

## The Effect of Iron Slag Powder Addition on the Performance of Self-Compacting Concrete

lecturer \ Haifa Ali Abu Haliga\*, Abdul Hadi Mohamed Alebrahim, Hamed Munir Al-Mobaid

Faculty of Engineering | University of Tripoli | Libya

Received:

15/03/2025

Revised:

23/03/2025

Accepted:

16/04/2025

Published:

15/06/2025

\* Corresponding author:  
[eng.haifa.ali@gmail.com](mailto:eng.haifa.ali@gmail.com)

**Citation:** Abu Haliga, H. A., Alebrahim, A. M., & Al-Mobaid, H. M. (2025). The Effect of Iron Slag Powder Addition on the Performance of Self-Compacting Concrete. *Journal of engineering sciences and information technology*, 9(2), 13 – 25.  
<https://doi.org/10.26389/AJSRP.K170325>

2025 © AISRP • Arab Institute of Sciences & Research Publishing (AISRP), Palestine, all rights reserved.

• Open Access



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY-NC) license

**Abstract:** This study aimed to utilize iron slag as a cementitious binder in varying proportions (5%, 10%, 15%, 20%, and 25%) by weight of ordinary Portland cement (42.5 KN). To achieve this, the iron slag was ground to match the fineness of cement and subsequently replaced in the designated proportions. Laboratory experiments were conducted on self-compacting concrete to assess the impact of iron slag addition on its properties in both fresh and hardened states. In the fresh state, performance was evaluated using tests such as the slump flow test, J-Ring test, and others. In the hardened state, the compressive strength of concrete cubes was measured at different curing ages (7 and 28 days), along with the absorption test, providing insights into the relationship between permeability and concrete durability. This study contributes to industrial waste reduction by repurposing iron slag instead of disposing of it in open sites, thereby conserving vast land areas and mitigating environmental impacts. Additionally, it offers a local alternative to imported materials. Despite the use of a lower water-to-cement ratio (0.42) compared to conventional concrete (0.45–0.375), the results confirmed the efficiency of this concrete type, demonstrating satisfactory mechanical and engineering properties. The findings indicated that incorporating iron slag enhances concrete workability, reduces bleeding, and improves mix homogeneity and resistance to segregation. Moreover, its inclusion increases compressive strength by reducing permeability. The study concluded that replacing 10–15% of cement with iron slag produces high-performance concrete while minimizing environmental impact, making it a viable option for sustainable construction, particularly in heavily reinforced structures or those exposed to chemical environments.

**Keywords:** Self-compacting concrete, iron slag, cementitious material.

### أثر إضافة مسحوق خبث الحديد على أداء الخرسانة ذاتية الدمك

المحاضرة / هيفاء علي ابوحليقة\*. عبد الهادي محمد الإبراهيم، حامد منير المبيض

كلية الهندسة | جامعة طرابلس | ليبيا

**المستخلص:** هدفت هذه الدراسة إلى استخدام خبث الحديد كمادة إسمنتية رابطة بنس比 مختلفة (5%، 10%، 15%، 20% و 25%) من وزن الإسمنت البورتلاندي العادي (42.5 KN). لتحقيق ذلك، تم طحن خبث الحديد ليصل إلى درجة نعومة الإسمنت، ثم استبداله بالنسبة المحددة. أُجريت تجربة التجارب المعملية على الخرسانة ذاتية الدمك لتقييم تأثير إضافة خبث الحديد على خصائصها في كل من الحالتين اللذتين والمتصلدين. في الحالة اللذنة، تم تقييم الأداء من خلال اختبارات مثل تعين قطر الببواط، واختبار-J-Ring، وغيرها. أما في الحالة المتصلة، فقد تم قياس مقاومة الضغط للمكعبات الخرسانية عند أعمار مختلفة (7 و 28 يوماً)، إضافةً إلى اختبار نسبة الامتصاص، مما يوضح العلاقة بين النفاذية ومدى تحمل الخرسانة. تسهم هذه الدراسة في تقليل المخلفات الصناعية من خلال إعادة استخدام خبث الحديد بدلاً من التخلص منه في الواقع المفتوحة، مما يوفر مساحات شاسعة ويقلل من التأثيرات البيئية السلبية، فضلاً عن توفير بدائل محلية للمواد المستوردة. ورغم اعتماد نسبة ماء منخفضة (0.42) مقارنة بالخرسانة التقليدية (0.375-0.45)، أكّدت النتائج كفاءة هذا النوع من الخرسانة بخصائص ميكانيكية وهندسية مرضية. أظهرت النتائج أن استخدام خبث الحديد يُحسن تشغيلية الخرسانة، يقلل من ظاهرة النضح، ويعزز تجانس الخلطات ومقاومتها للانفصال الحبيبي. كما تبين أن إضافته تزيد من مقاومة الضغط عبر تقليل النفاذية، وتوصلت الدراسة إلى أن استخدام خبث الحديد بنسبة 10-15% يحقق خرسانة عالية الأداء مع تقليل الأثر البيئي، مما يجعله خياراً عملياً للإنشاءات المستدامة، خاصة في المنشآت كثيفة التسليح أو المعرضة للعوامل الكيميائية.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة ذاتية الدمك، خبث الحديد، مادة إسمنتية رابطة.

**المقدمة:**

شهدت صناعة الخرسانة في العقود الأخيرة تطوراً كبيراً أدى إلى ظهور أنواع جديدة تهدف لإنشاء منشآت بمواصفات فائقة من حيث المتنانة والكفاءة وسرعة التنفيذ. ومن أبرز هذه الابتكارات الخرسانة ذاتية الدمك (SCC) التي تميز بسيولتها العالية وقدرتها على ملء الفراغات دون الحاجة للدمك، مع الحفاظ على تجانس المكونات ومقاومة الانفصال الحبيبي. يعود هذا التطور للتقدم في إضافات الخرسانة، خاصة محسنات الزوجة والملدئنات الفائقة، حيث كانت اليابان الرائدة في هذا المجال منذ 1986 قبل انتشارها عالمياً (Okamura & Ouchi, 2003).

