

تطور المقاومة الميكانيكية للملاطات الإسمنتية ثنائية وثلاثية التركيب المحتوية على البوزولانا الطبيعية و مسحوق الحجر الكلسي

الدكتور أندراوس سعود*

الدكتور عارف السويداني**

أمنية الحمّامي***

(تاريخ الإيداع 8 / 12 / 2015. قُبل للنشر في 31 / 7 / 2016)

□ ملخص □

وفقاً للمواصفة القياسية السورية رقم (3411) الموافقة للمواصفة الأوروبية رقم (EN 197-1)، يمكن إنتاج إسمنت بورتلاندي بوزولاني، و إسمنت بورتلاندي كلسي، بإضافة البوزولانا و الحجر الكلسي كبديل جزئي عن الإسمنت، بنسب تصل إلى (35%). رغم الفوائد الإقتصادية و البيئية و التقنية لاستعمال البوزولانا الطبيعية و مسحوق الحجر الكلسي، إلا أنه غالباً ما تقترن هذه الفوائد ببعض العيوب. يهدف هذا البحث إلى استقصاء أثر إضافة البوزولانا الطبيعية أو مسحوق الحجر الكلسي أو كليهما معاً كبديل جزئي عن الإسمنت في تطور المقاومة الميكانيكية للملاطات الإسمنتية المحضرة. في هذه الدراسة، تم إنتاج ست عشرة تركيبة إسمنتية (إسمنت بورتلاندي عادي، ست تركيبات من الإسمنت ثنائي التركيب، و تسع تركيبات من الإسمنت ثلاثي التركيب) بنسب استبدال مختلفة من البوزولانا الطبيعية و مسحوق الحجر الكلسي. تم استقصاء تطور مقاومة الضغط و الشد للملاطات المدروسة بعد فترات إنضاج قدرها: (2، 7، 28 و 90 يوماً). أظهرت النتائج حدوث تناقص في المقاومة مع زيادة محتوى البوزولانا الطبيعية، إضافة إلى حصول زيادة في المقاومة المبكرة عند إضافة الحجر الكلسي المسحوق. تمت ملاحظة وجود زيادة في مقاومة الضغط عند إضافة البوزولانا الطبيعية و الحجر الكلسي في آن معاً. بناءً على النتائج التي تم الحصول عليها، وباستعمال الطرائق الإحصائية تم استخراج معادلة حسابية للتنبؤ بالمقاومة الميكانيكية للملاطات المحضرة بإسمنتات ثنائية و ثلاثية التركيب. إضافة إلى ماسبق، تمت دراسة أثر إضافة البوزولانا الطبيعية أو مسحوق الكلس أو كليهما معاً في بعض الخواص الفيزيائية والكيميائية للإسمنتات ثنائية و ثلاثية التركيب.

الكلمات المفتاحية : المقاومة الميكانيكية، الإسمنت ثنائي التركيب، الإسمنت ثلاثي التركيب، البوزولانا الطبيعية، مسحوق الحجر الكلسي.

*أستاذ، كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق، دمشق - سورية .

**مدرس، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة العربية الدولية، دمشق - سورية .

***طالبة ماجستير، كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق، دمشق - سورية .

Mechanical strength development of binary and ternary blended cement mortars containing natural pozzolans and limestone powder

Dr. Andrawis Saoud*
Dr. Aref al-Swaidani**
Amineh Hammami***

(Received 8 / 12 / 2015. Accepted 31 / 7 / 2016)

□ ABSTRACT □

According to the Syrian standard 3411 & European standard EN 197-1, Portland pozzolana cements and Portland limestone cements can be produced by partial replacement of pozzolan or limestone up to 35%. Despite of the economical, ecological and technical benefits of adding natural pozzolan and limestone powder, they are often associated with shortcomings.

The objective of the study is to investigate the effect of adding natural pozzolan, limestone powder or both on the mechanical strength development of the prepared cement mortars. In the study, sixteen types of binders (one OPC, six binary and nine ternary blended cements) with different replacement levels of natural pozzolan, limestone powder or both have been produced. The development of the compressive and flexural tensile strength of all mortar specimens has been investigated after 2,7,28 & 90 days curing, respectively.

Test results revealed that there was a decrease in strength with increasing amounts of natural pozzolan. In addition, there was found an increase in the early age strength with adding limestone powder. The increase in compressive strength when adding both natural pozzolan and limestone powder has also been noted. Further, based on the results obtained, an empirical equation was derived to predict the mechanical strengths of binary & ternary blended cement mortars with curing times. The influence of adding natural pozzolan, limestone powder or both on some physical properties of binary and ternary blended cements have been reported, as well.

Keywords. Mechanical strength; binary cement; ternary cement; natural pozzolan; limestone powder.

* Professor, Faculty of Civil Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

** Assistant Professor, Faculty of Architectural Engineering, Arab International University (AIU), Damascus, Syria

*** Postgraduate Student, Faculty of Civil Engineering, Damascus University, Damascus, Syria

مقدمة:

منذ سبعينيات القرن الماضي ركزت جهود بحثية عديدة على استعمال الإضافات كبديل جزئي عن الإسمنت البورتلاندي. من بين هذه الإضافات كان الاستعمال الواسع للبوزولانا الطبيعية و لمسحوق الحجر الكلسي. حيث تستعمل البوزولانا الطبيعية، التي تعدّ إحدى أقدم مواد الإنشاء [1]، حالياً كبديل جزئي عن الإسمنت، نظراً لفوائدها البيئية و الاقتصادية و تلك المرتبطة بالأداء [2-7]، إلا أنّ هذا الاستعمال يؤخّر أزمته التجمّد (الأخذ) (setting times)، ويؤدّي إلى الحصول على مقاومات مبكّرة أكثر انخفاضاً مقارنةً بالإسمنت البورتلاندي العادي [8]. كما يستعمل الحجر الكلسي لأغراض عديدة في الإسمنت و الخرسانة، فهو يستعمل أساساً كمادة خام لصناعة الكلنكر، إضافةً لاستعماله كحصىّات في الخرسانة، ويمكن أن يستعمل مسحوق الحجر الكلسي أيضاً كبديل جزئي عن الإسمنت. ولاستعمال مسحوق الحجر الكلسي فوائد عدة منها المقاومة المبكّرة المرتفعة، و انخفاض متطلب الماء، وتخفيض كلفة إنتاج الإسمنت، وتخفيض انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في إنتاج الإسمنت [9]. بما أنّ المقاومة الميكانيكية تمثّل على نحو شائع، إحدى خواص الخرسانة الأكثر أهمية [10]، كما أنّ معرفة مميّزات التجمّد (الأخذ) للعجينة الإسمنتية ضرورية لتحديد الزمن المتاح لصب الخرسانة و دمكها و إنهاءها و فك قالبها. لذا للتغلب على انخفاض المقاومة المبكّرة للإسمنتات المحتوية على البوزولانا الطبيعية، و على مشكلة الإطالة في أزمته التجمّد، قد تكون إضافة مسحوق الكلس أحد الحلول لتلافي هذه العيوب. وفقاً للأدبيات العلمية [11،12]، فإنّ استبدال جزء من الإسمنت بمسحوق الحجر الكلسي يوفّر سطحاً إضافياً لترسيب نواتج الإماهة، محفّزاً بالتالي الإماهة المبكّرة للإسمنت. إضافة إلى التأثير السابق لإضافة مسحوق الحجر الكلسي، الذي يطلق عليه الأثر المائي (filler effect)، هناك أيضاً أثر كيميائي، حيث يمكن أن تتفاعل كربونات الكالسيوم الموجودة في مسحوق الحجر الكلسي مع طور الأومينات المائية المتشكل نتيجة إماهة الإسمنت البورتلاندي العادي [13،14]، مؤدّيةً إلى تشكّل كربوألومينات مائية (Carboaluminate hydrates) تقود إلى استقرار الاترنجيت (Ettringite)، مما يسبب زيادة في الحجم الكلي لنواتج الإماهة [14،15]. هذه الزيادة في الحجم قد تؤدّي إلى حدوث نقصان في المسامية (Porosity)، و بالتالي إلى ازدياد في المقاومة. إلا أنّ هذا الأثر الكيميائي في النّظام الإسمنتي المركّب من الحجر الكلسي و الإسمنت البورتلاندي قد يعدّ محدوداً بالنظر إلى محدودية محتوى الأومينات في الكلنكر، لذا غالباً ما يُنظر إلى الحجر الكلسي المائي على أنّه خامل. إلا أنّه عند استعمال مواد رابطة إضافية تحتوي الأومينات كالبوزولانا أو خبث الفرن العالي أو الرماد المتطاير، قد تنتج أومينات كالسيوم مائية إضافية [16]. لهذا السبب قد يكون الأثر الكيميائي أكثر أهمية في الإسمنتات المحتوية على المواد الرابطة الإضافية المحتوية على الأومينات [16]، حيث تتفاعل أومينات الكالسيوم المائية المتشكلة نتيجة التفاعل البوزولاني مع كربونات الكالسيوم الموجودة في مسحوق الحجر الكلسي، مشكّلة كربوألومينات الكالسيوم المائية.

