Effect Of Foaming Agent Content And Fineness Modulus Of Sand On Mechanical And Physical Properties Of Foamed Concrete

Dr. Ali Ibrahim Kheirbek*
Noura Sameer Joulak**

(Received 18 / 2 / 2024. Accepted 19 / 5 / 2024)

□ ABSTRACT □

Foamed concrete is categorized as a type of lightweight concrete, created by blending cement and sand with a foaming agent, that gives it the property of light weight compared to traditional concrete, it has various applications in construction field that differ from those of traditional concrete due to its varying densities.

This research aims to investigate the influence of foaming agent content (foaming agent to cement ratio) and sand fineness factor on the physical and mechanical properties of foamed concrete, where the focus lies on studying dry density and compressive strength, and this will be accomplished by creating mathematical relationships between them. Eight mixtures were prepared with a cement content of 350 kg/m^3, a water-to-cement ratio (W/C) of 0.56, and a sand-to-cement ratio (S/C) of 0.25. In the first four mixtures, the foaming agent to cement ratio was varied, using a single type of fine sand. In the next four mixtures, the foaming agent to cement ratio was fixed, while the type of sand varied based on the fineness modulus values, where Four sand types were used with different fineness modulus values. Various tests were conducted to determine certain physical and mechanical properties of foamed concrete, including wet density, dry density, and compressive strength.

At the conclusion of this research, The findings highlighted the influence of foaming agent content and sand fineness modulus on the dry density and compressive strength values of foamed concrete. Additionally, Experimental mathematical relationships linking these parameters were also formulated.

Keywords: Foamed Concrete, Foaming Agent, Lightweight Concrete, Fineness Modulus Of Sand.

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

* **Professor, Department of Construction Management and Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**
** **PhD Student, Department of Construction Management and Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. Nourasameerjoulak@gmail.com**

تأثير محتوى المادة الراغية ومعامل نعومة الرمل على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للبيتون الرغوي

د. علي ابراهيم خيربك*

نورا سمير جولاق**

(تاريخ الإيداع 18 / 2 / 2024. قُبِل للنشر في 19/ 5 / 2024)

□ ملخّص □

يعتبر البيتون الرغوي نوع من أنواع البيتون خفيف الوزن، ويعرف بأنه خليط من الإسمنت والرمل مع مادة راغية تمنحه خاصية خفة الوزن مقارنةً بالبيتون الكلاسيكي، وله استخدامات عديدة في مجال البناء تختلف عن استخدامات البيتون الكلاسيكي وذلك تبعاً لقيم كتله الحجمية المختلفة.

تهدف هذه الدراسة إلى دراسة تأثير محتوى المادة الراغية (نسبة مولد الرغوة إلى الإسمنت) ومعامل نعومة الرمل على الخصائص الفيزيائية للبيتون الرغوي والتي سندرس منها كتلته الحجمية الجافة، وعلى خصائصه الميكانيكية والتي سندرس منها مقاومة الضغط البسيط وذلك من خلال إيجاد علاقات رياضية تربط بينهما. تم تحضير ثمان خلطات من أجل محتوى إسمنت $350kg/m^3$، ونسبة ماء إلى إسمنت W/C=0.56 ونسبة رمل إلى إسمنت S/C=0.25، وتم في الخلطات الأربعة الأولى تغيير نسبة المادة الراغية إلى الإسمنت وذلك باستخدام نوع رمل واحد وهو الرمل الناعم، و تم في الخلطات الأربعة الثانية تثبيت نسبة المادة الراغية إلى الإسمنت وتغيير نوع الرمل تبعاً لقيم معاملات نعومته، حيث استخدمت أربعة أنواع من الرمل بقيم معاملات نعومة مختلفة، وتم إجراء اختبارات مختلفة لتحديد بعض الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للبيتون الرغوي كالكتلة الحجمية الرطبة والكتلة الحجمية الجافة ومقاومة الضغط البسيط.

تم في نهاية هذا البحث استنتاج تأثير كل من محتوى المادة الراغية ومعامل نعومة الرمل على قيم الكتل الحجمية الجافة وقيم مقاومات الضغط للبيتون الرغوي وإيجاد علاقات رياضية تجريبية تربط فيما بينها.

الكلمات المفتاحية: البيتون الرغوي، مولد الرغوة، بيتون خفيف الوزن، معامل نعومة الرمل.

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

* **أستاذ دكتور – قسم هندسة وإدارة التشييد – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.**

** **طالبة دكتوراه – قسم هندسة وإدارة التشييد – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.**

nourasameerjoulak@gmail.com

مقدمة:

كانت بدايات اكتشاف البيتون خفيف الوزن قديماً حيث أبدى الإنسان اهتماماً كبيراً بالمواد خفيفة الوزن خاصة أن البيتون الخفيف يقلل من الوزن الذاتي للمنشأة، فمن أهم عيوب البيتون التقليدي أنه ثقيل نسبياً حيث تكون نسبة الوزن الذاتي للعناصر الإنشائية للمبنى إلى باقي الحمولات المؤثرة هي نسبة عالية [2]، وبالتالي تم العمل على تخفيض وزن البيتون العادي إما باستخدام حصويات خفيفة الوزن ويسمى ببيتون الحصويات الخفيفة Lightweight aggregate concrete أو عن طريق إيجاد فراغات بين الحصويات ويسمى بالبيتون الخالي من المواد الناعمة No–fines concrete أوfinless concrete أو عن طريق إيجاد فراغات داخل العجينة الإسمنتية ويسمى بالبيتون المهوى أو الرغوي Foamed/Aerated concrete [3,5,6]، إن البيتون الرغوي هو نوع من أنواع البيتون الخفيف حيث يعرف بأنه خليط من الإسمنت والرمل والماء والهواء[1]، و يتم إنتاجه بتوليد فقاعات هوائية داخله أثناء عملية الخلط وهذا ما يجعله أخف وزناً وأقل كتلة حجمية من البيتون التقليدي بحوالي 50–80% [2]. وإن هذه الكتلة الحجمية المنخفضة التي يتمتع بها البيتون الرغوي تمنحه ميزة خفة الوزن وهذا ما يجعله مادة مرغوبة في مجال البناء حيث أن استخدام البيتون الرغوي يخفض وزن المبنى (المنشأة) بحوالي 25% وقد يخفض من وزن المنشأة في بعض الأوقات بحدود 30–40% وهذا ما يؤدي إلى تقليل أبعاد العناصر الإنشائية الحاملة للبناء مثل حجم الأساس أو الجائز أو مقاطع الأعمدة أو سماكة الجدران الحاملة وما إلى ذلك، كما أنه يؤدي إلى تخفيض نسب التسليح في العناصر الإنشائية الحاملة وإن هذا يعتبر أمر مفيد اقتصادياً [1,2,3]، ويتم إنتاج الفقاعات الهوائية داخل البيتون الرغوي إما باستخدام مواد تحدث تفاعلات كيميائية مع العجينة الإسمنتية فتنطلق الغازات نتيجة للتفاعل أو باستخدام مواد مضافة للبيتون حابسة للهواء أو باستخدام مواد راغية حيث يتم التحريك الميكانيكي للهواء مع مولد رغوة مخفف بالماء بنسبة معينة لتوليد الرغوة [11]، بالإضافة إلى خفة الوزن فإن البيتون الرغوي يمتاز بخصائص أخرى هامة منها العزل الحراري والعزل الصوتي، كما يمتلك قدرة عالية على مقاومة الصقيع ومقاومة الحريق ومقاومة الزلازل وبالتالي تسارع استخدام البيتون الرغوي الذي يدخل الهواء في تركيبه بشكل كبير في السنوات العشرة الأخيرة [1,3,4,5,6].

