مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (37) العدد (4) 2015
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (37) No. (4) 2015

مساهمة في دراسة بعض الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للبيتون الرغوي

نسرين الجبيلي *

(تاريخ الإيداع 2 / 3 / 2015. قُبِل للنشر في 11/ 8 / 2015)

ملخّص

شهد مجال صناعة البيتون تقدمًا وتطورًا كبيرًا حيث تم استحداث أنواع عديدة منها البيتون الرغوي، الذي يعرّف بأنّه بيتون ناتج عن خلط الاسمنت والرمل مع مادة راغية تجعله أخف وزناً من البيتون العادي. تهدف هذه الدراسة لإنتاج هذا النوع من البيتون ودراسة بعض خصائصه الفيزيائية والميكانيكية. تم تصميم الخلطة البيتونية من أجل أربع كثافات تصميمية مطلوبة ($1000, 1300, 1600, 1900\ kg/m^3$) وعيار اسمنت ($350kg/m^3$) ونسبة الماء إلى الاسمنت ($w/c=0.5$). تم اجراء اختبارات مختلفة لتحديد بعض خصائص البيتون الناتج كالكثافة والمقاومة على الضغط والمقاومة على الشد بالانفلاق.

بينت النتائج امكانية إنتاج بيتون رغوي بمجال واسع للكثافة والمقاومة. تراوحت قيم الكثافة الجافة للبيتون الرغوي ما بين ($870-1773\ kg/m^3$) ، وقيم المقاومة على الضغط ما بين ($2.95-16.2\ Mpa$)، في حين سجلت المقاومة على الانفلاق قيماً تراوحت ما بين ($0.32-1.76\ Mpa$) .

الكلمات المفتاحية : البيتون الرغوي، البيتون الخفيف المهوى، مادة راغية.

* مشرفة على الأعمال – قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية– جامعة تشرين– اللاذقية–سورية.

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (37) العدد (4) 2015
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (37) No. (4) 2015

Contribution in Study of some physical and mechanical properties of foamed concrete

Nisrin Aljubayli *

(Received 2 / 3 / 2015. Accepted 11 / 8 / 2015)

□ ABSTRACT □

foamed concrete is a concrete made by cement slurry mixed with foaming agent, so that foamed concrete is lighter than conventional concrete. The objectives of this study is to produce this kind of concrete, and to study some of its physical and mechanical properties. Mix design of concrete was made for four required densities (1000, 1300,1600,1900 kg/m^3), cement content of 350 kg/ m^3, and water to cement ratio equal to 0.5. Different tests were performed to determine some properties of product concrete such as density, compressive strength and splitting tensile strength. The results demonstrated the possibility of production foamed concrete with wide range of density and strength. The oven dry density of foamed concrete was in the range of (870-1773 kg/m^3) , compressive strength was in the range of (2.95-16.2 Mpa), and the splitting strength was in the range of (0.32-1.76Mpa).

Keywords: foamed concrete, cellular lightweight concrete, foaming agent.

*Work Supervisor, Department Of structural Engineering–faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة :

يعتبر البيتون العنصر الأساسي المستخدم في عملية البناء، حيث يشكل الوزن الذاتي لعناصر المبنى الجزء الأكبر من الحمل الكلي المؤثر. لذلك تم العمل على انتاج البيتون الخفيف لتقليل وزن المبنى وبالتالي استخدام مقاطع أصغر للعناصر الإنشائية وتقليل حجم الأساسات، إضافة لتقليل الضغط الجانبي والعمودي على قوالب الصب، كما يستخدم هذا النوع من البيتون بشكل واسع لأغراض العزل الصوتي والحراري [1].

يعرّف البيتون الخفيف بأنه البيتون الذي تقل كثافته عن كثافة البيتون العادي المقدّرة بـ [1] . ($2200-2500 kg/m^3$)

يمكن تخفيض وزن البيتون بإحدى الطرق الآتية:

a) استخدام حصويات خفيفة الوزن ويسمى ببيتون الحصويات الخفيفة (Lightweight aggregate concrete).

b) إيجاد فراغات بين الحصويات ويسمى بالبيتون الخالي من المواد الناعمة (No- fines concrete).

c) إيجاد فراغات داخل العجينة الاسمنتية ويسمى بـالبيتون المهوى أو الرغوي (Foamed / Aerated concrete).

يُعتبر النوع الأول الأكثر شيوعاً واستخداماً إذ يمكن استخدامه في العناصر الإنشائية، وقد تكون الحصويات المستخدمة إما صناعية (كالطين الممدد الانتفاخي والفيرموكليت)، أو طبيعية (كالطف البركاني والخفان). أما في النوع الثاني فيستخدم الإسمنت والحصويات الكبيرة فقط. وفي بعض الحالات يستخدم فيه الهواء من خلال إضافة مواد رغوية أو باستعمال تدرجات خاصة للحصويات. في حين أن النوع الثالث يتم إنتاجه بإدخال الفقاعات الهوائية أو الغازية داخل الخلطة البيتونية أثناء عملية الخلط.

يتميز البيتون المهوى بكثافة ومقاومة ميكانيكية منخفضتين مقارنة بأنواع البيتون الخفيف الأخرى وهذا ما يجعله مناسب لأغراض العزل الحراري في الأبنية. صُنع البيتون الخفيف المهوى لأول مرة عام 1929 في السويد لإنتاج بلاطات الأسقف المسلحة ذات الوزن الخفيف. واستخدم هذا البيتون في عدة أغراض في بريطانيا وغالباً ما يكون على شكل بلوكات أو وحدات إسمنتية مسلحة مسبقة الصنع. يتم انتاج البيتون الرغوي بإدخال كميات من الهواء أو الغاز خلال عملية الخلط مما يتسبب بتكوين خلايا أو فقاعات هوائية تؤدي إلى انخفاض كثافته، وتتعلق كثافة البيتون الناتج بحجم الخلايا أو الفقاعات الهوائية الموزعة فيه.

يتم انتاج الخلايا أو الفقاعات الهوائية بإحدى الطرق الآتية[2]:

a) استخدام مواد تحدث تفاعلات كيماوية مولدة للغازات.

b) استخدام مواد مضافة للبيتون حابسة للهواء (Air Entraining Agents).

c) استخدام مواد راغية (Foaming Agents).

