

Reducing Carbon Footprint through Marble Waste Recycling Using Life Cycle Assessment (LCA)

Khetam Ismail *

Dr. Haytham Shahin **

(Received 19 / 5 / 2026. Accepted 7 / 7 / 2026)

□ ABSTRACT □

This article addresses the potential of reducing the carbon footprint by recycling marble dust powder and using it as a partial substitute for cement, based on the Life Cycle Assessment (LCA) methodology to estimate the carbon emissions associated with the production of concrete mixtures. The environmental performance of different replacement ratios was studied within the system boundary from cradle to gate. Five concrete mixtures were studied with replacement ratios of 0%, 5%, 10%, 15%, and 20%, respectively, adopting a functional unit of one cubic meter of concrete. Mechanical tests were also conducted, including compressive strength, splitting tensile strength and flexural tensile strength at ages of 7 and 28 days, to verify the engineering suitability of the mixtures. The results showed that using marble dust powder contributed to reducing carbon dioxide emissions and improving the environmental performance of concrete while maintaining its mechanical properties. The carbon footprint was reduced up to 19.4% at a replacement ratio of 20%, while the 10% replacement ratio achieved the best balance between environmental efficiency and mechanical performance. The 15% replacement ratio recorded the highest tensile strength values. Sensitivity analysis confirmed the reliability and stability of the results.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA), Carbon Footprint, Marble dust powder (MDP), Environmental Efficiency, Industrial Waste Recycling.

Copyright  :Latakia University journal (formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Master's Student, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria.

khetamismaill1999@latakia-univ.edu.sy.

**Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria. [haitham shaahin@latakia-univ.edu.sy](mailto:haitham_shaahin@latakia-univ.edu.sy)

تقليل البصمة الكربونية من خلال تدوير مخلفات الرخام باستخدام منهجية دورة الحياة (LCA)

ختام حكمت اسماعيل *

د. هيثم شاهين **

(تاريخ الإيداع 19 / 5 / 2026. قُبِلَ للنشر في 7 / 7 / 2026)

□ ملخص □

تتناول هذه المقالة إمكانية تقليل البصمة الكربونية من خلال إعادة تدوير مسحوق غبار الرخام واستخدامه كبديل جزئي للأسمنت، وذلك بالاعتماد على منهجية تقييم دورة الحياة (Life Cycle Assessment-LCA) لتقدير الانبعاثات الكربونية المرتبطة بإنتاج الخلطات الخرسانية، ودراسة أثر نسب الاستبدال المختلفة على الأداء البيئي ضمن حدود النظام من المهد إلى بوابة المصنع (Cradle-to-Gate). تمت دراسة خمس خلطات خرسانية بنسب استبدال بلغت 20% و 15% و 10% و 5% و 0%، على التوالي، مع اعتماد وحدة وظيفية مقدارها واحد متر مكعب من الخرسانة. كما أُجريت اختبارات ميكانيكية شملت مقاومة الضغط البسيط، ومقاومة الشد بالفلق، ومقاومة الشد بالانعطاف عند عمري 7 و 28 يوماً، للتحقق من ملائمة الخلطات من الناحية الهندسية. بيّنت النتائج أن استخدام مسحوق غبار الرخام ساهم في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وتحسين الأداء البيئي للخرسانة، مع الحفاظ على خصائصها الميكانيكية. فقد انخفضت البصمة الكربونية بنسبة وصلت إلى 19.4% عند نسبة استبدال 20%، في حين حققت نسبة الاستبدال 10% أفضل توازن بين الكفاءة البيئية والأداء الميكانيكي، كما سجلت نسبة 15% أعلى قيم لمقاومة الشد. وأكد تحليل الحساسية موثوقية النتائج واستقرارها.

الكلمات المفتاحية: تقييم دورة الحياة، البصمة الكربونية، مسحوق غبار الرخام، الكفاءة البيئية، إعادة تدوير المخلفات الصناعية.



حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر

بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* طالبة ماجستير، قسم الهندسة البيئية، كلية الهندسة المدنية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية.

khetamismaail1999@latakia-univ.edu.sy

** أستاذ، قسم الهندسة البيئية، كلية الهندسة المدنية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية.

haitham_shaahin@latakia-univ.edu.sy

1-مقدمة:

أدى التزايد المستمر في استهلاك الموارد الطبيعية الخام وتنامي المشكلات البيئية المرتبطة بالأنشطة الصناعية إلى تعزيز الاهتمام بمفاهيم الاستدامة والاقتصاد الدائري، والتي تهدف إلى تحسين كفاءة استخدام الموارد وتقليل النفايات والحد من التأثيرات البيئية المرافقة لعمليات الإنتاج [1]. وفي هذا الإطار، برزت إعادة استخدام المخلفات الصناعية كأحد الحلول الواعدة لتحقيق التنمية المستدامة وتقليل الاعتماد على الموارد الأولية. تُعد مخلفات الرخام من المخلفات الصناعية التي تُنتج بكميات كبيرة نتيجة عمليات القطع والصقل والتشكيل، حيث يؤدي التخلص منها بطرق غير مناسبة إلى العديد من المشكلات البيئية، مثل تلوث التربة والمياه وزيادة تراكم النفايات الصلبة [2]. وقد دفع ذلك الباحثين إلى البحث عن بدائل تتيح الاستفادة من هذه المخلفات بدلاً من التخلص منها.

