International Science and Technology Journal
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
Volume 39 العدد
Part 2 المجلد
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
International Science and Technology Journal
ISTJ

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

Received	2026/10/22	تم استلام الورقة العلمية في
Accepted	2026/11/15	تم قبول الورقة العلمية في
Published	2026/11/16	تم نشر الورقة العلمية في

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة

محمد أحمد علي النعيري*[a] الحسين مسعود عيسى[b] عبدالباسط أبوشناف[c]

[a]الهندسة المدنية، جامعة مصراتة، ليبيا

[b]الهندسة المدنية، جامعة مصراتة، ليبيا

[c]الهندسة المدنية، كلية العلوم التقنية – بني وليد، ليبيا

*m.annairy@eng.misuratau.edu.ly

الملخص:

تُعاد في هذه الدراسة قراءة قاعدة بيانات تجريبية لخرسانة بثلاث رتب مقاومة (C25 وC30 وC35) أُضيفت إليها برادة الحديد الناتجة عن مصنع لسحب الأسلاك في مصراتة بنسب 1% و3% و5% من وزن الإسمنت دون تعديل لبقية مكونات الخلطة، وذلك بإطار تحليلي كمّي جديد لم يُستخدم في التقرير الأصلي للتجارب. شمل الإطار تحليل التباين الثنائي (رتبة الخلطة × نسبة الإضافة) مع حساب حجم الأثر، واختبار دانيت للمقارنة مع الخلطة المرجعية، ونموذج انحدار من نوع أبرامز يربط مقاومة الضغط بنسبة الإسمنت إلى الماء ونسبة البرادة، واشتقاق معامل كفاءة مكافئ للإسمنت (k)، وإعادة احتساب مقاومة الشد غير المباشر وفق المعادلة القياسية ومقارنتها بعلاقات ACI 318 وEurocode 2، ثم تحديد نسبة مقبولة وفق معايير متعددة. أظهرت النتائج أن للنسبة أثراً معنوياً على مقاومة الضغط عند عمري 7 و28 يوماً ($p < 0.001$)، وأن التداخل بين الرتبة والنسبة معنوي في العمر المبكر ($p = 0.003$) ويختفي عند 28 يوماً ($p = 0.517$)، أي أن العقوبة النهائية للبرادة شبه ثابتة بين الرتب وتبلغ نحو 0.89 ميجاباسكال لكل 1% إضافة. فسّر النموذج التنبؤي 93.8% من تباين مقاومة الضغط

International Science and Technology Journal
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
Volume 39 العدد
Part 2 المجلد
ISTJ

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

عند 28 يوماً (RMSE = 1.11 MPa)، وبيّن أن كل كيلوغرام من البرادة المضافة يعادل في أثره فقدان 1.5 إلى 1.8 كيلوغرام من الإسمنت (k ≈ −1.5 إلى −1.8). وفي المقابل رفعت نسبة 3% مقاومة الشد غير المباشر بنسبة 3.3% إلى 8.2% ونسبة الشد إلى الضغط من 6.6–6.9% إلى 7.4–8.2% في جميع الرتب، كما انخفض الهبوط بمعدل 2.65 مم لكل 1% (R^2 = 0.84). ولم يثبت إحصائياً أن البرادة تخفض الكثافة عند 28 يوماً (p = 0.286). وتحققت معايير القبول الثلاثة مجتمعةً (مؤشر احتفاظ بالمقاومة ≤ 0.90، وفقد هبوط ≥ 15%، ونسبة شد ≤ 0.95) عند نسبة 3% في الرتب الثلاث، مما يقدّم أساساً كمياً لاستخدام هذا المخلف في التطبيقات التي يكون فيها الأداء الشدّي هو الحاكم.

الكلمات المفتاحية: برادة الحديد، المخلفات الصناعية، تحليل التباين، معامل الكفاءة، مقاومة الشد غير المباشر، الخرسانة المستدامة.

Statistical Assessment and Predictive Modelling of Concrete Containing Iron Filings as a Cement-Mass Addition: Cement-Equivalent Efficiency Factor and Admissible Dosage Window

[a]Mohamed Ahmed Alnoairi, [b]Elhusain Masoud Essa

[c]Abdulbaset Abushnaf

[a] Civil Engineering, Misurata University, Libya
[b] Civil Engineering, Misurata University, Libya
[c] Civil Engineering, College of Technical Sciences – Bani Walid, Libya
*m.annairy@eng.misuratau.edu.ly

Abstract

This study re-examines an experimental database of normal-strength concrete (grades C25, C30 and C35) in which iron filings from a wire-drawing plant in Misurata were added at 1%, 3% and 5% by mass of cement without adjusting the remaining constituents. A quantitative framework not applied in the original test report is

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

adopted: two-way ANOVA (grade × dosage) with effect sizes, Dunnett's many-to-one comparisons, an Abrams-type regression linking compressive strength to the cement–water ratio and dosage, a cement-equivalent efficiency factor (k), recomputation of splitting tensile strength with the standard formula and its comparison with ACI 318 and Eurocode 2 relations, and a multi-criteria admissible dosage window. Dosage significantly affected compressive strength at 7 and 28 days ($p < 0.001$); the grade × dosage interaction was significant at early age ($p = 0.003$) but vanished at 28 days ($p = 0.517$), indicating an almost grade-independent penalty of about 0.89 MPa per 1% addition. The predictive model explained 93.8% of the 28-day strength variance (RMSE = 1.11 MPa) and showed that each kilogram of filings is equivalent to losing 1.5–1.8 kg of cement ($k \approx -1.5$ to -1.8). Conversely, a 3% dosage increased splitting tensile strength by 3.3–8.2% and raised the tensile-to-compressive ratio from 6.6–6.9% to 7.4–8.2% in all grades, while slump decreased by 2.65 mm per 1% ($R^2 = 0.84$). A density reduction at 28 days was not statistically supported ($p = 0.286$). All three acceptance criteria (strength retention ≥ 0.90, slump loss $\leq$ 15%, tensile ratio ≥ 0.95) were jointly satisfied at 3% in every grade, providing a quantitative basis for using this waste where tensile performance governs.

Keywords: iron filings; industrial waste; ANOVA; efficiency factor; splitting tensile strength; sustainable concrete.

1. المقدمة:

تُعد الخرسانة أكثر المواد المصنّعة استهلاكاً على مستوى العالم، ويُعزى جزء كبير من بصمتها البيئية إلى إنتاج الإسمنت الذي تُقدَّر انبعاثاته العملياتية من ثاني أكسيد الكربون بنحو مليار ونصف المليار طن سنوياً [1]. وقد خلصت مراجعات حديثة إلى أن خفض هذه الانبعاثات على المدى القريب يمر عبر رفع كفاءة استخدام الإسمنت داخل الخلطة وإدماج المواد البديلة والمخلفات الصناعية ضمن مكوناتها، أكثر مما يمر عبر تقنيات جذرية مكلفة [2]. وفي هذا الإطار حظيت مخلفات صناعة الحديد والصلب باهتمام واسع؛ فقد وثّقت مراجعة شاملة إمكانات خبث الصلب ركاماً ومادة رابطة مساعدة مع ما

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

يرافقه من تحديات تتعلق بثبات الحجم [3]، كما بيّنت مراجعة أخرى أن مخلفات خام الحديد يمكن أن تحل محل الرمل الطبيعي بنسب تصل إلى 40–30% مع تحسن في المقاومة والمتانة حتى جرعة مثلى تتراجع بعدها الخواص [4].

