International Science and Technology Journal
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
Volume 37 العدد
Part 1 المجلد
http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

Received	2025/08/02	تم استلام الورقة العلمية في
Accepted	2025/08/27	تم قبول الورقة العلمية في
Published	2025/08/28	تم نشر الورقة العلمية في

تأثير استخدام مسحوق كربونات الكالسيوم ومضاف فائق التلدين على مقاومة الخرسانة للضغط والانحناء

علي صالح محمد بن غشير.
قسم التقنيات المدنية – المعهد العالي للعلوم والتقنية _مصراته – ليبيا
banghisheerali@gmail.com

الملخص

يهدف هذا البحث إلى تقييم تأثير مسحوق كربونات الكالسيوم والمضافات فائقة التلدين على الخصائص الميكانيكية للخرسانة. تم تصميم ثماني خلطات خرسانية بِنِسبتين من الماء/أسمنت (w/c= 0.50.w/c=0.45) وتركيزات مختلفة من الإضافات. أظهرت النتائج أن إضافة مسحوق كربونات الكالسيوم لوحده يقلل من قابلية تشغيل الخرسانة (الهبوط)، إلا أن استخدام الملدنات الفائقة يعوض هذا النقص بشكل كبير، مما يحسن من قابلية التشغيل. فيما يتعلق بمقاومة الضغط، لوحظ تحسن كبير بإضافة 2.5% من مسحوق كربونات الكالسيوم، حيث وصلت المقاومة إلى 58.0 ميجا باسكال عند دمج مسحوق كربونات الكالسيوم مع الملدن الفائق، مما يؤكد التأثير التآزري للملدن في زيادة كثافة وقوة الخرسانة. بالنسبة لمقاومة الانحناء، تشير البيانات إلى أن مسحوق كربونات الكالسيوم يعمل كحشو دقيق يعزز التماسك. في الكمرات ذات القياس 70 سم، زاد متوسط حمل الانحناء من 11.2 كيلو نيوتن للخلطة المرجعية إلى 15.2 كيلو نيوتن مع إضافة 2.5% مسحوق كربونات الكالسيوم، (W/C 0.45)ووصل إلى 24.5 كيلو نيوتن عند استخدام 5.0% مسحوق كربونات الكالسيوم مع 1.8% ملدن فائق.(W/C= 0.45)أما في الكمرات ذات القياس 50 سم، فزاد متوسط حمل الانحناء من 23.7 كيلو نيوتن للخلطة المرجعية إلى 30.1 كيلو نيوتن مع 2.5%مسحوق كربونات الكالسيوم ((W/C 0.45، وسجل 26.0 كيلو نيوتن عند استخدام 5.0% مسحوق كربونات الكالسيوم مع 1.8% ملدن فائق (W/C=0.45) بشكل عام يشير البحث إلى أن دمج مسحوق كربونات الكالسيوم، خاصة بنسبة 2.5%، سواء بوجود الملدنات الفائقة أو بدونها، يحقق أداءً ميكانيكيًا مثاليًا للخرسانة.

الكلمات الدالة: مسحوق كربونات الكالسيوم، الملدنات الفائقة، قابلية التشغيل، مقاومة الضغط، مقاومة الانحناء.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

International Science and Technology Journal
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
Volume 37 العدد
Part 1 المجلد
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
International Science and Technology Journal
ISTJ

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

The Effect of Using Calcium Carbonate Powder and Superplasticizer Admixture on the Compressive and Flexural Strength of Concrete

Ali Saleh Mohamed Ben Ghisheer
Civil Technology Department - Higher Institute of Science and Technology, Misurata, Libya,
banghisheerali@gmail.com

Abstract

This research aims to evaluate the impact of calcium carbonate powder (CCP) and superplasticizer admixtures on the mechanical properties of concrete, with the objective of improving performance and durability. Eight concrete mixes were designed with varying water-to-cement (W/C) ratios and different additive concentrations. The results showed that the addition of CCP reduces concrete workability (slump), but the use of superplasticizers significantly compensates for this reduction, thereby improving workability. Regarding compressive strength, a significant improvement was observed with the addition of 2.5% CCP, where the strength reached 58.0 MPa when CCP was combined with a superplasticizer, confirming the synergistic effect of the superplasticizer in increasing concrete density and strength. For flexural strength, data indicate that CCP acts as a fine filler enhancing cohesion. In 70 cm beams, the average flexural load increased from 11.2kN for the reference mix to 15.2kN with the addition of 2.5% CCP (W/C 0.45), and reached 24.5kN when using 5.0% CCP with 1.8% superplasticizer (W/C 0.45). For 50 cm beams, the average flexural load increased from 23.7kN for the reference mix to 30.1kN with 2.5% CCP (W/C 0.45), and registered 26.0kN when using 5.0% CCP with 1.8% superplasticizer (W/C 0.45). Overall, the research indicates that the incorporation of CCP, especially at 2.5%, whether with or without superplasticizers, achieves optimal mechanical performance for concrete.

Keywords: Calcium carbonate powder, Superplasticizers, Mechanical and physical properties, Compressive strength, and Flexural strength.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

1- المقدمة

تعتبر الخرسانة من أكثر مواد البناء استخدامًا على نطاق واسع في جميع أنحاء العالم نظرًا لتوافر موادها الأولية نسبيًا وقدرتها على تحمل الأحمال المختلفة. ومع ذلك، فإن السعي المستمر لتحسين خواصها الميكانيكية والمتانة والاقتصادية يدفع الباحثين لاستكشاف مواد وتقنيات جديدة.، في هذا السياق يبرز استخدام المواد المضافة المعدنية مثل مسحوق كربونات الكالسيوم ($CaCO_3$)، ذلك الى توافرها الكبير، تكلفتها المنخفضة نسبيا وإمكانية تحسينها لبعض خواص الخرسانة حيث تساهم كربونات الكالسيوم في تحسين قوة الخرسانة ومقاومتها للضغط والشد (بن غشير،2025)، بالإضافة إلى مساهمتها المحتملة في تقليل البصمة الكربونية لصناعة الأسمنت خاصة عند استبدال جزء من الاسمنت وذلك بتقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بإنتاج الأسمنت البورتلاندي، نظراً لمساهمتها الكبيرة في البصمة الكربونية لقطاع البناء والتشييد(علي واخرون، 2024).

تكوين الكربو–ألومينات، حيث تتفاعل كربونات الكالسيوم مع الألومينات الموجودة في الأسمنت لإنتاج كالسيوم ألومينات (Calcium Aluminates)، تعد هذه المركبات مستقرة نسبيا وتساهم في تحسين الخواص الميكانيكية للخرسانة وتقليل مساميتها، خاصة في وجود نسب معينة من كربونات الكالسيوم. (M. Zhang, G. Li, & Y. Wang, 2023).

