



تأثير الاستبدال الجزئي للإسمنت البورتلاندي العادي بمسحوق مخلفات الرخام المحلي علي قابلية التشغيل و مقاومة الضغط للخرسانة

سراج صالح اونيس نسيم صالح اونيس

كلية الهندسة رقدالين / جامعة صبراتة، ليبيا

serag.aonyas@sabu.edu.ly

Effect of Partial Replacement of Ordinary Portland Cement with Local Marble Waste Powder on the Workability and Compressive Strength of Concrete

Siraj Saleh Onis

Naseem Saleh Onis

Faculty of Engineering, Raqdalim/University of Sabratha, Libya

تاريخ الاستلام: 2026/01/05 - تاريخ المراجعة: 2026/01/29 - تاريخ القبول: 2026/02/12 - تاريخ للنشر: 2026 /03/09

المخلص:

يشهد العالم اليوم تطورا كبيرا في تقنيات مواد البناء كتطبيق مفهوم الاستدامة ومجابهة التحديات البيئية المتمثلة في ازدياد كميات المخلفات الناتجة عن البناء والهدم التي يتم التخلص منها حاليا بردمها في المكبات العمومية والذي لا يعد حلا مستداما. احد اهم التقنيات مواد البناء المستدامة هو استغلال مخلفات البناء و الهدم كبديل جزئي لاحد مكونات الخرسانة لانتاج خرسانة خضراء اقتصادية ذات خواص مقاربة للمنتج الاصلي. إن إحدى هذه المخلفات هي مخلفات الرخام التي تتطلب مساحات كبيرة من الأراضي لطمرها، وبالرغم من وجود عدة دراسات على المستوى العالمي حول هذا الموضوع إلا أن هناك وعي قليل على المستوى المحلي حول كيفية الاستفادة من هذه المخلفات داخل الخرسانة.

يهدف هذا البحث إلى دراسة استبدال الإسمنت البورتلاندي بمسحوق الرخام في الخرسانة الاعتيادية نوع 30 ميغا باسكال بنسب (10 و 20 و 30) % ومعرفة التأثير على خواص الخرسانة الصلبة واللينة من خلال اختبارات الهبوط ومقاومة الضغط.

أظهرت النتائج أن مقاومة الضغط عند 28 يوم تعتبر مقبولة حتى نسبة استبدال 10% بمسحوق الرخام حيث سجلت مقاومة ضغط 27.3 ميغا باسكال. وإن استبدال الإسمنت بمسحوق الرخام يزيد من قابلية التشغيل للخرسانة.

أيضا إن استبدال الإسمنت بإحدى مساحيق المخلفات يقلل من تكلفتها بشكل ملحوظ فقد أثبت التجارب إمكانية توفير من كيس إلى كيسين إسمنت لكل متر مكعب خرسانة دون التأثير في خواصها كثيرا.

الكلمات الدالة: مخلفات مواد البناء، الرخام، الخرسانة الخضراء، الاستبدال الجزئي للإسمنت، مواد البناء المستدامة.

Abstract:

The world is witnessing significant advancements in building materials technologies, particularly in the application of sustainability principles and addressing environmental challenges. These challenges include the increasing volume of construction and demolition waste currently disposed of in landfills, which is not a sustainable solution. One of the most important sustainable building materials technologies is the utilization of construction and demolition waste as a partial replacement for concrete components, resulting in economical green concrete with properties similar to the original product. One such waste material is marble waste, which requires large areas of land for disposal. Despite numerous global studies on this topic, there is limited local awareness regarding its potential use in concrete.

This research aims to investigate the replacement of Portland cement with marble powder in standard 30 MPa concrete at percentages of 10%, 20%, and 30%, and to determine the impact on the concrete's fresh and hardened properties through slump and compressive strength tests.

The results showed that the 28-day compressive strength is acceptable up to a 10% replacement with marble powder, achieving a compressive strength of 27.3 MPa. Replacing cement with marble powder increases the workability of concrete.

Furthermore, replacing cement with a waste construction materials powder significantly reduces costs. Experiments have shown that one to two bags of cement can be reduced per cubic meter of concrete without significantly affecting its properties.

Keywords: Construction waste, marble, green concrete, partial cement replacement, sustainable building materials.

المقدمة

تعرّف الاستدامة بأنها القدرة على تلبية متطلبات الحاضر دون المساس بقدرة الأجيال القادمة على توفير احتياجاتهم أيضًا [1]. ويمكن تعريف الاستدامة أيضا بانها هي القدرة على الاحتفاظ بنوعية الحياة التي نعيشها على المدى الطويل وهذا بدوره يعتمد على الاستخدام المسؤول للموارد الطبيعية [2]. فازدياد اعداد السكان بشكل كبير بات يستنزف الموارد الطبيعية كالمعادن والبتروول والفحم وغيرها، مما يؤدي إلى اختلال النظم البيئية بحيث أصبحنا نعيش في عالم يستهلك الكثير من الموارد الطبيعية دون اعادة تدوير للمخلفات. من أهم النقاط التي تم التركيز عليها مؤخرا في الابحاث العلمية المتعلقة بالاستدامة في مجال تكنولوجيا البناء هي كيفية الاستفادة من مخلفات البناء والتقليل من استهلاك الموارد والطاقات الطبيعية. حاليا يتم التخلص من مخلفات البناء برميها على جانبي الطرق او في المقالب العمومية وذلك يمثل اثرا سلبيا على البيئة وتشويهها للمنظر الجمالي للمدن. حيث تقدر كمية مخلفات البناء والهدم المنتجة في ليبيا بـ 3,641,150 طن سنويا [3]، ولذلك ظهرت الحاجة لإيجاد حلول مستدامة لهذه المخلفات بسبب أثرها السلبى على الانسان والبيئة وصعوبة التخلص منها. إن مخلفات الرخام هي إحدى الامثلة على مخلفات البناء والهدم لذلك تم اقتراح استخدام مسحوقي مخلفات الرخام كبديل جزئي للإسمنت البورتلاندي العادي بنسب معينة في الخرسانة الاعتيادية.

إن كمية المخلفات من عملية تقطيع الرخام تصل من 20% إلى 25% من الحجم الكامل لكتل الرخام [4]. ومع زيادة الطلب على الرخام في أعمال البناء فإن هذه المخلفات تحتاج الي مساحات كبيرة من الأراضي للتخلص منها. إن استخدام مسحوق الرخام كبديل للإسمنت في الخرسانة يمكننا من إعادة تدوير هذه المخلفات للحفاظ على البيئة وكذلك يقلل من تكلفة الخرسانة.

