المؤتمر العلمي الثاني
لطلاب المرحلة الجامعية والدراسات العليا
الجامعة الأسمرية الإسلامية 1446هـ- 2024م

تأثير إحلال الرمل الصناعي الناتج من تكسير الصخور كبديل جزئي للركام الناعم على خواص الخرسانة

محمد منصور البربار، عبدالله علي اغويله*، بوزيد مصطفى العمامي، و عمران سالم اشميلة

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

*البريد الإلكتروني: a.agwila@asmarya.edu.ly

Effect of Partial Replacement of Manufactured Sand Produced from Stone Crushing by Natural Sand on Concrete Properties

Mohammed Mansour Al-Barbar, Abdullah Ali Agwila*, Bouzid Mustafa Al-Amami, and Imran Salem Ashmila

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

الملخص

إن العديد من المحاجر انتشرت بشكل عشوائي وغير منتظم؛ في مدينة زليتن ما زاد من الآثار البيئية الناجمة عن هذا القطاع الذي يتضمن جوانب سلبية كثيرة تضر بالبيئة والسكان والعديد من المجالات. من هذا المنطلق لجأنا في هذه الدراسة إلى إمكانية الاستفادة من مخلفات تكسير الصخور في المحاجر واستخدامها كرمل صناعي بديلاً جزئياً عن الرمل الطبيعي في الخلطات الخرسانية. حيث تم في هذه الدراسة تصميم خلطات خرسانية بنسب خلط ثابتة (1 :1.5 :3) للإسمنت والركام الناعم والركام الخشن على التوالي وتم استخدام الرمل الصناعي كبديل جزئي للركام الناعم (الرمل) في تصنيع الخرسانة بنسب إحلال (5، 10، 25، 50)% حيث تم تقييم مدى صلاحية استخدام الرمل الصناعي في الخلطات الخرسانية من خلال مجموعة من الاختبارات مثل تحديد الخواص التشغيلية ومقاومة الضغط ومقاومة الشد الغير مباشر للخرسانة. لوحظ في هذه الدراسة أنه كلما زادت نسبة الرمل الصناعي في الخلطة الخرسانية قلت التشغيلية حيث كانت نسبة الماء إلى الإسمنت في جميع الخلطات 45%. وتم عمل خلطة مرجعية وهي (X_1) لمقارنة النتائج المتحصل عليها من الخلطات الأخرى حسب نسب الإحلال للرمل الصناعي. ووفقا لهذه الدراسة كانت قيم الهبوط للخرسانة في الخلطة المرجعية (X_1) هي 55 مم، وأقل قيمة للهبوط لجميع الخلطات كانت 25 مم للخلطة Y_4 عند استخدام نسبة إحلال 50% من الرمل الصناعي، أما مقاومة الضغط بعمر 28 يوم فكانت القيمة الأعلى لجميع الخلطات هي 50.6 Mpa عند استخدام الرمل الصناعي بنسبة 50%، ونتائج مقاومة الشد الغير مباشر بعمر 28 يوم فكانت جميع القيم للخلطات الخرسانية متقاربة وكانت أعلى قيمة 2.53 Mpa عند استخدام الرمل الصناعي بنسبة إحلال 5%، ووفقا لهذه الدراسة يمكن استخدام الرمل الصناعي كبديل جزئي في الخلطات الخرسانية.

الكلمات الدالة: الرمل الصناعي، تشغيلية الخرسانة، مقاومة الضغط للخرسانة، مقاومة الشد الغير مباشر.

Abstract

Many quarries are spread randomly and irregularly; in the city of Zliten, the environmental impacts resulting from this sector have increased, which includes many negative aspects that harm the environment, people, and many Fields. From this standpoint, we resorted in this study to the possibility of benefiting from rock crushing waste in quarries and using it as manufactured sand, as a partial substitute for natural sand in concrete mixtures. In this study, concrete mixtures were designed and mixing ratios (3: 1.5: 1) are fixed for cement, fine aggregate, and coarse aggregate, respectively. manufactured sand was used as a partial substitute for fine aggregate (sand) in the manufacture of concrete with replacement ratios (5,10, 25, 50) %, to evaluate the validity where The suitability of using manufactured sand in concrete mixtures was evaluated through a set of tests, such as determining the workability properties, compressive strength and indirect tensile strength of concrete. It was observed in this study that the higher the percentage of manufactured sand in the concrete mixture, the less workability is becoming, as the water/cement ratio in all mixtures was 45%. A reference mixture (X_1) was made to compare the results obtained from other mixtures according to the replacement ratios for manufactured sand. According to this study, the slump value of concrete in the reference mix (X_1) was 55mm, and the lowest slump value for all mixtures was 25 mm for (Y_4) mix when using a 50% replacement ratio of manufactured sand. For the compressive strength at age of 28 days, the highest value for all mixtures was 50.6 MPa when using 50% manufactured sand. For the results of indirect tensile strength at age of 28 days, all values for concrete mixtures were close, and the highest value was 2.53 MPa when using manufactured sand with a 5% replacement ratio. According to this study, manufactured sand can be used as a partial substitute in concrete mixtures.

Keywords: *Manufactured Sand, Workability of concrete, Compressive Strength of Concrete, Tensile Strength.*

1. المقدمة

غبار المحاجر (كسَـارات الحجارة) يعرف على أنه رواســب أو مخلفات أو غيرها من النفايات غير القيّمة الموجودة بعد اسـتخراج ومعالجة الصخور لتشـكل حبيبات ناعمة ذات أقطار أقل من 4.75 مم. حيث يظهر غبار المحجر عند تكسـير الركام الخشـن، ويحتوي على حبيبات خشـنة وزوايا حادة مما يؤدي إلى اكتساب مقاومة جيدة نظراً لقوة التماسك والأحكام فيما بينها (الباحثون السوريون، 2015).

