

الإستفادة من مخلفات مصانع الرخام كمادة بديلة جزئياً عن الإسمنت لإنتاج خرسانة ذاتية الدمك

فاطمة مسعود المزوغي¹، نوري محمد الباشا، الصغير محمد الصغير
قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة صبراتة، صبراتة، ليبيا
felmezoughi@gmail.com

ملخص البحث:

إن النهضة العمرانية تعتمد بشكل كبير على تقدم علم تقنية الخرسانة ومواد البناء، فمشروعات الهندسة المدنية الضخمة ماهي إلا انعكاس لهذا التقدم. العقود القليلة الماضية شهدت تطوراً ملحوظاً في علم تقنية الخرسانة الذي تمثل في إنتاج أنواع جديدة من الخرسانة ومنها الخرسانة ذاتية الدمك Self-Compacting Concrete (SCC) التي تمتاز بقابليتها العالية للتشغيل وسهولة انسيابها وتدفقها الحر تحت تأثير وزنها الذاتي فقط .

الإسمنت يمثل العنصر الأكثر كلفة والأكثر ضرراً للبيئة، حيث أن عملية صناعته تمر بعدة مراحل من استخراج وتكسير وطحن وغيرها، كل هذه المراحل تستهلك طاقة كبيرة جداً فضلاً عن انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون الملوث الرئيسي للبيئة، لذا فإن استعمال مواد بديلة عن الإسمنت تساعد بدورها في التقليل من كلفة إنتاج الخلطة الخرسانية ذاتية الدمك و تحسن من خواصها في الحالة اللدنة والمتصلدة، لاسيما إذا كانت هذه المواد البديلة غير مكلفة مثل مخلفات مصانع الرخام Waste Marble Powder (WMP) التي تلقى في المكبات مسببة أضراراً للبيئة.

تم في هذه الورقة دراسة خصائص SCC وامكانية تنفيذها بالإستفادة من WMP ليتم احلالها جزئياً بدلاً عن الإسمنت بنسب 5، 10 و 15%. تم دراسة الخواص اللدنة وأجريت اختبارات Slump Flow، T500، J-Ring و اختبار L-Box وتبين أنه يمكن الإستفادة من WMP في إنتاج SCC وبالتالي تقليل نسبة الإسمنت، وأفضل نسبة لإحلال WMP بدل الإسمنت كانت 15%.

الكلمات المفتاحية

بقايا مصانع الرخام، الخرسانة ذاتية الدمك، الخواص اللدنة

Abstract

The construction boom depends heavily on the progress of the technology of concrete and building materials. Large-scale civil engineering projects are a reflection of this progress. In the last few decades, there has been a remarkable development in the technology of concrete, which is the production of new types of concrete, including Self Compacting Concrete (SCC), which is characterized by its high workability and ease of flow and free flow under the influence of self-weight only

Cement is the most expensive and most harmful to the environment, the process of cement production goes through several stages of extraction, cracking, grinding, etc., all of these stages consume very large energy as well as emissions of carbon dioxide, which is the main polluter of environment. Therefore, the use of alternative materials for cement also help to reduce the cost of SCC mixtures and improves its properties in the fresh and hard states.

In this paper, the properties of SCC were studied and the possibility of their implementation by utilizing the remnants of WMP marble factories to be partially replaced instead of cement by 5, 10 and 15%. Fresh properties were studied, Slump Flow, T500, J-Ring and L-Box tests were tested, and it was found that WMP could be used in SCC production, thus reducing the cement ratio, and the best replacement ratio for WMP in cement was 15%.

1. المقدمة

توسع استخدام الخرسانة ذاتية الدمك (SCC) Self-Compacting Concrete بشكل كبير بعد اكتشافها في عام 1988 في اليابان ويعتبر اليابانيون هم رواد صناعة هذه الخرسانة حيث قاموا باستخدامها في منشآت وتطبيقات عديدة ومفيدة. أما في أوروبا فعلى الأرجح أنها استخدمت لأول مرة في شبكات الطرق في السويد عام 1990. مولت الهيئة الأوروبية عدة مشاريع أهلية وحكومية للخرسانة ذاتية الدمك ما بين عامي 1997-2000 بعد ذلك انتشر استخدامها في أوروبا عموماً. في عام 2002 نشرت المنظمة الأوروبية المعروفة باسم مواصفات ودليل استخدام الخرسانة ذاتية الدمك، ومنذ ذلك الحين نشرت عدة تقارير عن الخرسانة ذاتية الدمك، بعد ذلك تم إنتاج هذه الخرسانة في العديد من الدول مثل تركيا وأمريكا.

