المؤتمر العلمي الأول
لطلاب المرحلة الجامعية والدراسات العليا
الجامعة الأسمرية الإسلامية 1445هـ- 2023م

استخدام مخلفات ورش الرخام كبديل للركام الناعم والخشن لإنتاج الخرسانة

حاتم محمد ناصف، أيمن هدية الكوت*، محمد عدنان صافي، و محمد احمد مامي

قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، الجامعة الأسمرية الإسلامية، زليتن، ليبيا.

*البريد الإلكتروني: aymanhadia14@gmail.com

Using Marble Workshops Residues as an Alternative to Soft and Coarse Aggregates to Produce Concrete

Hatem Mohammed Nasef, Ayman H. Elkut*, Mohammed Adnan Safey, and Mohammed Ahmed Mami

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Alasmarya Islamic University, Zliten, Libya.

الملخص

توجد مخاوف حول تأثير سلبي لمخلفات صناعة الرخام على البيئة. وتعتبر هذه المخلفات نفايات صناعية، حيث يتم التخلص منها بكميات كبيرة ولا يتم استخدامها سوى بنسبة ضئيلة في بعض الأعمال. قد تؤدي هذه المخلفات إلى تغيرات سلبية في التربة، حيث تؤدي إلى تقليل مساميتها وقدرتها على امتصاص الماء، مما يمكن أن يسبب بعض الأمراض التنفسية للسكان القريبين من المنطقة، وتلويث المياه الجوفية. بالإضافة إلى ذلك، فإنها تؤثر سلبًا على المظهر الجمالي للمنطقة. لذلك، قامت هذه الدراسة بتقديم حلاً محتملاً لهذه المشكلة من خلال استخدام مخلفات ورش صناعة الرخام كبديل للركام المحلي في صناعة الخرسانة. تضمنت الدراسة استخدام مخلفات الرخام كركام خشن بنسب مختلفة مثل 33.33%، 50%، 100% في تصنيع الخرسانة العادية. كما تم استخدام مخلفات الرخام كركام ناعم بنسب مختلفة مثل 10%، 30%، 50% من الركام الناعم المحلي (الرمل) في الخلطة الخرسانية العادية. وتم تقييم صلاحية استخدام مخلفات الرخام كركام خشن وناعم من خلال إجراء مجموعة من الاختبارات الميكانيكية والفيزيائية للركام المدروس، بالإضافة إلى اختبارات الخرسانة المعروفة مثل تحديد الخصائص التشغيلية ومقاومة الضغط. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن استخدام مخلفات الرخام كركام خشن وناعم في الخرسانة العادية قد يكون مجدًا. وتبيّن أن الخواص الميكانيكية للركام المستخدم كانت ضمن حدود المواصفات المقبولة. وفيما يتعلق بمقاومة الضغط، لوحظ أن الخرسانة التي تحتوي على ركام الرخام الخشن بنسبة 50% مع ركام التفجير أظهرت قيمًا أعلى من مقاومة الضغط بالمقارنة مع الخرسانة المصنوعة من الركام المحلي (التفجير والحرث). وبالمثل، أظهرت الخرسانة التي تحتوي على ركام مخلفات الرخام الناعم بنسبة 30% من الركام الناعم المحلي مقاومة ضغطٍ أعلى من الخرسانة العادية. بناءً على هذه النتائج، يوصى بشكل عام باستخدام مخلفات ورش صناعة الرخام كبديل للركام المحلي في صناعة الخرسانة. ومع ذلك، يجب مراعاة القيود

والمواصفات المحددة في الدراسة التي تم الاستناد إليها، حيث تم استخدام نسب محددة من مخلفات الرخام في الخلطات الخرسانية وتم تقييمها من خلال اختبارات مختلفة.

الكلمات الدالة: خرسانة، رخام، ركام، الخواص الميكانيكية.

Abstract

Using marble industry waste as an alternative to local aggregate in concrete has been studied. The study found that the mechanical properties of both coarse and fine marble aggregate were within acceptable limits. Furthermore, it was observed that concrete containing 50% coarse marble aggregate alongside blasting aggregate exhibited higher compressive strength compared to concrete made with local aggregate (blasting and quarrying). Similarly, concrete containing 30% fine marble waste aggregate showed higher compressive strength than normal concrete. Based on these findings, the use of marble industry waste as an alternative to local aggregate is recommended within the limitations specified in the research. However, this application should be implemented based on specific restrictions and specifications outlined in the study, as certain proportions of marble waste were used in the concrete mixes and evaluated through various tests.

Keywords: *Concrete, Aggregate, Marble, Compressive strength.*

1. المقدمة

إن المخلفات الصلبة والتي تسبب العديد من المشاكل يزداد بحث طرق التخلص منها حول العالم، في بعض المدن والمناطق الصناعية والسكنية والتجارية تكون مختلطة، وبالتالي يحصل تداخل لمشاكل النفايات الصناعية مع المنطقة السكنية، هذا بسبب أن المناطق الصناعية الواقعة داخل أو في حدود المدينة لا تملك مرافق كافية بحيث يمكن تنظيم الصناعات من جمع ومعالجة النفايات السائلة والصلبة والتخلص منها، ففي بعض الدول النامية مثل ليبيا لا توجد إدارة للنفايات الصلبة الصناعية لأن الأجهزة المحلية (البلدية) مقتصر فقط على تنظيف الشوارع ونقل المخلفات السكنية، وهذا الأمر قد يزيد من تفاقم مشكلة تكدس النفايات الصناعية الصلبة عند مواقع المصانع.

إن عملية تصنيع الرخام والحجر بما فيها من عمليات قص ونشر وتهذيب وتسوية سطوح في معامل الرخام والحجر ينتج عنها نفايات صلبة كبيرة مختلفة الحجم حيث يتم التخلص منها باستخدامها في صناعة الخرسانة والأعمال الإنشائية المختلفة وأعمال الركام، ومخلفات سائلة لزجة ثقيلة تتكون من كميات المياه التي تستخدم في عمليات تبريد آليات معامل الرخام والحجر وإضافة مواد تسوية السطوح، والجسيمات الدقيقة والرمال والنشارة الناتجة أثناء عمليات القص وغالباً تتحول بعد جفافها إلى مادة خفيفة النشر والتي تجمع غالبا في بحيرات لتجف وتتحول بعد جفافها إلى

مادة خفيفة جدا، تجمع عادة وترمى بشكل عشوائي مسببة مشكلات بيئية وصحية كثيرة، أيضاً تصدر انبعاثات كثيفة من الغبار أثناء عمليات القص والنشر من الآليات (الجولاني، 2008).

يتكون الركام نتيجة لترسّب المعادن وتشكلها خلال العمليات الجيولوجية، حيث تتشظى جسيمات الركام من الصخور، أما طبيعيا نتيجة لعمليات التجوية والبري والتآكل، أو صناعيا بواسطة تهشيم الصخور بالأجهزة والآلات، وتتشابه العديد من المركبات في خواصها، بينما تختلف أخرى باختلاف مصادرها (النبيل، 2011).

