مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (36) العدد (3) 2014
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (36) No. (3) 2014

دراسة تأثير استبدال حصويات المونة بالبوزولانا الطبيعية على خصائصها الطرية والصلبة

الدكتور علي خيربك*
نسرين الجبيلي**

(تاريخ الإيداع 4 / 12 / 2013. قُبِل للنشر في 14/ 5 / 2014)

□ ملخّص □

يتناول هذا البحث دراسة إمكانيةِ إنتاجِ مونةٍ إسمنتية خفيفة الوزن بمقاومة على الضغط البسيط تتراوح بين ($170-400kg/cm^2$) وبكثافة أقل من $1920kg/m^3$ تسمح باعتماد تسمية المونة الخفيفة، وذلك باستخدام مادة البوزولانا الطبيعية كحصويات ناعمة. تهدف الدراسة المجراة إلى استبدال حصويات المونة الإسمنتية المتمثلة بالرمل السيليسي بحصويات خفيفة من البوزولانا الطبيعية. فتم اعتماد قيم الاستبدال كنسب مئوية من حجم الرمل المستخدم في المونة (0, 10, 20, 30 50, 100%). وتم اختبار الخصائص الريولوجية للمونة الطرية والمتمثلة بقابلية التشغيل، وقياس المقاومة على الضغط البسيط، المقاومة على الشد بالانعطاف، والوزن الحجمي، ونسبة الامتصاص الأعظمي للماء في الحالة الصلبة. فسمحت النتائج بإيجاد علاقات تربط بين مجمل هذه الخصائص ونسب استبدال الرمل بالبوزولانا الطبيعية؛ حيث بينت النتائج أن استخدام البوزولانا الطبيعية كبديل عن الرمل السيليسي يقدم مجموعة من الميزات أهمها الإقلال من كثافة المونة ومن ثم إنتاج مونةٍ خفيفة يمكن استخدامها في العناصر الإنشائية عندما تزيد مقاومتها على الضغط البسيط عن$170kg/cm^2$.

الكلمات المفتاحية: خلطات المونة الاسمنتية، البوزولانا الطبيعية، المونة الاسمنتية الخفيفة، الحصويات الخفيفة.

* أستاذ مساعد – قسم هندسة و إدارة التشييد – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.
** مشرفة على الأعمال– قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية– جامعة تشرين– اللاذقية–سورية

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (36) العدد (3) 2014
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (36) No. (3) 2014

Study the Influence of Replacement the Aggregates of Mortar with Natural Pozzolana on its Fresh and Hardened Properties

Dr. Ali Kheirbek*
Nisrin Aljubayli**

(Received 21 / 6 / 2014. Accepted 21 / 1 / 2014)

□ ABSTRACT □

This research deals with the study of the possibility of producing lightweight cement mortar with simple compressive strength in range of (170-400kg/cm^2) and density less than 1920kg/m^3 allow the adoption of a lightweight mortar label, by using normal pozzolana as fine aggregates. The study aims to replace the silica sand of cement mortar with lightweight aggregates of natural pozzolana, replacement values was adopted as a percentage of the size of the sand used in the mortar (0, 10, 20, 30, 50, 100%).

Rheological properties were tested for fresh mortar which means the ability of working, and measuring simple compressive strength, flexural strength, volumetric weight, and the rate of maximum absorption of water in the hardened state. Results allowed to find relationships between all of these properties and replacement ratios the silica sand with natural pozzolana. The results showed that using natural pozzolana as a replacement of silica sand offers a range of features including reducing the density and thus the production of lightweight mortar which can be used in the structural elements when its compressive strength is more than 170kg/cm^2.

Keywords: cement mortar mixes, natural pozzolana, lightweight cement mortar, lightweight aggregates.

*Associate Professor– Department of Construction Engineering and Management– Tishreen University – Lattakia- Syria.
**Work Supervisor, Department of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة :

جعلت المنافع الاقتصادية والعملية المتوفرة في البيتون الخفيف في السنوات الأخيرة لهذه المادة مكانة هامة في بناء المنشآت، وأصبح الإقبال على تصنيعه في ازدياد مستمر.

يعرّف البيتون الخفيف بأنه بيتون تقل كثافته عن $1920kg/m^3$ مقارنة بالبيتون العادي ذي الكثافة $2240\sim2480\ kg/m^3$ [1].

يمكن تخفيض وزن البيتون عن طريق واحد أو أكثر من الطرق الآتية:

1- إحداث فراغات داخل الحصويات (البيتون المصنع من حصويات خفيفة).
2- إيجاد فراغات داخل العجينة الاسمنتية (البيتون المهوى أو الخلوي).
3- إيجاد فراغات بين الحصويات (البيتون الخالي من المواد الناعمة).

يعدُ 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 النوع الثاني من هذا البيتون فيتم إنتاجه بإدخال الفراغات من خلال استخدام مواد مولدة للغازات (كبودرة الألمونيوم أو بودرة الزنك)، أو يتم إضافة مواد رغوية للخلطة. في حين أن النوع الثالث يستخدم الإسمنت والحصويات الكبيرة فقط. وفي بعض الحالات يستخدم فيه الهواء من خلال إضافة مواد رغوية أو باستعمال تدرجات خاصة للحصويات.

تعتمد كثافة البيتون الخفيف على نوع الحصويات المستخدمة، ويتم تصنيف البيتون حسب الكثافة ومقاومة الضغط إلى ثلاثة أصناف حسب تصنيف المعهد الأمريكي للبيتون[1]

1-بيتون منخفض الكثافة (LDC): low Density Concrete

ويمتاز هذا النوع من البيتون بانخفاض كثافته إذ تتراوح ما بين $320\ kg/m^3$ - 1100 ومقاومته على الضغط البسيط أقل من $70\ kg/cm^2$ ويستخدم بشكل رئيس لأعمال العزل الحراري و الصوتي.

2-بيتون متوسط الكثافة (MDC): Moderate Density Concrete

إن لهذا النوع من البيتون كثافة $1100\sim1600kg/m^3$ ومقاومة على الضغط البسيط تقع بين مقاومة الضغط للبيتون المنخفض الكثافة والبيتون الخفيف الإنشائي، وتتراوح المقاومة لهذا النوع ما بين $70\sim140\ kg/cm^2$ وقدرته على العزل الحراري متوسطة.

