

استخدام بعض مخلفات البناء كإحلال جزئي من الاسمنت

اسم ولقب المؤلف الأول*¹ حسام زايد أبوجناح

¹ القسم المدني (إنشاءات) ، المعهد العالي للعلوم والتقنية الخمس، الخمس، ليبيا

* البريد الإلكتروني (للباحث المرجعي): hussamapojnah@gmail.com

Using some construction waste as a partial replacement for cement

First Author Husam Zayid Aboujanah¹

¹ Department civil Engineering, Higher Institute of Science and Technology Al-Khamis , Al-Khamis, Libya

Received: 30-09-2025; Revised: 10-10-2025; Accepted: 31-10-2025; Published: 25-11-2025

الملخص:

سيتم استخدام بعض مخلفات البناء كإحلال جزئي من الإسمنت وذلك لغرض الاستفادة من هذه المخلفات وتقليل تكلفة الخلطة الخرسانية وذلك بتقليل العنصر الأساسي في الخلطة الخرسانية والأعلى ثمناً وهو الإسمنت ، وسيتم معرفة مدى تأثير إضافة هذه المخلفات (مسحوق الاجر - غبار الرخام) كإحلال جزئي من الإسمنت على الخواص الميكانيكية للخرسانة عادية المقاومة (مقاومة الضغط - مقاومة الشد - مقاومة الانحناء) ، وفي هذا البحث سيتم عمل ثلاث خلطات خرسانية ذات مقاومات عادية وبمقاومات مختلفة وذلك عن طريق استخدام نسب (w/c) مختلفة للخلطة المرجعية وكذلك استخدام نسب (w/b) مختلفة لكل من الخلطات المحتوية على مسحوق الاجر كإحلال جزئي من الإسمنت و الخلطات المحتوية على غبار الرخام كإحلال جزئي من الإسمنت للحصول على مقاومات مختلفة لا تتجاوز (40Mpa) ، وسيتم تحديد كل من مقاومة الضغط ومقاومة الشد غير المباشر ومقاومة الانحناء لكل من الخلطات الثلاث ومقارنتها مع بعضها.

من خلال الدراسات التي تم إجرائها في هذا البحث أتضح ان كل من مقاومة الضغط ومقاومة الانحناء تقل عند استخدام مسحوق الاجر بنسبة 10% من وزن الاسمنت ، وتزداد مقاومة الشد غير مباشر عند نسبة مماثلة لمسحوق الاجر من وزن الاسمنت كما أن النقصان لكل من مقاومة الضغط ومقاومة الانحناء يقل بنقصان (w/b) ، تزداد كل من مقاومة الضغط ومقاومة الانحناء ومقاومة الشد غير مباشر عند استخدام غبار الرخام كإحلال جزئي من وزن الاسمنت بنسبة 10% وتعطي أفضل النتائج عند نسبة (w/b = 0.44) .

الكلمات المفتاحية: مسحوق الاجر، غبار الرخام ، نسبة الماء الي الاسمنت (w/c)، نسبة الماء الي المواد الاسمنتية (w/b)، مقاومة الضغط ، مقاومة الشد ، مقاومة الانحناء .

Abstract:

Some of the construction waste will be used as a partial replacement for cement in order to benefit from this waste and reduce the cost of the concrete mixture by reducing the main and most expensive element in the concrete mixture, which is cement , The effect of adding these wastes (brick powder - marble dust) as a partial replacement for cement on the mechanical properties of normal strength concrete (compressive strength - tensile strength - bending strength) will be known , In this research, three concrete mixtures with normal strengths and with different strengths will be made by using different (w/c) ratios for the reference mixture, as well as using different (w/b) ratios for each of the mixtures containing brick powder as a partial replacement of cement and the mixtures containing marble dust as a partial replacement of cement to obtain different strengths not exceeding 40 MPa, The compressive strength, indirect tensile strength, and flexural strength of each of the three mixes will be determined and compared. Through the studies conducted in this research, it was found that both compressive strength and flexural strength decrease when using brick powder at 10% of the cement weight , The indirect tensile strength increases at a similar ratio of brick powder to the weight of cement, and the decrease in both compressive strength and flexural strength decreases with a decrease in (w/b). The compressive strength, flexural strength, and indirect tensile strength increase when marble dust is used as a partial replacement of the weight of cement by 10%, and the best results are given at a ratio of $w/b = 0.44$.

Keywords: Brick powder, marble dust, water-cement ratio (w/c), water-cement ratio (w/b), compressive strength, tensile strength, flexural strength.

مقدمة:

تعتبر مخلفات البناء من المواد التي يتم التخلص منها برميها دون الاستفادة منها , وفي هذا البحث سيتم استخدام بعض هذه المخلفات كإحلال جزئي من مادة الاسمنت لتقليل من تكلفة الخلطة الخرسانية والتقليل من العنصر الاساسي والاغلى ثمنا وهو الاسمنت وكذلك للاستفادة من هذه المخلفات و عدم رميها , حيث تم استخدام هذه المخلفات (مسحوق الاجر - مسحوق غبار الرخام) بنسب معينة مختلفة وتم اختيار النسبة الافضل التي لا تقلل من مقاومة الخرسانة لضغط بحيث يتم مقارنتها بالخلطة المرجعية (لا تحتوي على إضافات) , والنسب هي 10% - 15% - 20% من محتوى الاسمنت في الخلطة , بحيث تم إضافة هذه النسب واختيار النسبة الافضل من بين هذه النسب و مقارنتها بالخلطات المرجعية التي تم تصميمها بمقاومة مستهدفة 32.5MPa ونسبة $w/c=0.5$, وبعها سيتم اختيار النسبة الافضل من بين هذه النسب من حيث تأثيرها على مقاومة الضغط , وكانت النسبة الافضل هي 10 % لكل من مسحوق الاجر وغبار الرخام وسيتم استخدامها كإحلال جزئي من الاسمنت , بعد ذلك سيتم تصميم خلطات خرسانية بمقاومات مختلفة تبدأ من 17MPa و لا تتعدى 40MPa للخلطات المرجعية , وبعدها سيتم إضافة نسبة 10% من مسحوق الاجر وغبار الرخام كلا على حدى كإحلال جزئي من الاسمنت لنفس الخلطات السابقة وسيتم مقارنتها بالخلطات المرجعية ودراسة مدى تأثير هذه الإضافات على الخواص الميكانيكية للخرسانة مع تغير المقاومة في كل

خلطة , والخواص الميكانيكية التي سيتم إيجادها هي (مقاومة الضغط - مقاومة الشد غير المباشر - مقاومة الانحناء).

مشكلة البحث:

تعتبر مخلفات البناء (مخلفات الرخام - مخلفات طوب الاجر - مخلفات خبث الحديد - مخلفات الزجاج وغيرها) من المخلفات التي يمكن إعادة تدويرها واستخدامها في مجال صناعة الخرسانة وذلك لتقليل من التلوث الناجم من هذه المخلفات , كما يمكن استخدامها كإحلال جزئي من الاسمنت أو الركام الناعم أو الخشن , كما يمكن إضافتها كمادة مألئة , وكل هذه الاستخدامات بإمكانها التقليل من تكلفة المواد المستخدمة في الخلطة الخرسانية وتقلل من انتاج بعض المواد مثل الاسمنت وبالتالي تقلل من انبعاث المواد الملوثة في الهواء والبيئة , كما ان اغلب الأبحاث السابقة تستخدم في خلطة خرسانية بمقاومة معينة مثلا 35MPa بعد ذلك تقوم بإضافة الاضافات بنسب معينة ولكن في هذا البحث قمنا بدراسة تأثير هذه الاضافات مع تغير في المقاومة المستهدفة لكل خلطة , حيث تم معرفة أي النسب أفضل ما بين (10%-15%20%) لكلا من مسحوق الاجر وغبار الرخام , حيث كانت النسبة التي لها اقل تأثير بالنسبة لمسحوق الاجر هي 10% , أما النسبة التي تعطي أفضل النتائج لمسحوق الاجر هي 10% , في هذا البحث قمنا باستخدام هذه النسبة 10% وقمنا بإضافتها كإحلال جزئي من الاسمنت في الخرسانة ذات المقاومات مختلفة تبدأ من 17MPa ولا تتجاوز 40MPa ومقارنتها بالخلطات المرجعية لمعرفة مدى تأثير هذه النسبة على خواص الخرسانة مع تغير مقاومة الضغط المستهدفة في كل خلطة , والهدف من هذا هو الحصول على نتائج دقيقة تحقق معرفة تأثير هذه الاضافات بشكل أكثر دقة .

