

دراسة تأثير السيليكا وألياف البولي بروبيلين على خواص الخرسانة ذاتية الدمك عالية المقاومة

عائشة جمعة جبريل، نوري محمد الباشا، وهبة أحمد الفاندي

قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة صبراتة، ليبيا

Email: aisha.j@eng.sabu.edu.ly

Received 30 May 2025; Revised 8 August 2025; Accepted 21 September 2025; Published 10 November 2025

ABSTRACT

This study aims to evaluate the effect of partially replacing cement with silica fume and incorporating polypropylene fibres on the fresh and hardened properties of high-strength self-compacting concrete (SCC). Several experimental concrete mixes were prepared with different proportions of silica fume (0%, 8%) and polypropylene fibres (0%, 0.2%, 0.35%, 0.5%), along with the use of a high-range water-reducing admixture to enhance workability while maintaining a low water-to-cement ratio. The study included the assessment of the fresh properties of SCC using slump flow, T50 flow time, L-box, and V-funnel tests, in addition to compressive strength tests at 7, 28, and 56 days of curing.

The results indicated that replacing 8% of cement with silica fume improved compressive strength, increased concrete density, and reduced porosity. Moreover, adding polypropylene fibers at rates of 0.2%–0.35% enhanced compressive strength while reducing plastic shrinkage cracking. However, increasing the fibre content to 0.5% negatively affected workability and compressive strength due to increased void content within the mix.

The study concluded that combining silica fume and polypropylene fibres at moderate rates, while properly adjusting the high-range water-reducing admixture content, improves the performance of high-strength SCC. It is recommended to adopt such mixes in structures requiring both high compressive strength and excellent workability.

KEYWORDS: fibres, polypropylene, self-compacting concrete, silica, additives.

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير استبدال السيليكا وألياف البولي بروبيلين على الخصائص الطازجة والمتصلدة للخرسانة ذاتية الدمك (SCC) عالية المقاومة. شملت الدراسة إعداد عدة خلطات خرسانية، استخدمت فيها نسب مختلفة من السيليكا وألياف البولي بروبيلين، مع الحفاظ على نسبة ماء إلى إسمنت ثابتة. تم تقييم الأداء الطازج باستخدام اختبارات الهبوط (Slump Flow)، واختبار زمن التدفق T50، واختبار لزوجة V-Funnel، واختبار المرور بين العوائق L-Box، واختبار قدرة العبور PJ. كما تم دراسة مقاومة الضغط لعينات قياسية (150 مم × 150 مم × 150 مم) بعد 7 و28 و56 يوماً من المعالجة.

أظهرت النتائج أن استبدال 8% من الإسمنت بالسيليكا ساهم في تحسين مقاومة الضغط وزيادة الكثافة وتقليل المسامية. كما أظهرت النتائج أن إضافة ألياف البولي بروبيلين بنسبة (0.2%–0.35%) عززت مقاومة الضغط مع الحد من تشققات الانكماش. إلا أن زيادة نسبة الألياف إلى 0.5% أثرت سلباً على قابلية التشغيل ومقاومة الضغط بسبب زيادة الفراغات في الخلطة.

خلصت الدراسة إلى أن الجمع بين السيليكا وألياف البولي بروبيلين بنسب معتدلة، مع ضبط محتوى الملدن الفائق، يساهم في تحسين أداء الخرسانة ذاتية الدمك عالية المقاومة، ويوصى باستخدام هذه الخلطات في المنشآت ذات المتطلبات الخاصة من مقاومة عالية وتشغيلية ممتازة.

الكلمات المفتاحية: ألياف، بولي بروبيلين، خرسانة ذاتية دمك، سيليكا، إضافات.

المقدمة

تتعرض المنشآت الخرسانية لظروف تشغيلية وبيئية متعددة تتطلب استخدام خرسانة ذات قدرة عالية على التحمل والديمومة لضمان سلامة واستدامة المنشأ. وفي المنشآت الكبرى التي تحتاج إلى خرسانة عالية الأداء من حيث التشغيلية والمقاومة، يُعد تحقيق هذه المتطلبات تحدياً تقنياً، إلا أنه أصبح ممكناً بفضل التطور السريع في تكنولوجيا الخرسانة، الذي أتاح للمهندسين والباحثين إنتاج أنواع متنوعة من الخلطات الخرسانية لتلبية متطلبات كل مشروع على حدة. وتُصنف الخرسانة على أنها عالية المقاومة (High Strength Concrete - HSC) عندما تبلغ مقاومتها للضغط 40Mpa أو أكثر [2،1].