نلاحظ وجود نقاط ضعف في ضبط العلاقة بين الكتلة الحجمية ومقاومة البيتون الرغوي على الضغط، خاصةً أن البارامترين الأساسيين لتصميم خلطة البيتون الرغوي هما الكتلة الحجمية المنخفضة والمقاومة العالية إذ أن العلاقة بين الكتلة الحجمية المنخفضة والمقاومة العالية علاقة عكسية، كما نلاحظ ندرة الأبحاث في سوريا التي تدرس تأثير تراكيب الخلطة كتأثير نسبة المادة الراغية إلى الإسمنت وتأثير معامل نعومة الرمل على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للبيتون الرغوي، وغياب وجود نموذج رياضي يربط بين بارامترات البيتون الرغوي بما فيها المقاومة على الضغط و الكتلة الحجمية، خاصةً من أجل عينات بيتون رغوي تحقق قيم كتل حجمية جافة منخفضة تحت $1000kg/m^3$ إذ أن الكتلة الحجمية للبيتون الرغوي في سوريا غالباً ما تتجاوز $1000kg/m^3$، وبالتالي فإن نسبة وزنه إلى حجمه تعتبر كبيرة وهذا ما يشكل أحمال كبيرة إضافية على المنشأة خاصةً إذا ما استخدم في صب ميول الأسطح، وقد نضطر أحياناً إلى صب طبقات ميول بسماكات كبيرة وبالتالي فإن البيتون الرغوي المصنع بقيم كتل حجمية كبيرة سيؤدي إلى تشكيل حمل كبير على البناء نظراً لوزنه الكبير[1,2].

أهمية البحث وأهدافه:

هدف البحث:

يهدف البحث إلى دراسة تأثير كل من محتوى المادة الراغية (نسبة مولد الرغوة إلى الإسمنت f/c) ومعامل نعومة الرمل MF على الخصائص الفيزيائية للبيتون الرغوي والتي سندرس منها كتلته الحجمية الجافة ρ_d وعلى خصائصه الميكانيكية والتي سندرس منها مقاومة الضغط البسيط R_C، كما يهدف إلى إيجاد علاقات رياضية تربط بينهما من الشكل:

$$\mathbf{R_C} = f(\mathbf{F/C}, \mathbf{MF})$$
$$\boldsymbol{\rho_d} = f(\mathbf{F/C}, \mathbf{MF})$$
$$\boldsymbol{\rho_d} = f(\mathbf{R_C})$$
$$\boldsymbol{\rho} = f(\boldsymbol{\rho_d})$$

حيث:

R_C: المقاومة على الضغط البسيط للبيتون الرغوي

F/C: نسبة المادة الراغية إلى الإسمنت

MF: معامل نعومة الرمل

ρ_d: الكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي

ρ: الكتلة الحجمية الرطبة للبيتون الرغوي

وذلك من أجل عينات بيتون رغوي ذات قيم كتل حجمية جافة أقل من $1000kg/m^3$ وذات مقاومات مقبولة على الضغط.

أهمية البحث:

تكمن أهمية البحث في فهم أعمق لتركيب خلطة البيتون الرغوي الذي يحقق قيم كتل حجمية جافة منخفضة أقل من $1000kg/m^3$ مع المحافظة على مقاومات مقبولة على الضغط، وذلك من خلال دراسة تأثير بعض تراكيب الخلط على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للبيتون الرغوي مما يساهم في ضبط تكنولوجيا صناعة البيتون الرغوي وتوطين إنتاجه في سوريا وفقاً للمواصفات القياسية العالمية لاستخدامه بأغراض العزل الحراري وأعمال صب طبقات الميول وتشييد جدران المنشآت، وهذا ما يوفر تقنيات جديدة واقتصادية في التشييد تتماشى مع التطور التكنولوجي العالمي في مجال مواد البناء.

4. مفهوم البيتون الرغوي وطرق إنتاجه وأنواع مولدات الرغوة وفقاً للمراجع:

يُصنف البيتون الرغوي على أنه نوع من أنواع البيتون خفيف الوزن [3,4,7,8]، لكن يُعتبر مصطلح البيتون الرغوي بحد ذاته مصطلح مضلل وذلك لأنه لا يحوي حصويات كبيرة، حيث أنه يحتوي فقط على الرمل والإسمنت ومواد رغوية خفيفة الوزن، لذلك يجب توصيف البيتون الرغوي بشكل أكثر دقة على أنه مونة رغوية [1,2,3,11].

وكقاعدة عامة يوصف البيتون الرغوي أنه حاوي على الهواء بنسبة تزيد عن 25% وهذا ما يميزه عن المواد التي يدخل في تركيبها الهواء بشكل كبير[1]، وفي مراجع أخرى يوصف البيتون الرغوي على أنه مادة إسمنتية تحوي رغوة على الأقل بنسبة 20% حجماً [12]، وهذا ما يميز البيتون الرغوي عن البيتون المهوى الذي تتشكل فيه الفقاعات الهوائية نتيجة التفاعل الكيميائي بين مسحوق الألمنيوم و هيدروكسيد الكالسيوم والقلويات الأخرى المتشكلة من إماهة الإسمنت، وعن البيتون الحابس للهواء الذي يحوي على حجم أقل بكثير من الهواء الموجود في البيتون الرغوي [13] .

بالنسبة لمعظم الاستخدامات الشائعة يتراوح محتوى الهواء في البيتون الرغوي عادةً بين 40% إلى 80% من الحجم الكلي، كما أن حجم فقاعات الهواء يختلف حيث تتراوح أقطار الفقاعات بين [0.1−1.5]mm ولكن يمكن أن تكون أقطار الفقاعات الهوائية أكبر من ذلك نتيجة الالتحام مع بعضها البعض[13].

يوجد نوعان من مولدات الرغوة التي تستخدم لتوليد الرغوة في البيتون الرغوي وهما مولدات رغوة طبيعية (أو بروتينية) ومولدات رغوة اصطناعية (أو كيميائية) [1,2,3]، حيث أن مولدات الرغوة البروتينية تم اكتشافها بفضل المصريين والرومان الذين استخدموا دماء الحيوانات لإدخال الهواء إلى خلطات البيتون التقليدية حيث أن المصطلح العام لهذا النوع من مولدات الرغوة هو horn & hoof أي "قرن وحافر" والذي يعتمد –كما يوضح اسمه– على المنتجات الحيوانية المشتقة [1]، كما يمكن أن تصنع مولدات الرغوة الطبيعية من المنتجات النباتية [2]، ومن ثم تم تركيب مولدات الرغوة الاصطناعية الشائعة والتي هي مشتقة من مواد كيماوية يصنعها الإنسان كتلك المواد التي تستخدم في صناعة الشامبو ومساحيق الصابون [1] حيث أن مولدات الرغوة الصناعية هي مواد محبة جداً للماء وتنحل بسهولة فيه مما يؤدي إلى تشكيل الفقاعات الهوائية [6].

تعتبر مولدات الرغوة الاصطناعية أسهل من ناحية التعامل معها كما أنها تخزن لفترات أطول وأقل تأثراً بدرجات الحرارة وأرخص سعراً بشكل عام وتتطلب طاقات أقل لإنتاج رغوة عالية الجودة إلا أنها لا يمكن أن تصل إلى أداء مولدات الرغوة البروتينية حيث أنه يوجد فرق في مقاومتهما يصل إلى أكثر من 80% [1].

إن البيتون الرغوي في الأساس هو مزيج من الرمل والإسمنت والماء (المزيج الأساسي) ومن الرغوة المسبقة التشكيل والتي هي بحد ذاتها مزيج من عامل مولد الرغوة ومن الماء والهواء حيث أن إضافة الرغوة مسبقة التشكيل الى المزيج الأساسي يؤدي إلى توليد فراغات هوائية في البنية المجهرية للمزيج الأساسي وبالتالي فإنه يخفض الكتلة الحجمية للمواد الأساسية، وكلما أضيفت الرغوة بكمية أكبر كلما حصلنا على مادة أخف وزناً [1,3,4,7].

إن الرغوة التي تضاف إلى المزيج الأساسي هي بنفس القدر من الأهمية للمزيج الأساسي، ويجب أن تبقى مستقرة وثابتة وألا تنهار أثناء الضخ والصب وبفترة المعالجة، وإن هذا الاشتراط يعتبر مهماً خصوصاً عندما تصبح الرغوة هي المكون المسيطر في خلطة البيتون الرغوي أي بمعنى آخر عندما تشكل الرغوة أكثر من 50% من مزيج المواد الأساسية مع الرغوة، وهذا ما يحدث عادةً عندما تكون الكتلة الحجمية للبيتون الرغوي حوالي $1100kg/m^3$، أما إذا احتجنا لمواد رغوية تنتج بيتون رغوي بكتل حجمية أقل من تلك فيجب تصنيع الرغوة واستخدامها بعناية أكبر[1,8].