الدراسات السابقة :

نشرت العديد من المجالات موضوع استخدام مخلفات البناء كإحلال جزئي من الاسمنت ومنها مجلة العلوم والتقنية في عددها الخامس والعشرون - أبريل 2021 , حيث استخدم الباحث أرحيم حسين وفريقه مخلفات الرخام في الخلطات الخرسانية , واستخدم مخلفات الرخام المطحون كبديل جزئي من الاسمنت وكانت النسب المستخدمة (5% , 10% , 20%) وأستنتج الباحث رحيم أن مقاومة الضغط كانت مقاربة للمقاومة المرجعية (49.2Mpa) , وكانت النتائج هي (45.8 , 42.3 , 36.5) على التوالي .

وكذلك نشرت مجلة الاكاديمية للعلوم الاساسية والتطبيقية - مارس 2023 دراسة استخدام فضلات الزجاج كبديل جزئي من الاسمنت في الخلطات الخرسانية , وكانت النسب (3% , 6% , 9% , 12%) من وزن الاسمنت في الخلطة ولوحظ انخفاض ملحوظ في مقاومة الضغط في جميع النسب , حيث تقدر نسبة انخفاض المقاومة من 6% الي 36% من مقاومة الضغط المرجعية .

وفي بحث نشره المؤتمر الوطني السابع لمواد البناء والهندسة الانشائية حيث تم استخدام غبار الرخام كإحلال جزئي من الاسمنت واستنتج أن مقاومة الضغط تزيد بنسبة 3% من المقاومة المرجعية عند استخدام مسحوق الاجر بنسبة 5% من وزن الاسمنت في الخلطة الخرسانية .

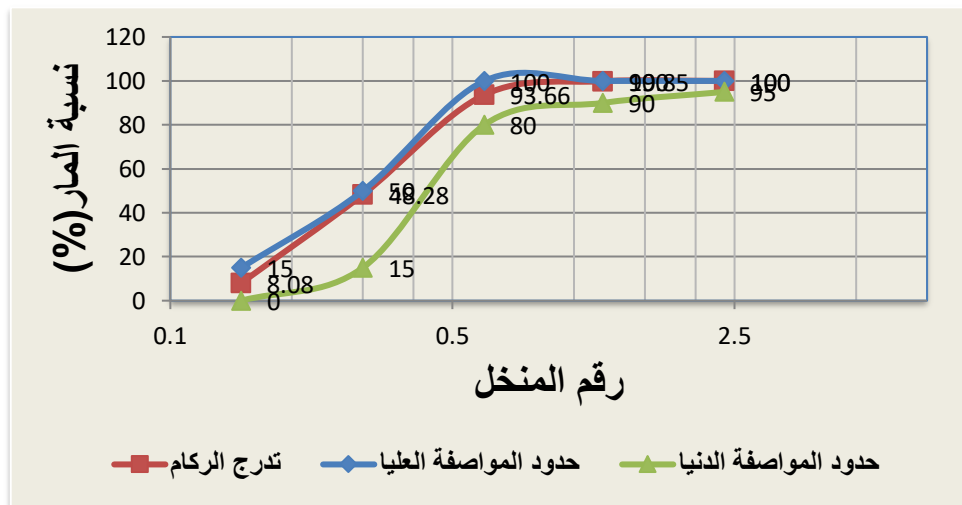
أهداف البحث :

عمل خلطات خرسانية عادية (مرجعية) ومقارنتها بالخلطات التي تحتوي على غبار الرخام بنسبة 10% وكذلك مقارنتها بالخلطات التي تحتوي على مسحوق الاجر بنفس النسبة ومعرفة مدى تأثير هذه الاضافات على خواص الخرسانة الميكانيكية (مقاومة الضغط - مقاومة الشد غير المباشر - مقاومة الانحناء) ,حيث سنقوم بدراسة هذه الاضافات مع تغير نسبة w/b للحصول على مقاومات مختلفة .

المواد المستخدمة:

1- الركام الناعم:

(BS882-1992)^[1] تم استخدام الركام الناعم الموجود بمحاجر منطقة زليتن وقد تم إجراء التحليل المنخلي له مطابق للمواصفات البريطانية (1992



شكل (1) يوضح تدرج الركام الناعم حسب المواصفات البريطانية (BS882-1992).

تم اجراء عدد من الأختبارات على الركام الناعم والنتائج كانت ضمن الحدود المسموح بها في المواصفات البريطانية (BS882-1992) كما هو موضح في الجدول (1).

جدول رقم (1) يوضح نتائج الاختبارات المعملية على الركام الناعم:

الاختبار	نتيجة الاختبار	حدود المواصفات البريطانية BS882:1992
الوزن النوعي	2.65	$2.75 > S.G > 2.5$
معايير النعومة	2.47	-
نسبة الامتصاص	1.29 %	$3 > \%$
نسبة الرطوبة	0.17 %	-

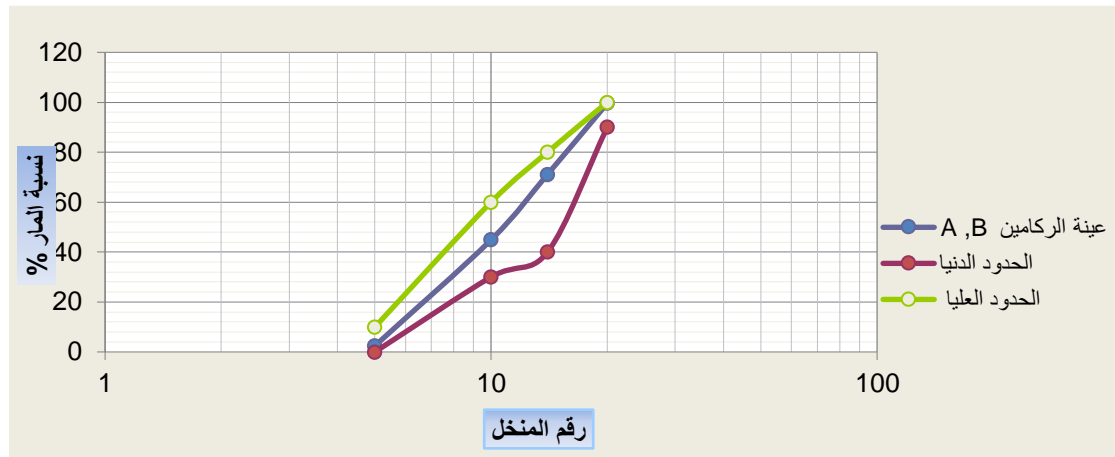
2- الركام الخشن :

هناك نوعان من الركام الخشن من حيث طريقة الإنتاج (تفجير - حرث) وفي هذا البحث تم استخدام ركام التفجير ومصدره منطقة العلوص حيث تم استخدام مقاسين مختلفين من الركام بمقاس اعتباري (mm) $A=10\text{mm} - B=15$ و تم دمجهما مع بعض للحصول على ركام يقع ضمن حدود المواصفات البريطانية (BS882:1992)^[1].