تم تطوير HSC لتلبية الحاجة إلى خرسانة قادرة على تحمل أحمال كبيرة دون التأثير على ديمومتها أو صلابتها، بالإضافة إلى تقليل أبعاد المقاطع الخرسانية وتحمل البيئات القاسية، مثل المنشآت البحرية [3]. كما ساهمت الحاجة إلى تسهيل عملية الصب في العناصر المعمارية المعقدة والمسلحة بكثافة، والتي تتطلب مواد عالية الجودة وعملاً ماهراً، في تطوير الخرسانة ذاتية الدمك (Self-Compacting Concrete - SCC).

يتطلب إنتاج هذا النوع من الخرسانة استخدام نسبة منخفضة من الماء إلى المواد الإسمنتية، مما يؤدي إلى تقليل النفاذية، وهو عامل مهم في تحسين ديمومتها. ونظراً للعلاقة المباشرة بين نسبة الماء والتشغيلية، لا سيما في SCC التي تتطلب تشغيلية عالية جداً، يُستخدم الملدن الفائق (Superplasticizer) لتقليل كمية الماء دون التأثير السلبي على التشغيلية. إلا أن هذا وحده لا يضمن مقاومة عالية، مما يستدعي استخدام محتوى إسمنتي مرتفع. ومع ذلك، فإن الارتفاع المفرط في نسبة الأسمنت يؤدي إلى زيادة حرارة التفاعل واحتمالية ظهور التشققات، مما يستوجب استبدال جزء من الأسمنت بمواد مضافة مثل السيليكا الدقيقة (Micro Silica - SF) أو ألياف البولي بروبيلين (Polypropylene Fibers - PF) أو مزيج منهما [4].

تُعد صعوبة توفير المواد الخام عالية الجودة اللازمة لإنتاج SCC عالية المقاومة من أبرز التحديات، وهو ما يؤدي إلى ارتفاع تكلفة الإنتاج. كما أن هذا النوع من الخرسانة يتطلب كميات كبيرة من المواد الناعمة لتحقيق خاصيتي الانسيابية والاستواء الذاتي [5]. بالإضافة إلى ذلك، فإن التأثير البيئي السلبي الناتج عن إنتاج الأسمنت البورتلاندي، إلى جانب استنزاف الموارد الطبيعية، يمثلان تحدياً إضافياً في هذا المجال [3،1].

تهدف هذه الدراسة إلى الإسهام في تطوير خرسانة مستدامة وعالية الجودة، من خلال دراسة تجريبية لإنتاج SCC عالية المقاومة باستخدام مواد محلية، وتحليل تأثير هذه المواد على الخصائص الطازجة والمتصلبة للخرسانة. ويساهم البحث المستمر في هذا المجال في تحسين أداء (High Strength Self-Compacting Concrete- HSSCC)، مما يعزز من استدامة المنشآت وطول عمرها. وقد بينت الدراسات السابقة أن HSSCC تُظهر مقاومة عالية للضغوط والإجهادات المختلفة، إلا أن إنتاجها يتطلب مواد أولية ذات جودة مرتفعة وعمليات تصنيع دقيقة، إلى جانب ضرورة مراقبة وتحليل خصائصها بشكل دوري [6،1].

تناولت دراسات عدة تأثير استبدال الإسمنت بنسب مختلفة من SF والرماد المتطاير (Fly Ash - FA)، مع إضافة ألياف زجاجية بنسبة تتراوح بين 0.1% و 0.4%، بهدف تحسين مقاومة الضغط والشد والانحناء. أظهرت النتائج أن أفضل أداء سُجِّل عند استخدام 5% من SF و 10% من FA، مع نسبة ألياف زجاجية 0.4%، حيث تحسنت مقاومة الضغط والشد بشكل ملحوظ، ووثقت أعلى مقاومة شد بعد 28 يومًا [7].

وفي دراسة أخرى، تم استخدام SF و FA لتحسين الخواص الميكانيكية لـ HSSCC، وأظهرت النتائج أن استبدال 15% من الأسمنت بـ SF رفع مقاومة الضغط بنسبة 40% مقارنة بـ FA، ويُعزى ذلك إلى التفاعل البوزولاني السريع للسيليكا الدقيقة وتكوين مركب C-S-H، بينما أظهرت أن FA يعطي مقاومة ضغط منخفضة نسبيًا في الأعمار المبكرة نتيجة لتفاعلها البوزولاني البطيء [8].

كذلك، تم استبدال الإسمنت بمسحوق الرخام بنسبة 4% إلى 16%، مع إضافة ألياف بولي بروبيلين بنسبة 0.1% إلى 0.4%. وأظهرت النتائج تحسُّنًا في مقاومة الشد بنسبة 16.92% والانحناء بنسبة 11.36% عند أعلى نسبة لألياف PF، إلا أن التشغيلية انخفضت عند هذه النسبة بسبب تراجع قابلية الدمك [9].

