Al - Saeed University Journal of Applied Sciences
journal@alsaeeduni.edu.ye
Vol (8), No (1), Aug., 2025
ISSN: 2616 - 6305 (Print) ISSN: 2790-7554 (Online)

إعادة تدوير مخلفات البناء لتحويل التحديات البيئية إلى فرص هندسية واستخدامها كمواد أساسية في الخرسانة

د/ عبدالرقيب أحمد علي غالب
كلية الهندسة وتقنية المعلومات، جامعة الجند

د/ عبدالكريم قاسم القادري
كلية الهندسة وتقنية المعلومات، جامعة الجند

م/ عمار قاسم احمد الاهدل
كلية الهندسة وتقنية المعلومات، جامعة الجند

Received: 25/6/2025 **Accepted: 28/7/2025**

Journal Website: https://journal.alsaeeduni.edu.ye

إعادة تدوير مخلفات البناء لتحويل التحديات البيئية إلى فرص هندسية واستخدامها كمواد أساسية في الخرسانة

د/ عبدالرقيب أحمد علي غالب
كلية الهندسة وتقنية المعلومات، جامعة الجند

د/ عبدالكريم قاسم القادري
كلية الهندسة وتقنية المعلومات، جامعة الجند

م/ عمار قاسم احمد الاهدل
كلية الهندسة وتقنية المعلومات، جامعة الجند

الملخص

تشكل مخلفات البناء تحديًا بيئيًا واقتصاديًا كبيرًا ومع زيادة كمية مخلفات البناء الناتجة عن عمليات الهدم والحروب والكوارث الطبيعية يزداد تأثيراتها السلبية. يقابل ذلك استنزاف للموارد الطبيعية لإنتاج مواد بناء جديدة، إضافة إلى المشاكل الاقتصادية الناتجة عن ازدياد كلفة التخلص من هذه المخلفات ومع ذلك، فإن هذه المخلفات، عندما تُدار بشكل صحيح، يمكن أن تتحول إلى فرص هندسية واقتصادية قيمة.

يهدف هذا البحث إلى استكشاف إمكانية إعادة تدوير الخرسانة المهدمة كمادة بديلة في مكونات الخرسانة، بهدف الحصول على خرسانة جيدة وتقليل الاعتماد على المواد الخام التقليدية.

تضمن هذا البحث اختبار خصائص الركام الخشن المعاد تدويره من تلك المخلفات، ودراسة تأثيره على خواص الخلطة الخرسانية. تم إعداد أربع خلطات مختلفة حاوية على نسب استبدال مختلفة (100%، 70%، 50%، 30%) من الركام المدور وتم دراسة مدى تأثير ذلك الركام على جودة وخصائص الخرسانة، من خلال قابلية التشغيل ومقاومتها لإجهاد الضغط عند كل نسبة استبدال، ومقارنة تلك النتائج مع الخلطة المرجعية الحاوية على نسبة استبدال 0% من الركام المدور.

وقد كانت النتائج إيجابية لاختبارات الخرسانة الطازجة والمتصلدة، حيث اعطت نتائج اختبار الخرسانة الطازجة، قيم جيدة للهطول الخرساني وضمن المتوقع (2–10سم)، للخلطات الحاوية على نسب استبدال (30%، 50%، 70%)، عدا الخلطة الحاوية على نسبة استبدال 100% من الركام المدور فقد انعدمت قابلية التشغيل نسبياً، وذلك نتيجة لزيادة امتصاصية الركام المدور لمياه الخلط، والذي ادى بدورة إلى انخفاض نسبي في نتائج اختبار الخرسانة المتصلدة بعد 28 يوم للخلطة الحاوية على تلك النسبة من الركام المدور، حيث انخفضت مقاومة اجهادها للضغط بمقدار 12.5% عن الخلطة المرجعية، بينما كان نتائج اختبار الخرسانة المتصلدة للخلطة الحاوية على نسبة (70%، 50%، 30%) من الركام المدور قد اعطت نتائج إيجابية في مقاومتها لإجهاد الضغط، مقارنة مع العينات المرجعية، حيث تشير إلى انخفاض طفيف في مقاومتها لإجهاد الضغط مقارنة بالانخفاض في الخلطة بنسبة استبدال 100 % وذلك بمقدار (9.3%، 8.75%، 6.25%) عن الخلطة المرجعية على التوالي، تُظهر هذه الدراسة إمكانية الاستفادة من تلك المخلفات، كبديل للمواد الأولية (الركام الخشن) بنسب مختلفة في إنتاج خرسانة ذات جودة مقبولة، في مجموعة متنوعة من الاستخدامات الإنشائية.

الكلمات المفتاحية: إعادة تدوير مخلفات البناء، الخرسانة المضافة، الأداء البيئي، الاستدامة الإنشائية.

Recycling construction and demolition waste to transform environmental challenges into engineering opportunities and utilizing it as a primary material in concrete

Dr. Abdulrakeeb Ahmed Ali Ghaleb
Faculty fo Engineering & IT, Aljanad University

Dr. Abdulkarim Qassem Al- Qaderi
Faculty fo Engineering & IT, Aljanad University

Eng. Ammar Qassem Al-Ahdel
Faculty fo Engineering & IT, Aljanad University

Abstract

Construction and demolition waste presents significant environmental and economic challenges, particularly with increasing quantities resulting from demolition, wars, and natural disasters. These effects are further compounded by the depletion of natural resources required to produce new construction materials and the rising costs associated with waste disposal. However, when properly managed, such waste can be transformed into valuable engineering and economic opportunities.

This study investigates the feasibility of recycling demolished concrete as a substitute material in concrete mixtures to produce acceptable-quality concrete and reduce reliance on conventional raw materials. The research involved testing the properties of recycled coarse aggregate and evaluating its impact on concrete mix performance. Four mixes were prepared with varying replacement ratios of recycled aggregate (30%, 50%, 70%, and 100%) and compared with a reference mix containing 0% recycled aggregate.

The results were generally positive for both fresh and hardened concrete. Mixes with 30%, 50%, and 70% replacement showed satisfactory slump values (2–10 cm), indicating good workability. However, the 100% replacement mix exhibited poor workability due to the high water absorption of recycled aggregate, which also led to a 12.5% reduction in 28-day compressive strength compared to the control mix. In contrast, the 30%, 50%, and 70% mixes showed minor reductions in compressive strength (6.25%, 8.75%, and 9.3%, respectively), suggesting their potential use in structural applications.

This study demonstrates the potential of using recycled aggregate as a partial replacement for natural coarse aggregate in concrete production, providing a sustainable solution for construction waste management while maintaining acceptable performance standards.

Keywords: Construction waste recycling, Recycled aggregate concrete, Environmental performance, Sustainable construction.

المقدمة:

أدى زيادة النمو الاقتصادي وزيادة عدد السكان واتساع المناطق الحضرية وشق الطرق وازدياد الحاجة للبناء والتوسع العمراني وتشييد المباني الجديدة، إلى زيادة كبيرة في استخدام الخرسانة، بما يقابل استهلاك المواد الخام الطبيعية بكميات كبيرة وهذا له تأثير مباشر على البيئة واستهلاك الطاقة، اضف الى ذلك الأحداث الجارية والمتلاحقة في المنطقة العربية وتحديدا اليمن والتي يقابلها الدمار الشديد في البنى التحية، وضع كل هذه الأسباب لتولد ملايين الأطنان من مخلفات البناء والهدم الناتجة عن دمار البنية التحتية، حيث ان تلك المخلفات تزايد طبقا لاستمرار فترة الحرب ومدتها ومع مجيء مرحلة الاعمار والتنمية وكذلك الترميم، وكل من هذه العمليات سواء كانت هدم أم إعادة اعمار تنتج لنا الكثير من المخلفات التي يصعب علينا التعامل معها.

