



العلاقة بين مقاومة الضغط ومقاومة الشد في الخرسانة عالية المقاومة

علي محمود إغليو و إمحمد حسن القط و عبد الكريم خليفة الأطرش و *عبد الله علي شافت

قسم الهندسة المدنية، جامعة مصراته، مصراته، ليبيا

الكلمات المفتاحية:

التشغيلية
الخرسانة
الخرسانة عالية المقاومة
المقاومة العالية
النسبة بين مقاومة الشد والضغط
مقاومة الشد
مقاومة الضغط
نسبة الماء الى الاسمنت

الملخص

تم في هذا البحث إجراء اختبارات معملية على عينات خرسانية لحساب كل من مقاومة الضغط ومقاومة الشد في الخرسانة عالية المقاومة، حيث تم حساب مقاومة الضغط باختبار عدد (12) مكعب مقاس (10*10*10)cm لكل تشغيلية (منخفضة - متوسطة - مرتفعة)، وتم حساب مقاومة الشد باستخدام اختبار القص المباشر باختبار عدد (8) اسطوانات مقاس (15*15)cm لكل تشغيلية، حيث تم رسم منحنيات للعلاقة بين مقاومة الضغط ومقاومة الشد للخرسانة عالية المقاومة عند كل تشغيلية، وكانت النتائج تشير إلى أنّ مقاومة الضغط تزداد كلما قلت نسبة الماء إلى الإسمنت عند جميع التشغيليات، وأشارت النتائج أيضاً إلى أنّ مقاومة الشد تزداد كلما قلت نسبة الماء إلى الإسمنت، ولكن عند التشغيلية المنخفضة كانت مقاومة الشد تقل كلما قلت نسبة الماء إلى الإسمنت حتى نسبة (W/C = 0.45) ثم تبدأ مقاومة الشد في الإزداد عند النسبة الأقل من (0.45) = (W/C)، كما أشارت النتائج أيضاً إلى أنّ مقاومة الشد تتراوح بين 6% إلى 8% من مقاومة الضغط عند جميع التشغيليات، وأشارت النتائج أخيراً إلى أنّه كلما زادت التشغيلية قلّ معامل الاختلاف لكل من مقاومة الشد ومقاومة الضغط ونسبة مقاومة الشد إلى مقاومة الضغط أي أنّ النتائج تكون أكثر تجانساً، بينما نسبة الماء إلى الإسمنت W/C ratio تكون أكثر تجانساً كلما قلت التشغيلية.

Relationship Between Compressive Strength and Tensile Strength in High-Strength Concrete

Ali Mahamoud Ghlaio, Imhemmed Hasan Algott, Abdalkrem khalifa Altresh, *Abdullah Ali Shafter

Department of Civil Engineering, Misrata University, Misrata, Libya

Keywords:

Compressive strength
Concrete
High strength
Ratio of tensile strength to
compressive strength
Tensile strength
Water-to-cement ratio
Workability

ABSTRACT

In this study, laboratory tests were conducted on concrete specimens to determine the compressive strength and tensile strength of high-strength concrete. The compressive strength was calculated by testing 12 (10 cm x 10 cm x 10 cm) cubes for each of three workability (low, medium, and high). The tensile strength was calculated using a direct shear test by testing 8 (15 cm x 15 cm) cylinders for each workability. The relationships between compressive strength and tensile strength of high-strength concrete were then determined for each workability. The results indicated that compressive strength increased with a decrease in the water-to-cement ratio (W/C) for all workabilities. The results also indicated that tensile strength increased with a decrease in W/C, but for the low workability, tensile strength decreased with a decrease in W/C until W/C = 0.45, after which tensile strength began to increase. The results also indicated that tensile strength ranged from 6% to 8% of compressive strength for all workabilities. Finally, the results indicated that the coefficient of variation (C.V) of tensile strength, compressive strength, and the tensile-to-compressive strength ratio decreased with increasing workability. This means that the results were more consistent with increasing mix. On the other hand, W/C ratio was more consistent with decreasing workability.

1. المقدمة

ترتبط الركام معاً، بينما يوفر الرمل الحجم والصلابة، والماء يوفر الرطوبة اللازمة للتفاعل الكيميائي الذي يربط المكونات معاً.

الخرسانة هي مادة بناء صلبة تتكون من خمسة مكونات رئيسية: الإسمنت والماء والركام الخشن والركام الناعم والإضافات، يوفر الإسمنت الرابطة التي

*Corresponding author:

E-mail addresses: Abdhalh.a.shafter@eng.misuratau.edu.ly, (A. M. Ghlaio) ali.ghlaio@eng.misuratau.edu.ly,

(I. H. Algott) Imhemmed@eng.misuratau.edu.ly, (A. k. Altresh) abalkreemalaltresh@eng.misuratau.edu.ly

Article History : Received 23 October 2023 - Received in revised form 17 January 2024 - Accepted 23 January 2024

تتميز الخرسانة بقدرة عالية على تحمل الضغط، مما يعني أنها يمكن أن تتحمل الأحمال الثقيلة دون أن تنهار، ومع ذلك، فهي ليست قوية في مواجهة الشد، مما يعني أنها يمكن أن تنكسر إذا تعرضت لقوة خارجية تسحبها. تتمثل العلاقة بين مقاومة الشد ومقاومة الضغط في أنهما يحددان قدرة الخرسانة على تحمل الأحمال، تشير مقاومة الشد إلى قدرة الخرسانة على تحمل الضغوط التي تحاول تمددها أو سحبها، بينما تشير مقاومة الضغط إلى قدرة الخرسانة على تحمل الضغوط التي تحاول ضغطها. تعود مشكلة ضعف الخرسانة في مواجهة الشد إلى طبيعة المادة نفسها. الخرسانة عبارة عن مادة غير متجانسة، مما يعني أنها تتكون من مجموعة متنوعة من المكونات التي لا ترتبط ببعضها البعض بشكل متساوٍ، هذا يؤدي إلى ظهور مناطق قوية ومناطق ضعيفة في الخرسانة.

تؤثر العديد من العوامل على مقاومة الشد للخرسانة، بما في ذلك:

- 1) نسبة الماء إلى الإسمنت: كلما زادت نسبة الماء إلى الإسمنت، كلما كانت الخرسانة أقل مقاومة للشد.
- 2) نوع الإسمنت: ينتج الإسمنت البورتلاندي العادي قوة شد أقل من الإسمنت البورتلاندي عالي الأداء.
- 3) نوع الركام: الركام الخشن أكثر مقاومة للشد من الركام الناعم.
- 4) طريقة الخلط والصب: يمكن أن يؤدي الخلط غير الصحيح أو الصب غير المناسب إلى ضعف مقاومة الشد للخرسانة.