من جانب آخر، تم تحسين نسبة الرمل إلى الركام الكلي ضمن مدى 0.35–0.45 لتحقيق أقل مسامية وأعلى مقاومة ممكنة، وكانت النسبة المثلى $r = 0.40$ ، حيث سجلت أعلى مقاومة عند 28 يومًا. كما أدى استخدام الملدن الفائق والسيليكا الدقيقة إلى تقليل استهلاك الإسمنت إلى 360 كغم/م³، مع تحسين المقاومة والكثافة، وتقليل المسامية بنسبة 25% [10].

تُظهر PF قدرة على تقليل التشققات الناتجة عن الانكماش الحراري والجفاف، في حين تُعد SF مادة بوزولانية فعالة تساهم في رفع مقاومة الضغط. وعلى الرغم من الفوائد الفردية لكل من PF و SF، فإن تأثير استخدامهما معًا في خلطة واحدة لا يزال غير واضح تمامًا. إذ تفتقر الدراسات الحالية إلى تحليل مشترك ومتكامل لمدى تأثير الجمع بين هاتين المادتين على الخصائص الأساسية لـ HSSCC، مثل مقاومة الضغط وقابلية التشغيل. كما لا تزال هناك حاجة إلى استكشاف كيفية تحقيق توازن مثالي بين محتوى PF ونسبة SF بما يضمن أداءً متكاملًا ومستدامًا للخرسانة.

المنهجية

تم استخدام الأسمنت البورتلاندي العادي في إنتاج الخرسانة ذاتية الدمك، مع رمل طبيعي ناعم بوزن نوعي 2.65 ونسبة امتصاص تبلغ 1%. كما تم استخدام ركام جيد التدرج بمقاس اعتباري أكبر 20 مم.

تم أيضاً استخدام نوعين من الملدنات الاول ملدن فائق high performance hyper for self-compacting concrete plasticizer Agel اسمه التجاري reduction اسمه التجاري Plastocrete N وهو اضافة سائلة للخرسانة ذاتية الدمك مطابقة للمواصفة-ASTM C 494 type F [11]، والثاني ملدن فائق مخفض للمحتوى المائي-Superplastizer water وهو اضافة سائلة مطابقة للمواصفة-ASTM C 494 type A [12]، كما استخدم نوعين من المضافات المعدنية في هذه الدراسة، الأول هو سيكاكريت Sikacrete HD [13] وهي اضافة تعتمد على SF الدقيقة وتوصي المواصفة بخلطها مع المكونات الجافة للخرسانة قبل إضافة الماء، ويجب أن يكون الحد الأدنى لزمن الخلط بعد إضافة الماء 90 ثانية للسماح بتوزيع الكامل للمكونات، والثاني هو ألياف البولي بروبيلين PF [14].

تم تقسيم البرنامج العملي إلى قسمين، اعتمد القسم الأول على تنفيذ خلطات تجريبية للوصول إلى نسب الخلط المناسبة والتي تعطي خرسانة ذاتية الدمك مطابقة لتوصيات المنظمة الأوروبية EFNARC بشرط الحصول على مقاومة أعلى من 40Mpa، أما القسم الثاني تم اعتماد فكرة استخدام نوعين من الملدنات الأول superplasticizer type A وقد تم اختياره تحديداً بسبب نجاحه في انتاج خرسانة ذاتية الدمك بنسبة ماء منخفضة بناء على تجارب معملية [15]، والسبب الرئيسي لاستخدام النوعين هو أن النوع الأول سيعمل على تقليل كمية الماء في الخلطة مع الحفاظ على الانسيابية العالية، أما النوع الثاني فسيعمل على الحفاظ على تجانس الخلطة وتماسكها، وقد تم التأكد من نشرة المصنع عن امكانية استخدام النوعين معاً، وقد تم اعتماد النسب المذكورة في الجدول (1).

الجدول 1: نسب وأوزان الخلط للمتر المكعب.

PSCC2	PSCC1	S.SCC	0.5PF	0.35PF	0.2PF	R.SCC	
460	460	460	500	500	500	500	الاسمنت (كجم/م ³)
40	40	40	0	0	0	0	سيكاكريت (كجم/م ³)
1	1	0	2.5	1.75	1	0	الالياف (كجم/م ³)
190	190	190	190	190	190	190	ماء (كجم/م ³)
672	672	672	672	672	672	672	ركام ناعم (كجم/م ³)
728	728	728	728	728	728	728	ركام خشن (كجم/م ³)
2	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	ملدن فائق (Technohyper %)
3.5	3.5	3.5	0.6	0.6	0.6	0.6	ملدن فائق (Plastocrete %) (N %)
0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	نسبة (W/C)
2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	نسبة (A/C)
0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	نسبة (F/A)

حيث:

R.SCC: تمثل الخلطة المرجعية.