بالنسبة للطريقة الأولى يتم انتاج البيتون بإضافة مواد تتفاعل كيماوياً مع مكونات الخلطة الاسمنتية بحيث تطلق الغازات التي تعمل على نفخ العجينة الاسمنتية ويتم التفاعل بوجود الماء ضمن البيتون الطري خلال عملية الخلط. يعتبر مسحوق الألمنيوم أو بودرة الزنك من المواد التي تحدث تفاعلات كيماوية مولدة للغازات، كما يمكن استخدام محلول ثاني أوكسيد الهيدروجين (H_2O_2) المخفف بنسبة 30% مع 70% كلور فعال لتوليد غاز الأوكسجين. عند استخدام الطريقة الثانية يتم إضافة سائل كيماوي إلى الخلطة البيتونية يؤدي إلى حبس الهواء فيها بنسبة تصل إلى

30% ¬20 من حجمها. أما في الطريقة الثالثة فيتم إضافة مواد راغية (بعد تخفيفها بالماء بنسبة معينة) إلى الخلطة البيتونية المكونة من الاسمنت والرمل والماء، بحيث يمكن انتاج بيتون رغوي بكثافة لها قيمة متعلقة بكمية الهواء الداخلة في تركيبه.

يمكن انتاج بيتون رغوي بكثافة تتراوح ما بين (200–1800 kg/m^3) بإحدى الطرق الآتية:

a) انتاج الرغوة بواسطة الخلط الميكانيكي: يتم إضافة المواد الراغية بحالتها المركزة أو المخففة بالماء بنسبة معينة إلى خليط الماء والرمل والاسمنت أثناء عملية الخلط، ويتم الخلط بشكل جيد جداً بحيث يتم توليد الرغوة مباشرة وبشكل يؤدي لانتشار الفقاعات الهوائية داخل المونة الاسمنتية التي تسبب خفة الوزن وبالتالي نقصان الكثافة.

b) انتاج الرغوة بشكل مسبق: تضاف المادة الراغية إلى الماء بنسبة معينة ثم يخلط المزيج بخلاط مناسب، بعدها تضاف الرّغوة إلى خليط الماء والرمل والاسمنت، وتحدد كمية الرغوة المضافة كثافة البيتون الناتج [2]. وهي الطريقة المتبعة في هذه الدراسة لإنتاج بيتون رغوي.

تمكن الباحث (BYUN, 2014) وأخرون [3] من إنتاج بيتون رغوي بكثافة تراوحت ما بين (390–640 kg/m^3) ومقاومة على الضغط ما بين (0.738–4.7 Mpa)، في حين كانت قيم معامل المرونة ما بين (400–2300Mpa).

استخدم الباحث المواد (اسمنت وماء ومادة راغية وحبيبات البوليسترين) بهدف الحصول على بيتون رغوي بمقاومة على الضغط أكبر من 3Mpa وكثافة بحدود $500kg/m^3$. اعتبر خلطة بيتونية مرجعية استخدم فيها الاسمنت والماء والمادة الراغية فقط، وخلطات بيتونية أخرى استبدل فيها المادة الراغية بحبيبات البوليسترين بشكل جزئي (الاستبدال على أساس حجمي) ، واعتمد نسب الاستبدال على الشكل التالي:

(حبيبات البوليسترين : المادة الراغية) = (10:0) , (7:3) , (5:5) , (3:7) , (0:10)

توصل الباحث إلى أن مكونات الخلطة البيتونية التي تحقق الشروط المطلوبة (مقاومة أكبر من 3Mpa وكثافة بحدود $500kg/m^3$) هي اسمنت (450 kg/m^3) ونسبة (حبيبات البوليسترين : المادة الراغية) = (7:3) ونسبة ماء إلى الاسمنت (w/c = 0.5).

توصل الباحث (BING, 2012) [4] لتطوير بيتون رغوي يمكن استخدامه في العناصر الإنشائية باستخدام هباب السيليس والرماد المتطاير وألياف البولي بروبلين. تراوحت المقاومة على الضغط لهذا البيتون ما بين (10–50 Mpa) من أجل كثافة ما بين (800–1500 kg/m^3) .

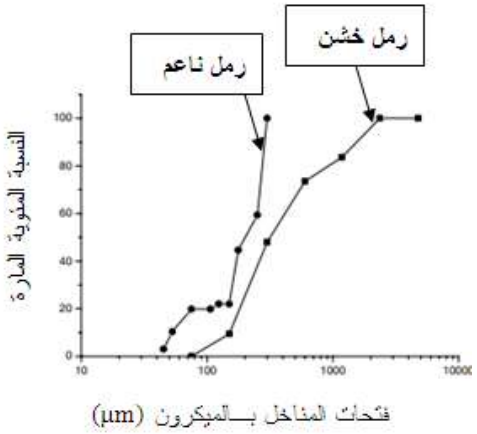
أجرى الباحث (KUNHANANDAN, 2006) [5] دراسة لتقييم تأثير الرمل والرماد المتطاير على خصائص البيتون الرغوي. استخدم الباحث في هذه الدراسة نوعين من الرمل (رمل ناعم بوزن نوعي 2.52 وقطر أعظمي 0.3mm ورمل خشن بوزن نوعي 2.66 وقطر أعظمي 4.75mm) وبتدرج حبي موضح في الشكل (1) من أجل دراسة تأثير معامل نعومة الرمل المستخدم على مقاومة الضغط للبيتون الرغوي، بيّنت النتائج أن مقاومة الضغط في حالة البيتون الذي أُستخدم فيه الرمل الناعم (معامل نعومة أقل) أعلى منها في حالة البيتون الذي أُستخدم فيه الرمل الخشن(معامل نعومة أعلى) كما يظهر الشكل (2)، وأنّه من أجل كثافة معينة للبيتون فإن استبدال الرمل بالرماد المتطاير يحسّن المقاومة على الضغط كما يوضح الشكل(3).