تتمثل إحدى طرق تحسين مقاومة الشد للخرسانة في استخدام حديد التسليح. حديد التسليح هو شبكة من الأسلاك الفولاذية المدفونة في الخرسانة. يساعد حديد التسليح في ربط الخرسانة معًا ويوفر دعمًا إضافيًا للشد [1]. في الآونة الأخيرة، أصبح استخدام الخرسانة عالية الأداء (HPC) أكثر شيوعًا، تتميز الخرسانة عالية الأداء بخصائص أفضل من الخرسانة العادية، بما في ذلك مقاومة الضغط العالية والقابلية للتشغيل العالية والخصائص طويلة المدى المحسنة [2].

حيث تناول هذه البحث دراسة العلاقة بين مقاومة الشد ومقاومة الضغط للخرسانة عالية المقاومة والمنتجة بمواد محلية مع تحسين خواص الخرسانة باستخدام إضافة (سيكامنت 163)، حيث تقوم الإضافة بالحفاظ على التشغيلية عند تقليل نسبة الماء للإسمنت لإنتاج خرسانة ذات مقاومة عالية. يهدف هذا البحث لإيجاد علاقة بين مقاومة الشد ومقاومة الضغط عند درجات مختلفة من التشغيلية، والاستفادة من هذه العلاقات في إنتاج خرسانة ذات خواص معينة.

2. الدراسات السابقة

1. المعهد الأمريكي للخرسانة (ACI) في دراسة أجراها في سنة (1992) بعنوان "مقاومة الشد للخرسانة عالية المقاومة"، وجد أن مقاومة الشد للخرسانة عالية المقاومة عادة ما تكون (10%-15%) من مقاومة الضغط، هذا يعني أن الخرسانة عالية المقاومة مع قوة ضغط (60MPa) سيكون لها مقاومة شد بين (6-12) MPa، ووجدت الدراسة أيضًا أنه يمكن زيادة مقاومة الشد للخرسانة عالية المقاومة باستخدام ركام عالي الجودة ونسب منخفضة من الماء إلى الإسمنت وحبس الهواء [3].

2. مالهوترا وكارينو في دراسة قاما بها في سنة (1994) بعنوان "تأثير نسبة الماء إلى الإسمنت على مقاومة الشد للخرسانة عالية المقاومة"، وجدوا أن مقاومة الشد للخرسانة عالية المقاومة تتراوح عادة بين (10%-20%) من مقاومة الضغط، ووجدوا أيضًا أن مقاومة الشد تتأثر أكثر من مقاومة الضغط بنسبة الماء إلى الإسمنت في الخلطة، وذكر أن انخفاض نسبة الماء إلى الإسمنت من (0.4 إلى 0.3) أدت إلى زيادة (50%) في مقاومة الشد وزيادة (25%) فقط في مقاومة الضغط [4].

3. المنصوري وآخرون قاموا بدراسة في سنة (2007) بعنوان "تأثير حجم الركام على مقاومة الشد للخرسانة عالية المقاومة"، وجدوا أنه يمكن زيادة مقاومة الشد للخرسانة عالية القوة باستخدام أحجام الركام الأصغر، وجد أن مقاومة الشد تزداد بنسبة تصل إلى (20%) عندما ينخفض المقاس الاعتباري الأكبر للركام من (19mm) إلى (12.5mm) [5].

4. باحثون في جامعة تكساس في أوستن في دراسة قاموا بها في سنة (2010) بعنوان "تأثير قابلية التشغيل على مقاومة الشد للخرسانة عالية المقاومة"، وجد الباحثون أن مقاومة الشد للخرسانة زادت مع تحسن قابلية التشغيل للخرسانة، كانت للخرسانة ذات قابلية التشغيل العالية قوة شد تبلغ (20MPa)، والخرسانة ذات قابلية التشغيل المتوسطة لها قوة شد تبلغ (15MPa)، والخرسانة ذات قابلية التشغيل المنخفضة لديها قوة شد تبلغ (12MPa) [6].

5. بينتور وآخرون في دراسة نشرت سنة (2004) بعنوان "الارتباط بين الخواص الميكانيكية للخرسانة عالية القوة"، وجدوا أن نسبة مقاومة الشد إلى مقاومة الضغط للخرسانة عالية المقاومة عادة ما بين (10:1) و(20:1)، ووجدت الدراسة أيضًا أن نسبة مقاومة الشد إلى قوة الضغط أكثر حساسية لنسبة الماء إلى الإسمنت من مقاومة الضغط، على سبيل المثال، أدى خفض نسبة الماء إلى الإسمنت من (0.4 إلى 0.3) إلى زيادة مقاومة الشد بنسبة (50%) وزيادة مقاومة الانضغاط بنسبة (25%) فقط [7].

6. باي وكيم وبارك في دراسة نشرت سنة (2015) بعنوان "الارتباط بين مقاومة الشد ومقاومة الضغط للخرسانة عالية القوة المدعمة بألياف الصلب"، وجدوا أنه يمكن أن تصل نسبة مقاومة الشد إلى مقاومة الضغط للخرسانة فائقة الأداء (UHPC) إلى (30:1)، وهذا يعني أن (UHPC) بقوة ضغط تبلغ (120MPa) سيكون لها مقاومة شد تبلغ (4MPa)، ووجدت الدراسة أيضًا أن نسبة مقاومة الشد إلى قوة الضغط أكثر حساسية لنسبة الماء إلى الإسمنت من مقاومة الضغط، على سبيل المثال، أدى تقليل نسبة الماء إلى الإسمنت من (0.3 إلى 0.2) إلى زيادة مقاومة الشد بنسبة (75%) وزيادة مقاومة الانضغاط بنسبة (50%) فقط [8].

7. Kumar and Das في دراسة نشرت في سنة (2017) بعنوان "تأثير الرماد المتطاير وخبث الأفران العالية على مقاومة الضغط والشد للخرسانة عالية الأداء" وجدوا أن نسبة مقاومة الشد إلى مقاومة الضغط للخرسانة عالية الأداء (HPC) عادة ما بين (15:1) و (20:1)، وهذا يعني أن (HPC) بمقاومة ضغط (60MPa) سيكون لها مقاومة شد من (4.5 إلى 5) MPa، ووجدت الدراسة أيضًا أن نسبة مقاومة الشد إلى مقاومة الضغط أكثر حساسية لنسبة الماء إلى الإسمنت من مقاومة الضغط، على سبيل المثال، أدى خفض نسبة الماء إلى الإسمنت من (0.4 إلى 0.3) إلى

الكوالينا	--	--	0.74	0.726
-----------	----	----	------	-------

5.1.3 الركام الخشن (Coarse aggregate)

تم جلب الركام الخشن بمقاسين اعتباريين (10mm) و (20mm) من نفس محجر الركام الناعم (النموه)، تم إجراء تجربة التدرج الحبيبي وكانت ضمن حدود المواصفات البريطانية (BS882:1992) [14]. تم إجراء اختبارات الوزن النوعي والامتصاص ومحتوى الرطوبة ومعامل التهشيم ومعامل 10% مواد ناعمة، وكانت النتائج كما في (جدول 2).