تمتلك سوريا مناطق بركانية واسعة، حيث تغطّي الصخور البركانية من العصر الثالث و الرابع ما يزيد على سدس مساحة سوريا. تشغل البوزولانا الطبيعية حجوماً مهمّة من بين هذه الصخور باحتياطي يقارب ثلاثة أرباع المليار طن. ولا زالت الدراسات التفصيلية لإمكانية استعمالها في صنع الخرسانة محدودة [2]. كما تتميز سوريا كذلك بغناها بالحجر الكلسي، الذي يصل احتياطيه إلى ما يزيد على عشرة مليارات طن وفقاً للتقديرات الجيولوجية [17]. مع عدم تجاهل ميزة وقوع مقالع الحجر الكلسي بجوار معامل الإسمنت، حيث يعدّ الحجر الكلسي أحد المواد الأولية الرئيسة التي تدخل في صناعة الإسمنت.

أهمية البحث و أهدافه:

تهدف هذه الورقة، التي تمثّل جزءاً من رسالة ماجستير يجري إعدادها في جامعة دمشق، إلى دراسة تطوّر المقاومة الميكانيكية للملاطبات الإسمنتية، المحضّرة بإضافة البوزولانا الطبيعية أو مسحوق الحجر الكلسي أو كليهما معاً كبديل جزئي عن الإسمنت، ومقارنة هذا التطوّر مع تطوّر المقاومة للإسمنت البورتلاندي العادي دون إضافات. بلغت نسب الإضافات المدروسة من البوزولانا الطبيعية: (0%، 10%، 20%، 30%) و من مسحوق الكلس: (0%، 5%، 10%، 15%)، حيث وصل عدد التركيبات الإسمنتية إلى ست عشرة تركيبة. تمّت دراسة تطور المقاومة الميكانيكية بعد أزمنة إنضاج (curing times) مختلفة: (2، 7، 28، و 90 يوماً). تمّت الإشارة كذلك في متن الورقة إلى بعض الخواص الفيزيائية للتركيبات الإسمنتية المدروسة.

طرائق البحث و مواده:

1. المواد:

1.1. البوزولانا الطبيعية:

تمّ استخراج البوزولانا الطبيعية من موقع تل شيحان الذي يقع على بعد يقارب الـ 70 كيلومتراً جنوب شرق دمشق (الشكل 1). أظهر التحليل الفلزي أنّ البوزولانا مكوّنة بشكل رئيس من كتلة أرضية زجاجية لا بلّورية، وحوصلات (فراغات هوائية) و فلّزات الأوليفين و البلاجيوكلاز و البيروكسين. يظهر الشكل رقم (2) صورة مأخوذة بالمجهر الاستقطابي لمقطع رقيق مأخوذ من البوزولانا المدروسة. كما يظهر الجدول رقم (1) التحليل الكيميائي للبوزولانا المدروسة.

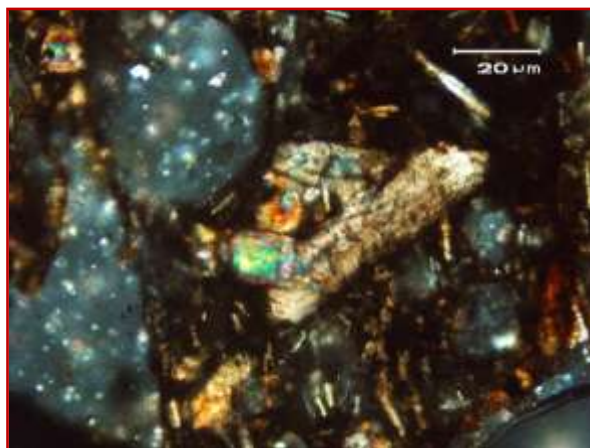


(ب)

(أ)

الشكل رقم (1) صورة فوتوغرافية للمقلع المدروس (تل شيحان) و للبوزولانا الطبيعية المدروسة.

(أ) صورة فوتوغرافية للمقلع المدروس، (ب) صورة للبوزولانا الطبيعية.



الشكل رقم (2) صورة مأخوذة بالمجهر الاستقطابي للبوزولانا الطبيعية تظهر فيها بلورات مجهرية من الأوليفين و البيروكسين و البلاجيوكلاز في أرضية زجاجية مع حويصلات (vesicles) (فراغات هوائية)، بعض هذه الفراغات مملوءة بفلزات بيضاء كالكالسيت.

2.1 . مسحوق الحجر الكلسي:

تم استرجار الحجر الكلسي من مقالع إسمنت حماة التي تقع على بعد حوالي (200 كم) شمال العاصمة دمشق. تم عرض نتائج تحليل مركباته الكيميائية في الجدول رقم (1). تم تحديد محتواه الإجمالي من الكربون العضوي (TOC) وفقاً للمواصفة الأوروبية (EN 13639)، وكذلك تحديد محتوى الغضار فيه من خلال اختبار أزرق الميتيلين (Methylene blue test) وفقاً للمواصفة الأوروبية (EN 933-9).

3.1. عينات الإسمنت:

تم تحضير ست عشرة تركيبة اسمنتية (الجدول رقم 2): تركيبة إسمنت بورتلاندي عادي دون إضافات، وست تركيبات من الإسمنت ثنائي التركيب، و تسع تركيبات من الإسمنت ثلاثي التركيب. تم الحصول على الإسمنت البورتلاندي (كلنكر +5% جيس) من إحدى مطاحن معمل إسمنت عدرا بريف دمشق مباشرة (نظراً لأن معظم إختبارات البحث قد تم إجراؤها في مخابر المعمل)، وبعد تم قياس السطح النوعي له أعطى قيمةً لنعومة بلين بحدود (3600 سم²/غ). الجدول رقم (1) يعرض نتائج التحليل الكيميائي للإسمنت. تم طحن البوزولانا الطبيعية و الحجر الكلسي في مطحنة مخبرية سعتها (25 كغ) وصولاً إلى نعومة بلين قدرها 100±4100 سم²/غ. تم اللجوء إلى هذا المستوى من نعومة البوزولانا للتغلب على حد ما على عيوب المقاومة المبكرة المنخفضة للإسمنتات المحتوية على البوزولانا الطبيعية [18-20]. كذلك تم طحن الحجر الكلسي بهذه النعومة للاستفادة من الأثر المالي له، و تعزيز تفاعله الكيميائي مع طور الألومينات المائية [12،14]. تمت إضافة البوزولانا الطبيعية كبديل جزئي عن الإسمنت بالنسب التالية: (0%، 10%، 20%، 30%)، كما بلغت نسب إضافة مسحوق الحجر الكلسي: (0%، 5%، 10%، 15%). تم قياس نعومة بلين باستعمال طريقة النفاذية للهواء (Air permeability method)، وفقاً للمواصفة الأوروبية (EN 196-6). حيث يعتمد مبدأ الطريقة على قياس تدفق الهواء عبر كومة مرتصة من المسحوق الإسمنتي. تم ترميز التركيبات الإسمنتية وفقاً لنسب الإضافة من البوزولانا الطبيعية أو مسحوق الكلس أو كليهما معاً، حيث يشير الرمز (NP0L0)، على سبيل المثال، إلى الإسمنت البورتلاندي العادي الذي لا يحوي أية إضافات، و الرمز (NP20L0) يشير إلى إسمنت ثنائي التركيب يحوي 20% بوزولانا طبيعية فقط، أما الرمز (NP0L5) فيشير إلى

إسمنت ثنائي التركيب يحوي 5% من مسحوق الحجر الكلسي فقط، في حين يشير الرمز (NP20L5) إلى إسمنت ثلاثي التركيب يحوي 20% بوزولانا طبيعية و 5% مسحوق حجر كلسي. تمّت إضافة المواد كافة على أساس وزني.

الجدول رقم (1): نتائج التحليل الكيميائي للإسمنت البورتلاندي العادي و البوزولانا الطبيعية و مسحوق الحجر الكلسي

| المواد الرابطة (Cementitious materials) | | | التركيب الكيميائي (%) |
|--|-----------------------------------|----------------------------|---|
| مسحوق الحجر الكلسي | البوزولانا الطبيعية* | الإسمنت البورتلاندي العادي | |
| 1.57 | 44.91 | 19.57 | SiO ₂ |
| 0.69 | 16.98 | 4.86 | Al ₂ O ₃ |
| 0.33 | 8.64 | 3.50 | Fe ₂ O ₃ |
| 54.37 | 9.39 | 62.21 | CaO |
| 0.43 | 8.87 | 2.78 | MgO |
| 0.01 | 0.01 | 2.12 | SO ₃ |
| 42.22 | 0.36 | 1.36 | الفاقد بالحرق (Loss On Ignition) |
| 0.019 | 2.76 | 0.22 | Na ₂ O |
| 0.014 | 1.75 | 0.34 | K ₂ O |
| 0.07 | 0.9 | 0.6 | TiO ₂ |
| 0.01 | 0.0 | 0.03 | Cl ⁻ |
| - | 5.01 | 1.67 | المتبقي غير المنحل (Insoluble) (Residue) |
| 99.73 | 99.58 | 99.26 | المجموع (Total) |
| | 79 (at 7 days) 90 (at 28 days) | | مؤشر فاعلية البوزولانا (Pozzolan) (ASTM C618) (activity index) |
| المكونات الرئيسية للإسمنت البورتلاندي العادي وفقاً لصيغ بوغ (Bogue's Formulas) | | | |
| | | 60.82 | C ₃ S |
| | | 10.22 | C ₂ S |
| | | 6.96 | C ₃ A |
| | | 10.65 | C ₄ AF |

*قيمة أكسيد السيليس الفعال (SiO₂reactive) المحددة وفقاً للمواصفة الأوروبية (EN 196-2) تساوي إلى

(%40.85)

4.1. ملاطات الإسمنت:

تمّ تحضير ملاطات الإسمنت باستعمال التركيبات الإسمنتية المحضرة، و رمل مخبري موافق لمتطلبات المواصفة الأميركية (ASTM C778). تمّت المحافظة على نسبة ثابتة للمادة الرابطة إلى الرمل (واحد رمل إلى 2,75 رمل وزناً). كذلك تمّت المحافظة على نسبة ثابتة للماء إلى المادة الرابطة (w/b) عند قيمة مساوية إلى 0.5 في جميع الخلطات. بعد حفظ العينات في جو رطب برطوبة نسبية (90% ~) تمّ فك القوالب و حفظ العينات بالماء المشبع بالكلس (lime-saturated water) عند درجة حرارة (22 °C ~) حتّى موعد إجراء الاختبار. الغاية من الحفظ في ماء مشبع بالكلس، وفقاً للمواصفة الأميركية (ASTM C192)، هي الحيلولة دون حدوث رشح للكلس أو البورتلانديت (CH leaching) من عينات الملاط الطري المحضّر باستعمال الاسمنت المخلوط.

