A Study of the Effect of Water Content Change on the Properties of Foamed Asphalt Mixtures

Dr. Bassam Sultan*
Mohamad Sameer Samaha**

(Received 15 / 8 / 2023. Accepted 5 / 10 / 2023)

□ ABSTRACT □

With the development and progress in the bitumen mixture industry, it is necessary to develop the reality of traditional bituminous mixtures that result in the emission of environmentally polluting gases. The production of traditional bituminous mixtures leads to the consumption of large energy spent on heating the bitumen and aggregates, and from this principle it is necessary to move towards solutions to reduce these emissions and energy. One of these solutions is the production of foamed bitumen mixtures made of foamed bitumen, which is characterized by two characteristics: a large expansion ratio and half life of the foam, which are actually affected by several factors such as air pressure, water pressure, and the temperature of heating the bitumen to the point of foaming. Foaming bitumen requires a small amount of water, usually (2-4)% of the bitumen content. Water is added to the bitumen heated to the foaming temperature and mixed with the aggregates at the ambient temperature, noting that the water percentage is the most influential in the production of these mixtures. In our research, we aimed to study the effect of changing the water content involved in the production of foamed mixtures on their stability. The bitumen was foamed with varying water ratios from 2% to 4%, with an increase of 0.1%. At each ratio, we obtained the expansion ratio and the half life of the foam. We found that at each added water percentage the stability was greater, compared to traditional hot bituminous mixtures. As a result, at a water percentage of 2.3%, it gave the greatest stability of the foamed mixture (1488 kg), an increase of 22.47% over the stability of the hot bituminous mixture, and the lowest flow value was 2.6 mm.

Keywords: foamed bitumen, water content, expansion ratio,Half-Life

Copyright **:**Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **Professor, Department of Traffic and Transportation, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.**
** **Master Student , Dep. Of Transport& Traffic Engineering -Tishreen University - Lattakia- Syria. MohamadSameerSamaha@gmail.com**

دراسة تأثير تغير المحتوى المائي على خصائص الخلطات الإسفلتية الرغوية

د. بسام سلطان*

محمد سمير سماحه**

(تاريخ الإيداع 15 / 8 / 2023. قُبِل للنشر في 5/ 10 / 2023)

□ ملخّص □

مع التطور والتقدم في صناعة الخلطات البيتومينية لابد من تطوير واقع الخلطات البيتومينية التقليدية التي ينتج عنها انبعاث الغازات الملوثة للبيئة ، فإنتاج الخلطات البيتومينية التقليدية يؤدي إلى استهلاك طاقة كبيرة تصرف على تسخين البيتومين والحصويات، ومن هذا المبدأ لابد من الاتجاه نحو حلول لتقليل هذه الانبعاثات والطاقة، وأحد هذه الحلول هي إنتاج خلطات بيتومينية رغوية مصنوعة من البيتومين الرغوي الذي يمتاز بخاصيتين هما نسبة التمدد الكبيرة expansion ratio ونصف عمر الإرغاء half life، والتي تتأثر فعلياً بعدة عوامل كضغط هواء وضغط ماء ودرجة حرارة تسخين البيتومين إلى درجة الإرغاء، وإرغاء البيتومين يحتاج لكمية صغيرة من الماء عادةً (2-4)% من محتوى البيتومين. يضاف الماء إلى البيتومين المسخن إلى درجة حرارة الإرغاء ويخلط مع الحصويات في درجة حرارة الوسط المحيط، علماً أن نسبة الماء هي الأكثر تأثيراً في إنتاج هذه الخلائط. توجهنا في بحثنا لدراسة تأثير تغير المحتوى المائي الداخل في إنتاج الخلطات الرغوية على ثباتها، تم إرغاء البيتومين بنسب ماء متغيرة من 2% حتى 4% بزيادة مقدارها0.1% عند كل نسبة حصلنا على نسبة تمدد expansion ratio ونصف عمر إرغاء half life . تبين لنا أنه عند كل نسبة ماء مضافة الثبات كان أكبر، بالمقارنة مع الخلطات التقليدية البيتومينية الحارة، بالنتيجة عند نسبة الماء 2.3% أعطت أكبر ثبات للخلطة الرغوية (1488 kg) بزيادة مقدارها 22.47 % عن ثبات الخلطة البيتومينية الحارة، وكانت أقل قيمة للانسياب 2.6 mm .

الكلمات المفتاحية: بيتومين رغوي _محتوى ماء_ نسبة التمدد expansion ratio _نصف عمر الإرغاء half life

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

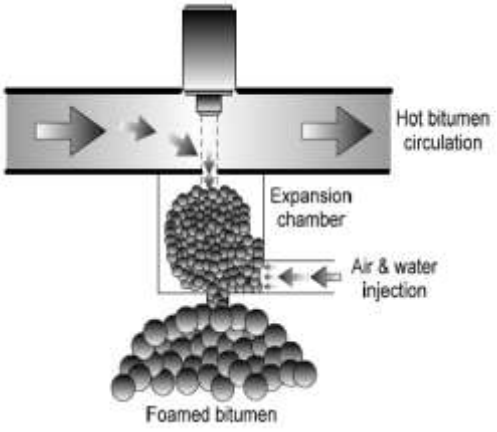
* أستاذ – قسم هندسة المواصلات والنقل – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

**طالب ماجستير – قسم المواصلات والنقل- كلية الهندسة المدنية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية. MohamadSameerSamaha@gmail.com

مقدمه:

إن صناعة الخلطات البيتومينية الحارة وكما نعلم تتطلب درجات حرارة عالية لا تقل عن 180 درجة مئوية للحصويات وحرارة كافية لوصول البيتومين إلى اللزوجة الكافية لتغليف الحصويات هذا يتطلب الكثير من الطاقة وانبعاثات الكثير من الغازات. تركزت الأبحاث في الآونة الأخيرة بالاتجاه نحو حلول للتقليل من استهلاك الطاقة وانبعاثات الغازات ومن هذا المنطلق يجب الإشارة الى برتوكول كيوتو الذي تلتزم فيه العديد من الدول بالحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري التي توفر حماية البيئة. وبناءً على ذلك تم التوجه للبحث عن تقنيات جديده لتصنيع الخلطات البيتومينية من خلال خفض درجات حرارة الإنتاج للخلطات ليتم تصنيفها دافئة ونصف دافئة وحتى بارده وإحدى هذه التقنيات استخدام البيتومين الرغوي في إنتاج هذه الخلطات والذي ينتج عن طريق تطبيق كميات مناسبة من الهواء والبيتومين والماء مما يؤدي إلى تقليل لزوجة البيتومين، ويزداد حجمه حتى (20) مره حجمه الأصلي وفي هذه الحالة يصبح مناسب للخلط مع الحصويات الباردة (حتى الرطبة) [1].

لذلك، فإن البيتومين الرغوي هو مفهوم شامل يتلخص بإدخال كمية صغيرة من الماء البارد (1–4٪ بالوزن) في البيتومين شديد السخونة (160–200 °C) وعند ضغط معين فعندها البيتومين الحار يتمدد بالاتصال المباشر مع الماء، الأمر الذي ينثر البيتومين لدخول الهواء ضمنه ممداً اياه (5 – 20) مرة من حجمه الأولي وبالتالي هنا تتغير الخصائص الفيزيائية للبيتومين مؤقتًا عندما يتحول الماء المحقون والملامس للبيتومين الساخن، إلى بخار محاصر في آلاف فقاعات البيتومين كما هو موضح في الشكل (1). ومع ذلك، تتبدد الرغوة في أقل من دقيقة ويستأنف البيتومين خصائصه الأصلية عندها يجب استغلال فترة الارغاء لإنتاج البيتون الاسفلتي الرغوي. [2].