جدول 2: نتائج اختبارات الركام الخشن

الوزن النوعي	الامتصاص	محتوى الرطوبة	معامل التهشيم %	معامل 10% مواد ناعمة	نسبة المواد الناعمة %
2.49	2.56%	1.0	22.97	160.5 KN	0.451

2.3 تصميم الخلطة الخرسانية

تم في هذه الدراسة إعداد خلطات خرسانية باستخدام اسمنت بورتلاندي عادي وركام ناعم وركام خشن وازافات حسب المعايير الموصى بها لتصميم الخلطة، حيث تم تغيير نسبة الماء الى الاسمنت ونسبة الملدنات الى الاسمنت في كل مرة، و (جدول 3) يوضح نسب وكميات الخلطة الخرسانية المستخدمة.

جدول 3: نتائج تصميم الخلطة الخرسانية

التشغيلية	الاسمنت	ركام 2.0	ركام 1.0	الرمل	الكوالينا
منخفضة	214.25	642.85	275.5	216.5	505.1
متوسطة	237.85	644.7	276.3	184.2	429.8
عالية	246.95	571.7	245	200.5	467.8

3.3 اختبارات الخرسانة المتصلبة

تم حساب مقاومة الضغط باختبار عدد (12) مكعب مقاس $10*10*10$ cm لكل تشغيلية، وتم حساب مقاومة الشد باستخدام القص المباشر باختبار عدد (8) اسطوانات مقاس $15*15$ cm لكل تشغيلية، وكانت النتائج كما هو موضح في (جدول 4) و (جدول 5) و (جدول 6).

1.3.3 التشغيلية المنخفضة

جدول 4: نتائج اختبارات الهبوط واختبار الضغط واختبار الشد

للتشغيلية المنخفضة

مقاومة الشد Ft (MPa)	مقاومة الضغط Fcu (MPa)	W/C ratio	الهبوط mm
4.094	56.29	0.471	45
4.247	56.44	0.471	45
	56.56	0.471	45
3.992	64.09	0.431	45
4.666	64.19	0.431	45
	65.67	0.431	45
5.186	72.02	0.391	35
3.93	69.69	0.391	35
	74.64	0.391	35
5.483	91.6	0.351	38
5.993	97.27	0.351	38
	92.39	0.351	38

2.3.3 التشغيلية المتوسطة

جدول 5: نتائج اختبارات الهبوط واختبار الضغط واختبار الشد للتشغيلية المتوسطة

زيادة مقاومة الشد بنسبة (50%) وزيادة مقاومة الضغط بنسبة (25%) فقط [9].

8. عاشور وآخرون في دراسة نشرت في سنة (2017) بعنوان "توقع مقاومة الشد للخرسانة عالية المقاومة باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية"، وجدوا انه يمكن التنبؤ بمقاومة الشد إلى مقاومة الضغط للخرسانة عالية المقاومة باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية بدقة (95%)، هذا يعني أن الشبكة العصبية يمكنها التنبؤ بمقاومة الشد للخرسانة عالية المقاومة بنسبة خطأ في حدود (5%) من القيمة الفعلية، ووجدت الدراسة أيضاً أن الشبكة العصبية كانت أكثر دقة من الطرق الأخرى للتنبؤ بمقاومة الشد للخرسانة عالية المقاومة، مثل تحليل الانحدار والمعادلات التجريبية [10].

3. المواد وطرق العمل

1.3 مكونات الخلطة الخرسانية

1.1.3 الإسمنت (Cement)

تم استعمال الإسمنت البورتلاندي العادي المنتج في مصنع الاتحاد العربي للمقاولات وتم إجراء الاختبارات الكيميائية والفيزيائية للإسمنت وكانت ضمن حدود المواصفات البريطانية (BS12:1996) [11].

2.1.3 ماء الخلط (Mixing water)

تم استعمال ماء الشرب من شبكة المياه العامة، وكانت ضمن المواصفات الليبية رقم 302 لسنة 1989 [12].

3.1.3 الإضافات (Admixtures)

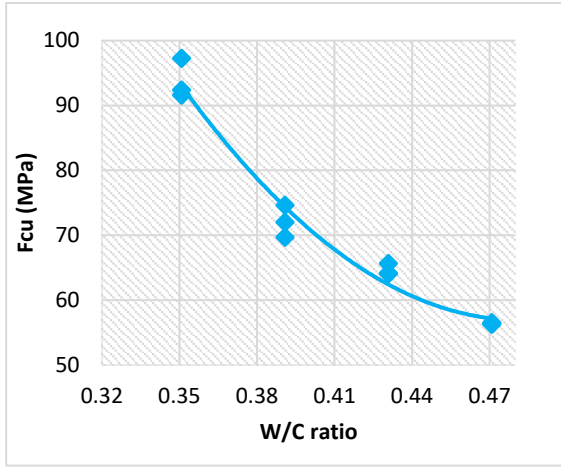
تم استخدام الملدنات الفائقة بنسب مختلفة لتعويض التشغيلية عند خفض المحتوى المائي في الخلطة الخرسانية في كل مرة، حيث استعمال الإضافة المنخفضة للمحتوى المائي عالية الكفاءة super plasticizer (سيكامنت 163) [13].

4.1.3 الركام الناعم (Fine aggregate)

الركام الناعم المستخدم في هذا البحث عبارة عن خليط من الرمل الطبيعي ونواتج تكسير الصخور المعروفة بـ (الكوالينا) وذلك للحصول على تدرج حبيبي ضمن حدود المواصفات، وقد تم جلبه من المحاجر الواقعة بمدينة مصراتة، حيث كان الرمل الطبيعي من محجر أبوروية، أما نواتج تكسير الصخور فقد جلبت من كسارة في منطقة النموه والمحجوزة على المنخل 1.18 mm، تم إيجاد نسب الدمج باستخدام الطريقة الحسابية، حيث كانت نسبة الرمل 30% من الركام الناعم والنسبة الباقية 70% للكوالينا المحجوزة على منخل 1.18 mm، وذلك للحصول على تدرج حبيبي ضمن حدود المواصفات البريطانية [10] (BS882:1992). كما تم إجراء اختبارات الوزن النوعي والامتصاص ومحتوى الرطوبة وكانت النتائج كما في (جدول 1).