2. الاختبارات الفيزيائية و الميكانيكية:

تمّ تحديد متطلب الماء للحصول على عينة قياسية، و أزمنة التجمد للعجينة القياسية، و التمدد الحجمي لكافة التركيبات الإسمنتية وفقاً للمواصفة القياسية السورية رقم (1675) الموافقة للمواصفة الأوروبية رقم (EN 196-3). بعد أن تمّ اختبار ثلاثة مواشير ملاط على الانعطاف، تمّ اختبار أنصاف هذه المواشير في آلة اختبار الضغط من نوع (Zwick Roell)، وفقاً للمواصفة القياسية السورية رقم (1674) الموافقة للمواصفة الأوروبية رقم (EN 196-1)، الشكل رقم (3). جرى اختبار عينات الملاط الإسمنتية على الإنعطاف و الضغط، بعد فترات إنضاج لهذه المواشير كانت على التوالي: 2، 7، 28، 90 يوماً. تمّ أخذ وسطي قياس ست قراءات في اختبار مقاومة الضغط، و وسطي ثلاث قراءات في اختبار مقاومة الانعطاف.

الجدول رقم (2) يبين النسب المستعملة من الإسمنت البورتلاندي

و البوزولانا الطبيعية و مسحوق الحجر الكلسي في التركيبات الإسمنتية المدروسة

| التركيبية (Combination) | إسمنت بورتلاندي عادي (كلنكر + جيس) (%) | البوزولانا الطبيعية (NP) (%) | مسحوق الكلس (L) (%) |
|----------------------------|---|---------------------------------|---------------------|
| NP0L0 (التركيبية المرجعية) | 100 | 0 | 0 |
| NP10L0 | 90 | 10 | 0 |
| NP20L0 | 80 | 20 | 0 |
| NP30L0 | 70 | 30 | 0 |
| NP0L5 | 95 | 0 | 5 |
| NP10L5 | 85 | 10 | 5 |
| NP20L5 | 75 | 20 | 5 |
| NP30L5 | 65 | 30 | 5 |
| NP0L10 | 90 | 0 | 10 |
| NP10L10 | 80 | 10 | 10 |
| NP20L10 | 70 | 20 | 10 |
| NP30L10 | 60 | 30 | 10 |

| | | | |
|----|----|----|---------|
| 15 | 0 | 85 | NP0L15 |
| 15 | 10 | 75 | NP10L15 |
| 15 | 20 | 65 | NP20L15 |
| 15 | 30 | 55 | NP30L15 |



الشكل رقم (3) صورة تظهر آلة اختبار الضغط و الانعطاف لمواشير الملاطات الإسمنتية المدروسة

النتائج و المناقشة:

1. خواص البوزولانا الطبيعية و مسحوق الحجر الكلسي:

كما هو مبين في الجدول رقم (2)، تعدّ البوزولانا الطبيعية المدروسة مادة مناسبة للاستعمال كبوزولانا، كونها توافق متطلبات المواصفات القياسية لمثل هذه المادة عبر امتلاكها لمجموع إجمالي لكل من (SiO_2) و (Al_2O_3) و (Fe_2O_3)، يزيد على (70%)، و محتوى كبريتات (SO_3) أقل من (4%)، و فاقد بالحرق أقل من (10%) وفقاً للمواصفة الأميركية (ASTM C618). كما أنّ محتوى البوزولانا من أوكسيد السيليس الفعّال يزيد على (25%) وفقاً لمتطلبات المواصفة القياسية السورية رقم (3411) الموافقة للمواصفة الأوروبية (EN 197-1). إضافة إلى ذلك فإنّها تمتلك مؤشر فعالية مقاومة (pozzolan activity index) مع الإسمنت البورتلاندي يزيد على القيم الموصّفة في المواصفة الأميركية (ASTM C618).

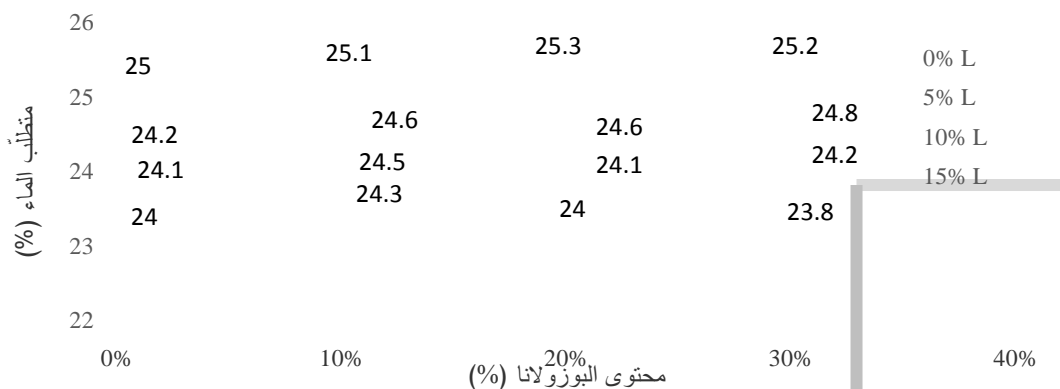
كما يعد مسحوق الحجر الكلسي مادة مناسبة لامتلاكه محتوى من كربونات الكالسيوم (CaCO_3) يعادل (97%) وهذه القيمة تزيد على الحد الأدنى البالغ (75%) وفقاً للمواصفة القياسية السورية رقم (3411) الموافقة للمواصفة الأوروبية (EN 197-1)، و كذلك محتوى إجمالي من الكربون العضوي (TOC) يقدر وسطياً بـ (0.36%)، حيث يمكن تصنيف الإسمنت المخلوط المنتج بإضافته على أنّه (CEM II/L)، كما أنّ محتوى الغضار فيه يقدر وسطياً بـ (0.56%)، أي لا يزيد على النسبة (1.2%) التي اشترطتها المواصفة الأوروبية (EN 933-9). علاوة

على ذلك تمّ تحديد بعض الشوائب مثل (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO)، وقد كان محتواها الإجمالي أقل من (3.1%).

2. الخواص الفيزيائية للإسمنتات المدروسة:

1.1.2. متطلب الماء (Water requirement):

يظهر الشكل رقم (4) تمثيلاً بيانياً لنتائج متطلب الماء لعينات العجينة المدروسة. من الملاحظ أنّ عينات الاسمنت ثنائية التركيب المحتوية على البوزولانا الطبيعية، احتاجت إلى متطلب ماء أكبر للحصول على القوام القياسي للعجينة. إلا أنّ نسبة الزيادة تبقى أقل من (2%)، عند مقارنتها بالعينة المرجعية. يمكن إرجاع ذلك إلى الأثر التزليقي (lubricant effect) الذي تبديه البوزولانا الطبيعية عند طحنها [21,2]. أما عينات الإسمنت ثنائية التركيب المحتوية على مسحوق الحجر الكلسي، فقد أبدت، بالرغم من النعومة العالية لمسحوق الحجر الكلسي، متطلباً أقل للماء بحوالي (4%) مقارنةً بالعينة المرجعية، حيث بلغ متطلب الماء للحصول على العجينة القياسية في العينة المرجعية (NP0L0) القيمة (25)، في حين انخفض هذا المتطلب في العينة (NP0L10) إلى (24). يعود هذا السلوك إلى التوزع الأوسع في القياس الحبيبي (wider particle size distribution) لمسحوق الحجر الكلسي [22]، الذي أكدّه الميل الأقل لمسحوق الحجر الكلسي المساوي إلى (0.69)، المرسوم بناءً على مخطط روزين و راملر (Rosin-Rammler diagram)، المبين في الشكل رقم (5). بالنسبة للإسمنتات ثلاثية التركيب، كان التغير في متطلب الماء طفيفاً و لم يزد بأيّ حالٍ من الأحوال على (6%).