3-البيتون الخفيف الإنشائي (SLC): Structural lightweight Concrete

يُعَدُّ هذا النوع من البيتون ذا كفاءة إنشائية جيدة جداً ،حيث ينتج باستخدام حصويات خفيفة صناعية أو طبيعية وتتراوح كثافته ما بين $1120\sim1920kg/m^3$ ومقاومة على الضغط لا تقل عن $170\ kg/cm^2$ إلا ان خواص العزل الحراري لهذا الصنف أقل كفاءة وفعالية من البيتون منخفض الكثافة.

حدث أقدم استخدام للبيتون الخفيف المصنع من حصويات خفيفة منذ ألفي عام تقريباً وذلك عندما بنى الرومان المعابد ومجاري المياه والمدرجات في روما مستخدمين حصويات الخفان الطبيعية، وما زالت تستخدم هذه الحصويات على نطاق واسع في إنتاج البيتون الخفيف في بلدان متقدمة مثل ألمانيا وإيطاليا واليابان.

أما في بريطانيا فقد استخدم البيتون المصنع من حصويات الرماد الفحمي المتحجر (بقايا الفحم المحترق) في بناء المتحف البريطاني.

ومنذ عام 1957 تقريباً تم في بريطانيا تصنيع الحصويات الصناعية لاستخدامها في البيتون من أجل البناء والعزل، كما تم استخدام الخبث الرغوي المتحجر أيضاً منذ الستينيات تقريباً وهو عبارة عن حصويات خفيفة جيدة.

صُنع البيتون الخفيف المهوى لأول مرة عام 1929 في السويد لإنتاج بلاطات الأسقف المسلحة ذات الوزن الخفيف، و يُستخدم هذا البيتون في عدة أغراض في بريطانيا وغالباً ما يكون على شكل بلوكات أو وحدات إسمنتية مسلحة مسبقة الصنع، وهو ذو قيمة عزل حراري عالية و يُطلق عليه في أوروبا: البيتون الغازي.

لقد بُدئ باستخدام البيتون الخفيف الخالي من المواد الناعمة في شكله الحالي منذ أربعين سنة تقريباً، وقد أصبح مادة البناء الشائعة حيث إن عدة آلاف من البيوت والمساكن بنيت من هذا النوع من البيتون الخفيف.

تُعَدُّ الحصويات التي تكون عادة من منشأ بركاني خفيفة وقوية بشكل كاف لاستخدامها في البيتون، مثل حجر الخفان (Pumice) والذي له بنية خلوية ناتجة عن تخلخل الغازات التي كانت موجودة في الحمم عند ثوران البركان بها، وفي سورية تتوفر حصويات الخفان بكثرة في محافظة السويداء وتستخدم في الأعمال التي تتطلب خفة في الوزن أو عزلاً حرارياً. كما يوجد نوع آخر من الحصويات الخفيفة كالبوزولانا الطبيعية (الطف) وهو حجر مسامي من رماد بركاني، وأيضاً السكوريا (Scoria) وهو خبث بركاني[2].

قام عدد من الباحثين [3] بإجراء دراسة تجريبية على خصائص البيتون المصنع من حصويات خفيفة (الخفان pumice). وذلك بتصميم مجموعتين من الخلطات البيتونية واختبارها، تضمنت الخلطة الأولى (LCNF) حصويات خفيفة مع رمل عادي، أما الأخرى (LCF) فقد تضمنت حصويات ورمل خفيفين. يبيّن الجدول(1) خصائص الخلطات البيتونية المدروسة و التي تحقق متطلبات البيتون الخفيف الإنشائي.

الجدول(1): خصائص الخلطات البيتونية المدروسة[3]

تسمية الخلطة	المقاومة على الضغط (kg/cm^2)	الكثافة (kg/m^3)
LCNF	203~302	1735-1830
LCF	159~196	1440-1510

كما قام الباحث Mesut [4] بتصنيع بيتون خفيف إنشائي باستخدام حجر البيرلايت الطبيعي وبودرة البيرلايت كاستبدال جزئي للاسمنت. وخلص الباحث إلى أنه يمكن إنتاج بيتون بمقاومة ضغط تتراوح بين $200\sim400\ kg/cm^2$ باستخدام البيرلايت، مع تسجيل وفر اقتصادي عند استخدام بودرة البيرلايت.

وقام الباحث WADIE,R [5] بإنتاج مونة إنشائية عالية المقاومة خفيفة الوزن بمقاومة على الضغط تتراوح بين ($335\sim525\ kg/cm^2$) وبكثافة تتراوح بين ($1625\sim2105\ kg/m^3$) وذلك باستخدام حصويات البيرلايت كرمل ناعم.

سنقوم في هذا البحث باستخدام البوزولانا الطبيعية (المتوفرة بكثرة في تل شيحان في منطقة جبل العرب- السويداء) في المونة الإسمنتية كبديل للرمل السيليسي على أساس استبدال حجمي وذلك لدراسة أثر هذه المادة على الخواص الميكانيكية والفيزيائية للمونة في حالتيها الطرية و الصلبة، وذلك باستخدام عدة بارامترات هي: زمن الجريان لقياس قابلية التشغيل، الوزن الحجمي، المقاومة على الضغط البسيط، المقاومة على الشد بالانعطاف، الامتصاص الأعظمي للماء.

نشير هنا إلى أن استخدام البوزولانا الطبيعية في سوريا اقتصر على المطحون منها بنعومة تقارب نعومة الإسمنت، لتلعب دورا الرديف للإسمنت في عمليات الإماهة. و لم تتم دراسة استخدام المادة الخشنة منها كحصويات خفيفة قد تستخدم في صناعة البيتون الخفيف.