اعتمد الباحث خلطات بيتونية بنسب المزج التالية:

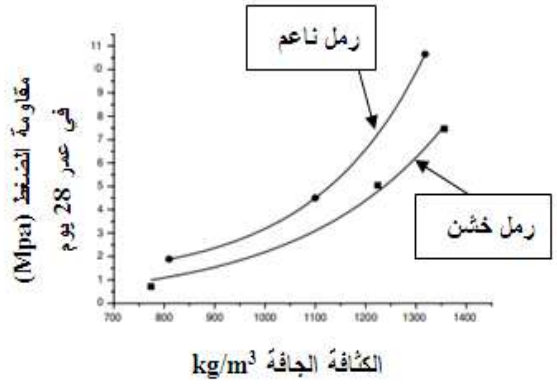
الخلطة الأولى: إسمنت : رمل ناعم = (1 : 1)

الخلطة الثانية: إسمنت : رماد متطاير : رمل ناعم = (1 : 0.5 : 0.5)

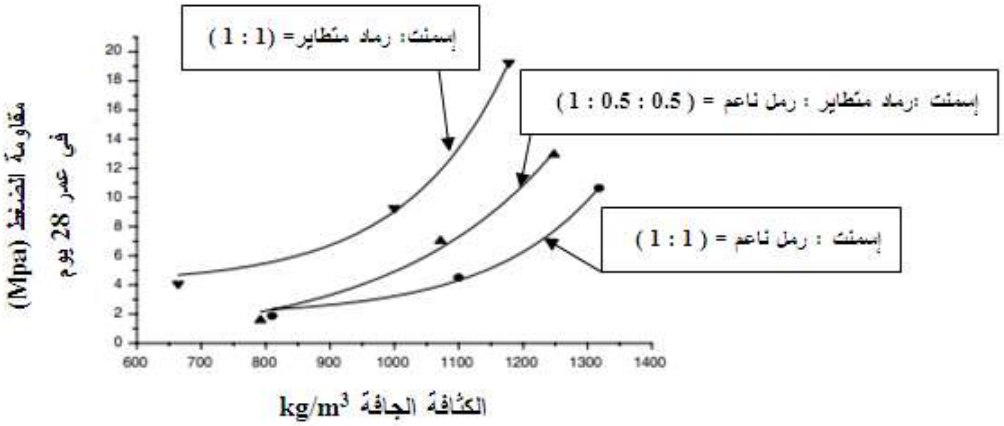
الخلطة الثالثة: إسمنت : رماد متطاير = (1 : 1)



الشكل(1) منحني التدرج الحبي لعينتي الرمل الناعم والرمل الخشن [5]



الشكل(2) العلاقة بين الكثافة الجافة ومقاومة الضغط لعينات مكعبية (50mm) [5]



الشكل(3) العلاقة بين مقاومة الضغط والكثافة الجافة للخلطات المدروسة [5]

أهمية البحث وأهدافه :

تأتي أهمية البحث في إنتاج بيتون رغوي والذي يتميز بالخصائص التالية[2] :

- ذو جدوى اقتصادية عالية إذا ما تمت مقارنته مع المواد الأخرى (البيتون العادي مثلاً)، إذ أن استخدام البيتون الرغوي يؤدي لتقليل وزن المنشأ (يتراوح وزن البيتون الرغوي ما بين 10% و 80% من وزن البيتون العادي)

مما يؤدي لتقليل حجم الأساسات وكمية حديد التسليح المستخدمة. ونظراً لما يتمتع به هذا النوع من البيتون من قدرة على العزل الحراري فإن استخدامه يؤدي إلى توفير الطاقة في التبريد والتدفئة.

- يتميز بقابلية تشغيل ممتازة تسمح بدخوله في الفجوات والفتحات بسهولة، كما يمكن ضخ البيتون الرغوي أفقياً أو عمودياً بدون حدوث انفصال حبيبي أو نضح، كما يمكن صبه بقوالب وأشكال مختلفة.
- لا يتطلب عمليات رج أو دمك أثناء الصب، ولا يتطلب أي معالجة خاصة بعد الصب.
- مادة عازلة للحرارة والصوت بشكل ممتاز.
- ذو امتصاصية منخفضة للرطوبة، لا يتأثر باختلاف درجات الحرارة.
- يعتبر مادة صديقة للبيئة إذ يمكن تكسيره أو طحنه واستخدامه من جديد في الخلطات البيتونية (مادة قابلة لإعادة التدوير).

يهدف هذا البحث إلى:

1 -انتاج بيتون رغوي من أجل كثافة طرية تصميمية ($1000,1300,1600,1900\ kg/m^3$) ونسبة ماء إلى الاسمنت (w/c=0.5) ومحتوى اسمنت $350kg/m^3$.

2 -دراسة بعض الخصائص الفيزيائية كالكثافة الجافة (oven dry density) للبيتون الناتج، وبعض الخصائص الميكانيكية كالمقاومة على الضغط والمقاومة على الشد بالانفلاق.

3 -إيجاد علاقات رياضية تربط بين متغيرات البيتون الرغوي (الكثافة والمقاومة على الضغط والمقاومة على الشد بالانفلاق و نسبة المادة الراغية إلى الاسمنت(foam/cement, F/C)).

طرائق البحث ومواده :

اعتمد البحث على دراسة نظرية للبيتون الرغوي وطريقة انتاجه وفق الكود ACI 523.3R[6]. وتم الاستفادة من بعض الدراسات والتجارب التي تناولت دراسة البيتون الرغوي. تم إجراء هذا البحث في مخابر كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين خلال عام2014.

1- خواص المواد المستخدمة في تحضير الخلطات البيتون المدروسة :

حضرت العينات من المواد التالية :

a) **إسمنت بورتلاندي عادي أسود نوع I** صنف 32.5 صنع معمل إسمنت طرطوس. يوضّح الجدول (1) الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية للاسمنت المستخدم في هذا البحث.