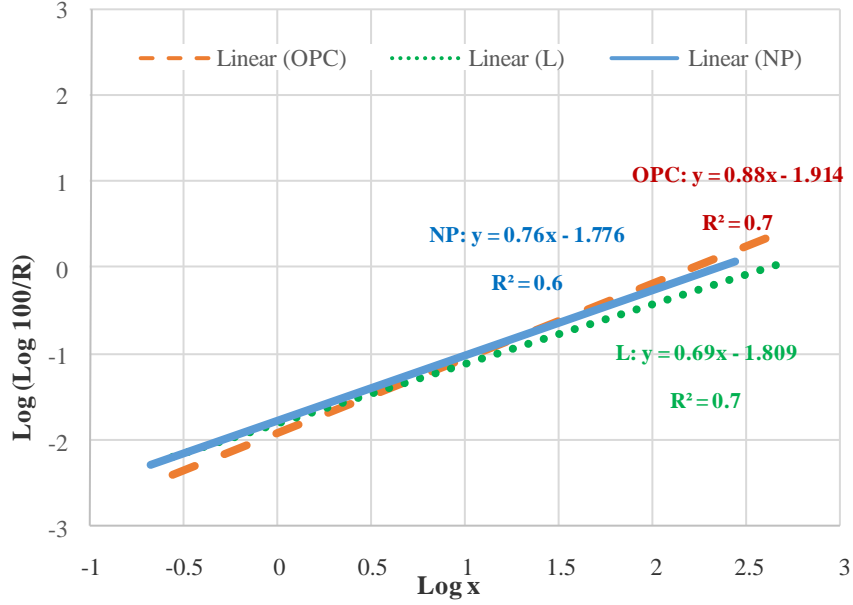


الشكل رقم (4) تمثيل بياني يظهر متطلب الماء للتركيبات الإسمنتية المدروسة

2.2. أزمنة التجمّد (الأخذ) (Setting times):

تعدّ معرفة مميّزات تجمّد (أخذ) العجينة الإسمنتية مهمّة جداً في حقل تشييد الخرسانة. حيث يلعب سلوك التجمّد للعجينة الإسمنتية دوراً مهماً في تحديد الزمن المتاح للصب و الدّمك و الإنهاء و فك القالب. يوضّح الشكل رقم (6) أزمنة بداية و نهاية التجمّد للعجينة الإسمنتية المرجعية، و عينات العجينة الإسمنتية التي تحوي إسمنتات ثنائية و ثلاثية التركيب. أظهرت النتائج ازدياداً طفيفاً في أزمنة الأخذ في الإسمنتات ثنائية التركيب التي تحوي البوزولانا الطبيعية فقط، مع ازدياد محتوى البوزولانا الطبيعية، يمكن إرجاع هذا السلوك إلى التفاعل البوزولاني بين البوزولانا و هيدروكسيد الكالسيوم (CH) المتحرّر من إماهة كل من (C_3S) و (C_2S) في الإسمنت البورتلاندي، الذي يتّصف بكونه تفاعلاً أبطأ من تفاعلات إماهة الإسمنت البورتلاندي [2]. بينما في الإسمنتات ثنائية التركيب التي تحوي مسحوق الحجر الكلسي فقط كان السلوك مغايراً، حيث تناقصت أزمنة التجمّد لهذه الإسمنتات بشكل ملحوظ مع ازدياد

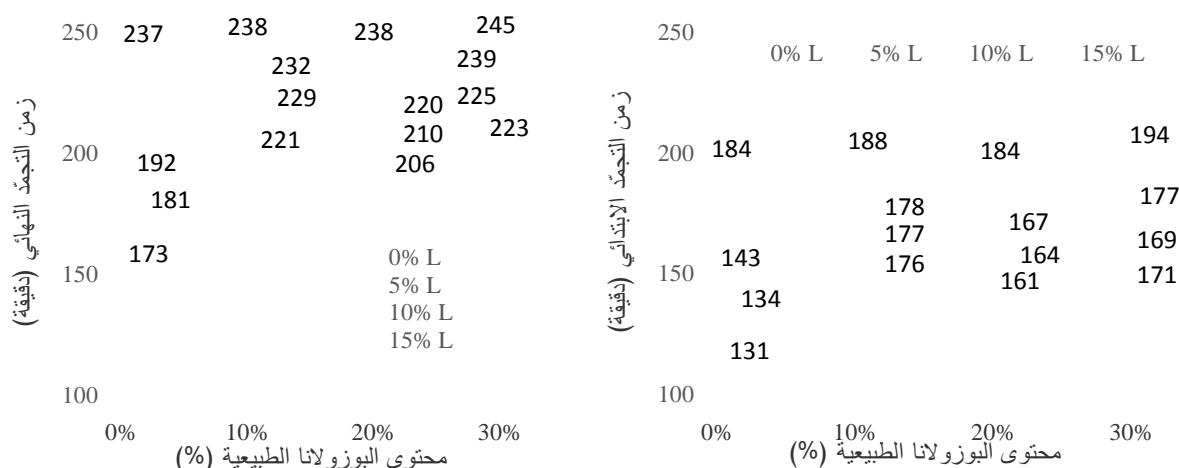
محتوى مسحوق الحجر الكلسي. على سبيل المثال، بگرت إضافة مسحوق الحجر الكلسي بنسبة (5%) زمن بداية التجمد بمقدار (50 دقيقة) مقارنةً بالعينة المرجعية، يمكن إرجاع ذلك إلى تأثير كربونات الكالسيوم المسرع لإماهة (C₃S) و (C₃A) مشكّلة السلفو ألومينات و سيليكات الكالسيوم المائية (C-S-H) [23].



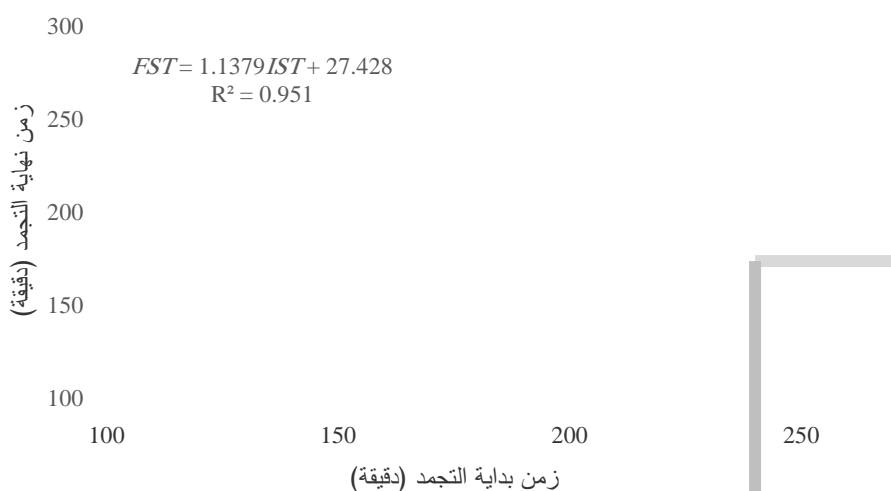
الشكل رقم (5) مخطط روزين و راملر للمكونات المستعملة في التركيبات الإسمنتية (x: قياس الحبة، R: يمثّل المحجوز التراكمي)

بالنسبة للتركيبات الإسمنتية ثلاثية التركيب، يمكن رؤية بوضوح تأثير إضافة مسحوق الحجر الكلسي في الحد من تأخر أزمّة التجمد عند استعمال التركيبات الإسمنتية الثنائية المحتوية على البوزولانا الطبيعية فقط، فعلى سبيل المثال، التركيبة الإسمنتية الثنائية المحتوية على (30%) بوزولانا أظهرت بعد مرور (194) دقيقة بداية للتجمد، في حين أنه بعد إضافة (5%) من مسحوق الحجر الكلسي، انخفض زمن بداية التجمد بمقدار (17) دقيقة، وبعد إضافة (15%) من مسحوق الحجر الكلسي، انخفض هذا الزمن بمقدار (23) دقيقة أي وصولاً إلى (171) دقيقة.

لابدّ كذلك من الإشارة إلى أنّ أزمّة بداية ونهاية التجمد لجميع التركيبات الإسمنتية المدروسة، كانت موافقة لاشتراطات المتطلبات القياسية، التي توصي بأن لا يقل زمن بداية التجمد للإسمنت عن 45 دقيقة، وأن لا يزيد زمن نهاية التجمد على 420 دقيقة، وفقاً للمواصفة الأميركية (ASTM C595)، وكذلك أن لا يقل زمن بداية الأخذ وفق المواصفة القياسية السورية رقم (3411) بأي حال من الأحوال عن 45 دقيقة. علاوةً على ذلك، أشار التمثيل البياني لأزمّة بداية التجمد في مقابل أزمّة نهاية التجمد للتركيبات الإسمنتية كافة، إلى وجود علاقة قوية بين هذين العاملين، حيث بلغ معامل الارتباط المحسوب (coefficient of correlation) (R^2) القيمة (95%). يشير الباحث مونتوغومري [24] إلى وجود علاقة قوية بين المتغيرات، عندما يكون معامل الارتباط أكبر أو يساوي (0.85). يمكن بالتالي التنبؤ بزمن نهاية التجمد من المعادلة الموضّحة على الشكل رقم (7)، عند الحصول على زمن بداية التجمد. حيث (FST) هو زمن نهاية التجمد بالدقيقة، و (IST) هو زمن بداية التجمد بالدقيقة.