ومن التطبيقات الواعدة لمخلفات الرخام، استخدامها في صناعة الخرسانة والمواد الاسمنتية كبديل جزئي للمواد التقليدية، الأمر الذي يسهم في تقليل استهلاك الموارد الطبيعية والحد من الأعباء البيئية المرتبطة بإدارة النفايات الصناعية [3-4]. كما يكتسب هذا التوجه أهمية إضافية في ظل التحديات البيئية المرتبطة بصناعة الاسمنت، التي تعد من أكثر الصناعات استهلاكاً للطاقة ومساهمة في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون على المستوى العالمي [5-6]. وقد أظهرت العديد من الدراسات السابقة إمكانية استخدام مسحوق غبار الرخام كبديل جزئي للإسمنت في الخلطات الخرسانية دون التأثير سلباً في خصائصها الميكانيكية عند نسب استبدال محددة [7]، كما أشارت بعض الدراسات إلى تحسن بعض الخصائص الفيزيائية والميكانيكية نتيجة تأثيره المائي وقدرته على تحسين البنية الداخلية للخرسانة [8]. وعلى الرغم من تعدد الدراسات التي تناولت استخدام مخلفات الرخام في الخلطات الخرسانية، فإن معظمها ركز على تقييم الأداء الميكانيكي والخصائص الفنية للخرسانة، في حين حظيت الجوانب البيئية باهتمام أقل نسبياً، ولا سيما فيما يتعلق بتقدير الانبعاثات الكربونية والآثار البيئية المترتبة على استخدام هذه المخلفات.

وفي هذا السياق، برزت منهجية تقييم دورة الحياة (Life Cycle Assessment, LCA) كأحدى أكثر الأدوات شمولاً لتقييم الأداء البيئي للمواد والمنتجات، نظراً لقدرتها على تحليل التأثيرات البيئية المرتبطة بمختلف مراحل دورة الحياة وفقاً لمعايير ISO 14040 و ISO 14044. وقد أثبتت هذه المنهجية فاعليتها في تقييم البدائل المستدامة ودراسة إمكاناتها في خفض الانبعاثات الكربونية وتقليل الأعباء البيئية المرتبطة بالمنتجات وعمليات الإنتاج المختلفة [9-10].

2-أهمية البحث و أهدافه:

تبرز أهمية هذه الدراسة في دعم مفاهيم الاستدامة والاقتصاد الدائري من خلال إعادة استخدام مخلفات الرخام والاستفادة منها في تقليل استهلاك المواد التقليدية والحد من الانبعاثات الكربونية. وتكتسب الدراسة أهمية إضافية لاعتمادها على منهجية تقييم دورة الحياة (LCA)، التي تُعد من أكثر الأدوات استخداماً في تقييم الأداء البيئي وتحليل البصمة الكربونية للمواد والمنتجات.

وبالتالي تهدف هذه الدراسة إلى تقييم إمكانية استخدام مسحوق غبار الرخام كبديل جزئي للإسمنت بهدف تقليل البصمة الكربونية، وهذا يمكن تحقيقه من خلال:

- 1- تقييم السلوك الميكانيكي للخرسانة المحتوية على نسب مختلفة من غبار الرخام.
- 2- تحليل تأثير نسب الاستبدال المختلفة على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

- 3- تحديد النسبة المثلث التي تحقق أفضل توازن بين تقليل الأثر البيئي والحفاظ على الأداء.
- 4- تقديم مؤشر الكفاءة البيئية كأداة لدمج الأداء البيئي مع الخصائص الميكانيكية، إلى جانب إجراء تحليل حساسية لتقييم موثوقية النتائج.

3-طرائق البحث ومواده:

تعتمد هذه الدراسة على منهجية تقييم دورة الحياة (Life Cycle Assessment – LCA) وفقاً لمعايير (ISO14040 – ISO14044)، وذلك بهدف تقييم الأثر البيئي لإعادة استخدام مسحوق غبار الرخام كبديل جزئي للأسمنت. حيث تم تطبيق هذه المنهجية وفق مراحلها الأربعة الأساسية. كما هو موضح في الشكل 1، وتضمن هذه المراحل: تحديد الهدف ونطاق الدراسة. تحليل جرد دورة الحياة. تقييم الأثر البيئي. وتفسير النتائج.

① تحديد هدف ونطاق الدراسة	② تحليل جرد دورة الحياة	③ تقييم الأثر البيئي	④ تفسير النتائج
1- تحديد هدف الدراسة. 2- تحديد الوحدة الوظيفية. 3- تحديد الفئات والأثر البيئي.	1- جمع البيانات الخاصة بالمدخلات (المواد). 2- جمع البيانات الخاصة بالمخرجات (الانبعاثات، النفايات،...) 3- حساب كميات البيانات لكل عملية ضمن حدود النظام.	1- تصنيف البيانات إلى فئات التأثير. 2- حساب مؤشرات التأثير لكل فئة (مثل: تغير المناخ- انبعاثات CO ₂).	1- تحليل النتائج وتحديد الاتجاهات الرئيسية. 2- تقييم مدى اكتمال البيانات وحساسية النتائج. 3- استخلاص الاستنتاجات والتوصيات

الشكل (1) مراحل تقييم دورة الحياة (LCA) وفقاً لمعايير ISO14040 أو ISO14044 (من إعداد الباحث)

3-1- تحديد الهدف والنطاق (Goal and scope Definition):

- يهدف هذا البحث إلى تقييم تأثير استخدام مسحوق غبار الرخام على البصمة الكربونية، مع التركيز على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO₂).
- تم تعريف الوحدة الوظيفية على أنها متر مكعب واحد من الخرسانة (1m³) لتسهيل إدارة البيانات وتطبيقها، وهي الوحدة التي سيتم على أساسها المقارنة بين السيناريوهات المقترحة.
- تم تحديد حدود النظام لتشمل مرحلة إنتاج المواد فقط (cradle- to – gate)، مع إهمال مراحل النقل والاستخدام ونهاية العمر الافتراضي. ويهدف هذا التحديد إلى التركيز على تقييم أثر استبدال المواد التقليدية بمسحوق غبار الرخام على الانبعاثات المرتبطة بمرحلة الإنتاج، مع تقليل التباين وعدم اليقين الناتج عن اختلاف سيناريوهات النقل والاستخدام ونهاية العمر، وبالتالي فإن النتائج تعكس مقارنة نسبية عادلة بين الخلطات المختلفة ضمن نطاق النظام نفسه.