الرخام هو عبارة عن صخر يتكّون بفعل درجات الحرارة والضغط الشديدين اللذين يتعرض لهما في باطن الأرض الصخر المتحّول من الكالسيت ذي درجة النقاء العالية، وتتعدد استخداماته فيدخل في المباني، والتماثيل، والنصب التذكارية، ومجال الزينة، والأمور المتعلقة بالأثاث والأرضيات. عرف الإنسان حجر الرخام منذ مئات السنين حيث عمل على استخدامه في تزيين وزخرفة القصور، والمساجد وغيرها الكثير من المباني والقلاع الفخمة، لما يتميز به من ألوان جميلة وبراقة والتي تضفي مظهر جمالي فريد في الأماكن التي توضع فيها، ونظرا لازدياد الطلب على استخدام الرخام عبر العصور وضرورة وجوده في كل بيت. عمل الإنسان على تطوُّر صناعات الرخام لتشمل عدّة أنواع وأشكال أكثر جودة من سابقتها، مّما يجعلها تدوم لفترة أطول عند استعمالها دون تكسرها أو تحطمها (المحجوب، 2009).

إمكانية استخدام مخلفات ركام الرخام كبديل للركام الطبيعي لإنتاج خرسانة ذات خواص جيدة كانت محور دراسة قام بها (Hebhoub et al., 2011) حيث استخدم ثلاث خلطات خرسانية، الخلطة الأولى تم فيها إحلال الركام الطبيعي الخشن بركام الرخام الخشن، وفي الخلطة الثانية تم استبدال الرمل الطبيعي بركام الرخام الناعم، أما في الخطة الثالثة استخدم كلا من الركامين الناعم والخشن بدل من الركام الطبيعي المكون للخلطة حيث كانت نسبة الإحلال (25%، 50%، 75%، 100%) وفي كل الخلطات ثبت نسبة الماء للإسمنت (0.5). نتائج هذه الدراسة أوضحت إمكانية استخدام مخلفات الرخام في الخرسانة وذلك يؤدي إلى تحسين بعض خواص الخرسانة مثل مقاومة الضغط والشد، إضافة إلى ذلك لوحظ أن نسبة الهواء المحبوس كانت أقل عندما كانت نسبة الإحلال (25-75%).

كما أجرى الطوير وآخرون (2017) دراسة لاستخدام مخلفات ورش الرخام كركام خشن بديل للركام المحلي في تصنيع الخرسانة العادية. هدفت الدراسة إلى تقييم مدى ملاءمة استخدام ركام مخلفات الرخام من خلال إجراء سلسلة من الاختبارات الميكانيكية على الركام المدروس، بالإضافة إلى اختبارات الخرسانة التي تشمل الخواص التشغيلية ومقاومة الضغط. أظهرت نتائج الدراسة أدلة تدعم

استخدام مخلفات الرخام كركام خشن في الخرسانة. وجد أن الخواص الميكانيكية لركام الرخام كانت تلبي المتطلبات المحددة. بالإضافة إلى ذلك، لوحظ أن الخرسانة التي تحتوي على ركام مخلفات صناعة الرخام تظهر قيماً لمقاومة الضغط تعادل تلك التي تحققت في الخلطات المصنعة من الركام المحلي (التفجير والحرث).

قام مدني (2016) بدراسة حول إنتاج خرسانة إنشائية من مخلفات الرخام كبديل للركام الناعم والخشن وتم استخدام الرخام كبديل للركام الناعم والخشن لإنتاج خرسانة خضراء صديقة للبيئة، حيث تم إضافته للخلطة الخرسانية بنسب مختلفة باستخدام الرخام الناعم بديلا للركام الناعم في خلطات منفصلة واستخدم الرخام الخشن بديلا للركام الخشن في خلطات منفصلة، ثم أخيرا تم تجربة استخدام نوعي الخام مع بعضهما البعض في خلطات أخرى لمعرفة المقاومة الناتجة. وبعد قياس المقاومات وجد أن المقاومة زادت مقارنة مع الخرسانة العادية، مما يعني أنه يمكن استخدام مخلفات الرخام كبديل للركام الطبيعي في الخلطات الخرسانية. كما توصلت نتائج دراسة قام بها Corinaldesi وآخرون (2010) بأن إحلال 10% من مخلفات ركام الرخام المستخدم كرمل أعطت أعلى مقاومة ضغط عند نفس درجة التشغيلية إن استخدام مخلفات الرخام لم يقتصر فقط على الخرسانة بل تم استخدامه في الأنواع الأخرى من مواد البناء. كما بينت الدراسة التي قام به (Saboy et al., 2007) أن استخدام مسحوق الرخام بنسبة تتراوح (15–20)% في صناعة السيراميك الأحمر يمكن أن يحسن الخواص الميكانيكية لطوب السيراميك.

وفي دراسة أخرى قام بها (Akbulut & Gurer, 2007) أوضحت أن الخواص الفيزيائية لركام مخلفات الرخام كانت ضمن الحدود المنصوص عليها ويمكن أن تستخدم في طبقات الرصف الإسفلتية الخفيفة والمتوسطة. أما من ناحية الجدوى الاقتصادية قد وجد أن عدم استخدام مخلفات ورش صناعة الرخام في الخرسانة تحقق عائد اقتصادي مقارنة بالأنواع الأخرى من الركام التقليدي المعروف على الصعيد العالمي والمتحصل عليه من الصخور النارية والرسوبية والمتحولة. فاستخدام ركام الرخام كجزء من مكونات الخلطة الخرسانية يوفر حوالي 22% من تكلفة المتر المكعب مقارنة مع تكلفة خرسانة محتوية على الركام التقليدي، حيث كان فرق التكلفة متمثلا في تكلفة تفجير وحرث ونقل الصخور الأصلية للكسارات، وهذه المرحلة من التصنيع لا يتضمنها ركام الرخام (Sudarshan and Vyas, 2016).

وفي دراسة أخرى قامت بها المزوغي وآخرون (2019) باستخدام مخلفات مصانع الرخام كمادة بديلة جزئيا عن الإسمنت لإنتاج خرسانة ذاتية الدمك حيث قاموا بدراسة خصائص الخرسانة ذاتية الدمك وإمكانية تنفيذها من مخلفات الرخام ليتم إحلالها جزئيا بدلا عن الإسمنت بنسب 5، 10، 15%. تم

دراسة الخواص اللدنة وأجريت اختبارات SLUMP FLOW، وG-ring واختبار L-BOX وتبين أنه يمكن الاستفادة من مخلفات الرخام في إنتاج خرسانة ذاتية الدمك وبالتالي تقليل نسبة الإسمنت، وأفضل نسبة لإحلال الرخام بدل الإسمنت كانت 15%.

2. المواد والطرق

1.2. مكونات الخرسانة

تم استخدام الإسمنت البورتلاندي العادي من إنتاج مصنع البرج للإسمنت التابع لشركة الاتحاد العربي للمقاولات وخواصه الفيزيائية مطابقة للمواصفات القياسية الليبية 340 (1997). والجدول (1) يوضح خواص الإسمنت البورتلاندي المستخدم، والجدول (2) يوضح التركيب الكيميائي للإسمنت المتحصل عليها من الإدارة الفنية للمصنع.