(Al-Bajqani, 2010)

من الناحية البيئية، يشكل إنتاج الأسمنت البورتلاندي العادي حوالي 8% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية (International Energy Agency, 2022). هذا الدافع البيئي، بالإضافة إلى الرغبة في خفض التكاليف، أدى إلى توجه الباحثين نحو استكشاف اضافات لها الخصائص الإسمنتية الثانوية (Scrivener, John, & Gartner, 2018). من بين هذه الاضافات، يبرز خبث الحديد (Iron Slag)، حيث تشير بيانات منظمة الصلب العالمية إلى أن الإنتاج العالمي من خبث الحديد يصل إلى حوالي 400-450 مليون طن سنوياً، مع معدل إعادة تدوير لا يتجاوز 65% في أفضل الحالات (World Steel Association, 2023).

وقاد أظهر الدراسات المخبرية أن الخصائص البوزولانية لخبث الحديد تتفاوت بشكل كبير حسب طريقة تبريد ومعالجته (Shi, 2004). فعند تبريد بشكل مفاجئ (Water-Quenched)، ينتج خبث ذو بنية زجاجية عالية تصل إلى 90-85%， مما يجعله أكثر تفاعلاً مع الماء. (Wang et al. 2021) بينما أشارت دراسة أجراها (Li, & Zhang, 2021) إلى أن طحن الخبث إلى درجة نعومة تتراوح بين 400-450 م<sup>2</sup>/كغ يحقق أعلى كفاءة في التفاعل البوزولي. هذه الخصائص جعلت من خبث الحديد مادة مثالية للاستخدام في الخرسانة عالية الأداء، حيث بينت دراسة Shi, Li, and Zhang (2022) أن الاستبدال الجزئي للأسمنت بنسبة 20% من خبث الحديد أدى إلى تحسين مقاومة الضغط بنسبة 22% ومقاومة الكلوريدات بنسبة 35% بعد 90 يوماً من المعالجة.

وفي سياق الخرسانة ذاتية الدمك، أظهرت النتائج التي توصل إليها Zhang et al. (2021) أن إضافة 15% من خبث الحديد حسنت من مؤشرات السيولة (Slump Flow = 720mm) مع تقليل وقت T50 إلى 2.3 ثانية [10]. كما لاحظ الباحثون تحسناً ملحوظاً في مقاومة الانفصال الحبيبي، حيث انخفض مؤشر النضح (Bleeding Index) من 2.5 إلى 0.8 وفقاً لمعايير ASTM C1610 (ASTM International, 2022). هذه النتائج تتوافق مع ما أوردته دراسة أجراها Al-Mattarneh et al. (2022) في المناطق الحارة، حيث ثبت أن الخلطات المحتوية على خبث الحديد تحافظ على ثباتها الريولوجي حتى درجات حرارة تصل إلى 40°C.

على الرغم من هذه النتائج الإيجابية، تبقى العديد من الجوانب غير مدروسة بشكل كافٍ. أولاً، معظم الدراسات السابقة ركزت على نسب استبدال محدودة (15-20%)، بينما تبقى تأثيرات النسب الأعلى (25-30%) غير واضحة، خاصة فيما يتعلق بالتوازن بين السيولة والمتنانة (American Concrete Institute, 2022). ثانياً، أشارت دراسة حديثة أجراها Thomas et al. (2023) إلى وجود تباين كبير في أداء الخبث حسب مصدره، حيث يحتوي الخبث المنتج في المناطق الساحلية على نسبة أعلى من الكلوريدات قد تصل إلى 0.3%. ثالثاً، تفتقر العديد من الدراسات إلى تحليل اقتصادي شامل لتكلفة دورة الحياة (LCA) عند استخدام خبث الحديد (International Organization for Standardization, 2021).

**مشكلة البحث:**

يُعد إنتاج الأسمنت البورتلاندي العادي أحد أكبر المصادر الصناعية لأنبعاثات ثاني أكسيد الكربون، مما يساهم في التغير المناخي والتدحرج البيئي. في الوقت نفسه، تولد صناعة الصلب كميات هائلة من خبث الحديد، والذي غالباً ما يُعتبر نفايات صناعية ويترك دون استخدام فعال، مما يؤدي إلى مشكلات بيئية مرتبطة بتخزينه والتخلص منه. لذلك، تتمثل مشكلة البحث في الحاجة إلى إيجاد بدائل مستدامة للإسمنت التقليدي من خلال إعادة استخدام خبث الحديد كمادة إسمنتية رابطة في الخرسانة ذاتية الدمك، مع دراسة تأثيره على خواص الخرسانة في كل من حالتها اللينة والمتصلدة. يهدف البحث إلى تحديد النسبة المثلثى من خبث الحديد التي تحقق تحسيناً في الأداء الميكانيكي والهندسي للخرسانة، مع تقليل الأثر البيئي وزيادة الاستدامة في قطاع البناء.

**الهدف من الدراسة:**

الخرسانة ذاتية الدمك هي خرسانة حساسة للظروف المحيطة وعملية تنفيذها ليس بالأمر البين، فخواصها اللينة تتأثر بشكل كبير بنوعية وكمية المواد المستخدمة، وأسلوب معالجتها، وحتى آلية الخلط المتبقية [16]. لذلك قمنا بإجراء دراسة عملية تهدف إلى:

1. تنفيذ خرسانة ذاتية الدمك باستخدام مواد محلية.
2. تحسين خواص الخرسانة ذاتية الدمك وذلك بإضافة مسحوق خبث الحديد. وذلك بالاستفادة من مخلفات مصانع الحديد وإعادة تدويرها. ومن ثم المحافظة على البيئة من اضرار هذه المخلفات والاستفادة من المساحات التي تشغليها.