جدول 1: نتائج اختبارات الركام الناعم

نوع الركام الناعم	الوزن النوعي	الامتصاص %	محتوى الرطوبة	نسبة المواد الناعمة %
الرمل	2.67	0.755	2.09	0.733

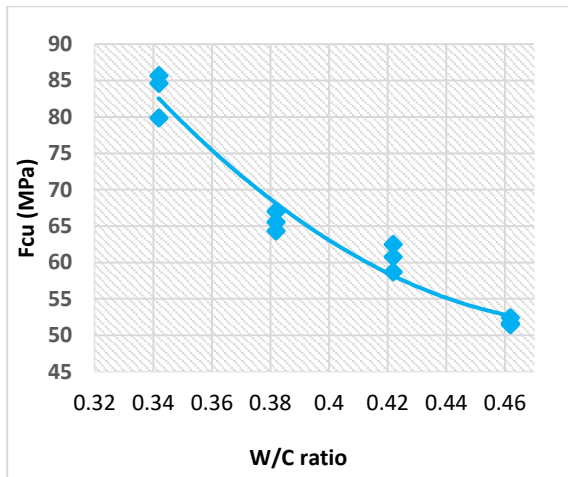


شكل 1: يوضح العلاقة بين نسبة الماء إلى الاسمنت (W/C) ومقاومة الضغط (Fcu) عند التشغيلية المنخفضة

2.4 العلاقة بين W/C ومقاومة الضغط عند التشغيلية المتوسطة

تم رسم العلاقة بين W/C ومقاومة الضغط عند التشغيلية المتوسطة. حيث كانت معادلة الانحدار معادلة (2) من الدرجة الثانية بدرجة الارتباط عالية جدا المتوسط ($R^2 = 0.9560$).

$$y = 1393.2x^2 - 1368.6x + 387.61 \quad (2)$$



شكل 2: يوضح العلاقة بين نسبة الماء إلى الاسمنت (W/C) ومقاومة الضغط (Fcu) عند التشغيلية المتوسطة

3.4 رسم العلاقة بين W/C ومقاومة الضغط عند التشغيلية العالية:

حيث كانت معادلة الانحدار معادلة (3) من الدرجة الثانية بدرجة الارتباط عالية جدا ($R^2 = 0.9301$).

$$y = 1103.1x^2 - 1086.8x + 322.66 \quad (3)$$

مقاومة الشد Ft (MPa)	مقاومة الضغط Fcu (MPa)	W/C ratio	الهبوط mm
3.938	51.69	0.462	70
4.329	51.43	0.462	70
	52.44	0.462	70
4.502	60.76	0.422	70
4.507	58.7	0.422	70
	62.51	0.422	70
4.487	64.35	0.382	90
4.504	65.59	0.382	90
	67.03	0.382	90
5.636	79.88	0.342	70
5.602	84.6	0.342	70
	85.65	0.342	70

3.3.3 التشغيلية العالية

جدول 6: نتائج اختبارات الهبوط واختبار الضغط واختبار الشد للتشغيلية المرتفعة

مقاومة الشد Ft (MPa)	مقاومة الضغط Fcu (MPa)	W/C ratio	الهبوط mm
4.122	54.96	0.457	130
4.286	55.8	0.457	130
	55.93	0.457	130
4.7	62.91	0.417	130
4.821	64.51	0.417	130
	63.58	0.417	130
4.884	71.03	0.377	150
4.994	68.43	0.377	150
	62.25	0.377	150
5.956	82.06	0.337	140
5.891	81.93	0.337	140
	83.21	0.337	140

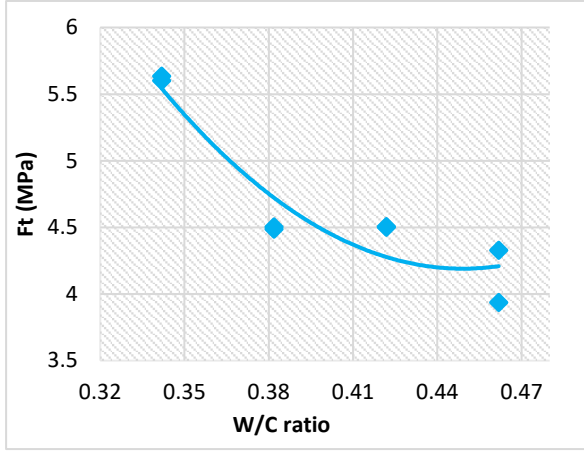
4. النتائج

في هذا البحث تم رسم النتائج في علاقات ثنائية للمتغيرات في الجداول السابقة باستخدام برنامج Microsoft excel، وتحديد معادلة الانحدار ودرجة الارتباط لكل علاقة.

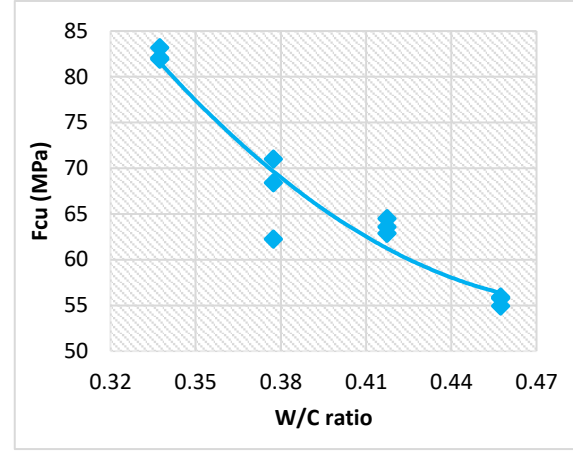
1.4 العلاقة بين W/C ومقاومة الضغط عند التشغيلية المنخفضة

تم رسم العلاقة بين W/C ومقاومة الضغط عند التشغيلية المنخفضة. حيث كانت معادلة الانحدار معادلة (1) من الدرجة الثانية بدرجة الارتباط عالية جدا ($R^2 = 0.9717$).

$$y = 2096.4x^2 - 2021.3x + 544.14 \quad (1)$$



شكل 5: يوضح العلاقة بين نسبة الماء إلى الاسمنت (W/C) ومقاومة الشد (Ft) عند التشغيلية المتوسطة



