The Effect of Mixing Technology on the Mechanical and Physical Properties of Foamed Concrete

Dr. Ali Ibrahim Kheirbek*
Noura Sameer Joulak **

(Received 15 / 1 / 2025. Accepted 26 / 3 / 2025)

□ ABSTRACT □

Foamed concrete is defined as a lightweight product made by introducing a foaming agent that generates air bubbles in the cement mortar. The introduced air bubbles reduce the density of the cement mortar, making the foamed concrete lightweight. It is produced according to various mixing parameters depending on the mixing equipment used. This research aims to investigate the impact of mixing technology—represented by mixing speed, mixing duration, and mixing method—on the physical properties of foamed concrete, particularly its dry density, as well as its mechanical properties, specifically its compressive strength. The study establishes mathematical relationships between these factors to identify the optimum mixing technology to produce foamed concrete samples with the lowest possible dry densities while maintaining acceptable compressive strength. Eight mixes were prepared using a cement content of 350 kg/m³, a water-to-cement ratio (W/C) of 0.56, a sand-to-cement ratio (S/C) of 0.25, and a foaming agent -to-cement ratio (F/C) of 0.011. These mixes were used to investigate the effects of mixing speed, mixing duration, and mixing method on the physical and mechanical properties of foamed concrete. The parameter under investigation was varied, while the other parameters were kept constant. Various tests were carried out to determine certain physical and mechanical properties of the foamed concrete, such as wet density, dry density, and compressive strength.

At the end of this research, the effects of mixing speed, mixing duration, and mixing method on the dry density and compressive strength of foamed concrete were determined. Empirical mathematical relationships linking these factors were established. In addition, the optimum mixing parameters were identified to produce foamed concrete with the lowest dry density while maintaining an acceptable compressive strength. It was found that the optimum mixing method is the pre-formed foam method, with the optimum mixing speed set at V = 900 RPM and the optimum mixing time set at T = 180 SEC.

Keywords: Foamed Concrete, Foaming Agent, Lightweight Concrete, Mixing Technology.

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, Lattakia University, Lattakia, Syria.**
** **PhD Student, Department of Construction Management and Engineering, Faculty of Civil Engineering, Latakia University, Lattakia, Syria.**

تأثير تكنولوجيا الخلط على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للبيتون الرغوي

د. علي ابراهيم خيربك*

نورا سمير جولاق**

(تاريخ الإيداع ١٥ / ١ / ٢٠٢٥. قُبِل للنشر في ٢٦/ ٣ / ٢٠٢٥)

□ ملخّص □

يعرف البيتون الرغوي على أنه منتج خفيف الوزن يتم إنتاجه عن طريق إدخال مادة راغية مولدة للفقاعات الهوائية إلى المونة الاسمنتية، حيث أن فقاعات الهواء المدخلة تقلل من الكتلة الحجمية للمونة الاسمنتية مما يجعل البيتون الرغوي خفيف الوزن، ويتم إنتاجه وفق بارامترات خلط مختلفة تبعاً لأجهزة الخلط المستخدمة.

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير تكنولوجيا الخلط المتمثلة بسرعة الخلط ومدة الخلط وطريقة الخلط على الخصائص الفيزيائية للبيتون الرغوي حيث درس منها كتلته الحجمية الجافة، وعلى خصائصه الميكانيكية والتي درس منها مقاومة الضغط البسيط وذلك من خلال إيجاد علاقات رياضية تربط بينها بهدف الوصول إلى تكنولوجيا الخلط المثلى التي تمكن من الحصول على عينات بيتون رغوي بأقل قيم ممكنة للكتل الحجمية الجافة وبمقاومات مقبولة على الضغط. تم تحضير ثمان خلطات من أجل محتوى إسمنت ٣٥٠kg/m^3، ونسبة ماء إلى إسمنت W/C=0.56 ونسبة رمل إلى إسمنت S/C=0.25 ونسبة مولد رغوة إلى إسمنت F/C=0.011، وتم في هذه الخلطات دراسة تأثير كل من سرعة الخلط ومدة الخلط وطريقة الخلط على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للبيتون الرغوي وذلك بتغيير قيمة البارامتر المراد دراسة تأثيره وتثبيت باقي البارامترات الأخرى، وتم إجراء اختبارات مختلفة لتحديد بعض الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للبيتون الرغوي.

تم في نهاية هذا البحث استنتاج تأثير كل من سرعة الخلط ومدة الخلط وطريقة الخلط على قيم الكتلة الحجمية الجافة وقيم مقاومة الضغط للبيتون الرغوي، وإيجاد علاقات رياضية تجريبية تربط فيما بينها، كما تم الوصول إلى بارامترات الخلط المثلى التي تحقق بيتون رغوي بأقل كتل حجمية جافة وبمقاومات مقبولة على الضغط حيث تبين أن طريقة الخلط المثلى هي طريقة الرغوة مسبقة التشكيل وذلك عند تثبيت كل من سرعة الخلط المثلى V=900 RPM ومدة الخلط المثلى T=180 SEC.

الكلمات المفتاحية: البيتون الرغوي، مولد الرغوة، بيتون خفيف الوزن، تكنولوجيا الخلط.

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

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

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

مقدمة:

يعتبر البيتون الرغوي من مواد البناء الهامة عالمياً التي يجب توافرها في سوريا، حيث يصنف البيتون الرغوي كنوع من أنواع البيتون خفيف الوزن الذي يتم إنتاجه عن طريق إيجاد فراغات داخل العجينة الاسمنتية ويسمى بالبيتون المهوى أو الرغوي Foamed/Aerated concrete [1,2,3]، حيث يعرف البيتون الرغوي على أنه خليط من الإسمنت والرمل والماء والهواء [4]، و يتم إنتاجه بتوليد فقاعات هوائية داخله أثناء عملية الخلط وهذا ما يجعله أخف وزناً وأقل كتلة حجمية من البيتون التقليدي بحوالي ٥٠-٨٠% [5]، ويتم إنتاج الفقاعات الهوائية داخل البيتون الرغوي إما باستخدام مواد تحدث تفاعلات كيميائية مع العجينة الاسمنتية 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 [6]، 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 خاصةً بسبب قدرته على العزل الحراري [4,1,2,3] ، ومن هنا نستنتج أهمية وضرورة توفره كمادة بناء في سوريا لذلك تم العمل في هذا البحث على المساهمة في ضبط تكنولوجيا صناعة البيتون الرغوي وتوطين إنتاجه.