2–الدراسات السابقة

أشارت دراسات سابقة متعددة إلى أن استخدام ركام كربونات الكالسيوم يساهم في تحسين الخصائص الميكانيكية للخرسانة، بما في ذلك مقاومة الضغط والشد وقابلية التشغيل، عند تطبيقها في البيئات الرطبة. وقد لوحظ بوضوح زيادة ملحوظة في قيم مقاومة الضغط والشد في الخرسانة التي تحتوي على هذا النوع من الركام. (بن غشير، 2025). وفي دراسة أخرى كشفت أن الزيادة في مقاومة الضغط والشد مع انخفاض نسبة الماء إلى الأسمنت. يُذكر أن مقاومة الشد أظهرت سلوكًا معقدًا، حيث قد تشهد انخفاضًا مبدئيًا عند النسب المنخفضة جدًا للماء إلى الأسمنت قبل معاودة الارتفاع عند نقطة معينة (علي واخرون ،2024). بالإضافة إلى ذلك، تُعد كربونات الكالسيوم مكونًا شائعًا في المواد الإسمنتية، حيث تؤثر على خصائصها من خلال آليتين رئيسيتين: تأثيرات فيزيائية (مثل خصائص الملء، التخفيف، والنمو البلوري وتأثيرات كيميائية M. Zhang, G. Li, & Y. Wang, 2023). علاوة على ذلك تُسهم كربونات الكالسيوم النشطة في تعزيز التكوين المعدني للمزيج الإسمنتي وتحسين تجانسه، مما قد يؤدي إلى تحسين خصائص

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

الملاط النهائية (Neville, 1997). ومن جانب أخر هنالك دراسة خلصت إلى أن استخدام 5٪ من (nano-$CaCO_3$) حسّن التعبئة الدقيقة وزاد من متانة الخرسانة. (M. He et al, 2020).

3- البرنامج العملي

تم إجراء الاختبارات اللازمة للتأكد من جودة المواد ومدى مطابقتها للمواصفات القياسية الليبية والبريطانية. معظم الاختبارات تم إجراؤها في معمل شركة الرباط الاستشارات والأعمال الهندسية ـ مصراته. ومكتب الجودة في مصنع البرج لصناعة الأسمنت زليتين والنتائج التي تم الحصول عليها تمت مقارنتها بالمواصفات البريطانية (BC882,1992) و الجدول رقم (1) يبين يوضح انواع الخلطات الخرسانية.

جدول 1: يوضح أنواع الخلطات الخرسانية.

رقم البند	اسم الخلطة الخرسانية	نسبة الماء إلى الاسمنت(w/c)
1	الخلطة المرجعية (الأولى)	w/c=0.5
2	الخلطة الثانية إضافة 10% بودرة	w/c=0.5
3	الخلطة الثالثة إضافة 05% بودرة	w/c=0.5
4	الخلطة الرابعة إضافة 10% بودرة	w/c=0.45
5	الخلطة الخامسة إضافة 05% بودرة	w/c=0.45
6	الخلطة السادسة إضافة 10%بودرة+1.8 ملدن	w/c=0.45
7	الخلطة السابعة إضافة 10%بودرة +1%ملدن	w/c=0.45
8	الخلطة الثامنة إضافة 05% بودرة+1.0%ملدن	w/c=0.45

4-مشكلة البحث

من أحد أهم المشاكل في الخلطات الخرسانية هي الوصول الي المقاومة المستهدفة للخلطة، ويتم ذلك بتحديد المصادر الجيدة لمكونات الخلطة الخرسانية للوصول الي المقاومة المطلوبة للخرسانة وبأقل التكاليف الممكنة. تحديد النسبة المثلى لكربونات الكالسيوم التي تحقق أفضل الخصائص الميكانيكية والمتانة، تمت صياغة مشكلة البحث في معرفة ماهي النسبة التي سوف تحقق أعلى مقاومة لتلك الخواص.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

5-أهداف الدراسة

تهدف هذه المخطوطة إلى دراسة وتحليل استخدام مسحوق كربونات الكالسيوم على مقاومة الضغط والانحناء للخرسانة. وسيتم تحليل النتائج ومقارنتها مع نتائج الخلطة المرجعية التي تم إعدادها بدون إضافة مسحوق كربونات الكالسيوم للحصول على خرسانة تفي بمتطلبات الجودة وبأقل التكاليف.

6. مكونات الخلطات الخرسانية

1.6 الإسمنت

الأسمنت المستخدم هو الإسمنت البورتلاندي العادي إنتاج مصنع البرج زليتن، النتائج التي تم الحصول عليها من معمل مراقبة الجودة بالمصنع كانت جميعها تقع ضمن الحدود المسموح بها بالمواصفات القياسية الليبية رقم 340 لسنة 1997م جدول رقم (2) يوضح التركيب الكيميائي الى الأسمنت المستخدم في هذه المخطوطة.

جدول 2: يوضح التركيب الكيميائي والمعدني الى الأسمنت المستخدم في هذه المخطوطة.

التركيب	النسبة	حدود المواصفات الليبية رقم 340 لسنة 1997 م
السيليكاSi	22.17%	-
الألومينا Al	4.98%	-
الحديدFe	3.61%	-
الكالسيوم Ca	62.70%	-
الماغنسيوم Ma	1.63%	>5.0%
الصوديومNa	0.11%	-
البوتاسيوم K	0.76%	-
الكلوريدات Cl	-0.208%	>0.1%
سيليكات ثلاثي الكالسيوم C3S	40.24%	-
سيليكات ثنائي الكالسيومC2S	33.13%	-
ألومنيات ثلاثي الكالسيومC3A	7.10%	-
ألومنيات وحديد رباعي الكالسيوم C4AF	10.97%	-
أكسيد الكالسيوم الحر F.Ca	1.12%	-
الفاقد بالحرق LOI	1.14%	>3.0%
المواد الغير قابلة للذوبان LR	0.39%	>1.5%