جدول 1. خواص الإسمنت البورتلاندي المستخدم

الاختبارات المعملية	نتائج الاختبار	حدود المواصفات القياسية الليبية رقم (340)
زمن الشك الابتدائي (دقيقة)	195	لا يقل عن 45 دقيقة
زمن الشك النهائي(دقيقة)	318	لا يزيد عن 10 ساعات
ثبات الحجم(مم)	1.00	لا يزيد عن 10 مم
مقاومة الضغط بعد 3 أيام (نيوتن/مم^2)	26	لا تقل عن 24 نيوتن/مم^2
مقاومة الضغط بعد 28 يوم (نيوتن/مم^2)	44	لا تقل عن 39 نيوتن/مم^2
الوزن النوعي	3.15	مطابق
المساحة السطحية (سم^2/جم)	2977	لا تقل عن 2225سم^2/جم

جدول 2. التركيب الكيميائي للإسمنت المستخدم

التركيب الكيميائي	النسبة المئوية(%)
الفاقد عند الحرق(L.O.I)	0.3
أكسيد السيلكون(SiO_2)	20.14
أكسيد الحديد(Fe_2O_3)	3.47
أكسيد الألمونيوم (Al_2O_3)	5.91
أكسيد الكالسيوم(CaO)	62.9
أكسيد الماغنيسيوم (MgO)	1.59
أكسيد الكبريت (SO_3)	2.13
أكسيد الصوديوم (Na_2O)	0.19
أكسيد البوتاسيوم (K_2O)	0.97
أكسيد الكالسيوم الحر	2.4

تم توريد الركام الناعم من مدينة زليتن وهو عبارة عن رمل طبيعي خال من الشوائب وقد أظهرت نتائج الاختبارات المعملية التي أجريت عليه في معمل الخرسانة بكلية الهندسة-الخمس بأن خواصه الفيزيائية مطابقة للمواصفات البريطانية (BS812,1992). والجدول (3) يبين نتائج التركيب الكيمائي والجدول (4) يبين نتائج الخواص الفيزيائية والجدول (5) يبين نتائج التحليل المنخلي حسب المواصفات البريطانية. (BS882, 1992).

جدول 3. التركيب الكيميائي للركام الناعم

التركيب الكيمائي	النسبة المئوية %
أكسيد السليكون SiO_2	20.14
أكسيد الحديد Fe_2O_3	2.99
أكسيد الألومنيوم Al_2O_3	5.91

جدول 4. الخواص الفيزيائية للركام الناعم.

الاختبار	نتائج الاختبار	حدود المواصفات BS812
الوزن النوعي	2.64	2.7 – 2.5
نسبة المواد الناعمة %	%2.55	لا تزيد عن 4%
الكثافة الظاهرية	1650 kg/m^3	1800 – 1400

جدول 5. التحليل المنخلي للركام الناعم وفق المواصفات البريطانية.

مقاس المنخل (mm)	وزن المحجوز (g)	الوزن التراكمي المحجوز (g)	النسبة المئوية للمحجوز (%)	النسبة المئوية المارة (%)	حدود المواصفات (BS882, 1992)
2.36	0	0	0	100	80 – 100
1.18	0	0	0	100	70 – 100
0.6	2.8	2.8	0.56	99.44	55 – 100
0.3	261.3	264.1	52.82	47.18	5 – 70
0.15	221.3	485.4	97.08	2.92	0 – 5
0.075	10.9	496.3	99.26	0.74	-
الوعاء	3.7	500	100	0	-

ركام التفجير تم توريده من كسارة شنين مدينة زليتن، وهو عبارة عن ركام زاوي الشكل ومقاس اعتباري أقصي 19 مم، والجدول (6) يوضح نتائج التحليل المنخلي للركام حسب المواصفات البريطانية المعتمدة (BS882, 2002).

جدول 6. التحليل المنخلي للركام وفق المواصفات البريطانية

مقاس المنخل (mm)	وزن المحجوز (g)	الوزن التراكمي المحجوز (g)	النسبة المئوية للمحجوز (%)	النسبة المئوية المارة (%)	حدود المواصفات البريطانية (BS882, 2002)
37.5	0	0	0	100	100
19	725	725	14.5	85.5	100-85
14	3467	4193	83.86	16.14	70-0
10	720	4913	98.26	1.74	25-0
4.75	85	4998	99.96	0.04	5-0
الوعاء	2	5000	-	-	-

ركام الحرث هذا النوع من الركام تم توريده من كسارة شنين في مدينة زليتن، وهو عبارة عن حصي مكسر الناتج من عمليات الحرث للصخور الغير قاسية ذو مقاس اعتباري أقصي 19 مم، والجدول (7) يوضح نتائج التحليل المنخلي للركام حسب المواصفات البريطانية المعتمدة (BS882, 2002).

جدول 7. التحليل المنخلي للركام وفق المواصفات البريطانية

مقاس المنخل (mm)	وزن المحجوز (g)	الوزن التراكمي المحجوز (g)	النسبة المئوية للمحجوز (%)	النسبة المئوية المارة (%)	حدود المواصفات البريطانية (BS882, 2002)
37.5	0	0	0	100	100
19	160	160	3.21	96.79	100-85
14	3684	3844	76.91	23.09	70-0
10	1078	4922	98.48	1.52	0-25
4.75	51	4973	99.5	0.50	5-0
الوعاء	27	5000	-	-	-

الماء المستخدم في الخلط المتوفر بمعمل الخرسانة خال من المواد العضوية ووفقاً لحدود المواصفات القياسية الليبية (م.ق.ل 294، 1988)، والتي تبين أن حدود الكلوريدات المسموح بها لخلط ومعالجة الخرسانة تكون أقل من 500 جزء في المليون وبالنسبة للكبريتات والكربونات والبيكربونات تكون أقل من 1000 جزء في المليون.

بينما ركام الرخام الخشن تم تصنيعه من مخلفات مصانع الرخام بمدينة مصراتة، حيث تم تكسيره ونخله على المناخل القياسية وتجميع المحجوز على كل منخل وبعد ذلك تم خلطه حسب التدرج الحبيبي لحدود المواصفات البريطانية (BS882, 2002). والجدول (8) يبين نتائج التحليل المنخلي حسب المواصفات البريطانية (BS882, 1992)، والشكل (1) يوضح مقارنة بين ركام الرخام الخشن ومخلفات الرخام في المصانع.

جدول 8. التحليل المنخلي للركام وفق المواصفات البريطانية

مقاس المنخل (mm)	وزن المحجوز (g)	الوزن التراكمي المحجوز (g)	النسبة المئوية للمحجوز (%)	النسبة المئوية المارة (%)	حدود المواصفات البريطانية (BS882, 2002)
37.5	0	0	0	100	100
19	637	637	12.74	87.62	100-85
14	2603	3240	64.83	35.17	70-0
10	975	4215	84.29	15.71	25-0
4.75	727	4942	98.84	1.16	5-0
الوعاء	58	5000	-	-	-

شكل 1. يوضح ركام الرخام الخشن المستخدم وقطع مخلفات الرخام في المصانع.