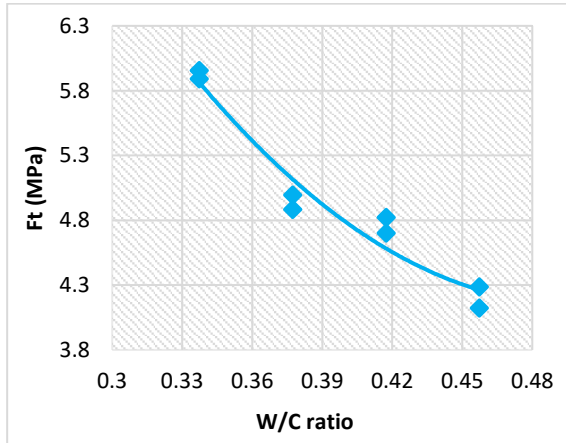
شكل 3: يوضح العلاقة بين نسبة الماء إلى الاسمنت (W/C) ومقاومة الضغط (Fcu) عند التشغيلية العالية

يتضح من (شكل 5) أن مقاومة الشد تزداد كلما قلت نسبة الماء إلى الاسمنت، حيث كانت الزيادة في مقاومة الشد طفيفة أو شبه معدومة عند نسبة ماء إلى الاسمنت أكبر من (0.43)، بينما كانت الزيادة بمقدار أكبر وبشكل متزايد عند القيمة الأقل من (0.43).

6.4 رسم العلاقة بين W/C ومقاومة الشد عند التشغيلية العالية

تم رسم العلاقة بين W/C ومقاومة الشد عند التشغيلية العالية. حيث كانت معادلة الانحدار معادلة (6) من الدرجة الثانية بدرجة ارتباط عالية جدا $R^2 (= 0.9456)$.

$$y = 66.875x^2 - 66.483x + 20.681 \quad (6)$$



شكل 6: يوضح العلاقة بين نسبة الماء إلى الاسمنت (W/C) ومقاومة الشد (Ft) عند التشغيلية العالية

يتضح من (شكل 6) أن مقاومة الشد تزداد كلما قلت نسبة الماء إلى الاسمنت عند التشغيلية العالية.

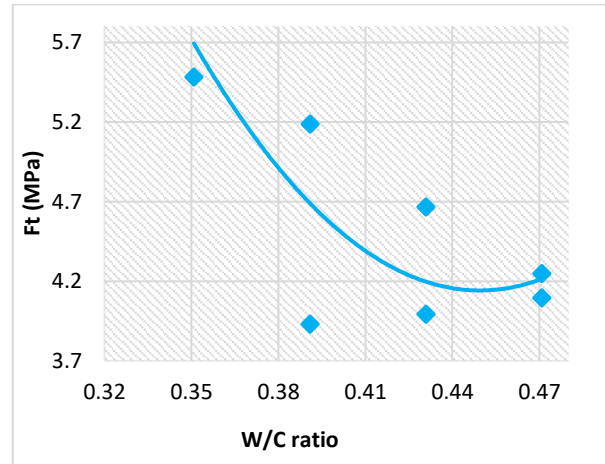
7.4 العلاقة بين مقاومة الضغط ومقاومة الشد عند التشغيلية المنخفضة

تم رسم العلاقة بين مقاومة الضغط ومقاومة الشد عند التشغيلية المنخفضة. حيث كانت معادلة الانحدار معادلة (7) من الدرجة الثانية بدرجة ارتباط فوق المتوسط ($R^2 = 0.7772$).

4.4 العلاقة بين W/C ومقاومة الشد عند التشغيلية المنخفضة

تم رسم العلاقة بين W/C ومقاومة الشد عند التشغيلية المنخفضة حيث كانت معادلة الانحدار معادلة (4) من الدرجة الثانية بدرجة الارتباط فوق المتوسط ($R^2 = 0.7051$).

$$y = 159.61x^2 - 143.49x + 36.391 \quad (4)$$



شكل 4: يوضح العلاقة بين نسبة الماء إلى الاسمنت (W/C) ومقاومة الشد (Ft) عند التشغيلية المنخفضة

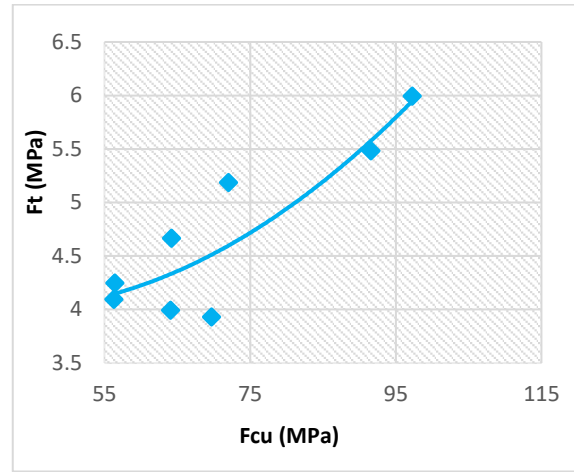
يتضح من (شكل 4) أن مقاومة الشد تقل كلما قلت نسبة الماء إلى الاسمنت عند النسبة الأكبر من (0.45) ثم تبدأ مقاومة الشد في الازدياد عند النسبة الأقل من (0.45).

5.4 العلاقة بين W/C ومقاومة الشد عند التشغيلية المتوسطة

تم رسم العلاقة بين W/C ومقاومة الشد عند التشغيلية المتوسطة حيث كانت معادلة الانحدار معادلة (5) من الدرجة الثانية بدرجة ارتباط فوق المتوسط ($R^2 = 0.8808$).

$$y = 117.58x^2 - 105.62x + 27.907 \quad (5)$$

$$y = 0.0006x^2 - 0.0489x + 4.9815 \quad (7)$$



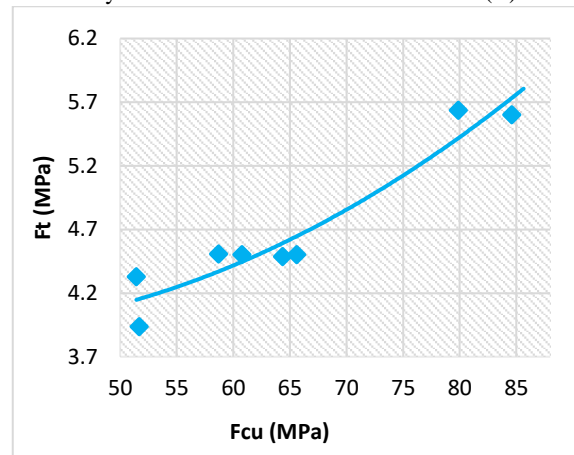
شكل 7: يوضح العلاقة بين مقاومة الضغط (Fcu) ومقاومة الشد (Ft) عند التشغيلية المنخفضة

يتضح من (شكل 7) أن مقاومة الشد تزداد كلما زادت مقاومة الضغط عند التشغيلية المنخفضة، حيث كان مقدار الزيادة في مقاومة الشد في البداية بشكل قليل ثم أصبحت الزيادة بشكل أكبر عند مقاومة ضغط أكبر من (70MPa).