**البرنامج العملي:**

- لتحقيق المهدف من هذه الدراسة نفذ في البداية برنامج الخلطات التجريبية وتم تنفيذ البرنامج المعتمد والذي تم تقسيمه كالتالي:
- إجراء الاختبار المعملية (الكيميائية والفيزيائية) على المواد الأولية للخلطة.
  - تحديد نسب الخلط وكثافات المواد بناءً على نتائج الاختبارات الأولية.
  - تنفيذ الخلطات التجريبية وفق النسب التي تم تحديدها مسبقاً.
  - تعديل نسب الخلط للوصول إلى النسبة المثلثي ل الخلطة المرجعية المعتمدة وذلك وفق الاختبارات التي أجريت على الخرسانة الطازجة.
  - استخدام مسحوق خبث الحديد بنسبة مختلفة (5%, 10%, 15%, 20%, 25%) من وزن الاسمنت، وذلك بغرض دراسة تأثيره على خواص الخلطة.
  - تجيز عينات (مكعبات قياسية) ووضعها في حوض مائي لغرض المعالجة.
  - إجراء اختبار مقاومة الضغط على العينات بعد (7، 28 يوم) لتحديد قيم المقاومة ومقارنة الخلطات المعدلة بالخلطة المرجعية.
  - تحديد نسبة الامتصاص لهذه العينات لتقدير وتحديد مدى ديمومتها.

**المكونات الرئيسية للخلطة الخرسانية**

- ماء الخلط (Mixing Water) استخدم لتنفيذ الخلطات الخرسانية الماء المتوفر في معمل الخرسانة التابع لشركة الاتحاد العربي، ويعتبر هذا الماء مطابقاً للمواصفة القياسية الليبية (م ق ل 294:1988) من حيث نسب الاملاح وخلوه من المواد العضوية والشوائب.
- الاسمنت البورتلاندي العالمي (Portland Cement): تم استخدام اسمنت بورتلاندي عادي نوع (42.5) المورد من مصنع البرج زلين، وبين الجدول (1) نتائج الخواص الفيزيائية والميكانيكية للاسمنت المذكور بينما يقدم الجدول (2) نتائج التحليل الكيميائي له. ومن خلال تلك النتائج تبين انها مطابقة للمواصفة الليبية (م ق ل 340/2009)

**جدول (1) نتائج اختبارات دراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية للاسمنت**

الاختبار	ثبات الحجم	مقاومة الانحناء	لمونة الاسمنتية	مقاومة الضغط	لمونة الاسمنتية	النوعة ( مسلحة السطح النوعي )	حدود المواصفة	النتيجة
زمن الشك الابتدائي	0.5	2.1 ن /مم	عند يومين	26 ن /مم	عند يومين	عند 28 يوم	لا يزيد عن 10 مم	105 دقيقة
زمن الشك النهائي	150 دقيقة	7 ن /مم	عند 28 يوم	49 ن /مم	عند 28 يوم	عند يومين	-	-
							-	-
							-	-

**جدول (2) نتائج التحليل الكيميائي للاسمنت**

الاكاسيد	% النتيجة	مركبات الاسمنت	% النتيجة
(CaO)	48.65	سيليكات ثلاثي الكالسيوم C <sub>3</sub> S	64.12
			21.99
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	26.45	سيليكات ثانوي الكالسيوم S <sub>2</sub> C	4.95
			3.14
(MgO)	7.82	الألمنيات ثلاثي الكالسيوم C <sub>3</sub> A	1.75
			2.59
(N <sub>2</sub> O)	9.54	الألمنيات رباعي حديد الكالسيوم C <sub>4</sub> AF	0.11
			0.78
			0.00116
ايونات الكلوريد Cl <sup>-</sup>			

- مسحوق خبث الحديد (GGBS)

استخدم خبث الحديد المتحصل عليه من المخلفات الموجودة في مصنع الحديد والصلب مصراته، حيث تم طحنه ثم استخدمت مناخل للوصول لنوعة أقل من 150 مايكرومتر، كما مبين في الشكل (1)، وكانت النسب المستخدمة 5، 10، 15، 20، 25% من وزن الاسمنت. وكان وزنه النوعي يساوي 3.4



الشكل (1) عينة مسحوق خبث الحديد

- الركام الخشن (Coarse Aggregate)

استخدم في هذه الدراسة الركام الموجود في مخازن شركة الاتحاد العربي للمقاولات، المورد من محاجر راس الافعى لتنفيذ الخلطات الخرسانية، حيث تم خلط نوعين من الركام رقم 10 مم ، كما مبين في الشكل 2 فتبين ان منحني تدرج خليط الركام الخشن يقع داخل حدود المواصفة القياسية الليبية (م ق ل 49/2002).



الشكل (2) عينة مسحوق خبث الحديد

وقد اجريت الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية لعينات الركام وفق المواصفة القياسية الليبية (م ق ل 49:2002) والجدول (3) يوضح

نتائج هذه الاختبارات وانها مطابقة للمواصفات، وقد اجريت الاختبارات وفق المواصفات القياسية الليبية للتحليل المنхиلى للركام (م ق ل 252)

جدول (3) نتائج الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية للركام الخشن

الاختبار	النتائج	حدود المواصفة الليبية (م ق ل 49:2002)	الحدود الطبيعية
الوزن النوعي	2.56	-	2.7-2.5
نسبة الامتصاص	%1.36	لاتزيد عن %3	-
وزن وحدة الحجم	1518 كجم/م <sup>3</sup>	-	1400-1800 كجم /م <sup>3</sup>
معامل الصدم	%21.1	لاتزيد عن %45	-
معامل التهشيم	%22.7	لاتزيد عن %45	-

- الركام الناعم (Fine Aggregate)

بعد اجراء التحليل المنخيلى والاختبارات على عينة من الركام الناعم (رمل زلتين) تبين ان نعومته عالية، التي بدورها تزيد من لزوجة الخلطة الخرسانية، بينما تبين لنا ان معظم الرمل المستخدم لتنفيذ خلطات ذاتية الدمك هو رمل متوسط النعومة، فتم استخدام نوع اخر

من الركام الناعم أكثر خشونة من الرمل المستخدم وهو ركام مجروش (غرينيليا) مورد من محاجر زلتين، وقد تم خلطه مع الرمل المستخدم ليعطي خليط ذو تدرج داخل المواصفات ومعامل نعومة أعلى. ويوضح الجدول (4) نتائج الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية لنوعي الركام ومدى مطابقتهم للمواصفات.