ويعتبر قطاع صـناعة الحجر من أهم القطاعات الصـناعية في ليبيا عامة وفي مدينة زليتن خاصـة ومن أهم مصـادر الدخل، وقد كان لهذا القطاع دور إيجابي كبير لا يمكن غض البصـر عنه في رفع مستوى الدخل القومي ورفع النهضة العمرانية في مدينة زليتن.

إن العديد من المحاجر انتشـرت بشـكل عشـوائي وغير منتظم؛ ما زاد من الآثار البيئية الناجمة عن هذا القطاع الذي يتضـمن جوانب سـلبية كثيرة تضـر بالبيئة والسـكان والعديد من المجالات. وعلى الرغم من الأهمية الكبيرة لصناعة الحجر كونه مصدر للدخل ومجال عمل للكثير من الأيدي العاملة إلا

أن أثرها ومدى إســهامها في تلوث البيئة يقلل من هذه الأهمية. حيث أن الملوثات الناجمة عن المحاجر تتمثل في الغبار وهو عبارة عن ذرات دقيقة ناتجة من الرمل والحجارة القابلة للتعلق في الهواء والتي من الممكن حملها إلى مسافات محدودة ثم ترسيبها على مناطق مختلفة.

نظراً لوجود كميات كبيرة من المواد الناعمة الناتجة من تكسير الصخور تكون هذه المواد غير صـالحة للزراعة، وكذلك لا يمكن الاسـتفادة منها في كثير من الأعمال الإنشـائية كالرصـف؛ لكونها غير قابله للدمك. فعند هبوب الرياح تسـبب هذه المواد الناعمة الناتجة من عملية التكسـير مشـاكل بيئية وصـحية مثل انعدام الرؤية للمناطق القريبة من الكسـارات وكذلك تؤثر على الغطاء النباتي. والشـكل (1) يوضح آثار الغبار على البيئة المحيطة بالمحاجر. وتعتبر المواد الصلبة أيضا من الملوثات الناجمة عن المحاجر حيث يمكن أن تتساقط بعض الحجارة على جوانب الطرقات أثناء عملية النقل أو التوزيع مما يؤدي إلى تلوث المنطقة بهذه المواد.

شكل 1. يوضح بعض الآثار السلبية للغبار

1.1. الرمل الصناعي

الرمل الصناعي أو المصنَع ويعرف أيضاً بالرمل المسحوق أو الركام الناعم الصناعي وهو بديل للرمل الطبيعي في أعمال البناء، حيث يتم تصنيعه عن طريق تكسير الصخور أو أحجار المحاجر أو قطع الركام الأكبر حجماً إلى جزيئات بحجم الرمل في المصنع أو المحاجر، الرمل الصناعي غالبا له شكل مكعب وزاوي، وقطره أقل من 4.75 مم.

يوصى باستخدام الرمل الصناعي حيث أنه بديل اقتصادي وصديق للبيئة أكثر من الرمل الطبيعي، ويمكن استخدام الرمال المصنعة في البناء لجميع العناصر باستثناء أعمال المحارة والعزل المائي وفي طبقة الأساس تحت الحجر (فهيم، 2022).

1.1.1. خصائص الرمل الصناعي:

من أهم الخصائص التي يتمتع بها الرمل الصناعي ما يلي (فهيم، 2022):

- شكل الرمل المسحوق الصناعي هو مكعب وزاوي له ملمس خشن وبالتالي فهو أفضل للخرسانة.

- لا يحتوي على طمي حيث يتم تصنيعه عن طريق تكسير الركام ولكن إذا لم تكن درجة الفرز مناسبة فقد يحتوي أحياناً على بعض الغبار.
- لا يحتوي على أي رطوبة.
- عند استخدامه في الخرسانة يكون زمن الشك في الخلطة الخرسانية أسرع نسبياً.
- قوة الانضغاط وقوة الانحناء للخرسانة المصنوعة من الرمل الصناعي أعلى من تلك المصنوعة من الرمل الطبيعي.
- الرمال يتم تجهيزها صناعياً لذلك لا توجد جزيئات كبيرة الحجم.
- امتصاص الماء من الرمل المسحوق الصناعي يتراوح من 2-4 % .
- تهدل الرمل المسحوق الصناعي أقل مقارنة بالرمل النهري أو الطبيعي.
- لا يحتوي على أي مخلفات أو مواد بحرية.
- تبلغ الكثافة الظاهرية للرمل المسحوق الصناعي 1.75 جم/سم^3.
- يتراوح الوزن النوعي للرمل المسحوق الصناعي من 2.5 إلى 2.9 ويعتمد ذلك على الصخور الأم.
- تصل الرطوبة السطحية للرمل المسحوق الاصطناعي إلى 10%.
- يسبب ضرراً أقل للبيئة مقارنة بالرمل الطبيعي.
- يتميز بجودة أفضل مقارنة بالرمل الطبيعي لأنه مصنوع في بيئة محكومة ومراقبة.
- يوصى به بشدة لأعمال البناء بالطوب وأعمال البلوكات الخرسانية ويعد أرخص من رمل النهر.