الجدول(1) الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية للإسمنت

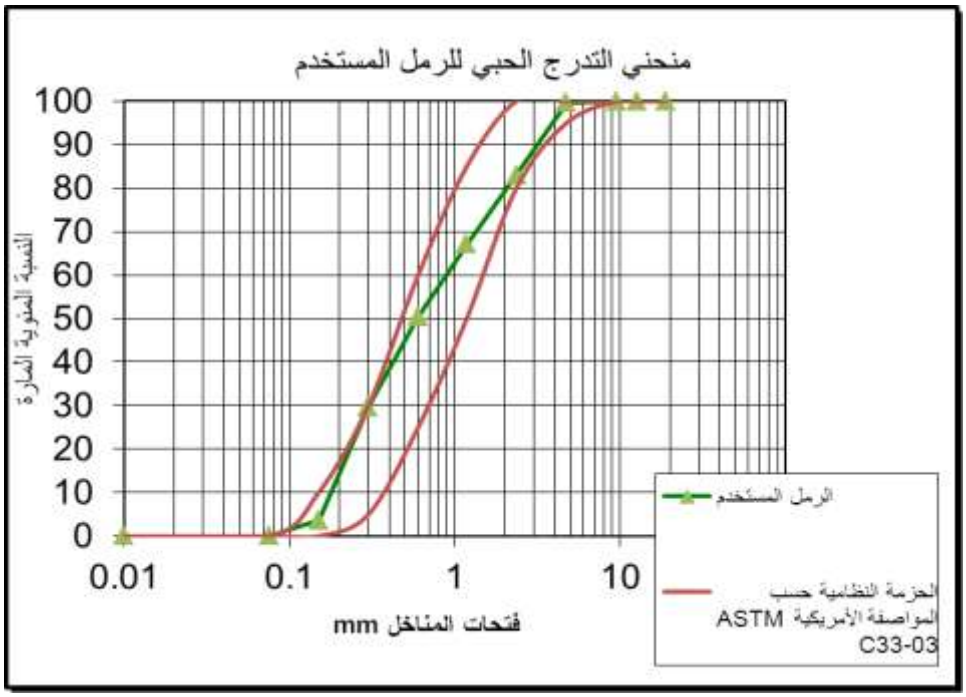
الخصائص الفيزيائية	نتائج الاخبار
النعومة cm^2/gr	3100
زمن بداية الأخذ (دقيقة)	120
زمن نهاية الأخذ (دقيقة)	220
التمدد mm	1
الخصائص الميكانيكية	نتائج الاختبار Mpa

مقاومة الضغط لعينات موشورية 4×4×16 cm	عمر 7 أيام	23.9
	عمر 28 يوماً	37
مقاومة الانعطاف لعينات موشورية 4×4×16 cm	عمر 7 أيام	7
	عمر 28 يوماً	9.3
الخصائص الكيميائية		نتائج الاختبار %
أكسيد السيليس Sio_2		19.85
أكسيد الألمنيوم Al_2O_3		5.16
أكسيد الحديد Fe_2O_3		4.68
أكسيد الكالسيوم CaO		61.88
أكسيد المغنيزيوم MgO		2.58
أكسيدالكبريت SO_3		2.2
الكلس الحر		1.73
فاقد الحرق		1.76
مواد غير ذوابة		1.4

b) **ماء الخلط** : ماء قابل للشرب.

c) **رمل:** مكون من رمل نهري من توضعات نهر مرقية (منطقة بانياس) وناعم من مقالع منطقة القريتين (رمل قيرواني)، استخدمت نسب المزج التالية 65% لرمل مرقية و 35% للرمل القيرواني وذلك للحصول على مزيج رملي بقطر أعظمي 4.75mm ومعامل نعومة قدره Mf=2.67. حُدد الوزن النوعي للرمل المستخدم بالقيمة 2.72 وذلك بالاعتماد على المواصفة الأمريكية ASTM C128 [8] والقيمة المتوسطة للمكافئ الرملي 98% وتم الحصول عليها بعد الغسل.

يبيّن الشكل (4) منحني التدرج الحبي لعينة الرمل المستخدم في هذا البحث وحدود الحزمة النظامية حسب المواصفة الأمريكية ASTM C33-03 [7].



الشكل (4) منحنيات التدرج الحبي للرمل المستخدم والحزمة النظامية حسب المواصفة الأمريكية ASTM C33-03

d) المادة الراغية (Foaming Agent): تم استخدام المادة (NEOPOR) (leycoChem LEYDE GmbH Germany)، وهي مادة عضوية ليس لها أي تأثير كيميائي بل تعمل كغلاف للهواء الذي يتم حقنه في البيتون. وقبل استعماله يجب تخفيفه بأربعين جزء من الماء وذلك حسب المواصفة ASTM C 796 [9]، ويتم اعتبار الماء اللازم لتشكيل الرغوة جزء من الماء الكلي في الخلطة. وبحسب (النشرة الفنية ودليل الاستخدام للمادة الراغية المستخدمة) فإن كل كيلو غرام من المادة الراغية مخففة بأربعين جزء من الماء يعطي حوالي 510 ليتر من المادة الرغوية بكثافة 80 غرام/ليتر.

2-تصميم خلطات البيتون الرغوي:

تم تصميم الخلطة بالاعتماد على طريقة الحجم المطلق بعد اختيار كثافة طرية تصميمية للخلطة البيتونية (fresh density) إذ تعتبر أساس تصميم البيتون الرغوي وذلك تبعاً لتوصيات كود المعهد الأمريكي ACI523.3R [6]. تم تصميم جميع الخلطات من أجل محتوى اسمنت $350\ kg/m^3$ ونسبة الماء إلى الاسمنت w/c=0.5 . يبيّن الجدول(2) تراكيب الخلطات البيتونية المقترحة في هذه الدراسة حيث تدل الرموز على الكثافة الطرية التصميمية للبيتون(LFC-1000, LFC-1300, LFC-1600, LFC-1900).

سنوضح فيما يلي الخطوات المتبعة في تصميم متر مكعب من الخلطة البيتونية LFC1000 .