ميزات استخدام البوزولانا في البيتون:

يمكن تعريف البوزولانا بأنها مواد سليسية وألومينية لا تملك منفردة صفات رابطة، ولكن عندما تطحن طحناً ناعماً وبوجود الماء تتفاعل كيمياوياً بوجود هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$ في درجات الحرارة الاعتيادية لتكوين مركبات ذات خواص رابطة. قد تتواجد البوزولانا في الطبيعة كالرماد البركاني (volcanic ash)، الأحجار الأوبالية الرخوة (opaline shales) والصخور الصواني (cherts) ، أو تحضر صناعياً مثل الطين المحروق (burnt clay) ورماد الفحم(coal ash). ويشترط أن تكون السليكات الموجودة في البوزولانا بشكل غير متبلور وذلك لأن فعالية أكاسيد السيليس المتبلورة تكون قليلة. إن المواد البوزولانية تقلل من معدل سرعة اكتساب المقاومة للخرسانة في الأوقات المبكرة و يزيده في العمر المتأخر وهذا بدوره يقلل من سرعة انبعاث حرارة الإماهة[6].

أهمية البحث وأهدافه :

تأتي أهمية البحث في إنتاج بيتون خفيف (مصنع من البوزولانا الطبيعية) والذي يتميز بما يأتي[1] :

1-تخفيض الأحمال الميتة في الأبنية البيتونية و المترافق بتقليل نسبة التسليح المستخدم مما سينعكس إيجاباً على الوفر الاقتصادي.

2-سلوك أفضل عند حدوث الزلازل إذ تتناسب الأحمال الزلزالية مع الأحمال الميتة.

3-توفير الراحة السكنية وتقليل تكاليف التدفئة والتبريد باعتبار أن البيتون الخفيف يمتلك قدرة على العزل الحراري وامتصاص للصوت أكثر منه في حالة البيتون العادي.

4-تقليل الضغط العمودي والجانبي على قوالب الصب مما يؤدي إلى تقليل كلفة أعمال تصنيع القوالب.

5-تقليل الأضرار والمخاطر الإنشائية الناتجة من حدوث الحرائق وذلك لديمومة البيتون الخفيف في الدرجات العالية مقارنة مع البيتون العادي.

نضيف لذلك امكانية الاستفادة من البوزولانا الطبيعية التي تمثل ثروة محلية إذ تتوافر تلال منها في المنطقة الجنوبية و مناطق أخرى من سورية.

يهدف هذا البحث إلى استخدام البوزولانا الطبيعية كبديل عن الرمل بمعدلات مختلفة كنسبة مئوية من حجم الرمل السيليسي لمعرفة خصائص المونة الإسمنتية المعدلة بإضافة البوزولانا الطبيعية ومقارنتها مع عينات نظامية غير معدلة، ودراسة تأثير ذلك على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للمونة الإسمنتية ومعرفة مدى إمكانية استخدام المونة الاسمنتية الخفيفة في العناصر الإنشائية (كمونة إنشائية خفيفة الوزن).

طرائق البحث ومواده :

اعتمد البحث على دراسة نظرية لأنواع الحصويات الخفيفة المتوفرة في سورية بحسب المؤسسة العامة للجيولوجيا [2]. وتمت الاستفادة من بعض الدراسات والتجارب التي تناولت دراسة البيتون الخفيف [3, 4, 5] في إغناء هذا البحث التجريبي الذي تم إجراؤه في مخابر كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين وباستخدام مواد محلية خفيفة (البوزولانا الطبيعية) خلال عام 2013.

1. مواصفات المواد الداخلة في خلطات المونة الإسمنتية :

استُخدمت في البحث لتحضير الخلطات البيتونية المختلفة المواد الآتية :

a) **إسمنت بورتلاندي عادي أسود تصنيف I** صنع معمل إسمنت طرطوس مُصنَّع وفق المواصفة السورية رقم 1987/63 بصنف 32.5 .

b) **ماء للجبل** قابل للشرب.

c) **البوزولانا الطبيعية:** من منطقة تل شيحان في السويداء. نبين فيما يلي خصائص هذه المادة من خلال الاختبارات المجراة عليها في مخبر تجريب المواد في كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين.

الوزن الحجمي الصلب: $\rho s=1.7 g/cm^3$

معامل النعومة: $Mf=4.05$

المكافئ الرملي: $ES=98\%$

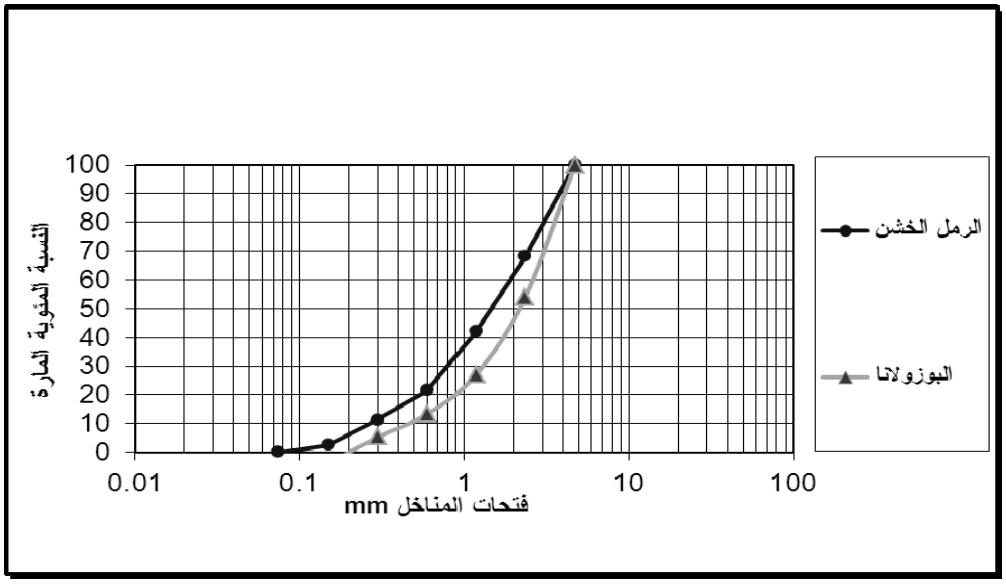
d) **رمل سيليسي:** تم استخدام رمل خشن بتدرج حبي مشابه للتدرج الحبي للبوزولانا المستخدمة بمعامل نعومة قدره $Mf=3.55$ ، ووزن حجمي صلب $\rho s=2.75 g/cm^3$.