اضافة لما تنتجه تلك المخلفات من أضرار بيئية كبيره واقتصادية في طرق التخلص منها. ونتيجة لذلك أصبح لدينا مشكلتان، الأولى تتمثل في نقص للمواد الخام اللازمة لإنتاج خرسانة جديدة، والثانية في كيفية التخلص من ركام ومخلفات الهدم للخرسانة، من هنا نشأت فكرة إعادة تدوير الخرسانة القديمة والتي أصبحت توجه عالمي يحظى باهتمام بالغ وخاصة في الدول المتقدمة، التي قطعت شوطا واسعا في عملية التدوير ومحاولة الاستفادة من مخلفات البناء لما في ذلك من فوائد جمة ذات مردود كبير في توفير المواد الخام وتقليل استهلاك الطاقة والانبعاث الحراري.

أما في معظم الدول النامية ومنها بعض الدول العربية لم تعط هذه القضية الاهتمام الكافي حتى الآن، حيث يكون مصير هذه المخلفات في أعمال الدفن للأراضي المنخفضة، وفي مساحات خضراء أو في التكديس بشكل غير قانوني في الأراضي الخالية وغالبا ما تهدر في مكبات النفايات التي أصبحت الآن غير قادرة على استيعاب كل هذه المخلفات بفعل الأوضاع الاستثنائية التي نمر بها من دمار البني التحتية وإعادة الإعمار، ورغم كل ذلك إلا أن موضوع إعادة تدوير تلك المخلفات لم يعط الاهتمام الكافي سواء من قبل الشركات المصنعة ولا متخذي القرار وواضعي السياسات البيئية والتخطيط الحضري، ولا حتى من الباحثين والمهندسين.

هذا وغيره ما دفعنا إلى إنجاز هذه الدراسة والتي سوف نعمل من خلالها في محاولة التخلص من الأثر البيني الناتج من هذه النفايات واستخدام منهجية دور الحياة لتحديد طرق المعالجة التي تقدم أفضل الحلول والتحسينات على البيئة والاقتصاد المحلي والوطني.

المشكلة البحثية:

ساهم توسع المدن في كثافة الأعمال الهندسية المختلفة، والتي نتج عنها كميات هائلة من المخلفات الانشائية، وتُعد عمليات البناء والتشييد من أكبر المساهمين في إنتاج النفايات الصلبة الناتج من عمليات البناء والهدم على مستوى العالم، حيث تُنتج كميات هائلة من مخلفات البناء

وعلى رأسها الخرسانة المهدمة، حيث دمّر ما لا يقل عن 3,000 مبنى بنحو 350–1,000 طن مخلفات لكل مبنى، فإن الكمية الإجمالية لمخلفات الهدم نتيجة الحرب تُقدّر بين 1.0–3.0 مليون طن منذ بداية الحرب وحتى عام 2025م (https://ceobs.org). حيث تعتبر المخلفات الناتجة عن عمليات البناء والهدم واحدة من أكبر أجزاء المخلفات في العالم، ومع تفاقم الحروب وانهيار البلدان ودمار البنية التحتية يزداد الحاجة إلى النشاط العمراني القائم على إعادة الترميم مما يقابله ذلك إلى زيادة في كمية المخلفات التي تتسبب بالعديد من المشاكل منها:

1- المشاكل البيئية: كان ذلك صحيا، وايضا بصريا على مستوى المنظر الجمالي المدينة

2- المشاكل الاقتصادية: الناتجة في زيادة تكاليف الهدم والتي تعمل على إعادة نشاط الحركة العمرانية الذي يقابله زيادة تكاليف طرق التخلص من تلك المخلفات، وإعادة بناء العديد من المشروعات السكنية بصفة خاصة والمشاريع الحكومية بصفة عامة.

ويتطلب ذلك زيادة في استهلاك الموارد الطبيعية لإنتاج مواد البناء اللازمة بالإضافة إلى الاستنزاف الكبير للموارد الطبيعية على كوكب الأرض وإذا ما علمنا أيضا أن مخلفات البناء والهدم عند انتهاء العمر النافع للمباني والمنشأت تمثل نسبة كبيرة من كمية المخلفات التي ترمي إلى أماكن مفتوحة خضراء أو جبلية كما هو الحال في مدينة تعز، وبذلك يتضح حجم الأثر البيئي التي تمثله هذه المخلفات، ويرتفع مؤشر نسبة المخلفات بشكل كبير في الدول التي تعاني من الحروب والأزمات كاليمن، ومن ثم يتبادر في أذهاننا إلى اين تذهب كل تلك المخلفات؟ هل يوجد مكان مخصص لا يؤثر على البيئة يستوعب كل تلك الكميات؟ والتخلص منها بشكل سليم؟ إلى متى سنستمر بهدر تلك المخلفات واستنزاف الموارد الطبيعية؟

هل يمكننا تحديد النسب الدقيقة من مخلفات البناء المهدمة التي لا تؤثر على خصائص الخرسانة (القوة، المتانة) في حال إعادة تدويرها وهل يمكننا تطوير طرق فعالة ومستدامة لمعالجة هذه المخلفات وتحضيرها للاستخدام في الخرسانة؟

ومن جانب آخر نتساءل لماذا نقوم بهدر كل تلك المخلفات دون الاستفادة منها على الرغم من انها ثروة حقيقة، وفي الوقت ذاته نقوم بالتخلص منها ونقلها الى اماكن بعيده بتكاليف كبيره ودون التخلص منها بشكل امن وسليم اضافة الى تولد اضرار بيئية كبيره وبهذا تبقى عبئا بيئيا على الدولة والمجتمع لذا فإن فكرة اعادة تدوير تلك المخلفات يجب أن تحضى بأهمية استثنائية، والعمل على وضع استراتيجيات تحد من التلوث البيئي، والاستفادة القصوى من تلك المخلفات التي تساعد في خلق دورة مغلقة لتلك الموارد وإعادة تدويرها واستخدامها مرة أخرى كمواد جديدة، مع الحفاظ على الموارد الطبيعية للأجيال القادمة.

أهمية الدراسة:

تُعد دراسة إعادة تدوير مخلفات البناء لاستخدامها في صناعة الخرسانة خطوة حيوية نحو تحقيق التنمية المستدامة في قطاع البناء. فهي لا تحل مشكلة بيئية كبيرة فحسب، بل تقدم أيضًا حلولًا هندسية مبتكرة وفرصًا اقتصادية واعدة. من خلال تحويل النفايات إلى موارد، يمكننا بناء مستقبل أخضر وأكثر كفاءة في استخدام الموارد.

1- الأهمية البيئية:

- التقليل من تراكم النفايات وبالتالي الحد من التأثير البيئي السلبي.
- خفض انبعاثات الكربون: استخدام مواد معاد تدويرها، يمكن تقليل الاعتماد على المواد الخام الجديدة وبالتالي خفض البصمة الكربونية للمشاريع الإنشائية.
- الحفاظ على الموارد الطبيعية: إعادة تدوير مخلفات البناء تقلل الحاجة إلى استخراج المواد الخام مثل الركام الطبيعي.