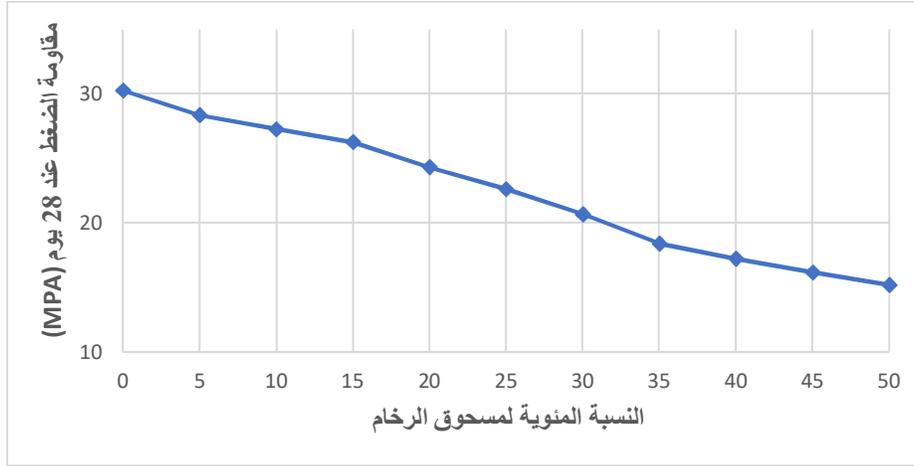
إن صناعة الإسمنت البورتلاندي ينتج عنها حوالي 8% من انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون (CO₂) في العالم الذي يعتبر من اهم غازات الاحتباس الحراري [5]. ومع الطلب المستمر على الخرسانة نتيجة التطور العمراني المرافق للزيادة السكانية ادي الي الحاجة الي انتاج كميات كبيرة من الاسمنت البورتلاندي العادي والتي تقدر عالميا بأكثر من 4 مليار طن سنويا [5]. بينما على المستوى المحلي فإن أكثر من 97% من كل أعمال البناء في ليبيا تستخدم مواد تعتمد على الإسمنت [6]، واستهلاك الإسمنت ازداد بشكل ملحوظ في الفترة من 1992 إلى 2006 من 4 ملايين طن إلى 7 ملايين طن سنويا بسبب مشاريع البناء الكبيرة للدولة [6]. هذا الطلب الكبير على الاسمنت البورتلاندي العادي سيفاقم المشكلة البيئية ويستنزف الطاقات والموارد الطبيعية. وبذلك ظهرت الحاجة الي إيجاد بديل جزئي أو تام للإسمنت يكون مستداما وصديقا للبيئة.

إن استبدال المركب الأهم والأعلى في مكونات الخلطة الخرسانية (الإسمنت) بمسحوق إحدى مخلفات البناء سيكون غالبا ذو جدوى اقتصادية. حيث ان مخلفات البناء متوفرة بكميات كبيرة وذات تكلفة قليلة ويمكن استغلالها في صناعة خرسانة ذات تكلفة اقتصادية. بالرغم من وجود دراسات على المستوى العالمي إلا أنه هناك وعي قليل على المستوى المحلي في إمكانية الاستفادة من مخلفات الرخام كبديل جزئية للإسمنت في الخرسانة. لذلك تم التطرق في هذه الدراسة إلى اكتشاف خصائص الخرسانة الاعتيادية اللدنة والصلبة عند استخدام مسحوق الرخام كبديل جزئي للإسمنت البورتلاندي العادي بمعدلات مختلفة.

الدراسات السابقة:

الباحثون Anwar وآخرون (2015) فحصوا تأثير الاستبدال الجزئي للإسمنت البورتلاندي العادي بمسحوق الرخام بنسب من 5% إلى 50% على مقاومة الضغط للخرسانة عند 28 يوم. حيث تم طحن مخلفات الرخام و تمريرها من منخل 90 ميكرومتر. كان الهدف الرئيسي من التجربة هو دراسة خصائص خرسانة المحتوية علي مسحوق الرخام لإيجاد أفضل نسبة استبدال [7].

مقاومة الضغط التي تم الحصول عليها عند الاستبدال الجزئي للإسمنت بمسحوق مخلفات الرخام تعتبر مقبولة حتى نسبة 20% استبدال وعلل الباحث ذلك بسبب وجود اوكسيد السيليكا في مخلفات الرخام. لاحظ الباحث انخفاض في مقاومة الضغط عند 28 يوم بنسبة حوالي 19% عند نسبة استبدال 20% كما هو موضح بالشكل (1).



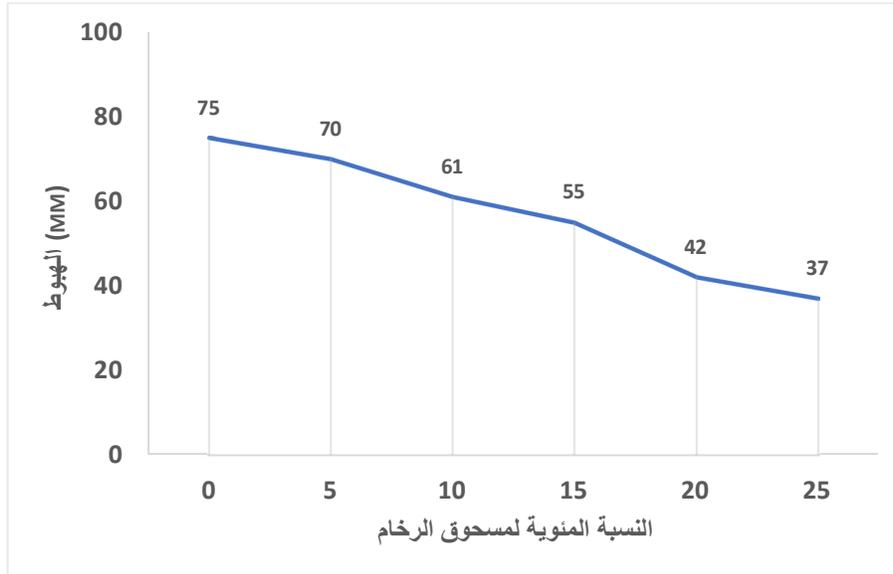
الشكل (1) العلاقة بين مقاومة الضغط للخرسانة عند 28 يوم ونسب استبدال الإسمنت بمسحوق الرخام

الباحث **Vaidevi (2013)** درس الاستبدال الجزئي للإسمنت البورتلاندي بمسحوق الرخام ممر من منخل 0.25 مم بنسب 5% و 10% و 15% و 20% وتأثيره على مقاومة الضغط في الخرسانة عند 14 يوم و 28 يوم [8].

لاحظ الباحث ان استبدال مسحوق الرخام بالإسمنت بنسبة 10% لم يؤثر على مقاومة الضغط بشكل كبير. وأوضح الباحث انه يمكن التوفير في تكلفة الخلطة باستبدال كيس إسمنت في كل 10 أكياس بكيس من مسحوق الرخام دون تأثير ملحوظ في مقاومة الضغط.

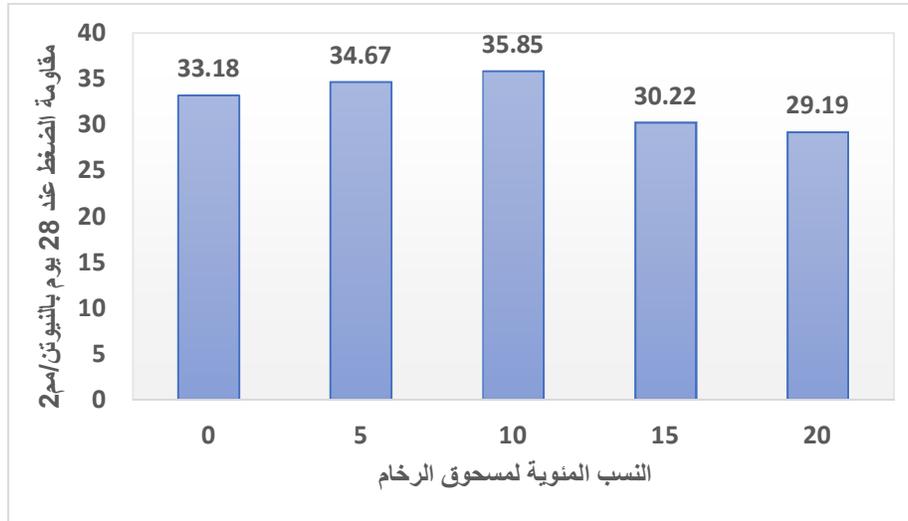
الباحثين **Kumar & Kumar (2015)** درسوا تأثير الاستبدال الجزئي للإسمنت البورتلاندي العادي بمسحوق رخام ممر على منخل 0.9 مم بنسب 5% و 10% و 15% و 20% في الخرسانة على مقاومة الضغط للخرسانة و قابلية التشغيل [9].