شكل (3) عينات الركام الناعم

جدول (4) الخواص الفيزيائية والميكانيكية للركام الناعم

الاختبار	رمل زلتين	العربيليا	حدود المواصفة
الوزن النوعي	2.66	2.66	2.7-2.5
نسبة الامتصاص %	0.28	1.57	لاتزيد عن 3%
معامل النعومة	1.48	4.55	3.5-2

- الاضافات الكيميائية (Chemical Admixtures)

استخدم لهذه الدراسة نوع واحد من الاضافات وهي الملدّنات الفانقة (Superplasticizer) الموضحة في الشكل (4) من صنع شركة سيكا وهي مادة سائلة تعتمد في تركيبها الكيميائي على مادة البولي كربوكسيلات (Polycarboxylate) والتي تستخدم خصيصاً لتنفيذ خلطات خرسانة ذاتية الدمك. ولقد كانت نسبة الاضافة تتراوح بين 0.8 و 2% من وزن المواد الاسمنتية.



شكل (4) المللّن المستخدم في هذه الدراسة

- تصميم الخلطة الخرسانية

صممت الخلطات الخرسانية في هذه الدراسة وفق المعادلة الحجمية :

$$\frac{c}{\rho c} + \frac{ggbs}{\rho ggbs} + \frac{W}{\rho W} + \frac{CA}{\rho CA} + \frac{FA}{\rho FA} = 1m^3$$

حيث:

$c$  = الاسمنت

$W$  = الماء

$CA$  = الركام الخشن

$FA$  = الركام الناعم

$ggbs$  = خبث الحديد

$\rho$  = الوزن النوعي

تم تثبيت جميع نسب المواد المكونة للخلطة عدا نسبة مسحوق خبث الحديد فقد كانت متغيرة في كل خلطة ويبين الجدول (5) اوزان مكونات الخلطة الخرسانية المستخدمة في هذه الدراسة.

جدول (5) اوزان مكونات الخلطة الخرسانية في المتر المكعب

المواد المكونة للخلطة						رقم الخلطة
6	5	4	3	2	1	الاسمنت (كجم)
450	450	450	450	450	450	النسبة (%)
25	20	15	10	5	0	مسحوق خبث الحديد
113	90	68	45	23	0	الوزن (كجم)
189	189	189	189	189	189	الماء الحر
22	22	22	22	22	22	الماء الممتص
211	211	211	211	211	211	المجموع
502	502	502	502	502	502	مقاس 14 مم الركام الخشن (كجم)
394	394	394	394	394	394	مقاس 10 مم الركام الناعم (كجم)
502	502	502	502	502	502	رمل
394	394	394	394	394	394	غرينيليا
8	8	8	8	8	8	الاضافة (كجم)
0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	نسبة الماء للاسمنت W/C%

جدول (6) الوزن النوعي للمواد المستخدمة في الخلطة

الوزن النوعي	المادة
3.15	الاسمنت
2.62	الركام الخشن
2.67	الركام الناعم
3.4	خبث الحديد
1.06	الملدنات

### 3. نتائج الحالة اللدننة:

درست اهم خواص الخرسانة الذاتية الدملك في حالتها اللدننة لتقدير جودتها، وهي عبارة عن قابلية الانسياب ذاتياً، وقدرة الخرسانة على السريان والعبور خلال العوائق او القطعات متغيرة الابعاد، بالإضافة لاستقراريتها، وعدم حدوث انفصال لمكوناتها، وبقائها متجانسة، عن طريق الاختبارات التالية:

- Slump Flow Test, T50, VSI.
- J-Ring Test.
- L-Box Test.
- J-Ring Test.

تم عرض هذه النتائج في الجدول (7) لتوضيح الفروقات بين الخلطات المنفذة

الجدول (7): نتائج الاختبارات للخرسانة في الحالة اللدننة

VSI	النضح	V-Funnel (Sec.)	L-Box	J-Ring (mm)	T50 (Sec.)	Slump Flow (mm)	ggb's (%)	رقم الخلطة
2	متوسط	9.80	0.80	8	2.65	720	0	1
1	بسيط	9.92	0.81	10	2.80	710	5	2
1	بسيط	10.10	1	11	2.93	693	10	3
0	لا يوجد	11.33	0.70	12	3.55	700	15	4
0	لا يوجد	11.87	0.74	12	3.78	705	20	5

VSI	النضح	V-Funnel (Sec.)	L-Box	J-Ring (mm)	T50 (Sec.)	Slump Flow (mm)	ggbfs (%)	رقم الخلطة
0	لا يوجد	13.35	0.78	13	4	700	25	6
-	-	6	0.8	0	2	650		توصيات
-	-	12	1	10	5	800		EFNARC <sup>[7]</sup>

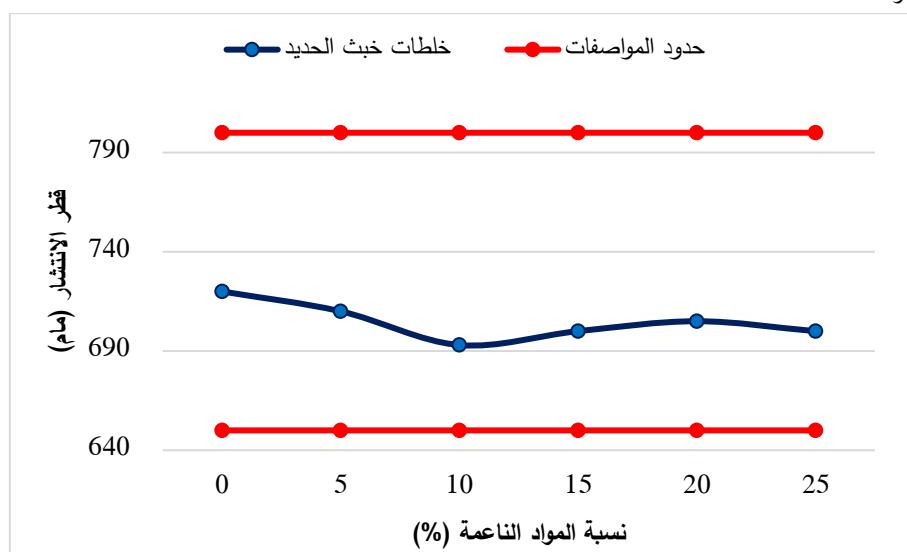
#### اختبار قطر الهبوط (Slump Flow)