2- الأهمية الاقتصادية:

- تخفيض تكاليف البناء: يمكن أن يؤدي استخدام مواد معاد تدويرها إلى خفض تكاليف المواد الخام والنقل والتخلص من النفايات.
- خلق فرص عمل جديدة: عملية جمع وفرز وتدوير مخلفات البناء توفر فرصًا لخلق وظائف جديدة في قطاع الاقتصاد الأخضر.
- زيادة القيمة المضافة للمشاريع: الشركات التي تعتمد على الاستدامة وتستخدم مواد صديقة للبيئة، مما يزيد من قيمة المشروع ويمنحها تنافسية في السوق.

3- الأهمية الهندسية:

- إنتاج خرسانة مستدامة باستخدام بعض المواد المعاد تدويرها، يمكن بها الحصول على خرسانة جيدة الخواص.
- تطوير تقنيات بناء مستدامة من خلال استخدام مخلفات البناء في الخلطات الخرسانية سيفتح آفاقًا جديدة أمام الباحثين والمصممين لتطوير تقنيات بناء مبتكرة ومتوافقة مع معايير الاستدامة العالمية.
- تعزيز مفهوم البناء الأخضر: من خلال دعم مفهوم البناء المستدام (Sustainable Construction) الذي يركز على تقليل التأثير البيئي للعمليات الإنشائية عبر دورة حياتها الكاملة.

الهدف من الدراسة:

هذه الدراسة لها هدف رئيسي هو توفير الحلول العملية للاستفادة من مخلفات البناء والهدم وتحديد النسب المثالية من المخلفات التي يمكن استخدامها لإنتاج خرسانة مستدامة جيدة في خصائصها الميكانيكية، وخفض التكاليف، من خلال الاتي:

1-المساهمة في تطوير حلول مستدامة لإدارة مخلفات البناء وتقليل الأثر البيئي لصناعة البناء.
2-الحفاظ على الموارد الطبيعية باستبدالها بمواد معاد تدويرها
3- التقليل من الأثر البيئي الكبير الناجم من تلك المخلفات ومن انتاج مواد جديدة
4- المساهمة في خفض تكاليف أسعار بعض المواد الاساسية للبناء ورفع مستوى أنشطة البناء في البلاد.
5-العمل على خلق دورة مغلقة بقدر الامكان تستوجي استخدام المواد بإعادة تدويرها لاستخدامها من جديد في الخلطة الخرسانية.
6-التقليل من مخاوف الهدم ومما ينتجه من مشاكل اقتصادية سواء في طرق نقل المخلفات أو التخلص منها.
7- العمل على رفع نسبة الاستثمار في البلاد وتوفير فرص عمل جديدة.

منهجية البحث:

تركز الدراسة إلى تحويل مخلفات الهدم إلى مواد اساسية مثل الركام الخشن واعادة استخدامه في التصميم الخلطة الخرسانية ومن ثم اختبار مدى قابلية تلك المواد على مقاومة الانضغاط في الخلطة الخرسانية للحصول على تقييم ما إذا كان استبدال الركام الخشن الطبيعي بركام مستخرج من الخرسانة المعاد تدويرها أقل تكلفة مع الحفاظ على قوة الخرسانة، ستعتمد هذه الدراسة على المنهج التجريبي من خلال:

1- اخذ عينات من مختلف الأماكن والمنشأت المعرضة الهدم
2- طحن العينات وتحويلها إلى ركام خشن
3- اختبار بعض الخواص الميكانيكية للركام
4- تصميم خلطات خرسانية حاوية على نسب استبدال مختلفة من الركام المعاد تدويره.
5- اختبار الخلطات الخرسانية المنتجة باستخدام الركام المعاد تدويره لكل من قابلية التشغيل وإجهاد الضغط.

الدراسات السابقة:

يهدف هذا الاستعراض الشامل لما توصلنا له من دراسات الى تحديد الفجوات المعرفية الحالية وتوجيه مسار البحث الحالي نحو معالجة هذه الفجوات وتقديم حلول عملية ومستدامة لإعادة تدوير مخلفات البناء واستخدامها في إنتاج الخرسانة المستدامة.

- دراسة (م. طرنبه، د. الباشا واخرون، 2022) هدفت الدراسة إلى استخدام ركام خشن معاد تدويره (RA) والمتحصل عليه من إعادة تدوير مخلفات مباني مدمرة ببلدية الزاوية في صناعة عينات خرسانية صديقة للبيئة (RAC) بنسب إستبدال مختلفة (30%، 50%، 70%، 100%) كبديل

عن استخدام الركام الطبيعي، وذلك للتحقق من مدى إمكانية استخدام هذا النوع من الخرسانة (RAC) بالمقارنة مع خواص الخرسانة الطبيعية .(NAC) نتائج هذه الدراسة أظهرت أن استخدام (RA) يؤثر على خواص الخرسانة (RAC) وأنه كلما زادت نسبة الاستبدال انخفضت خواص الخرسانة (RAC) مقارنة مع الخرسانة (NAC) كقابلية التشغيل ومقاومة الخرسانة للضغط. ومع ذلك لم يكن الانخفاض كبير عند استخدام نسبة استبدال تراوحت بين (0 –50%).

- دراسة (م. ليلى اللحام، 2017) هدف الدراسة اظهار امكانية الاستفادة الفعلية من مخلفات الإنشاء والهدم الانشائية بإعادة استخدامها أو تدويرها، مما له اثرا ايجابيا بيئيا واقتصاديا وتقنيا، مع توضيح المعوقات التي تحول دون استخدام هذه المخلفات، تم اجراء بعض التجارب الداعمة المتعلقة في الموضوع، لدراسة تأثير استخدام الحصوات المعاد تدويره من الخرسانة المتصلبة سابقاً على انتاج خرسانة حديثة، من حيث المقاومة على الانضغاط وقابلية التشغيل، أجريت الاختبارات على ثلاثة انواع من الخلطة الخرسانة تحتوى كلا منها على نسبة استبدال مختلفة (0%، 50%، 100%) من الركام المعاد تدويره وجد أن إجراءات تصميم الخلطة الخرسانية من الحصوات المعاد تدويره يتطلب كمية أكثر من الماء للحصول على فاعلية تشغيل مشابهة الخلطة التي نسبة استبدالها (0%)، وذلك لأن الحصويات المدورة لديها قدرة امتصاص عالية للماء، وتبين ايضا انخفاض في مقاومة الضغط يصل إلى حوالي 35% في العينات التي كانت نسبة استبدالها 100%، مع عدم قبول قابلية التشغيل لتلك العينة عند استخدام النسبة w/c=0.5، وكانت نسبة الهبوط لها 1.5 سم، اما في العينات التي نسبة الاستبدال 50% من الحصويات المدورة، اظهرت اداء افضل بكثير حيث انخفضت مقاومتها حوالي 15% فقط مقارنة مع الخلطة المرجعية، مع اداء مقبول القابلية التشغيل لتلك العينة، وأظهرت النتائج أن نسبة الفراغات في العينات التي تحتوي على نسب استبدال كان أكبر مما يؤدي ذلك إلى الحصول على كثافة اقل بسبب المسامية العالية في الحصويات المدورة.