- تم اقتراح السيناريوهات البديلة لإنتاج خلطة خرسانية تحوي على نسب مختلفة من مسحوق الرخام ومقارنتها مع الخلطة الخرسانية الأساسية التي لا تحتوي على أي مخلفات والتي تُمثل في هذه الدراسة بالسيناريو صفر MDP_0 .

حيث: MDP_5 : خلطة خرسانية بنسبة استبدال 5% من الاسمنت بمسحوق غبار الرخام.
 MDP_{10} : خلطة خرسانية بنسبة استبدال 10% من الاسمنت بمسحوق غبار الرخام.
 MDP_{15} : خلطة خرسانية بنسبة استبدال 15% من الاسمنت بمسحوق غبار الرخام.
 MDP_{20} : خلطة خرسانية بنسبة استبدال 20% من الاسمنت بمسحوق غبار الرخام.

3-2- تحليل جرد دورة الحياة (Life Cycle Inventory-LCI)

- في هذه المرحلة تم جمع البيانات المتعلقة بكميات المواد المستخدمة في الخلطات المستخدمة (باعتبارها مدخلات العملية)، حيث تم إعداد عدة خلطات باستخدام نسب استبدال مختلفة من مسحوق غبار الرخام بدلاً من الاسمنت (0%, 5%, 10%, 15%, 20%)، كما هو موضح في الجدول (1).
 - كما تم اعتماد معاملات انبعاث ثاني أكسيد الكربون لكل مادة من مصادر علمية موثقة [11-14]، كما هو مبين في الجدول (2).

الجدول (1). كميات المواد المستخدمة لمتر مكعب من الخلطة الخرسانية (نسب المزج) (طريقة درو-فيري/Dreux-Ferry) [15]

Amount of MDP in %	Cement (Kg)	MDP* (Kg)	Fine aggregate (Kg)	Coarse aggregate (Kg)	W/C
MDP_0	350	0	664	1164	0.54
MDP_5	332.5	17.5	664	1164	0.54
MDP_{10}	315	35	664	1164	0.54
MDP_{15}	297.5	52.5	664	1164	0.54
MDP_{20}	280	70	664	1164	0.54

*نسبة من وزن الاسمنت

الجدول (2). معاملات انبعاث ثاني أكسيد الكربون

المراجع	معامل الانبعاث	المادة
Intergovernmental Panel on Climate Change (2006), (2021) International Energy Agency (2020) [11-12-13]	0.90 - 0.85	الاسمنت
Ecoinvent (v3.8) [14]	0.005	الركام
Ecoinvent (v3.8) [14]	0.0003	الماء
Ecoinvent(v3-8) [14]	0.001	غبار الرخام

3-3- تقييم الأثر البيئي (Life Cycle Impact Assessment – LICA)

3-3-1- انبعاثات ثاني أكسيد الكربون

تم حساب انبعاثات ثاني أكسيد الكربون باستخدام طريقة معاملات الانبعاث (Emission Factor Method)، حيث يتم ضرب كتلة كل مادة داخلية في الخلطة الخرسانية في معامل الانبعاث الخاص بها، وفق العلاقة الآتية:

$$CO_2 = \sum(mi * Efi) \dots\dots\dots [1]$$

حيث: mi : كتلة المادة (Kg)

Efi : معامل الانبعاث (Kg CO₂/Kg)

- تم اعتماد معامل الانبعاث للأسمنت 0.9Kg CO₂/kg، والركام 0.005Kg CO₂/kg، وهي قيمة متوسطة ضمن المجال المذكور في الأدبيات. بينما تم اعتماد معامل انبعاث الكربون لمسحوق غبار الرخام 0 Kg CO₂/kg، لكونه مادة ثانوية ناتجة عن عمليات تقطيع وصقل الرخام، ولا ينتج عن إعادة استخدامه أي عمليات تصنيع إضافية ضمن حدود النظام. وبناءً على مبادئ منهجية تقييم دورة الحياة (Life Cycle Assessment)، لا يتم تحميل المواد الثانوية انبعاثات إنتاجية إضافية عند مرحلة إعادة الاستخدام لتجنب ازدواجية احتساب الانبعاثات البيئية.

3-3-2- الاختبارات الميكانيكية

- لدم التقييم البيئي المراد، تم إجراء اختبارات ميكانيكية للخلطات المدروسة للتحقق من قابلية التطبيق العملي، حيث شملت هذه الاختبارات: المقاومة على الضغط البسيط، مقاومة الشد بالفلق، ومقاومة الشد بالانحناف وذلك عند عمري 7 و 28 يوم، لأنها تمثل المراحل القياسية والمعتمدة في تقييم تطور مقاومة الخرسانة. إذ تعكس مقاومة عمر 7 أيام السلوك المبكر لتطور التفاعلات الهيدروليكية ومدى سرعة اكتساب المقاومة، وهو مؤشر مهم لفهم تأثير الإحلال الجزئي بمسحوق غبار الرخام على تفاعلات الإماهة في المراحل المبكرة. أما مقاومة عمر 28 يوم فتعد المرجع القياسي المعتمد دولياً لتقييم المقاومة النهائية للخرسانة، والتي تُستخدم كأساس في التصميم والتحليل الإنشائي وفق المواصفات القياسية (ACI).
- أجريت جميع الاختبارات الميكانيكية في مختبر نقابة المهندسين (فرع طرطوس)، وذلك وفق إجراءات الفحص القياسية المحددة في الكود العربي السوري للخرسانة (2024) [16]، حيث تم مقارنة تأثير نسب الاستبدال المختلفة على الأداء الميكانيكي للخلطات.