0.2PF: تمثل الخلطة التي تحتوي على نسبة 0.2% من PF ونسبة 1.8% ملدن TECH. من وزن المواد الاسمنتية ونسبة 0.6% من الملدن PLASTO.

0.35PF: تمثل الخلطة التي تحتوي على نسبة 0.35% من PF ونسبة 1.8% ملدن TECH. من وزن المواد الاسمنتية ونسبة 0.6% من الملدن PLASTO.

0.5PF: تمثل الخلطة التي تحتوي على نسبة 0.5% من PF ونسبة 1.8% ملدن TECH. من وزن المواد الاسمنتية ونسبة 0.6% من الملدن PLASTO.

S.SCC: تمثل خلطة تم فيها استبدال الاسمنت بنسبة 8% من SF، والتي تم زيادة نسبة الملدن PLASTO. فيها إلى 3.5% للحصول على التشغيلية المناسبة.

PSCC1: تمثل الخلطة التي تحتوي على مزيج من SF ونسبة 0.2% من PF.

PSCC2: تمثل الخلطة التي تحتوي على مزيج من SF ونسبة 0.2% من PF، والتي تم فيها تغيير نسبة الملدن TECH. إلى 2%.

أولاً: اختبارات الخرسانة في الحالة اللدنة

تم اجراء الاختبارات حسب توصيات الجمعية الأوروبية EFNARC,2005 [16]، بالنسبة لخاصية الانتشار Slump Flow تشير النتائج الموضحة في الجدول (2) أن خلطة R.SCC اقتربت من الحد الأعلى لتصنيف SF2 والذي توصي المنظمة الأوروبية EFNARC بأن الخرسانة التي تحقق خصائص هذه الفئة هي مناسبة للاستخدام في التطبيقات الشائعة مثل الحوائط والأعمدة، وذلك لأن الخلطة المرجعية تم تصميمها بحيث تلبى احتياجات أغلب القطاعات الخرسانية المسلحة وقد حققت ذلك حيث أظهرت تدفقاً سريعاً أقل من 5 ثوانٍ، إضافة PF بنسب 0.2%، 0.35%، 0.5% تؤدي إلى انخفاض ملحوظ في قطر الهبوط، الخلطة ذات 0.2% من PF بقطر 600 مم كانت الأقرب إلى الخلطة المرجعية، مما يشير إلى أن هذه النسبة تؤثر بشكل معتدل على التدفق، عند نسبة 0.5% PF، انخفض قطر الهبوط إلى 385 مم، وهو أقل من الحد الأدنى الذي توصي به المنظمة الأوروبية 550 مم، مما يعني تدهوراً كبيراً في قدرة الخرسانة على الانسياب الذاتي.

الجدول 2: نتائج الاختبارات في الحالة اللدنة.

PSCC2	PSCC1	S.SCC	0.5PF	0.35PF	0.2PF	R.SCC	
620	600	600	385	500	600	720	الاختبار قطر الهبوط (مم) EFNARC المواصفة SF1 550-650 (mm) SF2 660-750 (mm) SF3 760 – 800 mm
5.57	4.87	4.72	توقف التدفق عند 9.15 ثانية	5.47	6.59	3.03	زمن عند القطر 50 مم EFNARC المواصفة 2-5 Sec
3	2.75	1.5	احتجاز	3.5	3	0	اختبار الحلقة جي(مم) EFNARC المواصفة 0-10 mm
7.22	5.4	7.50	لا يوجد تدفق	5.70	5.28	9.37	اختبار القمع في EFNARC المواصفة 6- 12 Sec
0.7	0.7	0.7	لا يوجد تدفق	0.5	0.2	1	اختبار الصندوق L EFNARC المواصفة 0.8- 1.0
				نضح			ملاحظات

جميع الخلطات التي تحتوي على PF أظهرت زمن انسياب أعلى من الحدود المقبولة 2-5 ثوان، مما يدل على زيادة لزوجة الخلطة وصعوبة تدفقها في القطاعات الأفقية، عند نسبة 0.5% PF استغرق الانسياب 9.15 ثانية قبل أن يتوقف، مما يشير إلى تأثير كبير للـ PF على زيادة المقاومة الداخلية للحركة.

إضافة الألياف بنسبة (0.2، 0.35، 0.5) تعمل على زيادة لزوجة الخلطة وهذا واضح من زمن الانسياب حيث أن جميع خلطات التي تحتوي على ألياف كان زمن الانسياب لها أعلى من حدود المواصفة فعند إضافتها بنسب (0.2%، 0.35%، 0.5%) توقفت الخرسانة عن الانسياب بعد مدة (6.59، 5.47، 9.15)، وقد لوحظ أن إضافة السيليكا يحسن من زمن انسياب الخلطة رغم عدم تأثير قطر الهبوط حيث كانت القيمة 600 مم حتى بعد إضافة SF.