- دراسة (مازن القطان، ايمان عبد الرحمن وحسان محمود، 2012) تضمنت هذه الدراسة اختبار خصائص خلطة خرسانية معدة باستخدام ركام خشن معاد تدويره ناتج من مخلفات الخرسانة المحلية بعد إزالة قطع الحصى الكبيرة منها، أي استخدام مونة هذه المخلفات بعد تكسيرها وتدريجها لتكون مطابقة للمواصفات القياسية البريطانية، أوضحت النتائج إن الوزن النوعي لهذا الركام هو (2.124) وهو أقل منه للركام الخشن الاعتيادي المحلي الذي يكون عادة حوالي (2.65) وكذلك نسبة الامتصاص له كانت (10.8%) وهي أعلى منها للركام الاعتيادي المحلي التي تتراوح عادة بين (1–0.5%) والسبب في ذلك يعود إلى أن نسبة المسامية في داخل حبيبات هذا الركام أعلى منها للركام الاعتيادي مما يقلل من الوزن النوعي ويزيد من نسبة الامتصاص.

كما أوضحت النتائج أن الخرسانة المعدة من هذا الركام لها مقاومة انضغاط وامتصاص مقبولين ضمن حدود المواصفة القياسية العراقية الخاصة بنسبة الخلطة الخرسانية ولكنها قريبة من الحدود الدنيا له، وتوصل أيضا إلى أن الخرسانة ذات الركام المعاد تدويره من مخلفات الخرسانة مناسبة للاستخدام في رصف الطرق الخرسانية وساحات وقوف السيارات والأرصفة والمماشي وفي عمل كتل البناء الخرسانية.

- دراسة (ن. ماكولي، ف. روماني، واخرون، 2021) تتناول هذا الدراسة طرق تحسين خليط الخرسانة المنتجة باستخدام RCAs، بهدف تقليل التكاليف، وتلبية المعايير الهيكلية والأداء وفقًا لتطبيقها والعوامل البيئية، وقد حددت حالة وآفاق المستقبل لاستراتيجية تصميم الخرسانة المعاد تدويرها. في حين أن هناك نقصًا حاليًا في الوعي المجتمعي، والبحوث التطبيقية، واستراتيجية تطوير واضحة، يمكن للخرسانة المصنوعة من خلال الاستبدال الكامل للركام الطبيعي إنتاج خرسانة عالية الجودة اعتمادا على المعالجة المطولة واستخدام المواد البوزولانية مع تعديل نسب الأسمنت.
- دراسة (م. ساسين، س. روكيد، واخرون، 2025) طورت هذه الدراسة مفاهيم لإعادة استخدام مواد البناء، بما في ذلك مخلفات البناء، وتتجلى الفرص الرئيسية التي حددتها هذه الدراسة لتحويل مخلفات البناء والهدم من النفايات الصلبة في عمليات الهدم الى إعادة تدويرها الى مواد وأنظمة البناء القائم على الاستدامة، عملية إعادة تدوير نفايات البناء والهدم يشبه مصنع لإنتاج الركام الطبيعي المسحوق، تتمثل الطريقة الأساسية لإعادة تدوير نفايات الخرسانة والبناء في سحق الأنقاض لإنتاج منتج حبيبي ذي حجم جسيمات محدد. تُصنف مصانع معالجة نفايات الهدم بناءً على قابلية الحركة، ونوع الكسارة، وعملية الفصل. بشكل عام، تشمل هذه التطبيقات التي لا تتطلب أي معالجة ما يلي: أنواع الحشوات من العامة، حماية ضفاف القنوات، القاعدة أو الحشو لهياكل الصرف، بناء الطرق، حواجز السدود، معظم ركام الخرسانة المسحوقة غير المُعالجة بمقاسات 37.5 مم أو 50 مم لطبقات الأساس للرصف، بعد إزالة الملوثات من خلال الهدم الانتقائي، والغربلة، وفصل الهواء، وتقليل الحجم، يمكن استخدام الخرسانة المسحوقة في الخرسانة الجديدة للأرصفة والأكتاف والحواجز الوسطى والأرصفة والمزاريب والجسور.
- دراسة (س. كشكاش، ز. اوربان، ا. تشوبولي، 2021) هدفت الدراسة إلى تقييم إمكانية استخدام الركام المعاد تدويره والركام المسترد (Reclaimed Crushed Aggregates) كبديل للركام الخشن الطبيعي في الخرسانة، وذلك من خلال تحليل تأثير هذا الاستبدال على الخصائص الميكانيكية وقابلية التشغيل ومتانة الخرسانة الناتجة. تم تحضير خلطات خرسانية تراوحت نسب الاستبدال بين 0% (خرسانة تقليدية)، و50% ركام معاد، و50% ركام مسترد، وأخيراً 100% ركام مسترد. وأظهرت النتائج أن الخرسانة المنتجة باستخدام الركام المعاد تدويره والمسترد يمكن

أن تكون بديلاً فعالاً للخرسانة التقليدية، حتى في التطبيقات الإنشائية، شريطة الالتزام بشروط الخلطة المناسبة ومراعاة متطلبات المتانة. كما تم تسجيل زيادة ملحوظة في مقاومة الضغط للخرسانة المعاد تدويرها، بلغت حوالي 45% عند استخدام 100% ركام مسترد مقارنةً بالخرسانة المرجعية، بينما كانت الزيادة 12% و20% عند استخدام 50% ركام معاد و50% ركام مسترد على التوالي. من حيث قابلية التشغيل، أظهرت الخلطات التي تحتوي على نسبة استبدال تصل إلى 50% سلوكاً مشابهاً للخرسانة التقليدية، بينما انخفضت القابلية بشكل ملحوظ عند استخدام 100% ركام مسترد. بالإضافة إلى ذلك، تبين أن الخرسانة المعاد تدويرها أقل عرضة لاختراق الماء مقارنةً بالخرسانة التقليدية، مما يشير إلى تحسن في بعض جوانب المتانة.

طريقة ومواد الدراسة:

لتحقيق الأهداف الأساسية للدراسة واستخلاص حلول عملية للاستفادة من مخلفات الخرسانة التالفة الناتجة عن هدم المنشآت. تم إعادة تدوير هذه المواد وتحويلها إلى ركام خشن (مدور)، ومن ثم استخدامه بنسب استبدال مختلفة في تحضير خلطات خرسانية، ضمن برنامج تجريبي شامل يتضمن إعداد خلطة مرجعية تحتوي على 100% ركام طبيعي، بالإضافة إلى خلطات أخرى باستبدال الركام الطبيعي بنسبة 30%، 50%، 70%، و100% من الركام المدور، بعد صب العينات واختبارها، تم جمع النتائج وتحليلها إحصائياً لتحديد تأثير نسب الاستبدال على كثافة الخلطات وبعض خصائصها الميكانيكية، مع إجراء مقارنة شاملة بين النتائج والخلطة المرجعية.

1 – المواد الأولية: وتتألف من:

1–الإسمنت: تم استخدام إسمنت بورتلاندي يتوافق مع متطلبات مواصفات ASTM القياسية، وتم التأكد من خصائصه الفيزيائية والميكانيكية قبل استخدامه في تحضير الخلطات الخرسانية، والجدول التالي يوضح خصائص الاسمنت مع متطلبات ASTM.