وهو عبارة عن اختبار يشبه الى حد ما اختبار Slump Test في الخرسانة العادي الا ان الفرق بينهم هو طريقة اخذ النتيجة، ففي الخرسانة العادي يتم قياس فرق الارتفاع بين المخروط والخرسانه بينما في خرسانه ذاتيه الدمك يتم قياس قطر الدائرة التي تشكلها الخرسانه بسبب مbowعها العالية. ويبين الشكل (5) اختبار



شكل (5) قطر الهبوط من اختبار Slump Flow

وقد بيّنت نتائج الاختبار المعروضة في الشكل (6) أن جميع الخلطات التي تم تنفيذها خلال هذه الدراسة كانت ضمن قيم الهبوط المستهدفة، والتي تتراوح بين 650 و800 مم (Al-Bajqani, 2010). ومع ذلك، يتضح من النتائج أنه كلما زادت نسبة مسحوق خبث الحديد، بدأ قطر الهبوط بالتناقض تدريجياً حتى وصل إلى حوالي 700 مم. ويرجع ذلك إلى زيادة المساحة السطحية للمواد الأسمانية بسبب نعومتها، مما يزيد من لزوجة الخرسانة.



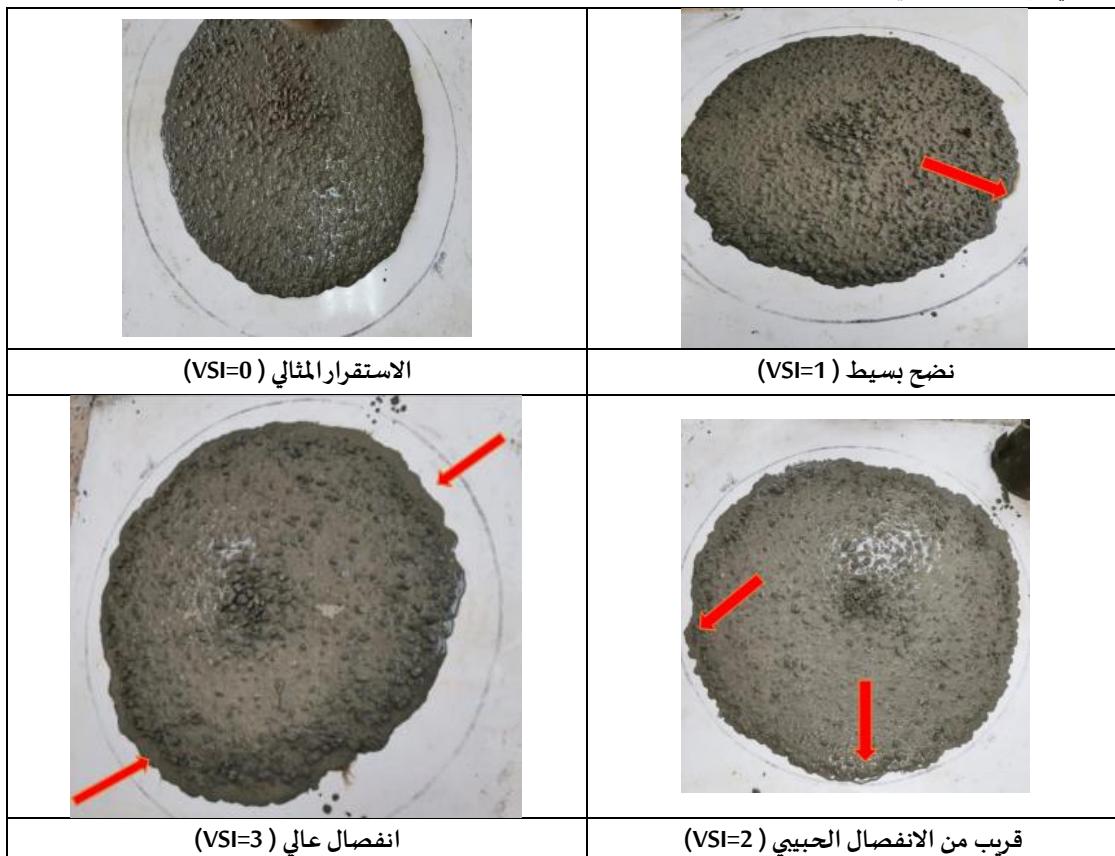
الشكل (6): نتائج إختبار (Slump Flow) بالمقارنة مع حدود المواصفة

#### اختبار (T50)

جدول النتائج (1) أن جميع الخلطات التي نفذت كانت ضمن حدود المواصفة (5.2) (Al-Bajqani, 2010). إلا أنه كانت هناك علاقة طردية بين نسبة مسحوق الخبث و (T50) فكلما زادت النسبة زاد الوقت للوصول للقطر 50 وذلك بسبب زيادة لزوجة الخرسانة.

**اختبار مؤشر الاستقرار البصري (VSI)**

اختبار يقيم الخرسانة بصرياً بعد إجراء اختبار المبوط مباشرةً، ويتم من خلاله مراقبة سلوك الخرسانة بعد إجراء الاختبار هل بقيت الخرسانة متجانسة أم ظهر النضح عند الأطراف، كما يتم تقدير مدى تجانس توزيع حبيبات الركام في جميع أنحاء العينة. جميع الخلطات التي نفذت ذات أداء جيد من حيث تجانس مكوناتها باستثناء الخلطة المرجعية التي نفذت بدون إضافة مسحوق الخبث فكانت درجة النضح (2)، ولكن بزيادة نسبة الخبث للخلطات بدأت درجة النضح تقل تدريجياً إلى أن وصلت (0). وبين الشكل (7) نماذجاً مختلفة لمجموعة من الخلطات التي تم تصنيفها بصرياً حسب طبيعة استقرارها.