ركام الرخام الناعم تم تصنيعه بتكسير مخلفات مصانع الرخام ونخله على المناخل القياسية وتجميع المحجوز على كل منخل وبعد ذلك تم خلطه بنسب حسب حدود المواصفات البريطانية (BS812, 1992)، والجدول (9) يبين نتائج التحليل المنخلي، في حين أن الشكل (2) يوضح ركام الرخام الناعم وقطع مخلفات الرخام في المصانع.

جدول 9. التحليل المنخلي لركام الرخام الناعم وفق المواصفات البريطانية

مقاس المنخل (mm)	وزن المحجوز (g)	الوزن التراكمي المحجوز (g)	النسبة المئوية للمحجوز (%)	النسبة المئوية المارة (%)	حدود المواصفات البريطانية (BS882,1992)
2.36	0	0	0	100	80 – 100
1.18	0	0	0	100	70 – 100
0.6	8	8	1.6	98.39	55 – 100
0.3	217.8	225.8	45.19	54.81	5 – 70
0.15	249.4	475.2	95.11	4.89	0 – 5
0.075	19.7	494.9	99.05	0.95	-
الوعاء	4.7	499.6			-

شكل 2. ركام الرخام الناعم المستخدم وقطع مخلفات الرخام

2.2. الخلطات الخرسانية

استخدمت الخلطات الخرسانية الموضحة في الجدول (10) والتي تبين كميات المواد المستخدمة لإنتاج متر مكعب، حيث تم تغيير نسبة الركام الخشن (33.33، 50 و100%) في الخلطة. وكذلك تم إحلال ركام الرخام الناعم بنسب مختلفة هي (10%، 30% و50%) من وزن الركام الناعم إلى الخرسانة كما مبين في الجدول (11).

جدول 10. نسب مكونات كل خلطة

الخلطة	إسمنت (kg/m^3)	ماء (L/m^3)	ركام رخام خشن (kg/m^3)	ركام رخام ناعم (kg/m^3)	ركام خشن تفجير (kg/m^3)	ركام خشن حرث (kg/m^3)	ركام ناعم (kg/m^3)
M0	450	198	0	0	898	0	898
M1	450	198	449	0	449	0	898
M2	450	198	898	0	0	0	898
M3	450	198	0	0	0	898	898
M4	450	198	449	0	0	449	898
M5	450	198	299.33	0	299.33	299.33	898
M6	450	198	0	89.8	898	0	808.2
M7	450	198	0	269.5	898	0	628.6
M8	450	198	0	449	898	0	449

جدول 11. نسب إحلال الرخام من الركام

العينة / النسبة	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
نسبة ركام الرخام الناعم	0%	0%	0%	0%	0%	0%	10%	30%	50%
نسبة ركام التفجير	100%	50%	0%	0%	0%	33.33%	100%	100%	100%
نسبة ركام الحرث	0%	0%	0%	100%	50%	33.33%	0%	0%	0%
نسبة ركام الرخام الخشن	0	50%	100%	0%	50%	33.33%	0%	0%	0%

تمت عملية الخلط داخل معمل الخرسانة بكلية الهندسة بالجامعة الأسمرية الإسلامية باستخدام خلاطة سعتها 0.15 $م^3$، حيث تم غمر الركام في الماء لمدة 24 ساعة ثم تجفيف السطح الخارجي للحصول على ركام مشبع جاف السطح، ومن تم إعداد القوالب القياسية ذات أبعاد 150×150×150مم وأسطوانات ذات أبعاد 150×300 مم وتنظيف السطح الداخلي للقوالب جيداً لمنع التصاق الخرسانة بها، تم وزن مكونات الخلطة الخرسانية اللازمة لإعداد العينات الخرسانية. تم وضع مواد الخلطة الخرسانية في الخلاطة الميكانيكية وخلطها على الجاف لمدة دقيقة واحدة بعد ذلك أضيف ماء الخلط تدريجياً حتى تتجانس الخلطة وتصبح جاهزة للصب داخل القوالب القياسية وفي زمن تقريباً أربع دقائق، وتم صب الخرسانة الطازجة مباشرة في القوالب ودمك الخرسانة جيداً للتخلص من الهواء المحصور داخل الخرسانة وذلك إلى منسوب أعلى من سطح القالب 2مم. بعد

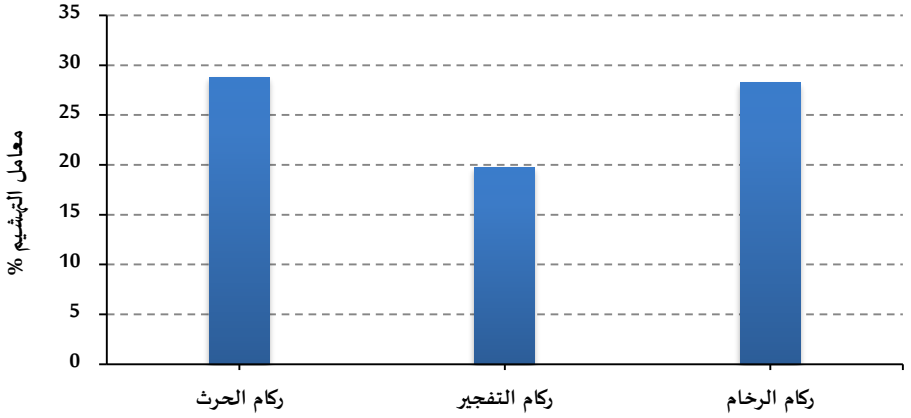
نصف ساعة تم تسوية السطح الخارجي للعينات ووضعت داخل المعمل لمدة 24 ساعة قبل فك القوالب وترقيم العينات حسب الخلطة الخرسانية. وفي النهاية تم فك القوالب وترقيمها وتم معالجة العينات بالغمر في الماء إلى حين موعد الاختبار.

3. النتائج والمناقشة

1.3. نتائج اختبارات الركام

1.1.3. نتائج اختبار معامل التهشيم للركام الخشن:

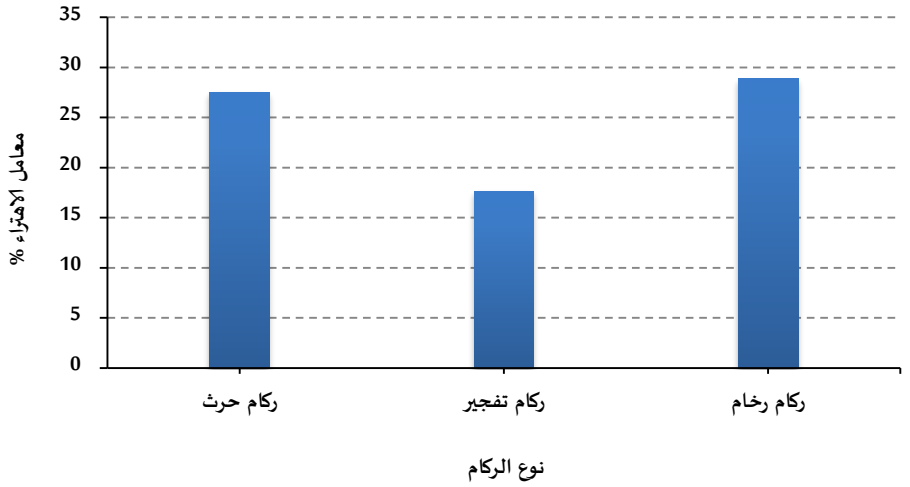
يوضح الشكل (3) معامل التهشيم لجميع أنواع الركام المستخدم وفق المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS812 _110, 1995). وجد أن معامل التهشيم لركام الرخام أقل من معامل التهشيم لركام الحرث بنسبة 0.5% وأعلى من معامل التهشيم لركام التفجير بنسبة 8.53%.