الكثافة الطرية التصميمية: $1000kg/m^3$

وزن الاسمنت: $350kg/m^3$

وزن الماء: $0.5*350=175kg/m^3$

فيكون وزن الرمل: $1000-(350+175)= 475kg/m^3$

يكون الحجم المطلق للإسمنت والرمل والماء: $350/3150+475/2720+175/1000=0.461m^3$

فيكون حجم الهواء اللازم ادخاله: $1-0.461=0.539m^3$

بافتراض حجم الهواء المولد بواسطة المادة الراغية : 95% فيكون حجم الرغوة اللازمة:

$0.539/0.95=0.568m3=568liter$

وزن المادة الراغية: $568/510=1.113kg/m^3$ (بحسب النشرة الفنية ودليل الاستخدام المرفق بالمادة الراغية المستخدمة)

فيكون وزن الماء اللازم لإنتاج الرغوة: $0.113*40=44.52\ kg/m^3$

فيكون وزن ماء الخلط: $175-44.52=130.48\ kg/m^3$

الجدول (2) مكونات الخلطات البيتونية المدروسة

اسم الخلطة	LFC-1900	LFC-1600	LFC-1300	LFC-1000
نسبة الماء إلى الاسمنت	0.5	0.5	0.5	0.5
وزن الاسمنت(kg)	350	350	350	350
الماء الكلي(kg)	175	175	175	175
وزن الرمل (kg)	1375	1075	775	475
كمية الماء اللازم لإنتاج الرغوة(kg)	17.2	26.3	35.4	44.5
ماء الخلط (kg)	157.8	148.7	139.6	130.5
وزن المادة الراغية (kg)	0.430	0.658	0.885	1.113
حجم الرغوة المدخلة (litre)	219	335	452	568
وزن المادة الراغية إلى وزن الاسمنت F/C (%)	0.12	0.19	0.25	0.32

3- طريقة تحضير عينات الاختبار:

استخدمت المواد الموصفة سابقاً لتحضير جميع عينات البيتون الرغوي، وتمت عملية التحضير وفق التسلسل التالي:

- تشكيل الرغوة اللازمة لكل خلطة من الخلطات المدروسة باستخدام الخلاط الآلي الموجود في مخبر تجريب المواد في كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين الشكل (5). تم وضع المادة الراغية وأضيف الماء اللازم لإنتاج الرغوة وذلك بحسب القيم الواردة في الجدول(2)، ثم تم تشغيل الخلاط حتى تشكلت الرغوة كما يبيّن الشكل(6).

الشكل(5) الخلاط الآلي المستخدم لتشكيل الرغوة

الشكل (6) تشكيل الرغوة اللازمة

- وزن المواد اللازمة لكل خلطة بيتونية (اسمنت– رمل– مادة راغية– ماء) بدقة وبشكل منفصل كما يظهر الشكل(7).
- وضع الرمل والاسمنت في الخلاط الآلي – الموجود في مخبر تجريب المواد والموضح في الشكل (8)– وتشغيله للحصول على خليط جاف متجانس.
- إضافة الماء اللازم للخلط على مراحل مع استمرار الخلط.
- إضافة الرغوة (المشكلة مسبقاً) إلى خليط الاسمنت والرمل والماء واستمرار الخلط حتى الحصول على خليط متجانس كما يبيّن الشكل(9).

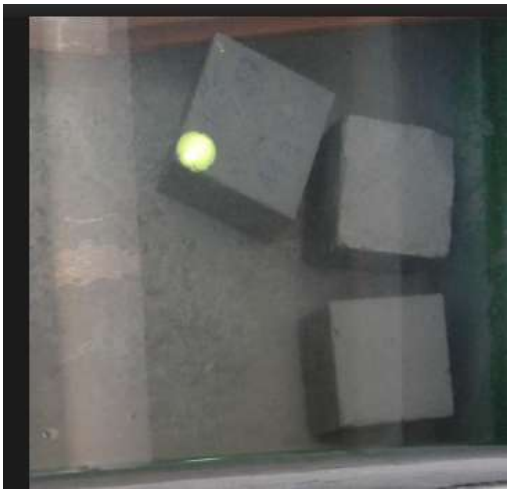
الشكل(7) المواد المستخدمة في إعداد الخلطات البيتونية

الشكل (8) الخلاط الآلي المستخدم لإعداد الخلطات البيتونية.

الشكل(9) إضافة الرغوة المشكلة مسبقاً إلى الخلطة البيتونية

- تجهيز قوالب الصب الفولاذية وتنظيفها وتزييتها لتحضير جميع العينات المختبرة.
- وضع البيتون الطري في القوالب المكعبية على طبقتين، وفي القوالب الاسطوانية على ثلاث طبقات بسماكة 5cm تقريباً كما يظهر الشكل (10)، ومن ثمّ رص العينات بضرب جوانب القالب عند الصب ضرباً خفيفاً كما يوصي المرجع [6] .
- ملء القوالب بالبيتون وتسوية سطحها.
- فك القوالب بعد أربع وعشرين ساعة وتسمية العينات ووضعها في حوض الماء الموجود في مخبر تجريب المواد بدرجة حرارة 2±23 حتى وقت الاختبار. يظهر الشكل(11) بعض العينات المدروسة في حوض الماء.

الشكل(10) صب البيتون في القوالب المكعبية والاسطوانية



الشكل (11) وضع العينات البيتونية في حوض ماء

من أجل كل خلطة من الخلطات المقترحة تم تحضير عينات مكعبية بأبعاد 100×100×100 mm لإيجاد المقاومة على الضغط وعينات اسطوانية بأبعاد 300×150mm لإيجاد المقاومة على الشد بالانفلاق.

النتائج والمناقشة:

أجريت مجموعة من الاختبارات على عينات البيتون المحضرة من الخلطات البيتونية المختلفة، شملت جملة الاختبارات هذه ما يلي:

- **الكثافة الجافة oven-dry density:** تعتبر الكثافة من أهم الخصائص الفيزيائية المميزة للبيتون الرغوي. أُستخدمت عينات مكعبية أبعادها 100×100×100 mm لإيجاد الكثافة الجافة في عمر 28 يوماً. تم حساب الكثافة الجافة بقسمة وزن العينة المجففة في الفرن (لمدة 24 ساعة بدرجة حرارة $110C^0$) على حجمها.
- **المقاومة على الضغط Compressive strength** : تمثل مقاومة الضغط للبيتون أهم الخواص الميكانيكية المميزة للبيتون. تم إجراء اختبار المقاومة على الضغط على عينات مكعبية أبعادها 100×100×100mm باستخدام جهاز الكسر المتوفر في مخبر تجريب المواد في كلية الهندسة المدنية. وضعت العينة بين بلاطتي (فكي) جهاز الكسر وطبق عليها قوة تحميل بسرعة ثابتة حتى الانهيار كما يظهر الشكل (12)، ومن ثمّ تم تقييم المقاومة على الضغط بقسمة قوة الانهيار على سطح العينة.