الشكل رقم (6) أزمنة بداية و نهاية التجمد للتركيبات الإسمنتية المدروسة. (أ) أزمنة بداية التجمد، (ب) أزمنة نهاية التجمد



الشكل رقم (7) العلاقة بين أزمنة التجمد الأولية و النهائية للعجينات الإسمنتية المصنعة من للتركيبات الإسمنتية المدروسة

3.2. التمدد الحجمي (Volume expansion):

أظهرت النتائج التجريبية أنّ قيم التمدد الحجمي للتركيبات الإسمنتية المحددة وفقاً لاختبار لوشاتوليه المسرع، كانت جميعها مقبولة، وفي معظمها أقل من (0.5 مم) وهي قيمة أقل بكثير من الحد الأعلى المسموح للتمدّد، البالغ (10 مم) الذي توصّفه المواصفة القياسية السورية رقم (1675) الموافقة للمواصفة الأوروبية (EN 197-1). وقد يُعزى ذلك إلى انخفاض محتوى الكلس الحر، و أكسيد المغنيزيوم النّفعال في الإسمنت، المركّبين المسؤولين عن مثل هذا التمدّد.

3. الخواص الميكانيكية للملاطات المدروسة:

1.3. مقاومة الضغط:

تم تمثيل النتائج التجريبية لمقاومات عينات الملاط المدروسة في الأشكال البيانية من (8) إلى (11)، وكذلك عرضها في الجدول رقم (3)، مع نسب هذه المقاومات بالمقارنة مع مقاومة العينة المرجعية المحتوية فقط على الإسمنت البورتلاندي. كما هو متوقع، فقد أظهرت عينات الملاط جميعاً تزايداً في المقاومة مع زيادة عمر الإنضاج. وقد كانت مقاومات الضغط الأعلى في أي عمر إنضاج، تعود في معظمها للإسمنت البورتلاندي العادي عند مقارنتها بالتركيبات الإسمنتية الأخرى. يُلاحظ من الأشكال البيانية من (8) إلى (11) أن تطور المقاومة الرئيسي في عينات الملاط الإسمنتي المحضرة بإضافة البوزولانا الطبيعية، يحدث في الـ (28) يوماً الأولى، مع وجود ازدياد ملحوظ آخر للمقاومة بين (28) يوماً و (90) يوماً. بالمقابل، يمكن ملاحظة بوضوح حدوث تطور للمقاومة في عينات الملاط الإسمنتي المحضرة بإضافة مسحوق الحجر الكلسي خلال الـ (28) يوماً الأولى، مع عدم ملاحظة حدوث أي تزايد مهم في المقاومة بعد عمر الإنضاج هذا. إضافة إلى ذلك، يمكن القول أنه كلما زاد محتوى البوزولانا في الإسمنتات ثنائية التركيب التي تحوي البوزولانا الطبيعية فقط، كلما تناقصت مقاومة الضغط. على سبيل المثال، انخفضت مقاومة الضغط من (20.6 MPa) إلى (8.3 MPa) بعد إنضاج لمدة يومين، عندما تم استعمال إسمنت بورتلاندي عادي و إسمنت ثنائي التركيب محتوى البوزولانا فيه (30%)، على الترتيب. يمكن تبرير هذا الانخفاض بالأثر التخفيفي (dilution effect) الذي يسببه الانخفاض في كمية المكون الأكثر فاعلية أو نشاطاً، أي الإسمنت البورتلاندي العادي، في التركيبة الإسمنتية، وكذلك إلى بطء التفاعل البوزولاني بين الطور الزجاجي في البوزولانا الطبيعية و هيدروكسيد الكالسيوم المتحرر من إماهة الإسمنت [2]. إلا أن المقاومة في الأعمار المتأخرة لهذه الإسمنتات ثنائية التركيب قد قاربت مقاومة الإسمنت البورتلاندي العادي.

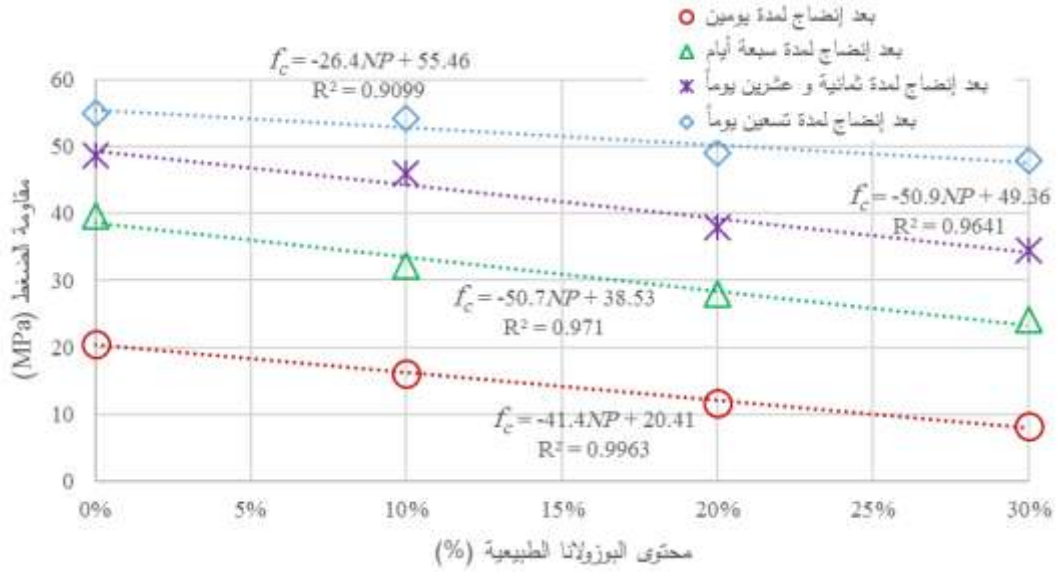
بالمقابل أظهرت عينات الملاط المحضرة بإسمنتات ثنائية التركيب بإضافة مسحوق الحجر الكلسي، سلوكاً مغايراً للعينات المحضرة بإضافة البوزولانا الطبيعية، حيث كانت المقاومة المبكرة مقاربة لمقاومة الإسمنت البورتلاندي العادي، بشكل خاص عند نسب الإضافة (5%) و (10%). على سبيل المثال، كانت مقاومة عينات الملاط المحضرة بإضافة (5%) من مسحوق الحجر الكلسي مساوية تقريباً لمقاومة ملاط الإسمنت البورتلاندي العادي عند عمر إنضاج (2) يوم، في حين أنها قد انخفضت بشكل طفيف عند عمر إنضاج قدره (7) يوم. يمكن إرجاع المقاومة المبكرة المرتفعة للإسمنت ثنائي التركيب بإضافة مسحوق الحجر الكلسي، إلى الأثر المالى (filler effect) لمسحوق الحجر الكلسي، و إلى توفير مسحوق الحجر الكلسي سطوحاً إضافية لترسب نواتج الإماهة، الذي يؤدي بدوره إلى تسريع إماهة الإسمنت البورتلاندي [11،23]، والتي عوّضت إلى حد كبير من الأثر التخفيفي الذي سببه استبدال مكون أكثر فاعلية (كالإسمنت البورتلاندي) بمكون آخر أقل فاعلية (كمسحوق الحجر الكلسي).

الجدول رقم (3) نتائج مقاومات الضغط للملاطات المدروسة عند أزمنة الإنضاج المختلفة.

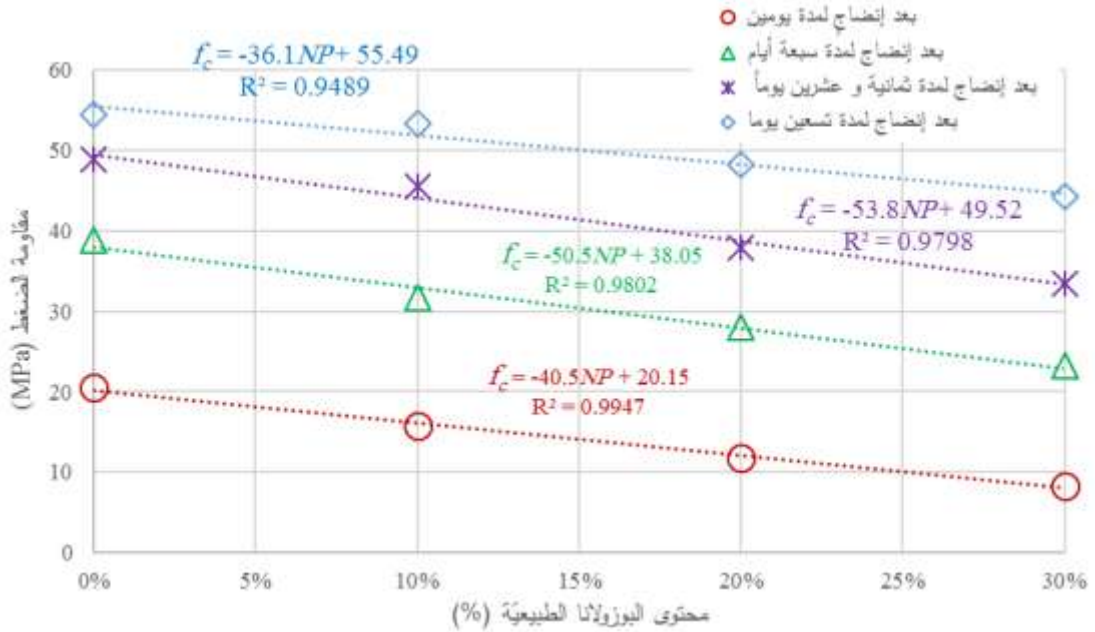
| مقاومة الضغط للملاطات المدروسة (MPa) -نسب هذه المقاومات إلى العينة المرجعية (NP0L0) (%) | | | | التركيبة (Combination) |
|---|---------------------------------|----------------------|------------------|------------------------|
| إنضاج لمدة تسعين يوماً | إنضاج لمدة ثمانية و عشرين يوماً | إنضاج لمدة سبعة أيام | إنضاج لمدة يومين | |