بالنسبة لقابلية العبور Passing Ability - PJ، فإن القيم تراوحت بين 0 ملم R.SCC و 3.5 ملم لنسبة 0.35% من PF وعند نسبة 0.5% من PF حدث احتجاز كامل للخلطة كما موضح في الشكل (1) و الشكل (2)، في حين توصي المواصفة الأوروبية بقيم بين 0-10 ملم، بالتالي نستنتج أن إضافة PF إلى الخلطات تزيد من اللزوجة، مما قد يقلل من قدرة الخلطة على المرور بين القضبان بسبب زيادة التماسك بين جزيئات الركام، لكن نظرًا لأن قيمة الاحتجاز لا تزال ضمن الحد المسموح به، لا يشكل ذلك مشكلة كبيرة في تدفق الخرسانة.

وعند إضافة السيليكا واستبدالها بالأسمنت بنسبة 8% (S.SCC) أعطت قيمة أعلى مقارنة بالخلطة المرجعية وهي 1.5 مما يعني أن السيليكا تعمل على زيادة لزوجة الخلطة التي تؤدي إلى تقليل قدرة العبور بين القضبان الكثيفة ومع ذلك فإن قيمة الاحتجاز تعتبر صغيرة وهي ضمن الحدود الموصى بها من قبل المنظمة الأوروبية، وعند استخدام نسبة 8% سيليكا و 0.2% ألياف كانت قيمة الاحتجاز 2.75 أي زيادة لزوجة الخلطة بسبب حبيبات السيليكا الناعمة جدا وكذلك إضافة الألياف وهذه القيمة هي نفس القيمة التي أعطتها الخلطة ذات نسبة ألياف 0.35 عند ثبات نسب باقي المكونات، ولم تؤثر زيادة الملدن في الخلطة نفسها على قيمة الاحتجاز بشكل ايجابي فقد زادت قيمة الاحتجاز إلى 3.5 عند نسبة 8% سيليكا و 0.2% ألياف، وقد يعود السبب إلى تبخر الماء بسبب زيادة معدل الإماهة الذي ينتج عنه حرارة وكذلك درجة حرارة الجو عند إجراء الاختبار.

لهذا من الملاحظات السابقة نستنتج أن SF تحسن من التجانس والاستقرار، لكنها تؤدي إلى زيادة اللزوجة مما قد يقلل من قدرة الخليط على العبور في الحالات التي تتطلب تدفقًا عاليًا، وعند الجمع بين SF و PF، يجب الانتباه إلى النسبة المتوازنة لتجنب ارتفاع لزوجة الخليط بشكل كبير مما قد يؤدي إلى مشكلات في التطبيق العملي مثل الاحتجاز أو العجز عن العبور.

تراوحت قيم زمن العبور V-Funnel Time بين 5.28 ثانية عندما كانت نسبة PF 0.2% و 9.37 ثانية للعينة R.SCC، وتوصي المواصفة الأوروبية بقيم بين 6-12 ثانية، والخلطات ذات PF بنسبة 0.5% توقفت عن التدفق تمامًا، مما يشير إلى مشكلة خطيرة في التماسك والانسيابية، ورغم أن انخفاض الزمن يعني زيادة في قابلية الانسياب، ولكن هذا قد يؤدي إلى مشاكل مثل الانفصال الحبيبي أو النضح، حيث أن الزمن أصبح أقل من الحد الأدنى الموصى به 6 ثوان.

هذه النتيجة قد تُشير إلى أن PF تساهم في تحسين الانسياب ولكنها تزيد من احتمالية فقدان الاستقرار في الخليط، فقد أكد [17] زيادة نسبة الألياف الحديدية وكذلك زيادة نسبة الألياف الزجاجية [7] أدت إلى زيادة زمن الانسياب مما يشير إلى أن نوع الألياف المستخدمة له تأثير كبير على خصائص الانسياب واتفق كذلك [18] على أن ألياف البولي بروبيلين تحسن الانسيابية إلى حد ما،

ولكن النسب الزائدة قد تسبب انخفاضاً في الاستقرار، مما يتطلب تحسين محتوى الألياف لتحقيق توازن بين الانسياب والاستقرار، في هذه الدراسة استخدام PF يؤدي إلى تحسين الانسياب و عند إضافة SF إلى الخلطة لوحظ تحسن في قدرة التدفق خاصة في المقاطع الرأسية والضيقة مقارنة بالخلطة الخالية من الإضافات كما موضح في الشكل (3) والشكل (4)، كما أن SF الدقيقة تساعد في تحسين التماسك وزيادة استقرار الخليط، عند إضافة 0.2% ألياف مع SF في الخلطة PSCC1 كانت قيمة زمن الانسياب مشابهة تماماً للخلطة 0.2% PF الخالية من SF، هذا يشير إلى أن إضافة PF مع SF تحسن من قدرة تدفق الخرسانة دون التأثير السلبي على استقرارها.