جدول (2) يوضح نتائج الدمج بين الركامين (A,B)

مقاس المنخل mm	0.6A	0.4B	الركام الخليط C	حدود المواصفات البريطانية (BS882:1992)
20	59.66	40	99.66	100-90
14	31.18	39.92	71.11	80-40
10	5.44	39.48	44.92	60-30
5	0.12	1.93	2.05	10-0

بعد الدمج كما هو موضح في الشكل رقم (2) نلاحظ أن الركام الخشن مطابق للمواصفات البريطانية (BS882:1992)^[1].



شكل (2) يوضح تدرج الركام الخشن الخليط حسب المواصفات البريطانية (BS882:1992).

جدول رقم (3) يوضح نتائج الاختبارات المعملية على الركام الخشن:

الاختبار	القيمة المتحصل عليها	حدود المواصفات البريطانية - BS882 1992
الوزن النوعي	2.67	$2.75 > S.G > 2.5$
نسبة الامتصاص	2.16%	$3\% >$
نسبة الرطوبة	1.73%	-
الوزن الحجمي kg/m^3	1443.8	-
معامل التهشيم	23.8%	$25\% >$
معامل الصدم	20.2%	$45\% >$

3- الماء:

بالنسبة للماء تم استخدام الماء الصالح للاستخدام اليومي الذي مصدره مياه بلدية الخمس والذي تم اختباره في مركز البحوث الصناعية بتاجوراء ، والجدول (4) يوضح التركيب المعدني للماء المستخدم في إعداد الخلطات الخرسانية ومدى مطابقته للمواصفات الليبية رقم 294 لسنة 1988 ^[2].

جدول (4) يوضح التركيب المعدني للماء المستخدم في الخلطات الخرسانية.

الاختبار	النتيجة (mg/L)	الحدود العليا للمواصفات الليبية رقم 294 لسنة 1988
محتوى الكبريتات (SO ₄)	117.69	1000
محتوى الكلوريدات (Cl)	290.7	500
الأملاح الذائبة (T.D.S)	880	2000
الكربونات والبيكربونات (Ca,CO ₃)	175	1000
الأس الهيدروجيني PH	7.96	8-6

4- الاسمنت:

تم استخدام الاسمنت البورتلاندي العادي (Type I) الذي مصدره مصنع لبدة التابع للشركة الأهلية للإسمنت , والجدول (5) يوضح الخواص الفيزيائية , تم الحصول على هذه النتائج من الإدارة المشرفة على الإنتاج بالمصنع وكانت جميع هذه النتائج مطابقة للمواصفات البريطانية (BS12-1996)^[3] وتقع ضمن الحدود المسموح بها. الجدول رقم (5) يوضح الخواص الفيزيائية للإسمنت.

الاختبار	النتيجة المتحصل عليها	المواصفات البريطانية BS12-1996
زمن الشك الابتدائي	2:45 ساعة	لا يقل عن 45 دقيقة
زمن الشك النهائي	4:28 ساعة	لا يزيد عن 10 ساعات
النعومة	3297	لا تقل عن 2500
التمدد	0.6 مم	لا يزيد عن 10 مم
الوزن النوعي	3.15	-

جدول رقم (5) يوضح الخواص الفيزيائية للإسمنت .

بعض الإضافات التي تم استخدامها كإحلال جزئي من الاسمنت :

1- مسحوق الطوب الاحمر: Clay Red Bricks Powder

يعتبر طوب الاجر من أقدم مواد الإنشاء التي عرفها الإنسان حيث يصنع من خلال حرق الطين إلى درجات مرتفعة تتراوح ما بين 500 - 600 درجة مئوية , ويتم استخدام كميات كبيرة من هذا الطوب المصنع محليا أو المستورد كأحد مواد البناء مصاحبا لتطور النهضة العمرانية في مجال البناء , وان عدم اتباع الطرق السليمة في التصنيع وسوء التخزين والمناولة أدى إلى ظهور كميات من المخلفات في الساحات المفتوحة وبشكل عشوائي على جوانب الطريق الزراعية , كما في الشكل (3) مما أضر بالبيئة وخلق اماكن ملائمة

لحياة الزواحف والقوارض والحيوانات الضارة كما أصبحت أماكن استفزاز لدى الناس ولهذه الاسباب أجريت العديد من الدراسات والبحوث في الآونة الاخيرة على إعادة استخدام هذه المخلفات وإدخالها مرة أخرى في



دورة مواد البناء لتقليل ارهاق البيئة^[4].

الشكل (3) يوضح مخلفات الاجر بجانب بعض الطرق و المزارع

2- غبار الرخام: Marble Dust Powder

في العصور القديمة وحت الآن يعتبر الرخام شائع الاستخدام كمادة من مواد البناء , ولكن التخلص من المخلفات أثناء قص وصقل الرخام يعتبر من المشاكل البيئية في جميع أنحاء العالم اليوم , ومع ذلك يمكن استخدام هذه المخلفات بطريقة ناجحة واقتصادية من أجل تحسين بعض الخصائص في الخرسانة الطازجة وبعض خصائص المونة الإسمنتية^[5].



الشكل (4) يوضح غبار الرخام

حيث يتم انتاج حوالي العديد من الملايين من الأطنان من مادة غبار الرخام من المحاجر في جميع انحاء العالم , والرخام عبارة عن صخور متحولة ناتجة من تحول الحجر الجيري النقي (CaCO_3 100%) , وتمثل نفايات الرخام 20% من استخراج الرخام وترك هذه النفايات في البيئة مباشرة يمكن أن يسبب مشاكل بيئية , كما أن مسحوق الرخام لديه مواد بوزلانية فعالة ومواد جيدة لإنتاج الخرسانة و في الوقت الحاضر تعد واحدة من أعظم المواد المستخدمة في مجال الخرسانة المسلحة, وفي دراسة قام بها (Manju et al.) (Pawar) تدل على أن زيادة نسبة غبار الرخام كإحلال جزئي من الاسمنت تزيد من مقاومة الخرسانة , كما توصل الى أنه تزداد مقاومة الضغط للخرسانة عند إضافة غبار الرخام الي نسبة تصل الي 12.5 % كإحلال جزئي من الاسمنت ومن تم تبدأ في التناقص وكذلك مقاومة الشد و بالتالي فإن النسبة المثالية من غبار الرخام 12.5 % من وزن الاسمنت سواء كان لمقاومة الشد أو مقاومة الضغط [5].

البرنامج العملي :

1- تم استخدام مسحوق مخلفات مادة الآجر كإحلال جزئي من وزن الإسمنت حيث تم عمل ثلاث خلطات خرسانية تجريبية بنسب مختلفة (10%- 15% - 20% من وزن الاسمنت) ومقارنتها بالخلطة التصميمية التي تم تصميمها بمقاومة مستهدفة (32.5 MPa) وبنسبة (w/c=0.5) , حيث تم عمل ثلاث مكعبات بمقاس (150mm×150mm×150mm) لكل خلطة وأخذ متوسط القراءات ومقارنتها بالخلطة المرجعية , كما تم إجراء بعض الاختبارات للخواص الفيزيائية لمسحوق الآجر مثل الوزن النوعي وقيمته (2.18) , نسبة الامتصاص وقيمتها (6%). والجدول (6) يوضح النتائج المتحصل عليها للخلطات الخرسانية .

جدول (6) يوضح المقاومات المختلفة للخلطات التجريبية.

