تأثير تعاقب التجمد والذوبان في ديمومة الخلطات البيتومينية[1]

المهندس عماد الشلعوط[2] الدكتور محمد راتب سطاس [3]

الدكتور أسامة ميرو[4]

الملخص

يهدف هذا البحث إلى دراسة إمكانية تحسين أداء الخلطات البيتومينية وديمومتها والوصول إلى خلطات بيتومينية تمتاز بأداء مستمر ومقبول تحت تأثير الحمولات المحورية المتكررة ومقاومة مقبولة للعوامل الجوية المختلفة مثل الرطوبة والإشباع والتجمد والذوبان والحرارة والتي قد تتعرض لها خلال العمر الاستثماري.

فقدان الديمومة أو ما يعرف بشيخوخة الخلطات البيتومينية هو أكثر مشاكل الرصف المرن شيوعاً. ولهذا قمنا بدراسة تأثير التجمد والذوبان في الخلطات البيتومينية عن طريق عينات مارشال "Marshall" وذلك بهدف الفهم الجيد للديمومة وظروفها ومتطلباتها وبغرض الوصول إلى ديمومة عالية لهذه الخلطات، والتعرف بوضوح على سلوكها نتيجة لتعرضها لهذا العامل. وتم في هذا البحث تحليل لهذه النتائج، والتوصل إلى إيجاد معيار الديمومة الأول والثاني، والوصول إلى عمل منحنيات لعوامل الديمومة يستطاع من خلالها الحكم على جودة هذه الخلطات، ونظراً لارتباط التجارب المجراة والاتصال الوثيق بتسلسلها مع النتائج فقد تم إيراد كامل النتائج والتي كان من الممكن أن تشكل مادة وفيرة لأكثر من بحث وهذا ما شكل تعدداً قد يبدو كبيراً في عدد صفحات هذا البحث.

[1] أعد هذا البحث في سياق رسالة الدكتوراه للطالب المهندس عماد الشلعوط بإشراف الدكتور المهندس محمد راتب سطاس ومشاركة الدكتور المهندس أسامة ميرو.

[2] قسم هندسة النقل والمواصلات– كلية الهندسة المدنية– جامعة دمشق.

[3] قسم هندسة النقل والمواصلات – كلية الهندسة المدنية– جامعة دمشق.

[4] قسم هندسة النقل والمواصلات – كلية الهندسة المدنية– جامعة دمشق.

1- المقدمة: "Introduction"

الثبات والديمومة "Stability and Durability" هما أساس تصميم الخلطات البيتومينية (1)، لذا فإن معيار الثبات يتطلب امتلاك الخلطات البيتومينية مقداراً أولياً (ابتدائياً) وكافياً للثبات، ليتحمل المقدار المطلوب من الحمولات المحورية التصميمية. أما معيار الديمومة فيتركز على الأداء المستمر والمقبول للخلطات البيتومينية تحت تأثير كل من الحمولات المحورية وتكرارها، وللعوامل الجوية المختلفة من رطوبة وأمطار وأشعة شمس وتجمد وذوبان والتي قد تتعرض لها هذه الخلطات خلال عمرها الاستثماري.

إن من أكثر مشاكل الرصف المرن شيوعاً وأكثرها تكلفة ما هو عائد إلى فقدان الثبات للخلطات البيتومينية أو ما يعرف بشيخوخة الخلطات "فقدان الديمومة". ومن الأسباب الرئيسية لتلف الأغطية المرنة أو تدني مستوى الخدمة للطرق هو انخفاض الخواص الكامنة للديمومة في طبقتي الأساس والاهتراء. وتعرف القدرة الكامنة (الخواص) لديمومة الخلطات البيتومينية بأنها مقدار استمرارية مقاومة هذه الخلطات لتأثير التلف الناجم عن مجموعة الأضرار الناتجة عن الماء والحرارة والتجمد.

إن ضعف الديمومة تعني ضمنياً أن السلوك والخواص الميكانيكية للخليط البيتومينى سوف تدوم وتستمر فترات طويلة بالاستخدام.

2- مفاهيم الديمومة:

إن العمر الاستثماري الطويل هو تقريباً المعنى المرادف للديمومة (2). إلا أن هناك أكثر من تعريف لكلمة "الديمومة". فديمومة المواد هو قدرتها على مقاومة التغيرات في حالتها ووضعها أو بكلمة أخرى في خواصها. إلا أن هذا التعريف لا يشير نهائياً بشيء إلى تأثير الزمن علماً بأن المواد التي تمتلك ديمومة عالية سوف تحتفظ بخواصها فترات زمنية طويلة، أو لن تكون قليلة الفائدة أو عديمتها في مدة زمنية قصيرة، وبعبارة أخرى فإن المواد ذات الديمومة العالية تمتلك خاصة خدمة زمنية طويلة (2).

عَرّف القاموس الديمومة بالمقدرة على البقاء طويلاً في الخدمة. أما الـ ASTM فتعرف الديمومة بأنها التأدية الآمنة للمنشأ أو لأحد أجزائه وللعمر التصميمي المقترح، أو بالمقدرة على المحافظة والأداء للمنتج أو أحد مكوناته. أو تركيبه وللفترة الزمنية المحددة وفقاً للتصميم (3).

فالمنتج ذو الديمومة العالية هو الذي يستطيع البقاء مدة زمنية طويلة دون ظهور عيوب ملحوظة فيه أو تلف.

إن العوامل المؤثرة في ديمومة الخلطات البيتومينية تشمل كل ما يعرض هذه الخلطات للتلف وظهور العيوب. إلا أن هذه العوامل المؤثرة وبحسب الخبراء ترتبط ارتباطاً وثيقاً بالعوامل الجوية خاصة الرطوبة والمياه والتجمد والذوبان والحرارة، كما ترتبط بكثافة السير على الطرق.

3- التجارب العملية والمواصفات:

اعتمدت المواصفات الآتية في أثناء إجراء التجارب العملية لهذه الدراسة:

1- الجمعية الأمريكية لمسؤولي الطرق السريعة والنقل (AASHTO).

2- الجمعية الأمريكية لاختبارات المواد (ASTM).

3- المواصفات القياسية البريطانية (B.S).

4- الشروط والمواصفات الفنية العامة لأعمال الطرق والجسور– الجزء الرابع الأعمال البيتومينية. هيئة المواصفات والمقاييس العربية السورية SAOSM.

5- مواصفات معهد الإسفلت الأمريكي AAI.

3-1- المواد المستخدمة واختباراتها:

3-1-1- البيتومين (الإسفلت) Asphalt Cement

اِسْتُخْدِمَ نوع واحد من البيتومين بدرجة غرز 70/60 وتم الحصول على هذا البيتومين من مصفاة بانياس وهو الشائع الاستعمال في سورية.

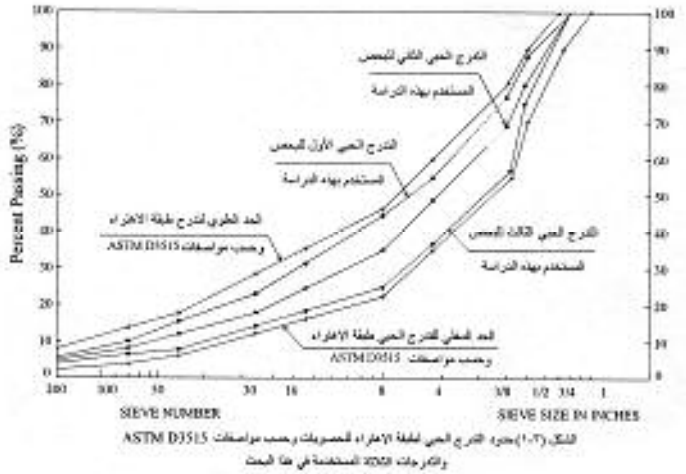
والجدول رقم (3-1) يبين أهم الاختبارات والنتائج التي أجريت لهذا النوع من البيتومين.

جدول رقم (3-1) نتائج اختبار البيتومين المستخدم في الدراسة

الرقم	اسم الاختبار	المواصفة للاختبار	النتائج			المعدل
			عينة 1	عينة 2	عينة 3	
1	المطالية (المطاوعة) (سم) Ductility	ASTM D113	102	104	102	103
2	درجة الليونة (التميع) Softening	ASTM D36	48	48	49	48
3	درجة الغرز (0.1) ملم 100 غم/ 5 ثواني Penetration	ASTM D5	66.5	67.5	67.0	67.0
4	نقطة الوميض والاشتعال Cleveland Open Cup	ASTM D92	300	301	300	300
5	الوزن النوعي Specific Gravity	ASTM D70	1.03	1.03	1.03	1.03

3-1-2- الحصويات (البحص) Aggregate

اِسْتُخْدِمَ نوع واحد من البحص وهو نتاج كسر حجر كلسي (دوليميتي) Dolomite مستخرج من مقالع منطقة حفير، استخدمت خلطات بيتومينية بتدرجات حبية حسب مواصفاتASTM D3515 وإن مجال هذا التدرج بحديه الأعلى والأدنى لطبقة الاهتراء مدرج في الشكل رقم (3-1)، علماً بأنه اِسْتُخْدِمَتْ ثلاثة تدرجات حبية في هذه الدراسة وهذه التدرجات الحبية الثلاثة تقع ضمن حدود المجال النظامي لهذا التدرج الحبي (4).



الشكل (3-1) يبين التدرج الحبي لطبقة الإفراد للحصويات وحسب مواصفات ASTM D3515 والتدرجات الثلاثة المستخدمة في هذا البحث

من الشكل (3-1) نلاحظ ما يأتي:

أ– التدرج الحبي الأول وهو التدرج القريب من الحدود العليا حسب ASTM D3515.

ب– التدرج الحبي الثاني وهو التدرج الوسطي بين الحدود العليا والدنيا.

جـ– التدرج الحبي الثالث وهو التدرج القريب بين الحدود الدنيا حسب ASTM D3515.

والجدول رقم (3-2) يبين الاختبارات والنتائج التي أجريت على الحصويات فيما الجدول رقم (3-3) يبين الحدود العليا والدنيا للمواصفات الخاصة بالتدرج الحبي حسب ASTM D3515 وقيم التدرجات الحبية الثلاثة المستخدمة في هذه الدراسة.

جدول رقم (3-2) نتائج اختبار الخواص للبحص الدولميتي

الرقم	نوع الاختبار	المواصفة	نتائج الاختبار			المعدل	حدود القبول حسب المواصفة
			عينة1	عينة2	عينة3		
1	التآكل Aggregate Abrasion	ASTM C131	17.96	18.74	18.5	18.4	30 max
2	الأصالة المعاملة كبريتات المغنيسيوم المعاملة كبريتات الصوديوم	ASTM C88	8.2 6.5	8.2 6.55	8.1 6.58	8.2 6.54	12 max 10 max
3	الوزن النوعي للبحص الخشن (مار من منخل ¾" ومحجوز على منخل # 4)	ASTM C127	2.732	2.732	2.734	2.733	-
4	الوزن النوعي للرمل الناعم (مار من منخل # 4 ومحجوز على منخل #200)	ASTM C128	2.754	2.753	2.753	2.753	-
5	الوزن النوعي (للمواد المالئة المارة من منخل# 200)	ASTM C128	2.789	2.788	2.786	2.788	

جدول رقم (3-3) الحدود الخاصة بالتدرج الحبي للحصويات حسب مواصفات ASTM D3515 وقيم التدرجات الحبية الثلاثة المستخدمة في هذه الدراسة (4)

مقياس المنخل أو رقم المنخل	الحدود الحبية حسب مواصفة ASTM D3515 نسبة المار	التدرجات المستخدمة في الدراسة (نسبة المار)		
		التدرج الحبي الأول	التدرج الحبي الثاني	التدرج الحبي الثالث
¾ "	90-100	100	100	100
½ "	71-90	87	81	75
3/8 "	56-80	77	68	59
# 4	35-65	62	50	38
# 8	23-49	46	36	26
# 16	17-39	36	28	20
# 30	11-29	26	20	14
# 50	5-19	16	12	8
# 100	4-15	13	9	7
# 200	2-8	7	5	3

4- التجارب العملية:

4-1- إيجاد نسبة الإسفلت المثلى:

تم إيجاد نسبة الإسفلت المثلى للتدرجات الحبية الثلاثة المستخدمة في هـذه الدراسـة حسب مواصفة الـ ASTM D1559-82، وكانت النتائج لهذه الاختبارات حسب الجدول رقم (4-1)

جدول رقم (4-1) نتائج اختبار الخواص الميكانيكية للخلطات البيتومينية

الرقم	الخاصة	التدرج الحبي للحصويات		
		التدرج الحبي الأول	التدرج الحبي الثاني	التدرج الحبي الثالث
-1	نسبة الإسفلت المثلى	5.2%	5.0%	5.1%
-2	الوزن النوعي غ/سم^3	2.465	2.470	2.454
-3	نسبة الفراغات الهوائية (%A.V)	3.9	3.9	4.2
-4	نسبة الفراغات المينرالية (%V.M.A)	15.6	14.83	15.8
-5	قيمة ثبات مارشال Kg	1650	1530	1417
-6	قيمة الانسياب mm	3.15	3.2	3.88
-7	القساوة = الثبات/ الانسياب Kg/mm	523.8	478.12	365.2

4-2- تجارب الديمومة:

بعد إيجاد نسبة الإسفلت المثلى لكل من التدرجات الحبية الثلاثة تم مجـدداً تحـضير عينات مارشال وبنسبة الإسفلت المثلى لكل تدرج حبي وحسب مواصفة الـ ASTM D1559-82 وتم الرص لهذه العينات وفي درجات حرارة مختلفـة وهـي (135, 155, 115) ± 3 C°، ثم تركت العينات مدة (24) ساعة في درجة حرارة الغرفـة الطبيعيـة لتبرد وبعد ذلك قُسِّمَتْ هذه العينات واِخْتُبِرَتْ بطريقة مارشال ولكل تدرج حبي وفـي درجات حرارة الرص الثلاث وبتأثير كل من:

1- عدد دورات التجمد والذوبان.

2- مدة التجميد.

4-2-1- عدد دورات التجمد والذوبان:

اِعْتُمِدَتْ مدة التجمد (24) ساعة حيث وضعت العينات في مجمدة بدرجة حرارة (-20) ^{o}C، ومدة الذوبان (24) ساعة وذلك بنقع العينات بحمام مائي بدرجة (60) ^{o}C. ومن ثَمَّ فإن الدورة الواحدة للتجمد والذوبان تحتاج إلى (48) ساعة.

اِعْتُمِدَتْ عدد دورات التجمد والذوبان في هذه الدراسة (10, 7, 5, 3, 2, 1) دورات.

عدد العينات التي اِخْتُبِرَتْ وفقاً لعدد دورات التجمد والذوبان لكل تدرج حبي هو (18) عينة بدرجة حرارة رص (115) ^{o}C و(18) عينة بدرجة حرارة رص (135) ^{o}C و(18) عينة بدرجة حرارة رص (155) ^{o}C. أي بمجموع (54) عينة من كل تدرج حبي والجداول أرقام (4-1, 4-2, 4-3) تبين نتائج هذه الاختبارات.

4-2-2- تأثير مدة التجمد

4-2-2-1- بتأثير مدة التجمد وعلى أن يتم نقع العينات في حمام مائي بدرجة حرارة (60) ^{o}C مدة (½) ساعة قبل اختبارها بطريقة مارشال مباشرة.

اِعْتُمِدَتْ درجة حرارة التجمد (-20)^{o}C ، ولفترات زمنية للتجمد (100, 48, 24, 12, 6) ساعة وعلى أن يتم نقع العينات بحمام مائي بدرجة حرارة (60)^{o}C مدة (1/2) ساعة قبل اختبارها بطريقة مارشال.

جدول رقم (4-1) نتائج اختبار الخواص الميكانيكية للخليطة البيتومينية التدرج الحبي الأول بتأثير عدد دورات التجمد والذوبان

درجة حرارة الرص °C	عدد دورات التجمد والذوبان	الوزن الحجمي g/cm^3	نسبة الفراغات الهوائية "%A.V"	نسبة الفراغات المينرالية "%V.M.A"	قيم ثبات مارشال "Kg"	قيم الانسياب "mm"	القساوة = ثبات مارشال/الانسياب "Kg/mm"
115	العينة المرجعية	2.451	4.48	15.18	1427.33	3.21	444.65
	1	2.450	4.52	15.20	1111.11	3.40	290.87
	2	2.449	4.56	15.25	752.82	3.82	197.07
	3	2.450	4.52	15.20	637.56	4.38	145.56
	5	2.450	4.52	15.20	499.61	5.09	98.15
	7	2.451	4.48	15.18	310.45	5.68	52.79
	10	2.451	4.48	15.18	-	-	-
135	العينة المرجعية	2.459	4.17	14.91	1511.75	3.06	494.03
	1	2.459	4.17	14.91	1204.65	3.39	355.35
	2	2.458	4.20	14.94	834.51	3.75	222.53
	3	2.460	4.13	14.87	697.86	4.24	164.58
	5	2.458	4.20	14.94	560.45	4.99	112.31
	7	2.458	4.20	14.94	378.82	5.30	71.48
	10	2.459	4.17	14.91	-	-	-
155	العينة المرجعية	2.460	4.13	14.87	1587.07	2.93	541.66
	1	2.461	4.09	14.84	1288.56	3.18	405.21
	2	2.461	4.09	14.84	1039.91	3.66	284.12
	3	2.459	4.17	14.91	810.37	4.17	194.33
	5	2.460	4.13	14.87	618.71	4.87	127.04
	7	2.460	4.13	14.87	388.26	5.08	76.43
	10	2.460	4.13	14.87	-	-	-

جدول رقم (4-2) نتائج اختبار الخواص الميكانيكية للخليطة البيتومينية التدرج الحبي الثاني بتأثير عدد دورات التجمد والذوبان

درجة حرارة الرص °C	عدد دورات التجمد والذوبان	الوزن الحجمي g/cm^3	نسبة الفراغات الهوائية "%A.V"	نسبة الفراغات المينرالية "%V.M.A"	قيم ثبات مارشال "Kg"	قيم الانسياب "mm"	القساوة = ثبات مارشال/الانسياب "Kg/mm"
115	العينة المرجعية	2.450	4.70	15.16	1356.32	3.39	400.19
	1	2.449	4.74	15.19	974.51	3.79	257.12
	2	2.452	4.63	15.09	689.78	4.20	164.23
	3	2.450	4.70	15.16	581.10	4.86	119.56
	5	2.449	4.74	15.19	459.42	5.19	88.52
	7	2.453	4.59	15.05	251.91	5.99	42.05
	10	2.450	4.70	15.16	-	-	-
135	العينة المرجعية	2.464	4.16	14.68	1457.92	3.29	443.13
	1	2.461	4.29	14.78	1154.35	3.51	328.87
	2	2.461	4.29	14.78	806.62	4.09	197.21
	3	2.463	4.20	14.71	643.83	4.80	134.13
	5	2.464	4.16	14.68	539.27	5.10	105.74
	7	2.464	4.16	14.68	309.45	5.83	53.08
	10	2.462	4.24	14.75	-	-	-
155	العينة المرجعية	2.465	4.12	14.64	1546.90	2.98	519.02
	1	2.466	4.08	14.60	1209.49	3.39	356.78
	2	2.465	4.12	14.64	964.37	4.03	239.30
	3	2.463	4.20	14.71	773.17	4.53	170.51
	5	2.464	4.16	14.68	570.65	4.94	115.90
	7	2.464	4.16	14.68	347.34	5.36	64.80
	10	2.464	4.16	14.68	-	-	-

جدول رقم (4-3) نتائج اختبار الخواص الميكانيكية للخليطة البيتومينية التدرج الحبي الثالث بتأثير عدد دورات التجمد والذوبان

درجة حرارة الرص °C	عدد دورات التجمد والذوبان	الوزن الحجمي g/cm^3	نسبة الفراغات الهوائية "%A.V"	نسبة الفراغات المينرالية "%V.M.A"	قيم ثبات مارشال "Kg"	قيم الانسياب "mm"	القساوة = ثبات مارشال/الانسياب "Kg/mm"
115	العينة المرجعية	2.446	4.63	15.10	1316.28	3.61	364.62
	1	2.446	4.63	15.10	940.18	4.04	232.71
	2	2.448	4.56	15.04	523.78	4.80	109.12
	3	2.449	4.52	15.03	399.05	5.96	66.95
	5	2.446	4.63	15.10	-	-	-
	7	2.445	4.67	15.14	-	-	-
	10	2.445	4.67	15.14	-	-	-
135	العينة المرجعية	2.453	4.36	14.86	1408.33	3.47	405.85
	1	2.454	4.32	14.83	1030.93	3.85	267.77
	2	2.455	4.28	14.79	771.55	4.17	185.02
	3	2.451	4.41	14.93	618.57	4.87	127.02
	5	2.453	4.36	14.86	402.7	5.39	74.71
	7	2.452	4.40	14.89	279.35	6.11	45.72
	10	2.453	4.36	14.86	-	-	-
155	العينة المرجعية	2.457	4.21	14.72	1503.37	3.13	480.30
	1	2.455	4.28	14.79	1111.70	3.48	319.45
	2	2.456	4.24	14.76	812.33	4.08	199.10
	3	2.454	4.24	14.76	682.75	4.78	142.83
	5	2.457	4.21	14.72	497.06	4.55	109.24
	7	2.455	4.28	14.79	307.6	5.57	55.22
	10	2.456	4.24	14.76	-	-	-

عدد العينات التي تم اِخْتُبِرَتْ وفقاً لزمن مدة التجمد لكل تدرج حبي هو (15) عينة لكل درجة حرارة رص، أي بمجموع (45) عينة لكل تدرج حبي والجداول أرقام (4-4)، (4-5)، (4-6) تبين نتائج هذه الاختبارات.

4-2-2-2- بتأثير مدة التجمد وعلى أن يتم نقع العينات في حمام مائي بدرجة حرارة (20)C° مدة 24 ساعة قبل اختبار بطريقة مارشال مباشرة.

إن عدد العينات المختبرة هنا هو العدد نفسه المشار إليه أعلاه. إذْ تم تغيير زمن النقع من (1/2) ساعة إلى (24) ساعة مع المحافظة على درجة حرارة التجمد

والفترات الزمنية للتجمد نفسها. ومن ثَمَّ فإن مجموع العينات لكل تدرج هو (45) عينة والجداول ذات الأرقام (4-7)، (4-8)، (4-9) تبين نتائج الاختبارات.

جدول رقم (4-4) نتائج اختبار الخواص الميكانيكية للخليطة البيتومينية التدرج الحبي الأول بتأثير مدة التجمد مع نقع العينات بحمام مائي بدرجة حرارة 60 C° مدة 30 دقيقة قبل اختبارها بطريقة مارشال

درجة حرارة الرص °C	عدد دورات التجمد والذوبان	الوزن الحجمي g/cm^3	نسبة الفراغات الهوائية "%A.V"	نسبة الفراغات الميترالية "%V.M.A"	قيم ثبات مارشال "Kg"	قيم الانسياب "mm"	القساوة = ثبات مارشال/الانسياب "Kg/mm"
115	العينة المرجعية	2.451	4.48	15.18	1427.33	3.21	444.65
	6	2.449	4.56	15.25	1362.41	3.43	397.20
	12	2.450	4.52	15.20	1288.53	3.49	369.21
	24	2.450	4.52	15.20	1204.42	3.77	319.47
	48	2.451	4.48	15.18	1162.04	3.98	291.97
	100	2.449	4.56	15.25	1065.44	4.37	243.81
135	العينة المرجعية	2.459	4.17	14.91	1511.75	3.06	494.04
	6	2.460	4.13	14.87	1480.40	3.22	459.75
	12	2.460	4.13	14.87	1402.20	3.39	413.63
	24	2.458	4.20	14.94	1366.14	3.59	380.54
	48	2.458	4.20	147.94	1305.05	3.90	334.63
	100	2.458	4.20	14.94	1242.53	4.02	309.09
155	العينة المرجعية	2.460	4.13	14.87	1587.07	2.93	541.66
	6	2.461	4.09	14.84	1496.14	3.07	487.34
	12	2.459	4.17	14.91	1460.82	3.33	438.68
	24	2.459	4.17	14.91	1399.64	3.52	397.63
	48	2.460	4.13	14.87	1322.45	3.76	351.72
	100	2.461	4.09	14.84	1288.08	3.89	331.13

جدول رقم (4–5) نتائج اختبار الخواص الميكانيكية للخليطة البيتومينية التدرج الحبي الثاني بتأثير مدة التجمد مع نقع العينات بحمام مائي بدرجة حرارة 60 C° مدة 30 دقيقة قبل اختبارها بطريقة مارشال.