لاحظ الباحثين انه بزيادة نسبة استبدال مسحوق الرخام من 0% إلى 20% يصبح الخليط أكثر صلابة ويحدث نقص في قيم الهبوط كما هو موضح بالشكل (2). ولاحظ الباحثين أيضا ان درجة التشغيل تلائم المواصفة القياسية للخرسانة العادية.



الشكل (2) قيم الهبوط لخرسانة محتوية على نسب مختلفة من مسحوق الرخام

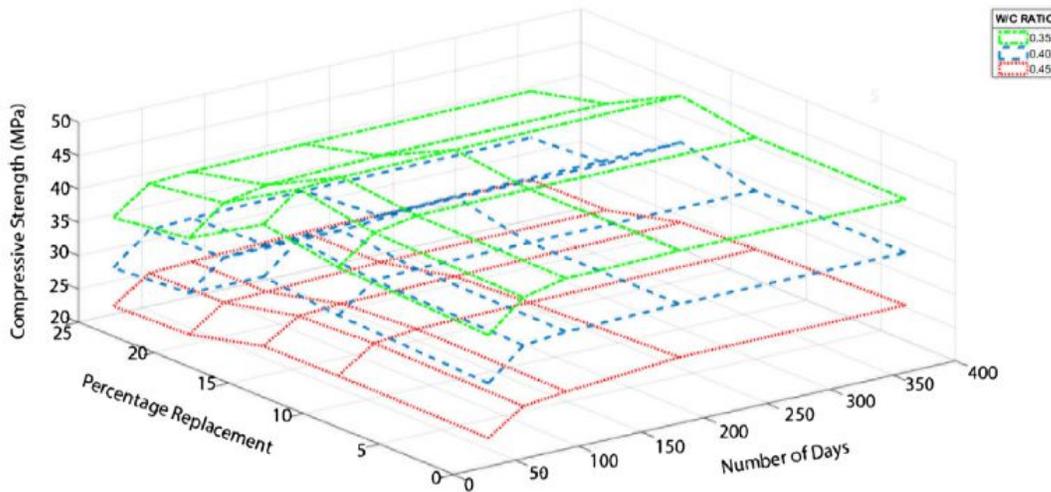
اظهرت النتائج ان مقاومة الضغط للخرسانة تزداد حتى نسبة 10% استبدال بينما تنخفض مقاومة الضغط عند زيادة نسبة الاستبدال عن 10% كما هو موضح بالشكل (3).



الشكل (3) مقاومة الضغط لخرسانة محتوية على نسب مختلفة من مسحوق الرخام

الباحثون Singh وآخرون (2018) درسوا التأثير الطويل المدى لخاصية مقاومة الضغط للخرسانة المحتوية على مسحوق الرخام. حيث قام الباحثون باستبدال الاسمنت البورتلاندي العادي بمسحوق الرخام المرمر من منخل 300 مايكرومتر بنسب (10% و 15% و 20% و 25%) و قاموا باستخدام نسب ماء إلى أسمنت مختلفة وهي (0.35 و 0.40 و 0.45). وقام الباحثون بدراسة التأثير طويل المدى عن طريق اختبار مقاومة الضغط لعينات الخرسانة المحتوية على مسحوق الرخام عند (28 و 56 و 90 و 180 و 360) يوم وذلك بعد معالجة جميع العينات بالماء لمدة 28 يوم و تعريض العينات لعوامل المناخ حيث تتراوح درجة الحرارة بين 0° شتاء و 47° صيفا [10].

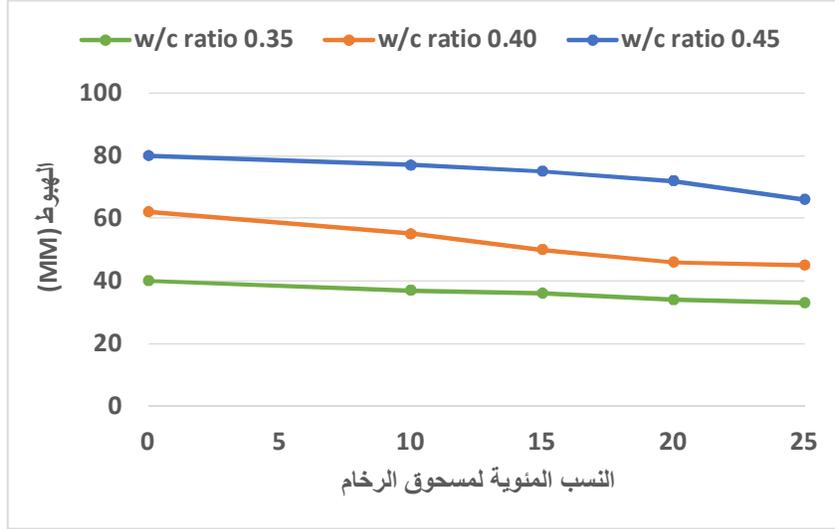
لاحظ الباحثين بناء على النتائج المتحصل عليها ان الخرسانة المحتوية على رخام اعطت نتائج جيدة الي غاية نسبة استبدال 15% عند 28 يوم حتى 360 يوم كما هو موضح بالشكل (4). ولاحظ الباحثين تأثير ايجابي لإضافة مسحوق الرخام على قيم مقاومة الضغط في المدى الطويل (عند 360 يوم) وذلك بسبب الزيادة في الكثافة للخليط.



الشكل (4) العلاقة بين عمر الخرسانة ومقاومة الضغط للخرسانة ونسب استبدال الإسمنت بمسحوق الرخام

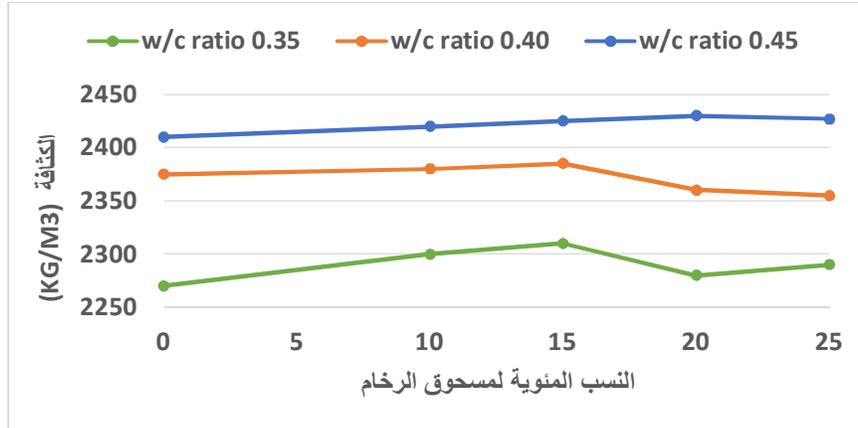
الباحث Singh وآخرون (2017) درسوا تأثير الاستبدال الجزئي للإسمنت البورتلاندي العادي بمسحوق الرخام المرمر من منخل 300 مايكرومتر في الخرسانة بنسب 10% و 15% و 20% و 25% و بنسب ماء إلى إسمنت 0.35 و 0.40 و 0.45 علي قابلية التشغيل و الكثافة و مقاومة الضغط عند 7 ايام و 28 يوم و 56 يوم [11].