شكل 3. معامل التهشيم للركام المستخدم

2.1.3. نتائج اختبار معامل الاهتراء (لوس أنجلوس) للركام الخشن:

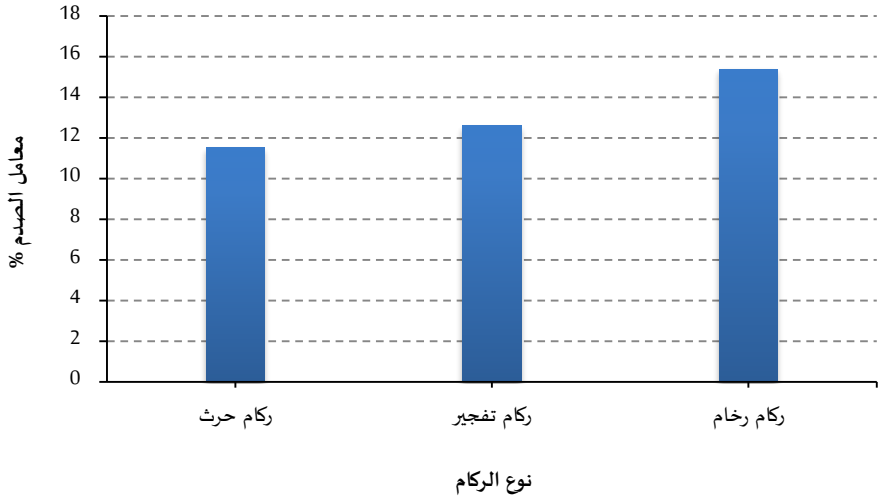
يبين الشكل (4) معامل الاهتراء لجميع أنواع الركام المستخدم وفق المواصفات الأمريكية (AASHTO_131). وبقياس معامل الاهتراء لجميع أنواع الركام وجد أن ركام الرخام له معامل اهتراء أعلى من ركام الحرث بنسبة 1.5% وأعلى أيضاً من ركام التفجير بنسبة 11.26%.



شكل 4. معامل الاهتزاز للركام المستخدم

3.1.3. نتائج اختبار معامل الصدم للركام الخشن:

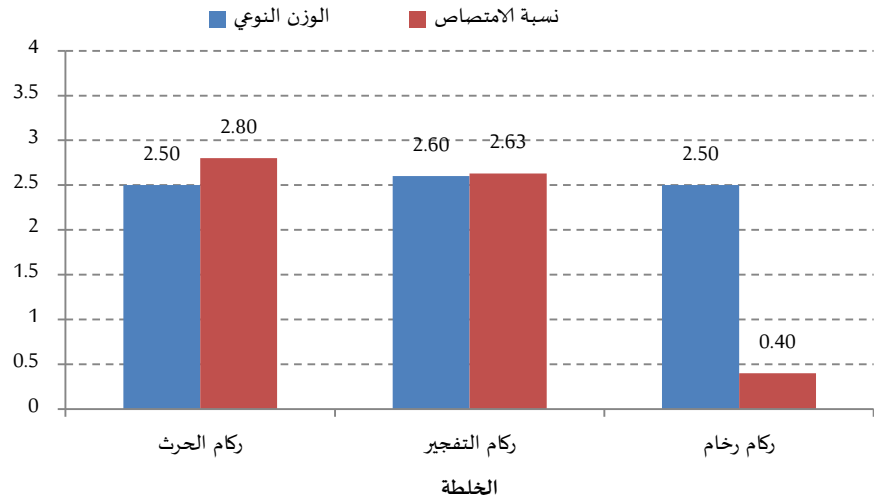
الشكل (5) يوضح معامل الصدم لجميع أنواع الركام المستخدم وفق المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS 812_110)، وجد أن معامل الصدم لركام الرخام أعلي من معامل الصدم لركام الحرث بنسبة 3.83% وأعلى من معامل الصدم لركام التفجير بنسبة 2.78%.



شكل 5. معامل الصدم للركام المستخدم

4.1.3. نتائج اختبار الوزن النوعي ونسبة الامتصاص للركام الخشن:

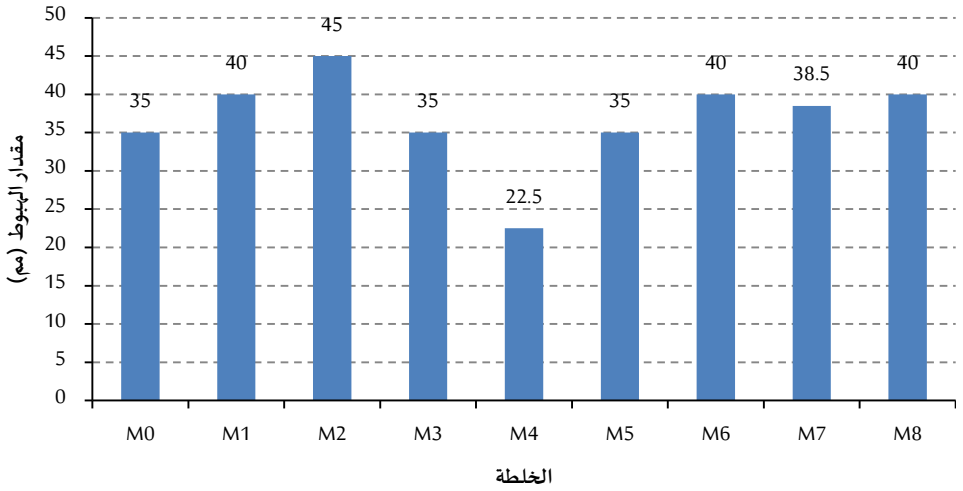
والشكل (6) يوضح الوزن النوعي ونسبة الامتصاص لجميع أنواع الركام المستخدم وفق المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS EN 1097_6, 2013)، ونلاحظ في النتائج أن ركام الرخام وركام التفجير وركام الحرث تقع ضمن الحدود القياسية للوزن النوعي للركام (2.5–75.2) ولكن نلاحظ أن الوزن النوعي لركام الرخام أقل بنسبة 4.5% مقارنة بركام التفجير وأقل بنسبة 0.4 % من ركام الحرث. ونلاحظ أن نسبة امتصاص الرخام أقل بنسبة 2.4% من ركام الحرث وبنسبة 2.23% من ركام التفجير.