أما برادة الحديد، وهي جسيمات معدنية دقيقة تنتج عن عمليات التشغيل والسحب والقطع، فقد دُرس استخدامها في الغالب بديلاً جزئياً عن الركام الناعم. فقد أفاد Ghannam وزملاؤه بأن إحلال مسحوق الحديد محل الرمل حتى 20% رفع مقاومتي الضغط والانحناء [5]، وحدّد Noori و Ibrahim نسبة 12% بوصفها الكمية المناسبة لمقاومتي الضغط والشد بالانحناء مع تراجع الخواص عند النسب الأعلى [6]، في حين وجد Olawale وزملاؤه في الخرسانة ذاتية الدمك أن إحلال 15% من الرمل بالبرادة رفع مقاومة الضغط بنحو 3.5% ومقاومة الشد بنحو 8.1% مع الحفاظ على متطلبات الحالة الطرية [7]. كما درس Al–Hashimi وزملاؤه نسباً بين 5% و15% في الخلطات العادية [8].

وعلى صعيد الكميات الصغيرة المضافة، أبلغ Alserai وزملاؤه عن زيادات في مقاومات الضغط والانحناء والشد غير المباشر عند إضافة 1–0.5% من البرادة لأربعة أنواع من الخرسانة المستدامة، كانت أكبرها في الشد [9]. وبيّن Mohammed وزملاؤه أن البرادة رفعت مقاومة الضغط في البداية ثم خفضتها عند المحتوى الأعلى، بينما ارتفعت مقاومة الشد بنحو 34–24% مع انخفاض طفيف في التشغيلية [10]. وعلى مستوى العناصر الإنشائية، حسّن إحلال 10% من الرمل بالبرادة سلوك الانحناء في كمرات خرسانية عالية المقاومة [11]، كما أدى إحلال غبار الصلب محل 10% من الإسمنت إلى رفع مقاومة الضغط بنحو 19% مقابل انخفاض في الهبوط [12]. غير أن النتائج ليست متسقة دائماً؛ إذ سجّلت دراسة ليبية على جسيمات أكسيد الحديد من وادي الشاطئ انخفاضاً في مقاومة الضغط وصل إلى نحو 40% عُزي إلى تكوّن المسامية [13].

وفي دراسة سابقة قام بها النعيري وآخرون [14] أُضيفت برادة الحديد بنسب 1% و3% و5% من وزن الإسمنت إلى خلطات C25 وC30 وC35 مصممة بطريقة ACI 211.1، وخلصت إلى انخفاض مقاومة الضغط والهبوط مع زيادة الكمية المضافة، كما أدى إلى تحسن في مقاومة الشد غير المباشر عند 3%. إلا أن تلك الدراسة اقتصرت على عرض وصفي للمتوسطات، وتركت عدة مسائل دون إجابة كمية يمكن تلخيصها في

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

أربع فجوات: (أولاً) لم يُختبر ما إذا كانت الفروق الملاحظة معنوية إحصائياً، ولا ما إذا كان أثر البرادة يتغير بتغير رتبة الخلطة، وهي مسألة جوهرية لأن تأثير المواد الناعمة يعتمد على محتوى العجينة ومساحة السطح النوعية [15]، [16]؛ (ثانياً) لم يُعبَّر عن العقوبة الناتجة عن الإضافة بوحدة هندسية قابلة للاستخدام في التصميم، مثل مفهوم معامل الكفاءة (k–value) المعتمد للمواد المضافة [17]، [18]؛ (ثالثاً) لم تُفحص العلاقة بين مقاومتي الشد والضغط ومدى توافقها مع العلاقات التصميمية في المواصفات [19–21]؛ (رابعاً) تبيّن عند إعادة فحص البيانات أن قيم مقاومة الشد غير المباشر المنشورة حُسبت دون المعامل 2 الوارد في المعادلة القياسية [22]، فجاءت بنصف قيمتها الصحيحة.

وبناءً على ذلك، تهدف هذه الورقة إلى تقديم إعادة تحليل كمّية لقاعدة البيانات التجريبية ذاتها، تتمثل إسهاماتها المضافة فيما يلي:

1. اختبار معنوية أثر الكمية المضافة ورتبة الخلطة والتداخل بينهما على مقاومة الضغط والكثافة عند عمري 7 و28 يوماً بتحليل التباين الثنائي مع حجم الأثر، ومقارنة كل نسبة إضافة بالخلطة المرجعية باختبار دانيت.
2. بناء نموذج تنبؤي من نوع أبرامز لمقاومة الضغط والهبوط بدلالة نسبة الإسمنت إلى الماء ونسبة البرادة، واشتقاق معامل كفاءة مكافئ للإسمنت يحوّل عقوبة الإضافة إلى كمية إسمنت مكافئة.
3. تصحيح قيم مقاومة الشد غير المباشر وتحليل نسبة الشد إلى الضغط ومقارنتها بعلاقات ACI 318 و Eurocode 2.
4. اقتراح نافذة نسبة إضافة مقبولة مبنية على معايير أداء متعددة (المقاومة، التشغيلية، الشد) بدلاً من الحكم على خاصية واحدة.

2. المواد والبرنامج التجريبي والإطار التحليلي:

1.2 قاعدة البيانات التجريبية:

تستند الدراسة إلى البرنامج التجريبي المفصّل في [14]، ويُلخَّص هنا بالقدر اللازم لإعادة التحليل. استُخدم إسمنت بورتلاندي عادي من النوع الأول مطابق للمواصفة الليبية رقم

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

23] 340]، وركام خشن مكسّر من منطقة ماجر بزليتن بمقاس اعتباري أقصى 20 مم حُدد تدرجه وكثافته النوعية وامتصاصه وفق [24]، [25] (الكثافة المدموكة نحو 1475 كجم/م^3)، ورمل طبيعي من منطقة المنقوش بمصراتة. جُمعت برادة الحديد من مصنع لسحب الأسلاك بمنطقة قزير على الطريق الساحلي بمصراتة، وتُحقِّق من خلوها من الزيوت بالفحص البصري والمغناطيسي. صُممت الخلطات وفق [26]، وأُضيفت البرادة كنسبة من وزن الإسمنت فوق مكونات الخلطة المصممة دون تعديل كمية الإسمنت أو الماء أو الركام. ويبين الجدول (1) نسب الخلطات.