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

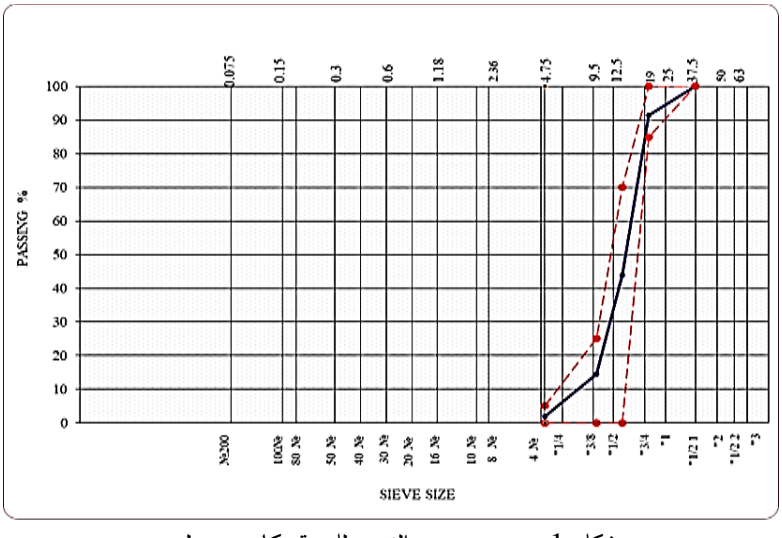
http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

2.6-الركام الخشن

1- تم توريد عينة ركام من كسارات بني وليد، حيث تم إجراء اختبار التدرج الحبيبي وكانت نتائج الاختبار ضمن الحدود والمواصفات البريطانية المعتمدة (BS 882,1992)، المواصفات الليبية رقم 49 لسنة 2002. والجدول رقم (3) يوضح نتائج اختبار تدرج التحليل المتخلي لعينة الركام. والشكل رقم (1) يوضح منحى التدرج الحبيبي للعينة الركام. والجداول (4) يوضح نتائج الاختبارات الفيزيائية.

جدول 3: يوضح التحليل المتخلي لعينة ركام كسارات بني وليد، وزن العينة 5505 جرام.

مقاس فتحة المنخل (ملم)	وزن المحجوز (جم)	نسبة المحجوز (%)	نسبة المار	حدود المواصفات البريطانية BS 882-1992	حدود المواصفات الليبية رقم 49لسنة 2002م.
37.5	0	0	100	100	100
20	58	1.1	98.9	85.100	90-100
14	4902	89	9.9	0.70	40-80
10	499	9.1	0.8	0.25	30-60
05	24	0.4	0.4	0.5	0-10
الوعاء	22	0.4	0	-	-



شكل 1: يوضح حدود التدرج للعينة ركام بني وليد

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

جدول 4: يوضح نتائج الاختبارات الفيزيائية للركام بني وليد.

الاختبار	نتيجة الاختبار	حدود المواصفات البريطانية BS822:1992:	حدود المواصفات الليبية رقم 49لسنة 2002م.
الوزن النوعي	2.56	S.G >2.50 <2.75	2.50 < S.G <2.75
الوزن النوعي (مشبع)	2.60	-	-
الوزن النوعي الظاهري	2.67	-	-
نسبة الامتصاص %	1.65	<3.0%	<4.0%
لوس انجلوس%	22.75	<50%	<50%
نسبة المواد الناعمة%	2.0%	<3.0%	<4.0%

6 .3 . الركام الناعم.

تم توريد عينة من الركام الناعم من الكثبان الرملية الموجود في مدينة مصراته . منطقة زريق، حيث أجري عليها اختبار التدرج الحبيبي واختبار الوزن النوعي ونسبة الامتصاص وكانت نتائج تلك الاختبارات ضمن الحدود والمواصفات البريطانية (BS822,1992).وحدود المواصفات الليبية رقم 49 لسنة 2002م. والجداول رقم (5-6) يوضحنا نتائج تلك الاختبارات. والشكل رقم (2) يوضح منحى التدرج الحبيبي للركام الناعم.

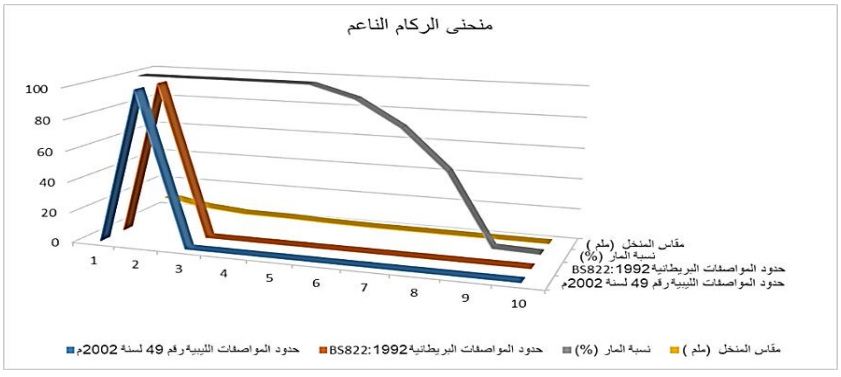
جدول 5: يوضح نتائج اختبار التحليل المتخلي لعينة الركام الناعم بوزن 300جم.

مقاس المنخل (ملم)	وزن المحجوز (جم)	نسبة المحجوز (%)	نسبة العابر (%)	حدود المواصفات البريطانية BS8221992:	حدود المواصفات الليبية رقم 49 لسنة 2002م.
9.50	0.0	0.0	100.0	-	-
4.75	0.0	0.0	100.0	100	100
2.36	0.0	0.0	100.0	80-100	80-100
2.00	0.3	0.1	99.9	-	-
1.18	0.8	0.3	99.6	70-100	70-100

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

55-100	55-100	91.6	8.0	24.0	0.600
-	-	75.1	16.6	49.7	0.425
-	-	49.1	25.9	77.8	0.300
0-15	0-15	2.1	47.0	141.1	0.150
-	-	1.1	1.0	3.1	0.075
-	-	0.0	1.1	3.3	الوعاء



شكل 2: يوضح منحنى الركام الناعم

جدول 6: يوضح نتائج اختبار الوزن النوعي ونسبة الامتصاص للركام الناعم.

الاختبارات	الوحدة	وزن العينة 1	وزن العينة2	المتوسط
وزن العينة مشبعة جافة السطح في الهواء جم	جرام	400.32	400.30	400.31
وزن العينة في الهواء جم	جرام	397.20	397.30	397.25
وزن الدور المخروطي مملوء بالماء	جرام	757.47	757.47	757.47
وزن الدور المخروطي مملوء بالماء العينة	جرام	1006.3	1005.9	1006.1
الوزن النوعي	-	2.622	2.615	2.169
الوزن النوعي المشبع	-	2.643	2.635	2.639
الوزن النوعي الظاهري	-	2.677	2.668	2.673
نسبة الامتصاص	%	0.79	0.76	0.77

4.6- ماء الخلطة.

تم إعداد الخلطة باستخدام ماء صالح لخلط الخرسانة طبقا للمواصفات الليبية رقم 294 لسنة 1988 ف، الجدول رقم (7) يبين التركيب المعدني لماء الخلط.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

جدول 7: يوضح التركيب المعدني لماء الخلطة.