يتم إنتاج البيتون الرغوي عن طريق إدخال مادة راغية مولدة للفقاعات الهوائية إلى المونة الاسمنتية وذلك وفقاً لنسب خلط قياسية [7] ووفقاً لبارامترات خلط مختلفة تبعاً لأجهزة الخلط المستخدمة حيث لا توجد تكنولوجيا خلط ثابتة ومعتمدة لإنتاجه، كما نلاحظ ندرة الأبحاث في سوريا التي تدرس تأثير بارامترات الخلط كتأثير سرعة الخلط ومدة الخلط وطريقة الخلط على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للبيتون الرغوي، وغياب وجود نموذج رياضي يربط بين خصائص البيتون الرغوي بما فيها المقاومة على الضغط والكتلة الحجمية وبين بارامترات الخلط، خاصةً من أجل عينات بيتون رغوي تحقق قيم كتل حجمية جافة منخفضة أقل من $1000 kg/m^3$ وبالتالي بات من الضروري دراسة تأثير بارامترات الخلط –للجهاز المستخدم لإنتاج البيتون الرغوي– على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخلطة.

أهمية البحث وأهدافه:

هدف البحث:

يهدف البحث إلى دراسة تأثير تكنولوجيا الخلط على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للبيتون الرغوي حيث تم دراسة تأثير كل من سرعة الخلط ومدة الخلط وطريقة الخلط على الخصائص الفيزيائية للبيتون الرغوي والتي سندرس منها كتلته الحجمية الجافة ρ_d (كتلته الحجمية الجافة) وعلى خصائصه الميكانيكية والتي سندرس منها مقاومة الضغط البسيط RC، كما يهدف إلى إيجاد علاقات رياضية تربط بينهما من الشكل:

$$RC = f(V,T), \qquad \rho d = f(V,T), \qquad \rho d = f(RC)$$

حيث:

R_C: المقاومة على الضغط البسيط للبيتون الرغوي

V: سرعة الخلط

T: زمن الخلط

ρ_d: الكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي

كل ماسبق بهدف الوصول إلى تكنولوجيا الخلط المثلى التي تمكن من الحصول على بيتون رغوي بأقل قيم ممكنة للكتل الحجمية الجافة و ذات مقاومات مقبولة على الضغط.

أهمية البحث:

تكمن أهمية البحث في فهم أعمق لتكنولوجيا خلط البيتون الرغوي من حيث سرعة وزمن وطريقة خلطه للوصول إلى تكنولوجيا الخلط المناسبة التي تحقق أقل قيم ممكنة للكتل الحجمية الجافة مع المحافظة على مقاومات مقبولة على الضغط، وذلك من خلال دراسة تأثير بارامترات تكنولوجيا 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.

١. بارامترات خلط البيتون الرغوي وطرق إنتاجه وفقاً للمراجع:

تؤثر بارامترات الخلط بشكل كبير على خصائص البيتون الرغوي إذ أن سرعة الخلط المناسبة تساعد على استقرار الفقاعات الهوائية في الخلطة كما تحسن من البنية المسامية للعينات، فعند استخدام سرعات منخفضة في الخلط يمكن الحصول على عينات ذات مسامات صغيرة الحجم، وإذا تم تخفيض سرعات الخلط بشكل كبير جداً حكماً لن يتم تشكيل الفقاعات الهوائية داخل المونة الاسمنتية كما ستصبح الخلطة غير متجانسة، اما عند استخدام سرعات كبيرة قد تنفصل الرغوة عن المزيج ويصبح من الصعب تشكيل الفقاعات الهوائية بشكل مستقر داخل خلطة البيتون الرغوي، كما تؤثر مدة الخلط بشكل كبير على خصائص البيتون الرغوي حيث أن إطالة مدة الخلط تؤدي إلى تشكيل رغوة بشكل أكبر مما يؤدي إلى زيادة المسامية في بنية العينات، ولكن إذا ما تم زيادة مدة الخلط بشكل كبير فسينعكس ذلك بشكل سلبي على تجانس الخلطة حيث قد يؤدي ذلك إلى انفصال مكونات الخلطة عن بعضها البعض وفقدان الفقاعات الهوائية داخل الخلطة، وبالتالي تعد كلاً من سرعة الخلط ومدة الخلط من العوامل الأساسية للتحكم بخصائص خلطة البيتون الرغوي، وبالرغم من أهميتهما الكبيرة نلاحظ افتقار أغلب الدراسات السابقة إلى دراسة تأثير كل منهما على خصائص البيتون الرغوي [8].

أما بالنسبة لطريقة الخلط فهي تمتلك أيضاً تأثير كبير على خصائص البيتون الرغوي [8]، حيث أنه هنالك طريقتان أساسيتان لإنتاج البيتون الرغوي باستخدام مولدات الرغوة وهما طريقة الرغوة المسبقة التشكيلpre-foaming method وطريقة الخلط الميكانيكي inline method [4] أو ما تسمى ب mix-foaming method [9,6]، حيث أنه من خلال كلا الطريقتين يمكن أن يتم التحكم بعملية الخلط وبجودة البيتون الرغوي [9].

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 الاسمنت والرمل وماء الخلط حيث يتم المزج بينهما بشكل كامل، وبشكل عام يمكن أن نقسم مراحل إنتاج البيتون الرغوي بطريقة الرغوة مسبقة التشكيل إلى ثلاثة مراحل: (١) تحضير المونة الاسمنتية (٢) تحضير الرغوة من خلال مزج مولد الرغوة مع كمية كافية من الماء (٣) مزج الرغوة مع المونة الاسمنتية لتوليد المزيد من الفقاعات الهوائية [6]، وإن 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 تشكل الرغوة أكثر من ٥٠% من مزيج المواد الأساسية مع الرغوة، وهذا ما يحدث عادةً عندما تكون الكتلة الحجمية للبيتون الرغوي حوالي $kg/m^3$١١٠٠، أما إذا احتجنا لمواد رغوية تنتج بيتون رغوي بكتلة حجمية أقل من تلك فيجب تصنيع الرغوة واستخدامها بعناية أكبر[4,3].

أما بالنسبة لطريقة الخلط الميكانيكي فتنفّذ عن طريق مزج مولد الرغوة مباشرةً مع المزيج الأساسي الذي يتكون من الاسمنت والرمل والماء الكلي [4,9]، وفي كلي الطريقتين يجب أن تكون الرغوة ثابتة ومستقرة لتكون قادرة على مقاومة ضغط الملاط الاسمنتي حتى حدوث التجمد (زمن الشك الأولي) للاسمنت [9,10].