جدول (1): نسب الخلطات الخرسانية (كجم/م^3) وكمية البرادة المضافة

الرتبة	w/c	c/w	الإسمنت	الماء	ركام 10 مم	ركام 15 مم	الرمل	البرادة %1	البرادة %3	البرادة %5
C25	0.60	1.67	300	180	600	450	340	3.0	9.0	15.0
C30	0.54	1.83	330	180	600	450	340	3.3	9.9	16.5
C35	0.51	1.95	360	185	600	450	340	3.6	10.8	18.0

2.2. الاختبارات:

قيس الهبوط لكل خلطة وفق [27]. وصُبّت مكعبات 150 مم وذُمكت يدوياً على ثلاث طبقات، ثم عولجت في الماء عند 2 ± 23 °م، واختُبرت في الضغط وفق [28] عند 7 أيام (ثلاثة مكعبات لكل خلطة) و28 يوماً (مكعبان لكل خلطة حسب السجلات المتاحة). كما اختُبرت أسطوانات 300 × 150 مم في الشد غير المباشر عند 28 يوماً وسُجّل متوسط حمل الانهيار لكل خلطة. وحُسبت الكثافة من كتلة المكعب وحجمه (0.003375 م^3). وبذلك يتكون التصميم من 12 خلطة (3 رتب × 4 نسب) و36 قراءة ضغط عند 7 أيام و24 قراءة عند 28 يوماً.

2.3 الإطار التحليلي:

(أ) مقاومة الشد غير المباشر: أُعيد حسابها من متوسط حمل الانهيار P بالمعادلة القياسية [22]:

$$f_{st} = \frac{2P}{(\pi LD)} \quad (1)$$

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

حيث L = 300 mm و D = 150 mm. وقد تبيّن أن القيم الواردة في [14] تساوي P/(πLD) تماماً، أي نصف القيمة الصحيحة؛ ولذلك تحل القيم المحسوبة هنا محلها، مع بقاء الاتجاهات النسبية بين الجرعات دون تغيير لأن الخطأ معامل ثابت.

(ب) مؤشرات الأداء: عُرّف مؤشر الاحتفاظ بالمقاومة (SRI) ونسبة تطور المقاومة (SDR) كما يلي، حيث d نسبة البرادة (%):

$$SRI(d) = \frac{f_{cu}(d)}{f_{cu}(0)} \quad (2)$$

$$SDR = \frac{f_{cu,7}}{f_{cu,28}} \quad (3)$$

(ج) النموذج التنبؤي ومعامل الكفاءة: اعتُمدت الصيغة الخطية لقانون أبرامز/بولومي التي تربط المقاومة بنسبة الإسمنت إلى الماء [16]، مع إضافة حد لنسبة البرادة:

$$f_{cu} = \beta_0 + \beta_1(c/w) + \beta_2 d \quad (4)$$

ولما كان β_2 يمثل تغير المقاومة لكل 1% إضافة وβ_1 حساسية المقاومة لنسبة c/w، فإن كمية الإسمنت المكافئة لعقوبة 1% إضافة عند ثبات كمية الماء W هي $\Delta c_{eq} = W \cdot (\beta_1/\beta_2)$. وبقسمتها على كتلة البرادة المقابلة m_F (1% من كتلة الإسمنت) نحصل على معامل كفاءة مكافئ للإسمنت بالمفهوم المستخدم للمواد المضافة [17]، [18]:

$$k = \left(\frac{\beta_2}{\beta_1}\right) \cdot \frac{W}{m_F} \quad (5)$$

فإذا كانت k موجبة كانت المادة تسهم في المقاومة كجزء من الإسمنت، وإذا كانت سالبة دلّت على أن المادة تُنقص المقاومة بما يعادل سحب كمية من الإسمنت. وطُبّق النموذج نفسه على الهبوط.

(د) علاقة الشد بالضغط: قورنت مقاومة الشد المقاسة بالعلاقتين التاليتين بعد تحويل مقاومة المكعب إلى مقاومة أسطوانة مكافئة بالتقريب [16]: $f_{cu} \approx 0.8f'_c$: علاقة ACI

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

318 [20] وعلاقة Eurocode 2 [21]، مع العلم أن الأخيرة تعطي مقاومة الشد المحوري، وأن نسبة الشد إلى الضغط تتناقص عادة مع ارتفاع المقاومة [19]:

$$f_{ct} = 0.56\sqrt{f'_c} \;;\; f_{ctm} = 0.30\, f_{ck}{}^{2/3} \qquad (6)$$

(هـ) التحليل الإحصائي: استُخدم تحليل التباين الثنائي بتصميم عاملي متوازن (الرتبة: 3 مستويات × النسبة: 4 مستويات) مع حد التداخل، وحُسب حجم الأثر $\eta^2 = SS_{effect}/SS_{total}$، عند مستوى دلالة $\alpha = 0.05$ [29]. واستُخدم اختبار دانيت لمقارنة كل نسبة بالخلطة المرجعية داخل كل رتبة مع ضبط معدل الخطأ العائلي [30]. وقُدّرت معاملات الانحدار بطريقة المربعات الصغرى العادية. ولأن قيم الشد متاحة كمتوسطات فقط، عولجت وصفياً دون اختبار معنوية.

(و) نافذة النسبة المقبولة: عُدّت النسبة مقبولة لرتبة ما إذا حققت ثلاثة شروط معاً: $SRI_{28} \geq 0.90$، وفقد هبوط لا يتجاوز 15% من هبوط الخلطة المرجعية، ونسبة مقاومة شد إلى المرجعية لا تقل عن 0.95.

3. النتائج والمناقشة:

1.3 التشغيلية (الهبوط):

انخفض الهبوط بانتظام مع زيادة النسبة في جميع الرتب، فبلغ الفقد عند 5% نحو 16.0% و13.3% و18.8% للخلطات C25 وC30 وC35 على الترتيب. وأعطى نموذج الانحدار للهبوط S (مم) العلاقة الآتية ($R^2 = 0.841$، $R^2_{adj} = 0.806$، RMSE = 3.5 مم، n = 12):

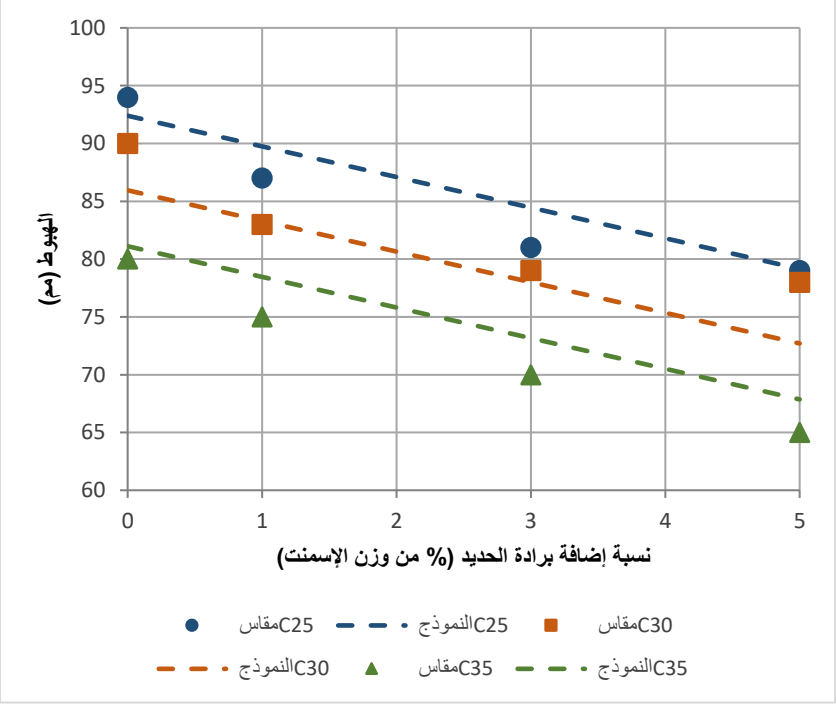
$$S = 159.7 - 40.3(c/w) - 2.65d \qquad (7)$$

وكان معامل النسبة معنوياً ($p < 0.001$)، أي أن كل 1% برادة يُفقد الخلطة نحو 2.7 مم من الهبوط بمعزل عن رتبتها، ويوضح الشكل (1) تطابق النموذج مع القيم المقاسة. ويتسق هذا الاتجاه مع ما أُبلغ عنه لدى إضافة البرادة أو غبار الصلب [10]، [12]،

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

ويُفسَّر بزيادة المساحة السطحية الكلية للمواد الناعمة التي تحتاج إلى ماء ترطيب إضافي عند ثبات كمية الماء [15].