الوزن الحجمي الصلب: $\rho s=2.75 g/cm^3$

معامل النعومة: $Mf=3.55$

المكافئ الرملي للرمل المغسول: $ES=99\%$

يبين الشكل(1) منحنيي التحليل الحبي لعينتي البوزولانا الطبيعية وعينة الرمل المستخدم في البحث.



الشكل (1) منحنيات التدرج الحبي للبوزولانا و الرمل

2. تصميم خلطات المونة الإسمنتية:

استخدمت المواد الموصفة سابقاً في صناعة عينات المونة الإسمنتية مختلفة التركيب (مع البوزولانا الطبيعية ودونها). تمت عملية التحضير باستخدام خلاط المونة الإسمنتية الخاص في مخبر تجريب المواد في كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين، و بشكلٍ موحد لجميع العينات وفق التسلسل الآتي [7]:

- وزن كل من المواد (رمل – إسمنت – ماء – البوزولانا) وزناً دقيقاً.
- وضع الماء في الخلاط بهدوء (الخلاط متوقف).
- وضع الإسمنت في الخلاط (الخلاط متوقف).
- تشغيل الخلاط بسرعةٍ بطيئة (140 دورة/دقيقة)، مدة 15 sec.
- إضافة الرمل أو خليط الرمل مع البوزولانا، أو البوزولانا .
- ترك الخلاط يدور بسرعة بطيئة (140 دورة/دقيقة)، مدة 30 sec.
- إيقاف الخلاط و تحريك المواد يدوياً لنزع ما التصق في قعر وعاء الخلط .
- إعادة الخلاط للدوران بسرعة (285 دورة/دقيقة)، مدة 30 sec ثمّ ببطء مدة 15 sec.

تم تحضير مجموعة من العينات الموشورية ذات الأبعاد 16cm*4*4 و ذلك بتراكيب مختلفة بحسب نسبة البوزولانا الطبيعية المضافة إلى الخلطة كنسبة مئوية تستبدل حجماً من محتوى الرمل.

بلغ عدد العينات المصبوبة ست وثلاثون عينة موشورية من جميع الخلطات التي شملت ستة تراكيب اختلفت فيما بينها بمحتواها من البوزولانا.

يبين الجدول (2) تراكيب هذه الخلطات حيث تدل الرموز M0, M10, M20, M30, M50, M100 على نسب الاستبدال الحجمي للرمل بالبوزولانا الطبيعية.

الجدول (2) التركيب الوزني لخلطات المونة الإسمنتية

رمز الخلطة	نسبة الاستبدال حجماً (P%)	وزن الرمل (g)	وزن الإسمنت (g)	وزن الماء (g)	وزن البوزولانا (gr)
M0	0%	1500	500	275	0
M10	10%	1350	500	275	92.4
M20	20%	1200	500	275	185.3
M30	30%	1050	500	275	277.9
M50	50%	750	500	275	463.13
M100	100%	0	500	275	926.3

النتائج والمناقشة:

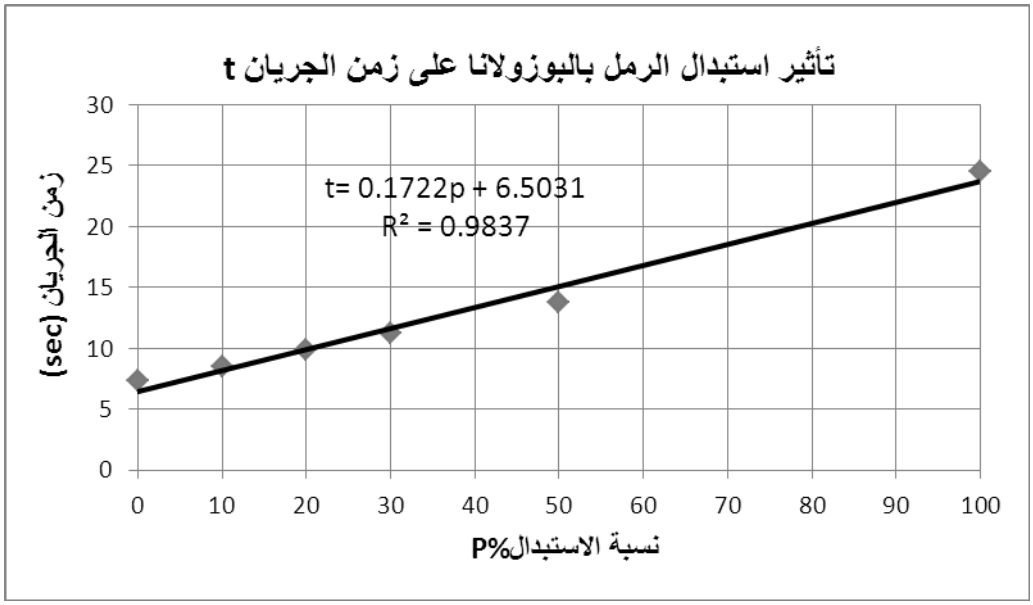
تم إجراء سلسلة من الاختبارات على العينات المختلفة من خلطات المونة الإسمنتية مع استخدام البوزولانا ودونه؛ وذلك لدراسة تأثير البوزولانا الطبيعية على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للمونة الإسمنتية.