لاحظ الباحثون أن الهبوط يقل بزيادة نسبة الاستبدال الجزئي للإسمنت بمسحوق الرخام وذلك بسبب وجود نسبة عالية من المواد الناعمة في مسحوق الرخام حيث انها تقوم بزيادة كمية الماء المطلوبة للخليط للحصول على درجة التشغيل المناسبة. اوصى الباحثون بإضافة إضافات تخفيض الماء للحصول على هبوط أعلى من 100م.



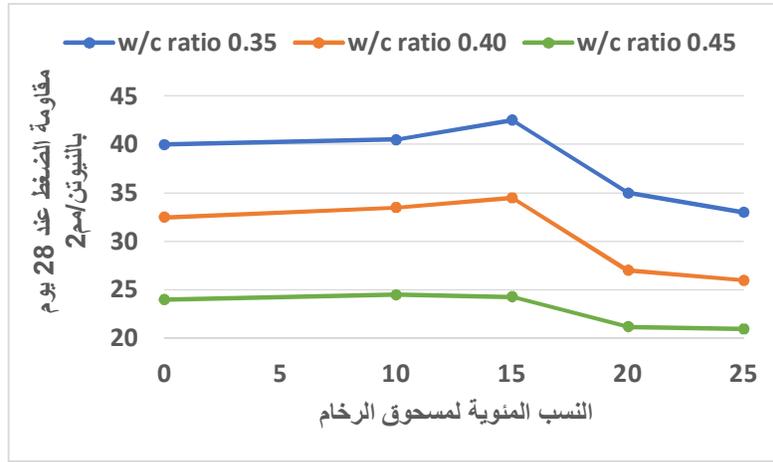
الشكل (5) العلاقة بين الهبوط ونسب استبدال الإسمنت بمسحوق الرخام

لاحظ الباحثون أنه لا يوجد تأثير ملحوظ لمسحوق الرخام على قيم الكثافة حيث بلغت نسبة الزيادة القصوى 1.5%. وكذلك لاحظوا أن نسب الماء إلى إسمنت الأقل (0.35 و 0.40) قد وفرت خليط أكثر كثافة مقارنة مع نسبة الماء إلى إسمنت الأعلى (0.45).



الشكل (6) العلاقة بين كثافة الخرسانة ونسب استبدال الإسمنت بمسحوق الرخام

لاحظ الباحثون أن مقاومة الضغط تزداد حتى نسبة 15% استبدال إسمنت بمسحوق الرخام بينما تنخفض عند نسب استبدال 20% و 25% كما هو موضح بالشكل (8-1). كذلك لاحظوا أنه كلما قلت نسبة الماء إلى الإسمنت من 0.35 إلى 0.45 كلما زادت مقاومة الضغط المتحصل عليها عند 7 أيام و 28 يوم و 56 يوم.



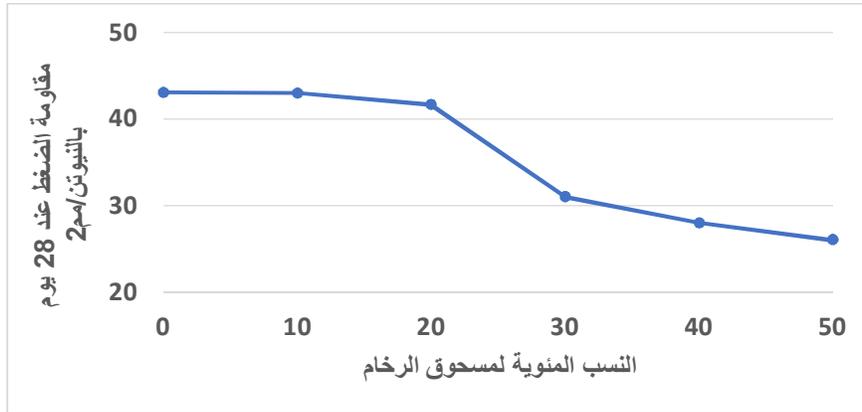
الشكل (7) العلاقة بين مقاومة الضغط للخرسانة عند 28 يوم ونسب استبدال الإسمنت بمسحوق الرخام

الباحثون Vardhan وآخرون (2015) درسوا الخواص الميكانيكية لعجينة الإسمنت المحتوية على مسحوق الرخام بديلا جزئيا للإسمنت البورتلاندي العادي بنسب من 10% إلى 50% [12].

لاحظ الباحثون زيادة في زمن الشك الابتدائي والنهائي كلما زادت نسبة مسحوق الرخام في العجينة الإسمنتية. زمن الشك الابتدائي والنهائي للخليط المرجعي كان 114 دقيقة و 229 دقيقة على التوالي. بينما زمن الشك الابتدائي والنهائي لعجينة الإسمنت المحتوية على 10% من مسحوق الرخام كان أعلى بـ 31.58% و 9.17% على التوالي بالمقارنة مع الخليط المرجعي. علل الباحثون هذه الزيادة في زمن الشك النهائي للخلطات المحتوية على مسحوق الرخام بسبب تأخر في عملية الإماء.

لاحظ الباحثون أن مقاومة الضغط المتحصل عليها عند 28 يوم كانت مقاربة للخلطة المرجعية عند نسبة 10% استبدال ومن ثم انخفضت قيم مقاومة الضغط للنسب من 20% الي 50%. كما هو موضح بالشكل (8).

أستنتج الباحثون أنه يمكن استخدام مسحوق الرخام حتى نسبة 10% استبدال جزئي بالإسمنت دون التأثير على خاصية التشغيلية ومقاومة الضغط للخليط الناتج. أشار الباحثون الي ان الانخفاض في المقاومة عند زيادة نسبة مسحوق الرخام ينتج بسبب أن مسحوق الرخام يعمل كحشو ولا يلعب أي دور ملحوظ في عملية الإماء.