3-3-3- مؤشر الكفاءة البيئية

- لتوضيح العلاقة بين الأداء الميكانيكي والتأثير البيئي بشكل أدق، تم اعتماد مؤشر الكفاءة البيئية، بهدف تحديد النسبة المثلى للاستبدال، والذي يعبر عن مقدار مقاومة الضغط المحققة لكل وحدة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون كالتالي:

$$EI = \frac{FC}{GWP} \dots\dots\dots [2]$$

حيث: FC : مقاومة الضغط الناتجة عن عمر 28 يوم (N/mm²).

GWP : إمكانية الاحترار العالمي وهو مجموع انبعاثات CO₂ لكل 1m³ من الخرسانة (kg CO₂).

- ونظراً لتركيز هذه الدراسة على فئة تأثير واحدة (انبعاثات CO₂)، فقد اقتصرت مرحلة تقييم التأثير على خطوتي التصنيف والتوصيف لحساب وتحويل كميات المواد والطاقة إلى انبعاثات كربونية مقاسة. وبناءً على ذلك، تم استبعاد خطوتي التطبيق والترجيح لعدم الحاجة إلى المقارنة بين فئات تأثير متعددة، وهو ما يتوافق مع إرشادات المواصفة القياسية ISO 14044 التي تصنف هذه الخطوات كعناصر اختيارية.

3-4- تفسير النتائج Interpretation

وهي الخطوة الأخيرة لمنهجية تقييم دورة الحياة، إذ يتم فيها مقارنة النتائج للخلطات المدروسة، ومن ثم اختيار الخلطة الأفضل التي تحقق التوازن بين الأداء الميكانيكي والتأثير البيئي.

4- النتائج والمناقشة:

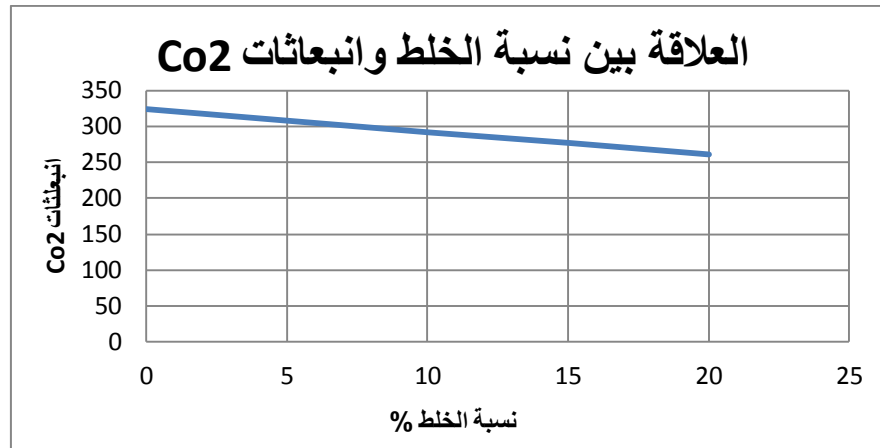
4-1- انبعاثات ثاني أكسيد الكربون

يوضح الجدول (3) نتائج انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO₂) لمختلف نسب استبدال الاسمنت بمسحوق غبار الرخام، بينما يوضح الرسم البياني 1 الاتجاه العام لهذه الانبعاثات.

الجدول (3). كميات المواد والانبعاث لكل 1m³ من الخرسانة

الخلطة	الاسمنت (kg)	غبار الرخام (kg)	الركام (kg)	انبعاثات CO ₂ (kgco ₂ /kg)
MDP0	350	0	1828	324.14
MDP5	332.5	17.5	1828	308.39
MDP10	315	35	1828	292.64
MDP15	297.5	52.5	1828	276.89
MDP20	280	70	1828	261.14

- تظهر النتائج انخفاضاً تدريجياً في انبعاثات CO₂ مع زيادة نسبة الاستبدال، حيث تعود هذه النتيجة بشكل رئيسي إلى تقليل كمية الاسمنت المستخدمة، والذي يعد المصدر الأكبر للانبعاثات. ويؤكد هذا الاتجاه الدور الإيجابي لإعادة استخدام مخلفات الرخام في تقليل البصمة الكربونية. حيث تتفق هذه النتائج مع دراسة ((Huntzinger and Eatmon 2009))، التي أكدت أن تقليل محتوى الاسمنت يؤدي مباشرةً إلى تقليل نسبة انبعاث ثاني أكسيد الكربون، وبالتالي، خفض البصمة الكربونية [17].



الرسم البياني (1). العلاقة بين نسب الاستبدال وانبعاثات CO₂ الناتجة

4-2- الخصائص الميكانيكية

يعرض الجدولان (4) و(5) نتائج الاختبارات الميكانيكية، بما في ذلك المقاومة على الضغط البسيط، مقاومة الشد بالفلق والشد بالانعطاف، عند عمري 7 و 28 يوماً، في حين توضح الأشكال (2-4) التغير في هذه الخصائص مع نسب الاستبدال المختلفة.