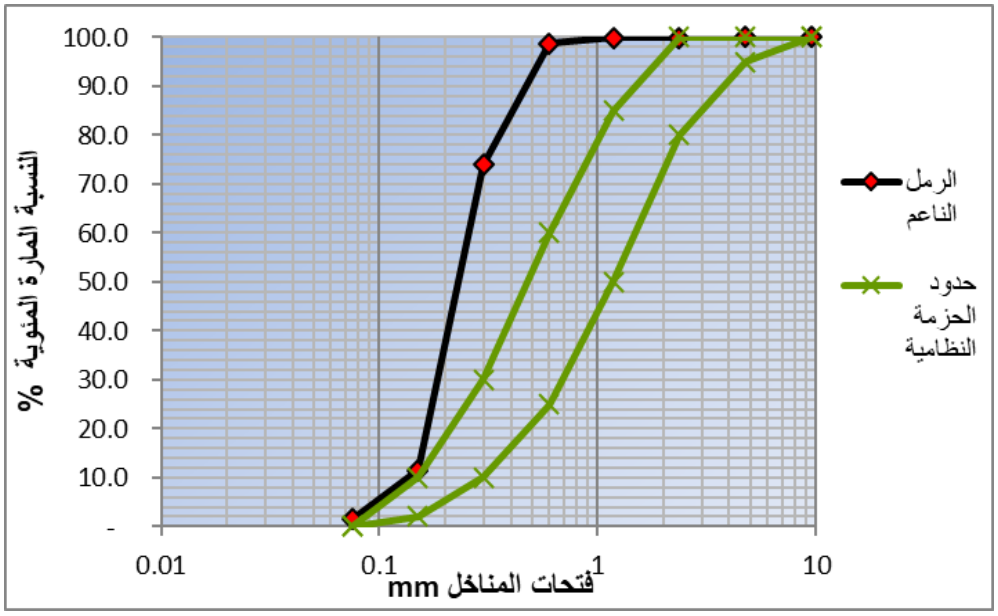
يفضل استخدام طريقة الرغوة مسبقة التشكيل على استخدام طريقة الخلط الميكانيكي في أغلب المراجع حيث أن جميع طرق الإنتاج تعتمد على طريقة الرغوة مسبقة التشكيل في حين تعتبر طريقة الخلط الميكانيكي طريقة نادرة وبالتالي تم أخذها بعين الاعتبار في هذا البحث وقد تمت دراسة تأثير كلاً من طريقتي الخلط على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للبيتون الرغوي. [8,2].

طرائق البحث ومواده:

يتبع هذا البحث المنهج التجريبي حيث تم تصنيع عينات من البيتون الرغوي في مخبر تجريب المواد في كلية الهندسة المدنية بجامعة اللاذقية عن طريق خلط مواد البناء المستخدمة لصناعة البيتون الرغوي وذلك باستخدام جهاز خلط 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 السابقة التي تناولت دراسة البيتون الرغوي وإنتاجه، كما يتبع هذا البحث المنهج التحليلي إذ سيتم القيام بتحليل النتائج حيث سيتم إيجاد تأثير سرعة الخلط وزمن الخلط وطريقة الخلط على كل من الكتلة الحجمية الجافة ومقاومة الضغط الميكانيكية لعينات البيتون الرغوي وإيجاد علاقات رياضية تربط بينها.

نستعرض فيما يلي المواد المستخدمة في تحضير خلطات البيتون الرغوي وخواصها:

- **إسمنت بورتلاندي عادي أسود نوع I** : صنف ٣٢,٥، صنع معمل إسمنت طرطوس.
- **ماء الخلط:** ماء قابل للشرب.
- **رمل:** تم استخدام رمل ناعم من مقالع اللاذقية مكافئه الرملي ES= 88.11%، نبين فيما يلي تدرجه الحبي من خلال الشكل (١):



الشكل (١) منحني التدرج الحبي للرمل المستخدم وحدود الحزمة النظامية حسب المواصفة الأمريكية ASTM

- **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 [١,٠٢ – ١,٠٤] في درجة حرارة ٢٥ درجة مئوية، ودرجة حرارة تجمده [٣–٥] 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".

٢- تصميم خلطة البيتون الرغوي:

تم تنفيذ ثمان خلطات من أجل محتوى إسمنت $350 kg/m^3$، ونسبة ماء إلى إسمنت W/C=0.56 ونسبة رمل إلى إسمنت S/C=0.25 ونسبة مولد رغوة إلى إسمنت F/C=0.011، وتم في هذه الخلطات دراسة تأثير كل من سرعة الخلط ومدة الخلط وطريقة الخلط على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للبيتون الرغوي وذلك بتغيير قيمة البارامتر المراد دراسة تأثيره وتثبيت قيم باقي البارامترات الأخرى، حيث تم أولاً صب مجموعة من الخلطات وذلك بتغيير سرعة الخلط وفقاً للقيم التالية: V={900, 1300, 1900, 2500}RPM وقد تم تثبيت مدة الخلط باعتبارها 120sec وتثبيت طريقة الخلط باعتبارها طريقة الرغوة مسبقة التشكيل، وقد تم ثانياً صب مجموعة من الخلطات وذلك بتغيير مدة الخلط وفقاً للقيم التالية: T={30 ,60, 120, 180}sec وقد تم تثبيت سرعة الخلط المثلى التي تم الحصول عليها من التجارب السابقة (والتي حققت أقل قيمة للكتل الحجمية الجافة للعينات) وتثبيت طريقة الخلط باعتبارها طريقة الرغوة مسبقة التشكيل، ومن ثم تم ثالثاً صب خلطة بعد تثبيت كل من سرعة الخلط المثلى ومدة الخلط المثلى اللتين تم الحصول عليهما من التجارب السابقة (واللتين حققتا أقل قيم للكتل الحجمية الجافة للعينات) وتمت المفاضلة بين طريقتي الخلط لإنتاج البيتون الرغوي وهما طريقة الرغوة مسبقة التشكيل وطريقة الخلط الميكانيكي، وذلك لمعرفة تأثير كل بارامتر من بارامترات الخلط بشكل منفرد على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للبيتون الرغوي بهدف الوصول إلى بارامترات الخلط المثلى التي تمكن من الحصول على عينات بيتون رغوي بأقل قيم ممكنة للكتل الحجمية الجافة وبقيم مقبولة على الضغط.