أدت زيادة كمية الملدن في الخلطة PSCC2 إلى ارتفاع زمن الانسياب، مما يدل على انخفاض قدرة الخلطة على التدفق. ويُعزى هذا الانخفاض إلى تبخر جزء من الماء نتيجة الحرارة المتولدة عن تفاعلات الإماهة، الأمر الذي أثر سلباً على سيولة الخلطة.

انخفضت قابلية المرور في بعض الخلطات، لا سيما عند زيادة نسبة الألياف إلى 0.3%، حيث ظهرت مؤشرات على حدوث انسداد (Blocking) أو توقف كامل للتدفق (No Flow) في اختبار L-Box. ووفقاً لنتائج الاختبار، فإن بعض الخلطات لم تحقق الحد الأدنى الموصى به لقابلية المرور.

ثانياً: اختبار مقاومة الضغط

تم اجراء هذا الاختبار حسب المواصفة [19]، وقد أظهرت المكعبات المختبرة سلوك انهيار نموذجي، كما هو موضح في الشكل (1) والشكل (2).



الشكل (1): شكل الانهيار لبعض عينات خلطات الالياف: الخلطة المرجعية والخلطة 0.2PF.



الشكل (2): شكل الانهيار لبعض عينات خلطات الالياف: الخلطة 0.35PF والخلطة 0.5PF.

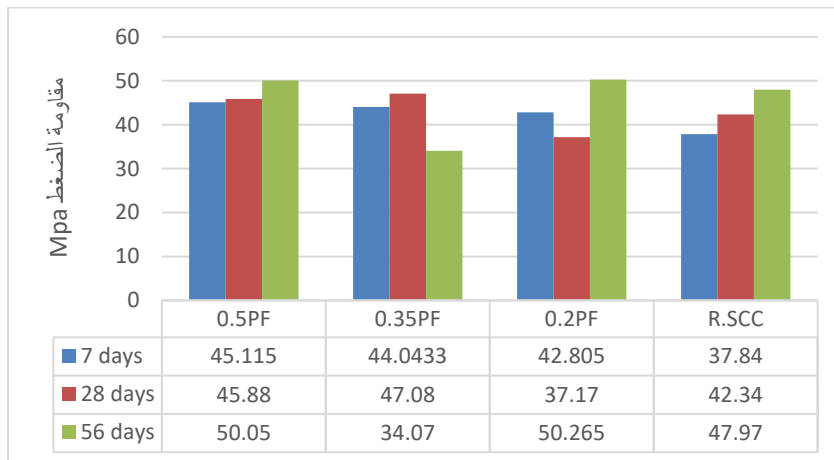


الشكل 3: شكل الانهيار لعينة الخلطة .S.SCC



الشكل 4: شكل الانهيار لبعض عينات الخلطات ذات الاستبدال الثاني في الضغط.

الخلطة R.SCC سجلت مقاومة ضغط جيدة في الأعمار المختلفة كما موضح في الشكل (5)، حيث كانت 37.84 MPa عند 7 أيام، و 42.34 MPa عند 28 يوماً و 47.971 MPa عند 56 يوماً. هذا يشير إلى أن الخرسانة ذاتية الدمك قادرة على التحسن بشكل كبير مع الزمن.



الشكل 5: نتائج مقاومة الضغط بـ MPa لخلطات الألياف في الأعمار 7 و 28 و 56 يوم.

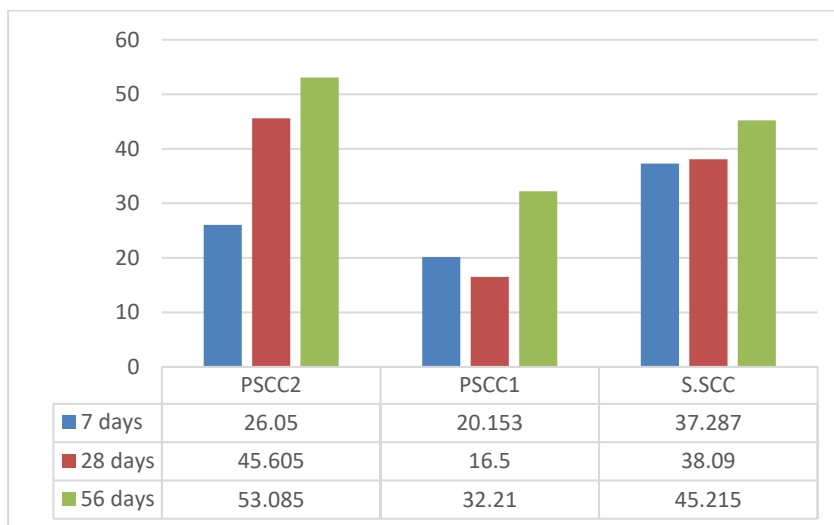
وتشير النتائج إلى أنه عند إضافة PF بنسبة 0.5 PF سجلت أعلى مقاومة ضغط في الأعمار المختلفة 7 أيام، و 28 يوماً، و 56 يوماً مقارنة ببقية الخلطات، حيث وصلت مقاومة الضغط إلى MPa