شكل (1): الهبوط المقاس (الرموز) والمتنبأ به من المعادلة (7) (الخطوط المتقطعة)

2.3 مقاومة الضغط (المعنوية الإحصائية)

يلخّص الجدول (2) متوسطات مقاومة الضغط وانحرافاتها المعيارية والمؤشرات المشتقة، ويعرضها الشكل (2). ويبيّن الجدول (3) نتائج تحليل التباين الثنائي.

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

جدول (2): متوسط مقاومة الضغط (ميجاباسكال) ± الانحراف المعياري ومؤشرات الأداء

الرتبة	نسبة الإضافة (%)	$f_{cu,7}$	$f_{cu,28}$	SRI_{28}	SDR
C25	0	32.07 ± 2.46	37.85 ± 0.78	1.000	0.847
	1	30.67 ± 1.29	34.85 ± 1.06	0.921	0.880
	3	30.73 ± 1.10	34.60 ± 0.14	0.914	0.888
	5	23.33 ± 0.51	31.60 ± 0.57	0.835	0.738
C30	0	34.67 ± 0.58	42.15 ± 0.78	1.000	0.822
	1	31.73 ± 0.96	39.95 ± 0.35	0.948	0.794
	3	31.60 ± 0.30	39.75 ± 0.35	0.943	0.795
	5	28.83 ± 0.75	38.35 ± 0.21	0.910	0.752
C35	0	36.07 ± 1.72	46.75 ± 2.47	1.000	0.771
	1	33.80 ± 1.80	43.70 ± 0.71	0.935	0.773
	3	33.40 ± 0.35	42.55 ± 0.21	0.910	0.785
	5	32.37 ± 1.10	41.40 ± 0.57	0.886	0.782

جدول (3): تحليل التباين الثنائي لمقاومة الضغط

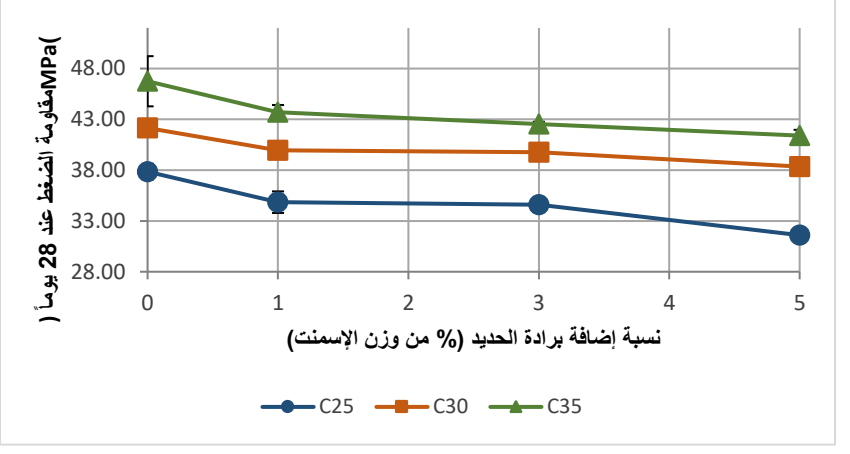
العمر	مصدر التباين	SS	df	MS	F	p	η^2
7 أيام	الرتبة	133.20	2	66.60	42.90	< 0.001	0.346
	نسبة الإضافة	172.23	3	57.41	36.98	< 0.001	0.448
	الرتبة × نسبة الإضافة	42.18	6	7.03	4.53	0.003	0.110
	الخطأ	37.26	24	1.55	—	—	0.097
28 يوماً	الرتبة	319.26	2	159.63	192.33	< 0.001	0.770
	نسبة الإضافة	81.12	3	27.04	32.58	< 0.001	0.196
	الرتبة × نسبة الإضافة	4.55	6	0.76	0.91	0.517	0.011
	الخطأ	9.96	12	0.83	—	—	0.024

تكشف النتائج أن نسبة الإضافة هي العامل الأكبر أثراً عند 7 أيام ($\eta^2 = 0.448$)، متقدمة على رتبة الخلطة نفسها، وأن التداخل معنوي ($p = 0.003$)؛ أي أن الخرسانة الأفقر بالإسمنت أكثر تأثراً بالبرادة في العمر المبكر، إذ بلغ ميل الانخفاض 1.58 ميجا باسكال لكل 1% في C25 مقابل 1.00 في C30 و0.63 في C35. أما عند 28 يوماً فتتقدم الرتبة بوضوح ($\eta^2 = 0.770$) ويبقى أثر نسبة الإضافة معنوياً ($\eta^2 = 0.196$)، لكن التداخل يختفي ($\eta^2 = 0.011$، $p = 0.517$). ومعنى ذلك هندسياً أن عيوب البرادة

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

النهائية شبه ثابتة بين الرتب، وأن الحساسية المرتفعة للخلطات الضعيفة ظاهرة مبكرة تتلاشى جزئياً مع تقدم الإماهة، وهو ما يظهر أيضاً في ارتفاع SDR للخلطة C25 عند 1% و3% (الجدول 2).



شكل (2): تطور مقاومة الضغط مع نسبة إضافة البرادة بعمر 28 يوماً (الأعمدة الصغيرة: ± انحراف معياري)

ويبيّن الجدول (4) نتائج اختبار دانيت. فالنسبة 5% خفضت المقاومة معنوياً في جميع الحالات، بينما لم تختلف النسبتان 1% و3% معنوياً عن المرجعية في C35 عند العمرين ولا في C25 عند 7 أيام. وهذا يعني أن الحكم الوصفي في [14] بأن "البرادة تخفض المقاومة" صحيح على مستوى الاتجاه العام، لكنه لا يصح إحصائياً لكل نسبة ولكل رتبة؛ فالنسب حتى 3% في الخلطة الأعلى مقاومة لم تُحدث فرقاً يمكن تمييزه عن تشتت الاختبار.