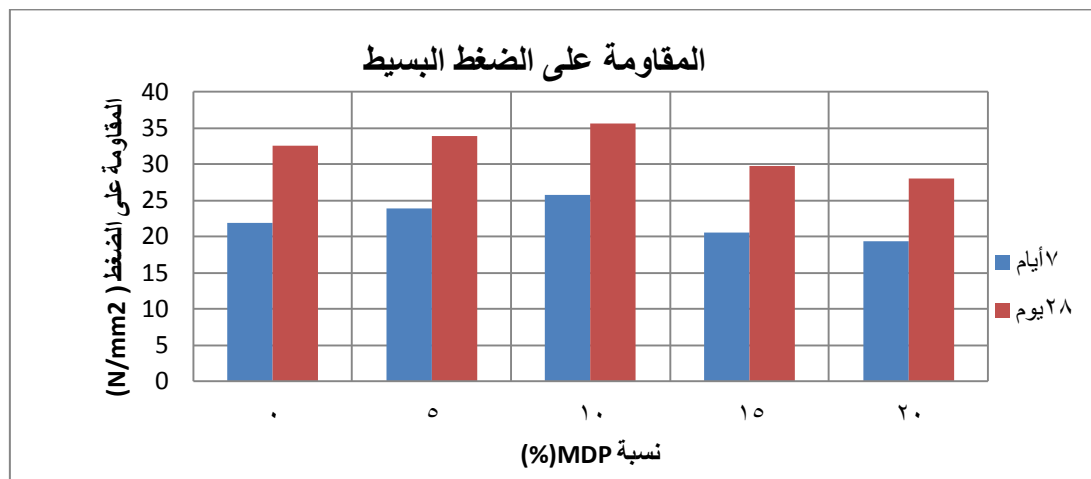
- أشارت النتائج إلى أن استخدام مسحوق غبار الرخام لا يؤدي إلى تدهور كبير في الخصائص الميكانيكية للخرسانة ضمن نسب استبدال منخفضة ومتوسطة، حيث تبقى القيم ضمن حدود مقبولة مقارنةً بالخلطة المرجعية، كما لوحظ أن بعض الخلطات أظهرت تحسناً ملحوظاً نسبياً في الأداء، وهو ما يمكن تفسيره بالتأثير المالي الناتج عن نعومة مسحوق الرخام. وتتوافق هذه النتائج مع دراسة (Alyamac and Ince) (2009) التي أظهرت إمكانية استخدام مسحوق الرخام دون تأثير سلبي كبير على مقاومة الخرسانة [7].

الجدول (4). ملخص نتائج الاختبارات عند عمر 7 أيام

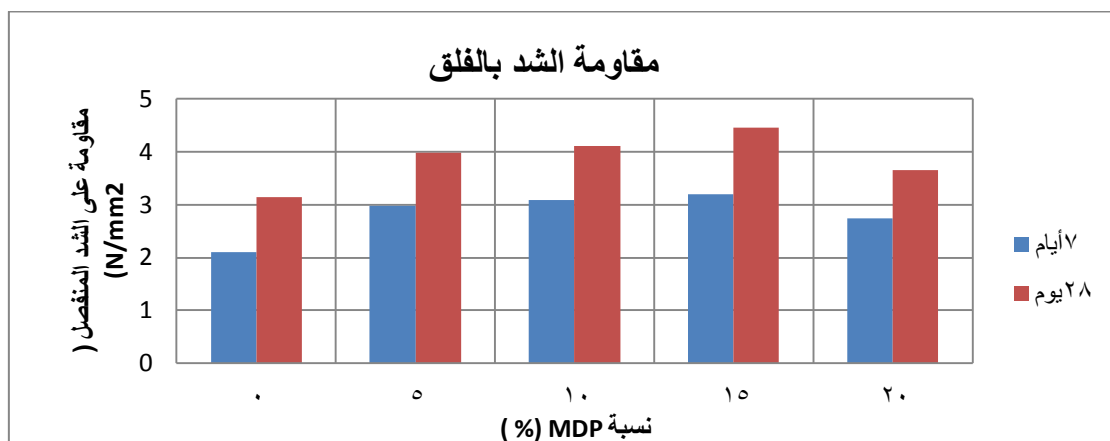
المزيج	المقاومة على الضغط البسيط (N/mm ²)	مقاومة الشد بالفلق (N/mm ²)	مقاومة الشد بالانعطاف (N/mm ²)
MDP0	21.87	2.1	2.98
MDP5	23.92	2.98	3.08
MDP10	25.82	3.08	3.5
MDP15	20.55	3.2	3.98
MDP20	19.38	2.75	2.66