ويبين الجدول (١) نسب الخلط المستخدمة وقيم بارامترات تكنولوجيا الخلط (سرعة الخلط ومدة الخلط وطريقة الخلط) لخلطات البيتون الرغوي:

الجدول (١) نسب الخلط المستخدمة وقيم بارامترات الخلط لخلطات البيتون الرغوي

اسم 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 سرعة الخلط V (RPM)	قيمة مدة الخلط T (SEC)	طريقة الخلط
A	5625	3150	61.8	1406	0.56	0.011	0.25	900	120	طريقة الرغوة مسبقة التشكيل
B	5625	3150	61.8	1406	0.56	0.011	0.25	1300	120	طريقة الرغوة مسبقة التشكيل
C	5625	3150	61.8	1406	0.56	0.011	0.25	1900	120	طريقة الرغوة مسبقة التشكيل
D	5625	3150	61.8	1406	0.56	0.011	0.25	2500	120	طريقة الرغوة مسبقة التشكيل
E	5625	3150	61.8	1406	0.56	0.011	0.25	السرعة التي تحقق الكتلة الحجمية الأقل	٣٠	طريقة الرغوة مسبقة التشكيل
F	5625	3150	61.8	1406	0.56	0.011	0.25	السرعة التي تحقق الكتلة الحجمية الأقل	٦٠	طريقة الرغوة مسبقة التشكيل
G	5625	3150	61.8	1406	0.56	0.011	0.25	السرعة التي تحقق الكتلة الحجمية الأقل	١٨٠	طريقة الرغوة مسبقة التشكيل
H	5625	3150	61.8	1406	0.56	0.011	0.25	السرعة التي تحقق الكتلة الحجمية الأقل	الزمن الذي يحقق الكتلة الحجمية الأقل	طريقة الخلط الميكانيكي

٣- طريقة تحضير عينات الاختبار:

تم استخدام المواد الموصفة سابقاً لتحضير وصب عينات البيتون الرغوي حيث تم صب الخلطات وفق التسلسل التالي:

١- تم صب الخلطات السبعة الأولى (A, B, C, D, E, F, G) باستخدام طريقة الرغوة مسبقة التشكيل حيث 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 بواسطة جهاز خلط البيتون الرغوي للحصول على رغوة متجانسة كما يبين الشكل (٢-أ):

أ- تشكيل الرغوة

ب- إعداد المزيج الكلي

الشكل (٢) الصب بطريقة الرغوة مسبقة التشكيل

٢- ومن ثم تم وزن كل من الإسمنت والرمل بدقة وبحسب القيم الواردة في الجدول (١) لكل خلطة بشكل منفصل وتم إضافة كل من الإسمنت والرمل إلى الرغوة المشكلة سابقاً حيث تم الخلط وفقاً لقيم سرعات الخلط ومدد الخلط الخاصة بكل خلطة وذلك بهدف الحصول على خليط متجانس من البيتون الرغوي ذي قوام مائع كما يظهر الشكل (٢-ب).

٣- تم صب الخلطة الثامنة والأخيرة (H) بطريقة الخلط الميكانيكي حيث تم إضافة كل من الإسمنت والرمل والماء ومولد الرغوة بنفس الوقت إلى جهاز الخلط بعد وزن كل مكون بدقة، ومن ثم تم الخلط وفقاً لقيمتي سرعة الخلط ومدة الخلط اللتين حققتا أقل كتلة حجمية جافة للبيتون الرغوي، ويظهر الشكل (٣) قوام البيتون الرغوي الطري المصنع باستخدام طريقة الخلط الميكانيكي:

الشكل (٣) قوام البيتون الرغوي الطري المصنع باستخدام طريقة الخلط الميكانيكي

٤- تم تجهيز قوالب الصب الفولاذية موشورية الشكل بأبعاد cm^3 ١٦*٤*٤ وتنظيفها وتزييتها ومن ثم تم صب ٦ عينات من البيتون الرغوي الطري لكل خلطة، حيث تم ملء القوالب دفعة واحدة بعناية وتم تسوية سطوحها، يظهر الشكل (٤) البيتون الرغوي الطري بعد صبه باستخدام طريقة الخلط الميكانيكي:

الشكل (٤) عينات البيتون الرغوي الطري بعد صبها باستخدام طريقة الخلط الميكانيكي

٥- تم ترك العينات في القوالب لمدة ٢٤ ساعة ومن ثم تم فك القوالب وتسمية العينات ووضعها في الهواء في جو رطب فوق شبك معدني موضوع فوق حوض مائي، ويظهر الشكل (٥) كل من عينات البيتون الرغوي المتصلبة المصنعة باستخدام طريقة الرغوة مسبقة التشكيل، والمصنعة باستخدام طريقة الخلط الميكانيكي:

عينات البيتون الرغوي المصنعة بطريقة الرغوة مسبقة التشكيل

عينات البيتون الرغوي المصنعة بطريقة الخلط الميكانيكي

الشكل (٥) عينات البيتون الرغوي المتصلبة

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 وزن العينات بعد فكها ومعالجتها لمدة ٢٨ يوم لحساب قيم كتلها الحجمية الرطبة Wet density، ومن ثم تم وضعها في الفرن لمدة ٢٤ ساعة وبدرجة حرارة C ° ١١٠، ومن ثم تم إخراجها من الفرن وقياس وزنها الجاف لحساب قيم 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.