جدول (1)

خصائص الاسمنت ومتطلبات ASTM

Tast Name	Tools used	Results	ASTM code	Iimits
Consistency (water/cement ratio)	Vicat device	33%	C191-19 C807-20	
Initial setting time	Vicat device	45 min	C191-19 C807-20	>45 minutes
Final setting time	Vicat device	245 min		<375 minutes
Fineness of cement	Sieve 90micro	3.2%	C184-83	Up to 10% mm
Soundness	Le chatelier	3 mm	C151	
Compressive strength	Compression machine	19.8 N/m^2 at 7 days	C 109	Up to 17.5 N/m^2 at 7 days

2- الماء: استخدمت مياه ابار (مياه جوفية) نظيفة وخالية من أي شوائب مرئية وكان الرقم الهيدروجيني [PH=7.8].

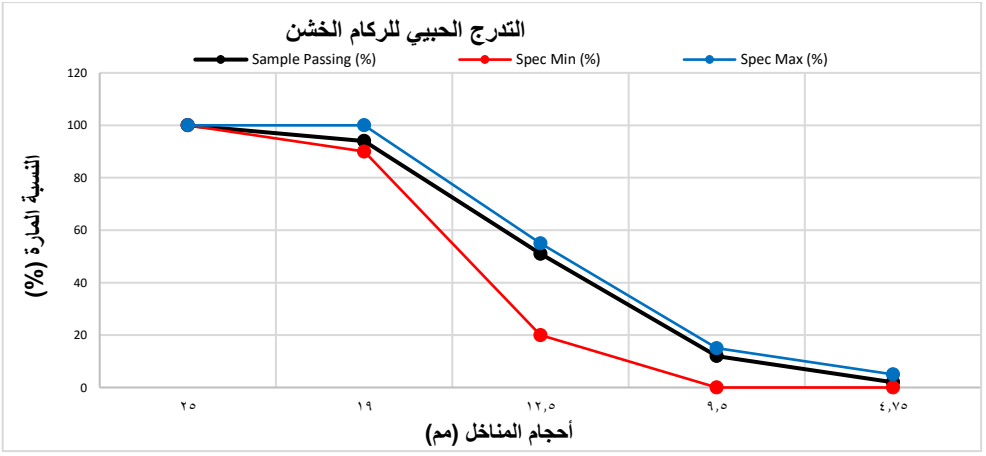
3-الركام الخشن: ركام طبيعي: مصدره كسارة الضباب من نوع البازلت، ويظهر الجدول (2) بعض خصائص الركام الطبيعي المستخدم في الخلطة المرجعية وقد تم اختبار خصائصه بما فيها التدرج الحبيبي والوزن النوعي، حيث ظهر توافقه مع المواصفات القياسية.

جدول (2)

بعض خصائص الركام الطبيعي

م	الخاصية	القيمة
1	الكثافة الحجمية	1655 kg/m^3
2	الوزن النوعي	2.94
3	الامتصاص	0.54 %

ويظهر الشكل (1) شكل التدرج الحبيبي الناتج، ومقارنة تلك النتائج مع التدرج المسموح وفقا لمواصفات ASTM.



شكل (1) نتائج اختبار التدرج الحبيبي

شكل (2-أ) حجم حبيبات الركام الخشن شكل(2-ب) المونة الاسمنتية الملتحمة بسطح الحبيبات

4- ركام خشن معاد تدويره: تم الحصول عليه من مخلفات هدم خرسانية من مواقع مختلفة في مدينة تعز. خضع الركام لعملية تكسير يدوي باستخدام أدوات ومطارق تقليدية للحصول على حبيبات بحجم مناسب كما في الشكل (2-أ)، أظهر الركام المعاد تدويره وجود مونة إسمنتية ملتحمة على سطح الحبيبات كما في الشكل (2-ب)، مما أثر على خصائصه الفيزيائية.

2 - خصائص الركام المعاد تدويره:

- نسبة الامتصاص: بلغت نسبة الامتصاص أعلى من الحد المسموح به وفقا لمواصفات ASTM C33، نتيجة وجود المونة الإسمنتية الملتصقة على الحبيبات.

جدول (3)
خصائص الركام المعاد تدويره

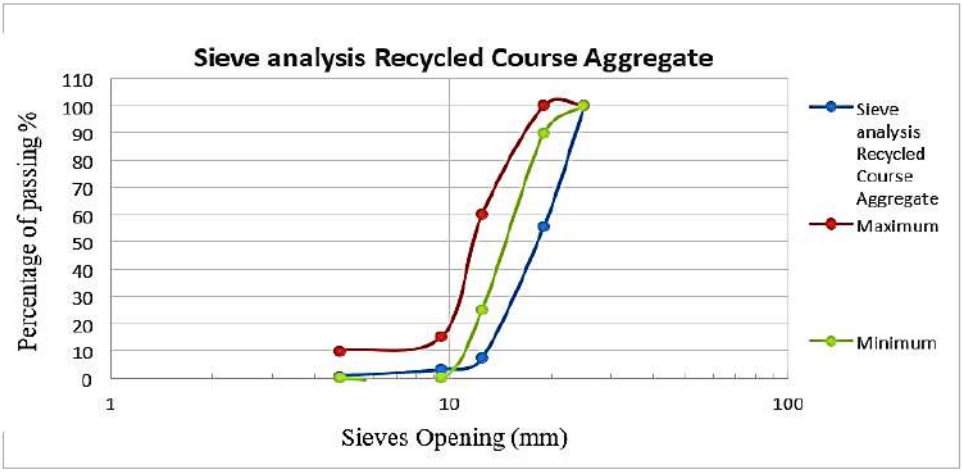
م	الخاصية	القيمة
1	الكثافة الظاهرية	1175.6 kg/m^3
2	الوزن النوعي	2.45
3	الامتصاص	3.07 %

- الوزن النوعي والكثافة: جاء أقل من الوزن النوعي للركام الطبيعي، مما قد يكون له تأثير إيجابي في خفض وزن الخرسانة الكلية، والجدول (3) يظهر الوزن النوعي والكثافة التي أجريت اختبارها، نلاحظ أن الوزن النوعي الناتج للركام المعاد تدويره أقل عما هو عليه في الركام الطبيعي.
- التدرج الحبيبي: تم فرز الركام المعاد تدويره بحيث لا يزيد قطره الأعظم عن 20 ملم، ويبين الجدول (4) نتائج اختبار التدرج الحبيبي للركام المعاد تدويره، والذي تم استخدامه في هذه الدراسة.

جدول (4)
التدرج الحبيبي للركام المعاد تدويره

فتحة المنخل (mm)	الوزن المتبقي في المنخل (gm)	النسبة المئوية للوزن المتبقي بالمنخل %	النسبة المئوية التراكمية للمتبقي %	النسبة المئوية للمار %
25	248	5	5	95
19	1970	39.5	44.5	55.5
12.5	2402	48.2	92.7	7.3
9.5	214	4.3	97	3.0
4.75	122	2.4	99.4	0.6
pan	28	0.6	100	0
The total	4984			

نلاحظ في الشكل (3) مقارنة نتائج التدرج الحبيبي للركام المعاد تدويره مع التدرج المسموح وفقا لمواصفات ASTM، وتظهر النتائج قربها المواصفات.