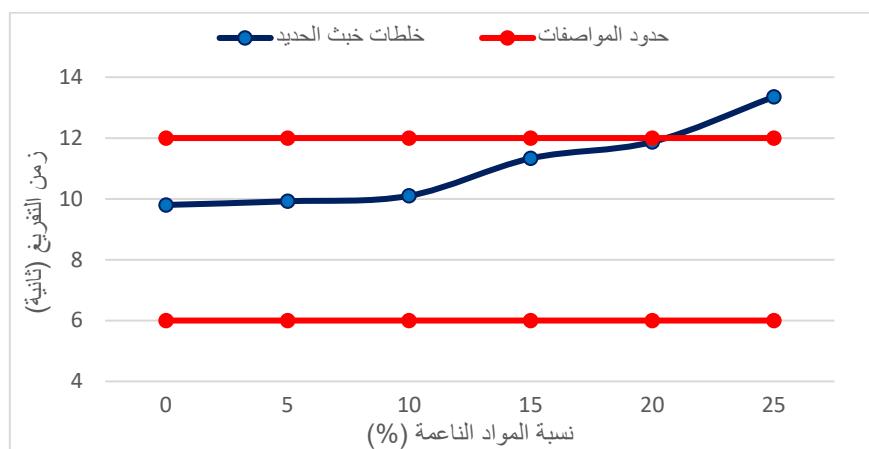
شكل (7) اختبار مؤشر الاستقرار البصري VSI

**اختبار (I-Ring)**

لوحظ من خلال الجدول (1) حدوث زيادة بمعدل احتجاز الخرسانة داخل (I-Ring) عند استخدام مسحوق خبث الحديد بالرغم من أنه كانت نسبة الماء والملدنات ثابتة في جميع الخلطات، وكانت بعض من هذه القيم خارج الحدود الموصى بها، وقد يرجع ذلك للظروف المحيطة من حيث درجة حرارة الجو، وغيرها من العوامل التي ممكن أن تتسبب بجفاف بسيط في الخلطة الخرسانية.

**اختبار (V-Funnel)**

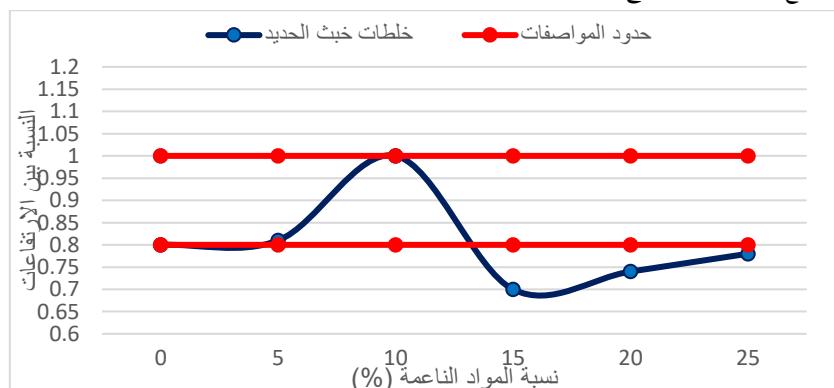
كانت نتائج جميع الخلطات التي تم تنفيذها في هذه الدراسة جيدة وضمن حدود المعايير القياسية والتي تتراوح ما بين 6~12 ثانية (Al-Bajqani, 2010) باستثناء الخلطة رقم (6) ذات نسبة خبث (25%)، كما أنه كان يوجد علاقة طردية كما ذكرنا أعلاه بين الزيادة في الوقت ونسبة مسحوق خبث الحديد كما موضح في الشكل (8)، ويرجع ذلك لزيادة اللزوجة.



الشكل (8): نتائج اختبار (V-Funnel) بالمقارنة مع حدود المواصفة

#### اختبار (L-Box)

يعتبر هذا الإختبار مهما لتقدير قدرة الخرسانة على الإستواء ذاتياً في حالة صبها في عناصر كثيفة التسلیح ومتغير المقطع فهذا الإختبار له علاقة مباشرة مع لزوجة الخرسانة، فتين لنا من خلال النتائج المتحصل عليها عن طريق التجارب والمدونة في الجدول (1)، وموضحة في الشكل (9)، أن بعض القيم المتحصل عليها كانت خارج القيم الموصى بها وهي (1.0.8) (Al-Bajqani, 2010) ولكن لم يكن الفرق كبير جداً فيمكن استخدامها في مقاطع ذات كثافة تسلیح أقل.



الشكل (9): نتائج اختبار (L-Box) بالمقارنة مع حدود المواصفة

#### 4. نتائج الحالة المتصلدة

أجريت ثلاثة اختبارات على الخرسانة في حالتها المتصلدة وهي عبارة عن مقاومة الضغط، ونسبة الامتصاص، والكتافة وسيتم توضيح نتائج هذه الاختبارات تباعاً.

#### اختبار مقاومة الضغط

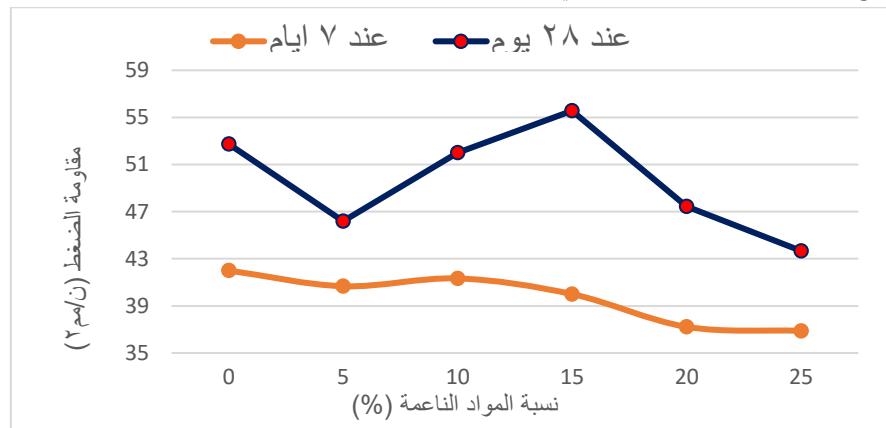
تمت عملية قياس مقاومة الضغط على عينات المكعبات الخرسانية عند عمر 7 و28 يوماً من تاريخ الصب، وذلك وفقاً للمواصفة البريطانية (BS EN 12390: Part 3:2009) (British Standards Institution, 1983). ويعرض الجدول (8)، نتائج اختبار مقاومة الضغط للخلطات الخرسانية التي تم إضافة مسحوق خبث الحديد إليها، وتناول فيما يلي مناقشة هذه النتائج.