كما يمكن أن تستخدم بعض الإضافات كبدائل للإسمنت مثل الرماد المتطاير pfa وخبث الأفران ggbs في خلطة البيتون الرغوي لتضاف جنباً إلى جنب مع الرمل بالإضافة إلى مجموعة من المواد المالئة مثل الفيلر الكلسي [1,3]، و يمكن أن يستخدم هباب السيليس silica fume أو ألياف البولي بروبيلين polypropylene fiber كإضافة أيضاً [3,7].

بالإضافة إلى ما سبق، يعتبر البيتون الرغوي مادة ذات بنية خلوية أو مسامية متجانسة ويمكن أن يصنف على أنه مادة ذات بنية خلوية مغلقة closed−cell structures وهذا ما يساعده على العزل الحراري[4]، حيث أنه بالعودة إلى المرجع [9] فإن المواد الخلوية (المسامية) ذات البنية الخلوية المغلقة تعتبر مواد عازلة حرارياً، وبشكل عام فإن البيتون الرغوي يمكن أن يستخدم في أغراض العزل إذا حقق قيم كتل حجمية أقل من 1450kg/m3 ومقاومة منخفضة تصل إلى 0.5Mpa [10].

إن الكتلة الحجمية للبيتون الرغوي تتراوح بشكل عام بين $[200-1800]kg/m^3$، وإن هذه القيم أقل كثيراً من الكتلة الحجمية للبيتون التقليدي التي تتراوح عادةً بين $[2200-2500]kg/m^3$، وعلى وجه الخصوص فإن العناصر التي

تمتلك كتل حجمية أكبر من $1600Kg/m^3$ تعتبر عناصر إنشائية حاملة في المباني بينما العناصر التي تمتلك كتل حجمية أقل فهي تستخدم بشكل رئيسي كعناصر غير حاملة مثل الحشوات والقواطع الداخلية (الجدران الداخلية) [3,4,7]، وبشكل عام يتم التحكم بالكتلة الحجمية للبيتون الرغوي عن طريق التحكم بنسبة الرغوة المدخلة إلى المونة الإسمنتية [6] .

كما ذكر سابقاً فإن إدخال فراغات الهواء إلى البيتون الرغوي يمكن أن يتم بعدة طرق، ومن هذه الطرق إضافة مسحوق الألمنيوم إلى الملاط الإسمنتي مما ينتج عنه غاز الهيدروجين حيث يتفاعل مسحوق الألمنيوم مع هيدروكسيد الكالسيوم والماء مطلقاً غاز الهيدروجين والذي يقوم بدوره بإرغاء المزيج الأساسي ليضاعف حجمه (مع فقاعات هوائية يصل قطرها إلىInch 1/8)، وفي نهاية عملية الإرغاء يتسرب غاز الهيدروجين إلى الغلاف الجوي ليتم استبداله بالهواء، وفي هذه الطريقة وبعد الانتهاء من عملية الصب وحدوث التجمد للإسمنت تتم معالجة العينات تحت البخار بدرجة حرارة تتراوح من 180 إلى 210 درجة مئوية وفي ضغط عالٍ جداً لفترة محددة من الزمن لإنتاج بنيتها النهائية، تم استخدام هذه الطريقة لإنتاج البيتون الرغوي في عشرينيات القرن الماضي في الدول الاسكندنافية ولا سيما السويد والدنمارك حيث تعتبر هذه الطريقة من أقدم الوسائل الحديثة لإنتاج البيتون الرغوي، وفي الوقت الحاضر يتم إنتاج البيتون الرغوي عن طريق إضافة مولدات الرغوة إلى المونة الإسمنتية وقد بدأ استخدام هذه الطريقة منذ عام 1980 [11] حيث أنه هنالك طريقتان أساسيتان لإنتاج البيتون الرغوي باستخدام مولدات الرغوة وهما طريقة الرغوة المسبقة التشكيل pre-foaming method وطريقة الخلط الميكانيكي المضمَّن inline method [1] أو ما تسمى ب mix-foaming method [8,11]، حيث أنه من خلال كلي الطريقتين يمكن أن يتم التحكم بعملية الخلط وبجودة البيتون الرغوي[8].

إن طريقة الرغوة مسبقة التشكيل تتمثل بتشكيل الرغوة بشكل مستقل عن المزيج الأساسي حيث يتم خلط مولد الرغوة مع كمية كافية من الماء لتشكيل الرغوة ومن ثم تضاف هذه الرغوة إلى المزيج الأساسي الذي يتكون من الإسمنت والرمل وماء الخلط حيث يتم المزج بينهما بشكل كامل، وبشكل عام يمكن أن نقسم مراحل إنتاج البيتون الرغوي بطريقة الرغوة مسبقة التشكيل إلى ثلاث مراحل: (1) تحضير المونة الإسمنتية (2) تحضير الرغوة من خلال مزج مولد الرغوة مع كمية كافية من الماء (3) مزج الرغوة مع المونة الإسمنتية عن طريق جهاز ضاغط للهواء لتوليد المزيد من الفقاعات الهوائية [11]، أما بالنسبة لطريقة الخلط الميكانيكي فتنفذ عن طريق مزج مولد الرغوة مباشرةً مع المزيج الأساسي الذي يتكون من الإسمنت والرمل والماء الكلي [1,8]، وفي كلي الطريقتين يجب أن تكون الرغوة ثابتة ومستقرة لتكون قادرة على مقاومة ضغط الملاط الإسمنتي حتى حدوث التجمد (زمن الشك الأولي) للإسمنت [8]، ومن أجل محتوى هواء معين فإذا كانت الفقاعات الهوائية كبيرة جداً فإن خلطة البيتون الرغوي ستكون أقل نجاحاً وذلك لأن الفقاعات الهوائية الكبيرة أقل استقراراً من الصغيرة وبالتالي فإنها أكثر عرضة للكسر أثناء خلط أو نقل أو صب البيتون الرغوي، حيث أنه إذا تم فقدان الكثير من تلك الفقاعات الهوائية فإننا لن نحصل على النتائج المتوقعة من خلطة البيتون الرغوي [11].

يفضل استخدام طريقة الرغوة مسبقة التشكيل على استخدام طريقة الخلط الميكانيكي وذلك لما تتمتع به طريقة الرغوة مسبقة التشكيل من مزايا تتلخص بمتطلبات أقل لمولد الرغوة وبتحقيق علاقة وثيقة بين كمية مولد الرغوة المستخدم ومحتوى الهواء في الخلطة [7].

طرائق البحث ومواده:

يتبع هذا البحث المنهج التجريبي حيث سيتم تصنيع عينات من البيتون الرغوي في مخبر تجريب المواد في كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين عن طريق خلط مواد البناء المستخدمة لصناعة البيتون الرغوي، ومن ثم القيام بالتجارب المخبرية على العينات المصنعة عن طريق مجموعة من التجهيزات المتوفرة في المخبر، حيث تمت الاستفادة من بعض الدراسات والتجارب التي تناولت دراسة البيتون الرغوي وإنتاجه، كما يتبع هذا البحث المنهج التحليلي إذ سيتم القيام بتحليل النتائج عن طريق الاستعانة بالبرامج التقنية حيث سيتم إيجاد تأثير محتوى المادة الراغية ومعامل نعومة الرمل على كل من الكتلة الحجمية الجافة ومقاومة الضغط الميكانيكية لعينات البيتون الرغوي وإيجاد علاقات رياضية تربط بينها.

وفيما يلي سنستعرض المواد المستخدمة في تحضير خلطات البيتون الرغوي وخواصها:

1- إسمنت بورتلاندي عادي أسود نوع I : صنف 32.5، صنع معمل إسمنت طرطوس ويوضح الجدول (1) الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للإسمنت المستخدم في هذا البحث.

الجدول (1) يبين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للإسمنت

الخصائص الفيزيائية		نتائج الاختبار
النعومة (cm^2/g)		3100
زمن بداية الأخذ (min)		120
زمن نهاية الأخذ (min)		220
انتفاخ لوشاتولييه (mm)		1
الخصائص الميكانيكية		**نتائج الاختبار(Mpa)**
مقاومة الضغط لعينات موشورية 4*4*16 cm	عمر 7 أيام	23.9
	عمر 28 يوم	37
مقاومة الانعطاف لعينات موشورية 4*4*16 cm	عمر 7 أيام	7
	عمر 28 يوم	9.3

2- ماء الخلط: ماء قابل للشرب.