| | | | | |
|-----------|-----------|-----------|------------|---------|
| %100-54.9 | %100-48.7 | %100-39.6 | %100-20.6 | NP0L0 |
| %99-54.2 | %94-45.9 | %81-32.1 | %79-16.2 | NP10L0 |
| %89-49.1 | %78-37.9 | %70-27.9 | %57-11.7 | NP20L0 |
| %87-47.8 | %71-34.4 | %61-24.1 | %40-8.3 | NP30L0 |
| %99-54.5 | %101-48.9 | %98-38.9 | %99.5-20.5 | NP0L5 |
| %97-53.4 | %93-45.5 | %80-31.7 | %76-15.7 | NP10L5 |
| %88-48.2 | %78-37.9 | %71-28 | %57-11.8 | NP20L5 |
| %81-44.2 | %69-33.5 | %59-23.3 | %40-8.3 | NP30L5 |
| %96-52.8 | %96-46.6 | %93-36.8 | %97-19.9 | NP0L10 |
| %92-50.5 | %86-42.1 | %73-29.1 | %71-14.6 | NP10L10 |
| %88-48.1 | %77-37.5 | 70%-27.6 | %56-11.6 | NP20L10 |
| %77-42.3 | %64-31.4 | %55-21.8 | %37-7.6 | NP30L10 |
| %89-49.1 | %91-44.1 | %82-32.6 | %72-14.8 | NP0L15 |
| %83-45.4 | %76-36.8 | %69-27.3 | %50-10.2 | NP10L15 |
| %79-43.3 | %69-33.5 | %58-23.1 | %42-8.7 | NP20L15 |
| %71-38.7 | %55-26.8 | %47-18.6 | %33-6.7 | NP30L15 |

بالنسبة للإسمنتات ثلاثية التركيب، يمكن من خلال الجدول رقم (3)، رؤية تحسين مسحوق الحجر الكلسي للإمالة المبكرة بشكل أكبر بكثير من البوزولانا الطبيعية، حيث تميل المقاومة للزيادة عندما يحل مسحوق الحجر الكلسي محل البوزولانا الطبيعية. على سبيل المثال، ارتفعت مقاومة الضغط عند عمر إنضاج (يومين) من (8.3 MPa) إلى (11.6 MPa) عند استبدال (10%) من البوزولانا الطبيعية بـ (10%) من مسحوق الحجر الكلسي في التركيبة (NP30L0)، ومن (11.7 MPa) إلى (14.6 MPa) عند استبدال (10%) من البوزولانا الطبيعية بـ (10%) من مسحوق الحجر الكلسي في العينة (NP20L0). كما أنّ استبدال (5%) أو (10%) من الإسمنت البورتلاندي بـ (5%) أو (10%) من مسحوق الحجر الكلسي، لم ينقص من مقاومة الضغط للتركيبة الجديدة. وفي ذلك فائدة مزدوجة، إقتصادية و بيئية. إضافة إلى ذلك، يمكن ملاحظة دور البوزولانا الطبيعية في زيادة المقاومة عند أزمانه الإنضاج المتأخرة، فعلى سبيل المثال، استبدال (10%) من مسحوق الحجر الكلسي في التركيبة (NP0L15) بـ (10%) من البوزولانا الطبيعية، أدى إلى حدوث زيادة في مقاومة الصّغط للملاط الإسمنتي عند عمر إنضاج (90 يوم) بحوالي (9%). يوكد هذا الاستبدال مشاركة البوزولانا الطبيعية في تطوّر المقاومة من خلال التفاعل البوزولاني.



الشكل رقم (8): العلاقة بين مقاومة الضغط و محتوى البوزولانا الطبيعية عند أعمار إنضاج مختلفة للتركيبات الإسمنتية غير المحتوية على مسحوق الحجر الكلسي.

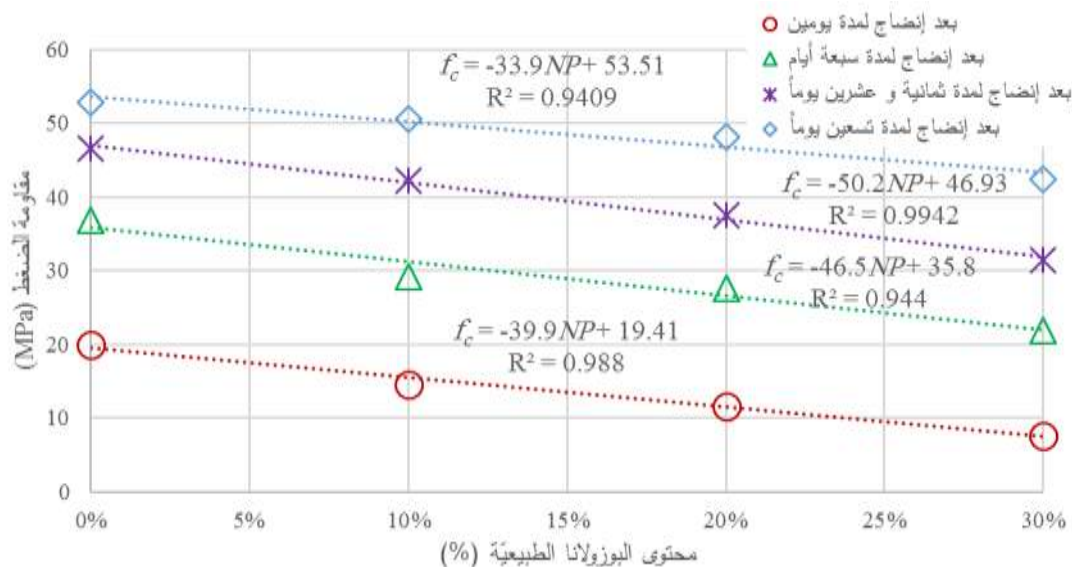


الشكل رقم (9): العلاقة بين مقاومة الضغط و محتوى البوزولانا الطبيعية عند أعمار إنضاج مختلفة للتركيبات الإسمنتية المحتوية على (5%) من مسحوق الحجر الكلسي.

تم الحصول كذلك على أكبر مقاومة ضغط بعمر (28) يوماً في الإسمنتات ثلاثية التركيب في التركيبة الإسمنتية التي تحوي (10%) بوزولانا طبيعية و (5%) مسحوق حجر كلسي، حيث بلغت (45.5 MPa)، الجدول رقم (3)، أي أنّ مثل هذه الإضافة المركبة لم تغيّر في صنف المقاومة للإسمنت البورتلاندي المستعمل. لا بدّ من الإشارة إلى الوصول إلى معاملات إرتباط قويّة (أكبر من 90%) عند تمثيل البيانات الإحصائية التجريبية بخط مستقيم، كما أشير إلى ذلك في الأشكال من (8) إلى (11).

2.3. مقاومة الشد للملاطات المدروسة

يظهر الجدول رقم (4) نتائج مقاومات الشد للمواشير المحضرة من الملاطات المنتجة، و المنضجة في الماء حتى تاريخ الاختبار. والقيم الواردة في الجدول تمثل وسطي ثلاث قراءات. من النتائج يمكن ملاحظة وجود سلوك مشابه لمقاومات الضغط، إلا أن نتائج مقاومة الشد أقل حساسية من نتائج مقاومة الضغط لنوع التركيبة الإسمنتية.



الشكل رقم (10): العلاقة بين مقاومة الضغط و محتوى البوزولانا الطبيعية

عند أعمار إنضاج مختلفة للتركيبات الإسمنتية المحتوية على (10%) من مسحوق الحجر الكلسي.

3.3. العلاقة بين مقاومة الضغط و مقاومة الشد للملاطات المدروسة:

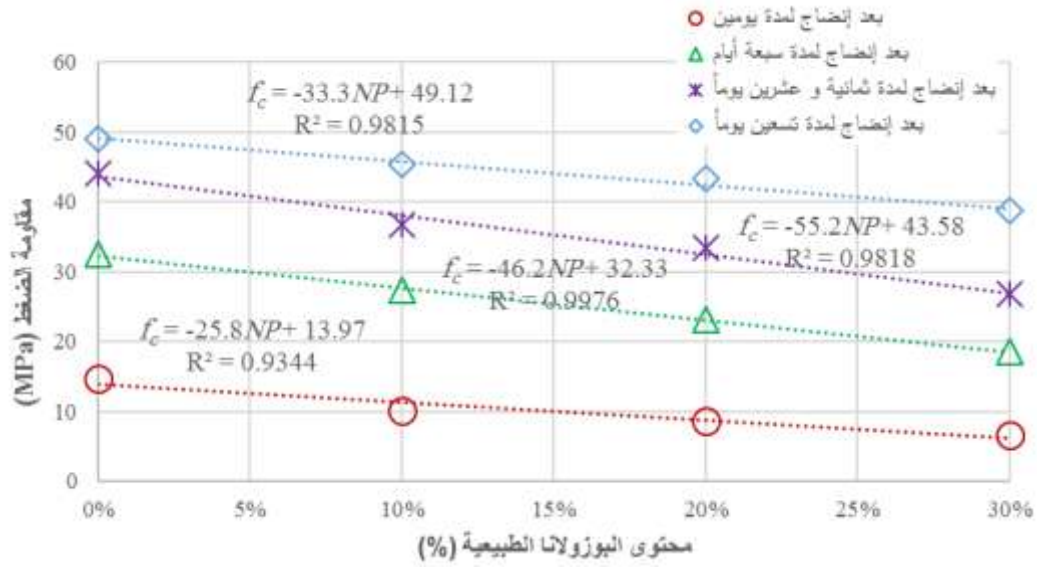
تم تمثيل العلاقة بين نتائج مقاومة الضغط و مقاومة الشد في الشكل رقم (12) وذلك لمجتمع العينات كافة.

$$f_t = 0.5(f_c)^{0.7}$$

حيث (f_t): مقاومة الشد (MPa)، و (f_c) مقاومة الضغط (MPa).