الخلطات الخرسانية	المقاومات المختلفة (f_{cu} (MPa)	نسبة انخفاض المقاومة %
الخلطة المرجعية	37.8	-----
خلطة الآجر 10%	30.56	19.15
خلطة الآجر 15%	25.67	32
خلطة الآجر 20%	22.8	40

من خلال النتائج المتحصل عليها من الجدول (6) نلاحظ أن جميع النسب التي تم استعمالها تقلل من مقاومة الضغط للخرسانة إذا ما قورنت بالخلطة المرجعية ولكن أقل نسبة تؤثر في المقاومة هي 10% لذلك سيتم اختيار هذه النسبة وسيتم دراسة الخصائص الميكانيكية الأخرى للخرسانة (مقاومة الشد غير المباشر - مقاومة الانحناء) ومدى تأثير إضافة مسحوق الأجر بنسبة 10% على هذه الخصائص الميكانيكية للخرسانة.

2- تم عمل خلطات تجريبية حيث تم استخدام غبار الرخام بنسب مختلفة كإحلال جزئي من وزن الاسمنت (10%-15% -20%) ومقارنتها بالخلطة التجريبية التي تم تصميمها بمقاومة (32.5MPa) وبنسبة (w/c=0.5) ومن خلال هذه الخلطات التجريبية سيتم اختيار النسبة الأمثل من بين هذه النسب , وذلك من خلال عمل ثلاث مكعبات خرسانية بمقاس (150mm×150mm×150mm) لقياس مقاومة الضغط لكل خلطة وأخذ متوسط هذه القراءات , وبعد اختيار النسبة الأمثل سيتم استخدامها في هذا البحث ودراسة تأثير غبار الرخام على الخواص الميكانيكية الأخرى (مقاومة الشد غير المباشر - مقاومة الانحناء), كما تم تمرير غبار الرخام من المنخل الذي مقاسه (0.15mm), والجدول (7) يوضح النتائج المتحصل عليها لمقاومة الضغط للخلطات المختلفة .

جدول (7) يوضح المقاومات المختلفة للخلطات التجريبية.

الخلطات الخرسانية	المقاومات المختلفة f_{cu} (MPa)	نسبة الزيادة في المقاومة %
الخلطة المرجعية	37.8	-----
خلطة غبار الرخام 10%	39.7	5
خلطة غبار الرخام 15%	34.39	9-
خلطة غبار الرخام 20%	32.88	13-

من خلال الجدول (7) نلاحظ أن أفضل نسبة لغبار الرخام عند استخدامه كإحلال جزئي من الاسمنت هي 10% .

سيتم اختيار النسبة كإحلال جزئي من غبار الرخام وكذلك مسحوق الأجر هي 10% لأنها تعتبر النسبة الأفضل حسب النتائج السابقة , بعد ذلك سيتم تثبيت هذه النسبة وإضافتها للخلطة الخرسانية التي سيتم تصميمها بنسب w/c مختلفة ومعرفة تأثير هذه النسبة على الخصائص الميكانيكية للخرسانة مع تغير محتوى الماء الي الاسمنت الذي سيتنجم مقاومات مختلفة .

تصميم الخلطات الخرسانية :

يعتبر تصميم الخلطة الخرسانية عبارة عن عملية لحساب نسب خلط الإسمنت ، والركام (الصغير والكبير) والماء لإنتاج خرسانة ذات خصائص محددة بأقل تكلفة ممكنة.

وفي هذا البحث تم اعتماد الطريقة الأمريكية في تصميم الخلطات الخرسانية ، حيث تم استخدام خلطة بسعة 0.1m^3 حيث تمت عملية الخلط بوضع الركام الخشن والركام الناعم في الخلطة ووضع نصف كمية الماء ونشغل الخلطة لمدة 30 ثانية وبعدها يوضع الاسمنت ويوضع الماء المتبقي وتشغل الخلطة لمدة 30 ثانية أخرى بحيث يكون زمن الخلط دقيقة واحدة^[6]، والجدول رقم (8) يوضح تصميم الخلطات الخرسانية المختلفة.

جدول رقم (8) يوضح تصميم الخلطات الخرسانية لكل متر مكعب بدون اضافات خلطات مرجعية.

رقم الخلطة	المقاومة المستهدفة بعد 28 يوم MPA	الإسمنت (Kg/m^3)	الماء (Kg/m^3)	W/C	الركام الناعم (Kg/m^3)	الركام الخشن (Kg/m^3)
(1)	17	300	205	0.68	899	941
(2)	22	311.55	205	0.65	887.45	941
(3)	27.5	356.52	205	0.57	842.48	941
(4)	32.5	405.94	205	0.5	793.06	941
(5)	37.5	460.67	205	0.44	738.33	941

اختبار الخرسانة الطازجة :

1- اختبار الهبوط:

هو اختبار لقياس خاصية قوام الخرسانة وذلك بتعيين مدى هبوطها بعد تشكيلها على هيئة مخروط ناقص إما في المعمل أو في موقع التنفيذ وقد تم إجراء اختبار الهبوط لجميع الخلطات الخرسانية و تم مقارنتها بالهبوط التصميمي للمواصفات (ASTM C143/C143)^[7] والشكل (5) يوضح هذا الاختبار.



الشكل (5) توضح إختبار الهبوط لأحد عينات الخلطة الخرسانية

اعداد العينات :

تم إعداد 135 عينة لثلاث خلطات خرسانية موزعة ما بين مكعبات و أسطوانات ومناشير:

- 45 مكعب ($150 \times 150 \times 150$ ملم) لقياس مقاومة الضغط.
- 45 أسطوانة (بقطر 150 ملم وبارتفاع 300 ملم) لقياس مقاومة الشد غير المباشر .
- 45 منشور ($400 \times 100 \times 100$ ملم) لقياس مقاومة الانحناء .

اختبارات الخرسانة المتصلبة:

1- تمت معالجة جميع العينات في الماء لمدة 28 يوم وثم إجراء اختبار الضغط علي هذه العينات بمقاس ($15 \times 15 \times 15$) سم وكان معدل التحميل 6 كيلو نيوتن / ثانية وكانت جميع النتائج المتحصل عليها مقارنة للمقاومات التصميمية ,تم اجراء الاختبار على العينات وفقا للمواصفات البريطانية BS 1881 Part (1983: 116)^[8], والشكل (6) يوضح عينة اختبار الضغط بعد الانهيار.



شكل (6) يوضح عينة اختبار الضغط

2- اختبار مقاومة الشد الغير مباشر :

تعتبر طريقة الشد غير المباشر أفضل من طريقة الشد المباشر لأن الشد المباشر يؤدي الي حدوث إجهادات عند أطراف العينة وهذا يؤثر على النتائج المتحصل عليها , وفي هذا البحث تم إجراء اختبار الشد الغير مباشر للعينات الأسطوانية بارتفاع 30سم وقطر 15سم عند عمر 28 يوم من تاريخ الصب وفقا للمواصفات الأمريكية (ASTM C494-96)^[9] و الشكل (7) يوضح عينة اختبار الشد بعد إجراء الاختبار عليها.



شكل (7) يوضح اختبار الشد غير المباشر بعد انهيار العينة

3- اختبار الانحناء :

تم إجراء اختبار الانحناء بتحميل عينة الاختبار في نقطتين **Pure Bending** لأن ذلك يجعل جزء الكرة الذي يحدث بداخله الكسر معرض لعزم خالص دون تواجد قص في ذلك الجزء الأمر الذي يجعل الكسر نتيجة مقاومة الانحناء فقط وتعتبر نتائج الاختبار عن مدى تأثر الخرسانة بالانحناء وهذا أفضل من تحميل العينة في نقطة واحدة , حيث تم إجراء الاختبار وفقا للمواصفات البريطانية (BS1881:Part118 :1983)^[10] وفي هذا البحث تم إجراء اختبار الانحناء على العينات بمقاس 10*10*40 سم عند فترة زمنية 28 يوم , والشكل (8) يوضح انهيار العينة اثناء اجراء اختبار مقاومة الانحناء .