يبين الجدول (٢) نتائج اختبارات الخلطات البيتونية المدروسة، حيث تمثل كل قيمة لمقاومة الضغط متوسط قيم المقاومة على الضغط لست عينات متماثلة لخلطة واحدة، أما بالنسبة لقيم الكتلة الحجمية الرطبة فإن كل قيمة تمثل متوسط قيم الكتلة الحجمية الرطبة لثلاث عينات متماثلة لخلطة واحدة وكذلك الأمر بالنسبة للكتلة الحجمية الجافة، وبعد الاطلاع على نتائج الخلطات الأربعة الأولى (A, B, C, D) تم استنتاج أن سرعة الخلط المثلى التي حققت أقل قيمة للكتلة الحجمية الجافة للعينات ρ_d=718Kg/m^3 هي V=900 RPM وقد تم تثبيتها واعتمادها في الخلطات الثلاث التالية (E,F,G) بهدف معرفة مدة الخلط المثلى، وبعد الاطلاع على نتائج هذه الخلطات الثلاث تبين أن مدة الخلط المثلى التي حققت أقل قيمة للكتلة الحجمية الجافة للعينات ρ_d=631Kg/m^3 هي T=180 SEC، وعند صب الخلطة الأخيرة (H) تم تثبيت كل من سرعة الخلط المثلى V=900RPM ومدة الخلط المثلى T=180 SEC وقد تم اتباع طريقة الخلط الميكانيكي أثناء صب هذه الخلطة بهدف معرفة طريقة الخلط المثلى، وقد تم استنتاج أن طريقة الرغوة المسبقة التشكيل هي طريقة الخلط المثلى التي حققت أقل قيمة للكتلة الحجمية الجافة للعينات ρ_d=631Kg/m^3 وذلك عند المقارنة بين الخلطة (G) التي تم خلطها باتباع طريقة الرغوة مسبقة التشكيل وبين الخلطة (H) التي تم خلطها باتباع طريقة الخلط الميكانيكي مع العلم أن باقي بارامترات الخلط ونسب الخلط ثابتة لكلي الخلطتين.

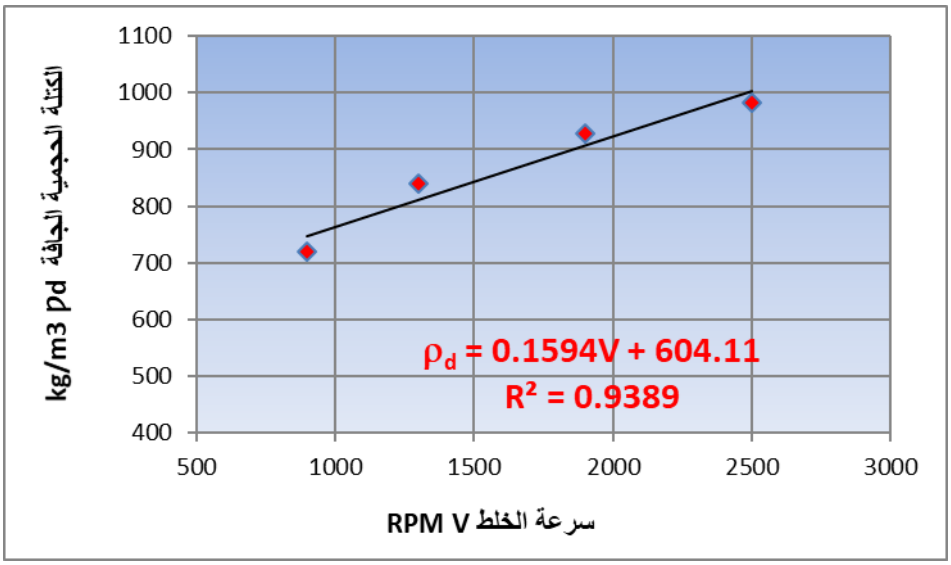
الجدول (٢) نتائج اختبارات الخلطات البيتونية المدروسة

رقم الخلطة	قيمة سرعة الخلط V (RPM)	قيمة مدة الخلط T (SEC)	طريقة الخلط	الكتلة الحجمية الرطبة (kg/m^3)	الكتلة الحجمية الجافة (kg/m^3)	مقاومة الضغط (Mpa)
A	900	120	طريقة الرغوة مسبقة التشكيل	789	718	2.00
B	1300	120	طريقة الرغوة مسبقة التشكيل	903	839	4.21

C	1900	120	طريقة الرغوة مسبقة التشكيل	997	927	5.06
D	2500	120	طريقة الرغوة مسبقة التشكيل	1061	983	5.36
E	900	٣٠	طريقة الرغوة مسبقة التشكيل	882	804	4.00
F	900	٦٠	طريقة الرغوة مسبقة التشكيل	820	743	2.44
G	900	١٨٠	**طريقة الرغوة مسبقة التشكيل**	709	631	1.51
H	900	180	طريقة الخلط الميكانيكي	825	752	2.50

- **العلاقة بين الكتلة الحجمية الجافة ρd وسرعة الخلط V للبيتون الرغوي:**

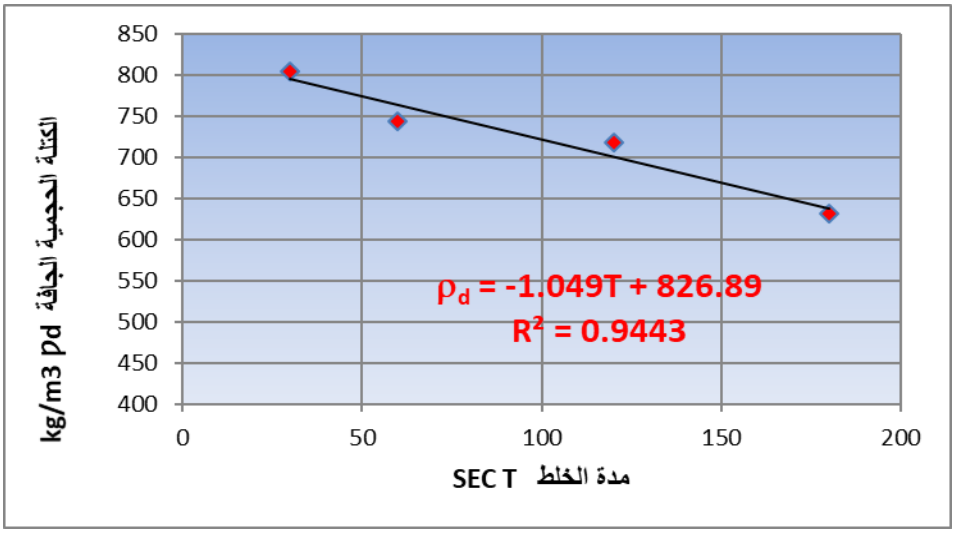
لوحظ ارتفاع قيم الكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي مع زيادة سرعة الخلط من $718kg/m^3$ إلى $983kg/m^3$ أي أن الكتلة الحجمية الجافة ارتفعت بمقدار 36.9% عندما ارتفعت قيم سرعة الخلط للجهاز المستخدم من 900RPM إلى 2500RPM، حيث تم تثبيت مدة الخلط باعتبارها 120sec وتثبيت طريقة الخلط باعتبارها طريقة الرغوة مسبقة التشكيل، وهذا ما يظهره الشكل (٦) حيث يبين المنحني وجود تناسب طردي بين الكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي ρ_d وسرعة الخلط V للجهاز المستخدم ، إذ كلما ازدادت قيم سرعة الخلط أثناء خلط عينات البيتون الرغوي ازدادت قيم كتلها الحجمية الجافة، ويعزى ذلك إلى أن سرعات الخلط الكبيرة تعمل على انفصال الرغوة عن المزيج ويصبح من الصعب تشكيل الفقاعات الهوائية بشكل مستقر داخل خلطة البيتون الرغوي [8]، فعندما يتم خلط البيتون الرغوي بسرعات كبيرة تقل الفراغات الهوائية في الخلطة مما يؤدي إلى زيادة الكتلة الحجمية للبيتون الرغوي، ويبين الشكل (٦) بأن سرعة الخلط المثلى التي حققت أقل قيمة للكتلة الحجمية الجافة لعينات البيتون الرغوي $\rho_d=718Kg/m^3$ هي V=900RPM، كما يظهر العلاقة التي تربط بين سرعة الخلط V والكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي ρ_d وهي معادلة خطية من الدرجة الأولى بمعامل ارتباط $R^2=0.93$.