هذه العلاقة مشابهة للعلاقة الواردة في الأدبيات العلمية [10]. وبالتالي بمعرفة مقاومة الضغط يمكن حساب أو

تخمين مقاومة الشد بمعامل ارتباط قوي يعادل تقريباً ($R^2=0.97$).

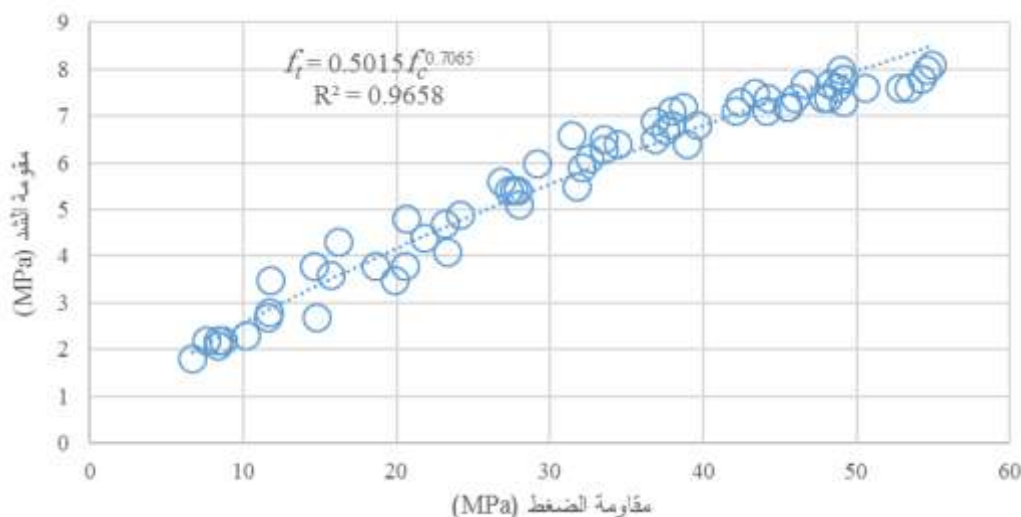


الشكل رقم (11): العلاقة بين مقاومة الضغط و محتوى البوزولانا الطبيعية عند أعمار إنضاج مختلفة للتركيبات الإسمنتية المحتوية على (15%) من مسحوق الحجر الكلسي.

الجدول رقم (4): نتائج مقاومات الشد للملاطات المدروسة عند أزمنة الإنضاج المختلفة.

| مقاومة الشد (flexural strength) للملاطات المدروسة (MPa) وفقاً لأزمنة الإنضاج | | | | التركيبية (Combination) |
|--|----------------------|--------------------------------|------------------------|----------------------------|
| إنضاج لمدة يومين | إنضاج لمدة سبعة أيام | إنضاج لمدة ثمانية وعشرين يوماً | إنضاج لمدة تسعين يوماً | |
| 4.8 | 6.8 | 7.6 | 8.1 | NP0L0 |
| 4.3 | 5.9 | 7.4 | 7.8 | NP10L0 |
| 2.8 | 5.4 | 6.8 | 7.3 | NP20L0 |
| 2.2 | 4.9 | 6.4 | 7.4 | NP30L0 |
| 3.8 | 6.4 | 8 | 8 | NP0L5 |
| 3.6 | 5.5 | 7.2 | 7.6 | NP10L5 |
| 3.5 | 5.1 | 7.1 | 7.5 | NP20L5 |
| 2.1 | 4.1 | 6.3 | 7.4 | NP30L5 |
| 3.5 | 6.9 | 7.7 | 7.6 | NP0L10 |
| 3.8 | 6 | 7.1 | 7.6 | NP10L10 |
| 2.7 | 5.4 | 6.7 | 7.4 | NP20L10 |
| 2.2 | 4.4 | 6.6 | 7.3 | NP30L10 |
| 2.7 | 6.1 | 7.1 | 7.8 | NP0L15 |

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|---------|
| 7.2 | 6.5 | 5.4 | 2.3 | NP10L15 |
| 7.5 | 6.5 | 4.7 | 2.2 | NP20L15 |
| 7.2 | 5.6 | 3.8 | 1.8 | NP30L15 |



الشكل رقم (12) يبين العلاقة بين مقاومة الضغط و مقاومة الشد لمجتمع العينات الإسمنتية كافة.

4.3. العلاقة بين المقامات الميكانيكية و زمن الإنضاج:

توضّح الأشكال من (8) إلى (11)، اعتماد مقاومة الضغط للتركيبات الإسمنتية المدروسة على محتوى البوزولانا الطبيعية وزمن الإنضاج عند محتوى معين لمسحوق الحجر الكلسي. وهي تتفق بشكل جيد مع التابع الخطي (linear function). كما هو واضح من هذه الأشكال، فإن مقاومة الضغط للملاط تتناقص مع زيادة محتوى البوزولانا من أجل أزمنة الإنضاج كافة. وفقاً لنتائج الاختبار، يبدو أنّ للمقامات الميكانيكية للملاط المدروسة علاقة قوية مع محتوى البوزولانا وزمن الإنضاج عند محتوى معين لمسحوق الحجر الكلسي. يمكن بالتالي التنبؤ بالمقاومة الميكانيكية (مقاومة الضغط و مقاومة الشد) عند معرفة محتوى البوزولانا و زمن الإنضاج عند محتوى معين لمسحوق الحجر الكلسي.

يمكن التعبير عن العلاقة العامة بين المقاومة الميكانيكية و محتوى البوزولانا الطبيعية وزمن الإنضاج عند

محتوى معين لمسحوق الحجر الكلسي، بالعلاقة التالية:

$$f_c; f_t = (a_1 \times t^2 - a_2 \times t - a_3) NP + a_4 \times \ln t + a_5$$

حيث (f_c) و (f_t) مقاومة الضغط و مقاومة الشد (MPa) على الترتيب، و (t) زمن الإنضاج (يوم)، و (NP)

محتوى البوزولانا (%)، و (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) ثوابت. الجدول رقم (5) يظهر الثوابت (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) مع معاملات الارتباط (R^2) للعلاقة بين البيانات التجريبية و المعادلة المقترحة.

إلا أنه لا بدّ من التأكيد أنّ عوامل إضافية كنوع البوزولانا الطبيعية ومسحوق الحجر الكلسي، و التركيب الكيميائي لهما و المقاومة الميكانيكية للكنكر المستعمل و (w/b)، واستعمال الإضافات الكيميائية وغيرها...، يمكن جميعها أن تكون مؤثرة في المقامات الميكانيكية للملاط.

الجدول رقم (5): الثوابت (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) مع معاملات التراجع (R^2) للعلاقة بين البيانات التجريبية و المعادلة المقترحة.

| محتوى الكلس (%) | المقاومة الميكانيكية | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | a_5 | R^2 |
|-----------------|----------------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 0 | f_c | 0.008 | -0.527 | -43.415 | 9.0733 | 17.188 | 0.964 |
| | f_t | -0.0017 | 0.2257 | -8.8583 | 0.8116 | 4.7055 | 0.9244 |
| 5 | f_c | 0.0088 | -0.6867 | -42.163 | 9.194 | 16.734 | 0.962 |
| | f_t | 0.0004 | 0.011 | -6.1639 | 1.0422 | 3.8369 | 0.908 |
| 10 | f_c | 0.0071 | -0.5638 | -40.574 | 8.8726 | 15.686 | 0.973 |
| | f_t | -0.0004 | 0.1027 | -6.7576 | 0.9566 | 3.9734 | 0.855 |
| 15 | f_c | 0.0155 | -1.4437 | -28.976 | 9.1341 | 10.839 | 0.960 |
| | f_t | 0.0008 | -0.0397 | -4.7302 | 1.2434 | 2.635 | 0.909 |

الاستنتاجات والتوصيات:

- استناداً إلى النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها في الدراسة، يمكن عرض الاستنتاجات التالية:
- إنّ البوزولانا الطبيعية المستعملة في الدراسة، يمكن أن تعدّ مناسبة لصناعة الإسمنت لتلبيتها للمتطلبات الكيميائية و الميكانيكية للمواصفات الأميركية و الأوروبية. كما أنّ مسحوق الحجر الكلسي الذي تمّ استجراره من مقالع إسمنت حماة، يمكن أن يعدّ مناسباً للاستعمال كبديل جزئي عن الإسمنت البورتلاندي، لتحقيقه كذلك للإشترطات الواردة في المواصفات.
- تسبّب التوزع الأوسع للقياس الحبيبي لمسحوق الحجر الكلسي، في انخفاض متطلب الماء، وبالتالي زيادة الكثافة، و المقاومة.
- أدى استعمال مسحوق الحجر الكلسي كبديل جزئي عن الإسمنت البورتلاندي إلى تخفيض ملحوظ في أزمدة تجمد العجينة الإسمنتية. بالرغم من ذلك، فقد كانت قيم أزمدة التجمّد، و كذلك قيم التمدد الحجمي للتركيبات الإسمنتية كافية، مقبولة و موافقة للمواصفات.
- كان واضحاً من النتائج أنّ المقامات الميكانيكية للتركيبات المحتوية على البوزولانا الطبيعية، قد عانت انخفاضاً واضحاً في الأزمدة المبكرة للإنضاج. وقد زاد هذا الانخفاض مع زيادة محتوى البوزولانا، ويمكن ردّ هذا الانخفاض إلى التفاعل البوزولاني البطيء، وكذلك إلى الأثر التخفيفي، إلا أنه عند أزمدة إنضاج متأخرة، قاربت هذه المقامات المقاومة الميكانيكية للعينة المرجعية. بالمقابل لم تعان التركيبات المحتوية على مسحوق الحجر الكلسي المضاف حتى بنسبة (10%) كبديل جزئي عن الإسمنت، من أي انخفاض ملحوظ في المقاومة المبكرة. يمكن أن يعزى ذلك إلى دور مسحوق الحجر الكلسي في تسريع إماهة كل من (C_3S) و (C_3A) في الإسمنت البورتلاندي،

إضافةً إلى دور مسحوق الكلس في إملء المسامات (الفراغات) بما يزيد كذلك في المقاومة، ويعوّض عن الأثر التخفيفي الناتج عن إضافته.

- تمّ تعويض الأثر السلبي لإضافة البوزولانا الطبيعية في المقاومة المبكرة، عن طريق إضافة مسحوق الحجر الكلسي و البوزولانا الطبيعية معاً. كما أنّ إضافة البوزولانا الطبيعية قد عوّضت إلى حدّ ما من الأثر السلبي للحجر الكلسي في المقاومة الميكانيكية للملاط في الأزمنة المتأخرة. وهذه النتيجة تؤكد مشاركة البوزولانا الطبيعية بتطور المقاومة الميكانيكية من خلال التفاعل البوزولاني في الأعمار المتأخرة.

- التركيبات الإسمنتية ثلاثية التركيب (إسمنت بورتلاندي-بوزولانا طبيعية-مسحوق حجر كلسي) المثالية، بالنسبة للمقاومة الميكانيكية، تمّ الحصول عليها في التركيبة (NP10L5)، التي لم تتغير من صنف المقاومة للإسمنت البورتلاندي (42.5) بعد إضافتها كبديل جزئي عنه. وكذلك في التركيبة (NP10L10) التي قاربت صنف المقاومة للإسمنت البورتلاندي المستعمل.

- اعتماداً على النتائج التي تمّ الحصول عليها، توصل الباحثون إلى علاقة قد تكون مفيدة، يمكن بموجبها التنبؤ بالمقاومة الميكانيكية (مقاومة الضغط ومقاومة الشد) للملاط الإسمنتي وفقاً لمحتوى البوزولانا الطبيعية و محتوى مسحوق الحجر الكلسي و زمن الإنضاج.

- من الواضح أنّ استبدالاً مهماً للإسمنت البورتلاندي بالبوزولانا الطبيعية و مسحوق الحجر الكلسي قد تصل نسبته إلى (35%)، يمكن أن يستعمل دون الإخلال كثيراً بالمقاومة. وهذا الاستبدال يمكن أن يؤدي بدوره إلى استعمال فعال للموارد الطبيعية، وإلى وفرٍ كبير في استهلاك الطاقة، إضافةً إلى تخفيض الانبعاثات الغازية الملوثة للبيئة الناجمة عن صناعة الإسمنت، كغاز ثاني أكسيد الكربون وغيره، بما يشجع على الحصول على خرسانة خضراء (green concrete).

- في دراسات مستقبلية، لابدّ من تقصي أو دراسة أثر الإضافات الكيميائية (كالملدّات، العناصر المدخلة للهواء، المسرّعات، ...) في التركيبات الإسمنتية ثنائية و ثلاثية التركيب.

المراجع:

- [1] WALKER, R.; PAVIA S. *Physical properties and reactivity of pozzolans and their influence on the properties of lime-pozzolan pastes*. Materials and Structures, Vol. 44, 2011, 1139-1150.
- [2] AL-SWAIDANI, A.M.; ALIYAN, S.D. *Effect of adding scoria as cement replacement on durability-related properties*. International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol. 9, Nr. 2, 2015, 241-254.
- [3] AL-CHAAR, G.K.; AL-KADI, M.; ASTERIS, P.G. *Natural pozzolan as a partial substitute for cement in concrete*. The Open Construction and Technology Journal, Vol. 7, 2013, 33-42.
- [4] SENHADJI, Y.; ESCADEILLAS, G.; KHELAFI, H., MOULI, M.; BENOSMAN, A.S. *Evaluation of natural pozzolan for use as supplementary cementitious material*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 16, Nr. 1, 2012, 77-96.
- [5] KOULOUMBI, N.; BATIS, G.; PANTAZOPOULOU, P. *Efficiency of natural Greek pozzolan in chloride-induced corrosion of steel reinforcement*. Cement and Concrete Aggregate, Vol. 17, Nr. 1, 1995, 18-25.

- [6] KHAN, K.I.; ALHOZAIMY, A.M. *Properties of natural pozzolan and its potential utilization in environmental friendly concrete*. Canadian Journal of Civil engineering. Vol. 38, 2010, 71-78.
- [7] MOUFTI, M.; SABBAN, A.; EL-MAHDY, O.; SHEHATA, W. *Assessment of the industrial utilization of scoria materials in central Harrat Rahat Saudi Arabia*. Engineering geology, Vol. 57, 2000, 155-162.
- [8] SHI, C. *An overview on the activation of the reactivity of natural pozzolans*. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 28, 2001, 778-786.
- [9] SEZER, G.I. *Compressive strength and sulfate resistance of limestone and/or silica fume mortars*. Construction and Building Materials, Vol. 26, Nr. 1, 2012, 613-618.
- [10] NEVILLE, A.M. *Properties of concrete*. Fifth edition, Pearson Education, 2011.
- [11] DE WEERDT, K.; KJELSEN, K.O.; SELLEVOLD, E.; JUSTNES, H. *Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements*. Cement & Concrete Composites, Vol. 33, 2011, 30-38.
- [12] BONAVENTTI, V.; DONZA, H.; RAHHAL, V., IRASSAR, E. *Influence of Influence of initial curing on properties of concrete containing limestone blended cement*. Cement and Concrete Research, Vol. 30, Nr. 5, 2000, 703-708.
- [13] BONAVENTTI, V.; RAHHAL, V.; IRASSAR, E. *Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements*. Cement and Concrete Research, Vol. 31, Nr. 6, 2001, 853-859.
- [14] LOTHENBACH, B.; LE SAOUT, G.; GALLUCCI, E.; SCRIVENER, K. *Influence of limestone on the hydration of Portland cements*. Cement and Concrete Research, Vol. 38, Nr. 6, 2008, 848-860.
- [15] MATSCHEI, T; LOTHENBACH, B.; GLASSER, F. *The role of calcium carbonate in cement hydration*. Cement and Concrete Research, Vol. 37, Nr. 4, 2007, 551-558.
- [16] HOSHINO, S; YAMADA, K.; HIRAO, H. *XRD/Rietveld analysis of the hydration and strength development of slag and limestone blended cement*. Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 4, Nr. 3, 2006, 357-367.
- [17] The General Establishment of Geology and Mineral Resources in Syria (GEGMR). *A Guide for mineral resources in Syria*, 2011 (in Arabic).
- [18] AL-SWAIDANI, AM; ALIYAN, SD; ADARNALY, N. *Mechanical strength development of mortars containing volcanic scoria-based binders with different fineness*. Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 19, 2016, 970-979.
- [19] DAY, RL.; SHI, C. *Influence of the fineness of pozzolan on the strength of lime natural pozzolan cement pastes*. Cement and Concrete Research, Vol. 24, 1994, 1485-1491.
- [20] BOUZOUBAA, N.; ZHANG, M.; BILODEAU, A.; MALHOTRA, V. *The effect of grinding on physical properties of fly ashes and a Portland cement clinker*. Cement and Concrete Research, Vol. 27, 1997, 1861-1874.
- [21] YETGIN, S.; CAVDAR, A. *Study of effects of natural Pozzolan on properties of cement mortars*. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 18, 2006, 813-816.
- [22] TIVILIS, S.; CHAMIOTAKIS, E.; BADOGIANNIS, E.; PAHOULS, G.; ILIAS, A. *A study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cement*. Cement and Concrete Composites, Vol. 2, 1999, 107-116.
- [23] KENAI, S.; SOBOYEJO, W.; SOBOYEJO, A. *Some engineering properties of limestone concrete. Materials and Manufacturing processes*, Vol. 19, Nr. 5, 2004, 949-961.

[24] MONTGOMERY, D.C.; Peck EA. *Introduction to linear regression analysis*.
New York: Wiley, 1982.