شكل (8) يوضح انهيار عينة اختبار الانحناء

تحليل ومناقشة النتائج:

يتناول هذا الباب عرض ومناقشة النتائج المتحصل عليها من التجارب المعملية التي تم إجراؤها على جميع الخلطات الخرسانية الطازجة وكذلك على العينات الخرسانية المتصلبة لقياس الخواص الميكانيكية لثلاثة أنواع من الخلطات الخرسانية .

خواص الخلطات الخرسانية الطازجة:

اختبار الهبوط:

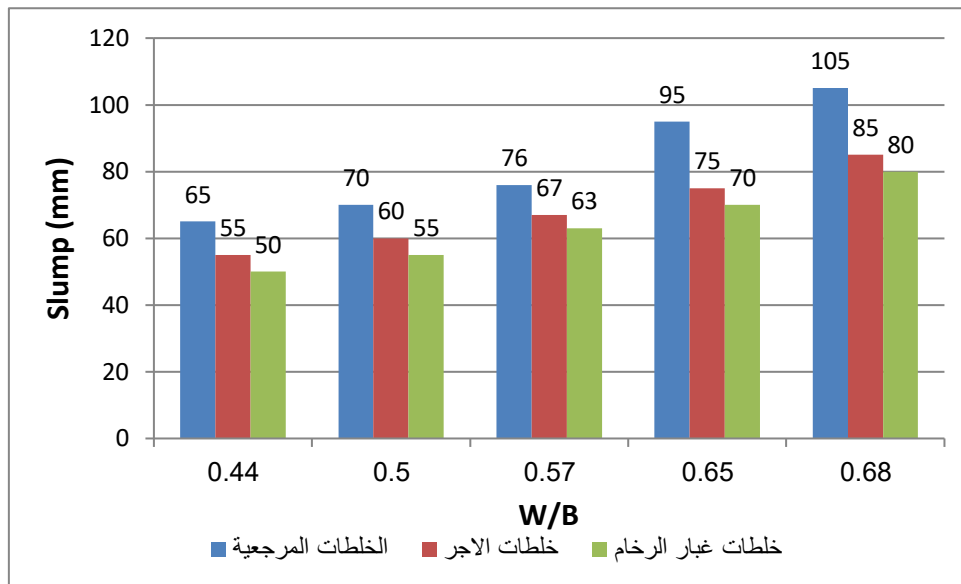
تم تعيين درجة التشغيلية لجميع أنواع الخلطات الخرسانية المستهدفة في هذه الدراسة كما هو موضح في الجدول (9) وذلك باستعمال اختبار الهبوط وفقا للمواصفات القياسية الأمريكية

(AST C143/C143)^[7].

خلطة غبار الرخام 10%		خلطة مسحوق الأجر 10%		خلطة مرجعية		w/b
الهبوط mm	رمز الخلطة	الهبوط mm	رمز الخلطة	الهبوط mm	رمز الخلطة	
80	MD1	85	MC1	105	MR1	0.68
70	MD2	75	MC2	95	MR2	0.65
63	MD3	67	MC3	76	MR3	0.57
55	MD4	60	MC4	70	MR4	0.5
50	MD5	55	MC5	65	MR5	0.44

الجدول (9) يوضح النتائج المتحصل عليها من اختبار الهبوط للخلطات الخرسانية.

ومن خلال النتائج الموضحة في الجدول (9) والشكل (9) نلاحظ أن الهبوط يقل مع انخفاض نسبة (w/b) في الخلطات الخرسانية المنتجة وكذلك نلاحظ أن مقدار الهبوط للخلطات الخرسانية المحتوية على الأجر وعلى غبار الرخام ينخفض مقارنة بالخلطات الخرسانية المرجعية عند نسبة w/c متساوية وهذا يدل على أن زيادة المواد الناعمة في الخلطات الخرسانية تقلل من قابلية التشغيل ويفسر ذلك لزيادة المساحة السطحية للمواد الناعمة الأمر الذي يزيد من حاجة الخلطة الخرسانية للماء , ومن خلال النتائج المتحصل عليها من اختبار الهبوط اتضح أن قابلية التشغيل تقل بنسبة تصل حتى 21% للخرسانة المحتوية على مسحوق الأجر و 23% للخرسانة المحتوية على غبار الرخام, كما نلاحظ أيضا أن التشغيلية للخلطات المحتوية على غبار الرخام أقل من الخلطات المحتوية على مسحوق الأجر ويرجع السبب في ذلك أن نعومة غبار الرخام اكبر من نعومة مسحوق الأجر



الشكل (9) يوضح الهبوط للخلطات الخرسانية المختلفة.

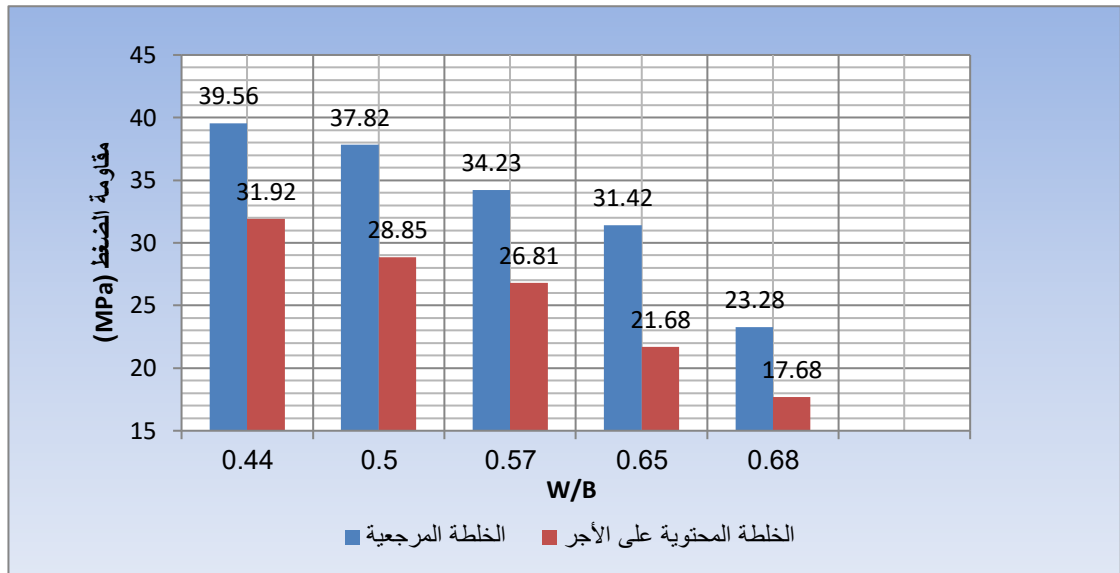
تأثير إضافة مسحوق مادة الأجر على الخواص الميكانيكية للخرسانة :

1- مقاومة الضغط:

جدول (10): مقارنة مقاومة الضغط للخلطات المرجعية والخلطات المحتوية على الأجر .

نسبة الانخفاض (%) في مقاومة الضغط	خلطات مسحوق الأجر 10%		الخلطات المرجعية	
	f_{cu} (MPa)	رمز العينة	f_{cu} (MPa)	رمز العينة
24%	17.68	MC1	23.28	MR1
31%	21.68	MC2	31.42	MR2
21.67%	26.81	MC3	34.23	MR3
23.7%	28.85	MC4	37.82	MR4
19%	31.92	MC5	39.56	MR5

بعد إجراء اختبار مقاومة الضغط للخلطات المرجعية وكذلك للخلطات المحتوية على مسحوق الأجر ومقارنة النتائج مع بعضها لوحظ أن الخلطات الخرسانية التي تحتوي على مسحوق الأجر بنسبة 10% تنخفض مقاومتها بنسبة تتراوح من (19% - 24%) مقارنة بمقاومة الخلطات المرجعية وكلما قلت نسبة w/b قلت نسبة انخفاض مقاومة الضغط للخرسانة المحتوية على مسحوق مادة الأجر والشكل (10) يوضح النتائج المتحصل عليها لمقاومة الضغط للخلطات المرجعية وكذلك للخلطات المحتوية على مسحوق مادة الأجر.