العناصر الأساسية	الرمز الكيميائي	الكمية الموجودة بالماء (ملغ/لتر)	حدود المواصفات الليبية رقم 294لسنة1988م الحد الأقصى المسموح به (ملغ/لتر)
الكالسيوم	Ca	6	-
الصوديوم	Na	4	-
الماغنيسيوم	Ma	4	-
البوتاسيوم	K	5	-
الكبريتات	So	26	1000
البيكربونات	HCO3	38	
مجموع الأملاح الصلبة	T.D. S	167	2000
الأس الهيدروجيني	PH	7.3	6-8

7- تصميم الخلطة الخرسانية.

تم تصميم جميع الخلطات الخرسانية في هذا البحث وفقًا لمتطلبات الطريقة البريطانية بقوة مميزة (Characteristic Strength)مقدارها (30 ميجا باسكال) (fc=30MPa) بعد 28 يومً باستخدام أسمنت بورتلاندي عادي من نوع N42.5، من إنتاج مصنع البرج الى الأسمنت زليتن. أما الركام الخشن المستخدم فهو ركام مكسر مصدره محاجر بني وليد، وتم استخدام ماء صالح للشرب، وكانت نتائج اختبارات الاسمنت والركام الخشن والماء المستخدم للخلط داخل حدود المواصفات البريطانية والليبية كما هو مبين في الجداول أعلاه (2،3،4،7).و بنسبتين مختلفتين من الماء إلى الاسمنت ((w/c=0.50,w/c=0.45وإدخال عليهما إضافة بنسبتين مختلفتين(2.5%،5%) من مسحوق كربونات الكالسيوم ، ملدن كذلك بنسبة (0%،1.0%،1.8%) بجانب مسحوق كربونات الكالسيوم من وزن الاسمنت، ولضمان جودة الخرسانة، تم الأخذ في الاعتبار معامل الانحراف المعياري (Standard Deviation, s)

البالغ 8 ميجا باسكال، ومعامل الثابت k بقيمة 1.64. كما استهدفت الخلطات تحقيق قابلية تشغيل (Workability)ضمن نطاق اختبار الهبوط (Slump Test)يتراوح بين 60-180 ملم. كما هو موضح في الجدول رقم (8).

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

جدول 8: مكونات الخلطات الخرسانية للخلطات الثمانية المستخدمة لهذه المخطوطة. الكميات لكل واحد متر مكعب لكل خلطة.

الخلطات	w/c	الإسمنت (كجم/م^3)	الماء (لتر/م^3)	الرمل (كجم/م^3)	الركام الخشن (كجم/م^3)	وزن مسحوق كربونات الكالسيوم (كجم/م^3)	ملدن (لتر/م^3)
المرجعية	0.5	410	205	538.5	1256.5	–	–
M1Ca5	0.5	410	205	538.5	1256.5	20.5	–
M1Ca2.5	0.5	410	205	538.5	1256.5	10.25	–
M2Ca5	0.45	410	205	538.5	1256.5	20.5	–
M2Ca2.5	0.45	410	184.5	538.5	1256.5	10.25	–
M2Ca5P 1.8	0.45	410	184.5	538.5	1256.5	20.5	7.38
M2Ca5P 1.0	0.45	410	184.5	538.5	1256.5	20.5	4.1
M2Ca2.5 P1.0	0.45	410	184.5	538.5	1256.5	10.25	4.1

8–مناقشة النتائج.

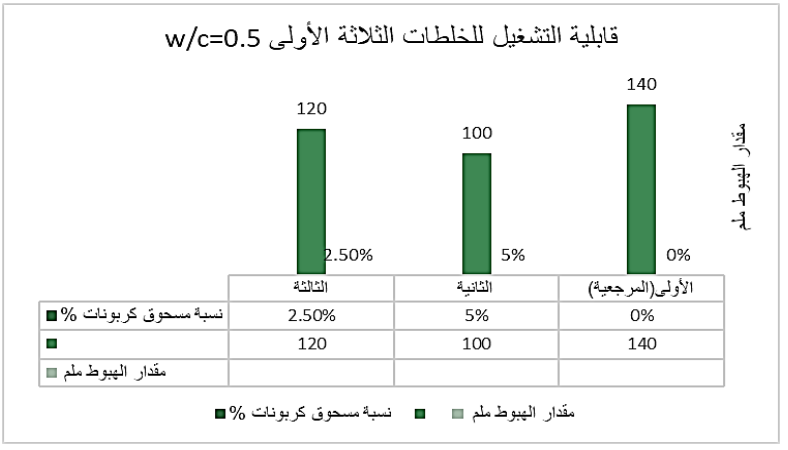
1.8– قابلية التشغيل (Workability)

تعتبر قابلية التشغيل من الخصائص الأساسية للخرسانة الطازجة التي تؤثر بشكل مباشر على سهولة الصب والدمك، وبالتالي على جودة ومتانة الخرسانة المتصلدة. لتقييم قابلية تشغيل الخلطات الخرسانية المختلفة التي تم تصميمها في هذه الدراسة، تم إجراء اختبار الهبوط ((Slump Test) وفقاً للمواصفة البريطانية(BS EN 12350– 2) عند نسبة ماء إلى الأسمنت (w/c=0.5) في الثلاث الخلطات الأولى للدراسة وبنسبة(w/c= 0.45) لباقي الخلطات مع إضافة ملدن(LYKSOR.NanoFlow2000) في الخلطة السادسة، السابعة والثامنة على التوالي بنفس نسب الخلط. وقد تروح مقدر الهبوط لجميع الخلطات المستهدفة داخل الدراسة ما بين (100–140ملم) وهوضمن الهطول التصميمي للخلطات (60–180ملم).

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

الشكل رقم (3) يوضح نتائج اختبار الهطول للخلطات الثلاثة الأولى والذي يبين أن أعلى قيمة هطول كانت للخلطة المرجعية بدون أي إضافات.



شكل 3: يوضح نتائج اختبار الهبوط للخلطات .w/c=0.5

عكس اختبار الهبوط (Slump Test) مدى سيولة الخرسانة الطازجة وقدرتها على الانسياب، وهو مؤشر حاسم لقابلية التشغيل. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير إضافة مسحوق كربونات الكالسيوم بنسب مختلفة (0%،2.5% و5% من وزن الأسمنت) على قابلية تشغيل الخرسانة.

أولا. الخلطة المرجعية (0% مسحوق كربونات الكالسيوم):

- **الهبوط: 140 ملم.**

هذه الخلطة تمثل نقطة الأساس للمقارنة. قيمة الهبوط البالغة 140 ملم تشير إلى أن الخلطة المرجعية لديها قابلية تشغيل جيدة جدًا، وتقع ضمن النطاقات الشائعة للخرسانة القابلة للصب والدمك بسهولة في معظم التطبيقات الإنشائية.