الشكل(12) عينة الاختبار على الضغط ضمن جهاز كسر العينات البيتونية

- **المقاومة على الشد بالانفلاق Splitting tensile strength** : أجري اختبار الشد بالانفلاق على عينات اسطوانية طولها 300mm وقطرها 150mm وعمرها 28 يوماً وذلك بتعريضها للانفلاق بواسطة حملي ضغط متساويين يعملان على رأسين متقابلين كما يبيّن الشكل (13)، تم إجراء التجربة حسب المواصفة الأمريكية [10] ASTM C496-04، ومن ثمّ حددت مقاومة الشد بالانفلاق بحسب العلاقة التالية:

$$f_t\left(MPa\ \right)=\frac{2P}{\pi dl}$$

حيث: P تمثل قوة الكسر بالنيوتن، d تمثل قطر الاسطوانة بالـ mm ، l تمثل طول الاسطوانة بالـ mm.

الشكل(13) عينة الاختبار على الشد بالانفلاق ضمن جهاز كسر العينات البيتونية

يبيّن الجدول(3) نتائج اختبار الخلطات البيتونية المدروسة، حيث تمثل كل قيمة للمقاومة على الضغط في الجدول(3) متوسط المقاومة على الضغط لثلاث عينات متماثلة وكذلك الأمر بالنسبة للكثافة، في حين تمثل كل قيمة للمقاومة على الشد بالانفلاق متوسط المقاومة على الشد بالانفلاق لعينتين اسطوانيتين.

الجدول(3) نتائج اختبار الخلطات البيتونية المدروسة

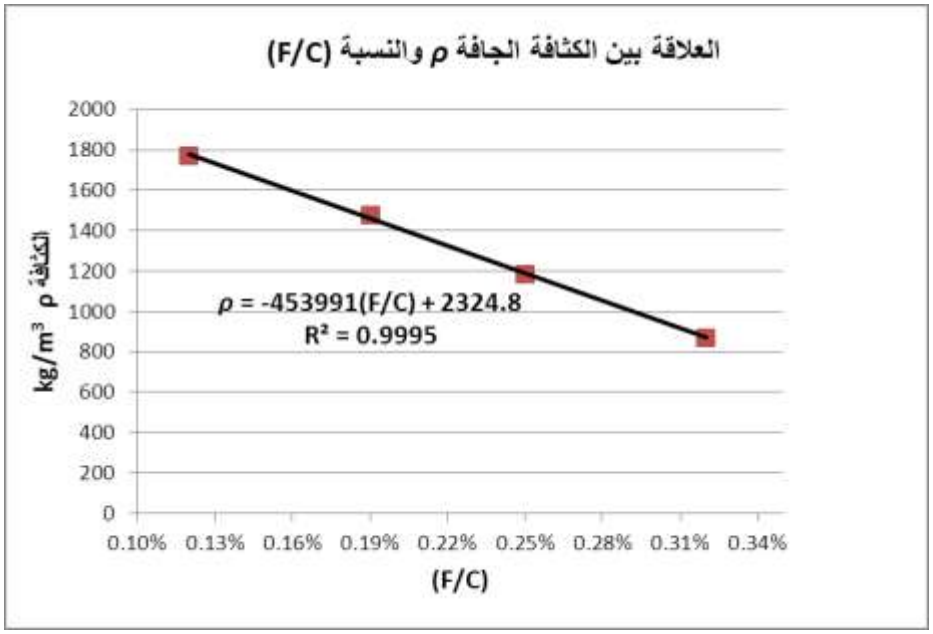
اسم الخلطة	المقاومة على الضغط عمر 7 أيام Mpa	المقاومة على الضغط عمر 14 يوماً Mpa	المقاومة المكعبية (100×100×100mm) على الضغط عمر 28 يوماً Mpa	المقاومة على الشد بالانفلاق Mpa	الكثافة الجافة Kg/m^3
LCF-1000	1.43	2.44	2.95	0.32	870
LCF-1300	4	4.86	5.38	0.62	1186
LCF-1600	7.17	7.53	10.2	1.21	1475
LCF-1900	12.1	12.8	16.2	1.76	1773

1- الكثافة الجافة:

تعمل المادة الراغية المعتمدة في هذه الدراسة على تخفيض كثافة البيتون بشكل واضح، فقد بيّنت النتائج انخفاض الكثافة من $1773\ kg/m^3$ (وفقاً للخلطة LFC-1900) إلى $870kg/m^3$ (وفقاً للخلطة LCF-1000) ،

أي انخفاض الكثافة الجافة بمقدار 47% عند زيادة ال نسبة F/C (وزن المادة الراغية إلى وزن الاسمنت) من (0.12%) إلى (0.32%).

تتعلق الكثافة بشكل مباشر بحجم الفقاعات الهوائية المدخلة ضمن الخلطة البيتونية وبمعنى آخر تتعلق الكثافة بالكمية المستخدمة من المادة الراغية لذلك تمّ إنشاء العلاقة التي تربط بين الكثافة الجافة ρ والنسبة F/C كما هو مبيّن في الشكل(14) ، وهذه العلاقة هي علاقة خطية والتناسب الذي يحكمها تناسب عكسي، إذ تتناقص قيم الكثافة كلما ازدادت النسبة F/C في الخلطة.



الشكل (14) العلاقة بين النسبة(F/C) والكثافة الجافة للبيتون

2- المقاومة على الضغط:

تراوحت قيم مقاومة البيتون الرغوي على الضغط – في هذه الدراسة للعينات المكعبية قياس 100×100×100mm- بعمر 7 أيام ما بين (1.43-12.1 Mpa) وعند 14 يوماً ما بين (2.44-12.8 Mpa) وفي عمر 28 يوماً ما بين (2.95-16.2 Mpa). يظهر الشكل(15) بعض العينات المكعبية التي تم اختبارها على الضغط.