أنتجت أنواع عديدة منها لتلائم نوع المنشأ ولتتحمل الضغط المسلط عليها كما تم مراعاة تطوير عملية الصب والرص في كل مرة وتقليل فترة الإنشاء وأيضاً التقليل من الاعتماد على العمالة أثناء التنفيذ. وتعتبر الخرسانة مادة ذات عناصر مختلفة الخواص حيث أنها خليط من الإسمنت الناعم والركام مختلف الحجم بالإضافة الى الماء. الخرسانة ذاتية الدمك نوع من أنواع الخرسانة المطورة والحديثة عالية الأداء وهي تصنع من نفس المواد مع اضافة أنواع من الملدنات التي تعمل على تحسين خواصها إلا أن الخرسانة ذاتية الدمك يمكن صبها دون الحاجة الى الهزازات حتى في الأماكن الضيقة ذات التسليح المزدحم والأشكال المعقدة وذلك بسبب انسيابها المباشر بفعل وزنها الذاتي والجاذبية الأرضية فقط .

إن الزيادة في الطلب على الإسمنت باعتباره المادة الأساسية في تركيب الخرسانة جعل منه موضوع بحث مهم من قبل العلماء المهتمين بالحفاظ على البيئة حيث لا يخفى على الرائي الملوثات الكبيرة التي تنتجها مصانع الإسمنت المنتشرة حيث أن صناعة الإسمنت تنتج من 5-6% من الغازات الملوثة المنبعثة في الجو^[1]، أيضاً فإن إنتاج الخرسانة ذاتية الدمك هو أمر مكلف بالمقارنة مع الخرسانة العادية فخاصيتها السائلة التي صممت من أجلها تحتاج استعمال حجم كبير من العجينة والملدنات. الإسمنت هو مكون أساسي للعجينة وهو المكون الأكثر تكلفة، لهذا كان الحل السليم هو التقليل من الإسمنت في الخلطة الخرسانية وذلك باستعمال المواد البديلة مثل بقايا الحجر الكلسي، الرماد المتطاير، غبار السيليكا، البوزولان الطبيعي... الخ ويعتبر هذا الحل جيداً لاسيما إذا كانت هذه المواد اقتصادية في حد ذاتها كاستعمال نفايات المصانع الصلبة كالحجر والجرانيت والرخام.

إن عملية تصنيع الرخام التي تشمل عمليات قص وتسوية وتهذيب السطوح في معامل الرخام ينتج عنها نفايات صلب، ومخلفات سائلة هذه المخلفات السائلة تكون لزجة ثقيلة وتتكون من كميات المياه التي تستخدم في عمليات تبريد آليات معامل الرخام والحجر إضافة الى مواد تسوية السطوح، والجسيمات الدقيقة والرمال والنشارة الناتجة أثناء عمليات القص والنشر والتي تجمع غالباً في بحيرات لتجف بشكل عشوائي مسببة تلوث للبيئة. أما المخلفات الصلبة فهي عبارة عن ألواح الرخام الغير منتظمة الشكل والناتجة عن قص أجزاء معينة مطلوبة هذه القطع لا يمكن استعمالها فتلقى وترمى كنفايات مسببة العديد من المشاكل حيث يتم وضعها مع المخلفات السكنية نظراً لوجود مصانع الرخام في المدن السكنية فيحدث تداخل في النفايات خاصة في الدول التي لا تملك مرافق كافية لتنظيم الصناعات من جمع ومعالجة والتخلص من النفايات الصلبة، فمثلاً في ليبيا فإن دور الأجهزة

المحلية (جهاز البلدية) مقتصر فقط على تنظيف الشوارع من المخلفات السكنية فقط وهذا ما يزيد من مشكلة تكسب النفايات الصناعية الصلبة حول المصانع .

2. مشكلة الدراسة:

الإسمنت هو مادة مكلفة جداً فعملية صناعته تمر بمراحل كثيرة من استخراج وطحن بمراحله وتسخين وتبريد ونقل. كل هذه المراحل تستهلك جهداً وطاقةً كبيرةً، فضلاً عن أنه يستهلك المادة الخام القابلة للنضوب. أيضاً تعتبر صناعة الإسمنت مصدر تلوث للبيئة حيث أن الغازات الناتجة من صناعة الإسمنت هي الملوث الرئيسي للهواء والبيئة المحيطة .