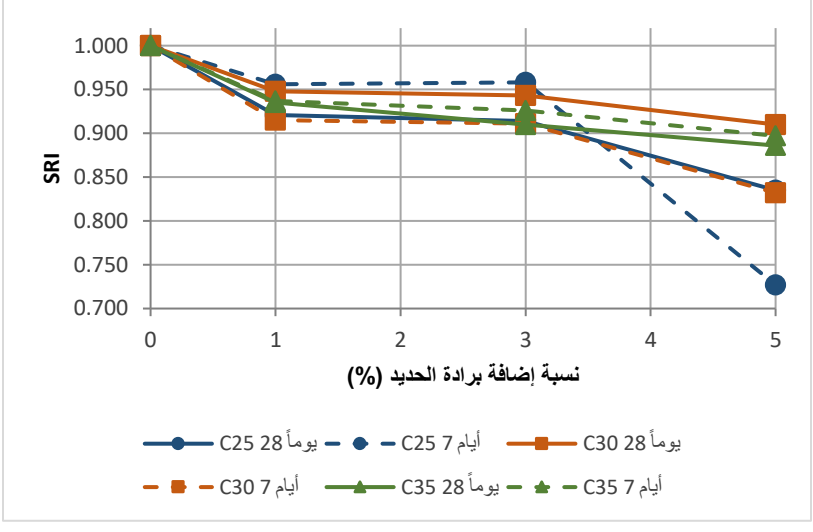
جدول (4): قيم p لاختبار دانيت (مقارنة كل نسبة إضافة بالخلطة المرجعية)

الرتبة	العمر	1%	3%	5%
C25	7 أيام	0.562	0.595	< 0.001
	28 يوماً	0.032	0.024	0.002
C30	7 أيام	0.002	0.002	< 0.001
	28 يوماً	0.022	0.016	0.003
C35	7 أيام	0.177	0.105	0.027
	28 يوماً	0.175	0.074	0.035

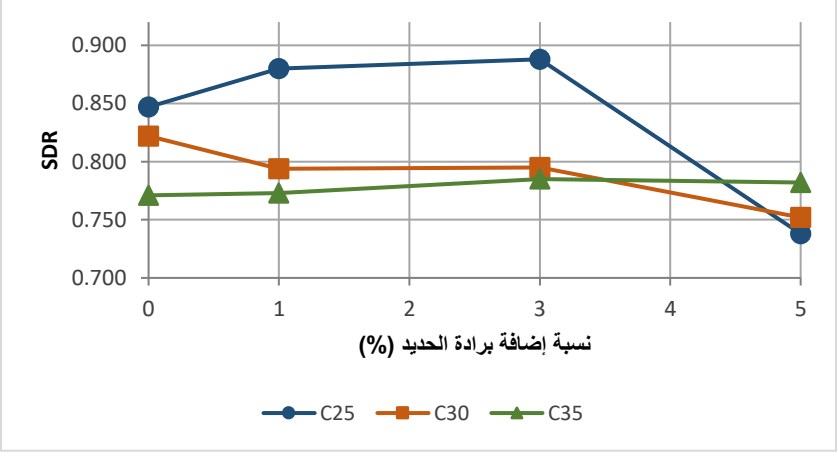
تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

ويعرض الشكلان (3) و(4) مؤشر الاحتفاظ بالمقاومة ونسبة التطور. فقد حافظت نسب الإضافة حتى 3% على $SRI_{28} \geq 0.91$ في جميع الرتب، في حين هبط المؤشر عند 5% إلى 0.835 في C25 و0.886 في C35. ويُلاحظ أن SDR للخلطات المرجعية (0.77–0.85) يقع ضمن المدى المعتاد للإسمنت البورتلاندي العادي، وأن البرادة لم تُبطئ تطور المقاومة بشكل منهجي إلا عند 5% في (SDR = 0.738 C25.



شكل (3): مؤشر الاحتفاظ بالمقاومة SRI عند 7 أيام و28 يوماً



شكل (4): نسبة تطور المقاومة $f_{cu,28}/f_{cu,7}$

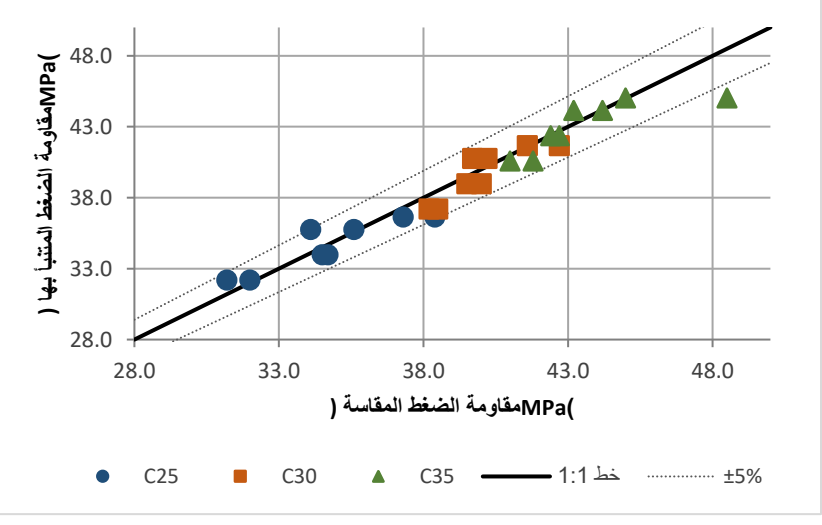
تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

3.3 النموذج التنبئي ومعامل الكفاءة الإسمنتية:

أعطى تطبيق المعادلة (4) على قراءات 28 يوماً (n = 24) النموذج الآتي، بمعامل تحديد (R^2_{adj} = 0.938 (R^2 = 0.932) وخطأ جذر متوسط مربع RMSE = 1.11 ميجاباسكال، وجميع المعاملات معنوية ($p < 0.001$):

$$f_{cu,28} = -13.37 + 30.02(c/w) - 0.891d \qquad (8)$$

أما عند 7 أيام فكان النموذج $f_{cu,7}$ = 5.25 + 15.75(c/w) − 1.069d بمعامل تحديد أقل (R^2 = 0.736)، وهو ما يتسق مع وجود التداخل المعنوي في العمر المبكر الذي لا يلتقطه نموذج جمعي. ويوضح الشكل (5) أن جميع القيم المتنبأ بها عند 28 يوماً تقع ضمن ±5% تقريباً من القيم المقاسة.



شكل (5): مقاومة الضغط المتنبأ بها من المعادلة (8) مقابل المقاسة (الخطوط المنقطة: ±5%)

وبتطبيق المعادلة (5) يتضح أن خفض 1% إضافة (0.891 ميجاباسكال) تعادل خفض نسبة c/w بمقدار 0.0297، أي سحب نحو 5.3–5.5 كجم من الإسمنت لكل متر مكعب. ويبيّن الجدول (5) معامل الكفاءة الناتج.

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

جدول (5): الإسمنت المكافئ لخفض 1% برادة ومعامل الكفاءة k

الرتبة	الماء W (كجم/م^3)	Δc_{eq} لكل 1% (كجم/م^3)	كتلة البرادة لكل 1% (كجم/م^3)	k (-)
C25	180	5.34	3.0	-1.78
C30	180	5.34	3.3	-1.62
C35	185	5.49	3.6	-1.53

فالقيمة السالبة لمعامل الكفاءة (-1.5 إلى -1.8) تعني أن كل كيلوغرام من البرادة المضافة دون تعديل الخلطة يُنقص المقاومة بقدر ما يُنقصها سحب 1.8–1.5 كيلوغرام من الإسمنت. وهذه القيمة تتيح للمصمم تعويض العقوبة مباشرة؛ فاستخدام جرعة 3% في خلطة C30 مثلاً يتطلب زيادة الإسمنت بنحو 16 كجم/م^3 (أو خفض الماء بما يكافئها) للمحافظة على المقاومة الأصلية. ويُفسَّر الأثر السالب بأن الإضافة ترفع محتوى الحبيبات الناعمة ومساحتها السطحية دون زيادة في المادة الرابطة، فتتوزع العجينة نفسها على مساحة أكبر وتضعف منطقة الانتقال البينية [15]، [16]. ويختلف هذا جوهرياً عن دراسات الإحلال التي تحل فيها البرادة محل حجم مكافئ من الرمل فيتحسن تعبئة الحبيبات وتماسك الركام دون تخفيف للعجينة [7]–[5]، وهو ما يفسر التناقض الظاهري بين نتائج هذه الدراسة وكثير من الدراسات السابقة.