شملت سلسلة الاختبارات المجراة على العينات ما يلي:

- **قياس زمن الجريان(t) لتحديد قابلية التشغيل.**
- **المقاومة على الشد بالانعطاف(Rt).**
- **المقاومة على الضغط البسيط(Rc).**
- **قياس الوزن الحجمي(ρ).**
- **قياس الامتصاص الأعظمي للماء(a).**

1- <u>تأثير الاستبدال على زمن الجريان:</u>

لدراسة تأثير نسبة استبدال الرمل بالبوزولانا على قوام المونة الإسمنتية والذي يدل عليه زمن الجريان، قمنا باستخدام جهاز المانيابيليميتر للمونة الإسمنتية الطرية قبل صبها في القوالب. يتألف هذا الجهاز من حيز على شكل متوازي مستطيلات بأبعاد 10cm*10*20 ومن حاجز معدني متحرك يفصل الحيز السابق إلى قسمين: الأول توضع فيه العينة قبل الجريان، والثاني تجري فيه العينة بعد نزع الحاجز. تصب عينة المونة الإسمنتية الطرية في القسم الأول من الجهاز قبل الحاجز المعدني. ولقياس قابلية تشغيل المونة الاسمنتية تترك العينة تجري بعد رفع الحاجز وتحت رجٍ آلي ثابت حتى تصل إلى حدٍ معين في طرف الجهاز (خط مرجعي ثابت). يُقاس في أثناء ذلك زمن جريان المونة بالثانية والذي يمتد بين لحظة نزع الحاجز ووصول المونة إلى الخط المرجعي في طرف الجهاز.



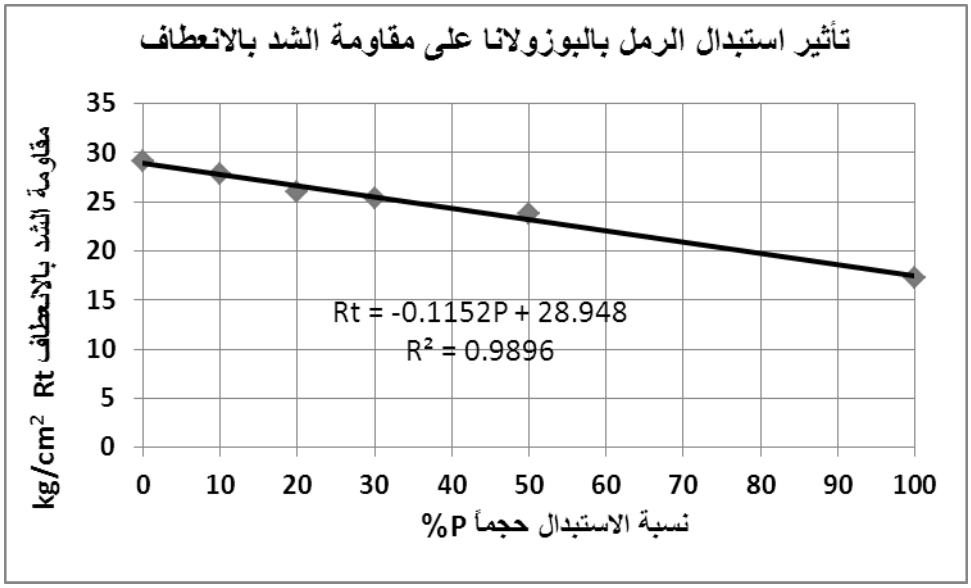
الشكل (2) تأثير استبدال الرمل بالبوزولانا على زمن الجريان.

يبدو من الشكل (2) زيادة زمن الجريان للعينات كلما ازدادت نسبة الاستبدال و هو ما يدل على عينة ذات قوام جامد، يعود ذلك إلى شراهة الحصويات الخفيفة (البوزولانا) للماء، إذ تقوم بامتصاص كمية من الماء الخلط (الذي يفيد في زيادة لدونة المونة في حالتها الطرية) وهو ما سيؤدي إلى تخفيض هذه اللدونة الذي سينعكس على زمن الجريان ليسجل أكبر قيمة له (t=24.5 sec) عند نسبة الاستبدال 100% أي بزيادة قدرها 35%.

2- تأثير الاستبدال على مقاومة الشد بالانعطاف:

أجريت جميع اختبارات قياس الخصائص الميكانيكية و الفيزيائية للخلطات المحضرة بعمر الـ 28 يوم.

يبين الشكل (3) تأثير استبدال الرمل بالبوزولانا الطبيعية على مقاومة المونة الإسمنتية على الشد بالانعطاف.



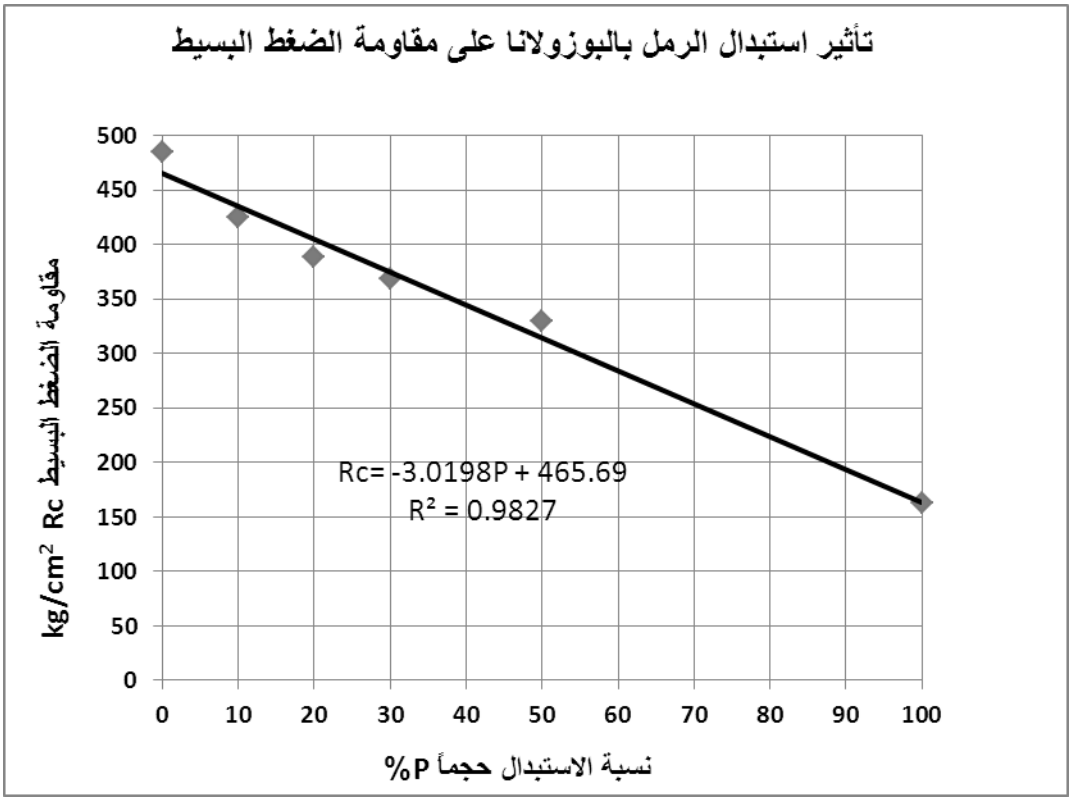
الشكل (3) تأثير استبدال الرمل بالبوزولانا على مقاومة الشد بالانعطاف.