الشكل (8) العلاقة بين مقاومة الضغط للخرسانة عند 28 يوم ونسب استبدال الإسمنت بمسحوق الرخام

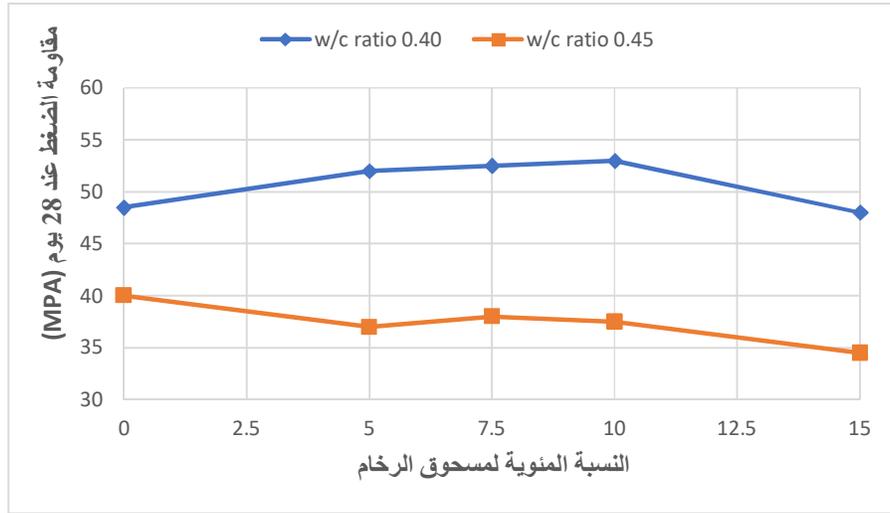
الباحث Aliabdo وآخرون (2014) درسوا تأثير استخدام مسحوق الرخام بديلا جزئيا للإسمنت البورتلاندي في الخرسانة بنسب استبدال 5% و 7.5% و 10% و 15% و بنسب ماء إلي إسمنت 0.40 و 0.50 و تم استخدام مسحوق الرخام يمر من منخل رقم 200 (#75ميكرومتر) [13].

لاحظ الباحثون عدم وجود اختلاف واضح في متطلبات الماء للعينات المصنوعة بالإسمنت المحتوي على مسحوق الرخام والعينات المرجعية للإسمنت البورتلاندي العادي. لاحظ الباحثون عدم وجود تغير ملحوظ في زمن الشك الابتدائي والنهائي لعينات المونة الإسمنتية المستبدلة جزئياً حتى نسبة استبدال 10% بالمقارنة بالخلطة المرجعية.

وقام الباحثون بدراسة مقاومة الضغط عند 7 أيام و 28 يوم و 56 يوم للخرسانة المحتوية على مسحوق الرخام. لاحظ الباحثون أن مقاومة الضغط تنخفض قليلاً لجميع العينات المحتوية على الرخام بديلاً للإسمنت.

عند استخدام نسبة ماء الي اسمنت 0.5, لاحظ الباحثون انخفاض في مقاومة الضغط عند 28 يوم بنسبة 7% و 4% و 5% و 14% لكل من نسب الاستبدال 5% و 7.5% و 10% و 15% على التوالي.

بينما عند نسبة ماء الي اسمنت 0.40, فإنه حتى نسبة استبدال 10% مقاومة الضغط تزيد قليلاً بالمقارنة مع الخليط المرجعي. فسر الباحثون هذه الزيادة لتأثير تعينة المسامات بمسحوق الرخام الذي يحسن من خصائص المنطقة المحيطة بالركام. وعلى النقيض من ذلك هناك نقص في مقاومة الضغط للخرسانة المحتوية على 15% مسحوق رخام.



الشكل (9) العلاقة بين مقاومة الضغط للخرسانة عند 28 يوم ونسب استبدال الإسمنت بمسحوق الرخام

ملخص الدراسات السابقة

- اعتبر اغلب الباحثين ان استخدام مسحوق الخرسانة كبديل جزئي للإسمنت يعطي نتائج غير مقبولة من ناحية مقاومة الضغط.
 - عند زيادة نعومة جزيئات مسحوق المخلفات يتم الحصول على نتائج أفضل بالنسبة لمقاومة الضغط وتنخفض قابلية التشغيل للخليط الناتج.
 - يوجد تباين بين الدراسات في تأثير الاستبدال الجزئي للإسمنت بمسحوق الرخام علي قابلية التشغيل.
 - زيادة في زمن الشك الابتدائي والنهائي عند الاستبدال الجزئي للإسمنت بمسحوق الرخام.
 - كلما قلت نسبة الماء الي الاسمنت في المدى من 0.35 الي 0.5 كلما تحصلنا على مقاومة ضغط أفضل عند الاستبدال الجزئي للإسمنت بمسحوق الرخام.
- لكن تبقى بعض النقاط الغامضة التي تبحث الدراسة عن اجوبة لها وهي:
- مدي مطابقة النتائج المتحصل عليها من مخلفات مواد هدم وانشاء من مصادر مختلفة (خارج ليبيا) مع مخلفات الانشاء والهدم في السوق المحلي.
 - تأثير الاستبدال الجزئي للإسمنت بمسحوق مخلفات الرخام على مقاومة الضغط والنسبة المثلي للاستبدال.
 - تأثير الاستبدال الجزئي للإسمنت بمسحوق مخلفات الرخام على القابلية التشغيل.
- مشكلة البحث

تكمن مشكلة البحث في أن وضع مخلفات الرخام في المكبات يسبب مشاكل بيئية ويعد حلا غير مستدام وأن تكلفة مواد البناء في ازدياد مستمر بسبب ارتفاع الطلب ونقص المواد الخام. فيجب استغلال هذه المخلفات لحماية البيئة والحصول على مردود اقتصادي دون التأثير في خواص الخرسانة.

أهمية البحث

تتمثل أهمية البحث في دراسة امكانية الاستفادة من مخلفات الرخام في صناعة الخرسانة وذلك باستخدامها كبديل جزئي للإسمنت البورتلاندي العادي مع الاحتفاظ بخصائص الخرسانة من مقاومة ضغط وقابلية تشغيل والتقليل من تكلفة الخرسانة عن طريق الاستبدال الجزئي لأغلي مكون فيها الإسمنت بمواد غير مرغوب بها (مخلفات).

أهداف البحث

تهدف الدراسة الي:

1. ايجاد بديل جزئي مستدام يحل المشاكل البيئية ومشكلة استنزاف الموارد الطبيعية والطاقات المصاحبة لإنتاج الاسمنت البورتلاندي العادي المستخدم في صناعة الخرسانة.
2. حل مشكلة تكس مخلفات الرخام ذلك بإعادة تدويرها في صناعة الخرسانة كبديل جزئي للإسمنت.

مواد الخلطة

تم إجراء اختبارات على المواد المستخدمة في الخلطة والتأكد من أنها ضمن حدود المواصفات، كذلك تم التأكد من عدم وجود فروقات بين الخلطات الخرسانية عن طريق تثبيت التدرج للركام الخشن ضمن حدود المواصفة واستخدام ركام ناعم ذو تدرج جيد لكل الخلطات وذلك لبيان تأثير مسحوق الرخام على الخلطة. تم تصميم الخلطة بالطريقة الأمريكية (ACI 211) [14] بدون استخدام إضافات بحيث تم تقسيمها الي 7 خلطات حيث كانت الخلطة الأولى مرجعية وتم استبدال الإسمنت في الخلطات الأخرى بمسحوق الرخام بنسبة 10% و 20% و 30% لكل مسحوق وتم إجراء اختبار الهبوط للخرسانة الطرية لكل الخلطات. بعد ذلك تم إعداد ثلاث مكعبات لكل مجموعة وأخذ متوسط مقاومة الضغط عند 28 يوم.