ثانيا. الخلطة الثانية (2.5% مسحوق كربونات الكالسيوم):

- **الهبوط: 120 ملم.**

عند إضافة 2.5% من مسحوق كربونات الكالسيوم، انخفض الهبوط من 140 ملم إلى 120 ملم. هذا يشير إلى أن إضافة هذه النسبة من مسحوق كربونات الكالسيوم أدت إلى انخفاض طفيف في قابلية التشغيل مقارنة بالخلطة المرجعية. لا تزال قيمة الهبوط (120 ملم) تعتبر جيدة ومقبولة لمعظم أعمال الخرسانة.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

ثالثا. الخلطة الثالثة (5% مسحوق كربونات الكالسيوم):

- **الهبوط: 100 ملم.**

عند زيادة نسبة مسحوق كربونات الكالسيوم إلى 5%، انخفض الهبوط بشكل أكبر ليصل إلى 100 ملم. هذا يمثل انخفاضًا أكثر وضوحًا في قابلية التشغيل مقارنة بكل من الخلطة المرجعية والخلطة ذات 2.5% إضافة. لا تزال قيمة الهبوط (100 ملم) مقبولة للعديد من التطبيقات، ولكنها تشير إلى أن الخرسانة أصبحت أقل سيولة وتتطلب جهدًا أكبر للصب والدمك.

- **المناقشة العامة وتأثير مسحوق كربونات الكالسيوم:**

تظهر هذه النتائج بوضوح أن إضافة مسحوق كربونات الكالسيوم يقلل من قابلية تشغيل الخرسانة، وأن هذا التأثير يزداد مع زيادة نسبة الإضافة.

- **الأسباب المحتملة لهذا الانخفاض:**

1. **زيادة مساحة السطح الكلية:** مسحوق كربونات الكالسيوم عادة ما يكون مادة دقيقة جدًا. عند إضافته إلى الخلطة، فإنه يزيد بشكل كبير من إجمالي مساحة السطح لجميع الجسيمات الصلبة في الخرسانة. هذا يعني أن كمية أكبر من ماء الخلط تصبح "محتبسه" على أسطح هذه الجسيمات أو تعمل على تليينها، مما يقلل من "الماء الحر" المتاح لتوفير السيولة للمزيج ككل.

2. **زيادة الاحتكاك الداخلي واللزوجة:** الجسيمات الدقيقة الإضافية يمكن أن تزيد من الاحتكاك بين جسيمات الأسمنت والركام الدقيق، مما يزيد من اللزوجة الكلية للمونة الإسمنتية ويجعلها أقل انسيابية.

3. **امتصاص الماء (إن وجد):** على الرغم من أن كربونات الكالسيوم نفسها ليست عالية الامتصاص للماء مثل بعض المواد البوزولانية، إلا أن الكميات الكبيرة من الجسيمات الدقيقة قد "تمتص" كمية بسيطة من الماء على أسطحها.

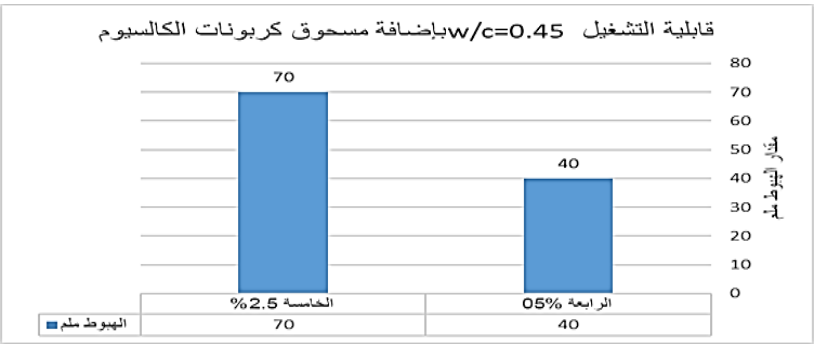
1.8 .1 التشغيلية بنسبة خلط (w/c=0.45)

تم تعيين قابلية التشغيل للخرسانة الطازجة بإجراء اختبار slump test للهبوط حسب المواصفات القياسية البريطانية (BS 1818, 1970) حيث تم إجراء اختبار الهبوط لهذه الخلطات بنسبة ماء إلى الاسمنت (w/c=0.45)، كانت نتائج اختبار الهبوط لعينة الرابعة 2.5% مسحوق كربونات الكالسيوم داخل حدود المواصفة حيث سجلت 70ملم لاختبار الهبوط slump test. بينما سجلت الخلطة الثالثة بإضافة 5% مسحوق الكربونات قابلية

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

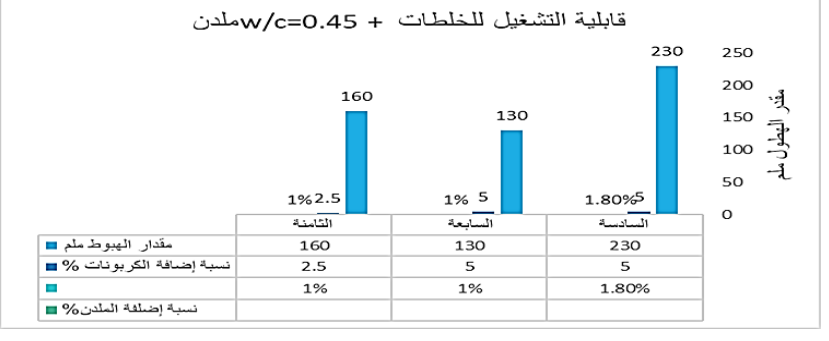
تشغيل أقل من حدود المواصفة حيث أعطت 40 ملم لنفس الاختبار slump test ، والشكل (4)يوضح نتائج الاختبار.



شكل 4: يوضح نتائج اختبار الهبوط للخلطات w/c=0.4

1.8 .2 التشغيلية بإضافة الملدن بنسبة خلط (ملدن + w/c=0.45).

تم تعيين قابلية التشغيل للخرسانة الطازجة بإجراء اختبار slump test للهبوط حسب المواصفات القياسية البريطانية (BS1818, 1970)،أجريء اختبار الهبوط لهذه الخلطات بنسبة ماء للإسمنت (ملدن+ w/c=0.45)حيث تم في هذه الخلطات إضافة ملدن من نوع " Nano Flow® 2000 LYKSSOR" بنسبة 1.8% مع مسحوق كربونات الكالسيوم بنسبة 05% من وزن الإسمنت حيث تحسنت قابلية التشغيل بي 5.75 أضعاف قابلية بدون إضافة 1.8% ملدن عن الخلطة الرابعة بنفس النسبة w/cللخلطتين ، في الخلطة السابعة حيث تحسنت قابلية التشغيل وسجلت 130ملم بزيادة مقدارها 60ملم ،كانت نتائج اختبار الهبوط لعينة الثامنة 2.5% مسحوق كربونات الكالسيوم + 1.0% ملدن 160ملم بمقدار زيادة قدره 90ملم عند الخلطة الخامسة لنفس الاختبار slump test ، والشكل رقم (5) يوضح نتائج الاختبار.