درجة حرارة الرص °C	عدد دورات التجمد والذوبان	الوزن الحجمي g/cm^3	نسبة الفراغات الهوائية "%A.V"	نسبة الفراغات المينرالية "%V.M.A"	قيم ثبات مارشال "Kg"	قيم الانسياب "mm"	القساوة = ثبات مارشال/الانسياب "Kg/mm"
115	العينة المرجعية	2.450	4.70	15.16	1356.32	3.39	400.19
	6	2.449	4.74	15.19	1255.14	3.50	358.61
	12	2.449	4.74	15.14	1200.86	3.67	327.20
	24	2.450	4.70	15.16	1141.66	3.89	293.48
	48	2.450	4.70	15.16	1096.53	4.07	269.41
	100	2.452	4.63	15.09	1030.42	4.72	218.30
135	العينة المرجعية	2.464	4.16	14.68	1457.92	3.29	443.13
	6	2.461	4.29	14.78	1408.18	3.47	405.81
	12	2.463	4.20	14.71	1366.22	3.63	376.36
	24	2.463	4.20	14.71	1298.05	3.85	337.15
	48	2.464	4.16	14.68	1214.60	4.01	302.89
	100	2.461	4.29	14.78	1187.13	4.18	284.00
155	العينة المرجعية	2.465	4.12	14.64	1546.90	2.98	519.02
	6	2.465	4.12	14.64	1452.14	3.16	459.53
	12	2.463	4.20	14.71	1400.06	3.38	414.39
	24	2.464	4.16	14.68	1360.68	3.79	359.01
	48	2.463	4.20	14.71	1280.55	3.87	330.89
	100	2.464	4.16	14.68	1198.18	4.00	299.54

جدول رقم (4-6) نتائج اختبار الخواص الميكانيكية للخليطة البيتومينية التدرج الحبي الثالث بتأثير مدة التجمد مع نقع العينات بحمام مائي بدرجة حرارة 60 C° مدة 30 دقيقة قبل اختبارها بطريقة مارشال

درجة حرارة الرص °C	عدد دورات التجمد والذوبان	الوزن الحجمي g/cm^3	نسبة الفراغات الهوائية "%A.V"	نسبة الفراغات الميترالية "%V.M.A"	قيم ثبات مارشال "Kg"	قيم الانسياب "mm"	القساوة = ثبات مارشال/الانسياب "Kg/mm"
115	العينة المرجعية	2.446	4.63	15.10	1316.28	3.61	364.62
	6	2.445	4.67	15.14	1208.06	3.67	329.17
	12	2.445	4.67	15.14	1138.52	3.88	293.43
	24	2.448	4.56	15.04	1082.66	4.04	267.98
	48	2.446	4.63	15.10	1005.12	4.71	213.40
	100	2.449	4.52	15.03	960.64	5.26	182.63
135	العينة المرجعية	2.453	4.36	14.86	1408.33	3.47	405.85
	6	2.451	4.41	14.93	1306.77	3.63	359.99
	12	2.453	4.41	14.93	1244.40	3.73	333.61
	24	2.453	4.36	14.86	1155.07	3.95	292.42
	48	2.452	4.40	14.89	1088.13	4.1	265.39
	100	2.454	4.32	14.83	1005.55	4.61	218.12
155	العينة المرجعية	2.457	4.21	14.72	1503.37	3.13	480.30
	6	2.456	4.24	14.76	1403.03	3.23	432.37
	12	2.456	4.24	14.76	1250.44	3.44	363.50
	24	2.455	4.28	14.79	1206.17	3.83	314.92
	48	2.455	4.28	14.79	1160.57	3.91	296.82
	100	2.455	4.28	14.79	1089.14	4.13	263.71

جدول رقم (4–7) نتائج اختبار الخواص الميكانيكية للخليطة البيتومينية التدرج الحبي الأول بتأثير مدة التجمد مع نقع العينات بحمام مائي بدرجة حرارة 60 C° مدة 24 ساعة قبل اختبارها بطريقة مارشال

درجة حرارة الرص °C	عدد دورات التجمد والذوبان	الوزن الحجمي g/cm^3	نسبة الفراغات الهوائية "%A.V"	نسبة الفراغات المينرالية "%V.M.A"	قيم ثبات مارشال "Kg"	قيم الانسياب "mm"	القساوة = ثبات مارشال/الانسياب "Kg/mm"
115	العينة المرجعية	2.451	4.48	15.18	1427.33	3.21	444.65
	6	2.450	4.52	15.20	1305.40	3.33	392.01
	12	2.451	4.48	15.18	1236.27	3.49	354.23
	24	2.450	4.52	15.20	1111.01	3.77	294.72
	48	2.449	4.56	15.25	1005.24	3.84	261.78
	100	2.450	4.52	15.20	942.88	4.42	213.30
135	العينة المرجعية	2.459	4.17	14.91	1511.75	3.06	494.03
	6	2.458	4.20	14.94	1411.55	3.13	450.97
	12	2.458	4.20	14.94	1350.62	3.23	418.14
	24	2.459	4.17	14.91	1204.65	3.39	355.35
	48	2.459	4.17	14.91	1084.11	3.66	296.20
	100	2.458	4.20	15.94	980.62	3.95	248.25
155	العينة المرجعية	2.460	4.13	14.87	1587.07	2.93	541.66
	6	2.459	4.17	14.91	1460.08	3.08	474.05
	12	2.459	4.17	14.91	1382.36	3.16	437.45
	24	2.461	4.09	14.84	1288.56	3.18	405.20
	48	2.461	4.09	14.84	1201.44	3.56	337.48
	100	2.460	4.13	14.87	1082.56	3.74	289.45

جدول رقم (4-8) نتائج اختبار الخواص الميكانيكية للخليطة البيتومينية التدرج الحبي الثاني بتأثير مدة التجمد مع نقع العينات بحمام مائي بدرجة حرارة 60 C° مدة 24 ساعة قبل اختبارها بطريقة مارشال

درجة حرارة الرص °C	عدد دورات التجمد والذوبان	الوزن الحجمي g/cm^3	نسبة الفراغات الهوائية "%A.V"	نسبة الفراغات المينرالية "%V.M.A"	قيم ثبات مارشال "Kg"	قيم الانسياب "mm"	القساوة = ثبات مارشال/الانسياب "Kg/mm"
115	العينة المرجعية	2.450	4.70	15.16	1356.32	3.39	400.19
	6	2.450	4.70	15.16	1205.05	3.59	335.66
	12	2.449	4.74	15.19	1088.44	3.62	300.67
	24	2.449	4.74	15.19	974.51	3.79	257.12
	48	2.449	4.74	15.19	806.42	4.20	192.00
	100	2.450	4.70	15.16	778.12	4.52	172.15
135	العينة المرجعية	2.464	4.16	14.68	1457.92	3.29	443.13
	6	2.463	4.20	14.71	1366.18	3.44	397.12
	12	2.461	4.29	14.78	1263.42	3.48	363.05
	24	2.461	4.29	14.78	1154.35	3.51	328.87
	48	2.463	4.20	14.71	1092.72	3.99	273.86
	100	2.463	4.20	14.71	960.42	4.00	240.10
155	العينة المرجعية	2.465	4.12	14.64	1546.90	2.98	519.02
	6	2.465	4.12	14.64	1405.22	3.15	446.11
	12	2.463	4.20	14.71	1352.06	3.27	413.47
	24	2.464	4.16	14.68	1209.49	3.39	356.78
	48	2.464	4.16	14.68	1162.44	3.75	309.98
	100	2.463	4.20	14.71	1053.04	3.91	269.31

جدول رقم (4–9) نتائج اختبار الخواص الميكانيكية للخليطة البيتومينية التدرج الحبي الثالث بتأثير مدة التجمد مع نقع العينات بحمام مائي بدرجة حرارة 60 C° مدة 24 ساعة قبل اختبارها بطريقة مارشال

درجة حرارة الرص °C	عدد دورات التجمد والذوبان	الوزن الحجمي g/cm^3	نسبة الفراغات الهوائية "%A.V"	نسبة الفراغات المينرالية "%V.M.A"	قيم ثبات مارشال "Kg"	قيم الانسياب "mm"	القساوة = ثبات مارشال/الانسياب "Kg/mm"
115	العينة المرجعية	2.446	4.63	15.10	1316.28	3.61	364.62
	6	2.448	4.56	15.04	1186.40	3.67	323.26
	12	2.446	4.63	15.10	1055.40	3.88	272.01
	24	2.446	4.63	15.10	940.18	4.04	232.71
	48	2.445	4.67	15.14	820.15	4.71	174.12
	100	2.445	4.67	15.14	751.26	5.27	142.55
135	العينة المرجعية	2.453	4.36	14.86	1408.33	3.47	405.85
	6	2.452	4.40	14.89	1288.68	3.63	355.00
	12	2.451	4.41	14.93	1184.68	3.73	317.60
	24	2.451	4.41	14.93	1030.93	3.85	267.77
	48	2.454	4.32	14.83	966.21	4.1	235.66
	100	2.451	4.41	14.93	813.77	4.61	176.52
155	العينة المرجعية	2.457	4.21	14.72	1503.37	3.13	480.30
	6	2.456	4.24	14.76	1336.25	3.23	413.69
	12	2.455	4.28	14.79	1263.71	3.44	367.35
	24	2.455	4.28	14.79	1111.70	3.58	310.53
	48	2.456	4.24	14.76	1004.22	3.91	256.83
	100	2.455	4.28	14.79	890.42	4.13	215.59

5- تحليل النتائج:

5-1- تأثير درجة حرارة الرص في الوزن الحجمي لعينات الخليط البيتوميني:

يبين الشكل رقم (5-1) العلاقة بين درجة حرارة الرص والوزن الحجمي للخليط البيتوميني. ونلاحظ أنَّ الوزن الحجمي يزداد بازدياد درجة حرارة الرص وهذه العلاقة صحيحة لجميع الخلائط البيتومينية على اختلاف تدرجاتها الحبية والمختبرة حسب تجربة مارشال.

إن ازدياد قيمة الوزن الحجمي للخليط البيتوميني بازدياد درجة حرارة الرص لهذا الخليط عائد إلى أنه بازدياد درجة حرارة الرص تقل اللزوجة مما يسهل الرص وتقارب حبيبات البحص من بعضها بعضاً.

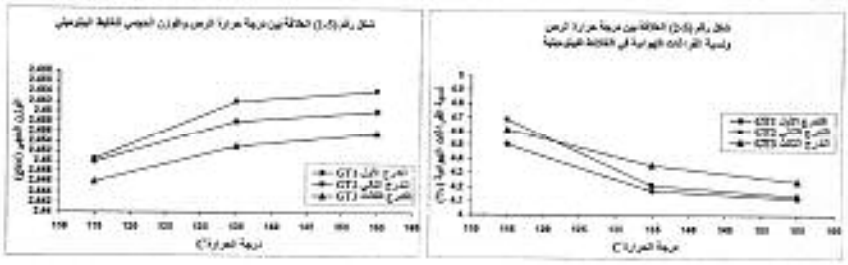
5-2- تأثير درجة حرارة الرص في نسبة الفراغات الهوائية للخليط البيتوميني:

يبين الشكل (5-2) العلاقة بين درجة حرارة الرص ونسبة الفراغات الهوائية للخليط البيتوميني. نلاحظ أنَّ نسبة الفراغات الهوائية تقل بازدياد درجة حرارة الرص. وهذه العلاقة صحيحة لجميع الخلائط البيتومينية على اختلاف تدرجاتها الحبية والمختبرة حسب تجربة مارشال.

إن الانخفاض في نسبة الفراغات الهوائية بازدياد درجة حرارة الرص عائد إلى أنه بازدياد درجة الحرارة تقل لزوجة الإسفلت ومن ثَمَّ تزداد قابلية التغليف بالبيتومين لحبيبات البحص مما يجعلها سهلة التشغيل ومن ثَمَّ فإن رصها وحركتها المتداخلة تصبح أمراً سهلاً ويسيراً فتتقارب جزيئات البحص من بعضها بعضاً مما يقلل من نسبة الفراغات الهوائية.

كما ونلاحظ من الشكل (5-2) أنَّ هناك فروقاً في نسبة الفراغات الهوائية للخلائط البيتومينية وللتدرجات الحبية الثلاثة المختلفة والمستخدمة في هذه الدراسة، وهذا الاختلاف عائد إلى اختلافٍ في النسب الحجمية للبحص المكون للخلطة. كما نلاحظ أنّه وضمن الخلطات البيتومينية ذات التدرج الحبي الواحد والمتجانس في المكونات

والنسب، أنَّ هناك اختلافاً ملحوظاً في نسبة الفراغات الهوائية عند درجة حرارة الرص الـ (115) ^{o}C عما هو عند درجة حرارة الرص الـ (135) ^{o}C. فيما نجد أنَّ هذا الفرق لم يعد ملحوظاً عند درجة حرارة الرص الـ (155) ^{o}C عما هو في درجة حرارة الرص الـ (135) ^{o}C.

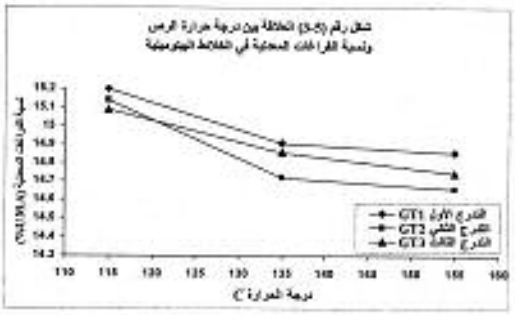


3-5- تأثير درجة حرارة الرص في نسبة الفراغات المينرالية للخليط البيتومينـي:

يظهر الشكل رقم (3-5) العلاقة بين تأثير تغير درجة حرارة الرص ونسبة الفراغات المينرالية للخليط البيتومينـي. ومن الشكل نجد أنَّ نسبة الفراغات المينرالية تقل بازدياد درجة حرارة الرص وهذا عائد نفسها للأسباب الوارد ذكرها في العلاقة بين الفراغات الهوائية وبتغير درجة حرارة الرص.

والعلاقة المشار إليها في إطار هذا البحث هي علاقة صالحة للخلائط البيتومينية الثلاث المستخدمة في هذه الدراسة على اختلاف تدرجاتها الحبية.

كما أننا نلاحظ من الشكل رقم (3-5) أنَّ الفرق الكبير نسبياً في الفراغات المينرالية للخلائط البيتومينية للتدرجات الحبية الثلاثة المستخدمة في هذه الدراسة يكون بين درجة حرارة (115) ^{o}C و(135) ^{o}C، فيما نلاحظ أنَّ هذا الفرق يكون بحدود متدنية جداً بين حرارة (135 و155) ^{o}C.



5-4- تأثير درجة حرارة الرص في قيم ثبات مارشال بتأثير عدد دورات التجمد والذوبان للخلطات البيتومينية:

الأشكال أرقام (5-4) و(5-5) و(5-6) و(5-7) و(5-8) و(5-9) تبين العلاقة بين تأثير اختلاف درجة حرارة الرص للخليط البيتوميني بتدرجاته الحبية الثلاثة وقيم ثبات مارشال وبتأثير عدد دورات التجمد والذوبان.

وقد اِخْتُبِرَتِ العينات المختلفة التدرجات الحبية على (دورة واحدة، دورتين، ثلاث دورات، خمس دورات، سبع دورات وعشر دورات).

نلاحظ من هذه الأشكال أنَّ قيم ثبات مارشال تزداد بازدياد درجة حرارة الرص وهذه العلاقة صحيحة لجميع الخلطات البيتومينية المكونة من التدرجات الحبية المختلفة. إن ازدياد قيم ثبات مارشال بازدياد درجة حرارة الرص عائد إلى ازدياد شدة التصاق جزيئات البحص ببعضها بعضاً نتيجة لانخفاض اللزوجة للبيتومين، ومن ثَمَّ الحصول على خلط سهل وحركة جيدة لجزيئات البحص وتداخلها بشكل جيد فيما بينها في أثناء عملية الرص.

كما نلاحظ أنَّ قيم ثبات مارشال وللخلائط البيتومينية الثلاث تزداد بشكل ملحوظ عند درجة حرارة الرص (^oC +135) عما هي عند درجة حرارة الرص (^oC 115). في حين أنَّ هذه الزيادة ليست بالقيم الملحوظة نفسها عما هي عند حرارة (^oC 155).

كما نلاحظ من هذه الأشكال أنَّ قيم ثبات مارشال تنخفض بزيادة عدد دورات التجمد والذوبان.

والمعادلات أرقام (1-4) و (2-4) و (3-4) تمثل العلاقة بين قيم ثبات مارشال لكل من التدرج الحبي الأول والثاني والثالث وعدد دورات التجمد والذوبان و بدرجة حرارة الرص للعينات (155) ^oC.

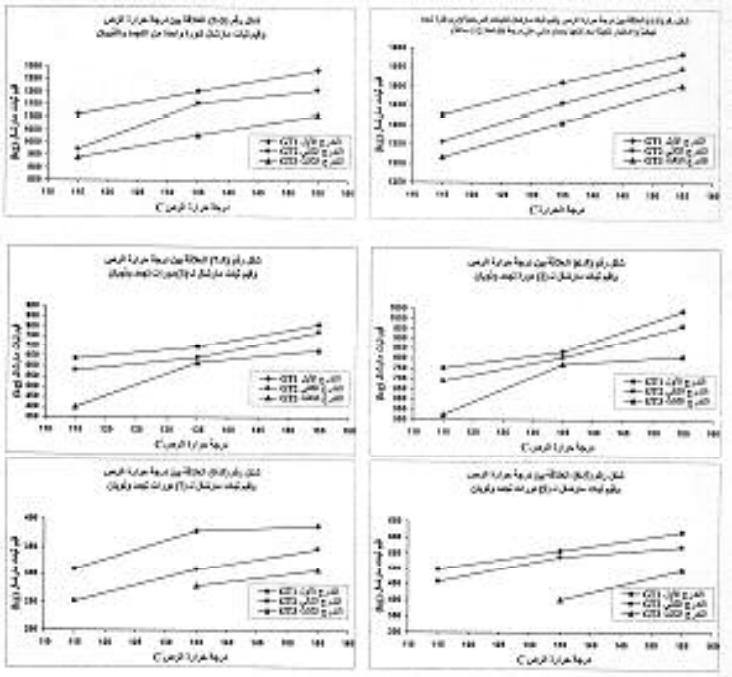
$$Y(X) = 1555.9859826*0.8217122^x \quad (4-1)$$
$$Y(X) = 1497.5101925*0.8138178^x \quad (4-2)$$
$$Y(X) = 1380.0044496*0.8058071^x \quad (4-3)$$

حيث:

Y– القيمة المتوقعة لثبات مارشال (Kg).

X– عدد دورات التجمد والذوبان.

كما لوحظ أنَّ أياً من الخلائط البيتومينية للتدرجات الحبية الثلاثة لم يسجل أية قيم لثبات مارشال عند (10) دورات تجمد وذوبان وفي أي درجة حرارة رص، وذلك بسبب تلف العينات وتفتتها وخرابها في أثناء دورات التجمد والذوبان. كما تبين أنَّ التدرج الحبي الثالث والمائل إلى الخشونة النسبية وفي درجة حرارة دمك (115) ^oC لم يسجل أية قيم لثبات مارشال على (5) دورات من التجمد والذوبان وهذا بسبب الخشونة في التدرج الحبي ومن ثَمَّ ازدياد الفراغات الهوائية مما أدى وفي أثناء تسرب المياه إلى داخل هذه الفراغات. وفي أثناء التجمد وازدياد حجم المياه (مع تجمد البيتومين المحيط بجزيئات البحص وفقدانه لخاصية المرونة بتأثير التجمد وبحيث أصبح البيتومين سريع التكسر) وبتجمد المياه المحصورة بالفراغات الهوائية وازدياد حجمها نتيجة لذلك ومع ضعف خاصية المرونة واللصق للبيتومين بدرجة التجمد فإن الإجهادات والقوة الداخلية هذه أدت إلى تشوه وخلخلة لجزيئات البحص والروابط فيما بينها ومن ثَمَّ لتفتت العينات وتكسيرها بحيث لم تعد صالحة لاختبارها بطريقة مارشال.



5-5- تأثير درجة حرارة الرص في قيم ثبات مارشال بتأثير مدة التجمد مع نقع العينات بحمام مائي بدرجة (60) ^{o}C قبل الكسر مدة (1/2) ساعة:

الأشكال أرقام (5-10) و(5-11) و(5-12) و(5-13) و(5-14) تبين العلاقة بين تأثير اختلاف درجة حرارة الرص للخليط البيتومينى بتدرجاته الحبية الثلاثة وقيم ثبات مارشال وبتأثير مدد التجمد وعلى أن تُتْرَكَ العينات مدة (24) ساعة بدرجة حرارة الغرفة الطبيعية بعد إخراجها من المجمدة ومن ثم نقع العينات بحمام مائي بدرجة حرارة (60) ^{o}C مدة (1/2) ساعة مباشرة قبل اختبارها بطريقة مارشال.

ومن الأشكال نلاحظ أنَّ قيم ثبات مارشال تزداد بازدياد درجة حرارة الرص ولجميع الخلطات البيتومينية وللتدرجات الحبية الثلاثة، وإن ازدياد قيم ثبات مارشال عائد للأسباب نفسها التي سبق بيانها في أثناء دورات التجمد والذوبان.

كما لوحظ أنَّ قيم ثبات مارشال وللخلائط البيتومينية الثلاث تزداد بشكل ملحوظ عند درجة حرارة الرص (135) ^{o}C عما هي عند درجة حرارة (115) ^{o}C، في حين تصبح هذه الزيادة غير ملحوظة نسبياً عند درجة حرارة (155 ^{o}C)، نلاحظ أيضاً أنَّ قيم ثبات مارشال تنخفض بزيادة مدة التجمد. إلا أن هذا الانخفاض نسبي وقليل جداً، حيث لا يتجاوز هذا الانخفاض نسبة الـ 30% من قيم الثبات المعيارية للتدرج الحبي الثالث في حين لم يتجاوز الانخفاض نسبة الـ 25% من قيم الثبات للتدرج الحبي الأول والثاني.

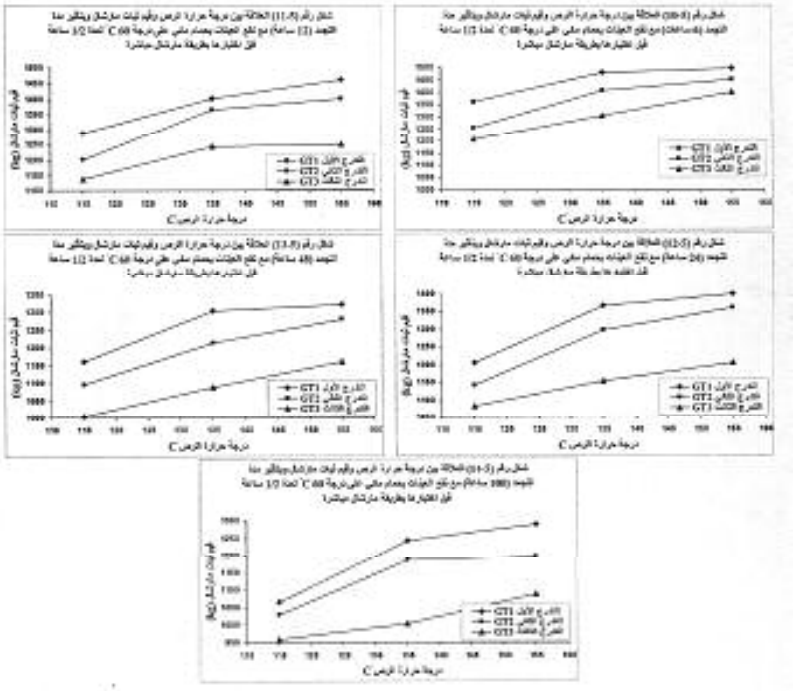
والمعادلات أرقام (5-1) و (5-2) و (5-3) تمثل العلاقة بين قيم ثبات مارشال لكل من التدرج الحبي الأول والثاني والثالث والمدة الزمنية للتجمد وبنقع العينات بحمام مائي بدرجة حرارة (60) ^{o}C مدة (30) دقيقة و بدرجة حرارة الرص للعينات (155) ^{o}C.

$$Y(X) = 1508.5652738*0.9981369\text{^}x \qquad (5\text{-}1)$$
$$Y(X) = 1470.3040416*0.9977345\text{^}x \qquad (5\text{-}2)$$
$$Y(X) = 1374.620871*0.9972814\text{^}x \qquad (5\text{-}3)$$

حيث:

Y– القيمة المتوقعة لثبات مارشال (Kg).

X– المدة الزمنية للتجمد (بالساعة).



5-6- تأثير درجة حرارة الرص في قيم ثبات مارشال بتأثير مدة التجمد مع نقع العينات بحمام مائي بدرجة (60) ^{o}C قبل الكسر مدة (24) ساعة

الأشكال أرقام (5-15) و(5-16) و(5-17) و(5-18) و(5-19) تبين العلاقة بين تأثير اختلاف درجة حرارة الرص للخليط البيتومين بتدرجاته الحبية الثلاثة وقيم ثبات مارشال وبتأثير مدد التجمد حيث نُقِعَت العينات مباشرة بحمام مائي مدة (24) ساعة بدرجة حرارة (60) ^{o}C بعد إخراجها من المجمدة وقبل اختبارها مباشرة بطريقة مارشال.

نلاحظ أنَّ قيم الثبات تزداد بازدياد درجة حرارة الرص ولجميع الخلطات البيتومينية وللتدرجات الحبية الثلاثة و للأسباب نفسها التي سبق ذكرها.

كما لوحظ أنَّ قيم ثبات مارشال وللخلائط البيتومينية الثلاث تزداد بشكل ملحوظ عند درجة حرارة الرص (135) ^{o}C عما هي عند درجة حرارة (115) ^{o}C، في حين تصبح

هذه الزيادة غير ملحوظة نسبياً عند درجة حرارة (155) ^oC. كما لوحظ أنَّ قيم ثبات مارشال تنقص بزيادة مدة التجمد.

والمعادلات أرقام (6-1) ، (6-2) و (6-3) تمثل العلاقة بين قيم ثبات مارشال لكل من التدرج الحبي الأول والثاني والثالث والمدة الزمنية للتجمد وبنقع العينات بحمام مائي بدرجة حرارة (60) ^oC مدة (24) ساعة و بدرجة حرارة الرص للعينات (155) ^oC.

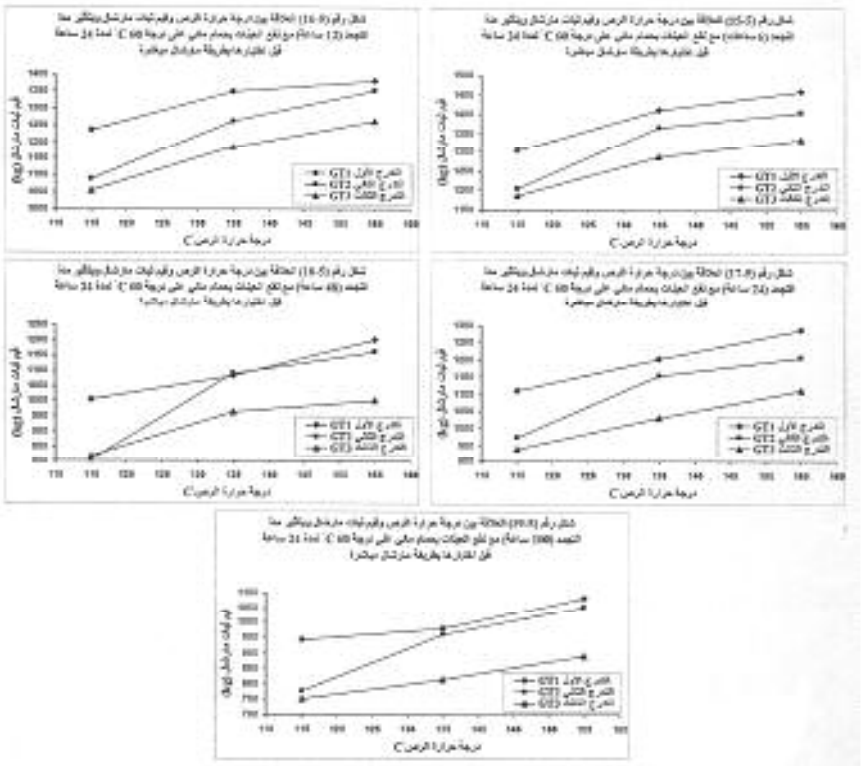
$$Y(X) = 1475.5764099*0.9965652\text{^}x \quad (6\text{-}1)$$
$$Y(X) = 1422.9646*0.9966059\text{^}x \quad (6\text{-}2)$$
$$Y(X) = 1357.2590638*0.995237\text{^}x \quad (6\text{-}3)$$

حيث:

Y– القيمة المتوقعة لثبات مارشال (Kg).

X– المدة الزمنية للتجمد (بالساعة).

وبمقارنة قيم ثبات مارشال مع مدة التجمد ودرجة حرارة الرص نفسها وبتغيير مدة نقع العينات بالحمام المائي بدرجة حرارة (60) ^oC من مدة (1/2) ساعة إلى (24) ساعة نجد أنَّ قيم الثبات عند نقع العينات مدة الـ (24) ساعة تقل عنها (وبشكل ملحوظ نسبياً) عن فترة (1/2) ساعة. وهذا يفسر بأنَّ البيتومين يفقد جزءاً من خواصه ومرونته بتأثير درجة التجمد والفترة الزمنية إلا أنه يعوض هذه الخسارة عند تركه في درجة حرارة الغرفة الطبيعية مدة (24) ساعة حيث يسترجع خواصه من جديد مع فقدان نسبي محدود جداً لهذه الخواص وعند نقعه مدة (1/2) ساعة فإن النتائج أظهرت قيماً مرتفعة لقيم ثبات مارشال مقارنة عما هي القيم عند نقع العينات بحمام مائي بدرجة (60 ^oC) مدة (24) ساعة.



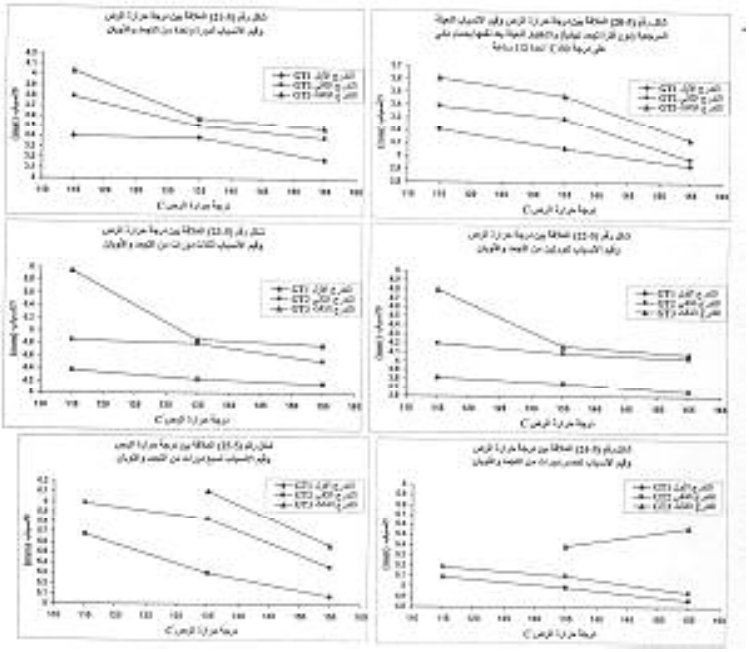
5-7- تأثير درجة حرارة الرص في قيم الانسياب:

5-7-1- تأثير درجة حرارة الرص في قيم الانسياب وبتأثير عدد دورات التجمد والذوبان:

الأشكال أرقام (5-20) و(5-21) و(5-22) و(5-23) و(5-24) و(5-25) تبين العلاقة بين درجة حرارة الرص وقيم الانسياب للعينات المختبرة وبتأثير عدد دورات التجمد والذوبان. نلاحظ من الأشكال أنَّ قيم الانسياب تنخفض بازدياد درجة حرارة الرص ولجميع العينات من مختلف التدرجات الحبية المستخدمة في هذه الدراسة. إذْ إنَّ ازدياد درجة حرارة الرص يؤدي إلى زيادة قابلية التشغيل للبيتومين الذي يؤدي إلى زيادة

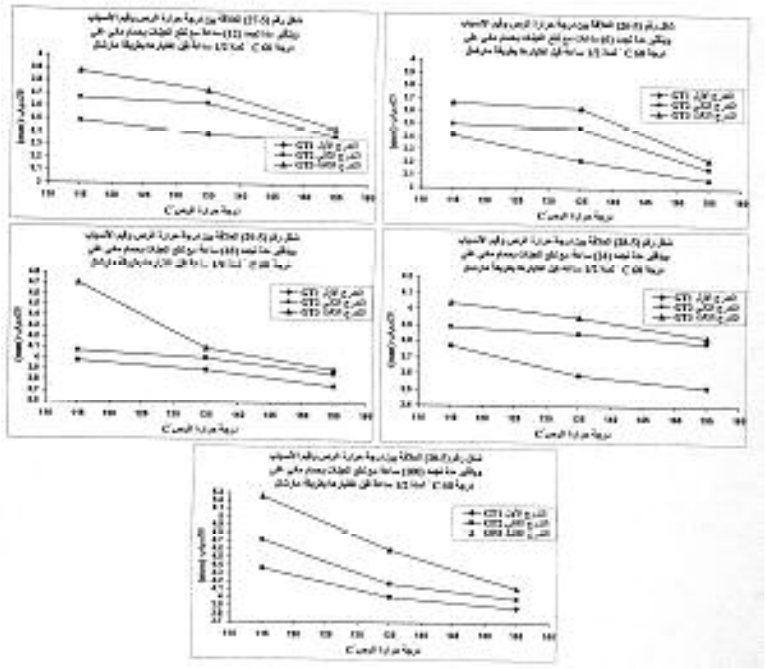
تغليف البيتومين لجزيئات البحص ومن ثَمَّ الحصول على درجة رص أعلى وتقليل الفراغات الهوائية الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض قيم الانسياب بسبب تداخل جزيئات البحص فيما بينها مشكلة كتلة واحدة بمسامية محدودة جداً.

كما نلاحظ أنَّ قيم الانسياب وللتدرج الواحد تزداد بشكل ملحوظ بازدياد عدد دورات التجمد والذوبان، وهذا عائد إلى أن عملية التجمد والذوبان وبتكرار دوراتها تؤدي إلى تشوه وخلخلة في جزيئات العينة نتيجة لتجمد جزيئات الماء داخل العينة ومن ثَمَّ خلق إجهادات داخلية تؤدي إلى تكسير جزء من الروابط البيتومينية ومن ثَمَّ ضعف تماسك جزيئات الحصويات وسهولة انسيابها الذي انعكس على القيم العالية نسبياً. كما نلاحظ أنَّ التدرج الحبي الثالث والمائل إلى الخشونة كان أكثر التدرجات الحبية تأثراً بعدد دورات التجمد الأمر الذي انعكس على قيم الانسياب العالية.



5-7-2- تأثير درجة حرارة الرص في قيم الانسياب بتأثير مدة التجمد مع اختبار العينات بعد نقعها بحمام مائي بدرجة (60) ^{o}C مدة (1/2) ساعة قبل اختبارها بطريقة مارشال مباشرة.

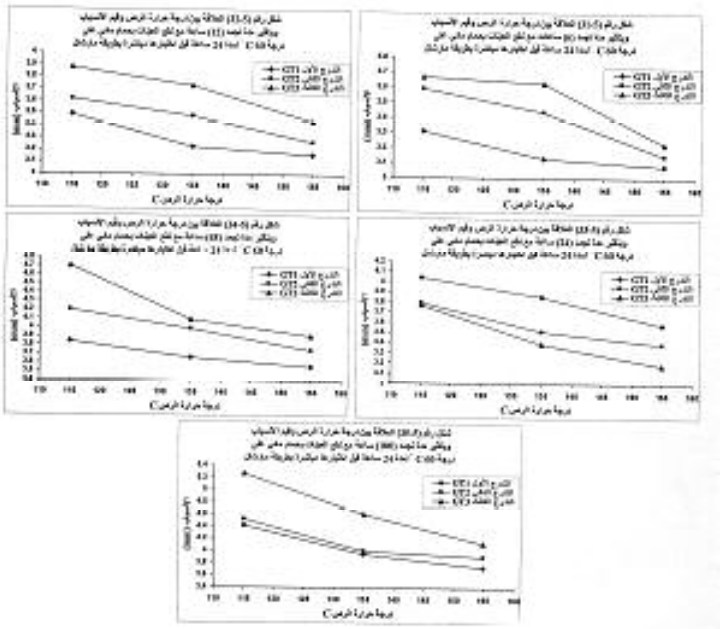
الأشكال أرقام (5-26) و(5-27) و(5-28) و(5-29) و(5-30) تبين العلاقة بين درجة حرارة الرص وقيم الانسياب للخليط البيتومينى بتدرجاته الحبية المختلفة والمستخدمة بهذه الدراسة وبتأثير مدة التجمد المختلفة مع نقع العينات بحمام مائي بدرجة (60) ^{o}C مدة (1/2) ساعة قبل اختبارها بطريقة مارشال، وبعد حفظ العينات بدرجة حرارة الغرفة الطبيعية مدة (24) ساعة نلاحظ من هذه الأشكال أنَّ قيم الانسياب تنخفض بزيادة درجة حرارة الرص ولجميع العينات من مختلف التدرجات الحبية المستخدمة وذلك للأسباب السابق ذكرها. كما نلاحظ أنَّ قيم الانسياب وللتدرج الحبي الواحد تزداد بازدياد مدة التجمد.



5-7-3- بتأثير مدة التجمد واختبار العينات بعد نقعها بحمام مائي بدرجة (60) ^{o}C مدة (24) ساعة قبل الاختبار بطريقة مارشال مباشرة:

الأشكال أرقام (5-31) و(5-32) و(5-33) و(5-34) و(5-35) تبين العلاقة بين درجة حرارة الرص وقيم الانسياب للخليط البيتومينيي بتدرجاته الحبية الثلاثة المستخدمة بهذه الدراسة وبتأثير مدة التجمد وأن يتم نقع العينات قبل اختبارها مباشرة بحمام مائي بدرجة (60) ^{o}C ومدة (24) ساعة، وذلك بعد حفظ العينات بعد عملية التجمد مدة (24) ساعة في درجة حرارة الغرفة الطبيعية.

من هذه الأشكال نلاحظ أنَّ قيم الانسياب تنخفض بزيادة درجة حرارة الرص ولجميع العينات من التدرجات الحبية الثلاثة. كما نلاحظ أنَّ قيم الانسياب بهذه الطريقة تعد أعلى من قيمها وللعينات المماثلة لها مع الاختلاف في زمن النقع من (24) ساعة إلى بـ (1/2) ساعة.



5-8- تأثير درجة حرارة الرص في القساوة "Stiffness"

5-8-1- تأثير درجة حرارة الرص في القساوة وبتأثير عدد دورات التجمد والذوبان:

تعرف القساوة بأنها حاصل قسمة قيم ثبات مارشال على قيم الانسياب، والأشكال أرقام (5-36) و(5-37) و(5-38) و(5-39) و(5-40) و(5-41) تبين العلاقة بين تأثير درجة حرارة الرص والقساوة وباختلاف عدد دورات التجمد والذوبان. ومن هذه الأشكال نتبين أنَّ قيم القساوة تزداد بازدياد درجة حرارة الرص لكنها تتناقص بتأثير عدد دورات التجمد والذوبان، وهذه العلاقة صحيحة لجميع الخلطات البيتومينية بتدرجاتها الحبية الثلاثة المستخدمة في هذه الدراسة.

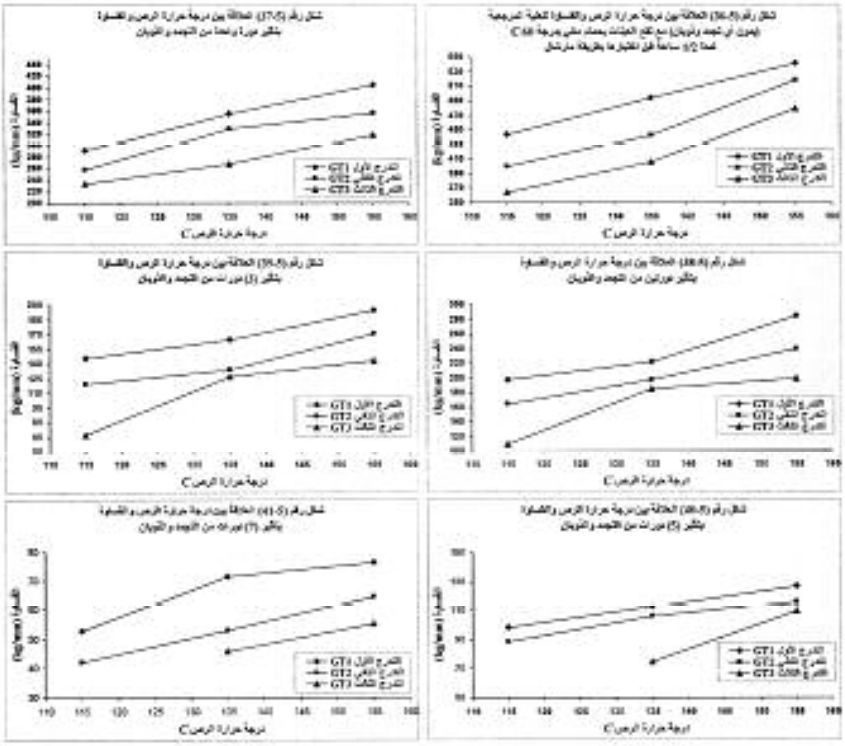
والمعادلات أرقام (8-1) و (8-2) و (8-3) تمثل العلاقة بين قيم القساوة لكل من التدرج الحبي الأول والثاني والثالث وعدد دورات التجمد والذوبان و بدرجة حرارة الرص للعينات (155) ^{o}C.

$$Y(X) = 512.2025106*0.756059^{x} \quad (8-1)$$
$$Y(X) = 465.3167585*0.749649^{x} \quad (8-2)$$
$$Y(X) = 413.7775375*0.7469916^{x} \quad (8-3)$$

حيث:

Y- القيمة المتوقعة للقساوة (Kg/mm).

X- عدد دورات التجمد والذوبان.



5-8-2- تأثير درجة حرارة الرص في القساوة وبتأثير مدة التجمد مع نقع العينات بحمام مائي بدرجة (60) °C مدة (30) دقيقة قبل اختبارها مباشرة بطريقة مارشال:

الأشكال أرقام (5-42) و(5-43) و(5-44) و(5-45) و(5-46) تبين العلاقة بين تأثير درجة حرارة الرص والقساوة بتأثير مدد التجمد مع نقع هذه العينات وللتدرجات الحبية الثلاثة المستخدمة في هذه الدراسة في حمام مائي بدرجة (60) °C مدة (30) دقيقة قبل اختبارها مباشرة بطريقة مارشال. ومن هذه الأشكال يتبين لنا أنَّ قيم القساوة تزداد بازدياد درجة حرارة الرص لكنها تتناقص بازدياد مدة التجمد.

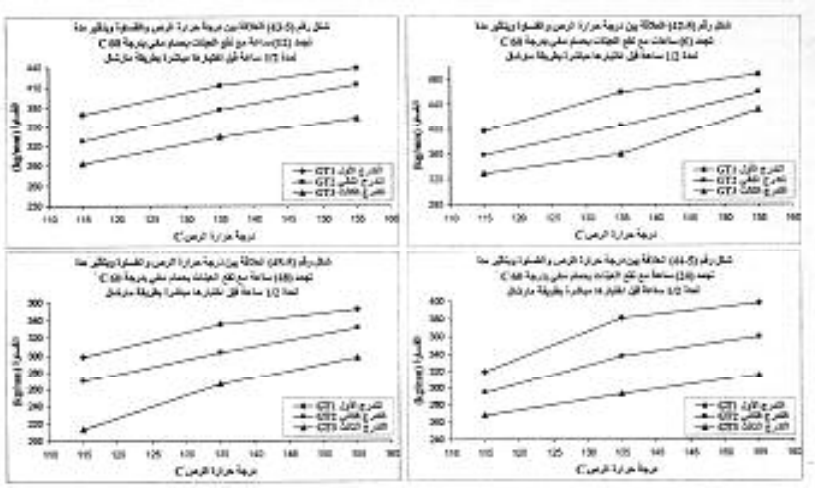
والمعادلات أرقام (4-8) و (5-8) و (6-8) تمثل العلاقة بين قيم القساوة لكل من التـــدرج الحبي الأول والثاني والثالث والمدة الزمنية للتجمد وبنقع العينات بحمام مـــائي بدرجـــة حرارة (60) ^{o}C مدة (30) دقيقة و بدرجة حرارة الرص للعينات (155) ^{o}C.

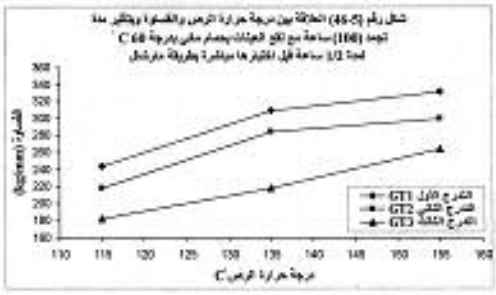
$$Y(X) = 481.9215716*0.9955444^{x} \quad (8\text{-}4)$$
$$Y(X) = 455.4716087*0.9951085^{x} \quad (8\text{-}5)$$
$$Y(X) = 414.9618042*0.9947017^{x} \quad (8\text{-}6)$$

حيث:

Y– القيمة المتوقعة للقساوة (Kg/mm).

X– المدة الزمنية للتجمد (بالساعة).





5-8-3- تأثير درجة الرص في القساوة وبتأثير مدة التجمد مع نقع العينات بحمام مائي بدرجة (60) °C مدة (24) ساعة قبل اختبارها مباشرة بطريقة مارشال

الأشكال أرقام (5-47) و(5-48) و(5-49) و(5-50) و(5-51) تبين العلاقة بين تأثير درجة حرارة الرص والقساوة بتأثير مدد التجمد مع نقع هذه العينات للتدرجات الحبية الثلاثة المستخدمة في هذه الدراسة بحمام مائي بدرجة (60) °C مدة (24) ساعة قبل اختبارها مباشرة بطريقة مارشال. ومن هذه الأشكال يتبين لنا أنَّ قيمة القساوة تزداد بازدياد درجة حرارة الرص لكنها تنخفض بزيادة مدة التجمد، كما نلاحظ أنَّ قيمة القساوة انخفضت عن مثيلاتها وبتأثير زيادة نقع العينات بالحمام المائي قبل الاختبار حسب تجربة مارشال من (30) دقيقة إلى (24) ساعة.

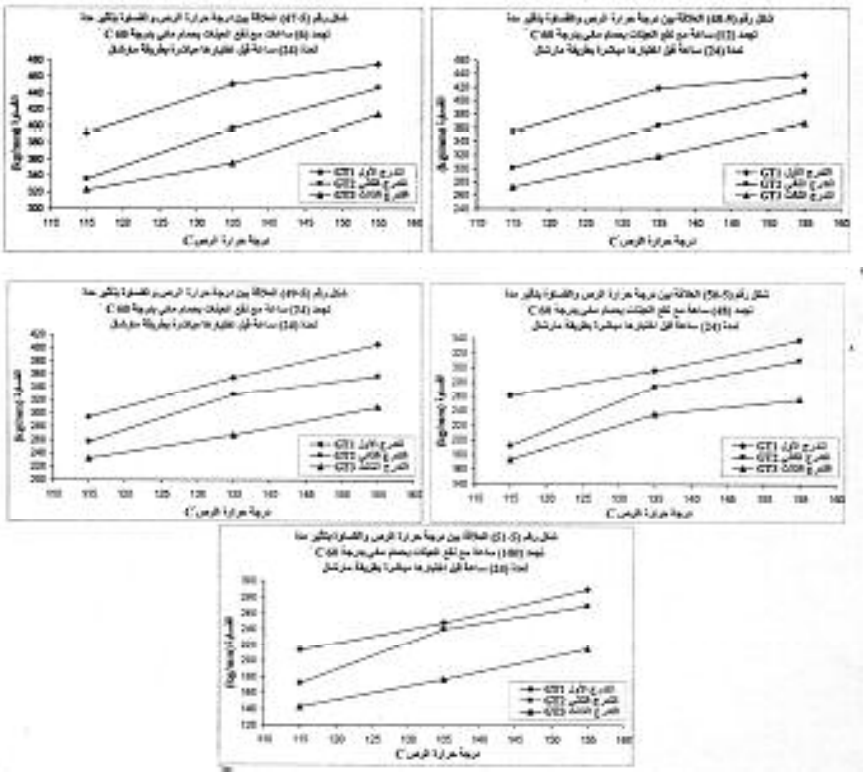
والمعادلات أرقام (7-8) ، (8-8) و (9-8) تمثل العلاقة بين قيم القساوة لكل من التدرج الحبي الأول والثاني والثالث والمدة الزمنية للتجمد وبنقع العينات بحمام مائي بدرجة حرارة (60) °C مدة (24) ساعة و بدرجة حرارة الرص للعينات (155) °C.

$$Y(X) = 486.9275785*0.9942382^{x} \qquad (8\text{-}7)$$
$$Y(X) = 454.8739877*0.9940518^{x} \qquad (8\text{-}8)$$
$$Y(X) = 415.8896294*0.9925719^{x} \qquad (8\text{-}9)$$

حيث:

Y– القيمة المتوقعة للقساوة (Kg/mm).

X– المدة الزمنية للتجمد (بالساعة).



6- تأثير الاختلاف في التدرج الحبي للحصويات ودرجة حرارة الرص في ديمومة الخلطات البيتومينية:

6-1- منحنيات الديمومة "Durability Curves":

يعرف معيار ديمومة الخلطات البيتومينية بأنّه مقدار مقاومة الخلطة البيتومينية لاستمرار التلف وظهور العيوب نتيجة لتأثير العوامل الجوية المختلفة (مياه، حرارة عالية، تجمد وذوبان). وإن القيم المرتفعة لمعيار الديمومة يشير صراحة إلى أن الخلطة البيتومينية سوف تحتفظ بخواصها وسوف تقاوم العوامل الجوية المؤثرة فيها ولعمر أطول، مما يبقيها في الخدمة لعمر طويل (5).

ويحدد معيار الديمومة لخليط بيتوميني ما باختبار هذا الخليط ضمن الظروف الجوية المحددة (وفي بحثنا هذا بتأثير دورات التجمد والذوبان ومدة التجمد). وإن المعيار الخاص بالديمومة في هذا البحث هو القيم المتبقية لقيم ثبات مارشال والمحافظ عليها في أثناء اختبارها.

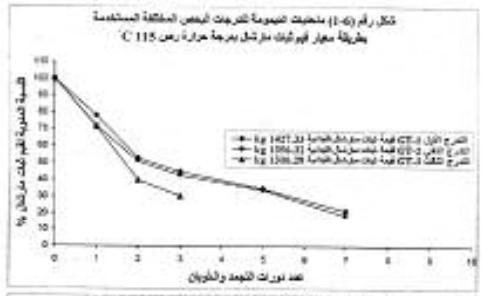
6-1-1- منحنيات الديمومة بتأثير عدد دورات التجمد والذوبان:

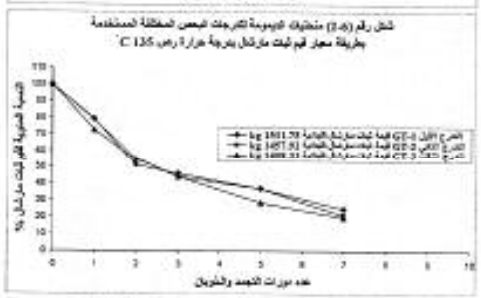
الأشكال (6-1)، (6-2)، (6-3) تبين معيار الديمومة لعدد دورات التجمد والذوبان. وتظهر منحنيات الديمومة العلاقة بين القيم المتبقية لقيم ثبات مارشال مع عدد دورات التجمد والذوبان ولكل تدرج من التدرجات الحبية الثلاثة وبتأثير درجة حرارة الرص المختلفة.

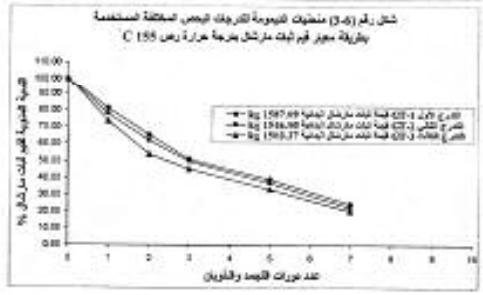
إن القيم المتبقية لقيم ثبات مارشال (والمحتفظ بها) والتي تم الحصول عليها من خلال اختبارها بطريقة مارشال يطلق عليها من خلال بعض المعاهد العلمية والهيئات الدولية بالمعاملات المعيارية للديمومة للخليط البيتوميني (6).

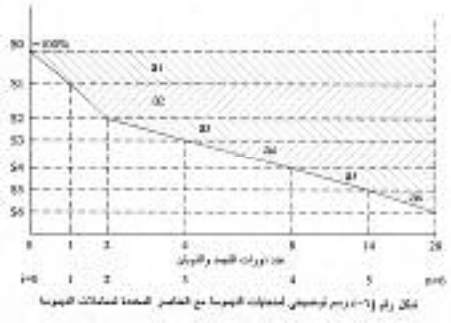
وهناك متطلبات أساسية لمعاملات الديمومة المقترحة حيث يفترض بها إيجاد قياس فردي وكمي (عددي) يستطيع أن يُشخص كامل منحنيات الديمومة. وأن يكون هذا القياس منطقياً ومعرفاً ومادياً ويجب أن يحدد قيم الديمومة الكامنة (المتبقية) مرتبطة بعدد دورات التجمد والذوبان (5).

مما سبق يتبين أنَّ هناك معاملين اثنين يمكن إيجادهما بحيث يحققان الشروط المحددة أعلاه.



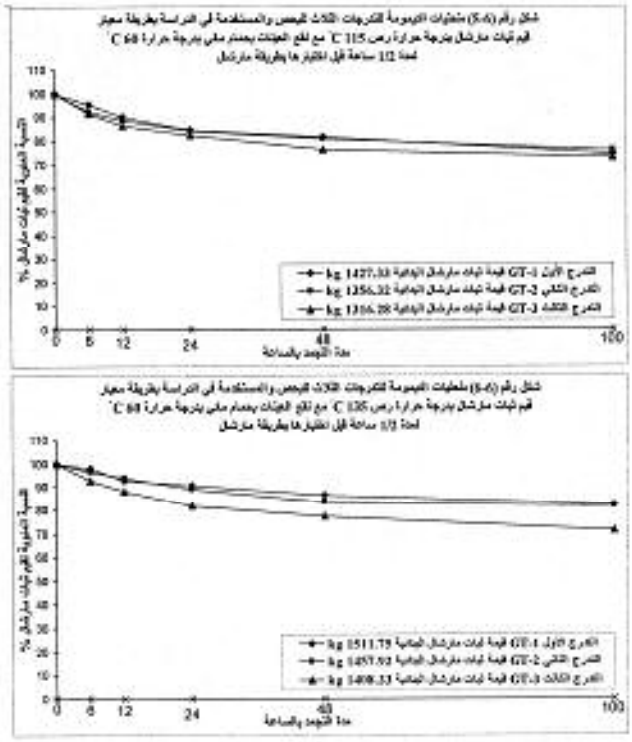


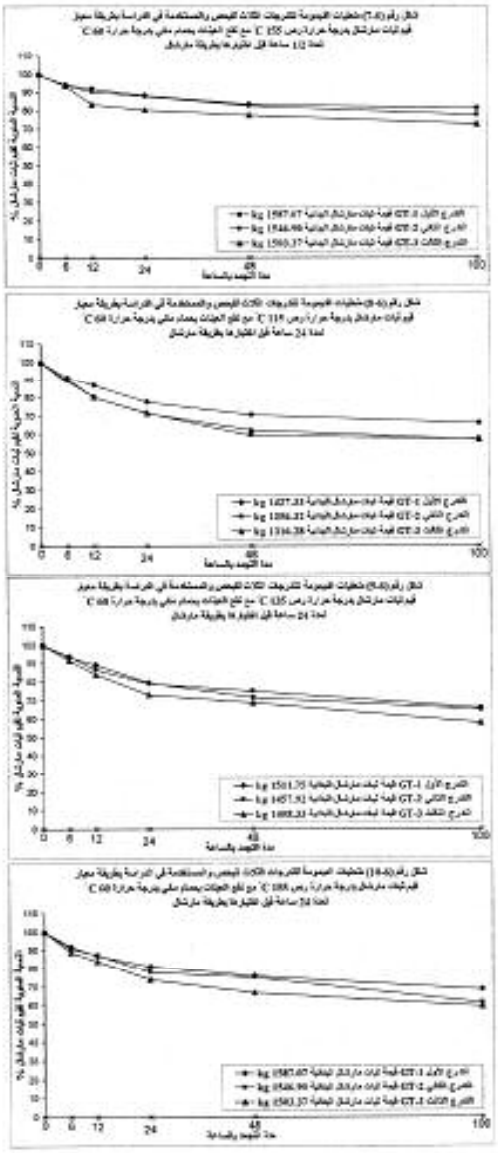




6-1-2- منحنيات الديمومة بتأثير مدة التجمد والذوبان:

الأشكال (6-5) و(6-6) و(6-7) تبين معيار الديمومة للخلطات البيتومينية للتدرجات الحبية الثلاثة المستخدمة في هذه الدراسة وبتأثير مدة التجمد مع نقع العينات في حمام مائي بدرجة حرارة (60) ^{o}C مدة (1/2) ساعة وقبل اختبارها بطريقة مارشال. في حين أن الأشكال (6-8) و(6-9) و(6-10) تبين معيار الديمومة للخلطات البيتومينية للتدرجات الحبية الثلاثة وبتأثير مدة التجمد مع نقع العينات في حمام مائي بدرجة (60) ^{o}C مدة (24) ساعة قبل اختبارها بطريقة مارشال.





7- معاملات الديمومة "Durability Indices"

7-1- معامل الديمومة الأول First Durability Index

عرف العالِم J.Craus و Ishai I معامل الديمومة الأول بأنّه مجموع الميول للأجزاء (المناطق) المتتالية من منحنى الديمومة. وحسب الشكل (6-14) فإن هذا المعامل (r) يمكن أن يعبر عنه حسب المعادلة:

$$r = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{S_i - S_{i+1}}{t_{i+1} - t_i} \qquad (1)$$

حيث:

S_{i+1} – النسبة المئوية للقيمة المتبقية من قيم ثبات مارشال عند الدورة t_{i+1}

S_i – النسبة المئوية للقيمة المتبقية من قيم ثبات مارشال عند دورة t_i

t_i ، t_{i+1} – عدد دورات التجمد والذوبان منذ بداية الاختبار

وبتطبيق عدد دورات التجمد والذوبان المعتمدة في هذه الدراسة على المعادلة رقم (1) فإننا سنحصل على المعادلة رقم (2) بصيغتها الآتية:

$$r = \left(\frac{S_0 - S_1}{1}\right) + \left(\frac{S_1 - S_2}{1}\right) + \left(\frac{S_2 - S_3}{1}\right) + \left(\frac{S_3 - S_4}{2}\right) + \left(\frac{S_4 - S_5}{2}\right) \quad \ldots(2)$$

يظهر معامل الديمومة الأول ويعبر عن نسبة الفقدان (الضياع) بالقوة بمقياس الدورة الواحدة، القيمة الإيجابية لـ (r) تعني أن القوة في حالة فقدان (خسارة) وفي حال القيم السلبية فإنها تعني أن القوة في حالة زيادة.

كما يعبر عن معامل الديمومة الأول بقيمة حدية مطلقة وبمقياس الفقدان من القوة (R) حسب المعادلة:

$$R = \frac{r}{100} \cdot S_0 \qquad (3)$$

حيث إنَّ:

S_0 – هي القيمة المطلقة لقيمة الثبات الأولية.

إن وحدات قياس R، S_0 هي نفسها وحدات قياس القوة المستخدمة (Kg)

2-7- معامل الديمومة الثاني Second Durability Index

يعرف معامل الديمومة الثاني بمعدل مساحة القوة المفقودة والمحصورة بين منحنى الديمومة وخط القوة عند مستوى (S_0) والتي تساوي عادة 100%. وبالرجوع إلى الشكل (4-6) فإن معامل الديمومة الثاني هو:

$$a = \frac{1}{t_n}\sum_{i=1}^{n} a_i = \frac{1}{2\,t_n}\sum_{i=0}^{n-1}\left(S_i - S_{i+1}\right)\left[2\,t_n - \left(t_i + t_i + 1\right)\right] \qquad \ldots(4)$$

إن معامل الديمومة الثاني (a) يظهر أيضاً مكافئ الفقدان في قيم الثبات بالدورة الواحدة. ويمكن أن يعبر عن النسبة المئوية للقوة المتبقية للدورة الواحدة حسب المعادلة:

$$S_a = \left(100 - a\right) \qquad (5)$$

كما أنه من الممكن أن يُعرف معامل الديمومة الثاني في حدود القيمة المطلقة المكافئة للفقدان والخسارة أو القوة المتبقية لثبات مارشال $(\bar{S}_a \,\&\, A)$ وحسب المعادلات:

$$A = \frac{a}{100}\cdot S_0 \qquad (6)$$

$$\bar{S}_a = S_0 - A \qquad (7)$$

الأشكال (1-6)، (2-6)، (3-6) تمثل منحنيات الديمومة مبينة التدرجات الحبية الثلاثة للحصويات، عدد دورات التجمد، درجة حرارة الرص ومعامل قيم مارشال. وهذه المنحنيات سوف تكون بمنزلة القاعدة لتحليل هذه العوامل المختلفة والمؤثرة في الديمومة للخليط.

الجدول رقم 7-1 يمثل قيم معاملات الديمومة الأول والثاني وحسب المعادلات من 1←7 والذي تم التوصل إليها من منحنيات الديمومة الممثلة لمعيار قيم ثبات مارشال. وهنا نرى بأنه يمكن تمثيل كامل هذه المنحنيات عن طريق قيمة إفرادية لمعامل الديمومة.

وفي الغالب فإن معاملي الديمومة يعكسان نزعة متشابهة في متغيراتهما بالنسبة للتدرجات الحبية ومحتوى البيتومين. ولأي تدرج حبي فإن معامل الديمومة الثاني يكون أكثر حساسية للقيم العليا والنسبة المئوية العالية لفقدان قيم الثبات والقيم المتبقية أيضاً.

كما أن لمعامل الديمومة الثاني ميزة أخرى وهي التعددية في إيجاد القيم المكافئة للقيم المتبقية (المحتفظ بها) عن طريق النسبة المئوية أو القيم المطلقة أو كقيم معاملات الديمومة.

الجدول رقم (7-2) والجدول رقم (7-3) يمثلان قيم معاملات الديمومة الأول والثاني وبتأثير مدد التجمد للتدرجات الحبية للخلطات البيتومينية بتدرجاتها الحبية مع نقع العينات بحمام مائي بدرجة حرارة "60" ^{o}C مدة (1/2) ساعة و(24) ساعة قبل اختبارهما بطريقة مارشال.

جدول رقم (7-1) قيم معاملات الديمومة للخلطات البيتومينية باستخدام التدرجات الحبية الثلاثة بتأثير عدد دورات التجمد والذوبان

نوع التدرج الحبي	درجة حرارة الرص "^{o}C"	قيم ثبات مارشال البدائية Kg	معامل الديمومة الأول		معامل الديمومة الثاني			
			% r معادلة 2	R Kg معادلة 3	% a معادلة 4	S_a% معادلة 5	A Kg معادلة 6	$\bar{S}_a$ Kg معادلة 7
1	115	1427.33	66.79	953.31	47.07	52.93	671.84	755.48
	135	1511.75	64.40	973.57	45.29	54.71	684.67	827.08
	155	1587.07	62.24	987.79	41.46	58.54	657.99	929.08
2	115	1356.32	69.3	939.93	49.22	50.78	667.58	688.74
	135	1457.92	67.31	981.32	45.88	54.12	668.89	789.03
	155	1546.90	63.78	986.61	43.45	56.55	672.12	874.28
3	115	1316.28	69.68	896.78	55.44	44.56	729.74	586.54
	135	1408.33	68.13	959.42	49.82	50.18	701.63	706.7
	155	1503.37	67.06	1008.15	47.96	52.04	721.02	782.35

جدول رقم (7-2) معامل ديمومة الخلطات البيتومينية للتدرجات الحبية الثلاثة بتأثير مدة التجمد مع نقع العينات بحمام مائي على درجة حرارة (60) oC مدة (30) دقيقة قبل اختبارها بطريقة مارشال

نوع التدرج الحبي	درجة حرارة الرص "°C"	قيم ثبات مارشال البدائية Kg	معامل الديمومة الأول		معامل الديمومة الثاني			
			% r معادلة 2	R Kg معادلة 3	% a معادلة 4	S_a% معادلة 5	A Kg معادلة 6	$\bar{S}_a$ Kg معادلة 7
1	115	1427.33	21.97	313.58	19.61	80.39	279.89	1147.44
	135	1511.75	15.75	238.10	13.83	86.17	196.52	1315.23
	155	1587.07	17.76	281.86	14.85	85.15	235.68	1351.39
2	115	1356.32	21.59	292.89	18.73	81.27	254.03	1102.29
	135	1457.92	17.63	257.10	14.67	85.33	213.87	1244.05
	155	1546.90	19.88	367.00	17.50	82.50	270.70	1276.20
3	115	1316.28	25.33	333.41	21.27	78.73	279.97	1036.31
	135	1408.33	25.67	361.51	22.28	77.12	313.77	1094.56
	155	1503.37	25.18	378.62	21.57	78.43	324.27	1179.10

جدول رقم (7-3) معاملات الديمومة للخلطات البيتومينية باستخدام التدرجات الحبية الثلاثة بتأثير مدة التجمد مع نقع العينات بحمام مائي في درجة حرارة (60) °C مدة (24) ساعة قبل اختبارها بطريقة مارشال

نوع التدرج الحبي	درجة حرارة الرص "°C"	قيم ثبات مارشال البدائية Kg	معامل الديمومة الأول		معامل الديمومة الثاني			
			% r معادلة 2	R Kg معادلة 3	% a معادلة 4	S_a% معادلة 5	A Kg معادلة 6	$\bar{S}_a$ Kg معادلة 7
1	115	1427.33	31.76	453.32	26.71	73.29	381.24	1046.09
	35	1511.75	31.71	479.37	27.42	72.58	414.52	1097.23
	155	1587.07	28.04	445.01	24.68	75.32	391.52	1195.39
2	115	1356.32	41.59	564.09	33.89	66.11	459.65	896.67
	135	1457.92	29.59	431.39	26.39	73.61	384.74	1073.18
	155	1546.90	31.89	493.30	29.73	70.27	459.89	1087.01
3	115	1316.28	40.30	530.46	33.82	66.18	445.16	871.12
	135	1408.33	36.76	517.70	32.63	67.37	459.53	948.80
	155	1503.37	36.99	556.09	31.86	68.14	478.97	1024.40

8- النتائج والتوصيات:

من خلال الدراسة نتبين النتائج الآتية:

1- تزداد قيم الوزن الحجمي وقيم ثبات مارشال وقيم القساوة للخلطات البيتومينية على اختلاف تدرجاتها الحبية بزيادة درجة حرارة الرص، في حين تقل نسبة الفراغات الهوائية والفراغات المينرالية وقيم الانسياب بازدياد درجة حرارة الرص بالنسبة لنسب الإسفلت المثلى للخلطات البيتومينية.

2- أظهرت النتائج أنَّ مقياس قيم ثبات مارشال للخلائط البيتومينية وبحسب نسب الإسفلت المثلى للخليط لا تُعد الطرائق الوحيدة للاستدلال بتأدية الديمومة لهذه الخلائط بمقارنتها بتأثير العوامل الجوية المختلفة كالتجمد والذوبان أو التجمد لفترات زمنية مختلفة.

3- أظهرت النتائج أنَّ دورة التجمد والذوبان تؤدي دوراً أساسياً في ديمومة الخلطات البيتومينية، إذْ تبين أنَّ جميع الخلطات المستخدمة في هذه الدراسة لم تستطع الثبات لـ (10) دورات من التجمد والذوبان، في حين أن الخلطات البيتومينية والمائلة للخشونة من حيث التدرج الحبي لم تستطع الثبات أكثر من (3) دورات.

4- أظهرت النتائج بوضوح أنَّ دورات التجمد والذوبان تُعدُّ من أكثر العوامل المؤدية لتلف الخلطات البيتومينية وفقدان ديمومتها. في حين أن مدة التجمد أظهرت مؤشراً لتلف الخلطات البيتومينية ولكن ليس بشدة الأثر الناتج عن دورات التجمد والذوبان. في حين أن مدة التجمد والاختبار للعينات بعد نقعها بالحمام المائي مدة ½ ساعة قبل اختبارها بطريقة مارشال لم تعطِ أي أثر يذكر في الديمومة.

5- لديمومة الخلطات البيتومينية أكثر من معنى أساسي وبجانب قيم القياس لمعيار الدورة الواحدة للتجمد فباختبار العينات لدورات من التجمد والذوبان استطاعت العينات أن تصمد للتدرج الأول أكثر من ثلاث دورات من التجمد والذوبان ومن ثَمَّ فهذا دليل على أن قيم الدورة الواحدة لا تعدُّ مؤشراً على ديمومة الخلطات البيتومينية.

6- تم التوصل إلى معايير الديمومة الأول والثاني بالنسبة للخلطات البيتومينية بتدرجاتها الحبية الثلاثة المستخدمة في هذه الدراسة.

7- تم التوصل إلى أنه لزيادة الديمومة يجب استعمال التدرج الحبي المائل إلى النعومة ضمن المجال النظامي للتدرج الحبي ودرجة حرارة رص الخليطة البيتومينة C $^{\circ}$135 كحد أدنى.

References

1- Improved Asphalt Containing Preclaimed Rubber for Paving Purposes, National center for construction Lab's, Iraq-Bagdad, 1988.

2- Lantcperg U.C, Road Highway and Parking, Moscow, 1983.

3- Serda P., Litvan G., Durability of Building Materials And Components; Proceeding of the first International Conference, ASTM STP 691, National Research counsil of Canada, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa. 1978.

4- Standard Specification for Transportation Materials and Methods of sampling and testing. fifteenth Edition 1990, Part II Tests, Adopted by the American Association of state Highway and Transpiration officials.

5- Craus J., Ishai I and Sides A., Durability of bituminous paving mixtures as related to filler type and Properties; Proceeding of the Association of Asphalt Paving technologies Vol. 50, 1981.

6- U.S Department of Army. Flexible Airfield Pavement Technical Manual EM 1100-45-30, 1985.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2006/4/12.