8.4 العلاقة بين مقاومة الضغط ومقاومة الشد عند التشغيلية المتوسطة

تم رسم العلاقة بين مقاومة الضغط ومقاومة الشد عند التشغيلية المتوسطة. حيث كانت معادلة الانحدار معادلة (8) من الدرجة الثانية بدرجة ارتباط عالية جدا ($R^2 = 0.9232$).

$$y = 0.0007x^2 - 0.042x + 4.5625 \quad (8)$$

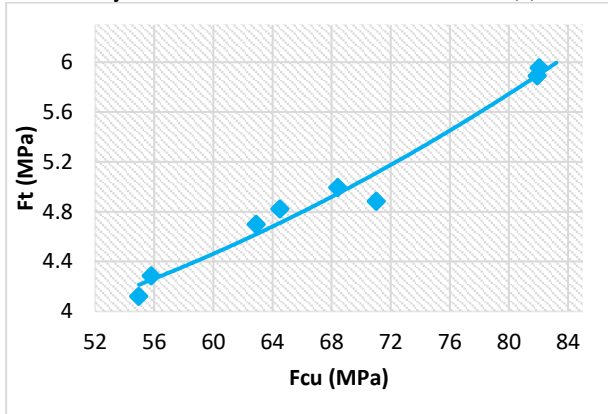


شكل 8: يوضح العلاقة بين مقاومة الضغط (Fcu) ومقاومة الشد (Ft) عند التشغيلية المتوسطة

يتضح من (شكل 8) أن مقاومة الشد تزداد كلما زادت مقاومة الضغط عند التشغيلية المتوسطة، حيث كان مقدار الزيادة في مقاومة الشد في البداية بشكل قليل ثم أصبحت الزيادة بشكل أكبر عند مقاومة ضغط أكبر من (63MPa).

9.4 العلاقة بين مقاومة الضغط ومقاومة الشد عند التشغيلية المرتفعة تم رسم العلاقة بين مقاومة الضغط ومقاومة الشد عند التشغيلية المرتفعة. حيث كانت معادلة الانحدار معادلة (9) من الدرجة الثانية بدرجة الارتباط عالية جداً ($R^2 = 0.9727$).

$$y = 0.0006x^2 - 0.0188x + 3.4559 \quad (9)$$



شكل 9: يوضح العلاقة بين مقاومة الضغط (Fcu) ومقاومة الشد (Ft) عند التشغيلية العالية

يتضح من (شكل 9) أن مقاومة الشد تزداد كلما زادت مقاومة الضغط عند التشغيلية العالية، حيث كان مقدار الزيادة في مقاومة الشد منتظمة بشكل تقريبي.

10.4 العلاقة بين مقاومة الضغط والنسبة بين مقاومة الشد الى مقاومة الضغط

تم رسم العلاقة بين مقاومة الضغط والنسبة بين مقاومة الشد الى مقاومة الضغط عند التشغيليات الثلاثة (المنخفضة، المتوسطة والمرتفعة). حيث كانت معادلة الانحدار للتشغيلية المنخفضة معادلة (10) من الدرجة الثانية بدرجة ارتباط عالية جدا ($R^2 = 0.9205$).

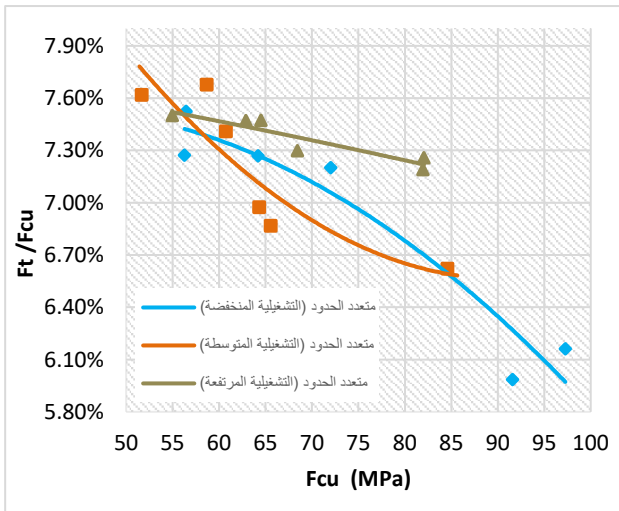
$$y = -0.0005x^2 + 0.0389x + 6.7661 \quad (10)$$

وكانت معادلة الانحدار للتشغيلية المتوسطة معادلة (11) من الدرجة الثانية بدرجة الارتباط فوق المتوسط ($R^2 = 0.8205$).

$$y = 0.0017x^2 - 0.2722x + 17.67 \quad (11)$$

وكانت معادلة الانحدار للتشغيلية المرتفعة معادلة (12) من الدرجة الثانية بدرجة الارتباط فوق المتوسط ($R^2 = 0.8303$).

$$y = 0.0002x^2 - 0.0474x + 9.4721 \quad (12)$$



5. المناقشة

في هذا البند سيتم تحليل النتائج تحليلًا إحصائيًا وتحليلها هندسيًا، وهو موضح كالتالي:

1.5 التحليل الإحصائي للنتائج

1.1.5 نسبة الماء إلى الاسمنت W/C

جدول 7: نتائج التحليل الإحصائي لنسبة الماء إلى الاسمنت W/C

المقياس	التشغيلية		
	عالية	متوسطة	منخفضة
الوسط الحسابي \bar{x}	0.397	0.402	0.411
الانحراف المعياري $s.d$	0.0478	0.0478	0.0478
معامل الاختلاف $C.V$	12.033	11.897	11.636

2.1.5 مقاومة الضغط (F_{cu})

جدول 8: نتائج التحليل الإحصائي لمقاومة الضغط

المقياس	التشغيلية		
	عالية	متوسطة	منخفضة
الوسط الحسابي \bar{x} (MPa)	64.04	63.43	67.68
الانحراف المعياري $s.d$ (MPa)	10.36	12.13	14.59
معامل الاختلاف $C.V$	16.17	19.12	21.55

3.1.5 مقاومة الشد (F_t)