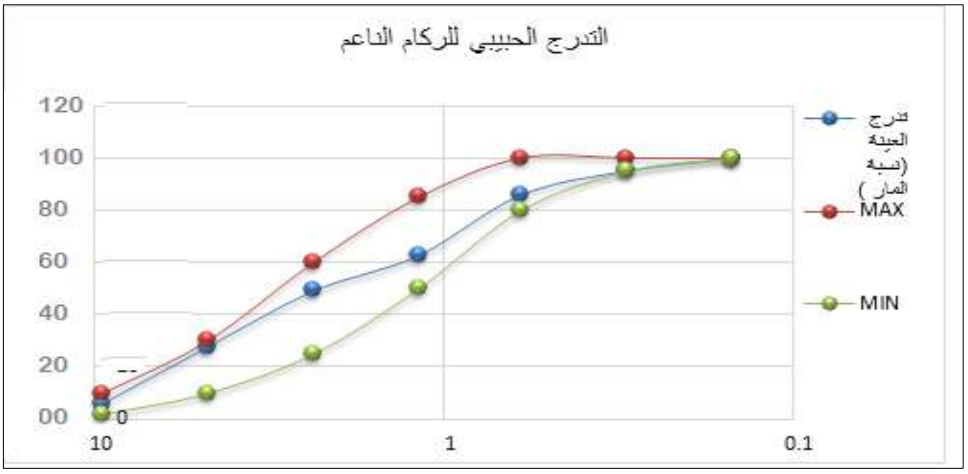
شكل (3) نتائج التدرج الحبيبي للركام المعاد تدويره مع التدرج المسموح وفق الكود الأمريكي

3- الركام الناعم (الرمل): استُخدم رمل ناعم طبيعي من منطقة الرجع بمحافظة لحج، ذات قطر أعظم 4.75 ملم، وقد تم اختبار معامل النعومة والتدرج الحبيبي للتأكد من مطابقته للمواصفات القياسية، كما في الجدول (5).

جدول (5)
التدرج الحبيبي ومعامل النعومة للركام الناعم

فتحة المنخل (mm)	الوزن المتبقي في المنخل(gm)	النسبة المئوية للوزن المتبقي بالمنخل %	النسبة المئوية التراكمية للمتبقي %	النسبة المئوية للمار %
9.5	0.0	0.0	0.0	100
4.75	98	4.9	4.9	95.1
2.36	182	9.1	14	86
1.18	464	23.2	37.2	62.8
0.6	272	13.6	50.8	49.2
0.3	428	21.4	72.2	27.8
0.15	436	21.8	94	6
Pan	120	6	100	0
The total	2000			
Fineness modulus	2.73			

ويظهر الشكل (4) نتائج اختبار التدرج الحبيبي للركام الناعم.



شكل (4) التدرج الحبيبي للركام الناعم

3 – تصميم الخلطة الخرسانية: تم تصميم الخلطة الخرسانية وفقاً لقواعد الكود الأمريكي [ACI 211.1-81]، لتحقيق مقاومة تصميمية قدرها 25 MPa، بنسبة ماء إلى أسمنت تبلغ 0.50، وهبوط يتراوح بين 2 – 10 سم، باستخدام ركام خشن بقطر أعظم 20 ملم.

جدول (6)
المواد المستخدمة في تحضير (1 m^3) من الخلطات الخرسانية

نسبة الاستبدال	وزن الماء Kg	وزن الأسمنت kg	وزن الركام الطبيعي الخشن Kg	وزن الركام الخشن المدور kg	وزن الركام الطبيعي الناعم kg	حجم الرمل m^3
0%	200	400	1056	0.00	863	0.314
30%	200	400	739.2	316.8	803.8	0.292
50%	200	400	528	528	764.28	.278
70%	200	400	316.8	739.2	696.6	0.253
100%	200	400	0.00	1056	595.35	0.243

4 – تحضير وخلط العينات: تم تجهيز جميع المواد الداخلة في الخلطات بدقة، مع ضمان تجفيف الركام الطبيعي والمسحوق تماماً قبل الاستخدام، تم اتباع طريقة تقليدية في خلط المواد للوصول إلى خليط متجانس باستخدام خلاطة المعمل حتى الوصول إلى عجينة متجانسة، مع مراعاة التسلسل الصحيح في إدخال المواد.

شكل (5) يوضح طريقة غسل وتجفيف وتحضير عينات الركام المعاد تدويره

5 – الاختبارات:

1- اختبار الخرسانة الطازجة (قابلية التشغيل): تم إجراء اختبار الهبوط (Slump Test) لجميع الخلطات الخرسانية التي تحتوي على نسب استبدال مختلفة (0%، 30%، 50%، 70%، 100%)، باستخدام مخروط ناقص طبقا لمواصفات C143 ASTM يتم ملؤه بالخرسانة على ثلاث طبقات، وتُدك كل طبقة ب25 ضربة، بعد رفع المخروط، يُقاس مقدار الهبوط الذي يعبر عن قابلية التشغيل.

شكل (6) يوضح طريقة اختبار مقدار الهبوط لكل خلطة خرسانية

2- اختبارات الخرسانة المتصلدة (الكثافة ومقاومة الضغط): تم صب العينات في قوالب مكعبية بأبعاد 15×15×15 سم، وتم دك الخرسانة على ثلاث طبقات لكل طبقة 25 ضربة والشكل

(7) يوضح ذلك، تم إخراج العينات من القوالب بعد 24 ساعة ووضعها في حوض مائي لمدة 28 يومًا، بعدها تم اختبار مقاومة الضغط باستخدام جهاز ضغط خاص، بالمواصفات التالية:

اسم الجهاز: Compression and Flexural Testing Machine.

قدرة تحمل الجهاز: load capacity of 2000 kN.

دقة الجهاز: Accuracy grade: 1.

موديل الجهاز: EYEW-2000 and No: E2020828.

وذلك لثلاث عينات لكل نسبة استبدال كما في الشكل(8).

شكل (7) ألية دمك المكعبات الخرسانية وتسويتها وتنعيم سطحها

شكل (8) احتبار مقاومة الضغط للمكعب الخرساني

6 –معالجة العينات: تم إخراج العينات من القوالب بعد 24 ساعة من الصب، ومن ثم وضعها في حوض مائي لمدة 28 يومًا، بعيداً عن أشعة الشمس المباشرة، وبدرجة حرارة تساوي درجة حرارة الغرفة العادية، والشكل (9) يوضح الحوض المستخدم للغمر.

شكل (9) الحوض المائي المستخدم لغمر المكعبات

النتائج والمناقشات:

تم اختبار الخصائص الفيزيائية للركام الخشن المعاد تدويره من مخلفات الهدم، وأظهرت النتائج (الجدول 7) وجود فروق واضحة بين الركام المعاد تدويره والركام الطبيعي:

- الوزن النوعي: بلغ الوزن النوعي للركام المعاد تدويره 2.46 مقابل 2.94 للركام الطبيعي، وهو أقل بحوالي 16%. يعود هذا الانخفاض إلى وجود المؤنة الإسمنتية الملتصقة على سطح حبيبات الركام المعاد تدويره، والتي تمتلك كثافة أقل من الحبيبات الطبيعية.

جدول (7)
مقارنة بين خصائص الركام الطبيعي والركام المعاد تدويره

الخاصية	الركام الطبيعي	الركام المعاد تدويره
الكثافة الحجمية (kg/m^3)	1655	1175.6
الوزن النوعي	2.94	2.46
الامتصاص	0.54 %	3.07%

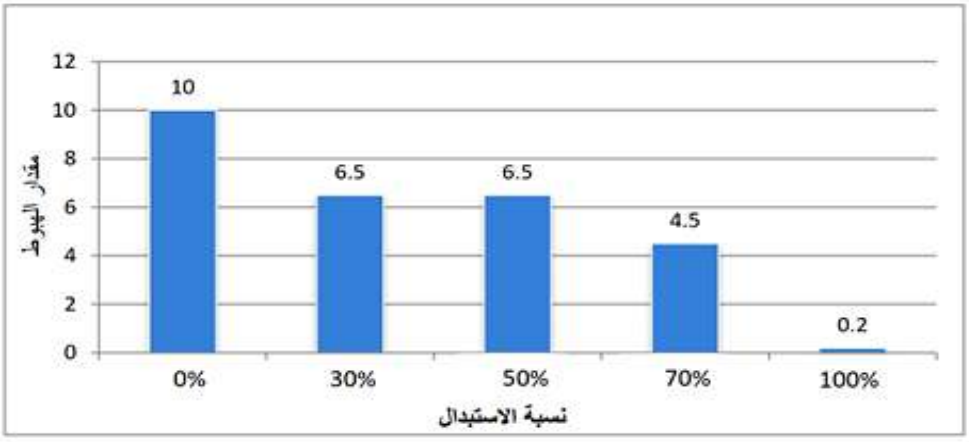
- نسبة الامتصاص: بلغت نسبة امتصاص الركام المعاد تدويره 3.09%، وهي أعلى بكثير من الحد المسموح به وفقا لمواصفات ASTM C33، والذي يُحدد أقصى نسبة امتصاص عند 2% في المقابل، كانت نسبة الامتصاص للركام الطبيعي0.54% فقط.

ويعزى التغير في هذه الخصائص إلى طبيعة سطح الركام المعاد تدويره الذي يتميز بالخشونة العالية ووجود فراغات ناتجة عن انفصال جزيئات المونة الإسمنتية الملتصقة، مما يؤدي إلى زيادة المساحة السطحية وبالتالي زيادة قدرة الركام على امتصاص الماء.

2- قابلية التشغيل للخرسانة الطازجة:

أجري اختبار الهبوط (Slump Test) على جميع الخلطات التي تحتوي على نسب استبدال مختلفة من الركام المعاد تدويره (0%، 30%، 50%، 70%، 100%)، وكانت النتائج كما يلي (الشكل10):

- الخلطات ذات نسب الاستبدال 30%، 50%، و70%: أظهرت قبولاً جيداً من حيث قابلية التشغيل، مع قيم هبوط ضمن الحدود المتوقعة (بين 2–10 سم)، ما يشير إلى إمكانية استخدامها دون تعديلات كبيرة في تصميم الخلطة.



شكل (10) مقدار الهبوط عند نسب الاستبدال المحددة

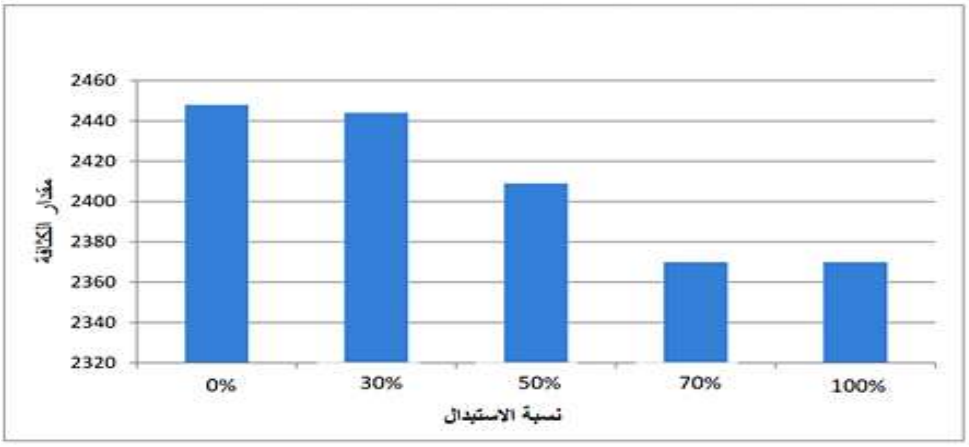
- الخلطة ذات نسبة الاستبدال 100%: شهدت انخفاضاً كبيراً في قابلية التشغيل، حيث لم يتجاوز مقدار الهبوط 2 سم، ويُعزى ذلك إلى:
  - ارتفاع نسبة امتصاص الركام المعاد تدويره.
  - الحاجة إلى كمية أكبر من الماء لتغطية المساحات السطحية الكبيرة للركام.
  - صعوبة دمك الخليط بسبب امتصاص الماء.

كما ظهرت مشكلة التعشيش (Formation of Voids) بشكل واضح في المكعبات التي تحتوي على نسبة استبدال 100%، كما هو موضح في الشكل (11)، مما يدل على ضعف التماسك بين الركام والعجينة الإسمنتية وصعوبة تجانس الخليط.

شكل (11) التعشيش في مكعبات الخرسانة التي تحتوي على نسبة استبدال 100% من الركام المعاد تدويره

3- الكثافة ومقاومة الضغط للخرسانة المتصلدة: تم اختبار مقاومة الضغط بعد 28 يوماً من الغمر في الماء لكل العينات، حيث تم حساب المتوسط من ثلاث عينات لكل نسبة استبدال، مع مراعاة

أن لا يزيد الفرق بين أعلى وأدنى قيمة عن 15%من المتوسط العام. أظهرت النتائج (كما في الشكل 12 والشكل 13) ما يلي:



شكل (12) الكثافة الجافة للعينات الخرسانية عند نسب الاستبدال المختلفة

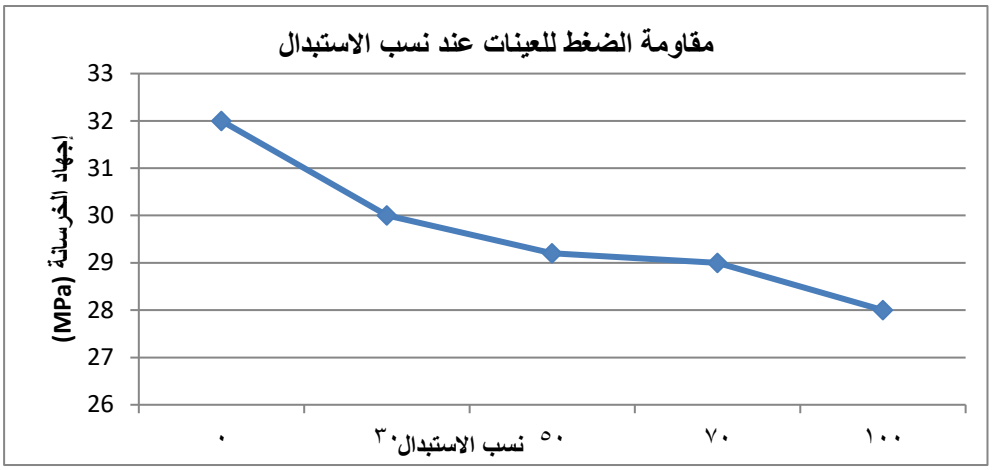
أ- الكثافة الجافة: انخفضت الكثافة الجافة للخرسانة مع زيادة نسبة الركام المعاد تدويره، نتيجة انخفاض كثافة الركام نفسه، وكان الانخفاض في الكثافة متناسباً مع زيادة نسبة الاستبدال، حيث سجلت الخلطة ذات 100% ركام معاد تدويره أقل كثافة.