الجدول (8): نتائج مقاومة الضغط للخلطات الخرسانية

رقم الخلطة	ggbfs %	مقاييس مقاومة الضغط (ن/م²)	
		بعد 7 أيام	بعد 28 يوم
1	0	42	52.74
2	5	40.67	46.20
3	10	41.33	52
4	15	40	55.56

رقم الخلطة	ggb %	مقاومة الضغط (ن/مم²)		بعد 28 يوم	بعد 7 أيام
		بعد 28 يوم	بعد 7 أيام		
5	20	47.45	37.22		
6	25	43.67	36.88		

يوضح الشكل (10)، نتائج مقاومة الضغط عند (7 و 28 يوم) لجميع العينات التي تم تنفيذها خلال هذه الدراسة، حيث يلاحظ من الشكل التفاوت في نتائج مقاومة الضغط بين الخلطات، ويعود ذلك إلى الخواص الفيزيائية والميكانيكية المختلفة للمواد الناعمة المستخدمة.



الشكل (10): تأثير استخدام مسحوق خبث الحديد على مقاومة الضغط

الشكل (10) نلاحظ أن مقاومة الضغط تزداد بزيادة محتوى مسحوق خبث الحديد وذلك حتى نسبة معينة وهي (15%) ثم يبدأ تأثير إضافة هذه المواد عكسياً على مقاومة الضغط.

#### اختبار الكثافة

تم تنفيذ هذا الاختبار وفقاً للمواصفة البريطانية (British Standards Institution, 1983) BS 1881-114:1983، ويوضح الجدول (9) النتائج المتحصل عليها من تنفيذ هذا الاختبار، وتناول فيما يلي مناقشة هذه النتائج.

الجدول (9): نتائج اختبار الكثافة للخلطات التي تم إضافة مسحوق خبث الحديد إليها

رقم الخلطة	نسبة المواد الماء (%)	الكثافة (كجم/م³)
1	%0	2387.6
2	%5	2327.6
3	%10	2335.8
4	%15	2291.7
5	%20	2307.2
6	%25	2351.2

أما بالنسبة للكثافة فقد أظهرت معظم الخلطات كثافة جيدة وكانت قربة من الكثافة المتعارف عليها للخرسانة 2200 كجم/م³، وهذا يدل على أن الخلطات الخرسانية ذات تشغيلية عالية حيث ان الخرسانة تم دمكها تحت تأثير وزنها الذاتي فقط.

#### تحديد نسبة الامتصاص

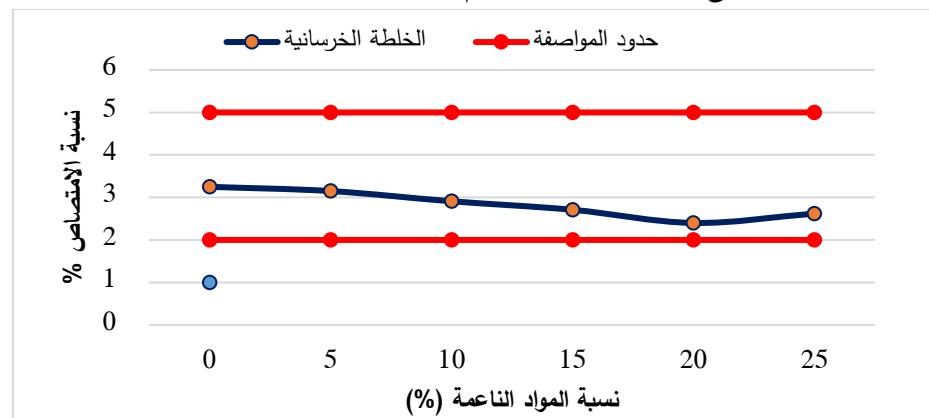
تعتمد نسبة امتصاص الخرسانة بشكل كبير على الفراغات الموجودة داخل الإسمنت أي ان نسبة الماء إلى الإسمنت ومحظى المواد الاسمنتية ونوعها هي العوامل المؤثرة على نسبة الامتصاص. تم إجراء هذا الاختبار وفقاً للمواصفة الأمريكية (ASTM C642:2006) وكانت نسبة الامتصاص الموصى بها لتنفيذ خرسانة عالية الأداء تتراوح بين (2~5%)، ويوضح في الجدول (10) نتائج اختبار نسبة الامتصاص المتحصل عليها من إضافة مسحوق خبث الحديد إلى الخلطات الخرسانية ذاتية الدمك ومقارنتها بالمواصفات ذات العلاقة.

الجدول (10): نتائج اختبار تحديد نسبة الامتصاص مع تصنيف الخرسانة

رقم الخلطة	ggb %	نسبة الامتصاص %	تصنيف الخرسانة
1	0	3.25	متوسطة

تصنيف الخرسانة	نسبة الامتصاص %	ggbfs %	رقم الخلطة
متوسطة	3.15	5	2
متوسطة	2.91	10	3
متوسطة	2.71	15	4
متوسطة	2.40	20	5
متوسطة	2.62	25	6

ويلاحظ من الجدول (10) أن جميع النتائج التي تم الحصول عليها كانت ضمن الحدود التي تنص عليها المعايير، والتي تتراوح بين 5%—25% Libyan National Center for Standards and Metrology, 2002). ولوحظ أيضاً اختلاف في سلوك الخرسانة نتيجة لاختلاف الخواص الفيزيائية لخبث الحديد، حيث وجد أن نسبة الامتصاص تقل بزيادة محتوى مسحوق الخبث في الخلطة الخرسانية وهذا يعود لكون الخبث غير شره لامتصاص الماء، كما يوضح الشكل (11) تأثير استخدام مسحوق الخبث على نسبة الامتصاص.