الشكل (10) يوضح العلاقة بين مقاومة الضغط للخلطات المرجعية وللخلطات التي تحتوي على مسحوق مادة الأجر مع اختلاف (w/b).

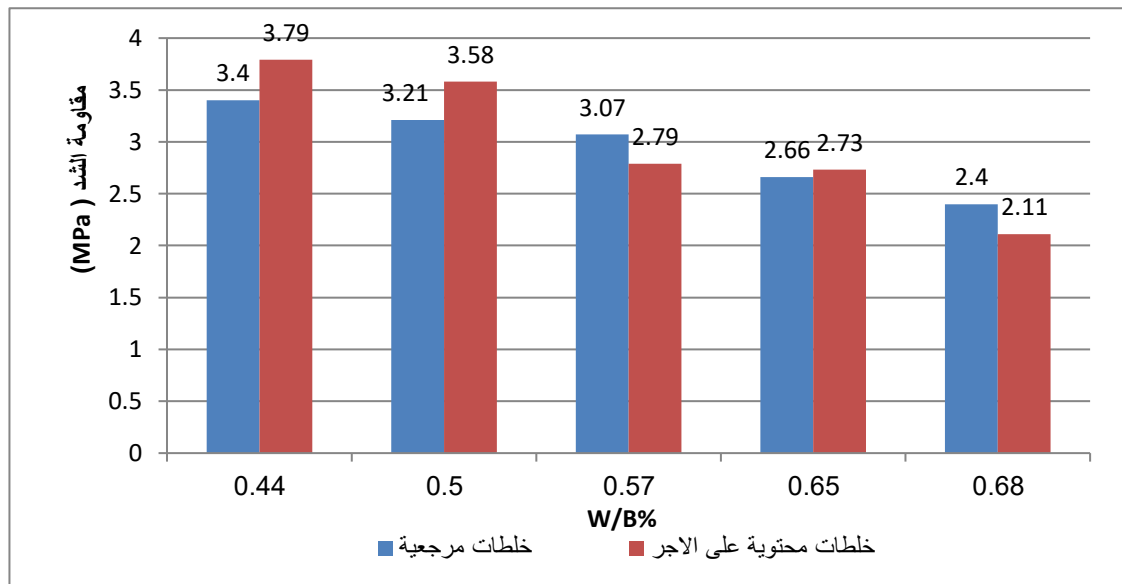
2- مقاومة الشد غير المباشر :

من خلال النتائج المتحصل عليها من خلال إجراء اختبار تعيين مقاومة الشد للعينات المحتوية على مسحوق الأجر والموضحة في الجدول (11) نلاحظ ان كلما قلت نسبة W/b كلما زادت مقاومة الشد لهذه العينات.

جدول (11): مقارنة مقاومة الشد للخلطات المرجعية والخلطات المحتوية على الأجر.

نسبة الزيادة (%) في مقاومة الشد	خلطات مسحوق الأجر 10%		الخلطات المرجعية	
	f_t (MPa)	رمز العينة	f_t (MPa)	رمز العينة
12- %	2.11	MC1	2.4	MR1
2.63 %	2.73	MC2	2.66	MR2
9.1- %	2.79	MC3	3.07	MR3
11.5 %	3.58	MC4	3.21	MR4
16.7 %	3.97	MC5	3.4	MR5

ومن خلال الشكل والجدول (11) يتبين أن هناك عدم ثبات لنسب الزيادة في مقاومة الشد غير المباشر للعينات المحتوية علي الأجر مقارنة بالعينات المرجعية، فنلاحظ أنها تتناقص للخلطة MC1 مقارنة بالخلطة MR1 بنسبة وصلت إلي 12- % وتزداد هذه النسب للخلطتين MC4&MC5 مقارنة بالخلطتين المرجعيتين MR4&MR5 ويرجع السبب في ذلك أن بنقصان نسبة W/b عن حد معين تزيد من مقاومة الشد.



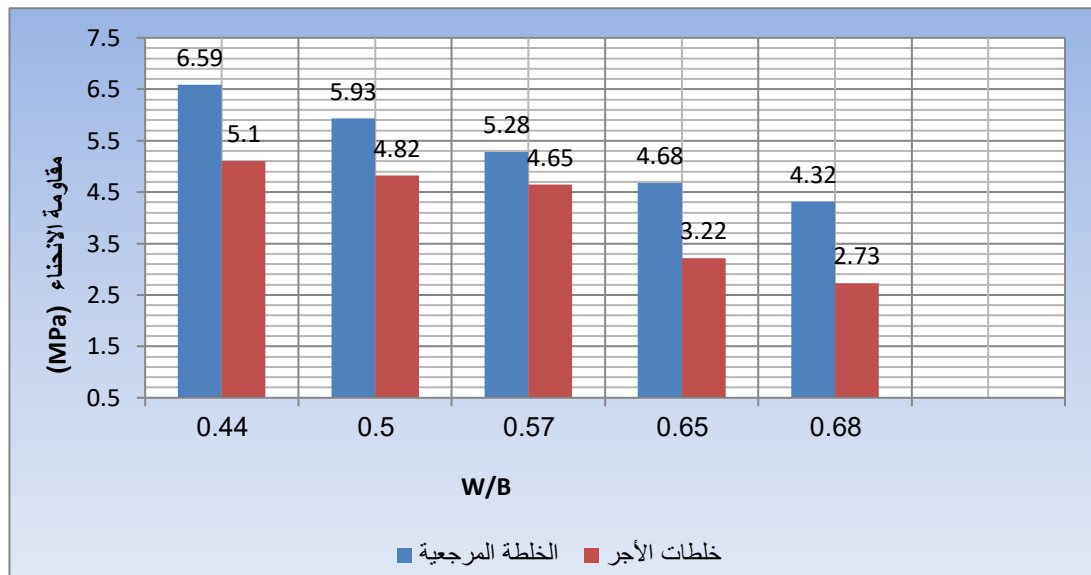
الشكل (11) يوضح العلاقة بين نسبة الماء الي المواد الإسمنتية ومقاومة الشد غير المباشر للخلطات المرجعية والخلطات المحتوية على مسحوق الأجر.

3- مقاومة الانحناء:

تقل مقاومة الانحناء للعينات التي تحتوي على مسحوق مادة الأجر بنسبة متوسطة تصل إلي 23% مقارنة بالخلطات المرجعية وتقل هذه القيمة كلما قلت نسبة w/b والجدول (12) يوضح النتائج المتحصل عليها لمقاومة الانحناء لكل من الخلطات المرجعية وكذلك للخلطات المحتوية على مسحوق مادة الأجر.

جدول(12): مقارنة مقاومة الانحناء للخلطات المرجعية والخلطات المحتوية على الأجر

نسبة الانخفاض (%) في مقاومة الانحناء	خلطات مسحوق الأجر 10%		الخلطات المرجعية	
	f_r (MPa)	رمز العينة	f_r (MPa)	رمز العينة
35%	2.73	MC1	4.23	MR1
31%	3.22	MC2	4.68	MR2
11%	4.65	MC3	5.28	MR3
18%	4.82	MC4	5.93	MR4
22%	5.1	MC5	6.59	MR5



الشكل (12) يوضح مقاومة الانحناء للخلطات المحتوية على مسحوق مادة الأجر وللخلطات المرجعية.