تمثل كل نقطة من نقاط المنحني وسطي قيمة إجهاد الشد بالانعطاف لثلاث عينات متماثلة.

يبدو من منحني الشكل (3) أن العلاقة بين مقاومة العينات على الشد بالانعطاف ونسب الاستبدال خطية، وأن التناسب الذي يحكم العلاقة بينهما هو تناسب عكسي، إذ نلاحظ تناقصاً لقيم المقاومة على الشد بالانعطاف كلما ازدادت نسبة استبدال الرمل السيليسي بالبوزولانا في الخلطة إذ انخفضت المقاومة من حوالي $30Kg/cm^2$ دون استبدال إلى حوالي الـ $17.3Kg/cm^2$ عند نسبة الاستبدال 100% و التي تشكل القيمة القصوى للاستبدال. يعود ذلك إلى هندسية شكل حبيبات الرمل والبوزولانا والذي يتميز بأفضلية للرمل السيليسي مقارنة بالبوزولانا التي تتميز سطوح حبيباتها بتكهفات ستؤثر سلباً على قابلية التصاقها بالعجينة الاسمنتية.

3- تأثير الاستبدال على المقاومة على الضغط البسيط:

يبين المنحني في الشكل (4) الانخفاض الواضح لقيم المقاومة على الضغط البسيط مع زيادة نسبة الاستبدال الحجمي بالبوزولانا في الخلطة، إذ نلاحظ انخفاض قيم المقاومة على الضغط البسيط من $485.5kg/cm^2$ الموافقة لنسبة الاستبدال 0% إلى $163kg/cm^2$ والموافقة لنسبة الاستبدال 100%. وهذا يعني أن المقاومة على الضغط البسيط تتأثر بشكل أكثر حدة منها في حالة المقاومة على الشد بالانعطاف، إذ إن العينات تفقد ما يقارب 67% من مقاومتها على الضغط البسيط عند نسبة الاستبدال 100%، مقابل فقدان 41% من المقاومة على الشد بالانعطاف عند نسبة الاستبدال ذاتها. يعود هذا الانخفاض في المقاومة إلى أن البوزولانا لا مقاومة كبيرة لها فهي حصويات ضعيفة القساوة وتحتاج ماءً أكثر في الخلطة ومن المعلوم أن المقاومة تنخفض مع زيادة نسبة المياه إذ تم اعتماد نسبة الماء إلى الاسمنت في جميع الخلطات w/c=0.55، إضافة إلى أن سطوح حبيبات البوزولانا تتميز بتكهفات تؤثر سلباً على قابلية التصاقها بالعجينة الإسمنتية.



الشكل (4) تأثير استبدال الرمل بالبوزولانا على مقاومة الضغط البسيط.

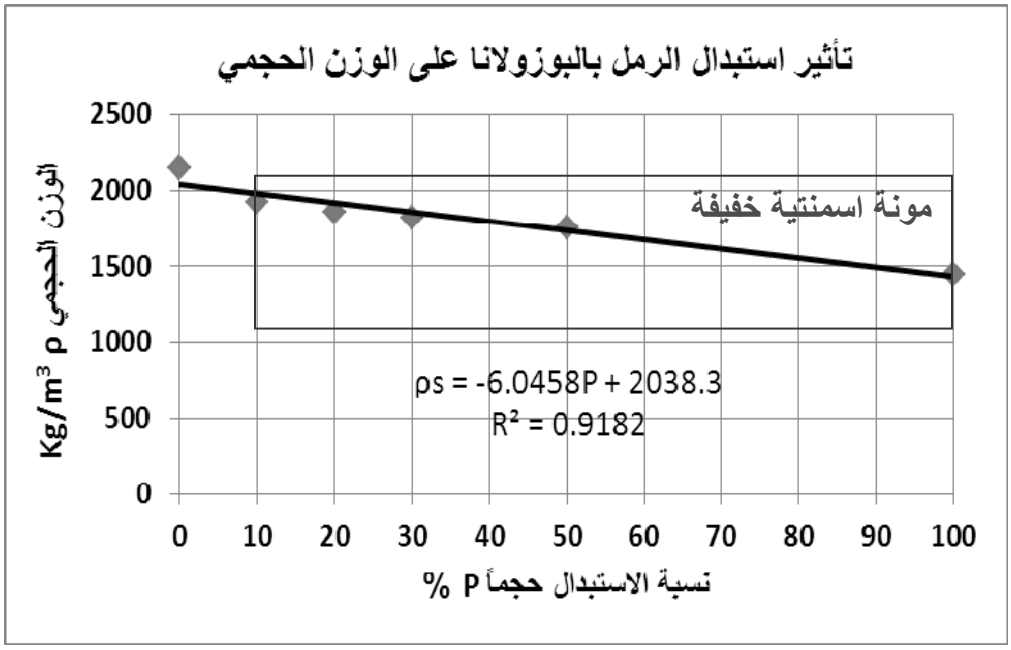
تعد المونة الإسمنتية صالحة للعناصر الإنشائية عند نسبة استبدال الحصويات أقل من 90%، إذ تكون مقاومتها أكثر من $170kg/cm^2$ ، وعلى ضوء هذه النتائج نستطيع تقسيم هذا المجال إلى مجالات جزئية بحسب المقاومة:

نسبة الاستبدال P %	المقاومة على الضغط البسيط kg/cm^2	الاستخدام الأمثل
10-0	400~485.5	مونة عالية الأداء
20-90	400~170	مونة صالحة للعناصر الإنشائية
>90	<170	مونة صالحة لصبات الميول تحت طبقات العزل

3. تأثير الاستبدال على الوزن الحجمي:

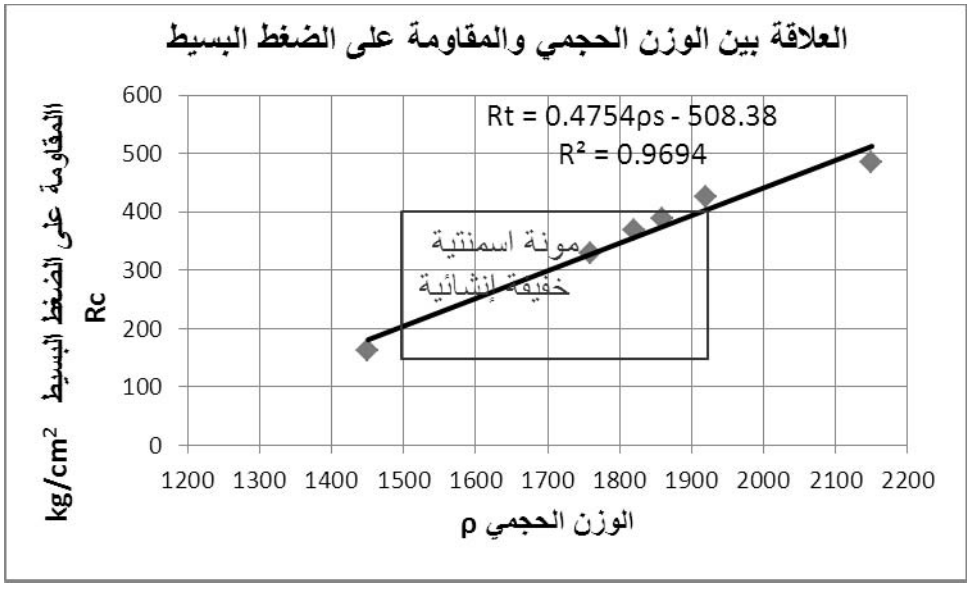
يساهم الوزن الحجمي الصلب المنخفض لمادة البوزولانا $\rho s=1.7g/cm^3$ في إنقاص الوزن الحجمي للخلطة كلما زادت نسبة استبدال الرمل بالبوزولانا . ويبين الشكل (5) الأثر الإيجابي لاستبدال الرمل حجماً بالبوزولانا الذي يتمثل بانخفاض الوزن الحجمي للمونة الإسمنتية مع زيادة نسب الاستبدال. تفقد العينات ما يقارب 33% من وزنها الحجمي عند نسبة الاستبدال 100%، وهو ما يتمثل بالحصول على مونة خفيفة يصل وزنها الحجمي إلى ما دون

الـ $1500Kg/m^3$، مع إمكانية الدخول إلى شريحة المونة الخفيفة اعتباراً من نسبة الاستبدال 10% التي تمثل القيمة التي نبدأ عندها بالحصول على مونة خفيفة ($\rho<1920Kg/m^3$).



الشكل (5) تأثير استبدال الرمل بالبوزولانا على الوزن الحجمي.

ولربط قيم الوزن الحجمي مع المقاومات على الضغط البسيط قمنا برسم المخطط بالشكل (6). يمثل الجزء من المخطط الذي يقع ضمن الإطار حالة مونة إسمنتية خفيفة إنشائية (يمكن استخدامها في العناصر الإنشائية) والتي توافق وزناً حجمياً أقل من $1920kg/m^3$ ومقاومة ضغط بسيط أكبر من $170kg/cm^2$ ونسبة استبدال أقل من 90%.



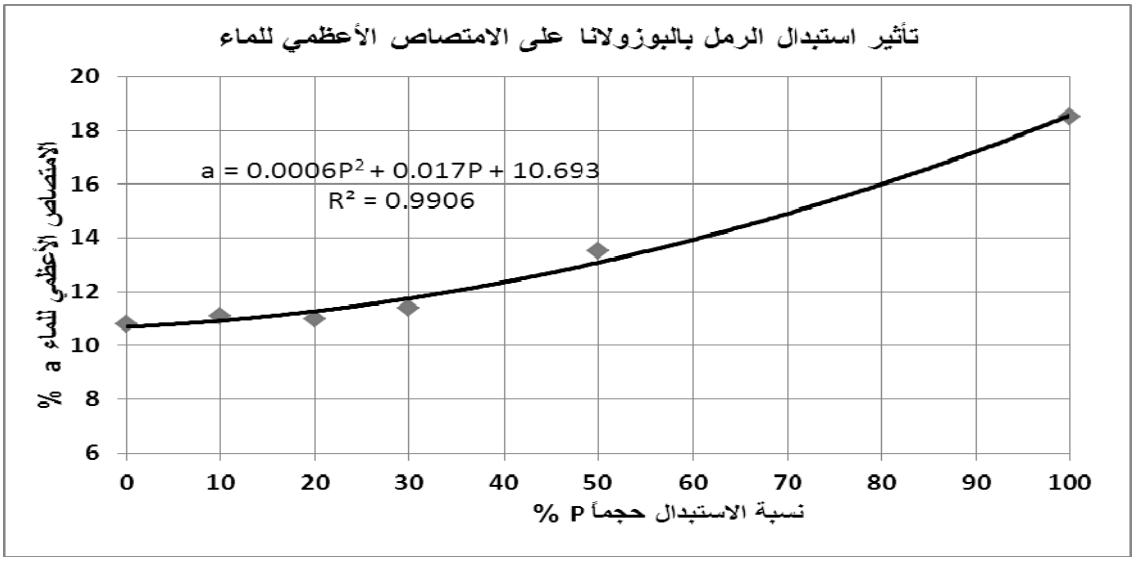
الشكل (6) العلاقة بين قيم الوزن الحجمي للمونة والمقاومة على الضغط البسيط

4. تأثير الاستبدال على الامتصاص الأعظمي للماء:

تم ذلك بغمر العينات الموشورية المحضرة ذات التراكيب المختلفة بالماء حتى ثبات وزنها لتتشرب الماء بشكل أعظمي، ثم قياس وزنها المشبع، ثم تجفيفها حتى ثبات وزنها بدرجة حرارة t=105°C و حساب تشربها الأعظمي بالماء كنسبة مئوية من العلاقة :

الامتصاص الأعظمي = (الوزن المشبع – الوزن الجاف)/(الوزن الجاف)

يبين الشكل (7) تأثر امتصاص المونة الأعظمي بالماء عند استبدال الرمل بالبوزولانا ، ويتوافق هذا التأثر مع مواصفات المونة الخفيفة التي يزداد امتصاصها للماء مع نقصان وزنها الحجمي وذلك بفعل امتصاص البوزولانا للماء إذ يعدُّ هذا النوع من الحصويات أكثر شراهة للماء من الحصويات العادية. وهو ما يُلاحظ على منحني الشكل (7) الذي يبدي زيادة في الامتصاص الأعظمي للماء حتى نسبة الاستبدال 100%. نلاحظ أن نسب الامتصاص الأعظمي للماء تبقى مقبولة لأجل نسبة استبدال30% لذلك لابد من الانتباه إلى الحصويات وعدم وضعها في جو رطب دون حفظها لأنها تمتص الرطوبة وبالتالي تزداد نسبة الماء في الخلطة عن المقرر مما يخفض قيم المقاومة على الضغط.



الشكل (7) تأثير استبدال الرمل بالبوزولانا على الامتصاص الأعظمي للماء.

الاستنتاجات والتوصيات :

1) أظهرت النتائج إمكانية استخدام الحصويات البوزولانية الخفيفة كبديل للحصويات التقليدية في المونة الاسمنتية مع ملاحظة انخفاض الخصائص الميكانيكية (المقاومة على الضغط البسيط، المقاومة على الشد بالانعطاف) وبقاء هذه القيم ضمن الحدود التي تسمح باستخدام هذه المونة في العناصر الإنشائية.

2) بينت النتائج وجود علاقة خطية و تناسب عكسي بين نسبة الاستبدال ومقاومة العينات على الضغط البسيط، فسجلت مقاومة المونة على الضغط البسيط قيماً صغيرة من أجل نسب استبدال كبيرة. وكذلك فإن التناسب العكسي هو الذي يحكم العلاقة ما بين المقاومة على الشد بالانعطاف ونسبة الاستبدال، ولكن بقيم أقل منها في حالة المقاومة على الشد بالانعطاف.

3) تسمح نسب الاستبدال المرتفعة 100% بالحصول على مونة خفيفة بوزن حجمي يسمح باستخدامها في العناصر العازلة حرارياً وصوتياً.

4) يمكن الحصول على مونة إسمنتية خفيفة إنشائية (يمكن استخدامها في العناصر الإنشائية) والتي توافق وزناً حجمياً أقل من $1920kg/cm^2$ ومقاومة على الضغط البسيط أكبر من $170kg/cm^2$ ومن أجل نسبة استبدال من 0 حتى 90% .

5) يؤدي استخدام الحصويات البوزولانية الخفيفة في المونة الاسمنتية إلى الحد من قابلية تشغيلها نظراً لشراهة هذا النوع من الحصويات للماء، مما يستدعي استخدام الملدنات عند صب هذه المونة خشية انخفاض مقاومتها عند الاضطرار لرفع النسبة w/c.

كما يمكن تسجيل مجموعة من التوصيات قد تفيد في الأبحاث القادمة في هذا المجال. يمكن تلخيص أهم هذه التوصيات بالآتي:

1) لا بد من إجراء أبحاث أكثر تقدماً تتناول موضوع الديمومة والتأثر بدرجات الحرارة العالية التي قد تستخدم فيها المونة البوزولانية الخفيفة. إذا ما علمنا أن العديد من المنشآت الأثرية القديمة كانت تستخدم في إنشائها البوزولانا و المونة البوزولانية.

2) بعد النتائج التي حصلنا عليها على المونة الإسمنتية البوزولانية الخفيفة، نرى ضرورة القيام باختبارات مشابهة على البيتون و ذلك بتطبيق استبدال و بنسب مختلفة للحصويات التقليدية بحصويات بوزولانية أكبر مقاساً من الحصويات المستخدمة في هذا البحث.

3) لا بد من القيام بأبحاث على البوزولانا الطبيعية الموجودة في سورية لاختبار عازليتها الحرارية والصوتية إذ لمسنا عند التعريض الحراري للعينات ارتفاعاً أقل في درجات الحرارة للعينات ذات نسب الاستبدال المرتفعة.

المراجع :

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

2- http://www.geology-sy.org (موقع المؤسسة العامة للجيولوجيا والثروة المعدنية في سورية)

3- PARHIZKAR,T; Najimi,M; Pourkhorshidi,A.R. "*Application of pumice aggregate in structural lightweight concrete*" Asian journal of civil engineering (building and housing) vol. 13, No. 1,2012 , 43-54.

4-MESUT, A. "*Structural lightweight concrete with natural perlite aggregate and perlite powder* ", M.Sc. Thesis, Middle East technical university, Turkey, September 2006.

5- WADIE,R.N. "*Properties of High Strength Structural Lightweight Mortar Using Perlite as Partial Replacement of Fine Aggregate*" Eng. & Tech. Journal, Vol.31, No.2, 2013, 265-276.

6- معلة، خلدون عباس؛ السعدي، نوال أحمد؛ عبد الله، حسام حميد. تواجد البوزولانا الطبيعي العراقي في منطقة أنجانة، جبل حمرين الجنوبي، وسط العراق، مجلة الجيولوجيا والتعدين العراقية. المجلد/2/، العدد/2/، 2006، 51-63.

7- خيربك، علي. *أثر الاستخدام الأمثل للملدنات على مواصفات المونة الإسمنتية في الحالة الطرية والصلبة*، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية- سلسلة العلوم الهندسية، جامعة تشرين، المجلد (30) العدد (1) 2008، 29- 39.