3- رمل: تم استخدام أربعة أنواع للرمل وتم تصنيفها تبعاً لقيم معاملات النعومة، وسنستعرض فيما يلي أنواعها ونتائج تجارب التحليل الحبي والمكافئ الرملي لكل نوع:

3-1 رمل خشن من البسيط

3-2 رمل متوسط الخشونة من البسيط

3-3 رمل ناعم من اللاذقية

3-4 رمل متوسط النعومة (تم تحضيره من خلط الرمل الناعم مع الرمل متوسط الخشونة كما سنشرح لاحقاً)

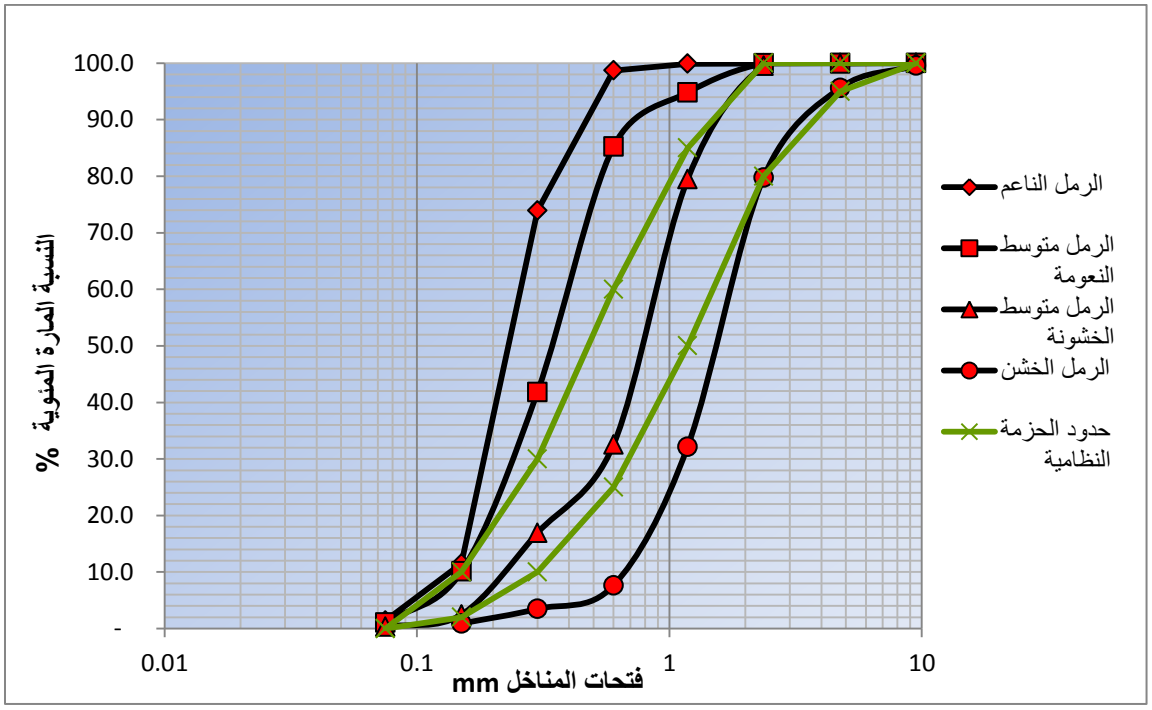
تم إجراء تجربة التحليل الحبي لأنواع الرمل الأربعة المذكورة ويبين الجدول (2) النسبة المئوية المارة لكل نوع:

الجدول (2) يبين نتائج تجارب التحليل الحبي لأنواع الرمل الأربعة المستخدمة

فتحة المنخل (mm)	النسبة المارة للرمل الناعم (من اللاذقية) %	النسبة المارة للرمل متوسط النعومة %	النسبة المارة للرمل متوسط الخشونة (من البسيط) %	النسبة المارة للرمل الخشن(من البسيط) %
9.5	100.0	100.0	100.0	99.6
4.75	100.0	100.0	99.9	95.6
2.36	99.9	99.9	99.5	79.8
1.18	99.9	94.8	79.5	32.2
0.6	98.7	85.2	32.5	7.6
0.3	73.9	41.8	16.9	3.5
0.15	11.5	10.1	2.5	0.9
0.075	1.4	1.0	0.3	0.0
القعر	0	0	0	0

نستنتج من الجدول بأن معامل نعومة الرمل الخشن MF=3.80، وأن معامل نعومة الرمل متوسط الخشونة MF=2.69، وأن معامل نعومة الرمل الناعم MF=1.16، ومن الجدير بالذكر أن الرمل متوسط النعومة تم تحضيره من خلط الرمل متوسط الخشونة (من البسيط) ذو معامل النعومة MF=2.69 ومن الرمل الناعم (من اللاذقية) ذو معامل النعومة MF=1.16، حيث استخدمت نسب المزج التالية 9.2% للرمل متوسط الخشونة (من البسيط) و90.8% للرمل الناعم (من اللاذقية) وذلك للحصول على رمل متوسط النعومة بمعامل نعومة يساوي MF=1.70، وقد تم إجراء تجربة التحليل الحبي لهذا الرمل للتأكد تجريبياً من صحة نسب المزج ومن قيمة معامل النعومة ونستنتج من الجدول بأن قيمة معامل نعومة الرمل التجريبية هي MF=1.68 وهي قريبة جداً من القيمة الحسابية.

ويبين الشكل (1) منحنيات التدرج الحبي لأنواع الرمل الأربعة المستخدمة وحدود الحزمة النظامية حسب المواصفة الأمريكية ASTM:



الشكل (1) يبين منحنيات التدرج الحبي لأنواع الرمل المستخدمة وحدود الحزمة النظامية حسب المواصفة الأمريكية ASTM

نستنتج من الشكل (1) والجدول (2) أن القطر الأعظمي للرمل الخشن هو D_{max}=4mm وأن القطر الأعظمي للرمل متوسط الخشونة هو D_{max}=1.8mm وأن القطر الأعظمي للرمل متوسط النعومة هو D_{max}=0.8mm وأن القطر الأعظمي للرمل الناعم هو D_{max}=0.5mm وتعتبر هذه النتائج منطقية.

كما تم إجراء تجربة المكافئ الرملي لأنواع الرمل الثلاثة التي تم إحضارها إلى المخبر للتأكد من نظافة الرمل وتحديد كمية الشوائب والمواد الناعمة كنسبة حجمية وكانت النتائج كما يبين الجدول (3):

الجدول (3) يبين قيم المكافئ الرملي ES لأنواع الرمل التي تم إحضارها إلى المخبر

نوع الرمل	المكافئ الرملي ES
رمل خشن من البسيط	98.42%
رمل متوسط الخشونة من البسيط	95.47%
رمل ناعم من اللاذقية	88.11%

نلاحظ من الجدول أن قيم المكافئ الرملي للأنواع الثلاثة من الرمل أكبر من 80% وبالتالي نعتبر أن أنواع الرمل الثلاثة نظيفة جداً ولا داعي لغسلها قبل البدء بوضعها ضمن خلطة البيتون الرغوي.

4- المادة الراغية Foaming Agent:

إن مولد الرغوة المستخدم هو مولد رغوة صناعي ويحمل الاسم التجاري "Kut Plast LWC Foaming Agent" وهو يتوافق مع معايير ASTM C-86، وهو سائل شفاف اللون مائل إلى البني يمتزج بالماء بشكل فوري، وثقله النوعي يساوي [1.02 – 1.04] في درجة حرارة 25 درجة مئوية، ودرجة حرارة تجمده [3-5] درجة مئوية، كما يمكن

استخدامه مع كل أنواع الإسمنت البورتلاندي، وقبل الاستعمال يجب التخفيف بمئة جزء من الماء مقابل جزء واحد من مولد الرغوة "Kut Plast LWC".

تصميم خلطة البيتون الرغوي:

تم تصميم أربع خلطات من أجل محتوى إسمنت $350kg/m^3$، ونسبة ماء إلى إسمنت W/C=0.56 ونسبة رمل إلى إسمنت S/C=0.25 ، وتم تغيير نسبة المادة الراغية إلى الإسمنت حيث تم إعطائها القيم التالية:

F/C={0.8, 1.1, 1.5, 2}% بهدف معرفة تأثير محتوى المادة الراغية على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للبيتون الرغوي، حيث تم صب هذه الخلطات الأربعة الأولى باستخدام نوع رمل واحد وهو الرمل الناعم ذو معامل النعومة MF=1.16، كما تم تصميم أربع خلطات أخرى بمحتوى إسمنت $350kg/m^3$، ونسبة ماء إلى إسمنت W/C=0.56 ونسبة رمل إلى إسمنت S/C=0.25، ونسبة مادة راغية إلى إسمنت ثابتة وهي F/C=0.011 وتم تغيير نوع الرمل في كل خلطة من الخلطات الأربعة المذكورة سابقاً تبعاً لقيم معاملات نعومتها، حيث استخدمت أربعة أنواع من الرمل بقيم معاملات النعومة التالية: MF={1.16, 1.70, 2.69, 3.80} بهدف معرفة تأثير معامل نعومة الرمل على خصائص البيتون الرغوي.