شكل 6. الوزن النوعي ونسبة الامتصاص للركام المستخدم.

2.3. نتائج اختبارات الخرسانة الطرية

الشكل (7) يوضح نتائج اختبار الهبوط حيث يبين مقدار الهبوط للخرسانة الطرية لجميع الخلطات. حيث قيمة الهبوط للخلطات الحاوية على الرخام الخشن زادت بنسبة 22% عن الخلطة المرجعية، بينما الخلطات الحاوية على الرخام الناعم زادت قيم الهبوط بنسبة 11% عن الخلطة المرجعية ويرجع هذا التغير إلى زيادة امتصاص الماء لركام الرخام الناعم مقارنةً بركام الرخام الخشن.

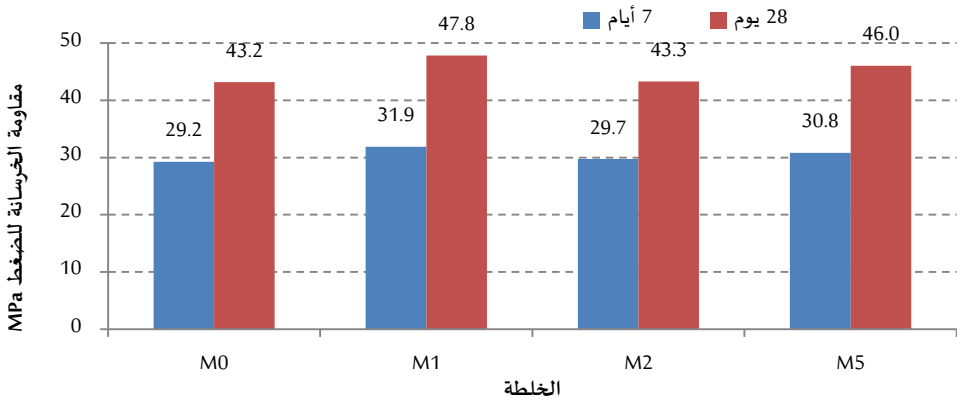


شكل 7. مقدار الهبوط

3.3. نتائج اختبارات الخرسانة المتصلدة

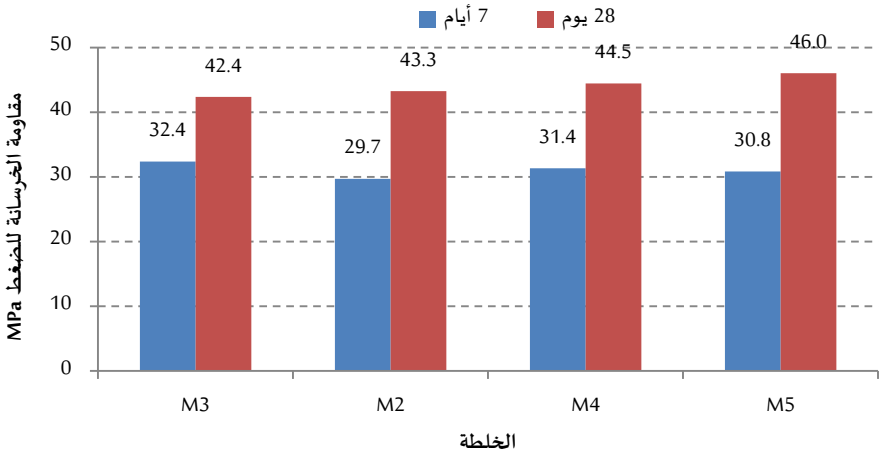
1.3.3. نتائج اختبار مقاومة الخرسانة للضغط:

الشكل (8) يوضح تأثير نسبة ركام الرخام الخشن مع ركام التفجير على مقاومة الخرسانة للضغط، وفقا للموصفات البريطانية (BS 1881 Part 116,1983) ومن خلال الشكل نلاحظ أن مقاومة الضغط زادت بنسبة 5.19% و8.46% و1.68% وبعد 7 أيام للعينات التي تحتوي على نسبة ركام الرخام بنسبة إحلال33.33% و50% و100% على التوالي بالمقارنة مع العينات المرجعية. وعند 28 يوم زادت المقاومة بنسبة 6% و9.6% و0.23% للعينات التي تحتوي على نسبة إحلال 33.33% و50% و100% على التوالي بالمقارنة مع العينات المرجعية. نلاحظ من خلال هذه النتائج إمكانية استخدام ركام الرخام بنسب إحلال عالية دون حدوث أي انخفاض في مقاومة للمحتوي الرطوبة الزائد وبذلك يعمل على تخفيض نسبة الماء للإسمنت مما ينتج عنه زيادة في المقاومة. الضغط وخاصة مع زيادة عمر العينات وربما يرجع ذلك التحسن في المقاومة لامتصاص الرخام.

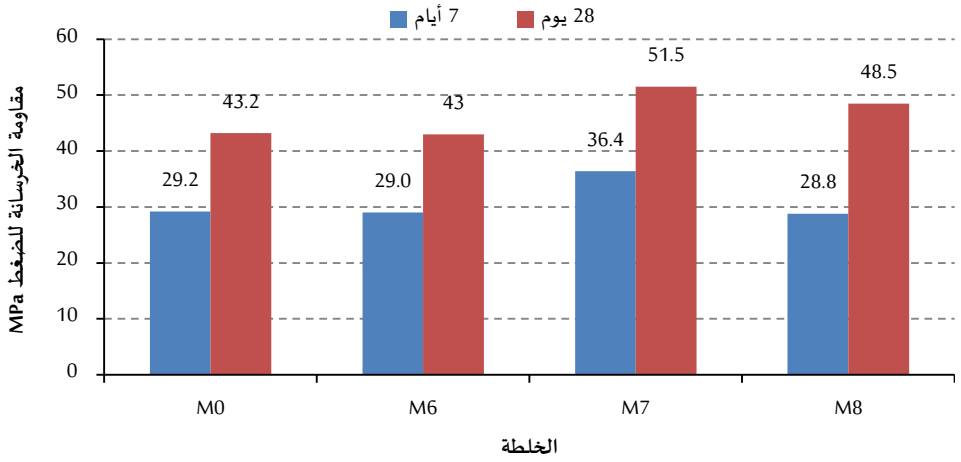


شكل 8. مقاومة الخرسانة للضغط عند إضافة الرخام كركام خشن مع ركام التفجير

الشكل (9) يوضح تأثير نسبة ركام الرخام الخشن مع ركام الحرث على مقاومة الخرسانة للضغط، ومن خلال الشكل نلاحظ أن مقاومة الضغط قلت بنسبة 4.93% و3.08% و8.33% بعد 7 أيام للعينات التي تحتوي على نسبة ركام الرخام بنسبة إحلال 33.33% و50% و100% على التوالي بالمقارنة مع العينات المرجعية. وعند 28 يوم زادت المقاومة بنسبة 7.82% و4.71% و2.07% للعينات التي تحتوي على نسبة إحلال 33.33% و50% و100% على التوالي بالمقارنة مع العينات المرجعية. نلاحظ من خلال هذه النتائج إمكانية استخدام ركام الرخام بنسب الإحلال المستخدمة.