الشكل (٦) العلاقة بين الكتلة الحجمية الجافة ρ_d وسرعة الخلط V للبيتون الرغوي

- **العلاقة بين الكتلة الحجمية الجافة ρd ومدة الخلط T للبيتون الرغوي:**

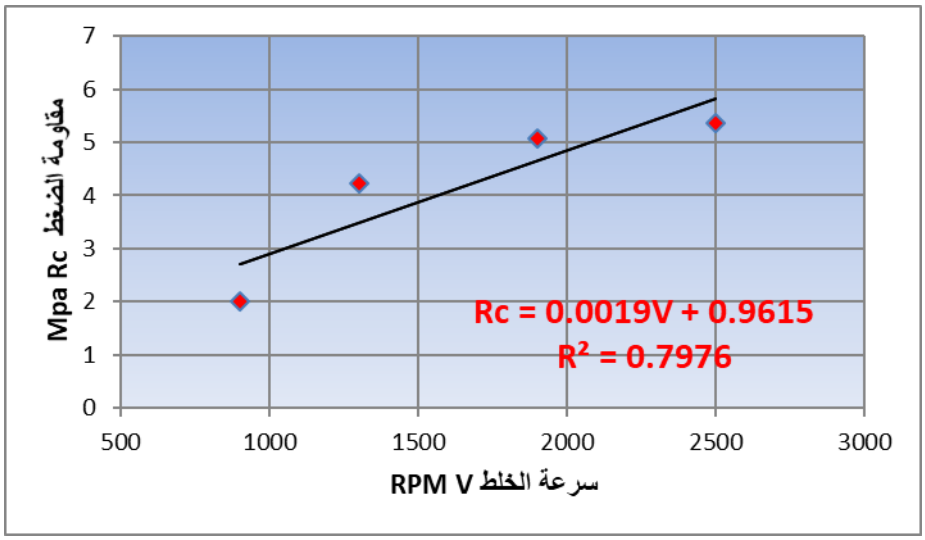
أدى زيادة مدة خلط البيتون الرغوي إلى تخفيض الكتلة الحجمية للبيتون الرغوي بشكل واضح، فقد بينت النتائج انخفاض الكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي من $804kg/m^3$ إلى $631kg/m^3$ أي أن الكتلة الحجمية الجافة انخفضت بمقدار 21.5% وذلك عند زيادة مدة الخلط من 30sec إلى 180sec، حيث تم تثبيت سرعة الخلط باعتبارها 900RPM وتثبيت طريقة الخلط باعتبارها طريقة الرغوة مسبقة التشكيل، ويبين الشكل (٧) العلاقة التي تربط بين الكتلة الحجمية الجافة ρ_d ومدة خلط البيتون الرغوي بمعامل ارتباط $R^2=0.94$، ويظهر من المنحني أن التناسب بينهما عكسي إذ كلما ازدادت مدة الخلط انخفضت قيم الكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي، وهذا منطقي لأن إطالة مدة الخلط تؤدي إلى تشكيل فقاعات هوائية أكثر ضمن الخلطة مما يؤدي إلى زيادة حجم الفراغات الهوائية في بنية العينات وبالتالي يؤدي إلى انخفاض قيم كتلتها الحجمية [8]، كما يبين الشكل (٧) بأن مدة الخلط المثلى التي حققت أقل قيمة للكتلة الحجمية الجافة لعينات البيتون الرغوي $\rho_d=631Kg/m^3$ هي T=180 SEC.