ويبين الجدول (4) والجدول (5) نسب الخلط المستخدمة وقيم معاملات النعومة لأنواع الرمل المستخدمة لخلطات البيتون الرغوي:

الجدول (4) يبين نسب الخلط المستخدمة وقيم معاملات النعومة للرمل المستخدم للخلطات الأربعة الأولى

رقم الخلطة	وزن الإسمنت (g)	وزن الماء (g)	وزن مولد الرغوة (g)	وزن الرمل (g)	نسبة الماء إلى الإسمنت W/C	نسبة المادة الراغية إلى الإسمنت F/C	نسبة الرمل إلى الإسمنت S/C	قيمة معامل نعومة الرمل MF
1	5625	3150	45	1406	0.56	0.008	0.25	1.16
2	5625	3150	61.8	1406	0.56	0.011	0.25	1.16
3	5625	3150	84.3	1406	0.56	0.015	0.25	1.16
4	5625	3150	112.5	1406	0.56	0.02	0.25	1.16

الجدول (5) يبين نسب الخلط المستخدمة وقيم معاملات النعومة للرمل المستخدم للخلطات الأربعة الثانية

رقم الخلطة	وزن الإسمنت (g)	وزن الماء (g)	وزن مولد الرغوة (g)	وزن الرمل (g)	نسبة الماء إلى الإسمنت W/C	نسبة المادة الراغية إلى الإسمنت F/C	نسبة الرمل إلى الإسمنت S/C	قيمة معامل نعومة الرمل MF
5	5625	3150	61.8	1406	0.56	0.011	0.25	1.16
6	5625	3150	61.8	1406	0.56	0.011	0.25	1.70
7	5625	3150	61.8	1406	0.56	0.011	0.25	2.69
8	5625	3150	61.8	1406	0.56	0.011	0.25	3.80

5- طريقة تحضير عينات الاختبار:

تم استخدام المواد الموصفة سابقاً لتحضير وصب عينات البيتون الرغوي حيث تم صب جميع الخلطات باتباع طريقة الرغوة مسبقة التشكيل لإنتاج البيتون الرغوي وفق التسلسل التالي:

1- تم خلط الماء مع مولد الرغوة وذلك بحسب القيم الواردة في الجدول لكل خلطة بعد وزن كل من الماء ومولد الرغوة بدقة على الميزان الالكتروني، حيث تم الخلط لمدة 5 دقائق بواسطة محرك كهربائي يتحرك بسرعة دورانية وذلك لتشكيل الرغوة كما يبين الشكل (2):

الشكل (2) تشكيل الرغوة اللازمة بطريقة الرغوة مسبقة التشكيل

2- ومن ثم تم وزن كل من الإسمنت والرمل بدقة وبحسب القيم الواردة في الجدول لكل خلطة بشكل منفصل وتم إضافة الرغوة المشكلة سابقاً إلى الإسمنت وخلطها لمدة ثلاث دقائق ومن ثم تم إضافة الرمل وتم الخلط لمدة ثلاث دقائق حتى الحصول على خليط متجانس من البيتون الرغوي ذي قوام مائع كما يظهر الشكل (3):

الرغوي الطري بعد الانتهاء من عملية الخلط

الشكل (3) يوضح قوام البيتون الرغوي الطري بعد الانتهاء من عملية الخلط

3- تم تجهيز قوالب الصب الفولاذية موشورية الشكل بأبعاد $4*4*16\ cm^3$ وتنظيفها وتزييتها ومن ثم تم صب 6 عينات من البيتون الرغوي الطري من كل خلطة على حده حيث تم ملء القوالب دفعة واحدة بعناية وتم تسوية سطوحها، ويظهر الشكل (4) شكل عينات البيتون الرغوي الطري بعد صبها لإحدى الخلطات:

الشكل (4) يوضح شكل عينات البيتون الرغوي الطري بعد صبها لإحدى الخلطات

4- تم ترك العينات في القوالب لمدة 24 ساعة ومن ثم تم فك القوالب وتسمية العينات ووضعها في الهواء في جو رطب فوق شبك معدني موضوع فوق حوض مائي، ويظهر الشكل (5) شكل عينات البيتون الرغوي المتصلب لأحد القوالب بعد الفك:

الشكل (5) يوضح شكل عينات البيتون الرغوي المتصلب بعد الفك

النتائج والمناقشة:

أجريت مجموعة من الاختبارات على عينات البيتون الرغوي المحضرة من الخلطات البيتونية المختلفة، وسوف نستعرضها كما يلي:

أولاً: الكتلة الحجمية الجافة Dry density:

تعتبر الكتلة الحجمية من أهم الخصائص الفيزيائية التي يتمتع بها البيتون الرغوي، حيث تم قياس كتل العينات بعد فكها ومعالجتها لمدة 28 يوم لحساب قيم كتلها الحجمية الرطبة Wet density، ومن ثم تم وضعها في الفرن لمدة 24 ساعة وبدرجة حرارة 110 ° C، ومن ثم تم إخراجها من الفرن وقياس كتلها الجافة لحساب كتلها الحجمية الجافة.

ثانياً: المقاومة على الضغط البسيط Compressive strength:

تعتبر المقاومة على الضغط من أهم الخصائص الميكانيكية المميزة للبيتون الرغوي، وقد أجري هذا الاختبار بعد أن تم إجراء اختبار المقاومة على الشد بالانعطاف Tensile strength على العينات الموشورية المذكورة مسبقاً حيث قسمت كل عينة إلى جزأين، ومن ثم تم إجراء اختبار الضغط البسيط على كل جزء باستخدام جهاز الكسر المتوفر في مخبر تجريب المواد في كلية الهندسة المدنية، حيث وضع كل جزء بين فكي جهاز الكسر وتم تطبيق قوة ضغط ثابتة عليه حتى الانهيار، ويبين الشكل (6) اختبار الشد بالانعطاف لإحدى عينات البيتون الرغوي واختبار الضغط البسيط لإحدى جزأي العينة المختبرة:

الشكل (6) يوضح اختبار الشد بالانعطاف واختبار الضغط البسيط لإحدى عينات البيتون الرغوي

يبين الجدول (6) نتائج اختبارات الخلطات البيتونية المدروسة، حيث تمثل كل قيمة لمقاومة الضغط متوسط المقاومة على الضغط لست عينات متماثلة لخلطة واحدة، أما بالنسبة لقيم مقاومات الشد بالانعطاف فإن كل قيمة تمثل متوسط المقاومة على الشد بالانعطاف لثلاث عينات متماثلة لخلطة واحدة وكذلك الأمر بالنسبة للكتلة الحجمية الرطبة والجافة.