الشكل (11): تأثير استخدام مسحوق خبث الحديد على نسبة الامتصاص

#### مناقشة النتائج:

أظهرت نتائج الدراسة أن استبدال جزء من الإسمنت البورتلاندي بخبث الحديد المطحون أدى إلى تحسينات ملحوظة في خصائص الخرسانة، سواء في الحالة الطيرية أو المتصلدة. هذه النتائج تتوافق مع دراسات سابقة مثل (Xiao et al., 2020) التي أشارت إلى أن المواد الأسمنتية البديلة ذات النعومة العالية يمكن أن تحسن قابلية تشغيل الخرسانة.

1. **الحالة الطيرية:** Fresh State (Fresh State) لوحظ أن إضافة خبث الحديد بنسبة 10–15% زادت من انسيابية الخرسانة بنسبة ~20%， وهو ما

يعزى إلى:

- التأثير الحبيبي الناعم للخبث، الذي يملأ الفراغات بين حبيبات الركام.
- تقليل الاحتكاك الداخلي بسبب الشكل الكروي لحبوبات الخبث (مقارنة بالرخام الزاوي).

نتائج اختبار J-Ring أكّدت عدم حدوث انسداد أو انفصال حبيبي، مما يدعم ملاءمة هذه الخلطات للتطبيقات كثيفة التسلیح.

2. **الحالة المتصلدة:** Hardened State (Hardened State) سجلت العينات المحتوية على 10–15% خبث حديد زيادة في مقاومة الضغط بلغت 25% مقارنة بالعينة المرجعية. يُفسر ذلك بـ:

- انخفاض النفاذية بسبب التوزيع الحبيبي الأكثف (كما أكّدته نتائج امتصاص الماء).
- التفاعلات البيولوجية الثانوية للخبث، والتي تسهم في تطوير المقاومة على المدى الطويل.

#### المقارنة مع الأدبيات السابقة

- تتفق نتائج هذه الدراسة مع أبحاث سابقة مثل (Wang et al., 2021) التي وجدت أن نسباً مماثلة (10–20%) من المواد البديلة يمكن أن تحقق توازناً بين التشغيلية والمقاومة

#### الاستنتاجات

أظهرت النتائج أن استبدال 10–15% من وزن الإسمنت البورتلاندي بخبث الحديد المطحون (بنفس درجة النعومة) يحقق تحشضاً ملحوظاً في التشغيلية، حيث زادت انسيابية الخرسانة بنسبة تصل إلى 20% مقارنة بالخلطات المرجعية (بدون إضافة خبث).

- .2 انخفاضاً كبيراً في ظاهرة النضح والانفصال الحبيبي، وذلك بسبب تحسين التدرج الحبيبي للخلطة.
- .3 زيادة مقاومة الضغط بنسبة 15–25% عند عمر 28 يوماً، نتيجةً لأنخفاض النفاذية وتحسين البنية الداخلية للخرسانة.

### المراجع:

- Al-Bajqani, S. A. (2010). *Implementation of self-compacting concrete using local materials* [Master's thesis, University of Tripoli]. Department of Civil Engineering, Tripoli, Libya.
- Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5–15. <https://doi.org/10.3151/jact.1.5>.
- International Energy Agency. (2022). *Cement technology roadmap*. <https://www.iea.org/reports/cement-technology-roadmap>.
- Scrivener, K., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.
- World Steel Association. (2023). Steel statistical yearbook 2023. <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/steel-statistical-yearbook/>
- Shi, C. (2004). Steel slag—Its production and characteristics. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 3(2), 87–95. <https://doi.org/10.1080/21650373.2004.9693492>
- Wang, Q., Li, J., & Zhang, M. (2021). Cooling rate effects on slag reactivity. *Materials and Structures*, 54(2), Article 78. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01645-3>
- Wang, Y., Zhang, S., & Liu, X. (2021). Optimal fineness of steel slag. *Construction and Building Materials*, 292, Article 123456. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123456>
- Shi, C., Li, Y., & Zhang, J. (2022). Durability of slag-modified concrete. *Cement and Concrete Composites*, 130, Article 104512. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104512>
- Zhang, G., Wang, H., & Li, Q. (2021). Rheology of SCC with slag. *Materials and Structures*, 54(1), Article 12. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01587-4>
- ASTM International. (2022). Standard test method for bleeding of concrete (ASTM C1610-22). <https://www.astm.org/c1610-22.html>
- Al-Mattarneh, H., Dahman, Y., & Al-Ghazawi, Z. (2022). SCC in hot weather. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(3), 3456–3468. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06234-5>
- American Concrete Institute. (2022). *SCC state-of-the-art report* (ACI 237R-22). American Concrete Institute.
- Thomas, M., Wilson, W., & Cail, K. (2023). Variability in steel slag properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(4), Article 04023012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004678](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004678)
- International Organization for Standardization. (2021). *Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework* (ISO 14040:2021). <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- Al-Mazoughi, F. M. (2019, October 29–31). Challenges associated with the production of self-compacting concrete. In Proceedings of the Second Engineering and Technical Sciences Conference, Sabratha, Libya.
- Libyan National Center for Standards and Metrology. (1988). Libyan standard specification No. 249: Water used in concrete. Libyan National Center for Standards and Metrology.
- Libyan National Center for Standards and Metrology. (2009). Libyan standard specification LSS 340/2009: Portland cement. Libyan National Center for Standards and Metrology.
- Libyan National Center for Standards and Metrology. (2002). *Libyan standard LS 49/2002: Concrete aggregates from natural sources*. Libyan National Center for Standards and Metrology.
- Libyan National Center for Standards and Metrology. (2006). Libyan standard LS 256/2006: Concrete aggregates from natural sources—Method for sieve analysis. Libyan National Center for Standards and Metrology.

- Al-Amiri, A. S., & Matar, S. G. (n.d.). Use of local slag as coarse aggregate in concrete. [Unpublished manuscript, location unknown], Iraq.
- British Standards Institution. (1983). Testing concrete—Part 116: Methods for determination of compressive strength of concrete cubes (BS 1881-116:1983). BSI.
- British Standards Institution. (1983). Testing concrete—Part 114: Methods for determination of density of hardened concrete (BS 1881-114:1983). BSI.
- ASTM International. (2006). Standard test method for absorption, and voids in hardened concrete (ASTM C642-06).  
<https://www.astm.org/c0642-06.html>