الشكل (٧) العلاقة بين الكتلة الحجمية الجافة ρ_d ومدة الخلط T للبيتون الرغوي

- **العلاقة بين المقاومة على الضغط RC وسرعة الخلط V للبيتون الرغوي:**

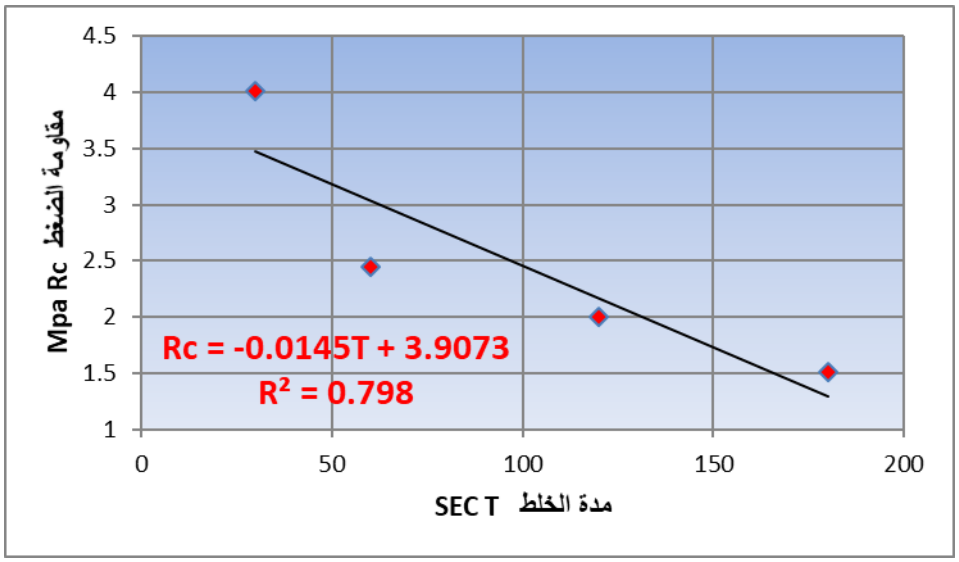
أدى ارتفاع قيم سرعة الخلط للجهاز المستخدم لصناعة البيتون الرغوي من 900RPM إلى 2500RPM إلى ارتفاع قيم مقاومات الضغط البسيط بعمر ٢٨ يوم من 2.00Mpa إلى 5.36Mpa، أي أن ارتفاع قيم المقاومة على الضغط البسيط كانت بمقدار 168%، وذلك عند تثبيت مدة الخلط باعتبارها 120sec وتثبيت طريقة الخلط باعتبارها طريقة الرغوة مسبقة التشكيل، وبالتالي تم استنتاج أنه كلما ازدادت قيم سرعة الخلط أثناء خلط عينات البيتون الرغوي ازدادت قيم مقاوماتها على الضغط البسيط، ويعزى ذلك إلى أن سرعات الخلط الكبيرة تعمل على تشكيل فقاعات هوائية غير مستقرة داخل خلطة البيتون الرغوي [8] بالإضافة إلى أنه يؤدي إلى زيادة الكتلة الحجمية للبيتون الرغوي فتزداد عندها المقاومة على الضغط البسيط. يبين الشكل (٨) العلاقة التي تربط بين المقاومة على الضغط البسيط RC وسرعة الخلط V للبيتون الرغوي بمعامل ارتباط $R^2=0.79$، ويظهر من المنحني أن التناسب بينهما طردي.



الشكل (٨) العلاقة بين المقاومة على الضغط RC وسرعة الخلط V للبيتون الرغوي

- **العلاقة بين المقاومة على الضغط RC ومدة الخلط T للبيتون الرغوي:**

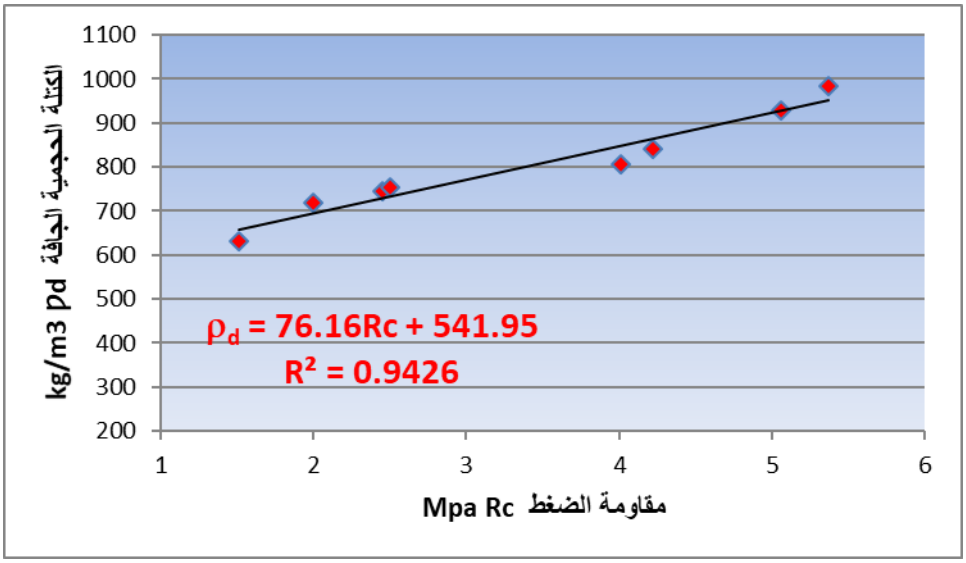
لوحظ انخفاض قيم مقاومات الضغط للبيتون الرغوي عند زيادة مدة الخلط، حيث انخفضت قيم مقاومات الضغط للبيتون الرغوي من 4Mpa إلى 1.51Mpa أي أن قيمة مقاومة الضغط قد انخفضت بمقدار 62.2% وذلك عند زيادة مدة الخلط من 30sec إلى 180sec، مع تثبيت تثبيت سرعة الخلط باعتبارها 900RPM وتثبيت طريقة الخلط باعتبارها طريقة الرغوة مسبقة التشكيل. يبين الشكل (٩) العلاقة التي تربط بين المقاومة على الضغط البسيط R_C ومدة الخلط T للبيتون الرغوي بمعامل ارتباط $R^2=0.79$، ويظهر من المنحني أن التناسب بينهما عكسي إذ كلما ازدادت قيم مدة الخلط انخفضت قيم مقاومة الضغط للبيتون الرغوي ويفسر ذلك بأنه كلما ازدادت قيم مدة الخلط يزداد حجم الفراغات الهوائية [8] ويقل حجم العجينة الرابطة فتنخفض الكتلة الحجمية مما يؤدي إلى انخفاض المقاومة على الضغط البسيط وهذا ما يتفق مع نتائج الدراسة [11].



الشكل (٩) العلاقة بين المقاومة على الضغط RC ومدة الخلط T للبيتون الرغوي

- **العلاقة بين مقاومة الضغط RC والكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي ρd:**

أدى انخفاض قيم الكتل الحجمية الجافة للبيتون الرغوي من983kg/m3 إلى631kg/m3 إلى انخفاض قيم مقاومات الضغط البسيط بعمر ٢٨ يوم من 5.36Mpa إلى 1.51Mpa، أي أن انخفاض قيم الكتل الحجمية الجافة بمقدار ٣٥,٨% أدى إلى انخفاض قيم المقاومة على الضغط البسيط بمقدار ٧١,٨%، وذلك نتيجةً لتزايد الفقاعات الهوائية التي تولدها المادة الراغية في عينات البيتون الرغوي، ويبين الشكل (١٠) العلاقة التي تربط بين الكتلة الحجمية الجافة ρ_d ومقاومة الضغط البسيط R_C بمعامل ارتباط $R^2=0.94$، 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 (١٠) العلاقة بين المقاومة على الضغط RC والكتلة الحجمية الجافة للبيتون الرغوي ρd

الاستنتاجات والتوصيات:

١- تم التوصل لتصاميم خلطات بيتون رغوي بكتل حجمية جافة مختلفة تراوحت في المجال $[631-983]kg/m^3$ وبقيم مقاومة على الضغط تراوحت في المجال (1.51-5.36)Mpa باستخدام المادة الراغية "Kut Plast LWC Foaming Agent".