الجدول (6) يبين نتائج اختبارات الخلطات البيتونية المدروسة

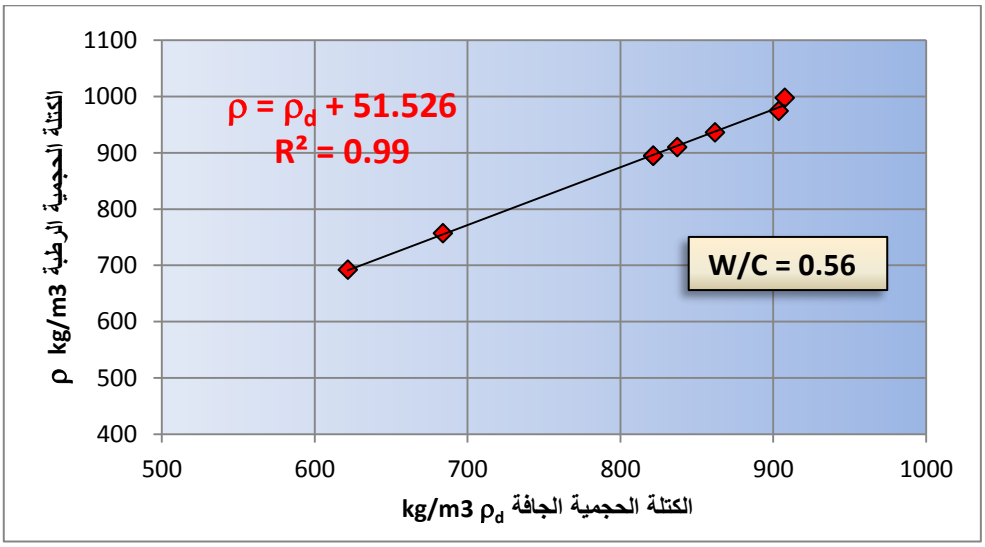
رقم الخلطة	الكتلة الحجمية الرطبة (kg/m^3)	الكتلة الحجمية الجافة (kg/m^3)	مقاومة الضغط (Mpa)	مقاومة الشد بالانعطاف (Mpa)
1	909	837	2.12	0.46
2	894	821	1.98	0.43
3	756	683	1.59	0.27

0.24	1.21	621	691	**4**
0.43	1.98	821	894	**5**
0.74	2.89	861	936	**6**
0.96	4.22	903	973	**7**
1.10	4.79	907	997	**8**

مناقشة نتائج الكتلة الحجمية الجافة:

1- العلاقة بين الكتلة الحجمية الجافة ρ_d والكتلة الحجمية الرطبة ρ للبيتون الرغوي:

تراوحت قيم الكتل الحجمية الرطبة للخلطات المدروسة في المجال kg/m^3 [691-997]، كما تراوحت قيم الكتل الحجمية الجافة لها في المجال kg/m^3 [621-907]، ويبين الشكل (7) المعادلة التي تربط بين الكتلة الحجمية الجافة ρ_d والكتلة الحجمية الرطبة ρ للبيتون الرغوي وهي معادلة خطية من الدرجة الأولى، بمعامل ارتباط $R^2=0.99$، كما يظهر من المنحني أن العلاقة بينهما خطية والتناسب بينهما طردي بحيث كلما ازدادت الكتل الحجمية الرطبة للعينات تزداد الكتل الحجمية الجافة لها.

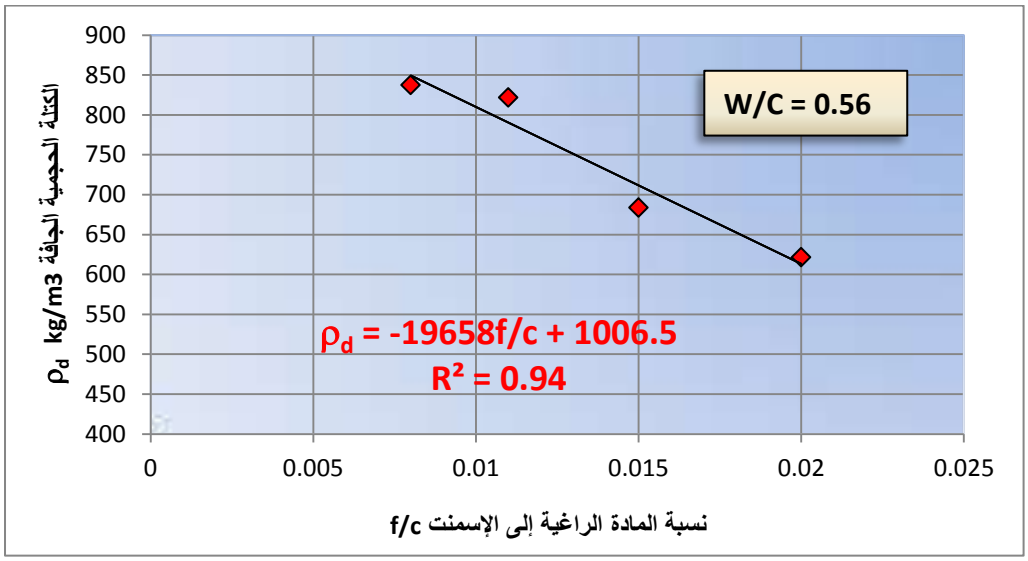


الشكل (7) العلاقة بين الكتلة الحجمية الجافة ρ_d والكتلة الحجمية الرطبة ρ للبيتون الرغوي

2- تأثير نسبة المادة الراغية إلى الإسمنت f/c على الكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي ρ_d:

أدى إضافة محتوى المادة الراغية المعتمدة في هذه الدراسة إلى تخفيض الكتلة الحجمية للبيتون الرغوي بشكل واضح، فقد بينت النتائج انخفاض الكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي من $837kg/m^3$ إلى $621kg/m^3$ أي أن الكتلة الحجمية الجافة انخفضت بمقدار 25.8% وذلك عند زيادة محتوى المادة الراغية من 0.8% إلى 2%، ويبين الشكل (8) العلاقة التي تربط بين الكتلة الحجمية الجافة ρ_d ونسبة المادة الراغية إلى الإسمنت f/c بمعامل ارتباط $R^2=0.94$، ويظهر من المنحني أن التناسب بينهما عكسي إذ كلما ازداد محتوى المادة الراغية إلى الإسمنت انخفضت

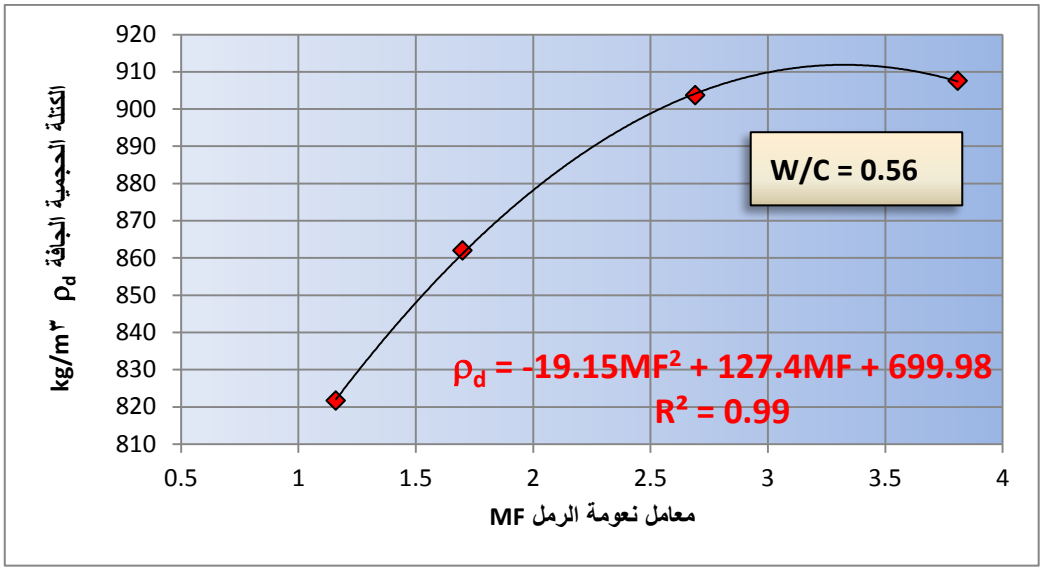
قيمة الكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي، وهذا منطقي لأنه كلما ازدادت كمية مولد الرغوة يزداد حجم الفراغات الهوائية المتشكلة في الخلطة وهذا ما يؤدي إلى انخفاض كتلتها الحجمية.



الشكل (8) العلاقة بين نسبة المادة الراغية إلى الإسمنت f/c والكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي ρ_d

3- تأثير معامل نعومة الرمل MF على الكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي ρ_d:

لوحظ ارتفاع قيم الكتل الحجمية الجافة للبيتون الرغوي من $821kg/m^3$ إلى $907kg/m^3$ عندما ارتفعت قيم معامل نعومة الرمل المستخدم من 1.16 إلى 3.80، وهذا ما يظهره الشكل (9) حيث يبين المنحني وجود تناسب طردي بين الكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي ρ_d ومعامل نعومة الرمل المستخدم MF إذ كلما ازدادت قيم معامل نعومة الرمل المستخدم في خلطات البيتون الرغوي ازدادت قيم كتلها الحجمية الجافة، وهذا ما يتوافق مع المرجع [11] إذ ينصح باستخدام الرمل (الحصويات الناعمة) في صناعة البيتون الرغوي بقطر أعظمي يساوي إلى 5 مم، وعادةً لا يستخدم البحص (الحصويات الخشنة) لإنتاج البيتون الرغوي، ويعزى ذلك إلى أن خلطات البيتون الرغوي تحتاج الى مواد ناعمة ليتم إنتاجها بكتل حجمية منخفضة، فعندما يتم استخدام رمل خشن بقيمة معامل نعومة عالية تقل كمية المواد الناعمة وبالتالي تقل الفراغات الهوائية في الخلطة مما يؤدي إلى زيادة الكتلة الحجمية للبيتون الرغوي، كما يظهر الشكل (9) العلاقة التي تربط بين معامل نعومة الرمل MF والكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي ρ_d بمعامل ارتباط $R^2=0.99$.