2.1.1. ميزات الرمل الصناعي:

يمتلك الرمل الصناعي ميزات من أهمها (فهيم، 2022):

- متدرج جيداً في النسب المطلوبة لأعمال البناء.
- لا يحتوي على مركبات عضوية أو مكونات قابلة للذوبان تؤثر على زمن الشك للإسمنت.
- يتم تصنيعه بشكل مناسب بحيث يمكن الحصول على الخاصية المطلوبة.
- لا يحتوي على شوائب مثل الطين والطمي، وبالتالي يزيد من جودة ومتانة الخرسانة.
- مادة اقتصادية وصديقة للبيئة.

3.1.1. عيوب الرمل الصناعي:

من عيوب الرمل الصناعي ما يلي (فهيم، 2022):

- قابلية تشغيل الخرسانة المصنعة بالرمل الصناعي أقل من تلك المصنعة برمال طبيعية. ولكن يمكن التغلب على ذلك باستخدام المضافات المخفضة للماء.

- شكل رمال النهر مستدير ولها سطح أملس بينما الرمال الاصطناعية لها شكل زاوي ومكعب وسطح خشن، ولذلك العجينة الإسمنتية المطلوبة لملء الفجوات في الخرسانة المعدة باستخدام رمل النهر أقل مقارنة بالرمل الصناعي. وبالتالي فإن الرمل الصناعي يتطلب مزيداً من المياه والإسمنت لتحقيق قابلية التشغيل المتوقعة مما يؤدي إلى زيادة التكاليف.
- من العيوب الأخرى للرمل الصناعي هو أنه يحتوي على كميات أكبر من الجسيمات الدقيقة جداً مقارنة بالرمل الطبيعي أثناء عملية الإنتاج لذلك يمكن أن يؤثر هذا مرة أخرى على قوة الخرسانة وقابليتها للتشغيل.

2.1. أهمية وأهداف الدراسة

من خلال الاطلاع على عدد من البحوث المتعلقة باستخدام غبار المحاجر في الخلطات الخرسانية لوحظ عدم وجود دراسات مستفيضة حول استخدام غبار المحاجر في الخرسانة لذلك كان من الضروري إجراء دراسات أكثر حول إمكانية استخدام غبار المحاجر كبديل جزئي للرمل في الخلطاتة الخرسانية لمعرفة مدى تأثيرها على خواص الخرسانة.

الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو الحصول على بعض المعلومات لمحاولة استخدام غبار المحاجر كبديل جزئي وكلي للركام الناعم في صناعة الخرسانة. تم في هذه الدراسة استخدام المواد الناعمة في الخلطة الخرسانية كبديل جزئي للرمل بنسب إحلال (5، 10، 25، 50)%.

2. الدراسات السابقة

قام حاوي (2015) بدراسة تأثير الرماد المتطاير كبديل جزئي عن الرمل على خواص خرسانة الركام الخشن، حيث تضمن البحث دراسة كل من الخواص (الهطول، قوتي الانضغاط والشد، الامتصاص، الكثافة) لأربع خلطات خرسانية مختلفة كانت جميعها بركام خشن معاد بنسبة وزنية 50% بدلا من الركام الخشن الطبيعي، إحداها بالرمل الطبيعي وأعدت خلطة مرجعية وثلاث أخرى تحتوي على رماد متطاير صنف (F) كبديل جزئي عن الرمل بنسب استبدال وزنية (15، 30، 45)% لمعرفة تأثير هذا الاستبدال على الخواص المذكورة بالأعمار (7، 14،28، 90) يوم، بينت النتائج تأثيراً إيجابياً كبيراً على زيادة قوة انضغاط الخرسانة بنسب استبدال الرمل بالرماد المتطاير. قوة الشد تتأثر إيجابياً أيضاً حيث تزداد بزيادة نسب الاستبدال وبتقدم عمر الخرسانة ولكن بدرجة أقل كثيراً من تأثير قوة الانضغاط أما امتصاص الخرسانة للماء والهطول فيقل بشكل كبير بزيادة نسبة الاستبدال لتصل أعلى

نسـبة نقصـان في الامتصـاص 30.5% و29.88 % في هطول الخلطة بنسـبة اسـتبدال 45% مقارنة بالخلطة المرجعية.

وفي دراسة أخرى قام كل من Vijayaraghavan & Wayal (2013) بدراسة تأثير الرمل الصناعي (M-Sand) على مقاومة الضغط وقابلية التشغيل للخرسانة، حيث تم استبدال الرمل الطبيعي برمل صناعي بنسب إحلال 50%، 100% وقد أعطت النتائج أن مقاومة الضغط للخرسانة تزداد مع زيادة نسبة الإحلال وأن استخدام الرمل الصناعي بنسبة 100% أعطى أعلى قيمة مقاومة للضغط بعمر 28 يوم مقارنة بالخلطة المرجعية والخلطة ذات نسبة إحلال للرمل الصناعي 50% بنسبة زيادة 7.03% عن الخلطة المرجعية، وقيمة الهبوط للخرسانة كانت أقل قيمة عند نسبة إحلال 100% حيث أعطت 34 مم مقارنة بالخلطة المرجعية (125 مم) والخلطة ذات نسبة الاحلال 50% (100مم).