الجدول (5). ملخص نتائج الاختبارات عند 28 يوم

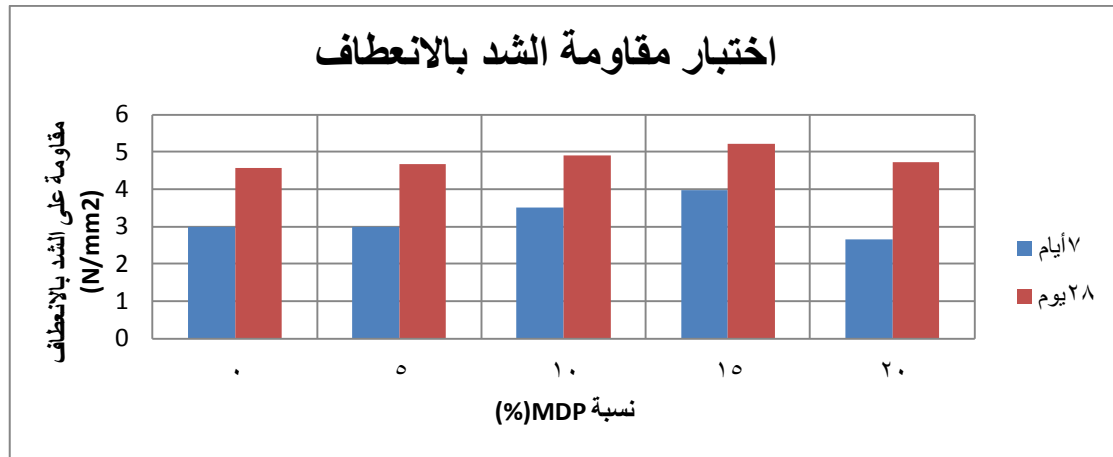
المزيج	المقاومة على الضغط البسيط (N/mm ²)	مقاومة الشد بالفلق (N/mm ²)	مقاومة الشد بالانعطاف (N/mm ²)
MDP0	32.63	3.18	4.57
MDP5	33.96	3.98	4.68
MDP10	35.66	4.12	4.90
MDP15	29.8	4.45	5.22
MDP20	28.00	3.65	4.72



الرسم البياني (2). يوضح العلاقة بين نسب الاستبدال ومقاومة الخرسانة للضغط



الرسم البياني (3). يوضح العلاقة بين نسب الاستبدال ومقاومة الخرسانة للشد المنفصل



الرسم البياني (4) . يوضح العلاقة بين نسب الاستبدال ومقاومة الخرسانة للشد بالانعطاف

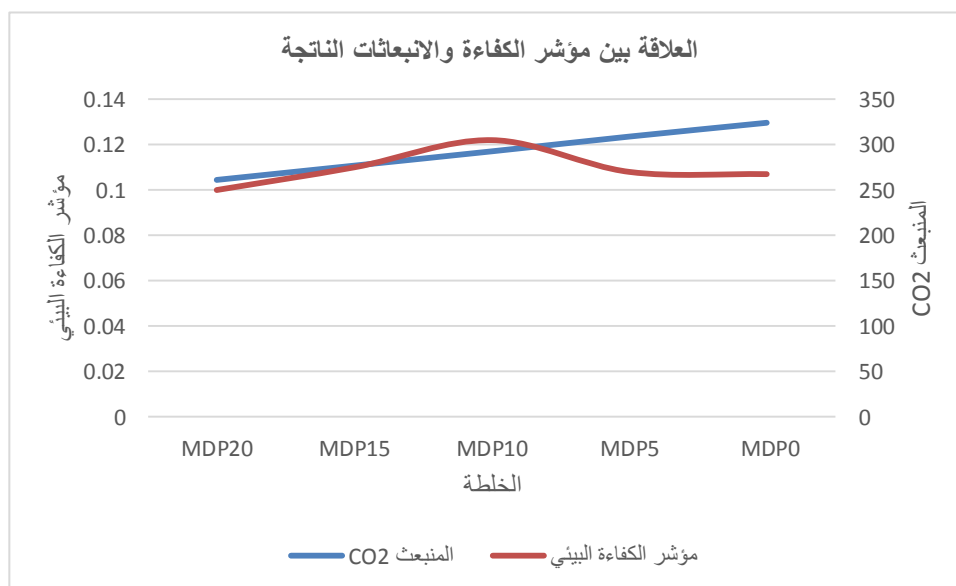
4-3- مؤشر الكفاءة البيئية

يوضح الجدول (6) قيم مؤشر الكفاءة البيئية المحسوبة عند عمر 28 يوم للخلطات المختلفة، بينما يوضح الشكل (6) التغير في هذا المؤشر مع زيادة نسبة الاستبدال.

جدول 6 نتائج مؤشر الكفاءة البيئية للنتائج المدروسة

مؤشر الكفاءة البيئية (MPa/KgCO ₂)	CO ₂ المنبعث (Kg CO ₂)	المقاومة على الضغط البسيط (MPa)	المزيج
0.100	324.14	32.63	MDP0
0.110	308.9	33.96	MDP5
0.122	292.64	35.66	MDP10
0.108	276.89	29.8	MDP15
0.107	261.14	28.00	MDP20

يُلاحظ من الجدول السابق أن أعلى قيمة لمؤشر الكفاءة يقابل الخلطة MDP₁₀، وهذا يدل إن الخلطة أصبحت أكثر استدامة (قوة ضغط أعلى ← كفاءة بيئية أعلى).



الرسم البياني (5). العلاقة بين نسب الاستبدال ومؤشر الكفاءة البيئية والانبعثات الناتجة

- تم اعتماد المقاومة على الضغط البسيط في حساب مؤشر الكفاءة البيئية باعتبارها الخاصية الميكانيكية الأساسية الممثلة للأداء الإنشائي للخرسانة، وذلك لكونها المؤشر الأكثر استخداماً في تصميم العناصر الخرسانية [18] أما مقاومتنا الشد بالفلق والشد بالانعطاف، فقد تم استخدامهما كعوامل داعمة لتحليل السلوك الميكانيكي، دون إدخالهما بشكل مباشر في حساب مؤشر الكفاءة البيئية، وذلك لكون الخرسانة تُصمم أساساً لتحمل إجهادات الضغط.
- أظهرت النتائج أن الكفاءة البيئية ازدادت مع زيادة نسبة الاستبدال حتى وصلت إلى قيمة عظمى عند نسبة 10%، ثم بدأت بالانخفاض تدريجياً عند نسب أعلى. ويعكس ذلك تحقيق أفضل توازن بين تقليل الانبعثات والحفاظ على الأداء الميكانيكي عند هذه النسبة.
- ويظهر هذا المؤشر أهمية الدمج بين الأداء البيئي والتطبيقي، حيث أن الاعتماد على الانبعثات فقط قد لا يكون كافياً لتحديد الخلطة المثلى من منظور الاستدامة.