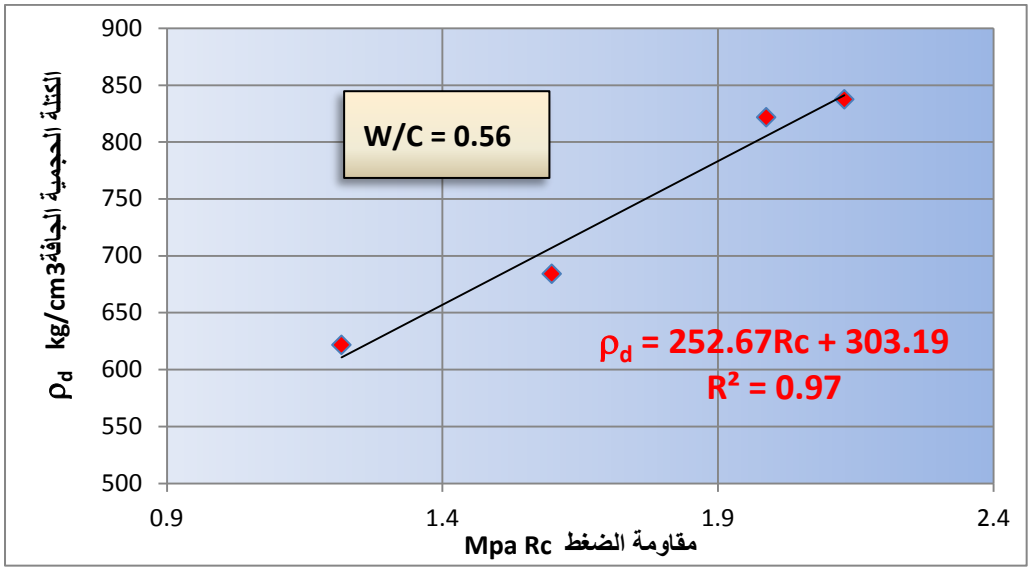


الشكل (9) العلاقة بين معامل نعومة الرمل MF والكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي ρ_d

مناقشة نتائج المقاومة على الضغط:

1- العلاقة بين المقاومة على الضغط R_C والكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي ρ_d:

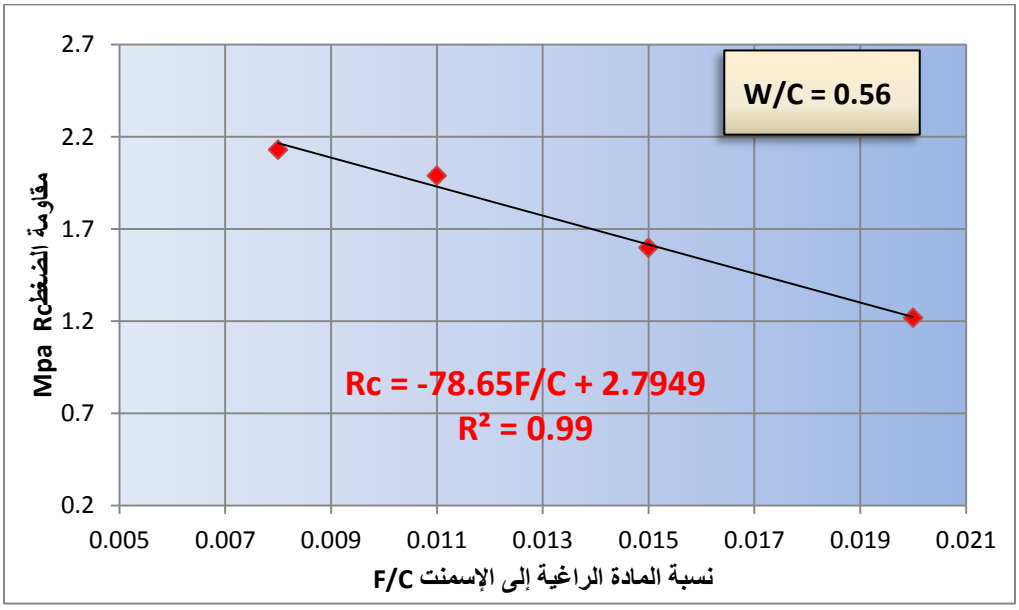
أدى انخفاض قيم الكتل الحجمية الجافة للبيتون الرغوي من837kg/m3 إلى621kg/m3 إلى انخفاض قيم مقاومات الضغط البسيط بعمر 28 يوم من 2.12Mpa إلى 1.21Mpa، أي أن انخفاض قيم الكتل الحجمية الجافة بمقدار 25.8% أدى إلى انخفاض قيم المقاومة على الضغط البسيط بمقدار 42.9%، وذلك نتيجةً لتزايد الفقاعات الهوائية التي تولدها المادة الراغية في عينات البيتون الرغوي، ويبين الشكل (10) العلاقة التي تربط بين الكتلة الحجمية الجافة ρ_d ومقاومة الضغط البسيط R_C بمعامل ارتباط R^2=0.97، ويظهر من المنحني أن التناسب بينهما طردي إذ كلما ازدادت قيم الكتل الحجمية الجافة للبيتون الرغوي ازدادت قيم مقاومات الضغط البسيط لها، وذلك لأنه كلما ازدادت كمية مولد الرغوة في الخلطة يزداد حجم الفراغات الهوائية فتنخفض الكتلة الحجمية ويقل حجم العجينة الرابطة فتنخفض المقاومة على الضغط البسيط، وهذا ما يتناسب مع أسس تصميم خلطات البيتون الرغوي.



الشكل (10) العلاقة بين المقاومة على الضغط R_c والكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي ρ_d

2- تأثير نسبة المادة الراغية إلى الإسمنت f/c على مقاومة الضغط للبيتون الرغوي R_c:

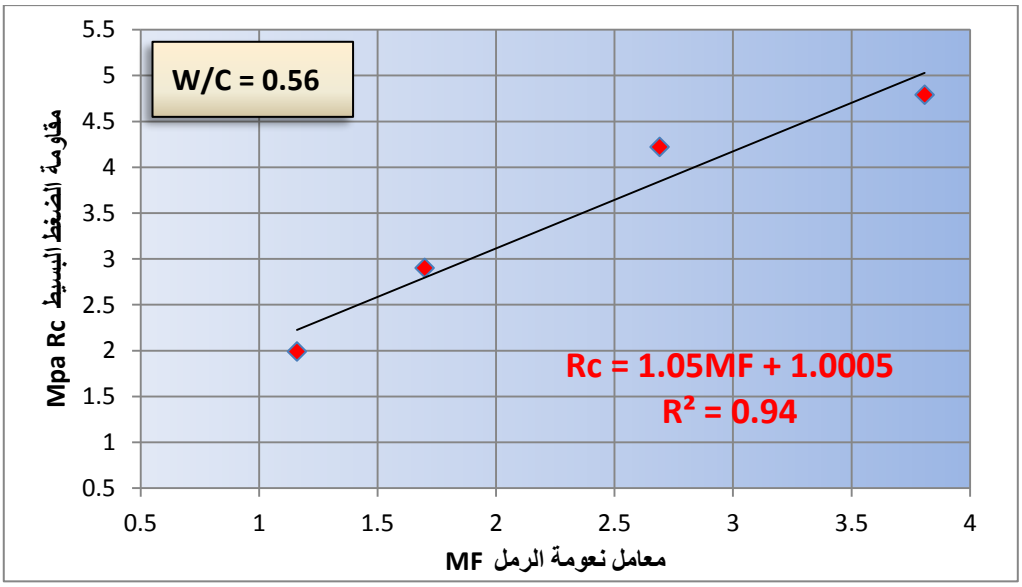
أدى إضافة محتوى المادة الراغية إلى تخفيض المقاومة على الضغط البسيط لعينات البيتون الرغوي، فقد بينت النتائج انخفاض قيم مقاومات الضغط للبيتون الرغوي من 2.129Mpa إلى 1.217Mpa أي أن قيمة مقاومة الضغط انخفضت بمقدار 42.9% وذلك عند زيادة محتوى المادة الراغية من 0.8% إلى 2%، و يبين الشكل (11) العلاقة التي تربط بين المقاومة على الضغط البسيط R_c ونسبة المادة الراغية إلى الإسمنت f/c بمعامل ارتباط R^2=0.99، ويظهر من المنحني أن التناسب بينهما عكسي إذ كلما ازداد محتوى المادة الراغية إلى الإسمنت انخفضت قيم مقاومات الضغط للبيتون الرغوي وهذا منطقي لأنه كلما ازدادت كمية مولد الرغوة في الخلطة يزداد حجم الفراغات الهوائية ويقل حجم العجينة الرابطة فتنخفض المقاومة على الضغط البسيط كما أوردنا سابقاً.