شكل 9. مقاومة الخرسانة للضغط عند إضافة الرخام كركام خشن مع ركام الحرث

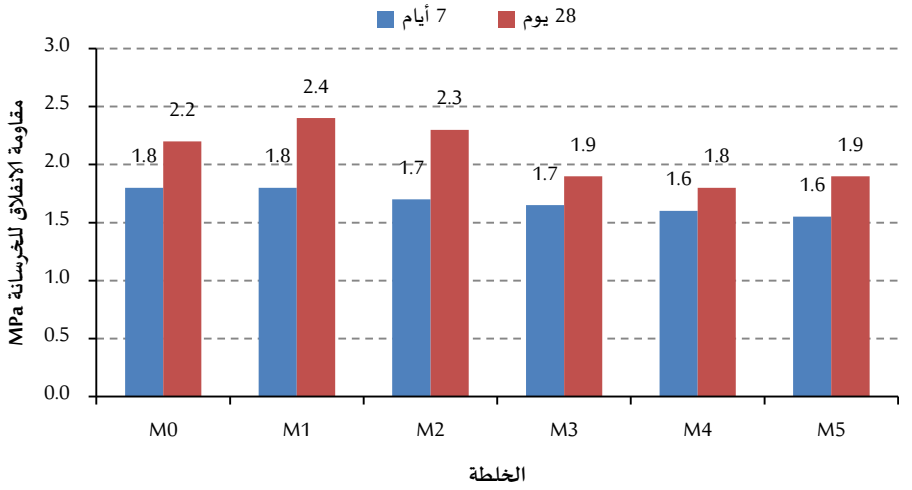


شكل 10. مقاومة الخرسانة للضغط عند إضافة الرخام كركام ناعم

الشكل (10) يوضح تأثير نسبة ركام الرخام الناعم على مقاومة الضغط، ومن خلال الشكل نلاحظ أن مقاومة الضغط بعد 7 أيام قلت بإضافة ركام الرخام الناعم حيث قلت بنسبة 0.68% من مقاومة الخلطة القياسية لنسبة رخام 10% وزادت بنسبة 19.7% لنسبة رخام 30% بينما تقاربت مقاومة الضغط لنسبة رخام 50% من مقاومة الخلطة القياسية، وعند 28 يوم قلت بنسبة 0.46% من مقاومة الخلطة القياسية لنسبة رخام 10% بينما زادت بنسبة 16.1% لنسبة رخام 30% وزادت بنسبة 10.2% لنسبة رخام 50%. وكذلك نلاحظ أن مقاومة الضغط للخلطات المحتوية على ركام رخام ناعم في ازدياد ملحوظ مع الزمن كما هو ملاحظ عند عمر 28 يوم ويدل تأخر الحصول على مقاومة الضغط المبكرة للخلطات المحتوية على رخام ناعم نظراً لأن الرخام الناعم يحتوي على جزيئات ناعمة دقيقة تملأ الفراغات بين جزيئات الإسمنت الأكثر خشونة وتعمل كمواد بوزولانية تبطئ من عملية التميؤ وهذا ما أكدته الدراسات السابقة.

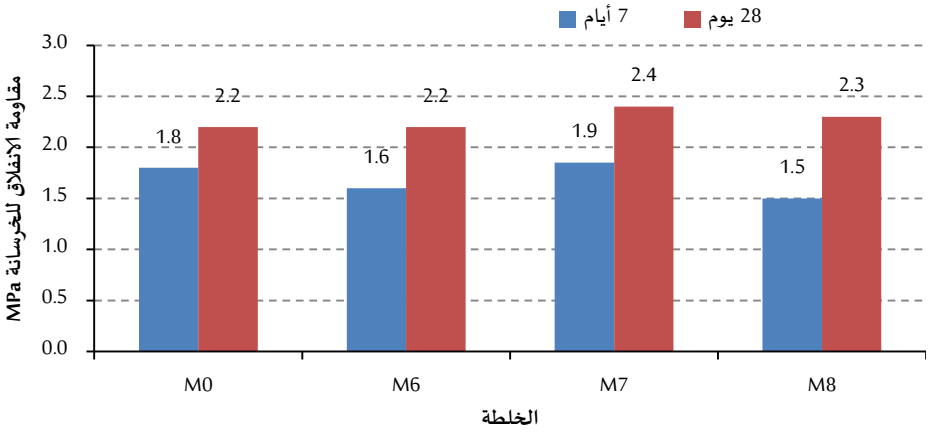
2.3.3. نتائج اختبار مقاومة الشد الغير مباشر للأسطوانات:

الشكل (11) يوضح تأثير نسبة ركام الرخام الخشن على مقاومة الشد الغير مباشر وفق المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS 1881 Part 117, 1983)، ومن خلال الشكل نلاحظ أن مقاومة الشد بعد 7 أيام أعطت نتائج متقاربة بإضافة ركام الرخام الخشن لنسبة رخام 50% وقلت بنسبة 5.55% لنسبة رخام 100%، وقلت بنسبة 11.11% لنسبة 33.33% وعند 28 يوم زادت بنسبة 8.33% من مقاومة الخلطة القياسية لنسبة رخام 50% وزادت بنسبة 4.3% لنسبة رخام 100% بينما قلت بنسبة 13.6% من مقاومة الخلطة القياسية لنسبة رخام 33.33%.



شكل 11. مقاومة الشد الغير مباشر عند إضافة الرخام كركام خشن

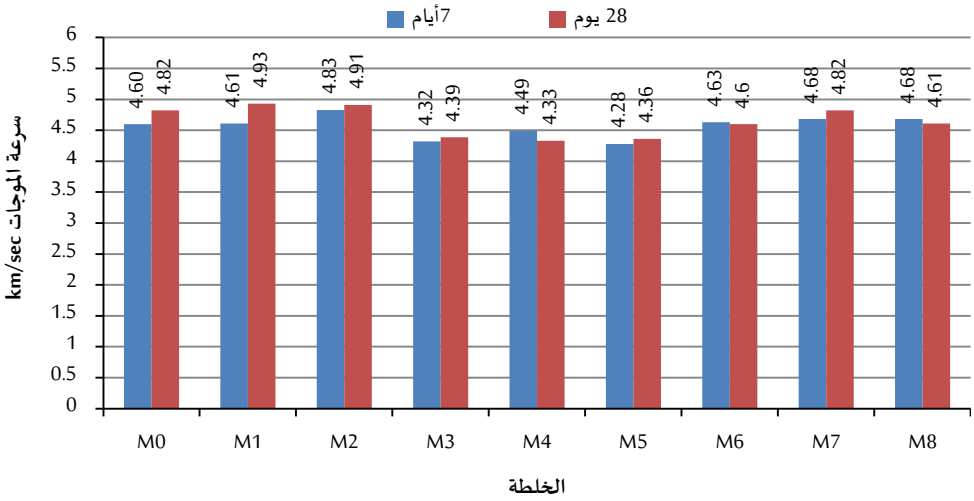
والشكل (12) يوضح تأثير نسبة ركام الرخام الناعم على مقاومة الانفلاق، ومن خلال الشكل نلاحظ أن مقاومة الشد الغير مباشر بعد 7 أيام تتغير بإضافة ركام الرخام الناعم حيث قلت بنسبة 11.11% من مقاومة الخلطة القياسية لنسبة رخام 10% وزادت بنسبة 5.26% لنسبة رخام 30% بينما قلت بنسبة 16.66% لنسبة رخام 50%، وعند 28 يوم عادلت مقاومة الانفلاق مقاومة الخلطة القياسية لنسبة رخام 10% وزادت بنسبة 8.3% لنسبة رخام 30% بينما زادت بنسبة 4.3% لنسبة رخام 50%.