ب- مقاومة الضغط:

- الخلطات ذات نسب استبدال 30%، 50%، و70% من الركام المعاد تدويره حققت انخفاضا في مقاومة الضغط بنسبة 6.25%، 8.75%، و9.3% على التوالي مقارنةً بالخلطة المرجعية (0%) من الركام المعاد تدويره ولكنها ضمن الحدود المقبولة طبقا للكود ACI 211.1.91
- الخلطة ذات نسبة استبدال 100% من الركام المعاد تدويره سجلت انخفاضا في مقاومة الضغط أكبر مما هو عليه في الخلطات الأخرى حيث وصلت نسبة الانخفاض إلى 12.5% مقارنةً بنتائج الضغط للخلطة المرجعية، ويُرجع ذلك إلى:

i) امتصاص كمية كبيرة من الماء بواسطة الركام المعاد تدويره، مما أدى إلى نقص الماء في مكون الخرسانة وعدم ترابط مكونات الخرسانة وتشكيل فراغات داخل الكتلة الخرسانية.

إجهاد الخرسانة	32	30	29.2	29	28
نسب الاستبدال	0	30	50	70	100



شكل (13) مقاومة الضغط للعينات الخرسانية عند نسب الاستبدال المختلفة

كما أظهرت العينات (ذات 100% ركام معاد) حدوث تشققات قبل الانهيار أثناء اختبار الضغط، كما هو موضح في الشكل (14). ويعزى سبب ذلك إلى وجود فجوات وإلى ضعف الترابط بين مكونات الخرسانة، مما أدى إلى ضعف في البنية الداخلية للخرسانة.

شكل (14) شكل الانهيار في المكعبات الخرسانية ذات نسبة استبدال 100% بعد اخراجها من مكينة الضغط

الاستنتاجات:

توصلت هذه الدراسة الى الاستنتاجات التالية:

1- يمكن استخدام الركام المعاد تدويره بنسبة تصل إلى 70% من الركام الخشن في الخلطات الخرسانية لتحقيق مقاومات ضغط مقبولة، شريطة تعويض انخفاض قابلية التشغيل باستخدام ملدنات فائقة (Superplasticizers) أو ضبط نسبة الماء/الأسمنت بدقة.

2- يؤدي استخدام نسبة 100% ركام معاد تدويره إلى انخفاض ملحوظ في كل من قابلية التشغيل وكثافة الخرسانة ومقاومتها للضغط، مما يجعله غير مناسب للاستخدام في الخلطات الإنشائية بدون تعديلات تقنية.

3- الخشونة العالية لسطح الركام المعاد تدويره تساهم في تحسين التماسك بين الركام والمونة، لكنها تتطلب كمية ماء إضافية لتعويض امتصاصه العالي.

4- يجب المحافظة على نسبة ثابتة من الماء إلى الأسمنت (w/c) ومراعاة التدرج الحبيبي عند استخدام الركام المعاد تدويره لضمان تحقيق الخصائص المطلوبة.

5- استخدام الركام الخشن المعاد تدويره لإنتاج الخرسانة يعد ضمن الإجراءات الفعالة للتخلص من مخلفات البناء والهدم المتزايدة باستمرار، وخاصة في وقت الحروب.

6- هنالك حاجة إلى ضخ المزيد من الاستثمارات في مجال إعادة تدوير المخلفات الإنشائية للتخلص من الأعباء البيئية والاقتصادية والسعي الى الاستدامة والحفاظ على الموارد الطبيعية.

المراجع:

القطان، مازن طه حمدان، قاسم، ايمان عبدالرحمن، محمود، حبان عصام (2011)، استخدام مخلفات البناء في الخلطة الخرسانية.المجلة الاكاديمية العراقية المجلد(25)، الاصدار(2).

اللحام، ليل (2012)، تقنية إعادة استخدام الخرسانة الناتجة من عملية هدم الأبنية. رسالة ماجستير الجامعة الافتراضية السورية، دمشق، سوريا.

طرنبة، عبدالمنعم سالم، الباشا، محمد، الحروق، محمد العربي، الباشا، عبدالخالق (2022)، إعادة تدوير مخلفات البناء بمدينة الزاوية لخدمة التنمية المستدامة. المؤتمر الهندسي الثالث، مدينة الزاوية، ليبيا

Domagala, L. (2015), The effect of lightweight aggregate water absorption on Procedia the reduction of water-cement ratio in fresh concrete, Engineering, 108, 206-213

Kashkash, S., & Czoboly, O. (2021), The influence of utilizing recycled and reclaimed coarse aggregates in producing concrete for structural applications, Tehnički vjesnik, 28031.

Maya Sasane, Sahil Rokade, Sumeedh Kawade, Smruti Randive, (2025), Recycling and Reuse of Construction and Demolition Waste, Internattional journal of current science (IJCSPUB), Vol. (15), Issue (1).

Natt Makul, Fediuk Roman, Mugahe Amran, Zeyad Abdullah (2021), Design Strategy for Aggregate Concrete: Areview of Status and Future Perspectives, Crystals Basel, Vol. (11), Issue (6), pp (695).

Priyanka Gholap, Avinash Kamble, Sushant Divekar, Shubham Bhise, (2023), Recycling of Demolition Waste in Concrete Construction, Internattional journal of current Engineering and science Research (IJCESR), Vol. (10), Issue (6).

Saied Kashkash, Zoltan Orban, Oliver Czoboly, (2021), The Influence of Utilizing Recycled and Reclaimed Coarse Aggregates in Producing Concrete for Structural Applications, Tehnički vjesnik , Vol(28), Issue(3), PP 1025-1031

Zhang Han, Shi Shiying, Zhao Fangfang, Hu Mingming, Fu Xiao (2024), Integrated Benefits of Sustainable Utilization of Construction and Demolition Waste in a Pressure-State Response Framework, Sustainability Basel, Vol. (16), Issue (19).

ASTM C150/150m-15. Standard Specification For Portlandcement.2015. 34. IS 456: Sp: 23, Is: 1199. Standard Practice Making And Curing Concrete Test Specimens In Laboratory.1959,1982, 2000.

ASTM C136/C136m-14. Standard Test Method For Sieve Analysis Of Fine And .8 Coarse Aggregate.2015.

ASTM C127-15. Standard Test Method For Relative Density (Specific Gravity) .2 And Absorption Of Coarse Aggregate. 2015.

ASTM C143/C143m-15. Standard Test Method For Slump Of Hydraulic-.11 Cement Concrete. 2015.

IS: 516 - 1959, Standerd Methods of Tests for Strength of Concrete.

Is: 1199-1959, Methods of Sampling and Analysis of Concrete.

Sp: 23-1982, Handbook on Concere Mixes.

Is: 10086-1982, Specification for Moulds for Use in Tests of Cement and Concerete.