شكل 5: يوضح نتائج اختبار الهبوط للخلطات w/c=0.45 + ملدن

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

3.1.8 الاستنتاجات لاختبار الهبوط:

من النتائج المتحصل عليها من اختبار الهبوط (slump test) نجدان الخلطة المرجعية تتميز بأفضل قابلية تشغيل.

* إضافة 2.5% من مسحوق كربونات الكالسيوم تقلل من الهبوط بشكل طفيف ولكن تبقى الخلطة ضمن نطاق قابلية التشغيل الجيدة.

* زيادة نسبة الإضافة إلى 5% تؤدي إلى انخفاض أكبر في الهبوط، مما يشير إلى أن الخرسانة تصبح أكثر جفافًا أو لزوجة، وقد تتطلب جهدًا أكبر للصب والدمك.

* يجب مراعاة هذا التأثير عند تحديد نسبة مسحوق كربونات الكالسيوم في تصميم الخلطة، خاصة إذا كانت هناك متطلبات صارمة لقابلية التشغيل (مثل الخرسانة ذاتية الدمك أو الخرسانة التي يتم ضخها لمسافات طويلة). قد يتطلب الأمر استخدام مضافات كيميائية (مثل الملدنات الفائقة) لتعويض هذا النقص في قابلية التشغيل عند استخدام نسب أعلى من مساحيق الحشو الدقيقة.

2.8 مقاومة الخرسانة للضغط.

يقدم هذا القسم اختبارات مقاومة الضغط للخرسانة ومقارنة النتائج التي تم الحصول عليها بعد معالجتها في الماء لمدة 7 و28 يوم. حيث تم إجراء هذا الاختبار وفق المواصفات البريطانية (BS1881Part 116:1983):، و الجدول رقم (9) يبين نتائج اختبار مقاومة الضغط للعينات المعالجة في الماء.

جدول 9: يبين نتائج اختبار مقاومة الضغط للعينات المعالجة في الماء.

اسم الخلطة	نسبة الخلط (w/c)	نسبة إضافة مسحوق كربونات%	نسبة إضافة ملدن %	متوسط مقاومة العينات للضغط المعالجة في الماء (Map)	
				7أيام	28يوم
الخلطة الأولى المرجعية	0.50	0	0	29.6	35.6
الخلطة الثانية	0.50	%05	0	33.0	39.0
الخلطة الثالثة	0.50	%2.5	0	37.0	40.5
الخلطة الرابعة	0.45	%05	0	35.0	43.0
الخلطة الخامسة	0.45	%2.5	0	41.5	46.0
الخلطة السادسة	0.45	%05	%1.8 ملدن	52.5	58.0
الخلطة السابعة	0.45	%05	%1.0 ملدن	52.0	58.0
الخلطة الثامنة	0.45	%2.5	%1.0 ملدن	55.5	58.0

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

8. 2 .1 تأثير استخدام مسحوق كربونات الكالسيوم على مقاومة الضغط

أولا: تأثير مسحوق كربونات الكالسيوم بدون الملدن:

الخلطات الأولية (الثانية، الثالثة) بنسبة ماء للإسمنت w/c=0.5، كانت مقاومة الخلطات بعد 7 أيام (33.0، 37.00) ميقا بسكال، بنسبة زيادة 11.48%، 25.0% بالتوالي عن الخلطة الأولى المرجعية بعد 7أيام. بالإضافة إلى ذلك، لوحظت زيادة إضافية بنسبة 9.5% و13.7% بعد 28 يوم من المعالجة بالغمر في الماء أيضا. من النتائج يمكن أن نفسر أن إضافة 2.5% من مسحوق كربونات الكالسيوم أدت إلى تحسين مقاومة الخرسانة للضغط للعمرين بشكل أفضل من إضافة 5%، ذلك لأنه عند إضافة نسبة صغيرة من مسحوق الكربونات تعمل كنواة لتكوين بلورات هيدرات الكالسيوم سيليكات –C) S–H)، هي المرحلة الرئيسية المسؤولة عن قوة الخرسانة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تملأ هذه الجزيئات الفرغات الصغيرة بين جزئيات الأسمنت، مما يزيد كثافة الخرسانة ويحسن قوة الضغط، لكن عند زيادة نسبة كربونات الكالسيوم الي 5% قل تأثير ملئ الفرغات قليلا. قد يكون ذلك بسبب تكتل جزيئات كربونات الكالسيوم معا، مما يقلل من فعاليتها كنواة ويخلق مناطق ضعيفة في المصفوفة الخرسانية بدلا من ملء الفرغات بشكل مثالي. ويظهر ذلك التأثير وضحا أيضا عند تخفيض نسبة الماء للإسمنت w/c=0.45 في الخلطتين الرابعة والخامسة حيث سجلت كل منهما (35.0، 41.5) ميقا بسكال بعد 7 أيام معالجة بالغمر في الماء على التوالي، (43.0، 46.0) ميقا بسكال بعد 28يوم.

ثانيا: تأثير مسحوق كربونات الكالسيوم وتفاعله مع الملدن:

عند نسبة 02.5% مسحوق كربونات الكالسيوم +1.0% ملدن في الخلطة الثامنة أعطت زيادة مطردة في مقاومة الانضغاط حيث سجلت 55.5 ميقا بسكال بعد 07 أيام من الغمر في الماء. بمقدار زيادة قدره 14 ميقا بسكال. يرجع ذلك إلى تأثير تآزري حيث عمل الملدن على تشتيت المسحوق، مما أدى إلى تحسين القوة المبكرة للخرسانة، كذلك نجده يعطي نفس المفعول عند عمر 28 يوم للخلطات الثلاثة (السادسة، السابعة، الثامنة) حيث سجلت كلا منها 58.00 ميقا بسكال للخلطات الثلاث على التوالي، بفارق 12.0 مقا بسكال عن أعلى مقاومة للخلطات بدون إضافة الملدن وبنفس نسبة كربونات الكالسيوم، الماء إلى الإسمنت w/c في الخلطة الخامسة، حيث سجلت الأخيرة 46.0 ميقا بسكال بنفس المدة 28 يوم من المعالجة بالغمر في الماء.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