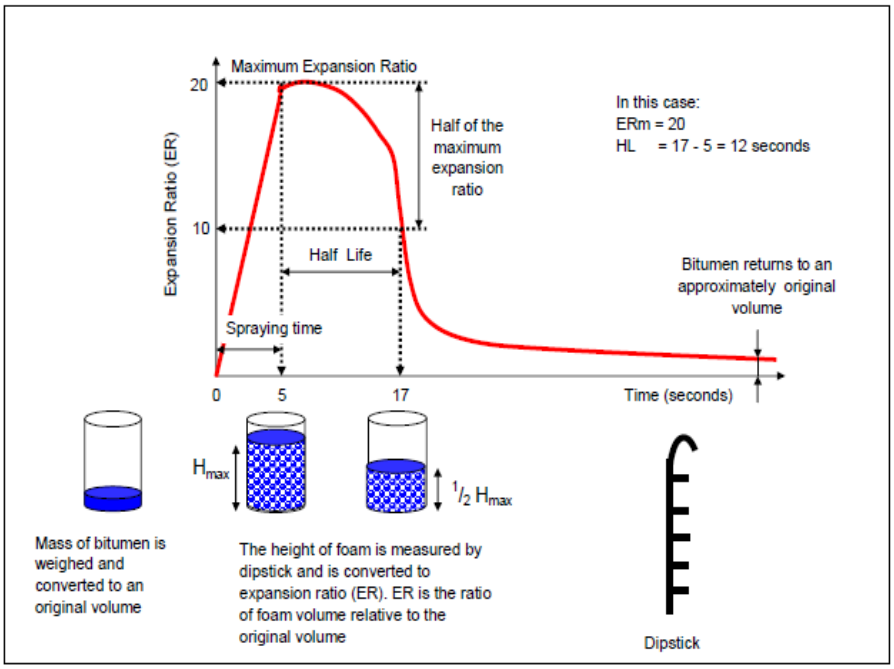


الشكل (1): آلية إنتاج البيتومين الرغوي

أثبتت الأبحاث والتجارب المطبقة في مجال إنتاج البيتون الإسفلتي الرغوي أن أهم بارامترات البيتومين الرغوي والمنتشرة على نطاق واسع[1] يمكن تمثيلها في الشكل رقم(2):

مفهوم نسبة التمدد expansion ratio (ER): هي النسبة بين الحجم الأعظمي الذي يصل اليه البيتومين بالحالة الرغوية والحجم النهائي للبيتومين بعد تبدد الرغوة

نصف عمر الإرغاء half life (HL): هو الوقت بين اللحظة التي يكون فيها البيتومين بالحجم الأعظمي واللحظة التي تتبدد فيها الرغوة إلى نصف الحجم ويقدر بالثواني. [3]



الشكل (2) بارامترات البيتومين الرغوي

تلعب خصائص الرغوة للبيتومين دوراً مهماً خلال مرحلة الخلط لإنتاج البيتومين الرغوي. يمكن توقع أن نسب التمدد العظمى ونصف عمر الإرغاء ستعزز تشتت المادة الرابطة داخل الخليط.

وجد Castedo Franco and Wood (1983) أن أي بيتومين، بغض النظر عن الدرجة أو الأصل يمكن إرغائه بمجموعة مناسبة من نوع فوهة الجهاز وضغط وحقن الماء والهواء والبيتومين[4]. ومع ذلك، وجد (Abel) 1978 أن هناك عوامل تؤثر على إرغاء البيتومين نلخصها [5]:

- البيتومين الذي يحتوي على السيليكون يمكن أن يقلل من قابلية الرغوة للبيتومين.
- البيتومين ذو اللزوجة المنخفضة يتم إرغاءه بشكل أسرع وله نسبة تمدد أعلى ونصف عمر أعلى من البيتومين ذو اللزوجة العالية، ولكن استخدام البيتومين عالي اللزوجة يغلف الحصويات بشكل أفضل.
- حسنت العوامل المانعة للتعرية من قدرة البيتومين على الإرغاء.
- يمكننا الحصول على نسبة رغوة مقبولة في درجات الحرارة فوق 149 درجة مئوية.

وجد (Brennen et al 1983) أن نصف عمر الإرغاء ونسبة التمدد للرغوة الناتجة من أي بيتومين معين تتأثر بحجم الرغوة المنتجة وكمية المياه المستخدمة ودرجة الحرارة التي تم إنتاج الرغوة عندها. أدى ارتفاع درجات حرارة الرغوة وزيادة كميات الماء إلى زيادة نسب التمدد، ولكن أدى ذلك إلى انخفاض نصف عمر الإرغاء. [6]

في المختبر، وجد أن حجم الوعاء يؤثر على معايير الرغوة (Ruckel et al، 1982) ويوصي أن يكون حجم الوعاء مناسباً ليستوعب تمدد البيتومين بحدود 8–15 مقابل 20 ثانية على الأقل لنصف عمر الإرغاء. [7]

إن مقارنة الخلطات البيتومينة الرغوية مع الخلطات الإسفلتية الحارة ينتج عنها أن البيتومين الرغوي له مزايا مختلفة يكسبها للخليط مثل تحسين قوة المزج ومتانته ، وتقليل كمية البيتومين في الخلطة. بالإضافة إلى ذلك، تتيح تقنية البيتومين الرغوي استخدام مجموعة واسعة من الحصويات، وتوفير الطاقة أثناء معالجة المزيج حيث أن الحصويات

عادة ما تكون في درجات الحرارة المحيطة، وصديقة للبيئة حيث تقلل من انبعاث الغازات، وتحسين قابلية التشغيل حيث يمكن أن تبقى الخلطات لفترة أطول بشرط منع فقدان الرطوبة، عدى عن أن هذه التقنية تقلل من التكاليف.

أظهر (Bowering and Martin 1976) أن التماسك وقوة الانضغاط للخلائط كانت أكبر بشكل ملحوظ عند استخدام البيتومين الرغوي (15: 1). [8]

بين (Maccarrone et al 1994) أن البيتومين الرغوي عالي التمدد يؤدي إلى تحسين التغليف الكلي، وبالتالي تحسين خصائص المزيج. [9]

أهمية البحث وأهدافه:

يقع هذا البحث في مجال هندسة المواصلات والنقل (مواد طبقات الرصف الطرقي) ويتخصص في إنتاج خلطات بيتومينية رغوية . يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير تغير المحتوى المائي على الخلطات البيتومينية الرغوية، حيث المحتوى المائي يؤثر تأثير كبير على إنتاج البيتومين الرغوي وبالتالي على خصائص الخلطة من ثبات وانسياب.

طرائق البحث ومواده:

1- البيتومين: تم استخدام نوع واحد من البيتومين في تصميم عينات البحث ، البيتومين المستخدم في الدراسة هو بيتومين ذو صنف (60-70) وتم الحصول عليه من مصفاة بانياس و اختباره وفق المواصفات السورية.

2- الحصويات: تم الحصول عليها من أحد المجابل العاملة في محافظة اللاذقية ومصدرها مدينة حسياء حيث تم اختبارها وفق المواصفات السورية.

3-الماء تم الحصول علية من مياه الشرب العادية.

4-جهاز إنتاج البيتومين الرغوي .

العمل المخبري

يستند العمل المخبري على مجموعة من التجارب على البيتومين المستخدم ذو الصنف (60-70) والحصويات المستخدمة في البحث ومن ثم إنتاج خلطة بيتومينية حارة لمقارنتها مع خلطة البيتومين الرغوي وفيما يلي تسلسل العمل المخبري:

1-اختبارات البيتومين: وتشمل تجارب الغرز، الاستطالة، نقطة التمييع (الكرة والحلقة) ونقطتي الوميض والاشتعال والفاقد بالتسخين بغرض التأكد من مطابقة البيتومين المستخدم في تحضير عينات الدراسة للمواصفات الفنية السورية المعمول بها.