الشكل(15) بعض العينات المكعبية المختبرة على الضغط.

تتأثر مقاومة البيتون الرغوي على الضغط بعوامل عدة منها عمر العينة، الكثافة، محتوى الاسمنت، نسبة الماء إلى الاسمنت، نسبة الرمل إلى الاسمنت S/C ، طريقة حفظ العينة، وكمية المادة الراغية[6].

تمت دراسة تأثير بعض هذه العوامل على مقاومة الضغط للبيتون الرغوي **<u>كعمر العينة والكثافة</u>** (التي تتعلق مباشرةً بالكمية المستخدمة من المادة الراغية).

<u>2-1- تأثير عمر العينة على مقاومة البيتون على الضغط:</u>

يبيّن الشكل (16) العلاقة بين المقاومة على الضغط وعمر العينة (7, 14, 28) يوماً وذلك من أجل جميع الخلطات البيتونية المختبرة. يظهر الشكل(16) تزايداً مستمراً لقيم المقاومة على الضغط مع ازدياد عمر العينة وذلك من أجل جميع الخلطات، ولكن قيمة هذا التزايد تكون أقل كلما ازداد محتوى العينة من المادة الراغية أي كلما قلت الكثافة، كما هو حال الخلطات (LCF-1000, LCF-1300) .

الشكل (16) العلاقة بين المقاومة على الضغط وعمر العينة

2-2- تأثير الكثافة على مقاومة البيتون على الضغط:

أدى تخفيض الكثافة التصميمية من $1900kg/m^3$ (وفقاً للعينة LCF-1900) إلى $1000kg/m^3$ (وفقاً للعينة LCF-1000) إلى انخفاض المقاومة على الضغط بعمر 28 يوماً من (16.2 Mpa) إلى (2.9 Mpa) ، أي أنّ تخفيض الكثافة الطرية التصميمية بمقدار 50% أدى إلى انخفاض قيمة المقاومة على الضغط بمقدار 81% ، وذلك نتيجة تزايد الفقاعات الهوائية في العينات البيتونية.

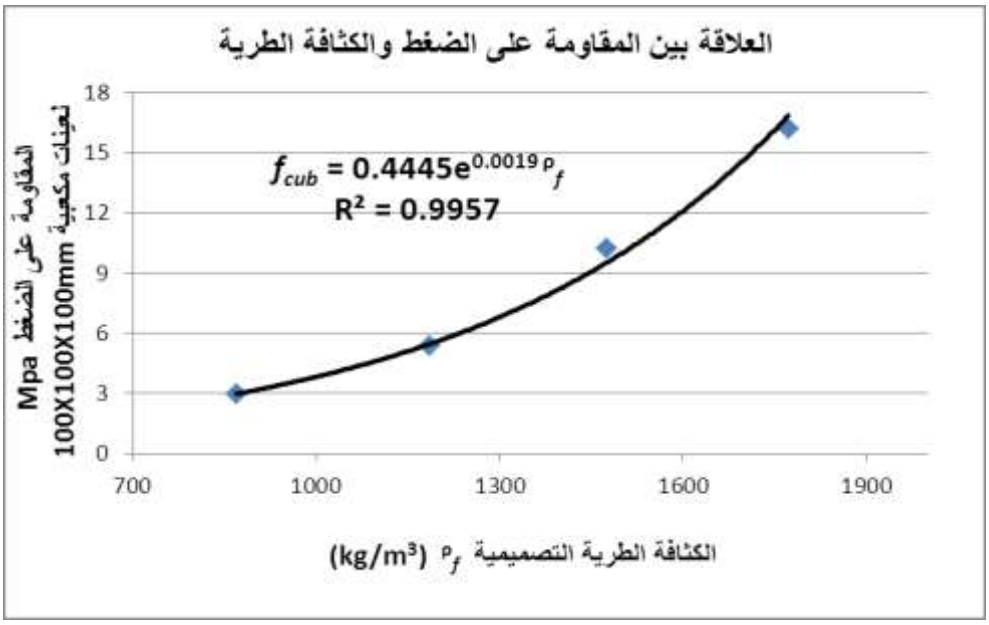
بالاعتماد على النتائج التجريبية لهذا البحث وبرنامج Excel تم اقتراح علاقة تمكن من توقع (التنبؤ) قيمة مقاومة البيتون الرغوي على الضغط f_{cub} في عمر 28 يوماً وذلك من أجل قيمة معينة للكثافة الطرية ρ_f (التي تمثل أساس تصميم هذا النوع من البيتون).

يبيّن الشكل(17) أن أفضل علاقة تربط ما بين المقاومة على الضغط والكثافة الطرية هي علاقة تابع أسي له الشكل التالي:

$$f_{cub} = 0.4445e^{0.0019\rho_f}$$

حيث: ρ_f الكثافة الطرية التصميمية وتقدر بـ kg/m^3

f_{cub} المقاومة على الضغط لعينات مكعبية 100×100×100mm بعمر 28 يوماً وتقدر بـ Mpa