كما أن بقايا مصانع الرخام تسبب مشاكل كثيرة فالأجزاء الصغيرة والغير متناسقة التي تنتج من قص اشكال معينة ومطلوبة للرخام ترمى وتلقى كنفايات مسببة أضراراً للبيئة وللإقتصاد. يمكن تجميع الفاقد الناتج من عمليات قص وتسوية ألواح الرخام ثم تكسيره وطحنه بدرجة نعومة الإسمنت أو أعلى ثم استخدامه بديلاً نسبياً عن الإسمنت وبذلك يتم الاستفادة من بقايا مصانع الرخام والتقليل من استخدام الإسمنت الذي يشكل المادة الأساسية لإنتاج الخرسانة والمونة، كما يمكن استخدام مسحوق الرخام بديلاً نسبياً عن الإسمنت لإنتاج الخرسانة ذاتية الدمك والتي تعتبر بدورها حلاً جيداً لتدني مستوى أداء الخرسانة التقليدية في حالة طلب الحصول على قابلية تشغيل عالية بإضافة الماء الذي يسبب مشاكل مثل النضح والانفصال الحبيبي وأيضاً انخفاض مقاومة الضغط.

3. البرنامج العملي:

نسب الخلط:

الإسمنت المستخدم في هذه الدراسة هو إسمنت بورتلاندي عادي صنف N42.5 من مصنع شركة الإتحاد العربي للمقاولات زليطن، والجدول رقم 1 يبين نتائج الخواص الفيزيائية والميكانيكية للإسمنت المستخدم، بينما الجدول رقم 2 يبين نتائج التحليل الكيميائي، حيث تبين أنه مطابق للمواصفات القياسية الليبية (2002/340)^[2] والمادة المألثة التي استعملت هي مسحوق الرخام (WMP) الناتج من قص وتسوية ألواح الرخام في المصانع بعد تكسيره وطحنه وتميريه من منخل 90 ميكرون كما موضح بالشكل رقم 1، أما للركام الناعم فقد أُستخدم رمل زليطن مخلوط بالجرانيليا بنسبة 25% والشكل رقم 2 يوضح التحليل المنخلي للخليط المطابق للمواصفات القياسية الليبية (2002/49)^[3]، وللركام الخشن تم استخدام زلط من محاجر قصر الحاج بمقاس إعتباري 14 مم ويوضح الشكل 3 التحليل المنخلي للركام الخشن ، أما الماء فقد تم استخدام الماء الصالح للشرب ، كما تم استعمال ملدن Vescocrete Tempo 12 دون دخوله في تصميم الخلطة، فقد أُضيفت جرعة بنسبة 1.5% والتي حققت الإنتشار المستهدف (650-800) مم^[4].

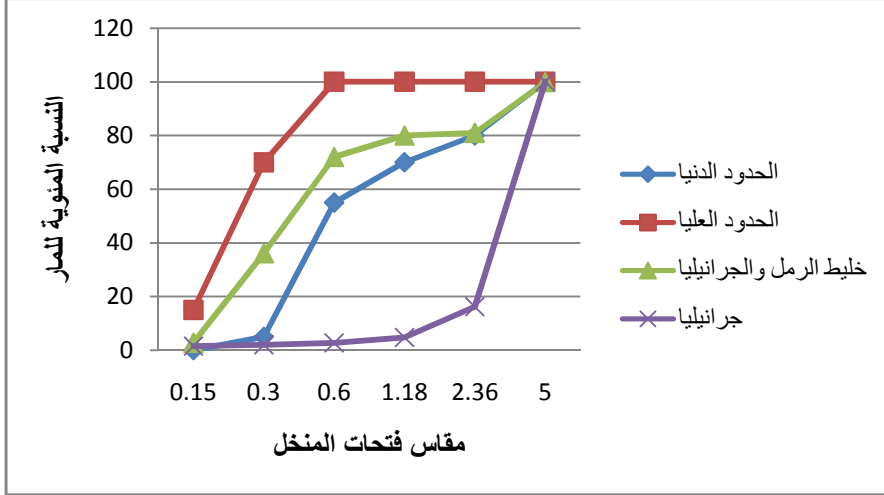
الجدول رقم 1 : نتائج اختبار الخواص الفيزيائية والميكانيكية للإسمنت

الاختبار	النتيجة	حدود المواصفات	مواصفة الاختبار
نسبة الماء القياسية	28.5	غير مشروط	م ق ل 341-2 ^[5]
زمن الشك الابتدائي	155	لا يقل عن 45 دقيقة	