45.115 عند 7 أيام و 45.88 MPa عند 28 يومًا. ولكن عند 56 يومًا، كان هناك ارتفاع طفيف إلى 50.045 Mpa، وخطوة PF0.35 سجلت مقاومة ضغط أعلى عند 28 يومًا 47.08 Mpa مقارنة ببقية الخلطات، لكنها انخفضت بشكل ملحوظ عند 56 يومًا إلى 34.07 Mpa، وخطوة PF 0.2 أظهرت مقاومة ضغط عالية عند 56 يومًا 50.265 MPa، لكنها أظهرت تذبذبًا بين الأعمار المختلفة. هذه النتيجة تتفق مع ما تم ملاحظته في دراسة [20] حيث كانت مقاومة الضغط في الخلطات التي تحتوي على PF0.5 جيدة في البداية ولكن تراجعت في الخلطات ذات النسبة العالية من PF.

وكذلك أظهرت نتائج دراسة [17] أن إضافة PF، خصوصًا PF الحديدية، كانت تؤدي إلى تحسن ملحوظ في مقاومة الضغط، مقارنة ب PF العضوية، ورغم أن الدراسة الحالية تركز على PF، إلا أن التأثير يظل مماثلًا من حيث تحسين الأداء، إلا أنه قد يكون هناك اختلاف في النتائج بسبب نوع PF المستخدمة. نستنتج أن الألياف وخاصة PF، تلعب دورًا مهمًا في زيادة المقاومة للضغط عن طريق تحسين توزيع المقاومة في الخرسانة وتقليل تأثير التشققات، بينما لوحظ بعض التذبذب في أداء بعض الخلطات خاصة PF 0.35 ويعود السبب إلى تكتل PF أثناء الخلط لكن بشكل عام، PF تحسن المقاومة. وأن مقاومة الضغط تزداد بمرور الوقت في جميع الخلطات، ما يعكس التحسن الطبيعي في مقاومة الخرسانة مع التفاعل المستمر بين الأسمنت والماء، بالإضافة إلى التحسين الناتج عن إضافة المكونات مثل SF و PF.

وأظهرت خلطة S.SCC زيادة تدريجية في مقاومة الضغط مع مرور الوقت، حيث وصلت إلى 37.287 MPa عند 7 أيام و 38.085 MPa عند 28 يومًا، ثم 45.215 MPa عند 56 يومًا، كما هو موضح في الشكل (6)،. هذا يشير إلى تحسن تدريجي في الأداء مع زيادة العمر، وهو أمر متوقع بالنسبة للخرسانة ذاتية الدمك، و SF تعتبر مادة مؤخرة للشك في بداية العمر المبكر للخرسانة.

وقد يكون سبب الأداء الضعيف في بداية الاختبارات هو الزيادة في التماسك الذي يحد من انتشار الحرارة، وبالتالي تأخر عملية الإماهة. ومع مرور الوقت 28 و 56 يومًا، تتحسن SF في الخرسانة مما يؤدي إلى زيادة في المقاومة، أظهرت نتائج بعض الدراسات [21 و 22] أن إضافة SF بنسبة تتراوح بين 5% إلى 10% في الخرسانة ذاتية الدمك كان له تأثير إيجابي على مقاومة الضغط، مما أدى إلى تحسين التحمل الكلي للخرسانة. هذه النتائج تدعم ما تم ملاحظته في هذه الدراسة، حيث تبين أن إضافة SF بنسبة 8% ساهمت في زيادة مقاومة الضغط في الأيام المتقدمة 28 و 56 يومًا.



الشكل 6: نتائج مقاومة الضغط ب Mpa في الأعمار 7 و 28 و 56 يوم للخلطات الثنائية.