الشكل (17) العلاقة بين المقاومة على الضغط والكثافة الطرية

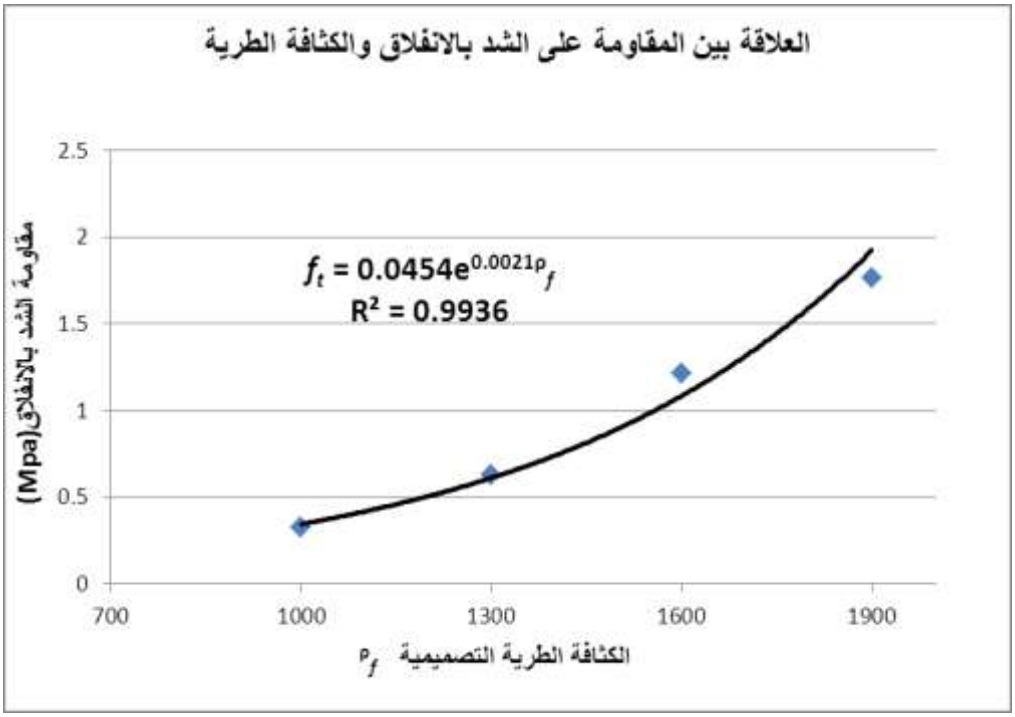
3- المقاومة على الشد بالانفلاق:

تراوحت قيم مقاومة البيتون الرغوي على الشد بالانفلاق ما بين (0.32-1.76Mpa). تتأثر قيم المقاومة للعينات البيتونية على الشد بالانفلاق بقيم كثافتها، لذلك تم إيجاد علاقة تمكن من توقع قيمة المقاومة على الشد بالانفلاق للبيتون الرغوي f_t من أجل قيمة معينة للكثافة الطرية ρ_f وذلك بالاعتماد على النتائج التجريبية في هذا البحث وبرنامج Excel . يبيّن الشكل(18) أنّ العلاقة الأفضل للربط بين المقاومة على الشد بالانفلاق والكثافة الطرية هي علاقة تابع أسي له الشكل التالي:

$$f_t = 0.0454\ e^{0.0021\rho_f}$$

حيث: ρ_f الكثافة الطرية التصميمية وتقدر بـ kg/m^3

f_t المقاومة على الشد بالانفلاق لعينات اسطوانية 150×300 mm بعمر 28 يوماً وتقدر بـ Mpa



الشكل (18) العلاقة بين المقاومة على الشد بالانفلاق والكثافة الطرية

الاستنتاجات والتوصيات:

استناداً إلى الدراسة التجريبية التي تم عرضها في هذا البحث، والمتضمنة انتاج بيتون رغوي ودراسة بعض خصائصه الميكانيكية والفيزيائية، فقد تم التوصل إلى النتائج التالية:

1. إمكانية إنتاج بيتون رغوي باستخدام المادة الراغية (NEOPOR foam)، حيث تراوحت الكثافة الجافة للبيتون الناتج بين ($870-1773\ kg/m^3$).
2. تراوحت قيم المقاومة على الضغط لعينات مكعبية (100×100×100mm) بعمر 28 يوماً ما بين (2.95-16.2Mpa)، في حين كانت قيم المقاومة على الشد بالانفلاق بحدود (0.32-1.76 Mpa).
3. إن إضافة المادة الراغية- المستخدمة في هذه الدراسة- إلى الخلطة البيتونية يؤثر بشكل مباشر على قيم الكثافة، فقد أدت زيادة النسبة F/C (وزن المادة الراغية إلى وزن الاسمنت) من (0.12%) إلى (0.32%) إلى انخفاض الكثافة الجافة بمقدار 47% .
4. تبدي عينات البيتون الرغوي تزايداً مستمراً لقيم المقاومة على الضغط مع ازدياد عمر العينة وذلك من أجل جميع خلطات البيتون المدروسة، وتقل قيمة هذا التزايد كلما تناقصت كثافة العينة المدروسة.

5. أدى تخفيض الكثافة الطرية التصميمية من $1900kg/m^3$ إلى $1000kg/m^3$ إلى انخفاض المقاومة المكعبية (100×100×100mm) على الضغط من 16.2Mpa إلى 2.95Mpa وانخفاض المقاومة على الشد بالانفلاق من 1.76 Mpa إلى 0.32Mpa.

6. تؤثر الكثافة بشكل مباشر على الخصائص الميكانيكية للبيتون، لذلك تم إيجاد علاقة تجريبية تربط بين قيمة الكثافة الطرية (التي تمثل أساس تصميم البيتون الرغوي) والمقاومة على الضغط، وعلاقة أخرى تربط بين الكثافة الطرية والمقاومة على الشد بالانفلاق.

المراجع :

1- ACI Committee 213R-03, "*Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*", American Concrete Institute, 2003, 38.

2- Building and constructer research center, "*Foamed Concrete*", June 2014. <http://www.hbrc.edu.eg/>.12

3- BYUN, K. J; SONG, W; PARK, S. S; SONG, Y. C. " *Development of structural lightweight foamed concrete using polymer foam agent* ".June 2014. <http://www.parkss87.com.ne.kr/foam.pdf> , 9.

4- BING, C; ZHEN, W; NING, L. " *Experimental Research on Properties of High-Strength Foamed Concrete* ". Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 24, No. 1, 2012, 113-118.

5- KUNHANANDAN , E ,K.; RAMAMURTHY, K. "*Influence of filler type on the properties of foam concrete*" Cement and Concrete Composites, Vol. 28, No. 5,2006 , 475-480.

6- ACI Committee 523.3R-14,Guide for "*Cellular Concretes above 50 lb/ft^3 (800 kg/m^3)*" American Concrete Institute, 2014, 17.

7- ASTM C33 " *Standard Specification for Concrete Aggregates*",2003, 11.

8- ASTM C128. "*Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate.* "1988, 7.

9- ASTM C796 "*Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam"*,2004, 6.

10- ASTM C496 "*Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimen*",2004, 5.