شكل 12. مقاومة الشد الغير مباشر عند إضافة الرخام كركام ناعم

3.3.3. نتائج اختبار الموجات فوق صوتية:

تـم إجـراء الاختبـار بالطريقـة المباشـرة حيـث كانـت المسـافة بـين المرسـل والمسـتقبل 15 سـم، وفـق المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS 1881_ Part 203, 1986) والشكل (13) يوضح نتائج سرعة الموجات الصوتية عند 7 و28 يوم.



شكل 13. سرعة الموجات فوق الصوتية

4. الاستنتاجات

نتائج الاختبارات المعملية المتعلقة بالخصائص الهندسية للركام المدروس أظهرت قبول ركام مخلفات الرخام لتكوين الخلطات الخرسانية العادية، حيث وجد أن قيم التدرج الحبيبي، الوزن النوعي، نسبة الامتصاص، وزن وحدة الحجوم، معاملات التهشيم والصدم والاهتراء، لها تأثير إيجابي مقارنة بالركام المتوفر محليا في مدينة زليتن. هذا من شأنه زيادة مقاومة الخرسانة للأحمال التي تتعرض لها وتحسين مقاومتها لعوامل البري والعوامل الجوية المختلفة وتحمل الخرسانة مع الزمن والتغيرات الحجمية للخرسانة كلها تعتبر محققة بمثل هذه الخصائص التي يتميز بها ركام مخلفات الرخام. كما أن عمليات إدماج ركام مخلفات الرخام كأحد مكونات الخلطة الخرسانية العادية تقود إلى زيادة ملحوظة في المقاومة، حيث تم الحصول على مقاومة 48.5 MPa عند خلطة بنسبة 50% مع الركام المحلي و 46.3 MPa عند خلطة مع الركام المحلي بنسبة 33.33% بعد 28 يوم من المعالجة وهذه المقاومة تعتبر ممتازة جدا مقارنة مع الخلطة المرجعية التي أعطت مقاومة 43.2 في الظروف العادية. واحتواء الخلطة الخرسانية على مسحوق الرخام لم يؤثر سلباً على قابلية التشغيل. وكانت أفضل نسبة إحلال لمسحوق

الرخام بدل الركام الناعم هي 30% حيث قد استوفت هذه الخلطة كل شروط القبول في المواصفات القياسية البريطانية.

المراجع

أولا: قائمة المراجع باللغة العربية

الجولاني، نبيل (2008). *الخصائص الهندسية والتطبيقات الصناعية والإنشائية لمخلفات مصانع قص الحجر*. رسالة ماجستير، كلية الهندسة، جامعة بوليتكنيك، فلسطين.

الطوير، نورالدين (2017). إمكانية استخدام مخلفات ورش الرخام كركام خشن للإنتاج الخرسانة العادية. *المؤتمر الاقتصادي الأول للاستثمار والتنمية في منطقة الخمس*.

المحجوب، محمد (2009). *كتاب الرخام والجرانيت*، مكتبة نور.

مدني، محمد التيجاني إبراهيم (2016). *إنتاج خرسانة إنشائية من مخلفات الرخام كبديل للركام الناعم والخشن*. كلية الهندسة جامعة السودان للعلوم والتكنلوجيا.

المزوغي، فاطمة مسعود؛ الباشا، نوري محمد؛ والصغير، الصغير محمد (2019). الاستفادة من مخلفات مصانع الرخام كمادة بديلة جزئياً عن الإسمنت لإنتاج خرسانة ذاتية الدمك. *المؤتمر الهندسي الثاني لنقابة المهن الهندسية*، الزاوية. 1-14.

المواصفات القياسية الأمريكية رقم (AASHTO_131) طريقة إجراء اختبار معامل الأجزاء للركام الخشن.

المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS 1881 Part 116:1983) طريقة إجراء اختبار مقاومة الضغط للخرسانة المتصلدة.

المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS 1881 Part 117) طريقة إجراء اختبار الشد غير المباشر 1983.

المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS 1881_ Part 203) طريقة إجراء اختبار الموجات فوق الصوتية للمكعبات 1986.

المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS 812 _110) طريقة إجراء اختبار التهشيم للركام الخشن وحدود المواصفات سنة 1995.

المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS 812_110) طريقة إجراء اختبار معامل الصدم للركام الخشن 1995.

المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS 812_1992) خواص الخرسانة للركام الناعم.

المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS 882:2002) طريقة إجراء اختبار التحليل المنخلي للركام الخشن.

المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS EN 1097_6) طريقة إجراء اختبار الوزن النوعي ونسبة الامتصاص للركام الناعم وحدود المواصفات سنة 2013.

المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS:882) حدود النتائج للتحليل المنخلي للركام الناعم والركام الخشن لسنة 1992.

المواصفات القياسية الليبية رقم (294) المياه المستعملة في الخرسانة وحدود المواصفات سنة 1988.

المواصفات الليبية القياسية رقم (340) الإسمنت البورتلاندي لسنة 1997.

النبيل، هادي (2011). *ركام الخرسانة*. جامعة الدار البيضاء.

ثانياً: قائمة المراجع باللغة الإنجليزية

Akbulut H., & Gurer C. (2007). Use of Aggregate Produced from Marble Quarry Waste in Asphalt Pavements. *Building and Environments*, 42(7), 1921-1930.

Corinaldesi V., Giacomo G., & Tarun R. (2010). Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 24(2), 113-117 .

Hebhoub H., Aoun H., Belachia M., Houari H., & Ghorbel E. (2011). Use of Waste Marble Aggregate in Concrete. *Construction and Building Materials*, 25(8), 1167-1171.

Saboy F., Vavier G., & Alexander J. (2007). Use of the Powder Marble By– product to Enhance the Properties of Brick Ceramic. *Construction and Building Materials*, 21(5), 1950 – 1960.

Sudarshan D. K., & Vyas A.K. (2016). Impact of marble waste as coarse aggregate on properties of lean cement concrete.*Case Studies in Construction Materials*, 4(3), 85–92.