2-**اختبارات الحصويات:** وتشمل اختبار التحليل واختبار الاهتراء والمكافئ الرملي الحبي، بغرض التأكد من أنها مطابقة للمواصفات الفنية السورية المتبعة في سوريا.

3-**تصميم خلطة بيتومينية حارة مرجعية** وفق الطريقة المتبعة في سوريا وهي طريقة مارشال واختبار مواصفات الثبات والانسياب ومجموعة من الخصائص الحجمية.

4 -**إرغاء البيتومين (نسبة توسع + نصف عمر الإرغاء)** المستخدم عند نسب ماء مختلفة (2-4) % بزيادة وقدرها 0.1% كنسبة مئوية من محتوى البيتومين في الخلطة ويبلغ 2.5% مع العلم ان عوامل الإرغاء الأخرى ثابتة (درجة

حرارة تسخين البيتومين للإرغاء 170 درجة مئوية وضغط الماء 4 bar وضغط الهواء 3 bar) وذلك باستخدام جهاز مولد للرغوه مصنع محلياً.

5-**تصميم خلطة البيتومين الرغوية:** عند كل نسبة ماء تم تشكيل ثلاث قوالب مارشال واختبارها على الثبات والانسياب.

النتائج والمناقشة:

5-1 تم إجراء الاختبارات والتجارب على البيتومين (60-70) في مخبر المواصلات والنقل – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين ونبين في الجدول (1) نتائج اختبار البيتومين

الجدول (1) نتائج اختبار البيتومين

نوع الاختبار	نتائج الاختبار	المتطلبات الفنية وفق ASTM D946
الغرز (Penetration Test) 77F(25C°)100g,5sec	66.52	60-70
استطالة البيتومين (الممطولية) (Ductility) 77F(25C°) 5cm/min ,cm	123.5	min 100.0
نقطة التميع (Softening Point Test) (c◦)	52.3	52-48
نقطة الوميض والاشتعال (Flash and Fire Point rest) (Cleveland cup open) (C°)	**درجة الوميض** C°303 **درجة الاشتعال** C°309	min 450(232 C°)
النقص في الوزن (%) (LOSS On Heating)	0.4	Max 1 %

من النتائج السابقة نجد أن البيتومين المستخدم في الدراسة قد أعطى قيمة غرز (66.52) وبالتالي هو من الصنف (60-70) وهو محقق للمتطلبات الفنية المنصوص عنها في الشروط والمواصفات الفنية للطرق والجسور الصادر عن وزارة النقل العام 2002.

5-2 نتائج اختبار الحصويات والتركيب الحبي للخلطة المرجعية والخلطة البيتومينية الرغوية

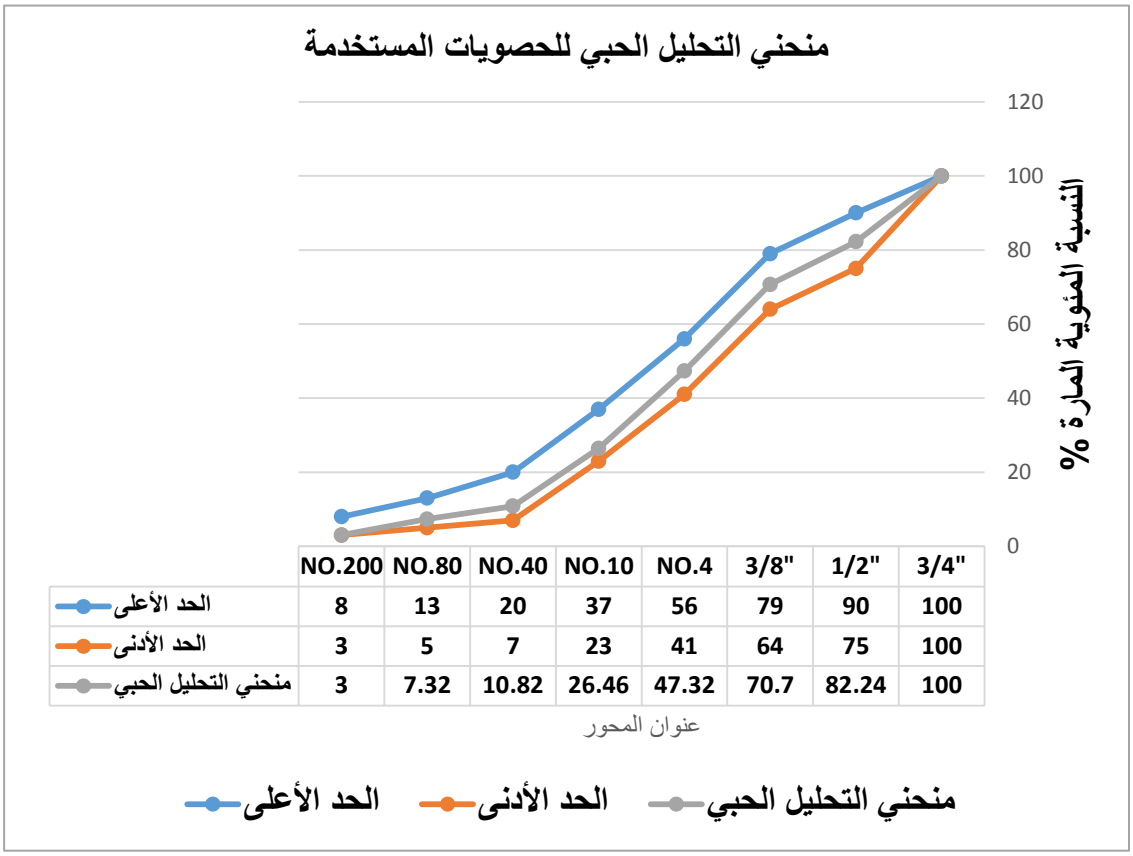
نبين في الجدول (2) نتائج اختبار الحصويات

نوع الاختبار	نتيجة الاختبار
فاقد الاهتراء وفق لوس انجلوس%	21.75
المكافئ الرملي%	85.36
التحليل الحبي	مرفق في الجدول (3)

نبين في الجدول (3) نتائج اختبار التركيب الحبي و الحزمة النظامية المعتمدة وفق المواصفات السورية.

أقطار المناخل mm	النسبة المئوية المارة %	النظامية الحزمة وفق المواصفات السورية
3/4"	100	100
1/2"	**82.24**	75-90
3/8"	**70.7**	64-79
NO.4	**47.32**	41-56
NO.10	26.46	23-37
NO.40	**10.82**	7-20
NO.80	**7.32**	5-13
NO.200	**3.00**	3-8

من الشكل (3) نجد أن منحني التركيب الحبي يقع ضمن الحزمة النظامية وفق المواصفات السورية



الشكل (3) منحني التركيب الحبي للحصويات المستخدمة

3- تصميم الخلطة البيتومينية المرجعية:

اعتماداً على المواد المحلية المستخدمة في تصنيع خلطات بيتومينية حارة في سوريا تم تصميم خلطة مرجعية وكانت نتائج تصميم الخلطة المرجعية من نسب مواد (بيتومين 5% وحصويات 95%) ونتائج التحليل الحبي موضحة في الجدول (3) وفق طريقة مارشال وكانت النتائج موضحة في الجدول (4)

الجدول (4) نتائج تصميم الخلطة المرجعية الحارة

رقم العينة	نسبة البيتومين وزناً%	وزن العينة g		الحجم Cm^3	كثافة مارشال gr/cm3	الفراغات الهوائية Va %	الفراغات المليئة بالبيتومين %Vfb	الثبات kg	الانسياب mm
		في الهواء	في الماء						
1	5	1195	684	511	2.339	4.1	74.69	1134	3.9
2	5	1203	689	514	2.340	4.1	74.55	1236	3.2
3	5	1198	689	509	2.354	3.5	77.24	1276	2.8
الوسطي		1198.7	687.3	511.33	2.344	3.9	75.49	1215	3.3

وبالتالي ثبات الخلطة المرجعية هو 1215 kg ستتم مقارنة هذا الثبات مع ثبات الخلطات البيتومينية الرغوية عند كل محتوى مائي كنسبة من محتوى البيتومين الرغوي.