قام تليش والطاهر (2025) بدراسة تأثير خبث الأفران كبديل جزئي للرمل على الخواص الهندسية للخرسانة ذاتية الدمك. حيث اهتمت الدراسة بتحديد أثر إحلال الخبث كنسبة من مكونات الخلطة الخرسانية ودراسة تأثيره على مقاومة الانضغاط والشد وقابلية التشغيل ونسبة الامتصاص للخرسانة. تم تصميم خلطة خرسانية مرجعية، وتم إضافة الخبث إلى الخرسانة ذاتية الدمك بإحلال الخبث بنسب (20، 30، 40، 50)% من وزن الرمل وبديلا عنه وتم إضافة الملدن الفائق (Viscocrete-5930) بنسبة ثابتة (0.9)% من وزن الإسمنت، تم اختبار الخرسانة في الحالة اللدنة التي تشمل (قابلية الانسياب، الانتشار، المرور ومقاومة الانعزال) وكذلك في الحالة المتصلدة (مقاومة الضغط بعمر 7-56 -28 يوم، مقاومة الشد لعمر 28 يوم، نسبة الامتصاص لعمر 56 يوم). أوضحت نتائج الاختبار أن إضافة الخبث إلى الخرسانة ذاتية الدمك كان له تأثير إيجابي في زيادة مقاومة الانضغاط ومقاومة الشد بالمقارنة مع الخلطة المرجعة كما بينت نتائج الاختبارات الطرية للخلطات الخرسانية الحاوية على الخبث بأن إضافة الخبث يؤدي إلى زيادة في قابلية التشغيل للخرسانة ذاتية الدمك.

وفي دراسة محمد (2011) قامت بدراسة تأثير إضافة مخلفات البورسلين كبديل جزئي عن الركام الناعم على بعض الخصائص الهندسية للخرسانة، إذ تم في هذا البحث إضافة مسحوق مخلفات البورسلين بنسبة (0، 10، 20، 30، 40)% مستبدلة من وزن الرمل. تبين النتائج المتحصلة أن استخدام مخلفات مسحوق البورسلين أثر على خواص الخرسانة إذ ساعدت على انخفاض كثافة الخرسانة بمقدار يصل إلى (6.07)% عند نسبة استبدال (40)% وتقليل من قابلية امتصاصها للماء إلى قيمة (17)% عند نفس النسبة، كما أظهرت النتائج التأثير الإيجابي لمسحوق البورسلين على مقاومة الضغط والشد بزيادة تصل إلى (18)% عند نسبة استبدال (20)% مقارنة بالخرسانة الاعتيادية.

في دراسة بعنوان ملاءمة الرمال المصنعة من الأحجار المكسرة لاستبدال رمال الأنهار الطبيعية لإنتاج خرسـانة برتبة C25 (Mamaru, 2020) بجامعة جيما بأثيوبيا، حيث كان الهدف الرئيسـي من هذه الدراسة هو تحديد الخصائص الطازجة والمتصلبة للخرسانة برتبة C25 من خلال استبدال الرمل الطبيعي بالرمل المصنع في مدينة جيما. أجريت هذه الدراسة التجريبية من خلال تحضير ثلاث مكعبات خرسانية لكل نسب استبدال. تم الاستبدال بنسبة (0، 10، 20، 40، 60، 100)% وفقا لهذه الدراسة كانت قيم الهبوط للخرسانة حسب نسب الاستبدال أعلاه بالنسبة المئوية (48.91 مم) و(45.23 مم) و(38.98 مم) و(32.56 مم) و(26.14 مم) على التوالي. وكانت مقاومة الانضغاط (27.08 MPa) و(29.34 MPa) و(31.25 MPa) و(27.25 MPa) و(29.22 MPa) على التوالي وكانت مقاومة الانحناء (3.22 MPa) و(3.35 MPa) و(4.37 MPa) و(3.26 MPa) و (4.26 MPa) على التوالي. وتم الحصول على أقصى مقاومة للضغط عند استبدال بنسبة (40)% مع قوة الانضغاط والانحناء المقابلة كانت (31.25 MPa) و(4.35 MPa) على التوالي. يستنتج من هذه الدراسة أنه يمكن استخدام الرمل المصنع كبديل جزئي وكلي للرمل الطبيعي.

3. البرنامج العملي

تناول هذا الجانب ثلاث مواضيع رئيسية وهي المواد المستخدمة في الخلطات الخرسانية كالإسمنت والركام الناعم (الرمل) والركام الخشن والرمل الصناعي وماء الخلط، وتطرق إلى تصميم الخلطات الخرسانية وكيفية إعداد هذه الخلطات. كما تطرق إلى أهم الاختبارات المعملية المستخدمة والتي شملت الوزن النوعي ونسبة الامتصاص والتحليل المنخلي ومعامل التهشيم ومعامل الصدم للركام الخشن، واختبار التحليل المنخلي والوزن النوعي ونسبة الامتصاص لكل من الرمل الصناعي والركام الناعم، واختبار الهبوط ومقاومة الضغط ومقاومة الشد غير المباشر للخرسانة.

تم استخدام الإسمنت البورتلاندي العادي الذي أنتج من قبل مصنع البرج (زليتن) لصناعة الإسمنت والتابع لشركة الاتحاد العربي للمقاولات، والتحليل الكيميائي له والخصائص الفزيائية مطابقة للمواصفات القياسية الليبية رقم (2009/340) والموضحة في الجدولين (1 و 2).

الركام الناعم: تم توريده من مدينة زليتن وهو عبارة عن رمل طبيعي خال من الشوائب ووزنه النوعي 2.65 ونسبة امتصاصه 0.81% وهي مطابقة للمواصفات القياسية البريطانية الأوروبية رقم (BS-EN 1097_6: 2013) ونسبة المواد الناعمة بطريقة الوزن باستخدام المنخل رقم 200 كانت 0.4% وهي مطابقة للمواصفات القياسية البريطانية (BS 812: Part2: 1975) والتحليل المنخلي مطابق للمواصفات البريطانية (BS 812: 1992) والجدول رقم (3) يوضح التحليل المنخلي للرمل.

جدول 1. التحليل الكيميائي للإسمنت المستخدم

التركيب الكيميائي	النسبة المئوية (%)
أكسيد السيلكون (SiO_2)	22.10
أكسيد الألمونيوم (Al_2O_3)	5.01
أكسيد الحديد (Fe_2O_3)	3.69
أكسيد الكالسيوم (CaO)	62.86
أكسيد الماغنيسيوم (MgO)	1.65
أكسيد الصوديوم (Na_2O)	0.19
أكسيد البوتاسيوم (K_2O)	0.73
أكسيد الكبريت (SO_3)	2.37
الكلوريد (Cl)	0.011
النعومة (Blaine)	3011 سم/جم

جدول 2. الخصائص الفيزيائية للإسمنت المستخدم

الاختبارات المعملية	نتائج الاختبار	حدود المواصفات القياسية الليبية رقم (2009/340)
زمن الشك الابتدائي (دقيقة)	220	لا يقل عن 45 دقيقة
زمن الشك النهائي (دقيقة)	252	لا يزيد عن 10 ساعات
ثبات الحجم (مم)	1.40	لا يزيد عن 10 مم
مقاومة الضغط بعد 2 أيام (نيوتن/مم^2)	18.53	لا تقل عن 10 نيوتن/مم^2
مقاومة الضغط بعد 7 أيام (نيوتن/مم^2)	36.82	_____
مقاومة الضغط بعد 28 يوم (نيوتن/مم^2)	58.27	لا تقل عن 42.5 نيوتن/مم^2
الوزن النوعي	3.15	مطابق
المساحة السطحية (سم^2/جم)	2977	لا تقل عن 2225 سم^2/جم

جدول 3. نتائج التحليل المنخلي للرمل المستخدم في الخلطات الخرسانية

مقاس المنخل (مم)	وزن المحجوز (جم)	الوزن التراكمي المحجوز (جم)	النسبة المئوية للمحجوز (%)	النسبة المئوية للمار (%)	حدود المواصفات (BS 882: 2002)
2.36	0	0	0	100	100-80
1.18	0.6	0.6	0.12	99.88	100-70
0.6	2.4	3	0.6	99.4	100-55
0.3	150	153	30.6	69.4	70-5
0.15	332.8	485.8	97.16	2.84	5-0
0.075	9.9	495.7	99.14	0.86	-
الوعاء	4.3	500	100	0	-

الركام الخشـن: تم توريد الركام الخشـن من أحد المحاجر جنوب مدينة زليتن وهو عبارة عن ركام زاوي الشكل والمقاس الاعتباري الأكبر هو 20 مم، ووزنه النوعي 2.62 ونسبة امتصاصه 1.85% وهي مطابقة للمواصفات القياسية (BS 812 Part 2: 1995) ومعامل التهشيم 20.6% ومعامل الصدم 11.35% وهما مطابقين للمواصـفات القياسـية البريطانية (BS 812 Part110: 1990) و (BS 812 Part110: 1990) والجدول (4) يوضـح نتائج التحليل المنخلي للركام الخشـن حسـب المواصـفات البريطانية BS 882 (2002).

جدول 4. نتائج التحليل المنخلي للركام الخشن

مقاس المنخل (مم)	وزن المحجوز (جم)	الوزن التراكمي المحجوز (جم)	النسبة المئوية للمحجوز (%)	النسبة المئوية للمار (%)	حدود المواصفات (BS 882: 2002)
37.5	0	0	0	100	100
20	447	447	14.9	85.1	100 – 85
14	1400	1847	61.57	38.43	70 – 0
10	1030	2877	95.9	4.1	25 – 0
5	108	2985	99.5	0.5	5 – 0
الوعاء	15	3000	100	0	-

ماء الخلط: تم استخدام ماء الخلط المتوفر في معمل الخرسانة وهو خال من المواد العضوية ومطابق لحدود المواصفات الليبية (م. ق. ل. 1988/294) .

الرمل الصـناعي (غبار المحاجر): تم توريد عينة الغبار من أحد المحاجر جنوب مدينة زليتن، وبعد إجراء اختبار تحديد نسـبة المواد الناعمة للرمل والغبار تبين أن الغبار يحتوي على نسـبة من المواد الناعمة خارج حدود المواصـفات (15%) لذلك تم غسـل عينة الغبار على المنخل رقم (200) للتخلص من المواد الناعمة والوصـول إلى النسـبة المسـموح بها، وتم إجراء اختبار الوزن النوعي للرمل الصـناعي وكانت قيمته 2.58 ونسـبة الامتصـاص كانت 1.19% وهي مطابقة للمواصـفات القياسـية البريطانية الأوروبية (BS- EN 1097_6: 2013) والشكل (2) يوضح مراحل تجهيز العينة، والشكل (3) يوضح الرمل الطبيعي والرمل الصناعي المستخدم والجدول (5) يوضح نتائج التحليل المنخلي للرمل الصناعي حسب المواصفات القياسية البريطانية (BS 812:1992)، والشكل (3) يوضح الرمل الطبيعي والرمل الصناعي المستخدم.

شكل 2. يوضح مراحل تجهيز العينة

شكل 3. صورة توضح الرمل الطبيعي والرمل الصناعي

جدول 5. نتائج التحليل المنخلي للرمل الصناعي (غبار المحاجر)

مقاس المنخل (مم)	وزن المحجوز (جم)	الوزن التراكمي المحجوز (جم)	النسبة المئوية للمحجوز (%)	النسبة المئوية للمار (%)	حدود المواصفات (BS 882: 2002)
2.36	4.4	4.4	0.88	99.12	100 - 80
1.18	61.9	66.3	13.26	86.74	100 - 70
0.6	64.3	130.6	26.12	73.88	100 - 55
0.3	62.2	192.8	38.56	61.44	70 - 5
0.15	88.8	281.6	56.32	4.63	5 - 0
0.75	168.4	450	90	10	-
الوعاء	50	500	100	0	-

الخلطات الخرسانية: تم استخدام الطريقة الوضعية في إعداد الخلطات الخرسانية، حيث تم تثبيت نسب الخلط للإسمنت والركام الناعم والركام الخشن بنسب (3:1.5:1) على التوالي وكانت نسبة الماء إلى الإسمنت في جميع الخلطات (45%). تمت عملية الخلط داخل معمل الخرسانة بكلية الهندسة، الجامعة الأسمرية الإسلامية باستخدام خلاطة أفقية سعتها 0.15 م^3 والشكل (4) يوضح الخلاطة المستخدمة في الخلط، والخطوات التالية توضح طريقة الخلط وإعداد العينات:

- تم غمر الركام بالماء لمدة 24 ساعة ثم تجفيف السطح الخارجي للحصول على ركام مشبع جاف السطح.
- تم إعداد القوالب القياسية ذات أبعاد 150x150x150 مم وأسطوانات ذات أبعاد 300x150 مم وتنظيف السطح الداخلي للقوالب جيدا لمنع التصاق الخرسانة بها.
- تم وزن مكونات الخلطة الخرسانية اللازمة لأعداد العينات الخرسانية.
- تم وضع مكونات الخلطة الخرسانية في الخلاطة الميكانيكية وخلطها على الجاف لمدة دقيقة واحدة.
- أضيف ماء الخلط تدريجيا حتى تتجانس الخلطة وتصبح جاهزة للصب داخل القوالب القياسية في زمن تقريبا أربع دقائق.
- تم صب الخرسانة الطازجة مباشرة في القوالب ودمك الخرسانة جيدا على ثلاث طبقات وتسوية سطحها الخارجي.
- بعد 24 ساعة من صب العينات تم فك القوالب وترقيم العينات حسب الخلطة الخرسانية.

- تم معالجة العينات بالغمر في الماء إلى حين موعد الاختبار بعد سبعة أيام وبعد 28يوم والشكل (5) يوضح العينات في حوض المعالجة والجدول (6) يوضح نسب وأوزان المواد المستخدمة في الخلطات الخرسانية.

شكل 4. خلاطة آلية

شكل 5. العينات في حوض المعالجة

جدول 6. نسب وأوزان المواد في الخلطات الخرسانية.

الخلطة الخرسانية	وزن الإسمنت (كجم)	وزن الركام الخشن (كجم)	وزن الرمل الطبيعي (كجم)	نسب الإحلال %	وزن الرمل الصناعي (كجم)	نسبة الماء إلى الإسمنت W/C %
X1	16	48	24	0	-	45
Y1	16	48	22.8	5	1.2	45
Y2	16	48	21.6	10	2.4	45
Y3	16	48	18	25	6	45
Y4	16	48	12	50	12	45

4. تحليل ومناقشة النتائج

1.4. نتائج اختبار التحليل المنخلي للرمل الطبيعي والصناعي

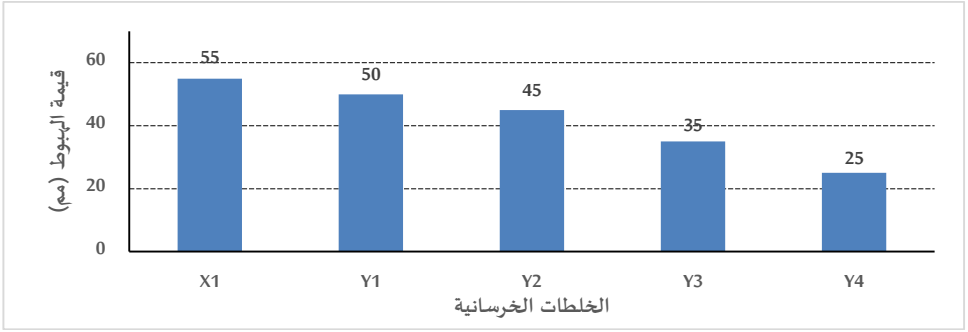
تم إجراء هذا الاختبار حسب المواصفات البريطانية (BS 882: 2002) وكانت نتائج الاختبار مطابقة للمواصفات لكل من الرمل الطبيعي والرمل الصناعي (غبار الكسّارات) كما هو موضح بالجدول (3) والجدول (5).

2.4. نتائج اختبار الوزن النوعي للرمل الطبيعي والصناعي

الوزن النوعي ونسـبة الامتصـاص للرمل الطبيعي والرمل الصـناعي أعطى نتائج مطابقة للمواصـفات القياسيـــــة (BS EN 1097_6: 2013) حيث كان الوزن النوعي للرمل الطبيعي 2.65 وللرمل الصناعي 2.58 بينما كانت نسبة الامتصاص للرمل الطبيعي 0.81 % وللرمل الصناعي 1.19% وهو ما يفسر نقص قيمة الهبوط للخرسانة كلما زادت نسبة إحلال الرمل الصناعي.

3.4. نتائج اختبار الهبوط للخرسانة

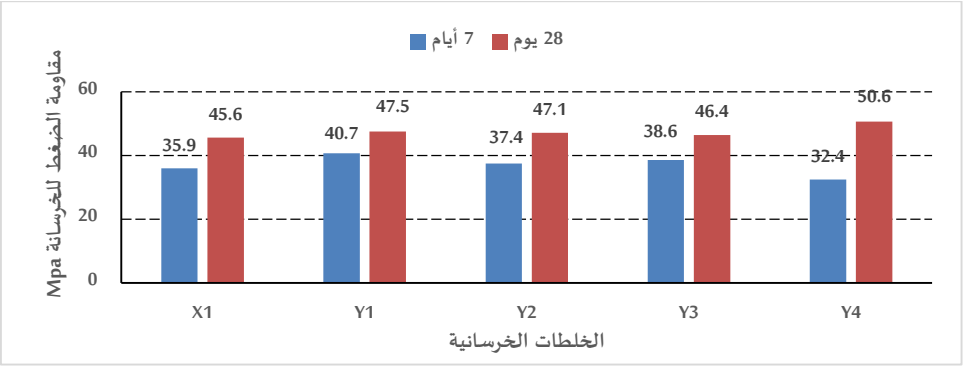
الرمل الصناعي أعطى نتائج ضعيفة لقابلية التشغيل للخرسانة مقارنة بالرمل الطبيعي وهذا واضح من خلال النتائج المرفقة بالشكل (6) حيث أنه كلما زادت نسبة الرمل الصناعي في الخلطة الخرسانية قلّت قيمة الهبوط للخرسـانة وتصـل إلى نسـبة 45% من قيمة الهبوط للرمل الطبيعي عند اسـتخدام الرمل الصـناعي بنسـبة إحلال 50% من الرمل الطبيعي، وذلك لأن نسـبة امتصـاص الماء للرمل الصـناعي أكبر منها للرمل الطبيعي وفق المواصفات القياسية البريطانية الأوروبية (BS EN 12350-2: 2019).



شكل 6. قيمة الهبوط للخلطات الخرسانية

4.4. نتائج اختبار الضغط للخرسانة

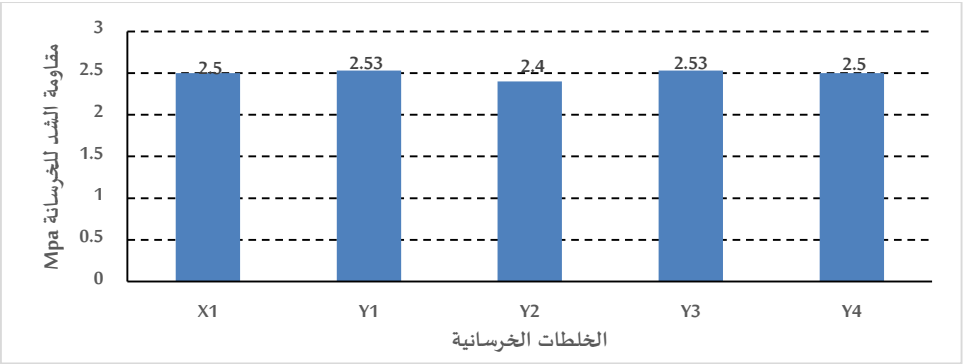
توضح النتائج الموضحة بالشكل (7) المتحصل عليها بعد 7 أيام من غمر المكعبات الخرسانية بالماء أنه عند نسبة إحلال (5)% أعطت أعلى قيمة مقاومة للضغط بينما عند نسبة إحلال (50)% أعطت أقل قيمة مقاومة للضغط، وبعد 28 يوم تبين النتائج المتحصل عليها أنه عند استخدام الرمل الصناعي في جميع الخلطات أعطى قيم لمقاومة الضـغط أعلى من تلك المتحصـل عليها في الخلطة المرجعية وأن نسـبة إحلال (50)% أعطت أعلى قيمة مقاومة، ويرجع سـبب زيادة مقاومة الضـغط للخرسـانة عند اسـتخدام الرمل الصـناعي مقارنة بالرمل الطبيعي أن الرمل الصـناعي حبيباته خشـنة وله حواف حادة وبـالتـالي يعطي أكثر تمـاســـك مع العجينـة الإســمنتيـة وفق المواصــفـات القيـاســيـة البريطـانيـة (BS 1881 Part 116: 1983).



شكل 7. مقاومة الضغط للخلطات الخرسانية

5.4. نتائج اختبار الشد الغير مباشر للخرسانة

يوضح الشكل (8) تأثير الرمل الصناعي على نتائج اختبار الشد الغير المباشر، ومن خلال النتائج نلاحظ أن مقاومة الشد الغير مباشر بعد 28 يوم لا تتغير بشكل كبير عند استخدام الرمل الصناعي مقارنة بالرمل الطبيعي وفق المواصفات القياسية البريطانية (BS 1881 Part 117: 1983).



شكل 8. نتائج اختبار مقاومة الشد الغير مباشر

5. الاستنتاجات والتوصيات

1.5. الاستنتاجات

اعتماداً على النتائج المعملية التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة وبعد مناقشة هذه النتائج أمكن التوصل إلى الاستنتاجات التالية:

- نتائج الاختبارات على الرمل الصناعي بينت أن التدرج الحبيبي للعينة ضمن حدود المواصفات وأن الوزن النوعي للرمل الصناعي كان داخل حدود المواصفات (2.58) ونسبة الامتصاص للرمل الصناعي كانت ضمن حدود المواصفات كذلك (1.19%).
- نسبة الامتصاص للرمل الصناعي (1.19%) أعلى من الرمل الطبيعي (0.81%) لذلك كلما زادت نسبة الرمل الصناعي في الخلطة الخرسانية قلت التشغيلية.
- نتائج الاختبارات للركام الخشن والتي تشمل التدرج الحبيبي، معامل التهشيم (20.6%)، معامل الصدم (11.35%) كانت ضمن حدود المواصفات.
- الوزن النوعي (2.62) ونسبة الامتصاص (1.85%) للركام الخشن كانت ضمن حدود المواصفات.
- أن عملية إحلال الرمل الصناعي كأحد مكونات الخلطة في الخرسانة تقود إلى زيادة ملحوظة في مقاومة الضغط للخرسانة، حيث تم الحصول على أعلى مقاومة ضغط (50.6MPa) عند نسبة الإحلال (50) %.
- إن استخدام الرمل الصناعي (غبار المحاجر) في الخرسانة يساعد على تحسين البيئة حيث يقلل من آثاره السلبية.

2.5. التوصيات

من خلال الاختبارات التي تمت في هذه الدراسة لوحظ أن هناك عدد كبير من الأفكار والاقتراحات التي من الممكن أن تتضمنها بعض الدراسات المستقبلية لاستكمال هذا البحث بما يحقق المزيد من المعلومات والبيانات التي ربما تساهم في إعداد دليل إرشادي لاستخدام الرمل الصناعي بشكل اقتصادي وبيئي ومن هذه التوصيات ما يلي:

- نوصي بدراسة تأثير إحلال كلّي للرمل الصناعي بنسبة 100% من الرمل الطبيعي على خواص الخرسانة.
- نوصي بدراسة تأثير الأحماض على الخرسانة المضاف إليها الرمل الصناعي.
- نوصي بدراسة النفاذية على الخرسانة الحاوية على الرمل الصناعي.
- نوصي بدراسة تأثير الاختبارات الغير متلفة على الخرسانة الحاوية على الرمل الصناعي.
- نوصي بدراسة مقاومة الانحناء عند إضافة نسب مختلفة من الرمل الصناعي للخرسانة.
- نوصي بدراسة تأثير إضافة الرمل الصناعي على معامل المرونة للخرسانة.
- نوصي باستخدام إضافات لزيادة التشغيلية للخرسانة الحاوية على الرمل الصناعي.

- نوصي باستخدام الرمل الصناعي الناتج من غبار المحاجر في الخرسانة ضمن حدود هذا البحث.
- نوصي بإيجاد تقنيات لغسل كميات كبيرة من غبار المحاجر.

المراجع

أولا: المراجع باللغة العربية

الباحثون السوريون (2015). *الخرسانة الخضراء وصناعة الخرسانة بمواد صديقة للبيئة*. على الرابط: https://www.syr-res.com/article/6885.html

تليش، سعاد أبوالقاسم سالم؛ الطاهر، لطفي الطاهر (2025). دراسة تأثير خبث الأفران كبديل جزئي للرمل على الخواص الهندسية للخرسانة ذاتية الدمك. *المجلة الأفريقية للعلوم المتقدمة البحتة والتطبيقية*، 4(1)، 319-336.

حاوي، خالد حسن (2015). تأثير الرماد المتطاير كبديل جزئي عن الرمل على خواص خرسانة الركام الخشن المعاد. *مجلة جامعة بابل: العلوم الهندسة*، 23(4)، 804-820.

فهيم، محمد السيد (2022). *الرمل الصناعي*. موقع هندسة اكس واي زيد، على الرابط: https://www.handasa.xyz/2020/09/m-sand-properties-advantages-disadvantages.html

محمد، زينة عادل (2011). تأثير إضافة مخلفات البورسلين كبديل جزئي عن الركام الناعم على بعض الخصائص الهندسية للخرسانة. *مجلة هندسة الرافدين*، 19(4).

المواصفات القياسية البريطانية (BS 812 Part2: 1975) طريقة إجراء اختبار تحديد نسبة المواد الناعمة.

المواصفات القياسية البريطانية الأوروبية رقم (BS EN 12350-2: 2019) لاختبارات الخرسانة الطازجة–اختبار الهبوط.

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

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

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

المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS 812 Part 110: 1990)، طريقة إجراء اختبار التهشيم للركام الخشن وحدود مواصفاته.

المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS 812 Part 112: 1990)، طريقة إجراء اختبار الصدم للركام الخشن وحدود مواصفاته.

المواصـــفات القياســـية البريطانية رقم (BS 812 Part 2: 1995)، طريقة إجراء اختبار الوزن النوعي ونســـبة الامتصاص للركام الخشن وحدود مواصفاته.

المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS812:1992) خواص الخرسانة للركام الناعم.

المواصفات القياسية البريطانية رقم (BS882: 2002) طريقة إجراء اختبار التحليل المنخلي للركام الخشن.

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

المواصفات الليبية القياسية رقم (340) الإسمنت البورتلاندي لسنة 2009.

ثانيا: المراجع باللغة الإنجليزية

Mamaru, D. (2020). Suitability of crushed manufactured sand for replacement of natural river sand to produce C-25 concrete. *J. Civ. Environ. Eng,* 10(7).

Vijayaraghavan, N., & Wayal, A. S. (2013). Effects of manufactured sand on compressive strength and workability of concrete. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 2(4), 228-232.