4.3 مقاومة الشد غير المباشر وعلاقتها بمقاومة الضغط:

يعرض الجدول (6) قيم مقاومة الشد بعد التصحيح وفق المعادلة (1)، ونسبتها إلى مقاومة الضغط، ونسبتها إلى قيم المواصفتين.

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

جدول (6): مقاومة الشد غير المباشر المصححة عند 28 يوماً ومؤشراتها

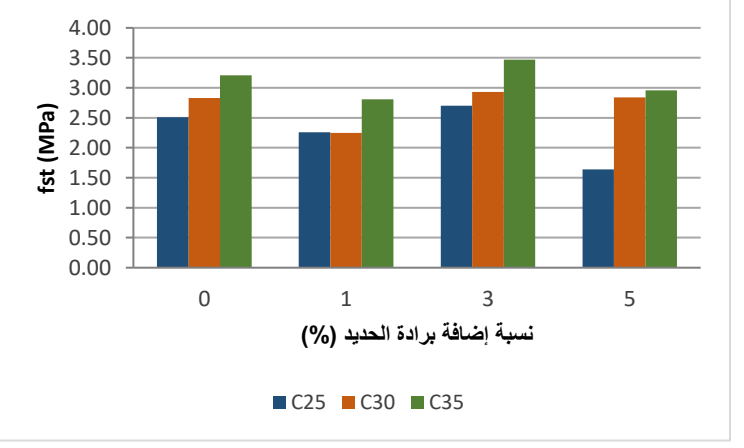
الرتبة	النسبة (%)	P (kN)	القيمة المنشورة سابقاً (MPa)	f_{st} المصححة (MPa)	f_{st}/f_{cu} (%)	ACI	EC2
C25	0	177.6	1.26	2.51	6.6	0.82	0.86
	1	159.8	1.13	2.26	6.5	0.76	0.82
	3	190.5	1.35	2.70	7.8	0.92	0.98
	5	115.6	0.82	1.64	5.2	0.58	0.63
C30	0	200.2	1.42	2.83	6.7	0.87	0.90
	1	159.1	1.13	2.25	5.6	0.71	0.75
	3	206.9	1.46	2.93	7.4	0.93	0.97
	5	200.7	1.42	2.84	7.4	0.92	0.97
C35	0	226.8	1.60	3.21	6.9	0.94	0.96
	1	198.9	1.41	2.81	6.4	0.85	0.88
	3	245.4	1.74	3.47	8.2	1.06	1.10
	5	209.3	1.48	2.96	7.2	0.92	0.96

بعد التصحيح أصبحت مقاومة الشد للخلطات المرجعية (2.51–3.21 ميجا باسكال) ونسبتها إلى مقاومة الضغط (6.6–6.9%) ضمن المدى المعروف للخرسانة العادية [16]، [19]، بخلاف القيم المنشورة سابقاً (1.26–1.60 ميجا باسكال) التي كانت ستعني نسباً غير واقعية تبلغ نحو 3.4%. وتؤكد البيانات المصححة أن نسبة 3% أعطت أعلى مقاومة شد في الرتب الثلاث، بزيادات قدرها 7.3% و3.3% و8.2% للخلطات C25 وC30 وC35 على الترتيب، رغم انخفاض مقاومة الضغط للخلطات نفسها بنحو 9–6%. والأهم أن نسبة الشد إلى الضغط ارتفعت عند 3% إلى 7.4–8.2% في جميع الرتب (الشكل 7)، أي أن البرادة بهذه النسب تُحوّل جزءاً من السلوك نحو استجابة أقل هشاشة، وهو اتجاه يتسق مع الزيادات الكبيرة في الشد المسجلة عند إضافة البرادة بنسب صغيرة [9]، [10] ومع ارتفاعها في الخرسانة ذاتية الدمك [7]. ويمكن تفسير ذلك بأن الجسيمات المعدنية الرفيعة والمتطاولة الناتجة عن سحب الأسلاك

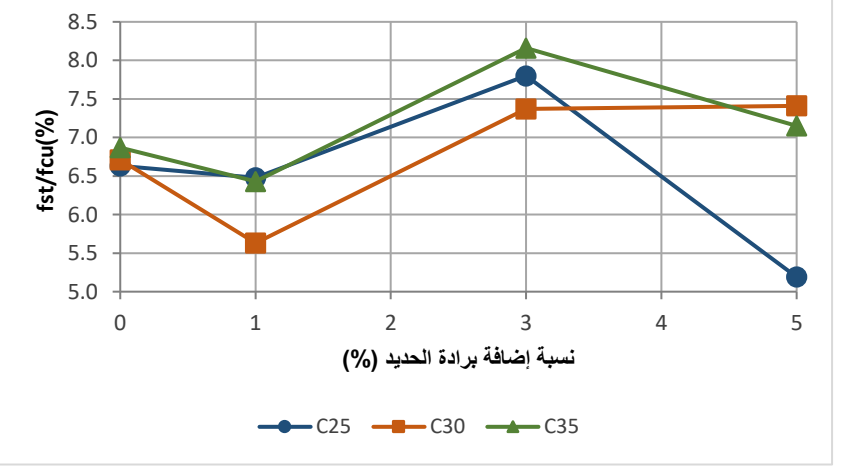
تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

تعمل كألياف دقيقة تعيق انتشار الشقوق الدقيقة عند الشد، بينما يظل أثرها على الضغط محكوماً بتخفيف العجينة.



شكل (6): مقاومة الشد غير المباشر المصححة عند 28 يوماً



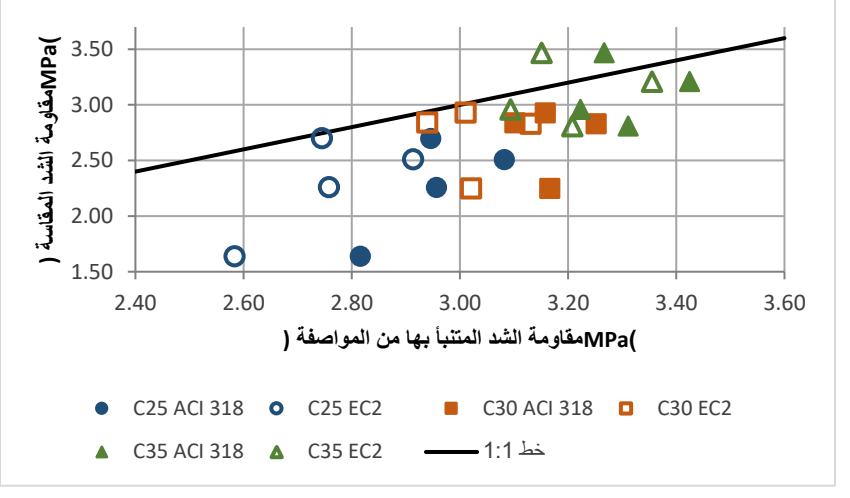
شكل (7): نسبة مقاومة الشد غير المباشر إلى مقاومة الضغط عند 28 يوماً