الشكل (11) العلاقة بين المقاومة على الضغط R_c ونسبة المادة الراغية إلى الإسمنت f/c

3- تأثير معامل نعومة الرمل MF على مقاومة الضغط للبيتون الرغوي R_C:

لوحظ ارتفاع قيم المقاومات على الضغط البسيط لعينات البيتون الرغوي من 1.98Mpa إلى 4.79Mpa عندما ارتفعت قيم معامل نعومة الرمل المستخدم من 1.16 إلى 3.80، وهذا ما يظهره الشكل (12) حيث يبين المنحني وجود تناسب طردي بين مقاومة الضغط البسيط R_C ومعامل نعومة الرمل المستخدم MF إذ كلما ازدادت قيم معامل نعومة الرمل المستخدم في خلطات البيتون الرغوي ازدادت قيم مقاوماتها على الضغط وهذا يتوافق مع ما توصلنا إليه سابقاً وهو أنه كلما ازدادت قيمة معامل نعومة الرمل تزداد الكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي وبالتالي من المنطقي أن تزداد مقاومته على الضغط البسيط بسبب ازدياد كتلته الحجمية، كما يظهر الشكل (12) العلاقة التي تربط بين مقاومة الضغط البسيط R_C ومعامل نعومة الرمل المستخدم MF بمعامل ارتباط $R^2=0.94$.



الشكل (12) العلاقة بين المقاومة على الضغط R_C ومعامل نعومة الرمل MF

الاستنتاجات والتوصيات:

1- إمكانية تصميم خلطات بيتون رغوي باستخدام المادة الراغية "Kut Plast LWC Foaming Agent" بقيم كتل حجمية جافة مختلفة تراوحت في المجال $[621-907]kg/m^3$، وبقيم مقاومة على الضغط تراوحت في المجال [1.21-4.79]Mpa.

2- لوحظ وجود علاقة خطية بتناسب طردي بين قيم الكتل الحجمية الرطبة ρ وقيم الكتل الحجمية الجافة ρ_d للبيتون الرغوي حيث تم إيجاد علاقة رياضية تجريبية تربط بينهما.

3- إن إضافة المادة الراغية –المستخدمة في هذه الدراسة– إلى خلطات البيتون الرغوي أثر بشكل واضح على قيم الكتل الحجمية الجافة للعينات، حيث انخفضت قيم الكتل الحجمية الجافة للعينات بمقدار 25.8% وذلك عند زيادة محتوى المادة الراغية من 0.8% إلى 2%.

4- لوحظ وجود تأثير لمعامل نعومة الرمل المستخدم في خلطات البيتون الرغوي على قيم الكتل الحجمية الجافة للعينات، فعندما ارتفعت قيم معامل نعومة الرمل المستخدم من 1.16 إلى 3.80 أدى ذلك إلى ارتفاع قيم الكتل

الحجمية الجافة للبيتون الرغوي من $821kg/m^3$ إلى $907kg/m^3$، إذ كلما ازدادت قيم معامل نعومة الرمل المستخدم في خلطات البيتون الرغوي ازدادت قيم كتلها الحجمية الجافة.

5- تؤثر قيمة الكتلة الحجمية الجافة بشكل واضح على قيم مقاومات الضغط لعينات البيتون الرغوي، حيث أدى انخفاض قيم الكتل الحجمية الجافة للبيتون الرغوي من$837kg/m^3$ إلى $621kg/m^3$ إلى انخفاض قيم مقاومات الضغط البسيط بعمر 28 يوم من 2.12Mpa إلى 1.21Mpa، أي أن انخفاض قيم الكتل الحجمية الجافة بمقدار 25.8% أدى إلى انخفاض قيم المقاومة على الضغط البسيط بمقدار 42.9%، وقد تم إيجاد علاقة رياضية تجريبية تربط بينهما.

6- أدى زيادة كمية محتوى المادة الراغية إلى تخفيض المقاومة على الضغط البسيط لعينات البيتون الرغوي، فقد بينت النتائج انخفاض قيم مقاومات الضغط للبيتون الرغوي بمقدار 42.9% وذلك عند زيادة محتوى المادة الراغية من 0.8% إلى 2%.

7- بينت النتائج أن لمعامل نعومة الرمل تأثير على مقاومة الضغط البسيط لعينات البيتون الرغوي، حيث لوحظ ارتفاع قيم المقاومات على الضغط البسيط لعينات البيتون الرغوي من 1.98Mpa إلى 4.79Mpa عندما ارتفعت قيم معامل نعومة الرمل المستخدم من 1.16 إلى 3.80.

8- تم إيجاد علاقات رياضية تجريبية عديدة تربط بين بارامترات البيتون الرغوي بما فيها الكتلة الحجمية الجافة ρ_d والمقاومة على الضغط البسيط R_C وبين تراكيب نسب الخلط بما فيها نسبة المادة الراغية إلى الإسمنت f/c ومعامل نعومة الرمل المستخدم MF.

References:

1- Aldridge D. Introduction to foamed concrete: what, why, how?. InUse of foamed concrete in construction: Proceedings of the international conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5 July 2005 2005 (pp. 1-14). Thomas Telford Publishing.

2- Varghese S, Ashok AM, Joseph AK, Emmanuel S, Swathylekshmi OV. A study on properties of foamed concrete with natural and synthetic foaming agent. International Research Journal of Engineering and Technology. 2017;4(3):2009-11.

3- Falliano D, De Domenico D, Ricciardi G, Gugliandolo E. Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density. Construction and Building Materials. 2018 Mar 20;165:735-49.

4- Zahari NM, Rahman IA, Zaidi AM, Mujahid A. Foamed concrete: potential application in thermal insulation. InMalaysian Technical Universities Conference on Engineering and Technology 2009 Jun 20 (pp. 47-52).

5- Liew AC. New innovative lightweight foam concrete technology. InUse of Foamed Concrete in Construction: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5 July 2005 2005 (pp. 45-50). Thomas Telford Publishing.

6- Kumar NV, Arunkumar C, Senthil SS. Experimental study on mechanical and thermal behavior of foamed concrete. Materials Today: Proceedings. 2018 Jan 1;5(2):8753-60.

7- Ramamurthy K, Nambiar EK, Ranjani GI. A classification of studies on properties of foam concrete. Cement and concrete composites. 2009 Jul 1;31(6):388-96.

8- Amran YM, Farzadnia N, Ali AA. Properties and applications of foamed concrete; a review. Construction and Building Materials. 2015 Dec 30;101:990-1005.

9- Vesenjak M, Öchsner A, Ren Z. Influence of pore gas in closed-cell cellular structures under dynamic loading. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg. 2005.

10- Al-Jabri KS, Hago AW, Al-Nuaimi AS, Al-Saidy AH. Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. Cement and Concrete Research. 2005 Aug 1;35(8):1472-9.
11- Bindiganavile V, Hoseini M. University of Alberta, Edmonton, AB, Canada. Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete. 2019 Jun 14:365.
12- Kearsley EP, Mostert HF. Opportunities for expanding the use of foamed concrete in the construction industry. InUse of Foamed Concrete in Construction: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5 July 2005 2005 (pp. 143-154). Thomas Telford Publishing.
13- Brady KC, Watts GR, Jones MR. Specification for foamed concrete. Crowthorne, UK: TRL Limited; 2001 Aug.