4- إرغاء البيتومين

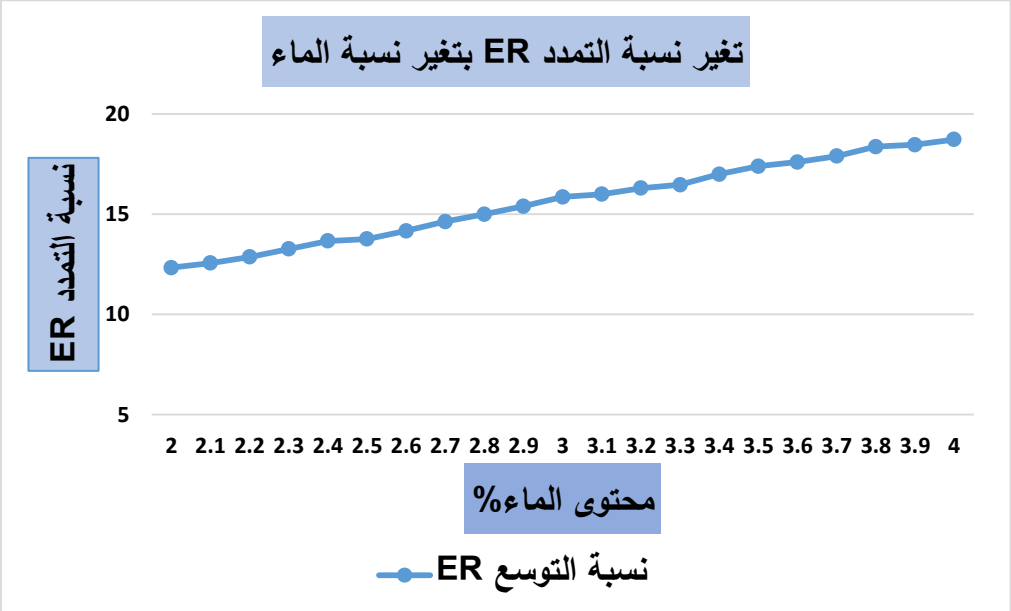
تم إرغاء البيتومين بواسطه جهاز مولد للرغوة مصنعا محلياً عند كل نسبة ماء من (2-4)% وبزيادة قدرها 0.1% وكانت نتائج الإرغاء موضحة في الجدول (5)

جدول رقم (5) نتائج إرغاء البيتومين (نسبة التمدد + نصف عمر الإرغاء)

محتوى الماء	نسبة التمدد ER	نصف عمر الإرغاء بالثواني HF
2.0	12.33	13
2.1	12.57	12.33
2.2	12.87	12.67
2.3	13.27	11.67
2.4	13.67	11.33

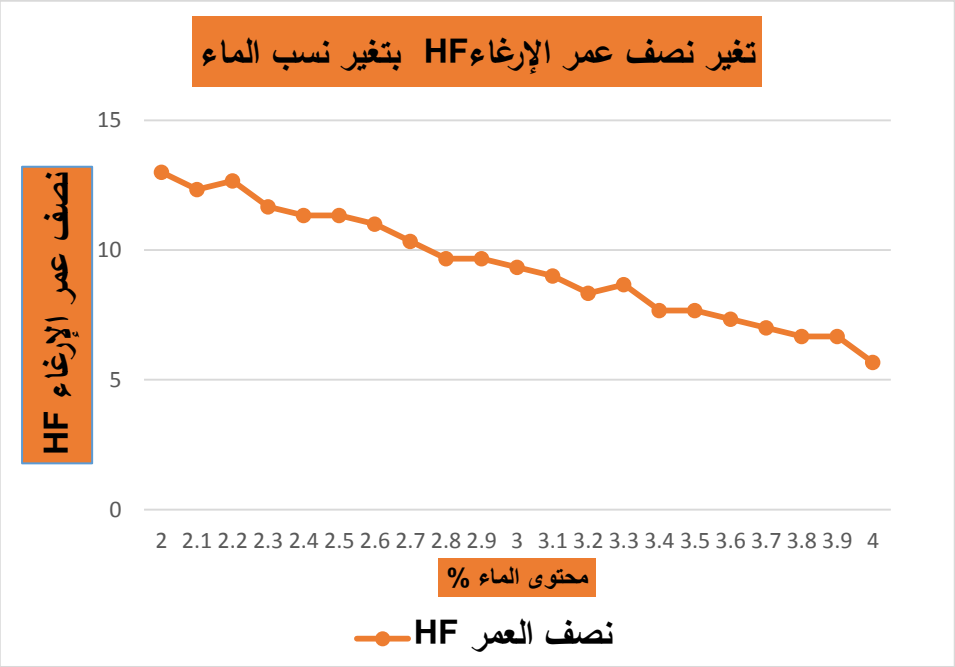
11.33	13.77	2.5
11	14.17	2.6
10.33	14.63	2.7
9.67	15	2.8
9.67	15.4	2.9
9.33	15.87	3.0
9	16	3.1
8.33	16.3	3.2
8.67	16.47	3.3
7.67	17	3.4
7.67	17.4	3.5
7.33	17.6	3.6
7	17.9	3.7
6.67	18.37	3.8
6.67	18.47	3.9
5.67	18.73	4.0

قمنا بتمثيل النتائج برسم المخطط البياني لتغير نسبة التمدد مع تغير نسب الماء كما هو موضح في الشكل (4)



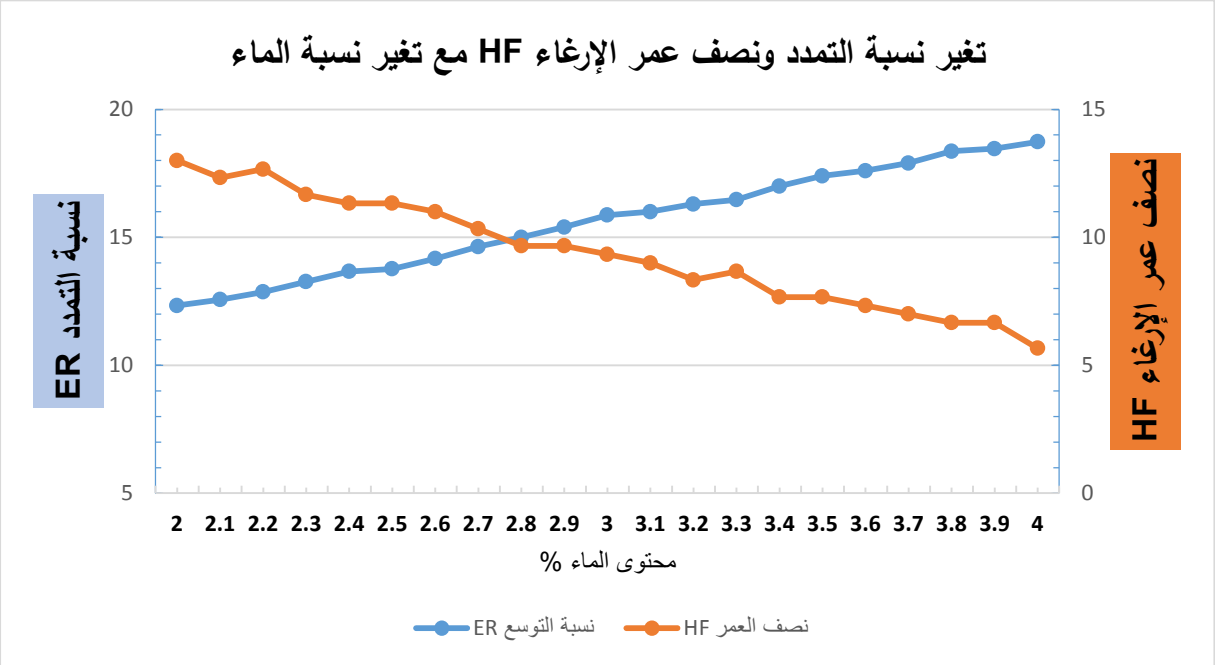
الشكل (4) تغير نسبة التمدد ER بتغير نسبة الماء

والمخطط البياني لتغير نصف عمر الإرغاء بالثواني مع تغير نسب الماء، كما هو مبين في الشكل (5)



الشكل (5) تغير نصف عمر الإرغاء HF بتغير نسب الماء

والمخطط البياني لكل من نسبة التمدد ونصف عمر الإرغاء بالثواني معاً، كما هو موضح في الشكل (6)



الشكل (6) تغير نسبة التمدد ونصف عمر الإرغاء HF مع تغير نسبة الماء

نلاحظ من المخطط أنه كلما زادت نسبة الماء زادت نسبة التمدد وبالمقابل يقل نصف عمر الإرغاء وهذا ما تم تأكيده وفق أغلب الأبحاث العالمية.

5- تصميم الخلطات البيتومينية الرغوية:

بما أن تصميم الخلطات البيتومينية الرغوية في أغلب الأبحاث تختلف في نتائجها وقيم العوامل التي تدخل في تصميمها حسب المواد المحلية المصنعة منها، لهذا السبب سنقوم بتثبيت عدة عوامل تدخل في تصميم الخلطة وتغيير عامل واحد وهو نسبة الماء كونه من أكثر العوامل التي تؤثر على خصائص الخلطات البيتومينية الرغوية

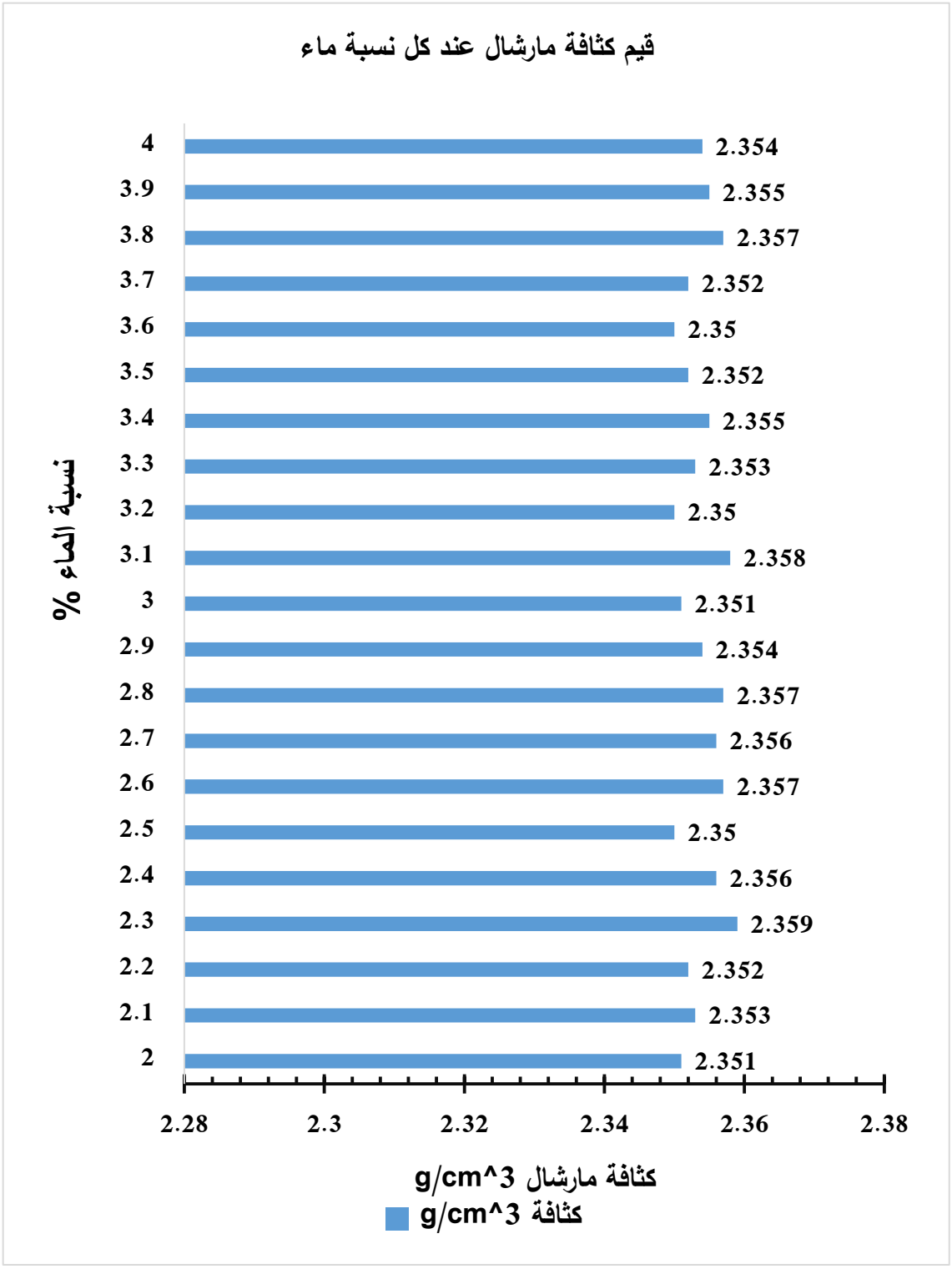
في بحثنا هذا تم استخدام نسبة البيتومين الرغوي 2.5% ودرجة حرارة تسخين البيتومين للإرغاء 170 درجة مئوية وضغط ماء 4 bar وضغط هواء 3 bar **ونسب ماء متغيرة من (2 % حتى 4 % بزياده وقدرها 0.1 %) من وزن البيتومين في تصميم الخلطات البيتومينية الرغوية.**

بعد أن تم إرغاء البيتومين عند نسب الماء المتغيرة وتحديد المتغيرين (نسبة تمدد ونصف عمر إرغاء مقاس بالثواني) تم انتاج خلطة بيتومينية رغوية وفق طريقة مارشال بتصميم ثلاث قوالب عند كل نسبة ماء واختبارها حسب مارشال (ثبات وانسياب) ومجموعة من الخواص الحجمية.

وبالتالي يمكننا أن نستنتج أن نسبة الماء التي تعطي عندها أكبر ثبات وأقل انسياب هي التي تحقق أفضل نسبة ماء داخلة في تصميم خلطة البيتومين الرغوي ومن ثم تتيح لنا مقارنتها مع ثبات وانسياب الخلطة المرجعية.

يمكننا أن نمثل النتائج في المخططات البيانية التالية :

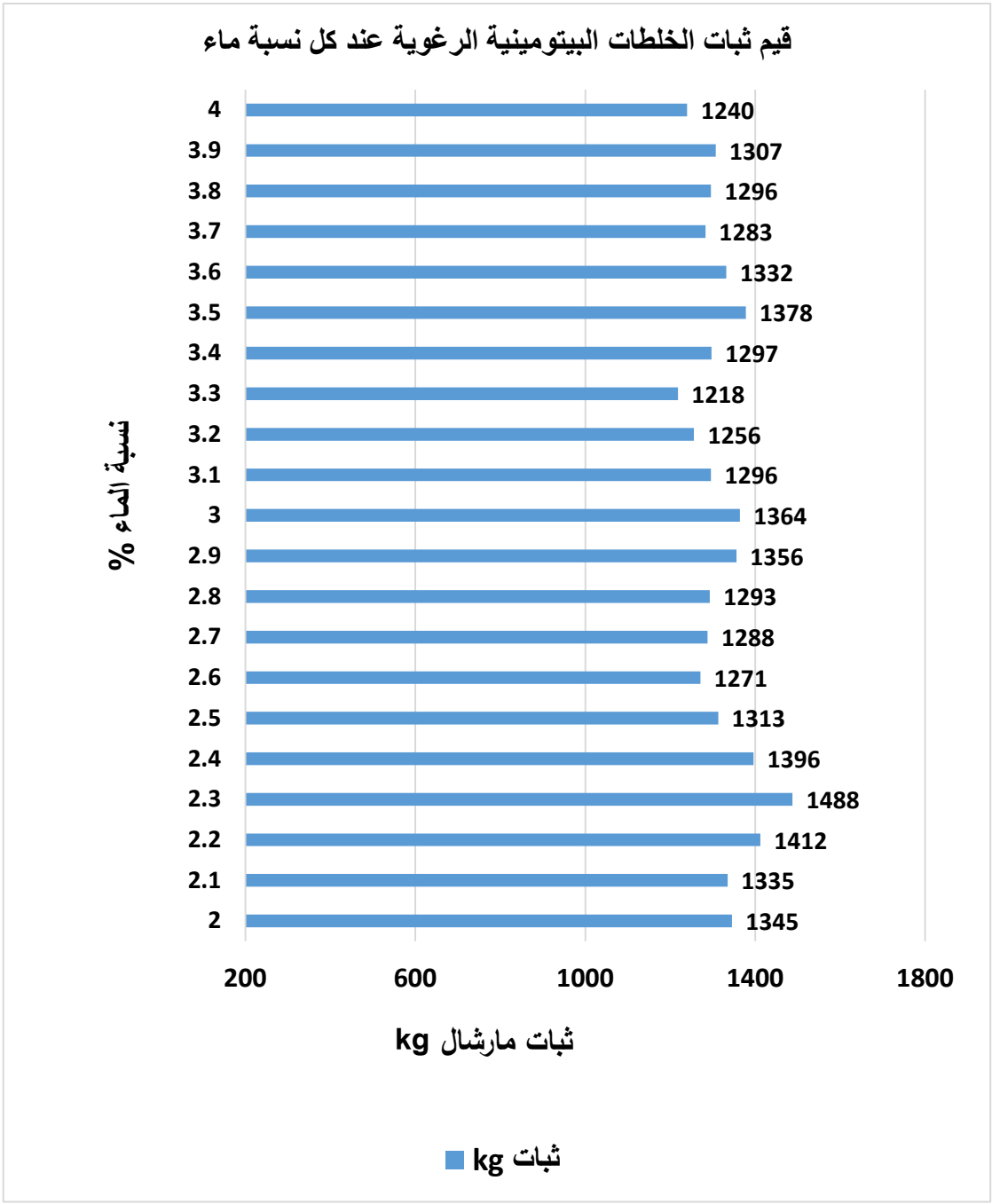
نعرض فيما يلي المخطط البياني لقيم كثافة مارشال عند كل نسبة ماء الشكل (7).



الشكل (7) قيم كثافة مارشال عند كل نسبة ماء

من المخطط نستنتج أن جميع قيم الكثافة عند جميع نسب الماء قريبة بالقيمة من بعضها، وهذا بسبب أننا قمنا بثبيت كمية البيتومين في الخلطة، وهي قيم جيدة بالنسبة لتصميم الخلطة حيث بلغت أصغر كثافة في تصميم الخلطة البيتومينية الرغوية(2.35 gr/cm3).

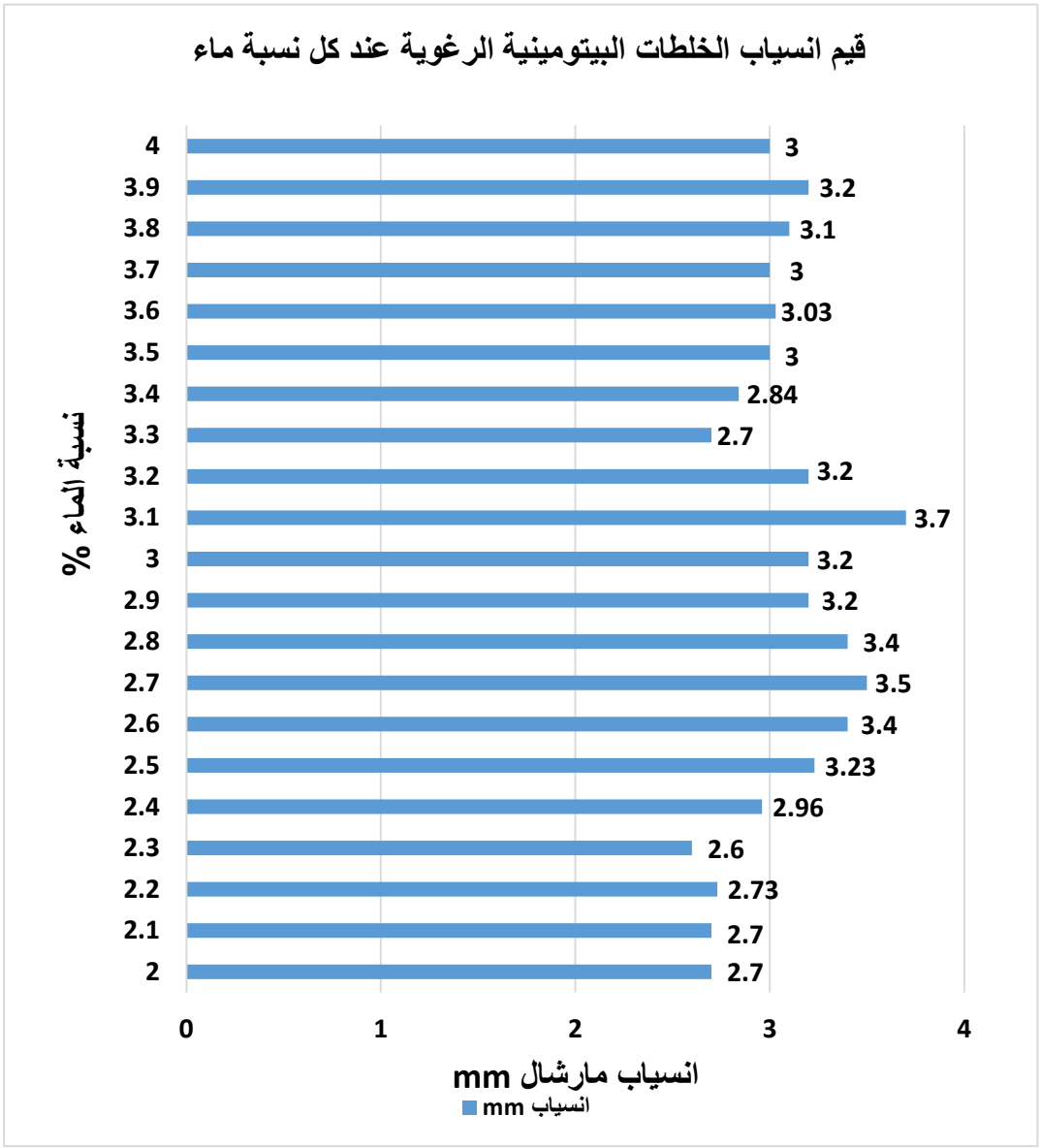
نعرض فيما يلي المخطط البياني لقيم ثبات الخلطات البيتومينية الرغوي عند كل نسبة ماء الشكل(8)



الشكل(8) قيم ثبات الخلطات البيتومينية الرغوية عند كل نسبة ماء

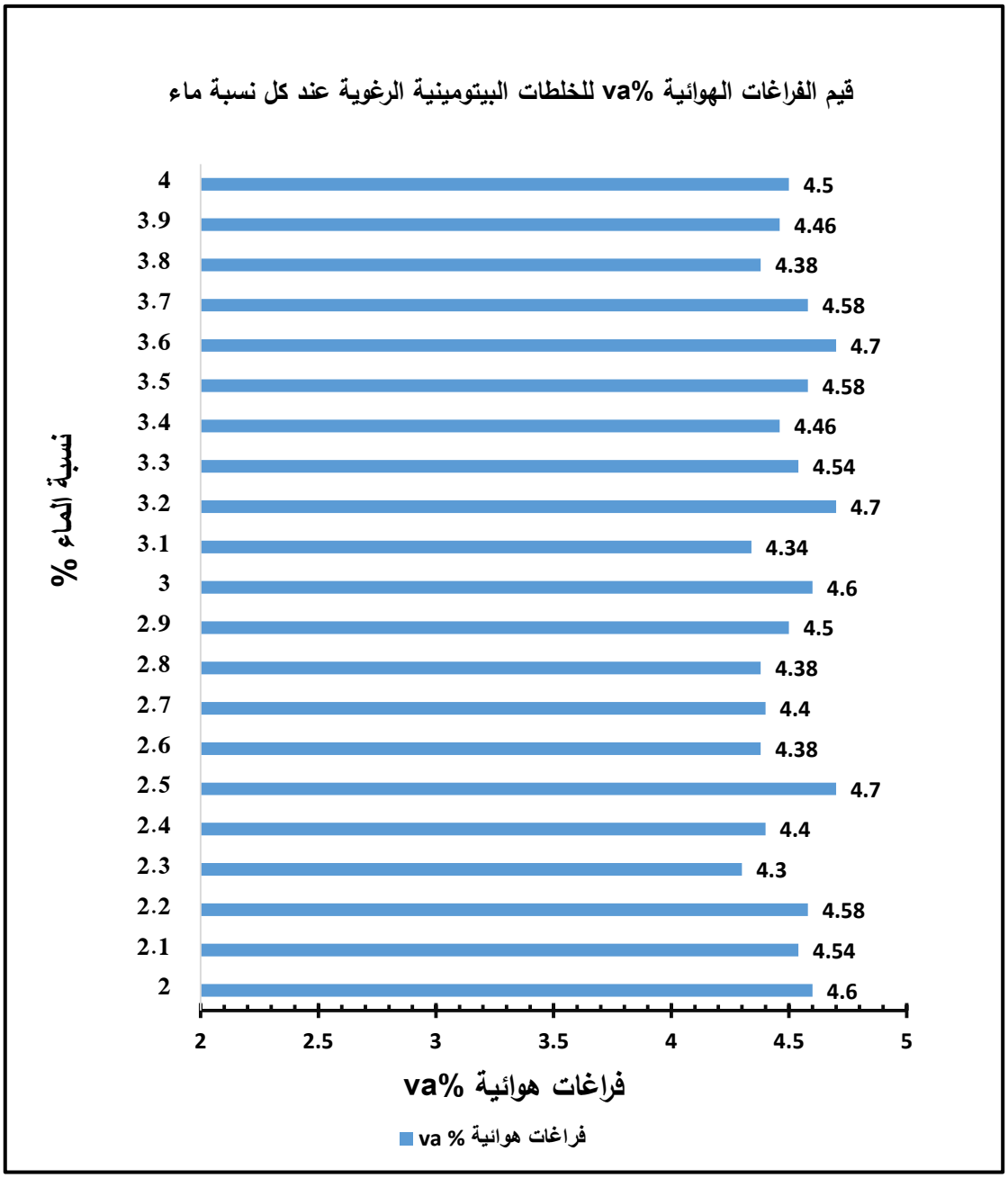
نستنتج من المخطط البياني أن أكبر ثبات للخلطة البيتومينية الرغوية عند محتوى الماء 2.3% هو (1488kg)،في حين أن كثافة الخلطة المرجعية كانت(1215 kg) أي أنه زاد الثبات عن ثبات الخلطة المرجعية بمقدار(22.5%) وجميع قيم الثبات بما فيها أصغر قيمة 1218 kg عند نسبة الماء 3.3% أكبر من ثبات الخلطة المرجعية، مما يدل على أن الخلطات البيتومينية الرغوية تعطي قوة محسنة للمزيج، حيث كان تأثير الماء على الثبات متفاوت.

نستعرض بالمخطط البياني قيم انسياب الخلطات البيتومينية الرغوية عند كل نسبة ماء، كما هو مبين في الشكل (9) من المخطط نستنتج أن أقل انسياب 2.6 mm عند نسبة الماء 2.3% وهي قيمة ضمن حدود التصميم بالنسبة لمارشال.



الشكل(9) قيم انسياب الخلطات البيتومينية الرغوية عند كل نسبة ماء

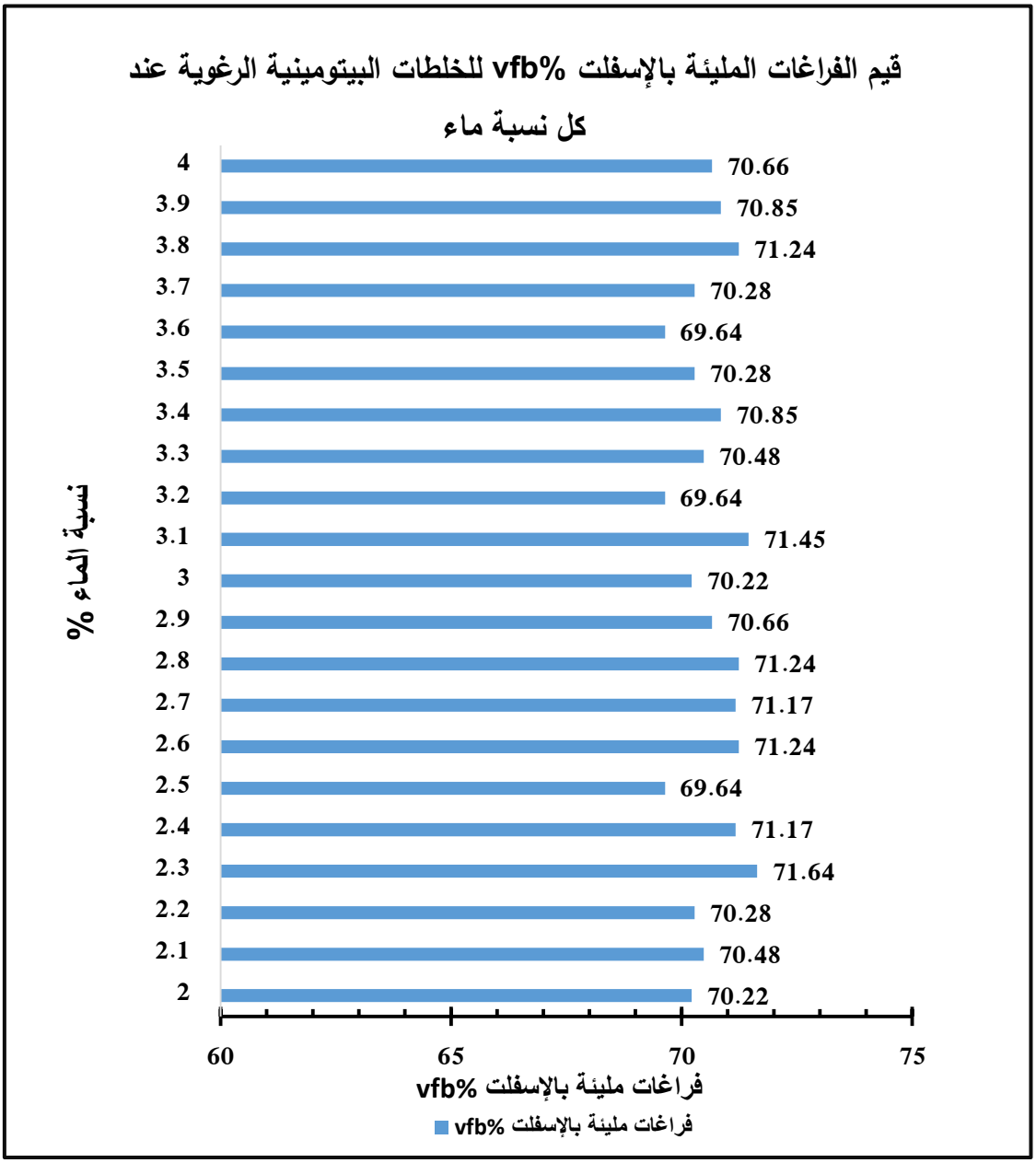
كما يمكننا أن نعرض المخطط البياني لقيم الفراغات هوائية va % للخلطات البيتومينية الرغوية عند كل نسبة ماء، كما هو مبين في الشكل(10)