4-4- تحليل الحساسية

تمت دراسة ثلاث حالات مختلفة لمعامل انبعاث الاسمنت وهي:

1. الحالة المنخفضة: تم اعتماد معامل انبعاث للاسمنت مقداره (0.8 KgCO₂/Kg).
 2. الحالة المتوسطة: تم اعتماد معامل انبعاث للاسمنت مقداره (0.9 KgCO₂/Kg)، وتمثل الحالة الأساسية المعتمدة في الدراسة.
 3. الحالة المرتفعة: تم اعتماد معامل انبعاث للاسمنت مقداره (1 KgCO₂/Kg).
- وبعد تطبيق معاملات الانبعثات الخاصة بكل حالة على الخلطات المدروسة، تم حساب انبعثات ثاني أكسيد الكربون ومؤشر الكفاءة البيئية، كما هو موضح بالجداول (9-7). في حين يوضح الرسم البياني (6) مقارنة بين الحالات الثلاث المعتمدة.

جدول (7). انبعاثات CO₂ والكفاءة البيئية للحالة الأولى

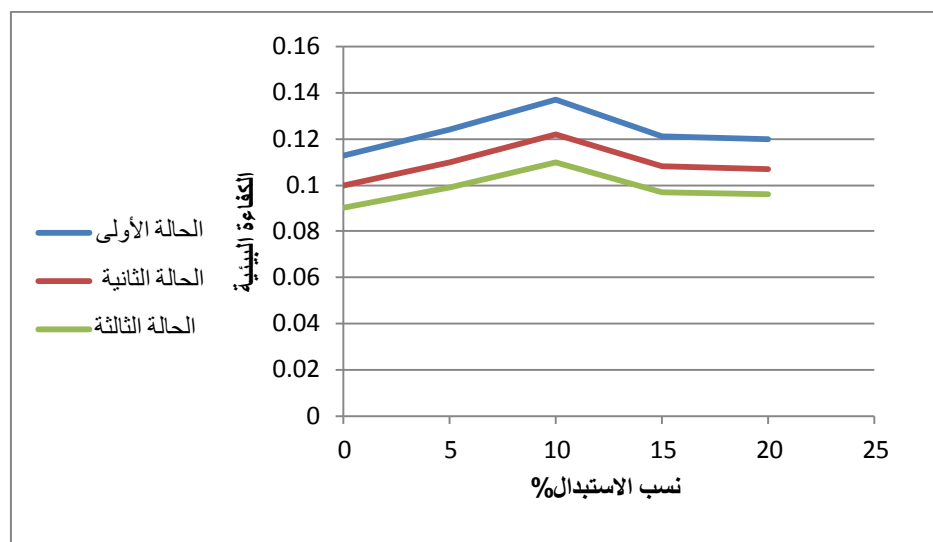
الكفاءة البيئية (MPa/KgCO ₂)	المقاومة على الضغط البسيط (MPa)	انبعاثات CO ₂ (KgCO ₂ /Kg)	النسبة (%)
0.113	32.63	288.1	0
0.124	33.96	274.1	5
0.137	35.66	260.1	10
0.121	29.8	246.1	15
0.120	28.0	232.1	20

جدول (8). انبعاثات CO₂ والكفاءة البيئية للحالة الثانية

الكفاءة البيئية (MPa/KgCO ₂)	المقاومة على الضغط البسيط (MPa)	انبعاثات CO ₂ (KgCO ₂ /Kg)	النسبة (%)
0.100	32.63	324.14	0
0.110	33.96	308.39	5
0.122	35.66	292.64	10
0.108	29.8	276.89	15
0.107	28.0	261.14	20

جدول (9). انبعاثات CO₂ والكفاءة البيئية للحالة الثالثة

الكفاءة البيئية (MPa/KgCO ₂)	المقاومة على الضغط البسيط (MPa)	انبعاثات CO ₂ (KgCO ₂ /Kg)	النسبة (%)
0.090	32.63	360.2	0
0.099	33.96	342.6	5
0.110	35.66	325.2	10
0.097	29.8	307.7	15
0.096	28.0	290.2	20



الرسم البياني (6) يوضح المقارنة بين الحالات المقترحة

تشير نتائج تحليل الحساسية إلى أن الاتجاه العام لانخفاض الانبعاثات مع زيادة نسبة الاستبدال يبقى ثابتاً، مما يدل على استقرار النتائج وعدم تأثرها بشكل كبير بالتغيرات المحتملة، وهذا يعزز من موثوقية الدراسة.

5- الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

خلصت هذه الدراسة، التي تناولت التقييم البيئي لإعادة استخدام مسحوق غبار الرخام كبديل جزئي للأسمنت، إلى مجموعة من الاستنتاجات الجوهرية التي تدعم توجهات البناء المستدام، وهي:

- 1- أثبتت منهجية LCA أن استبدال الاسمنت بغبار الرخام يؤدي إلى خفض مباشر في بصمة الكربون بنسبة تصل إلى 19.4% عند نسبة استبدال 20%، مما يساهم في تقليل ظاهرة الاحترار العالمي الناتجة عن صناعة الخرسانة.
- 2- بإهمال مسافات النقل، واعتبار غبار الرخام مادة معاد تدويرها (Waste- to - Reseource)، حققت جميع الخلطات المطورة مؤشرات كفاءة بيئية (EI) أعلى من الخلطة المرجعية.
- 3- سجلت نسبة الاستبدال 10% أفضل أداء ميكانيكي وبيئي مزدوج حيث ارتفعت مقاومة الضغط عند عمر 28 يوماً لتصل إلى 35.66 MPa (زيادة 9.2% عن المرجعية)، مع خفض الانبعاثات بنسبة 9.7%.
- 4- أظهرت نتائج عمر 7 أيام أن غبار الرخام يعمل كمحفز لسرعة اكتساب المقاومة في الأعمار المبكرة، وخاصةً عند نسبة 10%، مما يعزز من كفاءة العمليات الإنشائية زمنياً وبيئياً.
- 5- كشفت الدراسة عن سلوك متميز لغبار الرخام في تحسين مطيلة الخرسانة، حيث حققت نسبة استبدال 15% أعلى قيمة لمقاومة الشد بالفلق (4.45 MPa) ومقاومة الشد بالانعطاف (5.22MPa)، متفوقة بذلك على الخلطة المرجعية وبقيّة النسب مما يجعلها النسبة الأفضل للعناصر الإنشائية المعرضة لإجهادات الشد.
- 6- أظهر تحليل الحساسية أن هذا الاستنتاج يبقى ثابتاً حتى مع تغير معامل انبعاث الاسمنت ضمن نطاق واقعي مما يؤكد موثوقية النتائج واستقرارها.

التوصيات:

- 1- التوسع في استخدام مخلفات الرخام ضمن التطبيقات الاسمنتية والمواد الصديقة للبيئة بهدف تقليل استهلاك الموارد الطبيعية والحد من الانبعاثات الكربونية المرتبطة بصناعة الاسمنت.
- 2- تشجيع اعتماد منهجية تقييم دورة الحياة (LCA) في الدراسات المستقبلية المتعلقة بالمواد المعاد تدويرها، لما توفر من تقييم شامل للتأثيرات البيئية والبصمة الكربونية.
- 3- دعم استراتيجيات الاقتصاد الدائري من خلال تدوير المخلفات الصناعية والاستفادة منها بدلاً من التخلص منها بطرق قد تؤدي إلى تلوث البيئة.
- 4- إجراء دراسات مستقبلية لتقييم التأثيرات البيئية طويلة الأمد للمواد المحتوية على مخلفات الرخام، بما يشمل استهلاك الطاقة والانبعاثات خلال مختلف مراحل دورة الحياة.
- 5- تعزيز التكامل بين الأداء البيئي والأداء الوظيفي للمواد ضمن الدراسات المستقبلية بهدف الوصول إلى حلول أكثر توافقاً مع متطلبات التنمية المستدامة.
- 6- تطوير قواعد بيانات محلية خاصة بمعاملات انبعاثات الكربون للمواد الصناعية بهدف تحسين دقة دراسة تقييم دورة الحياة في البيئة المحلية.

References:

- [1] United Nations Environment Programme, "Global Resources Outlook ", Technical report, UNEP, Nairobi, Kenya, 2019.
- [2] World Bank Group, "Waste Management and Environmental Sustainability Report", Technical report, Word Bank, Washington DC, USA, 2018.
- [3] F. Saboya et al., "Use of Marble Waste in Construction Materials", Construction and Building Materials, vol. 21, no. 6, pp. 123-130, 2007.
- [4] H. Hebhouh et al., " Use of Waste Marble Aggregates in Concrete ", Construction and Building Materials, vol. 25, no. 3, pp. 1167-1171, 2011.
- [5] International Energy Agency, "Tracking Industry Cement", Technical report, IEA, Paris, France, 2020.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis", Technical report, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2021.
- [7] K.E. Alyamac and R. Ince, "A Preliminary Concrete Mix Desingn for SCC with Marble Powders", Construction and Building Materials, vol. 23, no. 3, pp. 1201-1210, 2009.
- [8] M. Ali et al., "Utilization of Marble Dust in Cement-Based Materials", Materials and Design, vol. 32, no. 8-9, pp.4391-4397, 2011.

- [9] M. Ahmadi, E. Abdollahzadeh, M. Kashfi, B. Khataei, and M. Razavi, " Life Cycle Assessment and Performance Evaluation of Self-Compacting Concrete Incorporating Waste Marble Powder and Aggregates", *Materials*, vol. 18, no. 13, pp.2982, 2025.
- [10] P. Sertyesilisik and T. Uygunoglu, "Environmental Impact Assessment of Self-Compacting Concrete made with Marble Dust", *Gazi University Journal of Science*, vol. 38, no. 4, pp. 1-15, 2025.
- [11] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories," Technical Report, IPCC, Geneva, Switzerland, 2006.
- [12] International Energy Agency (IEA), "World Energy Outlook 2020," Technical Report, IEA, Paris, France, 2020.
- [13] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), " Climate Change 2021: The Physical Science Basis, " Technical Report, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC, Geneva, Switzerland, 2021.
- [14] Ecoinvent Association, "Ecoivent Database version 3.8,"Ecoinvent, 2021.Available: ecoinvent.org.
- [15] Dreux & Festa (1998), *Nouveau guide du beton et de ses constituants*, Editions Eyrolles.
- [16] Syrian Engineers Syndicate, "Syrian Arab Code for the Design and Implementation of Reinforced Concrete Structures," 6th ed., Technical Report, Syrian Engineers, Syndicate, Damasscus, Syria, 2024.
- [17] D. N. Huntzinger and T. D. Eatmon, " A Life Cycle Assessment of Portland Cement Manufacturing ", *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, no. 7, pp. 668- 675, 2009.
- [18] American Concrete Institute (ACI), ACI 318-19," Building Code Requirements for Structural Concrete,". Farmington Hills, MI, USA, 2019.