تأثير إضافة غبار الرخام على الخواص الميكانيكية للخرسانة العادية:

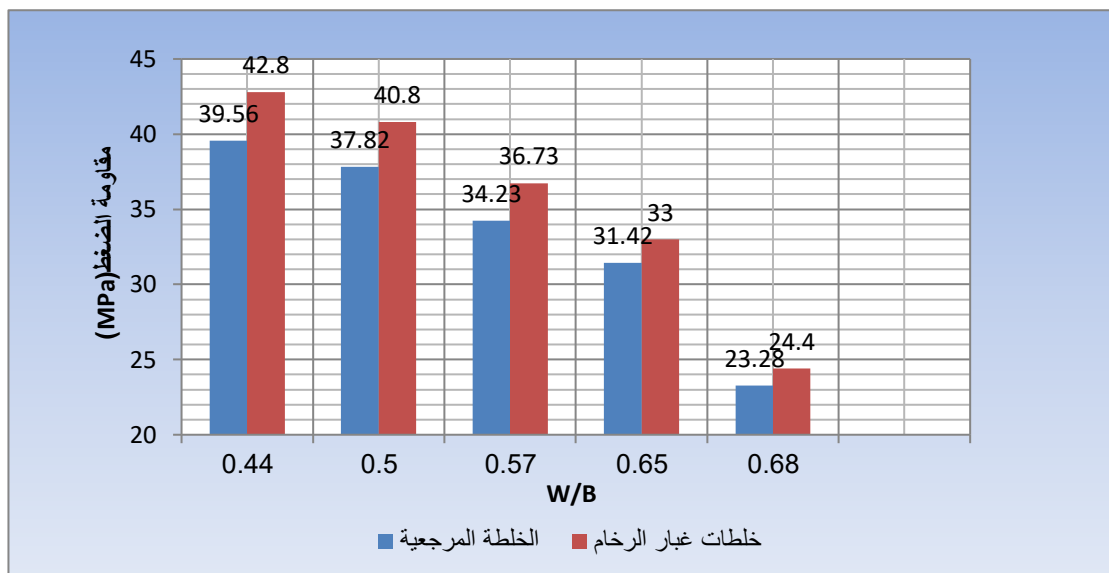
1- مقاومة الضغط:

نلاحظ من خلال الجدول (13) ان مقاومة الخرسانة للضغط تتحسن بإضافة غبار الرخام كإحلال جزئي من الاسمنت بنسبة 10% بعكس تأثير اضافة مسحوق الأجر بنسبة مماثلة ،حيث لوحظ أن مقاومة الضغط تزيد بنسبة تصل الي 4% عند نسبة W/b مقدارها 0.68 وتزيد هذه النسبة لتصل الى 8% عند نسب W/b أقل مقدارها 0.44 .

جدول (13) يوضح نتائج مقاومة الضغط للخلطات المرجعية والخلطات المحتوية علي غبار الرخام.

نسبة الزيادة (%) في مقاومة الضغط	خلطات غبار الرخام 10%		الخلطات المرجعية	
	f_{cu} (MPa)	رمز العينة	f_{cu} (MPa)	رمز العينة
4.7%	24.4	MD1	23.28	MR1
5%	33	MD2	31.42	MR2
7.3%	36.73	MD3	34.23	MR3
7.9%	40.8	MD4	37.82	MR4
8.2%	42.8	MD5	39.56	MR5

كما نلاحظ من الشكل (13) ان علاقة نسبة الماء الي المواد الاسمنتية مع مقاومة الضغط تكون علاقة عكسية فكلما زادت نسبة W/B قلت مقاومة الضغط .



الشكل (13) يوضح مقاومة الضغط للخلطات المرجعية والخلطات المحتوية على غبار الرخام.

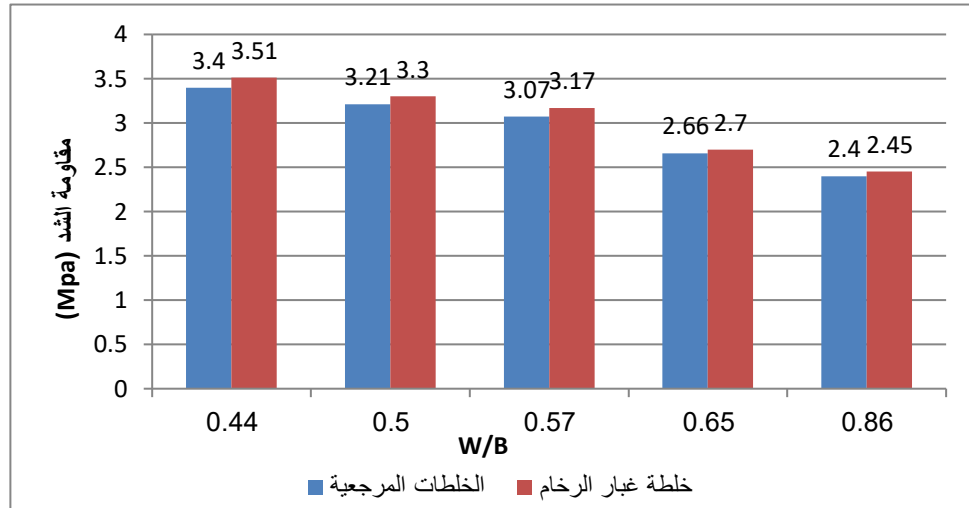
2- مقاومة الشد غير المباشر :

تزيد مقاومة الشد غير المباشر بنسبة تقدر من 2% الي 3% مقارنة بالخلطات المرجعية وذلك عند إضافة غبار الرخام بنسبة 10% , ويرجع السبب في تحسن الخواص الميكانيكية للخرسانة عند إضافة غبار الرخام بنسبة 10% كإحلال جزئي من وزن الاسمنت هو أن الرخام يحتوي على الجير الذي بدوره يزيد من الكفاءة التفاعلية (الإماهة) , ومن خلال المقارنة بين مقاومة الضغط ومقاومة الشد غير المباشر نلاحظ أن نسبة الزيادة في مقاومة الضغط أكبر من نسبة الزيادة في مقاومة الشد غير المباشر , كما نلاحظ أيضا أن نسبة الزيادة لكل من مقاومة الضغط ومقاومة الشد غير المباشر للخرسانة المحتوية علي غبار الرخام تزيد بنقصان W/B حيث أنها تعطي أفضل النتائج عند W/B تصل إلي (0.44) كما هو موضح في

الجدول (14) والشكل (14) .

الجدول (14) يوضح نتائج مقاومة الشد غير المباشر للخلطات المحتوية علي غبار الرخام

نسبة الزيادة (%) في مقاومة الشد	خلطات غبار الرخام 10%		الخلطات المرجعية	
	f_t (MPa)	رمز العينة	f_t (MPa)	رمز العينة
2%	2.45	MD1	2.4	MR1
1.5%	2.7	MD2	2.66	MR2
3.2%	3.17	MD3	3.07	MR3
2.8%	3.3	MD4	3.21	MR4
3.3%	3.51	MD5	3.4	MR5



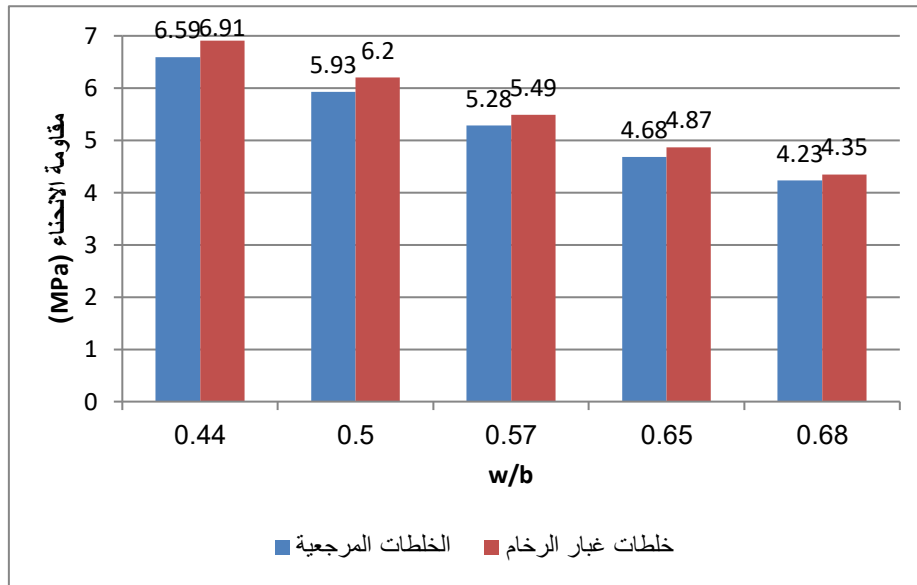
الشكل (14) يوضح مقاومة الشد غير المباشر للخلطات المرجعية وكذلك الخلطات المحتوية على غبار الرخام بنسبة 10% من وزن الإسمنت.