الشكل (10) قيم الفراغات هوائية va % للخلطات البيتومينية الرغوية عند كل نسبة ماء

نستنتج من المخطط أن قيم الفراغات الهوائية عند جميع نسب الماء ضمن حدود التصميم لمارشال حيث كانت أصغر قيمة 4.3% عند نسبة الماء 2.3% وأكبر قيمة 4.7 عند نسب الماء (2.5–3.2–3.6) % وأن جميع الفراغات الهوائية في الخلطة البيتومينية الرغوية عند جميع النسب هي أقل من الفراغات الهوائية في الخلطة البيتومينية الحارة المرجعية.

ويبين المخطط البياني لقيم الفراغات المليئة بالإسفلت vfb% للخلطات البيتومينية الرغوية عند كل نسبة ماء، الشكل(11) نستنتج من المخطط أن أكبر قيمة لنسبة الفراغات المليئة بالإسفلت 71.64% عند نسبة الماء 2.3% وهي قيمة مقبولة لتصميم الخلطة وأصغر قيمة 69.64% عند نسب الماء (2.5–3.2–3.6) % وهي قيمة أكبر من أكبر قيمة في تصميم الخلطة المرجعية والتي تبلغ 65.5 %وأن جميع القيم عند جميع نسب الماء هي قيم مقبولة في تصميم الخلطة البيتومينية وفق مارشال.



الشكل (11) قيم الفراغات المليئة بالإسفلت vfb% للخلطات البيتومينية الرغوية عند كل نسبة ماء

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1-تدل نتائج إرغاء البيتومين أنه كلما زادت نسبة الماء زادت نسبة التمدد ولكن بالمقابل يقل نصف عمر الإرغاء.

2-تبين من خلال تصميم الخلطة المرجعية الحارة والخلطات البيتومينية الرغوية بمحتوى مائي متغير، أن قيم ثبات الخلطات البيتومينية الرغوية بجميع نسب الماء المتغيرة فيها هي أعلى من قيم ثبات الخلطة البيتومينية الحارة.

3- أعلى قيمة ثبات وأقل انسياب في الخلطات البيتومينية الرغوية موضع بحثنا. كانت عند نسبة الماء 2.3% من محتوى البيتومين الرغوي .

4- نسبة الماء 2.3% في البيتومين الرغوي أعطت أعلى زيادة في ثبات الخلطات البيتومينة الرغوية إذ بلغت أكبر ب 22.47 % من ثبات الخلطة المرجعية .

5-أعطت الخلطات البيتومينية الرغوية بجميع نسب الماء فيها نسب فراغات هوائية مناسبة لتصميم الخلطة وبلغت أقل قيمة 4.3 % عند نسبة الماء 2.3% وهي قيمة ضمن الحدود المسموحة في التصميم.

6-أعلى قيمة لنسب الفراغات الهوائية في الخلطة الرغوية 4.7% وهي أقل من الفراغات الهوائية في الخلطة المرجعية 4.9%

8-أعطت النسبة 2.3% قيمة فراغات مليئة بالبيتومين 71.64% وهي قيمة مقبولة للتصميم وهي أكبر نسب الفراغات المليئة في الخلطة المرجعية البيتومينية الحاره.

9- من نتائج الفراغات الهوائية والفراغات المليئة من تصميم الخلطة الرغوية والخلطة المرجعية يتبين أن تصميم الخلطة البيتومينية الرغوية قد قلل من الفراغات الهوائية وزاد من نسبة الفراغات المليئة بالبيتومين.

10- تأثير الماء في تصميم الخلطات البيتومينية الرغوية واضح ومتفاوت عند جميع النسب.

11- يمكن تصميم خلطة بيتومينية رغوية بمحتوى بيتومين رغوي 2.5% ونسبة ماء 2.3% كنسبة مئوية من المحتوى البيتوميني ودرجة حرارة تسخين البيتومين 170 درجة مئوية للإرغاء وضغط ماء 4 بار وضغط هواء 3 بار حيث حسنت هذه القيم ثبات المزيج وانسيابه .

التوصيات

1-نوصي العمل على اختبار تغيير عوامل التصميم من محتوى بيتومين على ارغائه (وضغط الماء وضغط الهواء ودرجة حرارة تسخين البيتومين) للتوصل لدراسة معمقة لسلوك خلطات البيتومين الرغوي .

2-نوصي بذل جهود مع الجهات الحكومية للعمل على إنشاء مجابل خاصة بالبيتومين الرغوي.

3-نوصي بإنشاء مستودعات خاصة تتمتع بشروط تخزين مناسبة للخلطات الاسفلتية الرغوية لاستخدامها في التعبيد وأعمال الصيانة في جميع أوقات السنة دون قيود.

4-نوصي بإنشاء ساحات تجريبية لمد ودحي البيتومين الرغوي في جميع أوقات السنه ومراقبة أدائها.

References:

1- S. Khosravifar, D. Goulias, Ch.W. Schwartz, Laboratory Evaluation of Foamed Asphalt Stabilized Base Materials, *Geotechnical Special Publications*, GeoCongress 2012 (2012)

2- D. Palha, P. Fonseca et al., Recycled asphalt mixtures with foamed bitumen: an alternative to build ecofriendly road pavements. *AECEF2015* Proceedings, 8th Symposium, Universidade Porto – FEUP, 5/6 November 2015, (2015) 6p.

3-A. Woszuk, A. Zofka et al., Effect of zeolite properties on asphalt foaming, *Construction and Building Materials* 139, (2017) pp. 247-255.

4- Castedo-Franco, L.H. & Wood, L.E., 1983. **Stabilisation with Foamed Asphalt of Aggregate Commonly Used in Low Volume Road.** In: Low volume road: 3rd International Conference. Washington, DC: Transportation Research Board.Transportation Research Record: 898, pp 297-302

5- Abel F, 1978. **Foamed asphalt base stabilisation**, 6th Annual Asphalt Paving Seminar, Colorado State University.

6- Brennen, M., Tia, M., Altschaeffl, A.G. & Wood, L.E., 1983. **Laboratory Investigation of the Use of Foamed Asphalt for Recycled Bituminous Pavements**. In: Asphalt materials, mixtures, construction, moisture effects and sulfur. Washington, DC: Transportation Research Board. (Transportation Research Record; 911), pp 80-87.

7- Ruckel, P.J., Acott, S.M. & Bowering, R.H. 1982. Foamed-asphalt paving mixtures: preparation of design mixes and treatment of test specimens. In: **Asphalt materials, mixtures, construction, moisture effects and sulfur**. Washington, DC: Transportation Research Board

8- Bowering, R.H. & Martin, C.L. 1976. Performance of newly constructed full depth foamed bitumen pavements. In: **Proceedings of the 8 th Australian Road Research Board Conference**, held in Perth, Australia, 1976.

9- Maccarrone, S., Holleran, G., Leonard. D.J. & Hey, S. 1994. Pavement Recycling using Foamed Bitumen. In: **17th ARRB Conference**, Proceedings held in Gold Coast, Queensland, 15-19 August, 1994, Volume 17, Part 3, pp 349-365.