أما الانخفاض عند نسبة 1% في الرتب الثلاث فلا يجد تفسيراً ميكانيكياً واضحاً، ولما كانت قيم الشد متاحة كمتوسطات دون قراءات منفردة فلا يمكن الجزم بمعنويته؛ وقد يعود إلى عدم انتظام توزيع كمية صغيرة جداً من البرادة (3–3.6 كجم/م^3) في الخلطة. كما أن ملاءمة منحنى تربيعي للبيانات المعيارية المجمعة أعطت قيمة مثلى نحو 2.1% لكن

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

بمعامل تحديد ضعيف (R^2 = 0.11)، ولذلك تُعامل النسبة 3% هنا كأفضل نسبة مختبرة لا كقيمة مثلى مثبتة. ويبيّن الشكل (8) أن علاقة ACI 318 وEC2 تبالغ في تقدير الشد لمعظم الخلطات (نسب 0.94–0.58)، بينما تقترب منه أو تتجاوزه عند نسبة 3% (1.10–0.92)، وهو ما يعني أن استخدام العلاقات التصميمية القياسية لهذه الخلطات يبقى في الجانب الآمن عند 3% أكثر منه في الخلطات الأخرى.



شكل (8): مقاومة الشد المقاسة مقابل المتنبأ بها من ACI 318 (رموز مصمتة) وEC2 (رموز مفرغة)

5.3 إعادة فحص أثر الكفاءة على الكثافة:

خلصت الدراسة السابقة إلى أن البرادة تقلل كثافة الخرسانة [14]. غير أن تحليل التباين يقدّم صورة أدق؛ فعند 7 أيام كان أثر النسبة معنوياً (F = 6.26، p = 0.003)، إذ بلغ متوسط الكثافة المجمعة 2320 و2280 و2307 و2291 كجم/م^3 للنسب 0% و1% و3% و5%. أما عند 28 يوماً فلم يكن أثر النسبة معنوياً (F = 1.42، p = 0.286)، وتراوحت المتوسطات بين 2316 و2336 كجم/م^3، وكان الفرق بين الخلطة المرجعية وخلطة 5% أقل من 0.3%. ولذلك لا تدعم البيانات القول بأن البرادة تخفض الكثافة على نحو يُعتد به، ولا القول بأنها تخفض الحمل الميت؛ فالفروق المسجلة تقع

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

ضمن تشتت الدمك اليدوي، وهو ما يتسق مع أن كمية البرادة المضافة (حتى 18 كجم/م^3) أصغر من أن تغيّر الكثافة الكلية بشكل ملموس رغم كثافتها النوعية العالية.

6.3 نافذة النسبة المقبولة:

يجمع الجدول (7) المعايير الثلاثة المعرفة في القسم 2.3.

جدول (7): تقييم النسب وفق معايير الأداء المتعددة

الرتبة	النسبة (%)	$SRI_{28} \geq 0.90$	فقد الهبوط ≥ 15%	نسبة الشد ≤ 0.95	الحكم
C25	1	0.921 ✓	7.4 ✓	0.90 ✗	غير مقبولة
	3	0.914 ✓	13.8 ✓	1.07 ✓	مقبولة
	5	0.835 ✗	16.0 ✗	0.65 ✗	غير مقبولة
C30	1	0.948 ✓	7.8 ✓	0.79 ✗	غير مقبولة
	3	0.943 ✓	12.2 ✓	1.03 ✓	مقبولة
	5	0.910 ✓	13.3 ✓	1.00 ✓	مقبولة
C35	1	0.935 ✓	6.3 ✓	0.88 ✗	غير مقبولة
	3	0.910 ✓	12.5 ✓	1.08 ✓	مقبولة
	5	0.886 ✗	18.8 ✗	0.92 ✗	غير مقبولة

يتضح أن النسبة 3% هي الوحيدة التي حققت المعايير الثلاثة في جميع الرتب، وأن النسبة 5% مقبولة في C30 فقط على الحد الأدنى، وأن الجرعة 1% تُستبعد بسبب معيار الشد. وعليه فإن نافذة النسبة المقبولة لهذا النوع من البرادة، عند استخدامها إضافةً دون تعديل الخلطة، تتمركز حول 3% من وزن الإسمنت، وهي نسبة تستهلك نحو 9–11 كجم/م^3 من المخلف. ويوصى عند تبنيها بتعويض الفاقد على مقاومة الضغط باستخدام معامل الكفاءة في الجدول (5).

4. حدود الدراسة:

أقيمت الورقة على إعادة تحليل قاعدة بيانات قائمة، ولذلك ترث حدودها: فعدد المكعبات عند 28 يوماً اثنان لكل خلطة، وقيم الشد متاحة كمتوسطات فقط مما حال دون اختبار معنويتها، ولم تُحدد خصائص البرادة نفسها (التدرج، الشكل، التركيب الكيميائي، الكثافة

تقييم إحصائي ونمذجة تنبؤية لأداء الخرسانة المحتوية على برادة الحديد كإضافة وزنية للإسمنت: معامل الكفاءة المكافئ للإسمنت ونافذة النسبة المقبولة
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-2-mf38

النوعية)، ولم تُجرَ فحوص مجهرية أو اختبارات متانة. كما أن تحويل مقاومة المكعب إلى مقاومة أسطوانة بمعامل 0.8 تقريبي، وأن النموذج التنبؤي صالح فقط داخل مدى البيانات (c/w بين 1.67 و1.95، والنسبة بين 0 و5%). ويُنتظر من أي توسيع للبرنامج التجريبي أن يعالج هذه الحدود.

5. الإستنتاجات:

1. نسبة البرادة أثر معنوي على مقاومة الضغط عند 7 و28 يوماً ($p < 0.001$)، وهي العامل الأكبر أثراً في العمر المبكر ($\eta^2 = 0.448$).
2. التداخل بين الرتبة والنسب معنوي عند 7 أيام ويختفي عند 28 يوماً؛ فالخلطات الأفقر بالإسمنت أكثر حساسية مبكراً، لكن الإنخفاضات النهائية شبه ثابتة وتبلغ نحو 0.89 ميجاباسكال لكل 1% إضافة.
3. لم تختلف النسبتان 1% و3% معنوياً عن الخلطة المرجعية في C35، بينما خفضت نسبة 5% المقاومة معنوياً في جميع الحالات.
4. النموذج $f_{cu,28} = -0.891d - (c/w) + 30.02 + 13.37$ يفسر 93.8% من التباين، ويقود إلى معامل كفاءة مكافئ للإسمنت $k \approx -1.5$ إلى -1.8؛ أي أن كل كيلوغرام برادة يعادل سحب 1.5–1.8 كيلوغرام من الإسمنت.
5. يجب حساب مقاومة الشد غير المباشر بالمعادلة $2P/(\pi LD)$؛ وبعد التصحيح رفعت نسبة 3% مقاومة الشد بنسبة 3.3–8.2% ونسبة الشد إلى الضغط إلى 7.4–8.2% في جميع الرتب.
6. ينخفض الهبوط خطياً بمعدل 2.65 مم لكل 1% برادة ($R^2 = 0.84$) بمعزل عن رتبة الخلطة.
7. لا تدعم البيانات إحصائياً وجود أثر للبرادة على الكثافة عند 28 يوماً ($p = 0.286$).
8. نسبة 3% من وزن الإسمنت هي النسبة الوحيدة التي حققت معايير المقاومة والتشغيلية والشد معاً في الرتب الثلاث.