جدول 9: نتائج التحليل الإحصائي لمقاومة الشد

المقياس	التشغيلية		
	عالية	متوسطة	منخفضة
الوسط الحسابي \bar{x} (MPa)	4.853	4.503	4.457
الانحراف المعياري $s.d$ (MPa)	0.666	0.606	0.774
معامل الاختلاف $C.V$	13.734	13.448	17.358

4.1.5 النسبة المئوية بين مقاومة الشد إلى مقاومة الضغط (F_t/F_{cu})

جدول 10: نتائج التحليل الإحصائي للنسبة المئوية بين مقاومة الشد إلى مقاومة الضغط

المقياس	التشغيلية		
	عالية	متوسطة	منخفضة
الوسط الحسابي \bar{x}	7.384	7.191	7.235
الانحراف المعياري $s.d$	0.132	0.435	0.654
معامل الاختلاف $C.V$	1.793	6.043	9.038

من النتائج في الجداول السابقة يتضح أن نسبة الماء إلى الاسمنت (W/C) تكون أكثر تجانس عند التشغيلية الأقل، بينما مقاومة الضغط ومقاومة الشد ونسبة مقاومة الشد إلى مقاومة الضغط تكون أكثر تجانس عند التشغيلية الأعلى (تقريبًا).

شكل 10: يوضح العلاقة بين مقاومة الضغط (F_{cu}) والنسبة بين مقاومة الشد إلى مقاومة الضغط (F_t/F_{cu}) عند جميع التشغيليات (المنخفضة، المتوسطة والمرتفعة)

يتضح من (شكل 10) أن النسبة بين مقاومة الشد إلى مقاومة الضغط تقل كلما زادت مقاومة الضغط عند التشغيلية المنخفضة، حيث كان مقدار النقص في هذه النسبة في البداية بشكل أكبر ثم أصبحت النقص أقل عند مقاومة ضغط أكبر من (67MPa).

وعند التشغيلية المتوسطة كانت النسبة تقل كلما زادت مقاومة الضغط، حيث كان مقدار النقص في هذه النسبة في البداية بشكل أكبر ثم أصبحت النقص أقل بحيث أصبح تقريبًا قيمة ثابتة عند مقاومة ضغط أكبر من (78MPa).

وعند التشغيلية المرتفعة كانت النسبة تقل كلما زادت مقاومة الضغط، حيث كان مقدار النقص في هذه النسبة في البداية بشكل أكبر ثم أصبحت النقص أقل عند مقاومة ضغط أكبر من (74MPa).

4.11 العلاقة بين مقاومة الشد والنسبة بين مقاومة الشد إلى مقاومة الضغط

تم رسم العلاقة بين مقاومة الشد والنسبة بين مقاومة الشد إلى مقاومة الضغط عند التشغيليات الثلاثي (المنخفضة، المتوسطة والمرتفعة). حيث كانت معادلة الانحدار للتشغيلية المنخفضة معادلة (13) من الدرجة الثانية بدرجة ارتباط فوق المتوسطة ($R^2 = 0.7443$).

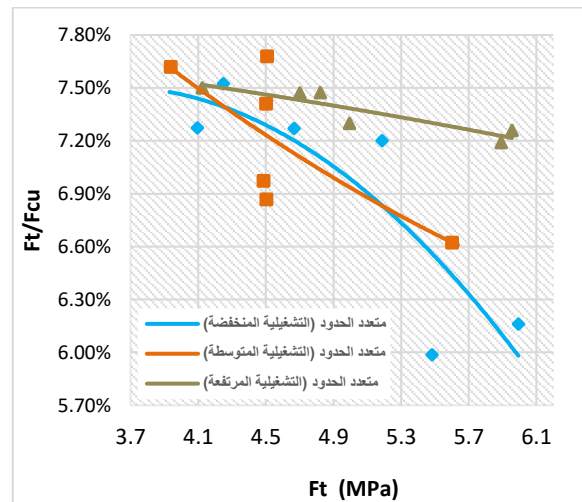
$$y = -0.2654x^2 + 1.9087x + 4.0751 \quad (13)$$

وكانت معادلة الانحدار للتشغيلية المتوسطة معادلة (14) من الدرجة الثانية بدرجة الارتباط متوسط ($R^2 = 0.5363$).

$$y = 0.0728x^2 - 1.2882x + 11.557 \quad (14)$$

وكانت معادلة الانحدار للتشغيلية المرتفعة معادلة (15) من الدرجة الثانية بدرجة الارتباط فوق المتوسط ($R^2 = 0.8143$).

$$y = -0.012x^2 - 0.0438x + 7.9022 \quad (15)$$



شكل 11: يوضح العلاقة بين مقاومة الشد (F_t) والنسبة بين مقاومة الشد إلى مقاومة الضغط (F_t/F_{cu}) عند جميع التشغيليات (منخفضة، متوسطة ومرتفعة)

2.5 التحليل الهندسي للنتائج

يتضح من المخططات السابقة أن مقاومة الشد تزداد كلما ازدادت مقاومة الضغط عند كل من التشغيلية المنخفضة والمتوسطة والمرتفعة بنفس العلاقة تقريباً وبدرجة عالية من الارتباط.

كما يتضح ان مقدار الزيادة في مقاومة الشد تقل كلما ازدادت مقاومة الضغط، ففي التشغيلية المنخفضة كانت نسبة الزيادة تقل بمقدار أبطأ عند مقاومة ضغط أقل من (70MPa)؛ ثم تقل بمقدار أكبر بعد هذه القيمة، بينما في كل من التشغيليتين المتوسطة والعالية فإن مقدار الزيادة في مقاومة الشد تقل بشكل كبير عند مقاومة الضغط الأقل من (70MPa) ثم يمكن معدل النقصان أقل بعد هذه القيمة.

3.5 استخدام النتائج

يتم استخدام المخططات السابقة في تقدير مقدار مقاومة الشد كنسبة من مقاومة الضغط عند التشغيليات المختلفة، حيث يمكن الاستفادة من هذه القيمة المقدرة لمقاومة الشد في تصميم العناصر الانشائية.

عند حساب مقاومة الضغط للخلطة الخرسانية، يتم الدخول لأحد المخططات السابقة -حسب تشغيلية الخلطة- في المحور الأفقي ثم يتم عمل خط رأسي حتى يتقاطع مع الانحدار ثم يتم عمل خط أفقي ليتقاطع مع المحور الرأسي عند مقاومة الشد المقدرة.