٢- أثرت زيادة قيم سرعة خلط البيتون الرغوي بشكل واضح على قيم الكتل الحجمية الجافة للعينات، حيث ارتفعت قيم الكتل الحجمية الجافة للعينات بمقدار ٣٦,٩% عندما ارتفعت قيم سرعة الخلط للجهاز المستخدم من 900RPM إلى 2500RPM، وذلك عند تثبيت مدة الخلط باعتبارها 120sec وتثبيت طريقة الخلط باعتبارها طريقة الرغوة مسبقة التشكيل.

٣- أدت إطالة مدة خلط البيتون الرغوي إلى تخفيض قيم الكتل الحجمية الجافة للعينات، حيث انخفضت الكتل الحجمية الجافة بمقدار 21.5% وذلك عند زيادة مدة الخلط من 30sec إلى 180sec، حيث تم تثبيت سرعة الخلط باعتبارها 900RPM وتثبيت طريقة الخلط باعتبارها طريقة الرغوة مسبقة التشكيل.

٤- أدى زيادة قيم سرعة خلط البيتون الرغوي إلى زيادة قيم المقاومة على الضغط البسيط لعينات البيتون الرغوي بعمر ٢٨ يوم، فقد بينت النتائج ارتفاع قيم مقاومات الضغط للعينات بمقدار 168% عند ارتفاع قيم سرعة الخلط من 900RPM إلى 2500RPM، وذلك عند تثبيت مدة الخلط باعتبارها 120sec وتثبيت طريقة الخلط باعتبارها طريقة الرغوة مسبقة التشكيل.

٥- لوحظ أن إطالة مدة خلط البيتون الرغوي أدت إلى تخفيض قيم المقاومة على الضغط البسيط لعينات البيتون الرغوي بعمر ٢٨ يوم، فقد بينت النتائج انخفاض قيم مقاومات الضغط لعينات البيتون الرغوي بمقدار 62.2% عند زيادة مدة الخلط من 30sec إلى 180sec، وذلك عند تثبيت سرعة الخلط باعتبارها 900RPM وتثبيت طريقة الخلط باعتبارها طريقة الرغوة مسبقة التشكيل.

٦- ترتبط قيم الكتلة الحجمية الجافة بشكل واضح مع قيم مقاومات الضغط لعينات البيتون الرغوي، حيث أدى انخفاض قيم الكتل الحجمية الجافة للبيتون الرغوي من $983kg/m^3$ إلى $631kg/m^3$ إلى انخفاض قيم مقاومات الضغط البسيط بعمر ٢٨ يوم من 5.36Mpa إلى 1.51Mpa، أي أن انخفاض قيم الكتل الحجمية الجافة بمقدار ٣٥,٨% أدى إلى انخفاض قيم المقاومة على الضغط البسيط بمقدار ٧١,٨%، وقد تم إيجاد علاقة رياضية تجريبية تربط بينهما.

٧- تبين أن سرعة الخلط المثلى التي تحقق أقل قيمة للكتلة الحجمية الجافة لعينات البيتون الرغوي $\rho_d=718Kg/m^3$ والتي تحقق مقاومة على الضغط البسيط RC=2.00Mpa هي V=900 RPM، وذلك عند تثبيت كل من مدة الخلط باعتبارها 120sec وطريقة الخلط باعتبارها طريقة الرغوة مسبقة التشكيل.

٨- يظهر أن مدة الخلط المثلى التي تحقق أقل قيمة للكتلة الحجمية الجافة لعينات البيتون الرغوي $\rho_d=631Kg/m^3$ والتي تحقق مقاومة على الضغط البسيط RC=1.51Mpa هي T=180 SEC، وذلك عند تثبيت كل من سرعة الخلط المثلى V=900 RPM وطريقة الخلط باعتبارها طريقة الرغوة مسبقة التشكيل.

٩- كما تبين أن طريقة الخلط المثلى التي تحقق أقل قيمة للكتلة الحجمية الجافة لعينات البيتون الرغوي $\rho_d=631Kg/m^3$ والتي تحقق مقاومة على الضغط البسيط RC=1.51Mpa هي طريقة الرغوة مسبقة التشكيل، وذلك عند تثبيت كل من سرعة الخلط المثلى V=900 RPM ومدة الخلط المثلى T=180 SEC.

١٠- تم استنتاج علاقات رياضية تجريبية عديدة تربط بين بارامترات البيتون الرغوي بما فيها الكتلة الحجمية الجافة ρ_d والمقاومة على الضغط البسيط R_C وبين بارامترات تكنولوجيا الخلط بما فيها سرعة الخلط V ومدة الخلط T.

١١- للحصول على بيتون رغوي بقيم كتلة حجمية جافة تساوي إلى $\rho_d=631Kg/m^3$ والتي تحقق مقاومة على الضغط البسيط RC=1.51Mpa يوصى باعتماد طريقة الرغوة مسبقة التشكيل وتثبيت سرعة الخلط V=900 RPM وتثبيت مدة الخلط T=180 SEC بالتزامن مع اعتماد نسب الخلط التالية: W/C=0.56 و F/C=0.011 و S/C=0.25 .

١٢- يوصى باختبار ودراسة قيم أخرى لسرعة ومدة خلط البيتون الرغوي وكذلك اعتماد نسب خلط أخرى في أبحاث مستقبلية وإيجاد تأثيرها على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للبيتون الرغوي.

References:

1- 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.

2- 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.

3- 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.

4- 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.

5- 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.

6- Bindiganavile V, Hoseini M. University of Alberta, Edmonton, AB, Canada. Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete. 2019 Jun 14:365.

7- British Cement Association. Foamed concrete: Compositions and properties. Camberley, UK. (1994).

8- Galoul R, Boumchedda K, Mebtouche F. Optimizing foam concrete performance using mixed foaming method: impact of mixing speed, mixing duration, and foam dosage. South Florida Journal of Development. 2024 Dec 27;5(12):e4847-.

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

10- Koudriashoff IT. Manufacture of reinforced foam concrete roof slabs. InJournal Proceedings 1949 Sep 1 (Vol. 46, No. 9, pp. 37-48).

11- Xu T, Garrecht H. Effects of Mixing Techniques and Material Compositions on the Compressive Strength and Thermal Conductivity of Ultra-Lightweight Foam Concrete. Materials. 2024 May 30;17(11):2640.