8. 2 .2 تأثير الملدن وتفاعله مع مسحوق كربونات الكالسيوم على مقاومة الضغط

مسحوق كربونات الكالسيوم وحده، بدون ملدن قد يكون له تأثير ضئيل أو سلبي طفيف على مقاومة الانضغاط. الجمع بين مسحوق كربونات الكالسيوم والملدن يعزز بشكل كبير مقاومة الانضغاط للخلطة. من المحتمل أن يحسن الملدن قابلية التشغيل وتشتيت المسحوق، مما يؤدي إلى مصفوفة أكثر كثافة وأقوى، يبدو أن هناك نطاقًا أمثل لكل من محتوى المسحوق والملدن. تُظهر الخلطات 6 ،7، 8 والتي تحتوي على الملدن، باستمرار أعلى القوى (58.0 ميغا باسكال)، بغض النظر عن نسبة المسحوق المضافة (سواء كانت 2.5% أو 5%)، فقد لوحظ أن مقاومة الضغط ظلت تابته، طالما أن كمية كافية من الملدن (حوالي 1.0% أو أكثر) موجودة. يشير هذا إلى أن الملدن يلعب دورًا حاسمًا في إطلاق الفوائد المحتملة لمسحوق كربونات الكالسيوم في تحسين قوة الخرسانة.

8. 3 مقاومة الخرسانة للانحناء.

تم إجراء الاختبار على الكمرات الخرسانية مقاس (10سم *10سم * 50سم)، (15سم *15سم *70سم)، بعد معالجتها بالغمر في الماء مدة 28يوم على التوالي. وأخذ متوسط النتائج لكل خلطة وكانت النتائج كما موضح بالجدول 10 و 11:

جدول 10: يوضح نتائج اختبار الكمرات مقاس (50سم * 10سم * 10سم).

اسم الخلطة	نسبة الخلط (w/c)	نسبة إضافة مسحوق كربونات%	نسبة إضافة الملدن %	متوسط وزن العينة (كجم)	متوسط حمل (كن)
الخلطة الأولى (المرجعية)	0.5	0	0	11.15	11.2
الخلطة الثانية	0.5	5.0%	0	12.73	14.0
الخلطة الثلاثة	0.50	2.5%	0	12.86	12.3
الخلطة الرابعة	0.45	5.0%	0	12.37	14.0
الخلطة الخامسة	0.45	2.5%	0	12.89	15.2
الخلطة السادسة	0.45	5.0%	1.8%	12.71	24.5
الخلطة السابعة	0.45	5.0 %	1.0%	13.10	16.5
الخلطة الثامنة	0.45	2.5%	1.0%	13.02	18.5

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

جدول 11: يوضح نتائج متوسط الكمرات مقاس (70سم*15سم*15سم).

اسم الخلطة	نسبة الخلط (w/c)	نسبة إضافة مسحوق كربونات%	نسبة إضافة الملدن %	متوسط وزن العينة	متوسط حمل (كن)
الخلطة الأولى (المرجعية)	0.5	0	0	38.30	23.7
الخلطة الثانية	0.5	5.0%	0	38.39	26.4
الخلطة الثلاثة	0.50	2.5%	0	37.43	28.1
الخلطة الرابعة	0.45	5.0%	0	38.50	29.5
الخلطة الخامسة	0.45	2.5%	0	38.23	30.1
الخلطة السادسة	0.45	5.0%	1.8%	37.50	26.0
الخلطة السابعة	0.45	5.0 %	1.0%	37.74	29.0
الخلطة الثامنة	0.45	2.5%	1.0%	37.59	29.2

1.3.8تأثير مسحوق كربونات الكالسيوم على مقاومة الانحناء للكمرات الخرسانية

يعمل مسحوق كربونات الكالسيوم كحشو دقيق (filler)يملأ الفراغات بين حبيبات الركام والأسمنت، مما يؤدي إلى مزيج أكثر تماسكاً وأقل مسامية. هذا يمكن أن يؤدي إلى تحسين في الخواص الميكانيكية والمتانة للمنتج النهائي.

– **التأثير على التفاعل الهيدروليكي:** كربونات الكالسيوم نفسه ليس مادة هيدروليكية، أي أنه لا يتفاعل مع الماء لتكوين مركبات الأسمنت المتصلبة. ومع ذلك، يمكن أن يعمل كمركز تنوي (nucleation site) لنمو بلورات (C–S–H)سيليكات الكالسيوم المائية الناتجة عن تفاعل الأسمنت، مما قد يسرع من عملية الترطيب ويحسن من بنية المعجون المتصلب.

2.3.8 تأثير مسحوق الكربونات بجانب الملدن على مقاومة الانحناء للكمرات الخرسانية

يعمل الملدن على تحسين خصائص الخرسانة من خلال تشتيت جزيئات الأسمنت ومسحوق كربونات الكالسيوم الدقيقة، مما يقلل قوى التجاذب بينها ويسمح بخفض نسبة الماء إلى الأسمنت (W/C)مع الحفاظ على قابلية التشغيل أو تحسينها. هذا الخفض في نسبة W/C يؤدي إلى تقليل الفراغات الشعرية في الخرسانة المتصلبة، مما يزيد من كثافتها وقوتها ومتانتها. كما أن التشتت المحسّن لكربونات الكالسيوم يضمن توزيعًا أكثر

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

تجانسًا للمواد الصلبة، ويقلل من التكتل، ويسهم في الحصول على منتج نهائي بخصائص أكثر اتساقًا وقوة محسّنة.

الاستنتاجات:

* **كربونات الكالسيوم وحدها:** أظهرت نسبة 2.5% من مسحوق كربونات الكالسيوم فعالية أعلى مقارنة بنسبة 5%. تُعزى هذه الفعالية إلى دور كربونات الكالسيوم كمادة حشو دقيقة تعمل على زيادة كثافة المزيج، ملء الفراغات، تحسين التماسك وقابلية تشغيل الخلطة الطازجة، وتعزيز الخصائص الميكانيكية للخرسانة المتصلبة.

* **كربونات الكالسيوم مع الملدن:** تبين أن إضافة 2.5% من كربونات الكالسيوم مع الملدن كافية لتحقيق الأداء المطلوب، وذلك بفضل التأثير التآزري بين المكونين. الملدن يعزز من تشتت كربونات الكالسيوم، مما يزيد من كفاءتها كحشو. الأهم من ذلك، يسمح الملدن بتقليل نسبة W/C مع الحفاظ على قابلية التشغيل، مما يؤدي بشكل حاسم إلى زيادة قوة ومتانة الخرسانة عبر تقليل المسامية وتحسين كثافة المنتج المتصلب.

بناءً على ما سبق، يمكن استنتاج أن نسبة 2.5% من مسحوق كربونات الكالسيوم هي الخيار الأمثل والأكثر كفاءة، سواء تم استخدامها بمفردها أو بالاشتراك مع الملدن، مما يضمن تحقيق الأداء الأمثل والاستغلال الفعال للمواد في تركيبات الخرسانة.