6. التوصيات:

1. عند استخدام البرادة إضافةً بنسبة 3%، يُعوَّض الانخفاض في مقاومة الضغط بزيادة الإسمنت وفق معامل الكفاءة المقترح (نحو 16 كجم/م^3 في خلطة C30) أو بإضافة ملدن يسمح بخفض الماء.
2. توجيه استخدام هذه الخلطات نحو التطبيقات التي يحكمها الأداء الشدّي، مثل البلاطات الأرضية والأرصفة والعناصر سابقة الصب غير الإنشائية.
3. إجراء برنامج تجريبي لاحق بتصميم متوازن يتضمن نسب بينية (4–2%)، وقراءات شد منفردة، وتوصيف البرادة، وفحوص مجهرية، واختبارات متانة تشمل الامتصاص والتآكل والكلوريدات.
4. مقارنة أسلوب الإضافة بأسلوب الإحلال الحجمي للرمل بالبرادة نفسها لفصل أثر تخفيف العجينة عن أثر المادة.

7. المراجع:

[1] R. M. Andrew, "Global CO_2 emissions from cement production," Earth Syst. Sci. Data, vol. 10, no. 1, pp. 195–217, 2018, doi: 10.5194/essd-10-195-2018.
[2] K. L. Scrivener, V. M. John, and E. M. Gartner, "Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry," Cem. Concr. Res., vol. 114, pp. 2–26, 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015.
[3] O. Gencel, Ö. Karadağ, O. H. Oren, and T. Bilir, "Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review," Constr. Build. Mater., vol. 283, Art. no. 122783, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122783.
[4] M. M. Arbili, M. Alqurashi, A. Majdi, J. Ahmad, and A. F. Deifalla, "Concrete made with iron ore tailings as a fine aggregate: A step towards sustainable concrete," Materials, vol. 15, no. 18, Art. no. 6236, 2022, doi: 10.3390/ma15186236.
[5] S. Ghannam, H. Najm, and R. Vasconez, "Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand," Sustain. Mater. Technol., vol. 9, pp. 1–9, 2016, doi: 10.1016/j.susmat.2016.06.001.

[6] K. M.-G. Noori and H. H. Ibrahim, "Mechanical properties of concrete using iron waste as a partial replacement of sand," Eurasian J. Sci. Eng., vol. 3, no. 3, pp. 75–82, 2018, doi: 10.23918/eajse.v3i3p75.

[7] S. O. Olawale, M. A. Kareem, H. T. Muritala, A. U. Adebanjo, O. O. Alabi, O. A. Olawuyi, and O. O. Fadipe, "Utilization of iron filings as partial replacements for sand in self-compacting concrete," Tanzania J. Sci., vol. 47, no. 3, pp. 906–916, 2021, doi: 10.4314/tjs.v47i3.3.

[8] M. N. H. Al-Hashimi, W. A. Najim, and A. M. Hameed, "Performance of concrete containing iron fillings," J. Univ. Babylon Eng. Sci., vol. 26, no. 6, pp. 384–392, 2018.

[9] S. J. Alserai, W. K. Alsaraj, and Z. W. Abass, "Effect of iron filings on the mechanical properties of different types of sustainable concrete," Open Civ. Eng. J., vol. 12, no. 1, pp. 441–457, 2018, doi: 10.2174/1874149501812010441.

[10] Z. A. Mohammed, A. Q. Makhool, Y. W. Abdujaleel, I. H. Naser, and G. Chiranjeevi, "Effect of steel fibers and iron filings on concrete properties with partial replacement of cement by fly ash," J. Techniques, vol. 7, no. 1, pp. 56–65, 2025, doi: 10.51173/jt.v7i1.2638.

[11] S. A. Hassan and S. Altai, "Flexural behavior of sustainable high-strength RC beams with GGBS and iron filings incorporation," J. Sustain. Constr. Mater. Technol., no. 4, pp. 315–326, 2024, doi: 10.47481/jscmt.1608347.

[12] A. Jahami, H. Younes, and J. Khatib, "Enhancing reinforced concrete beams: Investigating steel dust as a cement substitute," Infrastructures, vol. 8, no. 11, Art. no. 157, 2023, doi: 10.3390/infrastructures8110157.

[13] M. Almadani and I. Al-Arabi, "The effect of Wadi Alshati iron oxide fine-particles on the compressive strength of the concrete," J. Pure Appl. Sci., vol. 18, no. 2, 2019, doi: 10.51984/jopas.v18i2.276.

[14] A. Alajail, M. Ahmed, A. Abdullah, and A. Ali, "Study on the effect of adding iron filings on some properties of concrete" [in Arabic: تحسين خواص الخرسانة باستخدام مخلفات صناعة الحديد], African Journal (المجلة الأفريقية للعلوم البحثية والتطبيقية), Jul. 2025.

[15] O. Esping, "Effect of limestone filler BET(H_2O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete," Cem. Concr. Res., vol. 38, no. 7, pp. 938–944, 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2008.03.010.
[16] A. M. Neville, Properties of Concrete, 5th ed. Harlow, U.K.: Pearson Education, 2011.
[17] V. G. Papadakis, S. Antiohos, and S. Tsimas, "Supplementary cementing materials in concrete. Part II: A fundamental estimation of the efficiency factor," Cem. Concr. Res., vol. 32, no. 10, pp. 1533–1538, 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00829-3.
[18] Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity, EN 206:2013+A2:2021, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2021.
[19] N. Arioglu, Z. C. Girgin, and E. Arioglu, "Evaluation of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for concretes up to 120 MPa and its application in strength criterion," ACI Mater. J., vol. 103, no. 1, pp. 18–24, 2006.
[20] Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-19, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2019.
[21] Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, EN 1992-1-1:2004, CEN, Brussels, Belgium, 2004.
[22] Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM C496/C496M-17, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017.
[23] Libyan National Center for Standardization and Metrology, Libyan Standard No. 340: Ordinary Portland Cement – Specifications, Tripoli, Libya, 2009.
[24] Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM C136/C136M-19, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2019.
[25] Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM C127-15, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2015.
[26] Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, ACI 211.1-91 (Reapproved

2009), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2009.
[27] Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM C143/C143M-20, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2020.
[28] Testing Concrete – Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes, BS 1881-116:1983, British Standards Institution, London, U.K., 1983.
[29] D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, 9th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017.
[30] C. W. Dunnett, "A multiple comparison procedure for comparing several treatments with a control," J. Amer. Statist. Assoc., vol. 50, no. 272, pp. 1096–1121, 1955, doi: 10.1080/01621459.1955.10501294.