1. الإسمنت

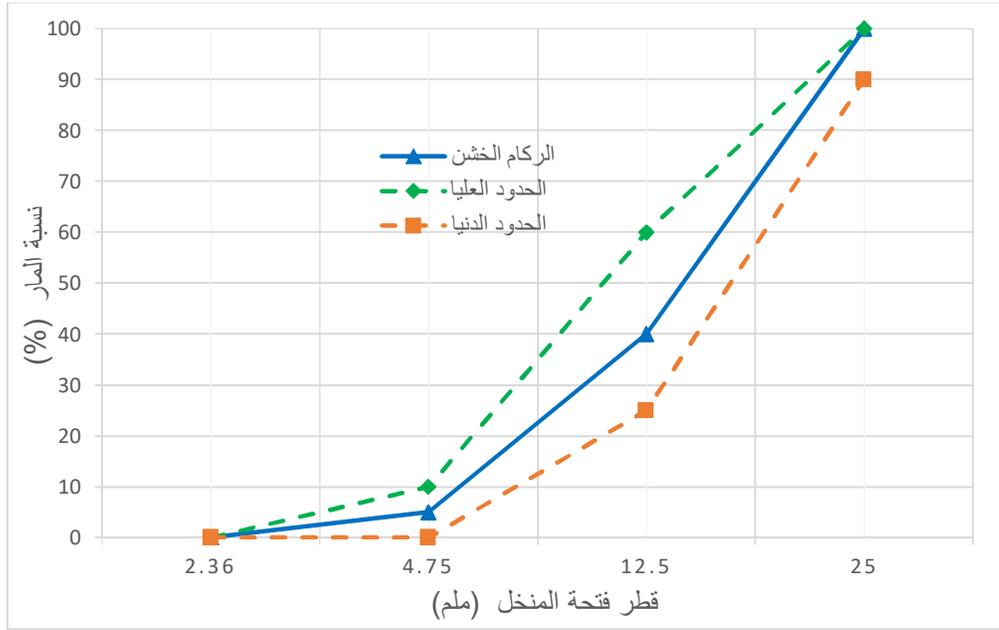
الإسمنت المستعمل في جميع الخلطات هو إسمنت بورتلاندي عادي نوع إسمنت القيروان 42.5N المطابق للمواصفات القياسية الليبية رقم 340 : 2009 [15] و المواصفات القياسية الأمريكية ASTM C150 [16].



الشكل (10) شكل الإسمنت المستخدم في الخلطات الخرسانية

2. الركام الخشن

تم استخدام ركام من منطقة رأس اللفعة، ذو مقياس اعتيادي أكبر (19mm) وتم عمل تدرج للركام وتقسيمه إلى أحجام تتراوح من 2.36mm – 4.75mm – 12.5mm – 25mm وثابت لكل الخلطات على النحو التالي:

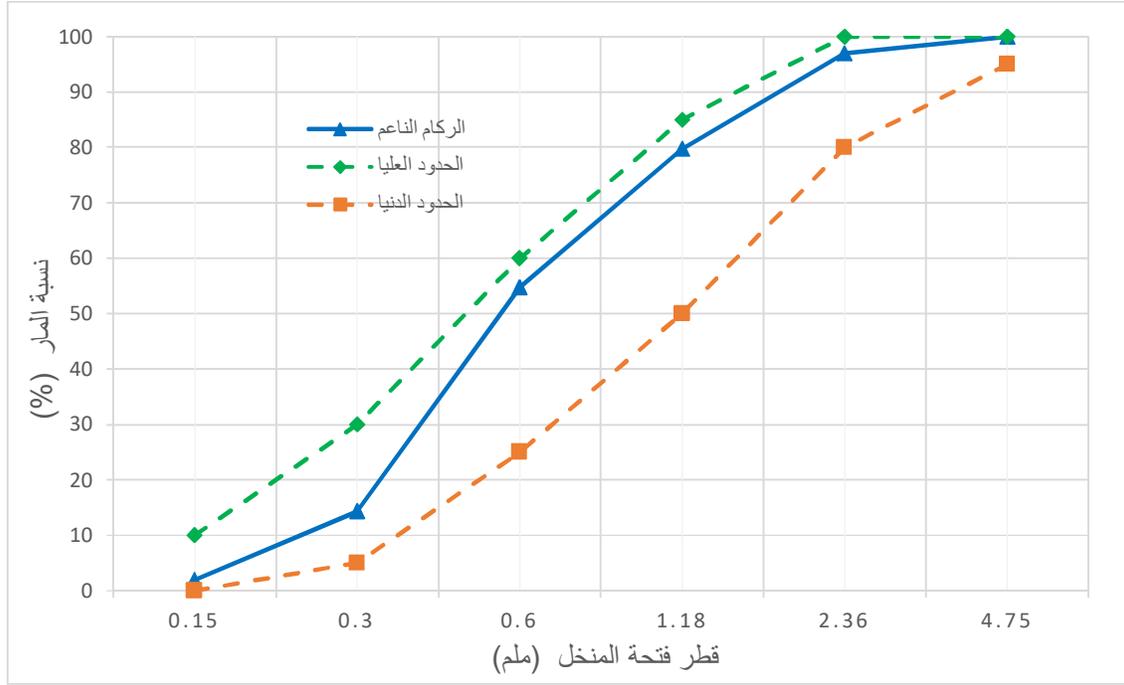


الشكل (11) منحنى التدرج للركام الخشن



الشكل (12) يوضح عينة الإسمنت والركام الخشن المتدرج للخلطة

3. الركام الناعم



الشكل (13) منحنى التدرج للركام الناعم

4. مسحوق الرخام

تم استخدام رخام أبيض اللون متوفر في السوق المحلي ومستورد من جمهورية مصر العربية وتم طحنه وتميره على منخل 250 مايكرومتر قبل الخلط في الخرسانة الشكل (14) يوضح شكل مسحوق الرخام.



الشكل (14) يوضح شكل مسحوق الرخام

5. ماء الخلط

أستخدم في تنفيذ جميع الخلطات الخرسانية ماء صالح للشرب خالي من الشوائب والمواد العضوية.

تصميم الخلطة الخرسانية

يعتبر تصميم الخلطة من أهم الخطوات المستخدمة في تحديد كمية المواد الأساسية الداخلة في تكوين الخرسانة، وقد تم في هذه الدراسة استخدام الطريقة الأمريكية لتصميم الخلطات الخرسانية بحيث تأمن مقاومة انضغاط (30Mpa) بعمر 28 يوم وذات هبوط من (75 – 100mm) وباستخدام مواد محلية و بدون استخدام إضافات. الجدول التالي يبين اوزان مكونات الخلطة المتحصل عليها.

الجدول 1 الأوزان المواد المستخدمة في كل خلطة

مسخوق الرخام Kg/m ³	نسبة الاستبدال %	ركام ناعم Kg/m ³	ركام خشن Kg/m ³	الإسمنت Kg/m ³	الماء L	W/C	الخلطة
–	–	736.7	1023.3	380	205	0.54	المرجعية R
38	10	736.7	1023.3	342	205	0.54	M1
76	20	736.7	1023.3	304	205	0.54	M2
114	30	736.7	1023.3	266	205	0.54	M3

الخلط وصب ومعالجة الخرسانة

تعتبر إجراءات تجهيز وصب المواد وخلطها مهمة جدا بالنسبة للخلطات الخرسانية، حيث أن التفاوت في أعمال الخلط والصب وغيرها من الإجراءات يترتب عنه اختلاف في الخواص اللدنة والمتصلدة للخرسانة.

1. خلط الخرسانة

تعتبر من أهم مراحل تجهيز الخلطة، حيث تم خلط الخرسانة يدويا وتجهيز كمية 3 مكعبات خرسانية (150×150×150) ملم لكل خلطة ويوضح الشكل (15) عملية الخلط



الشكل (15) يوضح عملية الخلط للخرسانة

2. صب الخرسانة

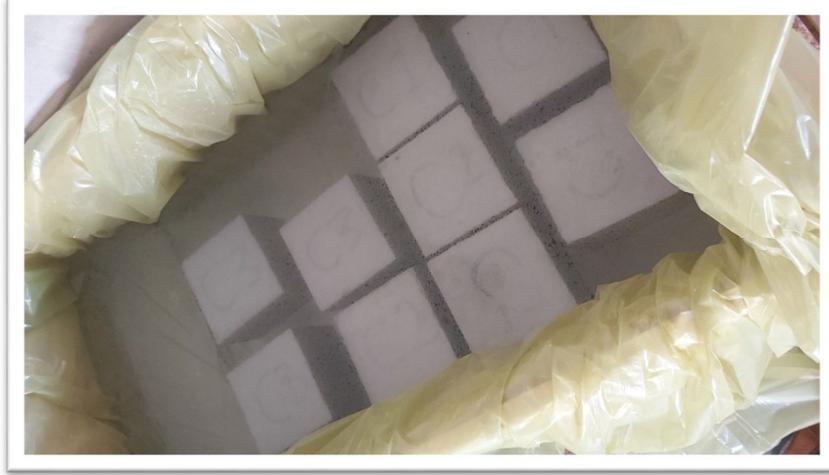
بعد الانتهاء من اختبارات الخرسانة اللدنة تم صب الخرسانة في القوالب القياسية من الفولاذ المكعبات ذات أبعاد (150×150×150) ملم مع مراعاة دهنها بالزيت ليسهل فكها في اليوم التالي. حيث يتم صب الخرسانة على ثلاث طبقات مع دكها بالقضيب القياسي بمعدل 25 ضربة لكل طبقة ثم يسوي سطح العينات وتترك يوم كامل (24 ساعة) في درجة حرارة المعمل لتتصلد. ثم نفاك القوالب وتعالج بغمرها في الماء إلي حين اختبارها، و يوضح الشكل (16) العينات الخرسانية بعد صبها في القوالب.



الشكل (16) يوضح عملية دهن القوالب وشكل العينات بعد صبها

3. معالجة الخرسانة

عولجت جميع العينات بطريقة الغمر بالماء في حوض خاص بالمعالجة، مع ترك مسافة صغيرة بين كل مكعب لضمان غمره بالكامل بالماء من جميع الجهات وتم تركها في درجة حرارة المعمل الي حين اختبارها.



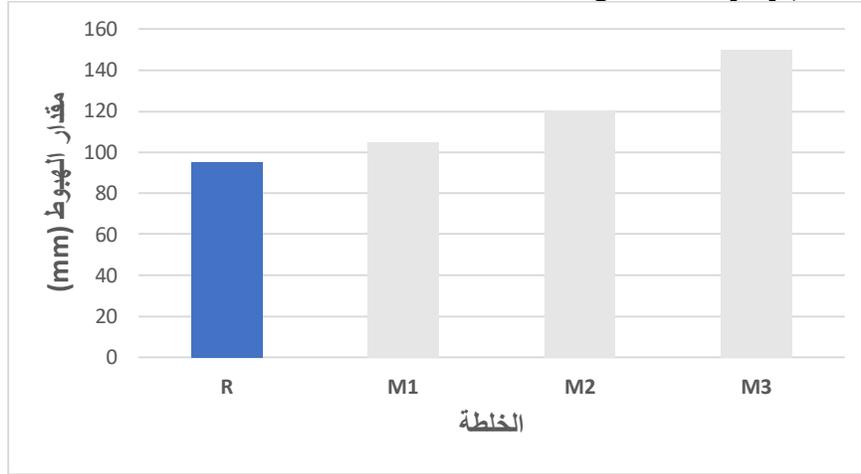
الشكل (17) يوضح حوض المعالجة

عرض النتائج

سيتم في هذا الفصل عرض ومناقشة النتائج للاختبارات المعملية التي تم الحصول عليها أثناء تنفيذ البرنامج العملي.

1. نتائج اختبار الهبوط للخلطات الخرسانية

تم إجراء اختبار الهبوط للخلطات الخرسانية التي اجريت في المعمل وكانت النتائج كما موضحة بالشكل (18). يتضح أن الخلطة المرجعية المصممة قد حققت الهبوط المطلوب بواقع 95 ملم وأن جميع الخلطات كانت داخل حدود المواصفة الأمريكية (ACI 211) [14] للهبوط لأنواع البناء المختلفة.

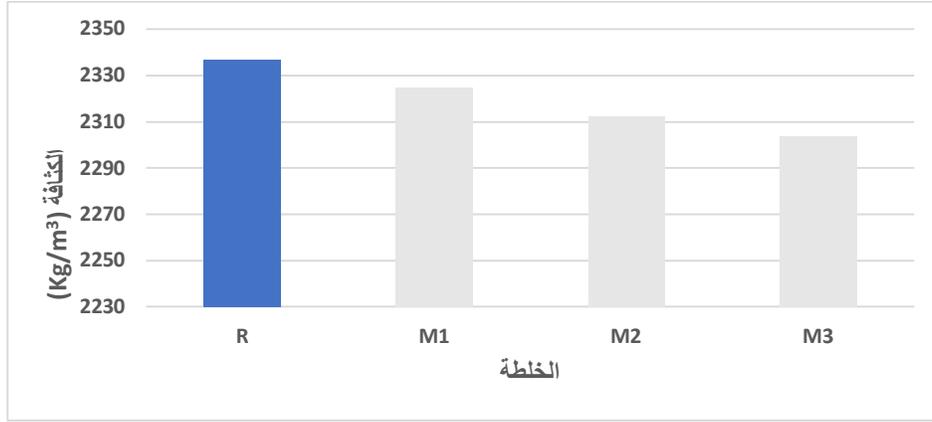


الشكل (18) نتائج اختبار الهبوط للخلطات المرجعية

يمكننا ملاحظة أن زيادة نسبة الاستبدال للإسمنت بمسحوق الرخام تسبب في زيادة الهبوط في الخلطة. فقد كان الهبوط 105 مم و 120 مم و 150 مم لكل من نسب الاستبدال 10% و 20% و 30% على التوالي. وكان الهبوط للخلطة المرجعية 95 ملم. قد يرجع هذا التحسن في قابلية التشغيل إلى ببطء التفاعل البوزولاني لمسحوق الرخام بالمقارنة مع تفاعل الإماعة لدي الإسمنت مما يسمح بتوفر الماء للخلطة لمدة أطول.

2. نتائج اختبار الكثافة

الشكل التالي يوضح متوسط نتائج الكثافة للمكعبات الخرسانية عند 28 يوم.

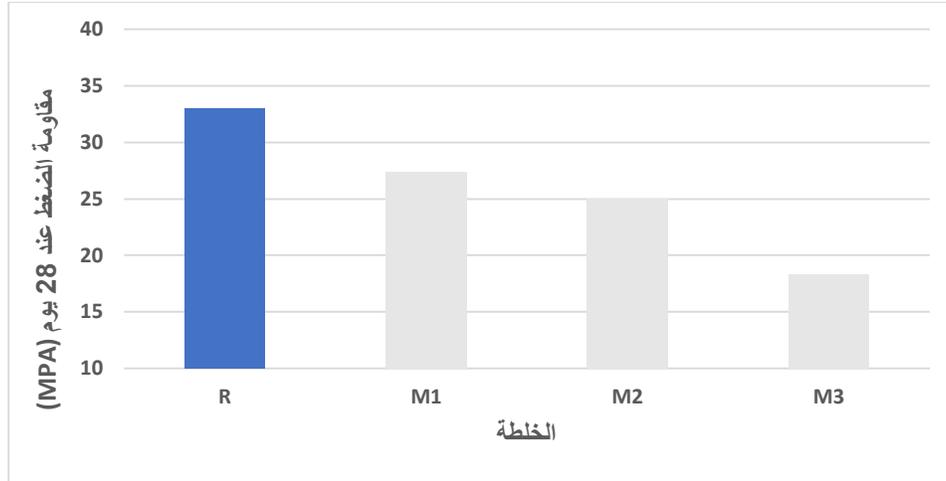


الشكل (19) متوسط نتائج الكثافة للمكعبات الخرسانية عند 28 يوم

نلاحظ وجود انخفاض طفيف في الكثافة عند الاستبدال بمسحوق الرخام.

3. نتائج اختبار مقاومة الضغط

نفذ هذا الاختبار طبقا للمواصفة الأمريكية (ASTM C-39) [17] على مكعبات قياسية ذات أبعاد (150×150×150) مم عند 28 يوم بعد الصب. يوضح الشكل (20) نتائج اختبار مقاومة الضغط لجميع الخلطات.



الشكل (20) نتائج اختبار مقاومة الضغط للخلطات الخرسانية

نلاحظ وجود انخفاض في مقاومة الضغط بنسبة 17% عند استبدال الإسمنت بالرخام بنسبة 10%، كذلك يستمر الانخفاض في المقاومة بنسبة 24% عند نسبة استبدال 20%، ثم حدوث انهيار كبير في المقاومة بنسبة 44.5% عند استبدال الإسمنت بمسحوق مخلفات الرخام بنسبة 30%. هذا الانخفاض في المقاومة عند زيادة نسبة مسحوق الرخام يشير أن مسحوق الرخام يعمل كحشو ولا يلعب أي دور ملحوظ في عملية الإماء.

التكلفة والتطبيق العملي

إلى جانب الفائدة البيئية فإن التقليل في تكلفة الخرسانة هو السبب الأهم لاستعمال مسحوق الرخام بديلا للإسمنت. ووفق النتائج العملية اتضح إمكانية الاستخدام العملي للخلطة المحتوية على 10% مسحوق رخام (M1). وعند مقارنة تكلفة الخلطات بتكلفة الخلطة المرجعية يتضح إمكانية التوفير في تكلفة الإسمنت في الخلطة الخرسانية بنسبة 10%.

التوصيات و الاستنتاجات

1. الاستنتاجات

من خلال النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة نستنتج الآتي:

1. أعطت مكعبات الخرسانة للخلطة المرجعية نتائج جيدة بمتوسط مقاومة ضغط أعلى ب 10% من المقاومة التصميمية للخلطة. وذلك لمطابقة المواد المستخدمة المواصفات وعدم وجود فراغات تعشيش في المكعبات.
2. زيادة في قابلية التشغيل للخرسانة بزيادة نسبة استبدال مسحوق الرخام بالإسمنت وذلك بسبب أن مسحوق الرخام يبطئ عملية التميؤ للخرسانة مما يوفر الماء للخليط لوقت أطول.
3. مقاومة الضغط للخرسانة المحتوية على مسحوق الرخام بديلاً للإسمنت تعتبر مقبولة حتى نسبة 10% وتنخفض بشدة عند زيادة نسبة الاستبدال عن ذلك.
4. لا يؤثر مسحوق الرخام على كثافة الخرسانة بشكل ملحوظ.
5. إن استعمال مسحوق مخلفات الرخام كبديل جزئي للإسمنت في صناعة الخرسانة يساهم في تقليل كمية المخلفات في البيئة حيث أن هذه المخلفات تتكسد بكميات كبيرة تصل إلى آلاف الأطنان سنوياً.
6. إن استعمال مسحوق مخلفات الرخام كبديل جزئي للإسمنت في الخرسانة يخفض من تكلفة إنتاجها ويعتبر ذو مردود اقتصادي.

2. التوصيات

بناء على ما تقدم يمكننا التوصية بالآتي:

1. إجراء اختبارات باستخدام نعومة أقل لمسحوق الرخام وذلك لأن حجم الجزيئات يلعب دور كبير في تعبئة الفراغات بين حبيبات الركام الذي يعد دور الإسمنت بالدرجة الأولى. وأنه كلما صغر حجم هذه الجزيئات كلما زادت مقاومة الضغط في الخلطة المستبدلة.
2. إجراء اختبارات باستخدام نسب ماء إلى إسمنت مختلفة. لأن الماء يعتبر المكون الرئيسي في عملية الإماء للإسمنت وإتمام التفاعل البوزولاني لمسحوق الرخام.
3. دراسة تأثير المخلفات على هذه الخرسانة عالية المقاومة.
4. اختبار تأثير الملدنات على الخلطة المحتوية على مسحوق الرخام.
5. الدمج بين أنواع مختلفة من المخلفات بنسب مختلفة.
6. اختبار التأثير طويل المدى لخرسانة مسحوق الرخام.

المراجع

1. في 20 آذار 1987، عرفت لجنة بريندتلاند التابعة لمفوضية الأمم المتحدة "التنمية المستدامة بأنها التنمية التي تفي باحتياجات الوقت الحاضر دون المساس بقدرة الأجيال المقبلة على تلبية احتياجاتها الخاصة."
2. Sustainability Theory and Conceptual Considerations: A Review of Key Ideas for Sustainability, and the Rural Context – November 2016.
3. Ashraf Ali (2016) Estimating Construction and Demolition (C&D) Waste Arising in Libya.
4. Hassan A. M. Abdelkader, et al. (2021) Influence of Waste Marble Dust on the Improvement of Expansive Clay Soils.
5. مقال لجامعة بيل في ديسمبر 2018 بعنوان "صناعة الإسمنت، واحدة من أكبر مصادر انبعاثات غاز CO₂. تتعهد بتخفيف الغازات الدفينة".
6. Ngab (2007) investigated the challenges that impede the development of the construction industry in Libya.
7. Anwar, et al. (2015) Replacement Of Cement By Marble Dust And Ceramic Waste In Concrete For Sustainable Development.
8. Vaidevi C (2013) Study on marble dust as partial replacement of cement in concrete.
9. Ranjan Kumar and Kishor Kumar (2015) Partial Replacement of Cement with Marble Dust Powder.
10. Manpreet Singh, et al. (2018) Long term strength and durability parameters of hardened concrete on partially replacing cement by dried waste marble powder slurry.
11. Manpreet Singh, et al. (2017) An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry.
12. Kirti Vardhan, et al. (2015) Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement.
13. Ali A. Aliabdo, et al. (2014) Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete.

14. American Concrete Institute. ACI 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. Reapproved 2002, American Concrete Institute, 2002
15. Libyan National Center for Standardization and Metrology. Libyan Standard No. 340:2009: Portland Cement. Tripoli: Libyan National Center for Standardization and Metrology, 2009.
16. ASTM International. ASTM C150/C150M: Standard Specification for Portland Cement. ASTM International, 2023.
17. ASTM International. ASTM C39/C39M: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, 2023.