6. الاستنتاجات

1. مقاومة الضغط تزداد كلما قلت نسبة الماء إلى الإسمنت عند جميع التشغيليات.
2. مقاومة الشد تزداد كلما قلت نسبة الماء إلى الإسمنت عند جميع التشغيليات، ولكن عند التشغيلية المنخفضة كانت مقاومة الشد تقل كلما قلت نسبة الماء إلى الإسمنت حتى نسبة (W/C = 0.45) ثم تبدأ في الإزدياد عند النسبة الأقل من (W/C = 0.45).
3. مقاومة الشد تزداد كلما ازدادت مقاومة الضغط عند جميع التشغيليات.
4. مقاومة الشد تتراوح بين 6.0% إلى 7.5% من مقاومة الضغط عند التشغيلية المنخفضة، بينما تتراوح بين 6.5% إلى 7.8% من مقاومة الضغط عند التشغيلية المتوسطة، وكانت هذه النسبة تتراوح بين 7.2% إلى 7.5% من مقاومة الضغط عند التشغيلية المرتفعة.
5. مقدار الزيادة في مقاومة الشد يقل كلما زادت مقاومة الضغط عند جميع التشغيليات، ويكون أقل تأثيراً كلما زادت التشغيلية.
6. مقاومة الضغط والشد تكون أكثر تأثيراً (أي أكثر اختلاف) كلما قلت التشغيلية، وبالتالي تكون متجانسة أكثر عند التشغيلية الأعلى.
7. كلما زادت التشغيلية قل معامل الاختلاف لكل من مقاومة الشد ومقاومة الضغط ونسبة مقاومة الشد إلى مقاومة الضغط أي أنّ النتائج تكون أكثر تجانس.
8. جميع المنحنيات ذات درجة ارتباط عالية أكثر من 0.7.
9. يمكن الاستعانة بالمخططات السابقة للتنبؤ بقيمة مقاومة الشد كنسبة من مقاومة الضغط عند المقاومات العالية وعند تشغيليات مختلفة.

10. يمكن الاستفادة من مقاومة الشد المستنبطة من المخططات السابقة في تصميم العناصر الإنشائية المعرضة لقوى شد، مع عمل اختبارات كافية للتأكد من مدى مطابقتها تصميم الخلطة الخرسانية سواء لمقاومة الضغط أو مقاومة الشد.

7. التوصيات

1. يوصى باستخدام خلطات ذات محتوى مائي منخفض وتعويضه بإحدى الإضافات لتحسين قابلية تشغيل الخرسانة، للحصول على مقاومة اعلا من الضغط أو الشد.
2. استخدام أنواع أخرى من ركام عالي الجودة، حيث أنّ الركام هو العنصر الفعال في مقومة الخلطة الخرسانية لكل من مقاومة الضغط ومقاومة الشد وزيادة قابلية التشغيل وبالتالي تقليل كمية المياه المطلوبة في الخلطة.
3. استخدام أنواع أخرى من الملدنات الفائقة ومعرفت مدى تأثيرها في زيادة التشغيلية وخفض المحتوى المائي وبالتالي زيادة ملحوظة في كل من مقاومة الضغط والشد.
4. استخدام ألياف معدنية أو بوليمر في الخلطة الخرسانية، وهذا يساعد في تحسين مقاومة الشد للخرسانة، مع حساب مدى تأثير مقاومة الضغط نتيجة إضافة هذه المواد إلى الخلطة.
5. استخدام الركام ذو مقاس اعتباري صغير، يمكن أن يساعد حجم الركام في تحسين مقاومة الشد للخرسانة وذلك بسبب زيادة قوة الالتصاق بين جزيئات الركام بسبب زيادة المساحة السطحية وبالتالي صعوبة فصلها.
6. استخدام تقنية تصنيع مناسبة، فطريقة الخلط المناسبة وطريقة النقل والمناولة والصب والدمك والمعالجة كلها عوامل تؤثر في جودة الخرسانة ومقاومتها للضغط والشد.

8. الاختصارات

جدول 11: الاختصارات في هذا البحث

الاختصار	التعريف
W/C	نسبة الماء إلى الاسمنت
Fcu	مقاومة الضغط
Ft	مقاومة الشد
Ft/Fcu	النسبة بين مقاومة الشد الى مقاومة الضغط
R ²	درجة الارتباط

9. المراجع

- [1]- غنيم، أحمد، و غنيم، محمد. (2023). "الخرسانة: علم وتكنولوجيا"، القاهرة، مصر، دار النشر للجامعات.
- [2]- عبد الرحمن عبد المنعم ومحمد عبد السلام، "الخرسانة عالية الأداء"، دار المعرفة الجامعية، 2016.
- [3]- American Concrete Institute. (1993). "Tensile Strength of High-Strength Concrete". ACI Journal, 90(1), 35-42.
- [4]- Malhotra, V. M., & Karino, I. (1995). "Influence of water-to-cement ratio on the tensile strength of high-strength concrete". Cement and Concrete Research, 25(6), 1173-1180.
- [5]- Al-Mansoori, A., Al-Jabri, M., & Alawadhi, S. (2007). "Effect of aggregate size on the tensile strength of high strength concrete". Construction and Building Materials, 22(3), 599-603.
- [6]- Al-Jabri, M., Alawadhi, S., & Mansour, A. (2010). "Effect of workability on tensile strength of high-strength concrete". Cement and Concrete Composites, 32(3), 271-275.

- artificial neural networks. *Materials and Structures*, 51(1), 32-44.
- [11]- British Standard Institution. (1996). Specification for Portland cement. BS 12:1996. British Standards Institution.
- [12]- المواصفات القياسية الليبية. (1989). اختبار الماء للخرسانة. رقم 302 لسنة 1989 المواصفات القياسية الليبية.
- [13]- British Standard Institution. (1991). Specification for aggregates for concrete. BS 812:1991. British Standards Institution.
- [14]- British Standard Institution. (1992). Specification for aggregates from natural sources for concrete. BS 882:1992. British Standards Institution.
- [7]- Bentur, A., & Bentur, N. (2005). "Correlation between mechanical properties of high strength concrete". *ACI Materials Journal*, 102(1), 11-16.
- [8]- Bae, J., Kim, S.H., & Park, J.W. (2015). "Correlation between tensile strength and compressive strength of high-strength concrete reinforced with steel fibers". *Cement and Concrete Composites*, 54, 123-130.
- [9]- Kumar, S., & Das, S. K. (2017). "Effect of fly ash and blast furnace slag on compressive and tensile strength of high performance concrete". *Construction and Building Materials*, 149, 620-629
- [10]- Ashour, A., Al-Khodari, W., & Ismail, A. F. (2018). "Predicting the tensile strength of high-strength concrete using