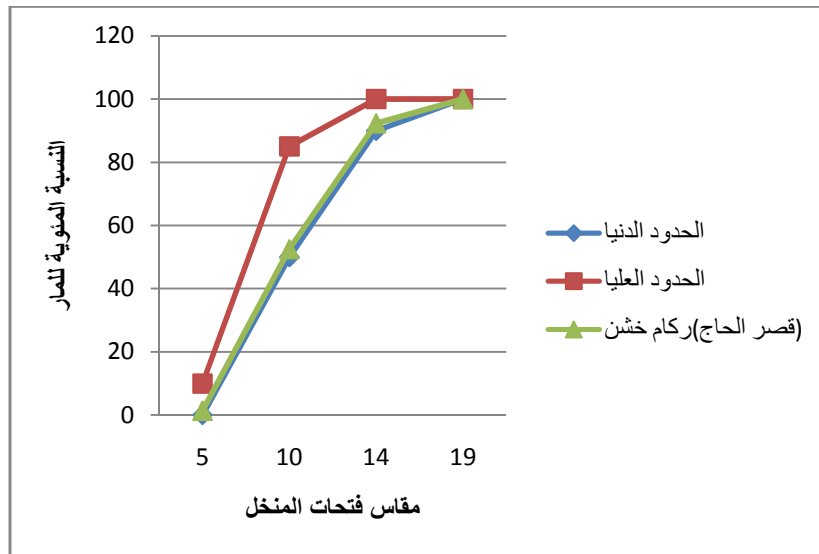
م ق ل 3-341 ^[6]	لايزيد عن 10 ساعات	285	زمن الشك النهائي
م ق ل 4-341 ^[7]	لايزيد عن 10مم	0	ثبات الحجم
م ق ل 5-341 ^[8]	أعلى من 2500 سم ² /جم	2977	النعومة (مساحة السطح النوعي)
م ق ل 6-341 ^[9]	أعلى من 21 ن/م ²	22.13	مقاومة الضغط للمونة الاسمنتية عند 3 ايام
	أعلى من 39 ن/م ²	39.22	مقاومة الضغط للمونة الاسمنتية عند 28 يوم



الشكل رقم 1: طريقة طحن الرخام



الشكل رقم 2: التحليل المنخلي للجرانيليا و الخليط (75% رمل زليطن + 25% جرانيليا)



الشكل رقم 3 : التحليل المنخلي للركام الخشن (قصر الحاج)

الجدول رقم 2 : نتائج اختبار الخواص الكيميائية للإسمنت والرغام

النتيجة (%)	رغام	النتيجة (%)	اسمنت
86	CaCO ₃	2.4	أكاسيد الكالسيوم (CaO)
11.5	CaMg(CO ₃)	20.14	ثاني أكسيد الكبريت (SiO ₂)
2.5	SiO ₂	5.91	ثالث أكسيد الألمونيوم (Al ₂ O ₃)
		2.99	ثالث أكسيد الحديد (Fe ₂ O ₃)
		1.59	أكسيد المغنيسيوم (MgO)
		2.13	ثالث أكسيد الكبريت (SO ₃)
		0.19	أكسيد الصوديوم (Na ₂ O)
		0.97	أكسيد البوتاسيوم (K ₂ O)

تصميم الخلطات:

تم تصميم 4 خلطات خرسانية ذاتية الدمك، الأولى بدون اضافة مسحوق الرغام (WMP)، أما باقي الخلطات فقد تم فيها إحلال مسحوق الرغام بدل الإسمنت بنسب 5، 10 و 15% وتم مقارنتها بالخلطة المرجعية. كل الخلطات صممت بالطريقة الحجمية^[10] كما مبين بالجدول رقم 3.