3- مقاومة الانحناء :

نلاحظ من خلال الجدول (15) ان مقاومة الانحناء تتحسن عند اضافة غبار الرخام بنسبة 10% من وزن الإسمنت حيث وصلت أعلى نسبة زيادة للخلطة MD5 مقارنة بالخلطة المرجعية MR5 الي 4.8% وهذا ما يدل الي ان مادة غبار الرخام مادة فعالة لزيادة الخواص الميكانيكية للخرسانة (مقاومة الضغط - مقاومة الشد غير المباشر - مقاومة الانحناء) وذلك لأنها مادة ناعمة تعمل على ملئ المسامات الصغيرة في الخرسانة الامر الذي يحسن من مقاومة الخرسانة.

الجدول (15) يوضح نتائج مقاومة الانحناء للخلطات المحتوية علي غبار الرخام ومقارنتها بالخلطات المرجعية.

نسبة الزيادة (%) في مقاومة الانحناء	خلطات غبار الرخام 10%		الخلطات المرجعية	
	f_r (MPa)	رمز العينة	f_r (MPa)	رمز العينة
%2.8	4.35	MD1	4.32	MR1
%4	4.87	MD2	4.68	MR2
%4	5.49	MD3	5.28	MR3
%4.5	6.2	MD4	5.93	MR4
%4.8	6.91	MD5	6.59	MR5



الشكل (15) يوضح النتائج المتحصل عليها من مقاومة الانحناء ومقارنتها بالخلطات المرجعية

الخلاصة:

- 1- يقل الهبوط للخلطات الخرسانية المحتوية على مسحوق الآجر وكذلك الخلطات المحتوية على غبار الرخام بنسبة تصل 21% و 23% على التوالي والسبب في ذلك زيادة المواد الناعمة في الخلطة الخرسانية مما زاد المساحة السطحية الأمر الذي يزيد من حاجة الخلطة الخرسانية للماء , كما أن مسحوق الآجر مادة طينية لها شراهة عالية في امتصاص الماء .
- 2- تقل مقاومة الضغط للخرسانة المحتوية على مسحوق الآجر بنسبة 10% من وزن الاسمنت إلى 24% مقارنة بالمقاومة المرجعية .
- 3- تزداد مقاومة الشد للخلطات المحتوية على مسحوق الآجر كإحلال جزئي من وزن الاسمنت وتقدر نسبة الزيادة بنسبة 16% مقارنة بالخلطات المرجعية وذلك عند نسبة $w/b=0.44$.
- 4- تقل مقاومة الانحناء للعينات المحتوية على مسحوق الآجر بنسبة تصل إلى 35% من المقاومة المرجعية عند نسبة $w/b=0.68$ وتنخفض هذه النسبة لتصل إلى 11% عند نسبة $w/b=0.48$.
- 5- تتحسن مقاومة الخرسانة للضغط بإضافة غبار الرخام بنسبة 10% من وزن الاسمنت حيث كانت نسبة الزيادة في مقاومة الضغط 8% عند نسبة $w/b=0.44$, وتقل نسبة الزيادة لتصل إلى 4.7% عند نسبة $w/b=0.68$ ويرجع السبب في ذلك أن غبار الرخام يحتوي على الجير الذي يزيد من عملية (الإمالة) .
- 6- تتحسن مقاومة الخرسانة للشد بنسبة تقدر من 2% إلى 3% وذلك عند استخدام غبار الرخام بنسبة 10% كإحلال جزئي من وزن الإسمنت .
- 7- تزداد مقاومة الانحناء بنسبة تصل إلى 4.8% عند نسبة $w/b=0.44$ وذلك عند استخدام غبار الرخام كإحلال جزئي من وزن الاسمنت بنسبة 10% .

التوصيات :

- 1- يفضل استخدام مسحوق الأجر بنسبة أقل من 10% من وزن الإسمنت لما لها من تأثير سلبي على مقاومة الضغط والانحناء .
- 2- دراسة تأثير مسحوق الأجر بنسب مختلفة لا تتجاوز 10% من وزن الإسمنت ومعرفة مدى تأثيرها على الخواص الميكانيكية للخرسانة.
- 3- عمل دراسة يتم من خلالها معرفة مدى تأثير إضافة مسحوق الأجر بنسبة 10% كمادة مائنة عند نسب w/b مختلفة.
- 4- يجب الا يزيد غبار الرخام عن 10% من وزن الاسمنت لأنه عند تجاوز هذه النسبة تبدأ مقاومة الضغط للخرسانة بالانخفاض .
- 5- عمل دراسة يتم من خلالها معرفة تأثير استخدام غبار الرخام كمادة مائنة بنسبة 10% من وزن الاسمنت مع استخدام w/b مختلفة ومدى تأثيره على الخواص الميكانيكية للخرسانة.
- 6- عمل دراسة يتم من خلالها دمج غبار الرخام مع مسحوق الأجر واستخدامهما بنسب مختلفة من وزن الاسمنت ومعرفة مدى تأثير ذلك على الخواص الميكانيكية للخرسانة.
- 7- يجب عدم التخلص من مخلفات البناء بالطرق التقليدية ولكن يمكن الاستفادة منها من خلال إجراء التجارب عليها وذلك بإدخالها في الخلطات الخرسانية ودراسة مدى تأثيرها على الخواص الميكانيكية للخرسانة ولكي تحافظ على نظافة البيئة.

المصادر والمراجع :

- 1- BS 882:1992 "Specification for aggregates from natural sources " , British Standards Institution , 389 Chiswick High Road , W4 4AL ,London, 1992.
- 2- المواصفات الليبية القياسية رقم 294 "المياه المستعملة في الخرسانة" المركز الوطني للمواصفات والمعايير القياسية, طرابلس, 1988 .
- 3- BS12:1996 " Specification for Portland Cement ". British Standards Institution , 389 Chiswick high road , London, W4 4AL, London, 1996.
- 4- مجلة البحوث الهندسية (جامعة طرابلس) ليبيا العدد (16) مارس 2012 .
- 5- "Partial Replacement of Cement with Marble Dust Powder" ' Mr.Ranjan Kumar Int. Journal of Engineering Research and Applications ISSN:2248-9622,vol.5,Issue8,(Part-4)August 2015,pp.106-114.

6- حبيب مصطفى زين العابدين , تقنية صناعة الخرسانة (1992).

7- Designation:C143/143M-00, Standard Test Method for slump of Hydraulic – cement concrete¹ , 100 Barr Harbor Drive , west Conshohocken , PA 19428– 2959, United states.

8-BS 1881: Part 116 : 1983 "Method for determination of compressive strength of concrete cubes " British Standards Institution , 389 Chiswick high road , W4 4AL , London, 1983.

9- ASTM- C 496/C 496M – 04 , "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens," West Conshohocken, PA 19428– 2959, United States,2004.

10- BS 1881: Part 118:1983,"Method for determination of flexural strength ".British Standards Institution, 2 Park Street , London, WL A 2BS, 1983.