9. الخلاصة

من النتائج المتحصل عليها يمكن استخلاص الاتي:

1.9 قابلية التشغيل (Workability):

* إضافة مسحوق كربونات الكالسيوم لوحده يقلل من قابلية تشغيل الخرسانة (الهبوط).

* عند نسبة w/c=0.5، انخفض الهبوط من 140 ملم في الخلطة المرجعية (بدون إضافات) إلى 120 ملم عند إضافة 2.5% من المسحوق، وإلى 100 ملم عند إضافة 5%.

* يُعزى هذا الانخفاض إلى زيادة المساحة السطحية الكلية للجسيمات الصلبة، مما يقلل من "الماء الحر" المتاح ويؤدي إلى زيادة لزوجة الخلطة.

* استخدام الملدنات الفائقة يعوض هذا النقص بشكل كبير، مما يحسن من قابلية التشغيل. على سبيل المثال، في الخلطات التي تحتوي على ملدن، وصلت قيم الهبوط إلى 230 ملم مع 5.0% من مسحوق كربونات الكالسيوم و1.8% ملدن (w/c=0.45).

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

2.9 مقاومة الضغط (Compressive Strength):

* أظهرت النتائج تحسنًا كبيرًا في مقاومة الضغط عند إضافة 2.5% من مسحوق كربونات الكالسيوم وحده.

* أفضل أداء لمقاومة الضغط تحقق عند دمج مسحوق كربونات الكالسيوم مع الملدن الفائق.

* وصلت مقاومة الضغط إلى 58.0 MPa بعد 28 يومًا عند استخدام 2.5% من المسحوق مع 1.0% ملدن، وكذلك عند استخدام 5.0% من المسحوق مع 1.0% أو 1.8% ملدن (عند w/c=0.45).

* يعود هذا التحسن إلى التأثير التآزري للملدن الذي يشتت جزيئات المسحوق، مما يؤدي إلى مصفوفة خرسانية أكثر كثافة وقوة.

3.9 مقاومة الانحناء (Flexural Strength):

* يعمل مسحوق كربونات الكالسيوم كحشو دقيق يعزز التماسك بين مكونات الخلطة.

* في الكمرات بقياس 70 سم، زاد متوسط حمل الانحناء من 11.2 كن للخلطة المرجعية إلى 15.2 كن مع إضافة 2.5% من المسحوق عند (w/c=0.45).

* وصل الحمل إلى 24.5 كن عند استخدام 5.0% من المسحوق مع 1.8% ملدن عند (w/c=0.45).

* في الكمرات بقياس 50 سم، زاد متوسط حمل الانحناء من 23.7 كن للخلطة المرجعية إلى 30.1 كن مع 2.5% من المسحوق (عند w/c=0.45)، وسجل 26.0 كن عند استخدام 5.0% من المسحوق مع 1.8% ملدن عند (w/c=0.45).

* يساهم الملدن في تحسين خصائص الانحناء من خلال تشتيت جزيئات الأسمنت ومسحوق كربونات الكالسيوم وتقليل نسبة الماء/الأسمنت، مما يؤدي إلى خرسانة أكثر كثافة وقوة.

10. التوصيات

يوصي الباحث في هذه الدراسة إلى مجموعة من النقاط التالية:

1 – يوصى بمواصلة البحث لتحديد النسبة المثلى لمسحوق كربونات الكالسيوم والمضاف فائق التلدين التي تحقق أعلى مقاومة للضغط والانحناء مع مراعاة الجدوى الاقتصادية.

2–إجراء دراسات معمقة حول تأثير هذه الإضافات على خواص المتانة طويلة الأمد للخرسانة، مثل النفاذية ومقاومة التآكل والتجمد والذوبان.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

3–التحقيق في التفاعلات الكيميائية والفيزيائية الدقيقة بين مسحوق كربونات الكالسيوم والأسمنت والملدنات على المستوى النانوي لفهم آليات التحسين بشكل أكثر تفصيلا وذلك بواسطة تحليل الحيود بالأشعة السينية (X–ray Diffraction – XRD) تُستخدم لتحديد التركيب البلوري للمواد وتقدير حجم البلورات.

4– تطبيق هذه النتائج في تصميم خلطات خرسانية لمشاريع إنشائية فعلية لتقييم الأداء في ظروف التشغيل الحقيقية، مع الأخذ في الاعتبار الظروف البيئية المحلية في ليبيا.

5– يجب مراعاة هذا التأثير عند تحديد نسبة مسحوق كربونات الكالسيوم في تصميم الخلطة، خاصة إذا كانت هناك متطلبات صارمة لقابلية التشغيل (مثل الخرسانة ذاتية الدمك أو الخرسانة التي يتم ضخها لمسافات طويلة).

11. المراجع

المركز الوطني للمواصفات والمعايير القياسية. (1988). المواصفات القياسية الليبية رقم 294 لسنة 1988ف للمياه المستخدمة في الخرسانة.

المركز الوطني للمواصفات والمعايير القياسية. (1997). المواصفات القياسية الليبية رقم 340 لسنة 1997 الخاصة بالإسمنت البورتلاندي.

المركز الوطني للمواصفات والمعايير القياسية. (2002). المواصفات القياسية الليبية رقم 49 لسنة 2002 لركام الخرسانة من المصادر الطبيعية.

بن غشير، ع. ص. (2025)، تأثير ركام كربونات الكالسيوم على مقاومة الخرسانة للضغط والشد في البيئة الرطبة، مجلة الجامعة الأسمرية: المجلد 10، العدد 1، ص.43–56.

علي، ا. والقط، م. (2024)، تحسين تدرج الركام وأثره على خواص الخرسانة عالية المقاومة، مجلة الهندسة الإنشائية، المجلد 23، العدد 1، ص.27.

British Standards Institution. (1970). BS 1881: Part 2: Method for Determination of Slump.

British Standards Institution. (1983). BS 1881: Part 119: Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes.

British Standards Institution. (1992). BS 882: Specification for Aggregates from Natural Sources for Concrete.

British Standards Institution. (1996). BS 12: Specification for Portland Cement.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/asmb0208

He, M. et al. (2020). Effects of nano-$CaCO_3$ on early-age properties of cement-based materials. Journal of Materials in Civil Engineering.

Neville, A. M. (1997). Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete.

Zhang, M., Li, G., & Wang, Y. (2023). Study on the Properties of Cement-Based Cementitious Materials Modified by Nano-$CaCO_3$. Applied Sciences, 13(4), 2451. https://www.mdpi.com/2076-3417/13/4/2451

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية