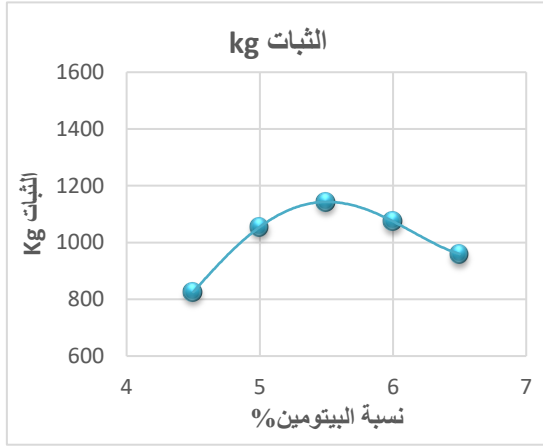
229. Souliman, M; Piratheepan, M; Hajj, E; Sebaaly, P; Sequeira, Y, 2015, Impact of lime on the mechanical and mechanistic performance of hot mixed asphalt mixtures. Road Materials and Pavement Design, Vol. 16, No. 2, 421–444.
230. Ismael, M; Ahmed, M, 2019, Effect of Hydrated Lime on Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures. Civil and Architectural Engineering, Number 3 Volume 25.

الملحق A

نتائج تصميم الخلطات البيتومينية الدافئة وفق طريقة مارشال

الجدول (1-A): حساب عناصر مارشال لتحديد نسبة البيتومين المثالية للخلطات البيتومينية عند درجة حرارة إنتاج 135°C (بدون إضافات)

الرقم No.	نسبة البيتومين وزن %	وزن العينة (g)			حجم لعينة cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الكثافة العظمى gr/cm ³	الفراغات (%)			الثبات kg	عمل التصحيح	الثبات المصحح kg	الانسياب mm
		في الهواء	مشبعة	في الماء				الهبوانية	الحصوية	بيتومينية				
A	4.5	1183.70	1194.4	669.2	525.2	2.254					858	0.96	824	2.74
B	4.5	1181.70	1190.8	669.2	521.6	2.266					842	1	842	2.70
C	4.5	1186.00	1196	670.9	525.1	2.259					845	0.96	811	2.60
متوسط نسبة الرابط 4.5%						2.259	2.466	53.9	18.21	8.4	840.3		825.67	2.68
A	5.0	1185.90	1191.4	673.3	518.1	2.289					1080	1	1080	2.90
B	5.0	1192.90	1198.3	676.9	521.4	2.288					1031	1	1031	3.24
C	5.0	1190.40	1195.5	677.3	518.2	2.297					1054	1	1054	2.89
متوسط نسبة الرابط 5%						2.291	2.448	63.3	17.48	6.4	1055.0		1055.00	3.01
A	5.5	1223.10	1226.7	692.8	533.9	2.293					1182	0.96	1135	3.20
B	5.5	1224.50	1227.5	695.5	532.0	2.304					1217	0.96	1168	3.46
C	5.5	1225.90	1229.7	699.8	529.9	2.314					1173	0.96	1126	3.60
متوسط نسبة الرابط 5.5%						2.304	2.431	70.0	17.48	5.2	1190.7		1143.00	3.42
A	6.0	1213.50	1215.9	689.6	526.3	2.306					1123	0.96	1078	4.16
B	6.0	1202.30	1204.3	686.5	517.8	2.322					1046	1	1046	4.00
C	6.0	1205.40	1208.2	686.9	521.3	2.312					1100	1	1100	3.88
متوسط نسبة الرابط 6%						2.313	2.414	76.3	17.57	4.2	1089.7		1074.67	4.01
A	6.5	1215.00	1216.4	685.0	531.4	2.286					1027	0.96	986	4.57
B	6.5	1196.40	1197.7	682.7	515.0	2.323					933	1	933	4.74
C	6.5	1200.00	1201.5	683.8	517.7	2.318					960	1	960	4.40
متوسط نسبة الرابط 6.5%						2.309	2.397	79.9	18.16	3.7	973.3		959.67	4.57

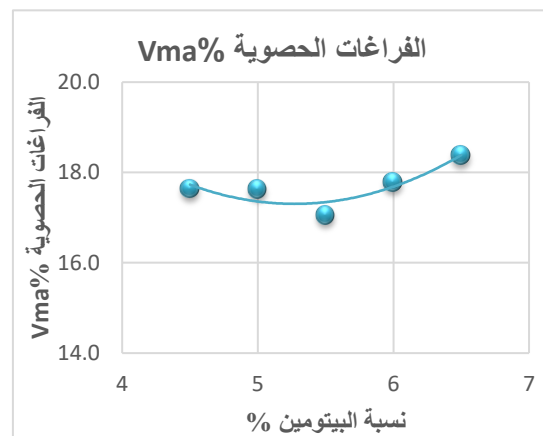
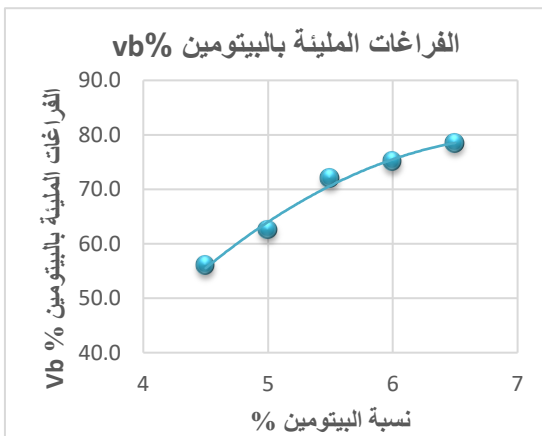
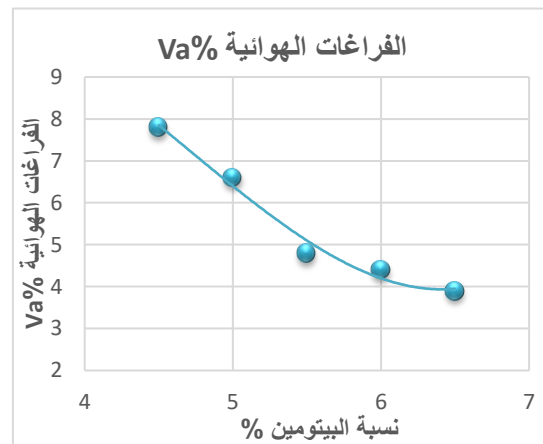
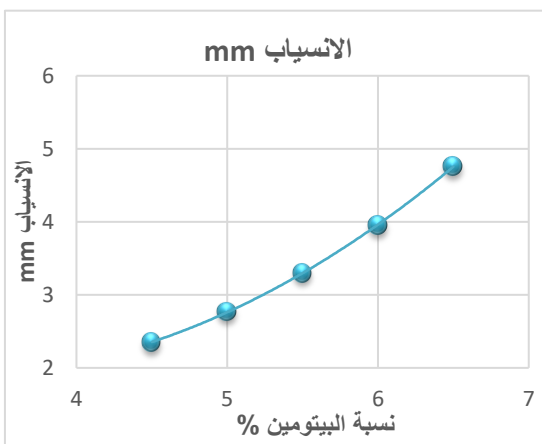
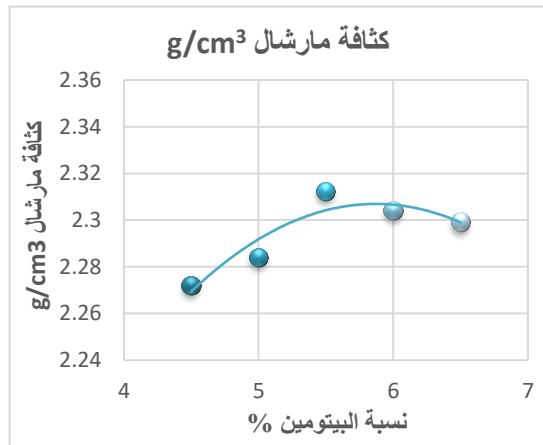
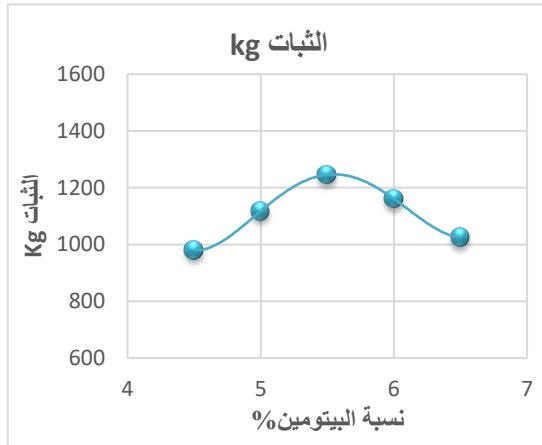


الشكل (1-A): منحنيات مارشال (الثبات، الكثافة، الانسياب، الفراغات الهوائية، الفراغات الحصوية، الفراغات المليئة بالبيتومين) للخلطات البيتومينية المصممة عند درجة حرارة إنتاج 135°C (بدون إضافات)

تم الاستنتاج من منحنيات مارشال بأن نسبة البيتومين المثالية المحققة للمتطلبات الفنية لطبقة اهتراء المجبول البيتوميني هي 5.9%.

الجدول (2-A): حساب عناصر مارشال لتحديد نسبة البيتومين المثالية للخلطات البيتومينية %0.6WMANZ عند درجة حرارة إنتاج 135°C

الرقم No.	نسبة البيتومين وزن %	وزن العينة (g)			حجم لعينة cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الكثافة العظمى gr/cm ³	الفراغات (%)			الثبات kg	عامل التصحيح الثبات	الثبات kg
		في الهواء	مشبعة	في الماء				الهوائية	الخصوية	المليئة بالبيتومين			
A	4.5	1178.2	1186.8	669.5	517.3	2.278					994	1	994
B	4.5	1183.5	1191.5	669.0	522.5	2.265					1027	0.96	986
C	4.5	1185.1	1194.5	672.9	521.6	2.272					961	1	961
متوسط نسبة الرابط 4.5%						2.272	2.463	56.0	17.64	7.8	994.00		980.33
A	5.0	1181.6	1187.4	667.7	519.7	2.274					1120	1	1120
B	5.0	1184.2	1190.2	669.5	520.7	2.274					1108	1	1108
C	5.0	1178.7	1183.7	672.0	511.7	2.303					1126	1	1126
متوسط نسبة الرابط 5%						2.284	2.445	62.6	17.63	6.6	1118.00		1118.00
A	5.5	1214.5	1217.8	694.2	523.6	2.320					1275	0.96	1224
B	5.5	1226.0	1229.2	698.8	530.4	2.311					1295	0.96	1243
C	5.5	1227.5	1230.5	697.9	532.6	2.305					1324	0.96	1271
متوسط نسبة الرابط 5.5%						2.312	2.428	72.0	17.06	4.8	1298.00		1246.00
A	6.0	1212.0	1213.4	689.0	524.4	2.311					1185	0.96	1138
B	6.0	1221.3	1222.6	692.3	530.3	2.303					1227	0.96	1178
C	6.0	1224.6	1226.1	692.9	533.2	2.297					1216	0.96	1167
متوسط نسبة الرابط 6%						2.304	2.411	75.1	17.79	4.4	1209.33		1161.00
A	6.5	1215.3	1216.7	688.8	527.9	2.302					1064	0.96	1021
B	6.5	1222.1	1223.7	691.2	532.5	2.295					1054	0.96	1012
C	6.5	1220.4	1222.2	691.7	530.5	2.300					1090	0.96	1046
متوسط نسبة الرابط 6.5%						2.299	2.394	78.5	18.38	3.9	1069.33		1026.33

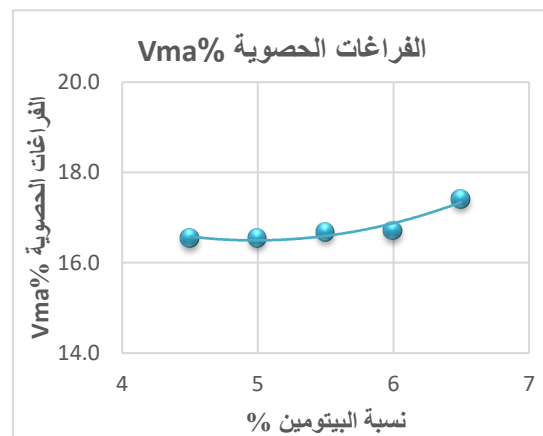
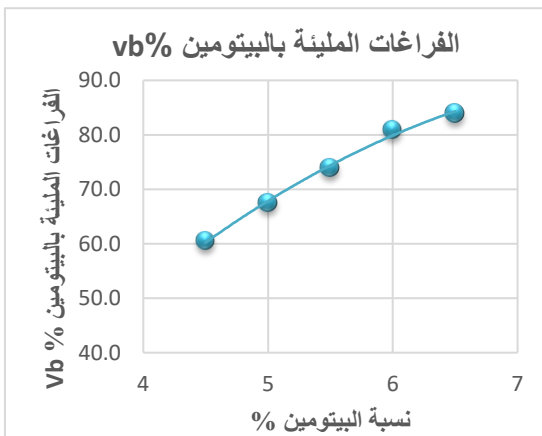
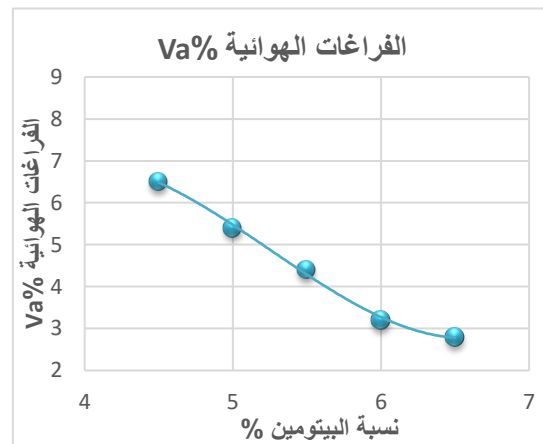
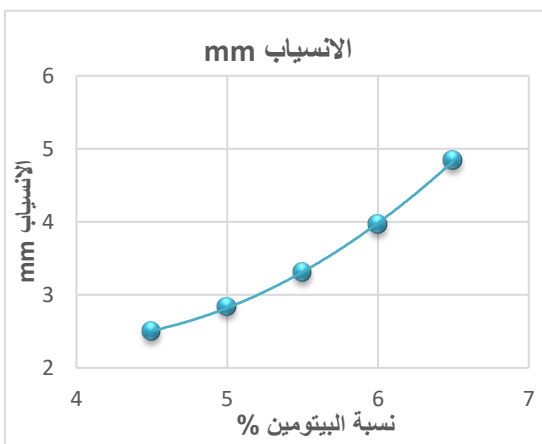
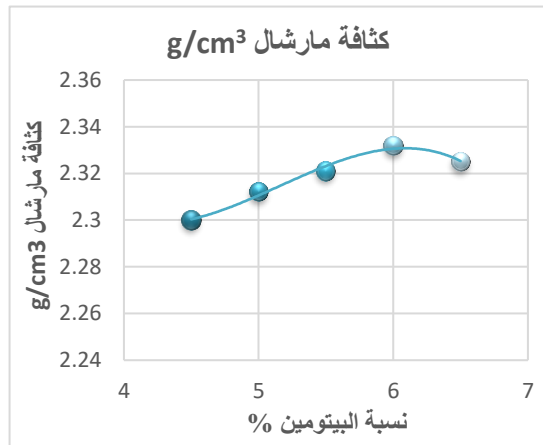
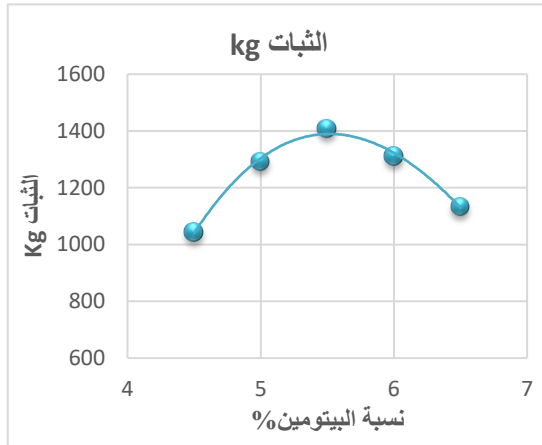


الشكل (2-A): منحنيات مارشال (الثبت، الكثافة، الانسياب، الفراغات الهوائية، الفراغات الحصوية، الفراغات المليئة بالبيتومين) للخلطات البيتومينية WMANZ0.6% عند درجة حرارة إنتاج 135°C

تم الاستنتاج من منحنيات مارشال بأن نسبة البيتومين المثالية المحققة للمتطلبات الفنية لطبقة اهتراء المجلول البيتوميني هي 5.87%.

الجدول (3-A): حساب عناصر مارشال لتحديد نسبة البيتومين المثالية للخلطات البيتومينية WMANZ0.9% عند درجة حرارة إنتاج 135°C

الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	وزن العينة (g)			حجم لعينة cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الكثافة العظمى gr/cm ³	الفراغات (%)			الثبت kg	عامل تصحيح الثبت	الثبت kg	الانسياب mm
		في الهواء	مشبعة SSD	في الماء				الهوائية	الخصوية	المليئة البيتومين				
A	4.5	1227.6	1233.6	697.5	536.1	2.290					1148	0.93	1068	2.41
B	4.5	1223.4	1228.7	697.7	531.0	2.304					1060	0.96	1018	2.66
C	4.5	1211.9	1216.9	691.5	525.4	2.307					1085	0.96	1042	2.42
متوسط نسبة الرابط 4.5%						2.300	2.461	60.5	16.54	6.5	1067.97		1042.67	2.50
A	5.0	1205.1	1209.4	688.1	521.4	2.311					1292	1	1292	2.78
B	5.0	1197.6	1201.6	683.3	518.4	2.310					1279	1	1279	2.75
C	5.0	1199.8	1203.9	685.4	518.6	2.314					1304	1	1304	2.98
متوسط نسبة الرابط 5%						2.312	2.443	67.5	16.55	5.4	1291.67		1291.67	2.84
A	5.5	1203.6	1206.4	692.2	514.2	2.341					1410	1	1410	3.12
B	5.5	1197.1	1199.1	681.5	517.6	2.313					1425	1	1425	3.36
C	5.5	1201.6	1204.6	684.0	520.6	2.308					1388	1	1388	3.44
متوسط نسبة الرابط 5.5%						2.321	2.426	73.9	16.68	4.4	1407.67		1407.67	3.31
A	6.0	1213.1	1214.0	694.3	519.7	2.334					1338	1	1338	3.88
B	6.0	1200.4	1201.2	686.4	514.8	2.332					1306	1	1306	3.95
C	6.0	1201.7	1202.6	686.9	515.7	2.330					1287	1	1287	4.08
متوسط نسبة الرابط 6%						2.332	2.409	80.9	16.71	3.2	1310.33		1310.33	3.97
A	6.5	1196.4	1197.1	682.0	515.1	2.323					1120	1	1120	4.70
B	6.5	1196.6	1197.2	682.1	515.1	2.323					1170	1	1170	4.93
C	6.5	1193.3	1194.0	681.7	512.3	2.329					1108	1	1108	4.88
متوسط نسبة الرابط 6.5%						2.325	2.392	83.9	17.41	2.8	1132.67		1132.67	4.84

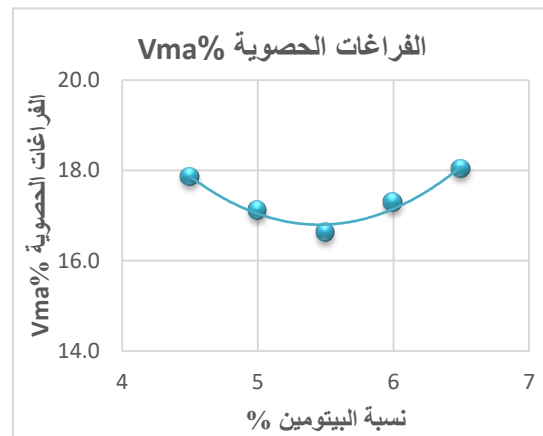
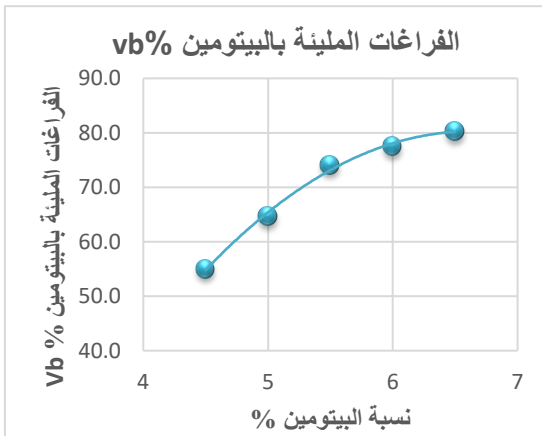
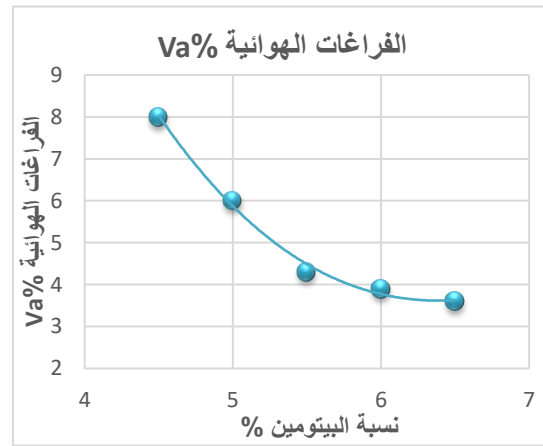
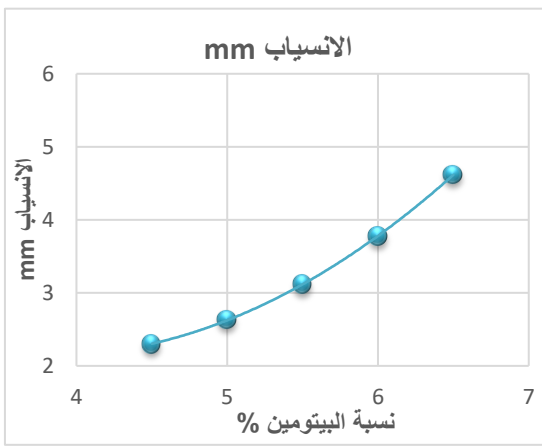
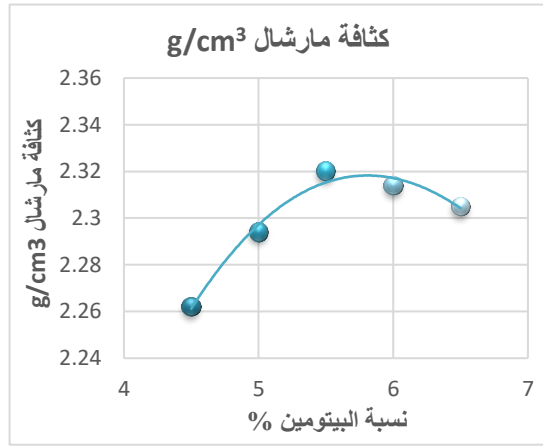
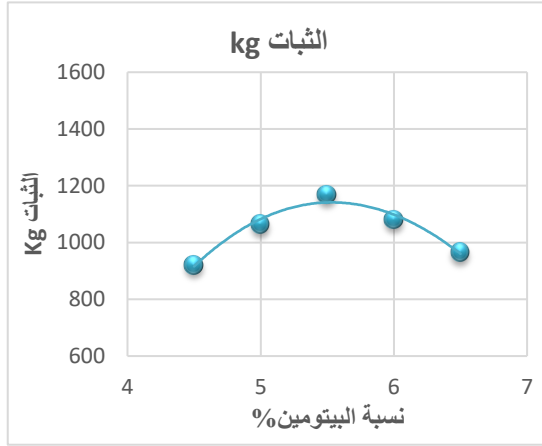


الشكل (3-A): منحنيات مارشال (الثبت، الكثافة، الانسياب، الفراغات الهوائية، الفراغات الحصوية، الفراغات المليئة بالبيتومين) للخلطات البيتومينية WMANZ0.9% عند درجة حرارة إنتاج 135°C

تم الاستنتاج من منحنيات مارشال بأن نسبة البيتومين المثالية المحققة للمتطلبات الفنية لطبقة اهتراء المجلول البيتوميني هي 5.73%.

الجدول (4-A): حساب عناصر مارشال لتحديد نسبة البيتومين المثالية للخلطات البيتومينية WMANZ1.2 % عند درجة حرارة إنتاج 135°C

الرقم No.	نسبة البيتومين وزن %	وزن العينة (g)			حجم لعينة cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الكثافة العظمى gr/cm ³	الفراغات (%)			الثبت kg	عامل التصحيح الثبت	الثبت المصحح kg	الانسياب mm
		في الهواء	مشبعة	في الماء				الهوائية	الخصوية	المليئة بالبيتومين				
A	4.5	1206.00	1215.6	682.6	533.0	2.263					972	0.96	933	2.50
B	4.5	1198.50	1207.5	676.0	531.5	2.255					932	0.96	895	2.14
C	4.5	1202.50	1211.0	680.8	530.2	2.268					973	0.96	934	2.26
متوسط نسبة الرابط 4.5%						2.262	2.459	55.0	17.86	8.0	959.00		920.67	2.30
A	5.0	1203.40	1208.4	684.0	524.4	2.295					1065	0.96	1022	2.30
B	5.0	1186.70	1191.5	672.9	518.6	2.288					1093	1	1093	2.74
C	5.0	1190.20	1194.8	677.3	517.5	2.300					1078	1	1078	2.84
متوسط نسبة الرابط 5%						2.294	2.442	64.7	17.12	6.0	1078.67		1064.33	2.63
A	5.5	1191.80	1194.4	680.5	513.9	2.319					1174	1	1174	3.30
B	5.5	1187.10	1189.3	677.0	512.3	2.317					1152	1	1152	3.12
C	5.5	1190.50	1193.4	681.2	512.2	2.324					1180	1	1180	2.94
متوسط نسبة الرابط 5.5%						2.320	2.424	74.1	16.63	4.3	1168.67		1168.67	3.12
A	6.0	1215.00	1216.5	691.7	524.8	2.315					1125	0.96	1080	3.66
B	6.0	1226.50	1227.9	697.3	530.6	2.312					1144	0.96	1098	3.98
C	6.0	1228.00	1229.7	699.1	530.6	2.314					1106	0.96	1062	3.66
متوسط نسبة الرابط 6%						2.314	2.407	77.5	17.30	3.9	1125.00		1080.00	3.77
A	6.5	1225.10	1226.3	696.2	530.1	2.311					996	0.96	956	4.52
B	6.5	1231.90	1233.0	699.1	533.9	2.307					1023	0.96	982	4.76
C	6.5	1230.40	1231.4	695.9	535.5	2.298					998	0.96	958	4.57
متوسط نسبة الرابط 6.5%						2.305	2.390	80.3	18.04	3.6	1005.67		965.33	4.62



الشكل (4-A): منحنيات مارشال (الثبت، الكثافة، الانسياب، الفراغات الهوائية، الفراغات الحصى، الفراغات الملينة بالبيتومين) للخلطات البيتومينية WMANZ1.2% عند درجة حرارة إنتاج 135°C

تم الاستنتاج من منحنيات مارشال بأن نسبة البيتومين المثالية المحققة للمتطلبات الفنية لطبقة اهتراء المجبول البيتوميني هي 5.7%.

الجدول (5-A): تحديد الوزن النوعي للحصويات المارة من المنخل 3/4 والمحجوزة على المنخل N04

رقم التجربة	I	II	III
وزن العينة مشبعة والسطح جاف	3087.6	3232.7	3159.5
وزن العينة في الماء gr	1900.4	1991.7	1947.4
وزن العينة جافة gr	3030.9	3177	3105.5
الوزن النوعي الجاف (Bulk)	2.553	2.560	2.562
الوزن النوعي مشبع والسطح جاف	2.601	2.605	2.607
الوزن النوعي الظاهري (Aparente)	2.681	2.680	2.682
الوزن النوعي الفعال	2.617	2.620	2.622
الوزن النوعي الفعال الوسطي	2.620		

الجدول (6-A): تحديد الوزن النوعي للحصويات المارة من المنخل N04 والمحجوزة على المنخل N0.200

رقم التجربة	I	II	III
وزن العينة الرطبة (SSD) gr	500	500	500
وزن البكنومتر مع الماء والعينة gr	1615.6	1615.8	1615.8
وزن البكنومتر مع الماء gr	1305.6	1305.6	1305.6
وزن العينة جافة gr	490.3	489.9	490
الوزن النوعي الجاف (Bulk)	2.581	2.581	2.582
الوزن النوعي الرطب مشبع والسطح جاف	2.632	2.634	2.634
الوزن النوعي الظاهري (Aparente)	2.719	2.726	2.725
الوزن النوعي الفعال	2.650	2.654	2.653
الوزن النوعي الفعال الوسطي	2.652		

الجدول (7-A): تحديد الوزن النوعي للحصويات المارة من المنخل N0.200

وزن الزجاجاة مع السدادة gr	129.8
وزن الزجاجاة مع السدادة والعينة جافة gr	179.8
وزن الزجاجاة مع السدادة والعينة والماء gr	406
وزن الزجاجاة والسدادة والماء	374.5
الوزن النوعي	2.703

الجدول (8-A): تحديد الوزن النوعي الفعال لمجمل الحصويات

الرقم No.	نسبة الحصويات من مجموع الحصويات %	الوزن النوعي الفعال	الوزن النوعي الفعال لمجمل الحصويات
الخشنة	51.5	2.620	2.638
الناعمة	43.0	2.652	
الفيلر	5.5	2.703	

الملحق B

نتائج اختبارات الشد غير المباشر ومقاومة خطر الرطوبة

الجدول (1-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية الساخنة HMA

العينات الجافة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينه (cm)	وزن العينه (g)			حجم لعينه cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظميه (KN)	مقاومة الشد الجافة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.4	6.60	1148.4	1155.4	648.3	507.1	2.265	7.0	9.14	873.34
B	5.4	6.65	1152.2	1160.6	653.1	507.5	2.270	6.7	9.35	886.68
C	5.4	6.68	1149.5	1156.8	648.4	508.4	2.261	7.1	8.75	826.06
الوسطي							2.265	6.9	9.08	862.03
العينات المشروطة الرطبة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينه (cm)	وزن العينه (g)			حجم لعينه cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظميه (KN)	مقاومة الشد الرطبة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.4	6.60	1149.7	1156.3	652.6	503.7	2.283	6.2	7.72	737.65
B	5.4	6.60	1147.8	1153.2	644	509.2	2.254	7.4	7.52	718.54
C	5.4	6.63	1153.1	1158.7	651.7	507.0	2.274	6.6	7.66	728.61
الوسطي							2.270	6.7	7.63	728.27
معدل مقاومة الشد غير المباشر TSR=84.5%										

الجدول (2-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية HMA_{HL1.5%}

العينات الجافة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينه (cm)	وزن العينه (g)			حجم لعينه cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الجافة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.4	6.64	1160.2	1169	658	511.0	2.270	6.7	9.29	882.32
B	5.4	6.67	1157.7	1164.7	653.4	511.3	2.264	7.0	9.44	892.53
C	5.4	6.66	1158.3	1166.8	657.7	509.1	2.275	6.5	9.61	909.97
الوسطي							2.270	6.8	9.45	894.94
العينات المشروطة الرطبة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينه (cm)	وزن العينه (g)			حجم لعينه cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الرطبة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.4	6.63	1160	1167.3	657.5	509.8	2.275	6.5	8.58	816.12
B	5.4	6.65	1158.5	1164.9	656	508.9	2.276	6.5	8.64	819.35
C	5.4	6.55	1154.6	1161	653	508.0	2.273	6.6	8.42	810.68
الوسطي							2.275	6.6	8.55	815.38
معدل مقاومة الشد غير المباشر TSR=91.1%										

الجدول (3-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية 2% HMA_{HL}

العينات الجافة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينه (cm)	وزن العينه (g)			حجم لعينه cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الجافة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.4	6.65	1155	1163.6	655	508.6	2.271	6.7	10.14	961.60
B	5.4	6.60	1153.7	1161	653	508.0	2.271	6.7	9.70	926.84
C	5.4	6.62	1149	1156	651	505.0	2.275	6.5	9.75	928.81
الوسطي							2.272	6.7	9.86	939.08
العينات المشروطة الرطبة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينه (cm)	وزن العينه (g)			حجم لعينه cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الرطبة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.4	6.66	1152.9	1160	653.6	506.4	2.277	6.5	8.95	847.48
B	5.4	6.66	1154	1160.5	653	507.5	2.274	6.6	9.43	892.93
C	5.4	6.64	1150	1157.4	652.7	504.7	2.279	6.4	9.59	910.81
الوسطي							2.276	6.5	9.32	883.74
معدل مقاومة الشد غير المباشر TSR=94.1%										

الجدول (4-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية HMA_{HL2.5%}

العينات الجافة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينه (cm)	وزن العينه (g)			حجم لعينه ³ cm	كثافة مارشال ³ gr/cm	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظميه (KN)	مقاومة الشد الجافة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.4	6.58	1152.9	1159.8	652.5	507.3	2.273	6.6	9.88	946.91
B	5.4	6.58	1151.2	1157.5	651.8	505.7	2.276	6.5	10.20	977.58
C	5.4	6.60	1153.3	1160.4	655.2	505.2	2.283	6.2	10.07	962.20
الوسطي							2.277	6.5	10.05	962.23
العينات المشروطة الرطبة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينه (cm)	وزن العينه (g)			حجم لعينه ³ cm	كثافة مارشال ³ gr/cm	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظميه (KN)	مقاومة الشد الرطبة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.4	6.62	1154	1161	653.2	507.8	2.273	6.6	9.28	884.03
B	5.4	6.58	1148.8	1155.4	651.9	503.5	2.282	6.3	9.06	868.32
C	5.4	6.60	1147.1	1153.9	651.7	502.2	2.284	6.2	9.46	903.91
الوسطي							2.279	6.4	9.27	885.42
معدل مقاومة الشد غير المباشر TSR=92%										

الجدول (5-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية HMA_{NZ0.6%}

العينات الجافة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينة (cm)	وزن العينة (g)			حجم لعينة ³ cm	كثافة مارشال ³ gr/cm	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الجافة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.3	6.52	1157.2	1163.9	655.7	508.2	2.277	6.5	9.44	913.07
B	5.3	6.56	1163.7	1170.3	656.6	513.7	2.265	7.0	9.52	915.19
C	5.3	6.55	1160	1167.8	656.5	511.3	2.269	6.8	9.28	893.48
الوسطي							2.270	6.7	9.41	907.25
العينات المشروطة الرطبة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينة (cm)	وزن العينة (g)			حجم لعينة ³ cm	كثافة مارشال ³ gr/cm	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الجافة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.3	6.56	1160.1	1165.5	654.1	511.4	2.268	6.8	8.43	810.41
B	5.3	6.58	1158	1163.3	657.4	505.9	2.289	6.0	8.55	819.44
C	5.3	6.54	1163.4	1168.7	655.4	513.3	2.267	6.9	8.50	819.63
الوسطي							2.275	6.6	8.49	816.49
معدل مقاومة الشد غير المباشر TSR=90%										

الجدول (6-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية الدافئة WMA

العينات الجافة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينة (cm)	وزن العينة (g)			حجم لعينة cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الجافة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.9	6.71	1138.7	1150	642.3	507.7	2.243	7.2	6.62	622.18
B	5.9	6.70	1143.3	1154.2	642	512.2	2.232	7.7	6.40	602.40
C	5.9	6.70	1140	1150.5	641.7	508.8	2.241	7.3	6.04	568.51
الوسطي							2.239	7.4	6.35	597.70
العينات المشروطة الرطبة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينة (cm)	وزن العينة (g)			حجم لعينة cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الرطبة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.9	6.70	1142.2	1153.1	640.5	512.6	2.228	7.8	3.98	374.62
B	5.9	6.70	1138.8	1149	641	508.0	2.242	7.3	3.64	342.61
C	5.9	6.69	1144.5	1153.8	643.8	510.0	2.244	7.2	3.93	370.46
الوسطي							2.238	7.4	3.85	362.56
معدل مقاومة الشد غير المباشر TSR=60.7%										

الجدول (7-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية %WMANZ0.9

العينات الجافة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينة (cm)	وزن العينة (g)			حجم لعينة ³cm	كثافة مارشال ³gr/cm	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الجافة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.73	6.70	1156.8	1166.3	653.5	512.8	2.256	6.7	7.10	668.29
B	5.73	6.71	1157	1167	656.1	510.9	2.265	6.4	7.76	729.32
C	5.73	6.71	1153.5	1164	654.7	509.3	2.265	6.3	7.55	709.58
الوسطي							2.262	6.5	7.47	702.40
العينات المشروطة الرطبة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينة (cm)	وزن العينة (g)			حجم لعينة ³cm	كثافة مارشال ³gr/cm	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الجافة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.73	6.70	1149	1158.6	650.2	508.4	2.260	6.5	5.72	538.39
B	5.73	6.69	1153.2	1162.5	651.3	511.2	2.256	6.7	5.90	556.17
C	5.73	6.69	1158.2	1167.3	655	512.3	2.261	6.5	5.84	550.51
الوسطي							2.259	6.6	5.82	548.36
معدل مقاومة الشد غير المباشر TSR=78%										

الجدول (8-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية WMANZ0.9%+HL1.5%

العينات الجافة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينة (cm)	وزن العينة (g)			حجم لعينة cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الجافة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.73	6.63	1151.7	1159.8	651	508.8	2.264	6.4	7.45	708.63
B	5.73	6.66	1151.4	1158	649.2	508.8	2.263	6.4	7.70	729.11
C	5.73	6.69	1150.2	1157.1	650.4	506.7	2.270	6.1	7.52	708.88
الوسطي							2.266	6.3	7.56	715.54
العينات المشروطة الرطبة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينة (cm)	وزن العينة (g)			حجم لعينة cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الجافة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.73	6.68	1149.6	1157.6	649.9	507.7	2.264	6.4	6.60	623.08
B	5.73	6.66	1151.2	1159.6	650.2	509.4	2.260	6.5	6.30	596.55
C	5.73	6.68	1148.3	1156.9	650.6	506.3	2.268	6.2	6.46	609.87
الوسطي							2.264	6.4	6.45	609.83
معدل مقاومة الشد غير المباشر TSR=85.2%										

الجدول (9-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية WMANZ0.9%+HL2%

العينات الجافة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينة (cm)	وزن العينة (g)			حجم لعينة cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الجافة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.73	6.64	1150.6	1157.9	650.2	507.7	2.266	6.3	7.84	744.61
B	5.73	6.64	1147.8	1155.1	649.9	505.2	2.272	6.0	7.55	717.06
C	5.73	6.70	1147.7	1155.4	649.2	506.2	2.267	6.2	7.50	705.94
الوسطي							2.269	6.2	7.63	722.54
العينات المشروطة الرطبة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينة (cm)	وزن العينة (g)			حجم لعينة cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الجافة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.73	6.68	1151	1158.5	651	507.5	2.268	6.2	6.72	634.41
B	5.73	6.68	1152	1158.3	649.5	508.8	2.264	6.4	6.86	647.63
C	5.73	6.66	1151.4	1158.4	652	506.4	2.274	6.0	6.54	619.27
الوسطي							2.269	6.2	6.71	633.77
معدل مقاومة الشد غير المباشر TSR=87.8%										

الجدول (10-B): حساب معدل مقاومة الشد غير المباشر (الحساسية ضد الرطوبة) للخلطات البيتومينية WMANZ0.9%+HL2.5%

العينات الجافة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينة (cm)	وزن العينة (g)			حجم لعينة cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الجافة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.73	6.64	1143	1149.3	645	504.3	2.267	6.3	7.64	725.61
B	5.73	6.64	1150.4	1157.5	650.5	507.0	2.269	6.2	8.14	773.10
C	5.73	6.70	1154.2	1161.1	653.4	507.7	2.273	6.0	7.80	734.17
الوسطي							2.270	6.1	7.86	744.29
العينات المشروطة الرطبة										
الرقم No.	نسبة البيتومين % وزنا	سماعة العينة (cm)	وزن العينة (g)			حجم لعينة cm ³	كثافة مارشال gr/cm ³	الفراغات الهوائية %	الحمولة الأعظمية (KN)	مقاومة الشد الجافة (kpa)
			في الهواء	مشبعة والسطح جاف	في الماء					
A	5.73	6.68	1146.4	1153	647	506.0	2.266	6.3	6.90	651.41
B	5.73	6.68	1148.9	1155.2	649.1	506.1	2.270	6.1	6.60	623.08
C	5.73	6.66	1155.5	1162.2	653.8	508.4	2.273	6.0	6.76	640.11
الوسطي							2.270	6.1	6.75	638.20
معدل مقاومة الشد غير المباشر TSR=85.7%										

ABSTRACT

The purpose of this research is to study the effect of Syrian natural zeolite on the physical and rheological properties of asphalt binder, improve properties of hot asphalt concrete and verify of using it to produce warm asphalt concrete, in addition to economic and environmental benefits which include reduction in pollution emissions and decreased energy consumption in mix production.

In this study, natural zeolite characterization has been investigated by X-Ray Fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infra-Red (FTIR) Techniques and Thermal Gravimetric analysis (TGA). Natural zeolite was added to bitumen binder with different percentages (3, 4, 5 and 6%) by weight and to determine the effect of natural zeolite on properties of bitumen binder, conventional tests (penetration, softening point, ductility, viscosity and RTOFT) were carried out on both modified and unmodified aged bitumen binder with natural zeolite. According to the test results, it has been seen that the addition of natural zeolite improves properties of the bitumen binder and an increase in its resistance to fatigue, and do not make a substantial difference on the workability of the bitumen binder. So the effect of the mixture of natural zeolite additives on the workability could not be predicted on bitumen binder, therefore the direct effect of additives should be studied on the bituminous mixtures.

Two types of hot bituminous mixtures were done according to the Marshall method: Reference mixtures and mixtures containing different percentage of natural zeolite (0.3, 0.6, 0.9)% by weight of total aggregates, then the changes in the properties of bituminous mixtures modified with natural zeolite were investigated and compared with reference mixtures. Results of this part indicate the improvement of the physical and mechanical properties of bituminous mixtures modified with natural zeolite at all ratios studied, with no significant changes in the optimal bitumen binder content. The ideal rate for using natural zeolite to improve the properties of hot bituminous

mixes is 0.6% by weight of total aggregates, which has obtained the highest stability, highest resistance to permanent deformation, and values of flow and air voids within the limits of the specifications.

The changes in the properties of warm bituminous mixes mixtures containing different percentage of natural zeolite (0, 0.6, 0.9, 1.2)% by weight of total aggregates were studied and compared with reference mixtures. Results of Marshall tests indicate the success of the Syrian natural zeolite in reducing the bituminous concrete production temperatures by 25°C, at a suggested percentage of 0.9% of the total weight of aggregates, in which the physical and mechanical properties of the warm mix asphalt were close to the properties of the hot mix asphalt. Results of moisture susceptibility tests were consistent with the results of previous studies in terms of the decrease in the resistance of warm mixtures to the influence of moisture, despite the role that zeolite played in improving moisture resistance compared to the case of reducing production temperatures without using any additives, and accordingly it was found that it is possible to use the Syrian natural zeolite to produce Warm bituminous concrete, with the need to modified it using anti-stripping agents to ensure effective resistance to moisture.

The hydrated lime has been used to improve the resistance of bituminous concrete to moisture damage as a partial substitute at different dosages (1.5, 2, 2.5)% by weight of total aggregates. Results of this part indicate the need to modified Warm bituminous mixes using anti-stripping agents to ensure effective resistance to moisture and the optimum dosage of hydrated lime to improve the moisture susceptibility of WMA is determined to be 2% by weight of total aggregates.

Key words: Hot mix asphalt, Warm mix asphalt, Synthetic/Natural Zeolite, Indirect tensile strength (ITS), Moisture Susceptibility, anti-stripping agents.

**Syrian Arab Republic
AL-Baath University
Faculty of Civil Engineering
Department of Transportation**



Effect of Syrian Natural Zeolite on Bituminous Concrete Properties

**Thesis for PhD Degree in Civil Engineering
(Transportation Engineering)**

Prepared by:

Eng. Mahmoud Ali Abdullh

Supervised by:

Dr. Fayez Suleiman

Dr. Bassem Ali

**2022م
1443هـ**