الجدول رقم 3 : نسب المواد للخلطات الخرسانية

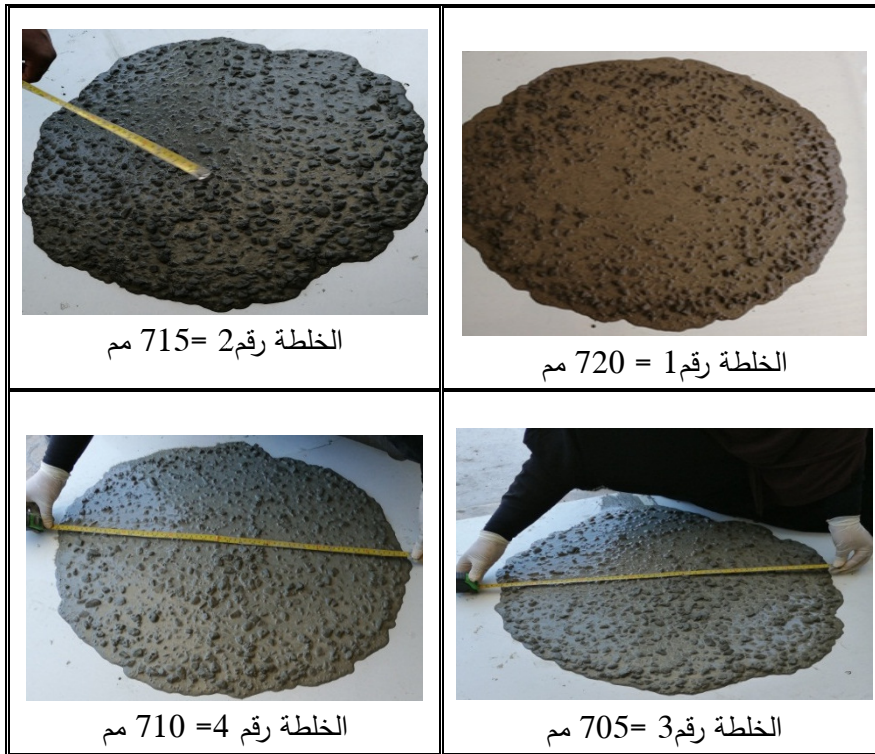
الملدنات (% من وزن المواد الاسمنتية)	الرغام (كجم/م ³)		الرغام (كجم/م ³)	الاسمنت (كجم/م ³)	الماء (كجم/م ³)	w/b	رقم الخلطة		
	الرغام الناعم								
	75%جرانيليا	25%رمل							
1.5	226	678	868	0	470	188	0.4	1	0% رغام
1.5	226	678	868	23.5	446.5	188	0.4	2	5% رغام
1.5	226	678	868	47	423	188	0.4	3	10% رغام
1.5	226	678	868	70.5	399.5	188	0.4	4	15% رغام

الفحوصات المختبرية:

أجريت الإختبارات في الحالة اللدنة للخلطات الخرسانية ذاتية الدمك المحتوية والغير محتوية على مسحوق الرخام طبقاً للمواصفات القياسية البريطانية، بحيث تم مراعاة تقارب الفترة الزمنية لكل الإختبارات وذلك لضمان خضوعها لنفس الظروف، وهذه الإختبارات هي:

إختبار الانتشار الحر + T₅₀₀ Slump Flow Test^[11].

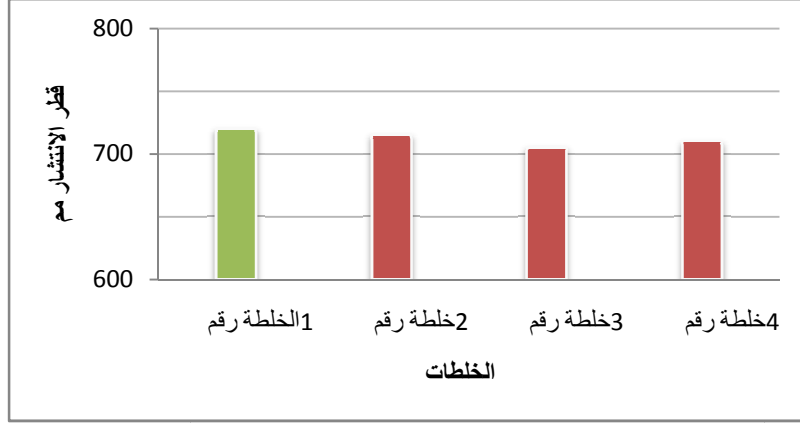
تم إجراء إختبار الإنتشار الحر على الخلطة المرجعية (الخلطة رقم 1) فكان قطر الإنتشار 720 مم وزمن T₅₀₀ = 3 ثانية، ثم عند إحلال مسحوق الرخام بدل الإسمنت بنسبة 5% لإنتاج الخلطة رقم 2، تم الحصول على قطر انتشار 715 مم وزمن T₅₀₀ = 3.5 ثانية، والخلطة رقم 3 المحتوية على 10% من مسحوق الرخام، أعطت قطر انتشار 705 مم وزمن T₅₀₀ = 4 ثانية، وأخيراً الخلطة رقم 4 التي تم فيها إحلال مسحوق الرخام بنسبة 15% بدل الإسمنت، كان قطر انتشارها 710 مم وزمن T₅₀₀ = 3.5 ثانية. مع العلم أن كل الخلطات كان لها نفس المؤشر البصري بقيمة صفر أي أنها متجانسة ولم يحدث بها أي نضح و الشكل رقم 4 يوضح ذلك.



الشكل رقم 4: إختبار الإنتشار الحر Slump Flow Test

النتائج والمناقشة:

كل الخلطات كانت ضمن حدود المواصفات البريطانية كما موضح في الشكل 5، الخلطة المرجعية أعطت قطر انتشار 720مم ثم بدأت تنخفض ولكن عند نسبة احلال 15% عادت للإرتفاع والملاحظ أن عند هذه النسبة كانت الخلطة أكثر تجانس.



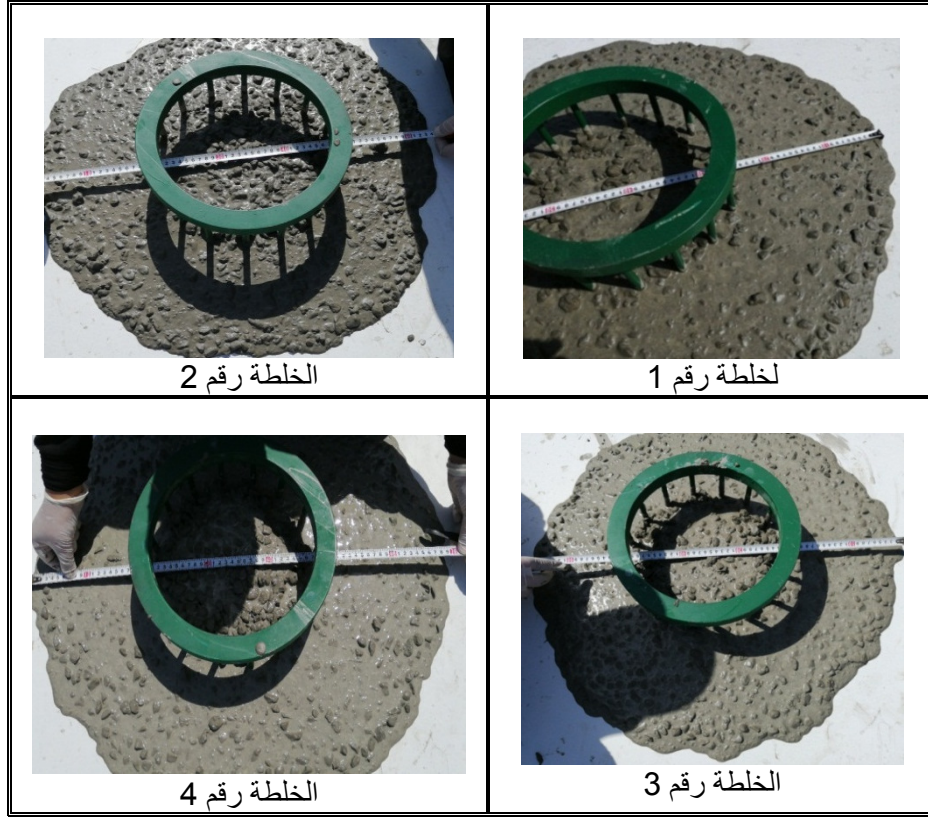
الشكل رقم 5: تأثير إحلال مسحوق الرخام على قطر الانتشار

اختبار الحلقة المعدنية J-Ring Test [12]

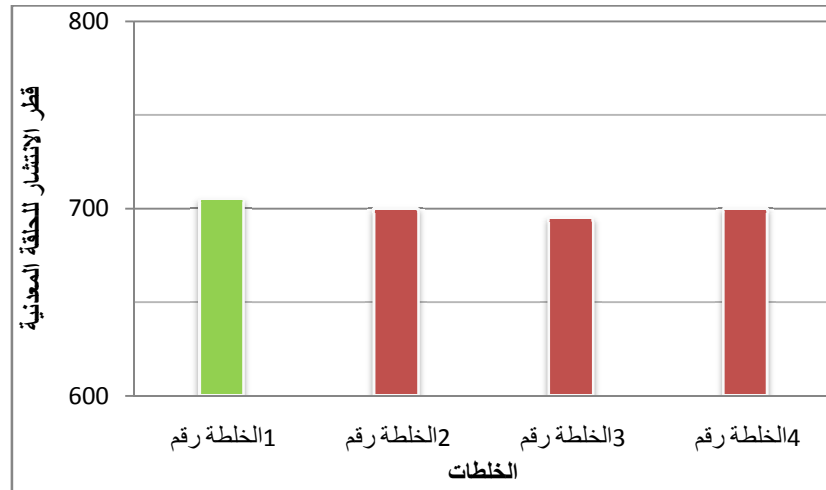
نفذ هذا الإختبار للخلطة رقم 1 (المرجعية) وكان قطر الإنتشار 705 مم، أي أن الفرق بين قطري اختبار المخروط والحلقة المعدنية هو 15مم، أما الخلطة 2 فقد أعطت قطر انتشار 700مم وهذا جعل الفرق بين القطرين 15مم. الخلطة 3 كان قطر انتشارها 695 مم والفرق بين القطرين 10مم، وأخيراً الخلطة 4 أعطت قطر انتشار 700 ما جعل الفرق بين القطرين 10مم، الشكل رقم 6 يبين اختبار الحلقة المعدنية لكل الخلطات.

النتائج والمناقشة:

الفرق بين قطري الإنتشار في الخلطة المرجعية كان 15مم وعند احلال 5% بقى الفارق 15مم ولكن حدث تحسن عند نسبة احلال 10% و15% حيث كان 10مم وهو ضمن المواصفات القياسية البريطانية (0-10) مم كما موضح بالشكل رقم 7.



الشكل رقم 6: اختبار الحلقة المعدنية J-Ring Test



الشكل رقم 7: تأثير احلال مسحوق الرخام على قطر انتشار الحلقة المعدنية (J-Ring)

اختبار القمع حرف-VV-Funnel Test^[13].

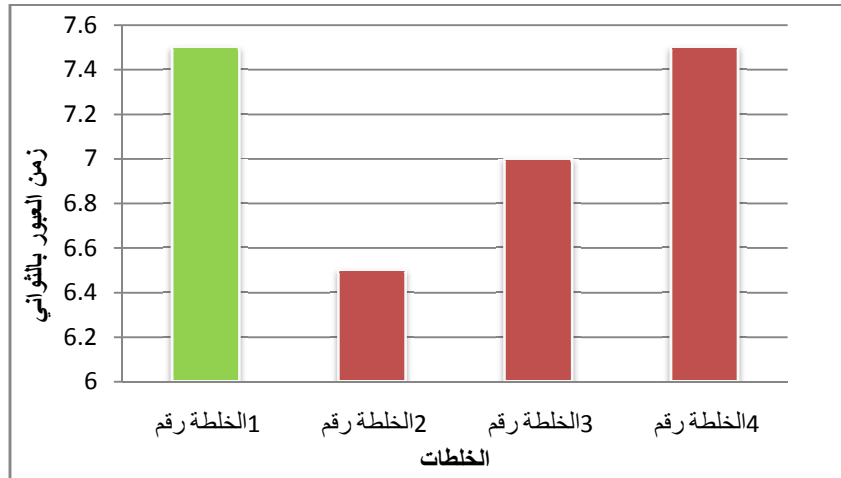
أُجرى الإختبار للخلطات الأربع بواسطة الجهاز المبين في الشكل رقم 8. نتائج اختبار القمع للخلطات رقم 1، 2، 3 و 4 هي على التوالي 7.5، 6.5، 7 و 7.5 ثانية .



الشكل رقم 8: جهاز القمع حرف-VV-Funnel

النتائج والمناقشة:

نتائج زمن العبور خلال القمع V تراوحت من 6.5 – 7.5 ثانية ، حيث كانت النسبة العليا عند الخلطة رقم 1 (المرجعية) ثم بدأ في الإنخفاض وعاد ليسجل نفس الزمن عند نسبة احلال 15% كما موضح في الشكل رقم 9.



الشكل رقم 9: تأثير احلال مسحوق الرخام على زمن العبور

اختبار الصندوق حرف - LL-Box Test [14]

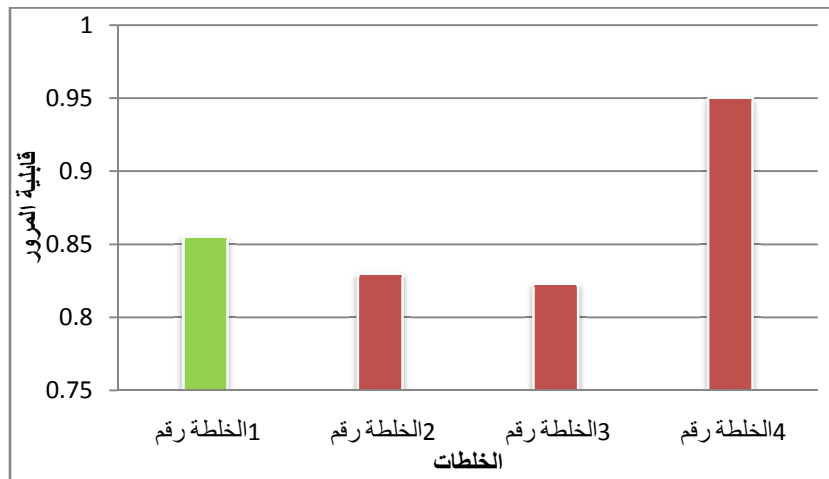
يجرى هذا الإختبار لتحديد قابلية العبور خلال المقاطع المسلحة كما في الشكل رقم 10. تم تنفيذ هذا الإختبار للخلطات المحتوية على 0، 5، 10 و 15% من مسحوق الرخام كبديل جزئي عن الإسمنت وكانت النتائج على التوالي 0.83، 0.855، 0.823 و 0.95.

النتائج والمناقشة:

قابلية المرور للخلطة رقم 1 (المرجعية) كانت 0.85 ثم انخفضت تدريجياً ولكن عند 15% سجلت أفضل نسبة وهي 0.95 كما مبين بالشكل رقم 11.



الشكل رقم 10: اختبار الصندوق حرف - L



الشكل رقم 11: تأثير مسحوق الرخام على قابلية المرور

الجدول رقم 4: نتائج الإختبارات اللدنة للخلطات

v-funnel (ث)	L-Box	الفرق بين القطرين (مم)	J-Ring (مم)	T50 (ث)	slump flow (مم)	رقم الخلطة
7.5	0.855	15	705	3	720	1 0% رخام
6.5	0.83	15	700	3.5	715	2 5% رخام
7	0.823	10	695	4	705	3 10% رخام
7.5	0.95	10	700	3.5	710	4 15% رخام

4. الخلاصة:

1. جميع نتائج الإختبارات اللدنة كانت ضمن الحدود المسموح بها حسب المواصفات البريطانية.
2. احتواء الخرسانة ذاتية الدمك على مسحوق الرخام لم يؤثر سلباً على قابلية التشغيل.
3. كلما زادت نسبة WMP في SCC كلما قلت قابلية الخرسانة للماء والعبور تدريجياً ولكن تعود لترتفع عند نسبة احلال 15%.
4. استخدام WMP كمادة بديلة عن الإسمنت لإنتاج خرسانة ذاتية الدمك يعتبر مفيد جداً تقنياً واقتصادياً وأيضاً من الناحية البيئية، حيث أظهرت النتائج امكانية الإستفادة الناجحة من هذه البقايا التي كانت تلقى في المكبات مسببة ضرراً كبيراً للبيئة .
5. أفضل نسبة احلال لمسحوق الرخام بدل الإسمنت هي 15%، حيث كان استوفت هذه الخلطة كل شروط القبول في المواصفات القياسية البريطانية كما انها الخلطة الأكثر اقتصادية حيث تم فيها تقليل الاسمنت بنسبة 15% أي مايعادل 70.5 كجم/م³ .

المراجع:

- [1] Shraddha Mishra, Dr. Nehal Anwar Siddiqui" A review On Environmental and Health Impact of Cement Manufacturing Emissions" International Journal of Geology, Agriculture and Environmental Sciences. Volume-2, Issue-3 June 2014.
- [2] المواصفات القياسية الليبية رقم 340 " الاسمنت البورتلاندي العادي"، 2009 .
- [3] المواصفات القياسية الليبية رقم 49 "ركام الخرسانة من المصادر الطبيعية"، 2002.
- [4] EFRANCE,"Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete"، February 2002.
- [5] المواصفات القياسية الليبية 2-341 " طرق الاختبارات الفيزيائية للاسمنت - القوام القياسي"، 2005.

- [6] المواصفات القياسية الليبية 341-3 طرق الاختبارات الفيزيائية للاسمنت - زمني الشك "، 2005.
- [7] المواصفات القياسية الليبية 341-4 طرق الاختبارات الفيزيائية للاسمنت - ثبات الحجم "، 2005.
- [8] المواصفات القياسية الليبية 341-5 طرق الاختبارات الفيزيائية للاسمنت - اختبار النعومة "، 2005.
- [9] المواصفات القياسية الليبية 341-6 طرق الاختبارات الفيزيائية للاسمنت - مقاومة الضغط "، 2005.
- [10] A. M. Neville, "Properties of Concrete", Fourth and Final Edition, Pitman Books Limited, London, 1995.
- [11] British Standard Institution, BS EN 12350-8: Testing fresh Concrete, Part 8: Method for self-compacting concrete-Slump flow test", London 2010.
- [12] British Standard Institution, BS EN 12350: Testing fresh Concrete, Part 12: Method for self-compacting concrete-J ring test", London 2010.
- [13] British Standard Institution, BS EN 12350-9: Testing fresh Concrete, Part 9: Method for self-compacting concrete-V funnel test", London 2010.
- [14] British Standard Institution, BS EN 12350-10: Testing fresh Concrete, Part 10: Method for self-compacting concrete-L box test", London 2010.