الخلاصة والتوصيات

توصلت الدراسة إلى أنه:

1. يمكن تقليل نسبة PF: للحفاظ على انسيابية الخرسانة ومنع الاحتجاز، ويُفضل استخدام نسب منخفضة من $PF \geq 0.2\%$.
2. يمكن إجراء تحسين على مكونات الخلطة: مثل تحسين نسبة الماء إلى الأسمنت أو استخدام مضافات لتحسين اللزوجة وتقليل الاحتكاك الداخلي، ومن المهم جداً استخدام الركام المناسب واختيار تدرج حبيبي يقلل من الاحتجاز ويحسن الانسيابية.
3. الخلطة المرجعية R.SCC: أظهرت أفضل أداء مقارنة بالمعايير الأوروبية، حيث حققت تدفقاً عالياً وقابلية ممتازة للعبور دون مشاكل احتجاز، والخلطات المحتوية على PF أظهرت تدهوراً تدريجياً في الأداء مع زيادة نسبة PF، خاصة عند النسبة 0.5% ، حيث توقفت الخلطة عن التدفق تماماً بسبب الاحتجاز.
4. الخلطات PS1 و PS2 و S.SCC: قدمت أداءً متوسطاً ومرضياً لكنها تجاوزت قليلاً بعض المعايير مثل زمن T50، حيث تقلل الألياف من زمن التدفق في المقاطع الأفقية ولكنها تعمل على زيادة الانسياب في المقاطع الرأسية والضيقة.
5. عند استخدام ألياف بنسب عالية، يمكن تحسين الأداء باستخدام مضافات كيميائية متخصصة Superplasticizers، وينصح باستخدام إضافات معدلة للزوجة لتحسين قدرة الخليط على العبور مع المحافظة على التجانس.
6. كما تحتاج SCC إلى إجراء اختبارات مكثفة لتحديد النسب المثلى للسيليكا و PF بما يتوافق مع الظروف البيئية ومتطلبات المشروع.
7. استبدال 8% من الأسمنت ب SF يُحسن من التجانس والاستقرار ولكنه يُزيد من اللزوجة، وإضافة PF بنسبة 0.2% مع SF تُزيد اللزوجة بدرجة أكبر، مما قد يؤدي إلى انخفاض قدرة الخليط على العبور، PF البولي بروبيلين في هذه الدراسة أظهرت تأثيراً مزدوجاً؛ حيث تحسنت مقاومة الضغط في بعض الخلطات ولكن انخفضت في أخرى بسبب تكتل PF.

وتوصي الدراسة بالآتي:

1. إجراء دراسات إضافية على المدى الطويل (90، 180 يوماً) لدراسة تطور مقاومة الضغط والانكماش والجفاف الذاتي لخرسانة SCC عالية المقاومة المحتوية على السيليكا والألياف.
2. استخدام المواد المتوفرة محلياً من السيليكا وألياف البولي بروبيلين بما يتوافق مع المواصفات القياسية لتقليل الكلفة والاعتماد على استيراد المواد الأجنبية.
3. دعم المشاريع الوطنية لاعتماد خرسانة ذاتية الدمك عالية المقاومة في المنشآت ذات التسليح الكثيف والجسور والأبراج عالية التحمل، لما أظهرته الدراسة من مزايا إنشائية وبيئية لهذه الخلطة.
4. إجراء دراسات مقارنة بين أنواع أخرى من الألياف (الزجاجية، البازلتية) مع ألياف البولي بروبيلين في خرسانة SCC لمعرفة أفضل البدائل المتاحة محلياً.

قائمة الرموز والاختصارات

Abbreviation	Meaning	المعنى
EFNARC	European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems	مواصفة الاتحاد الأوروبي لتقنيات الخرسانة الخاصة
FA	Fly Ash	رماد متطاير
HSC	High Strength Concrete	الخرسانة عالية المقاومة
HSSCC	High Strength Self-Compacting Concrete	خرسانة ذاتية الدمك عالية المقاومة
J-Ring	J-Ring test for ability of passing	اختبار الحلقة — لتقييم قدرة الخرسانة على المرور
L-Box	L-Box test for passing	اختبار الصندوق — L لتحديد قدرة العبور
MPa	Megapascal	وحدة قياس الضغط (ميغا باسكال)
PF	Polypropylene Fibers	ألياف البولي بروبيلين
PSCC1	Mixture containing SF and 0.2% PF	خلطة تحتوي على مزيج من SF ونسبة 0.2% من PF
PSCC2	Mixture containing SF, 0.2% PF, and 2% TECH	خلطة تحتوي على مزيج من SF ونسبة 0.2% من PF وتم فيها تغيير نسبة الملدن TECH إلى 2%
R.SCC	Baseline mixture	الخلطة المرجعية
SF	Silica Fume	غبار السيليكا
SCC	Self-Compacting Concrete	الخرسانة ذاتية الدمك
SP	Superplasticizer	ملدن فائق
S.SCC	Mixture in which cement was replaced by 8% SF, and plasticizer increased to 3.5%	خلطة استبدل فيها الاسمنت بنسبة 8% من SF، وتم زيادة نسبة الملدن PLASTO إلى 3.5%
T50	T50 test for concrete slump time flow at 50mm.	زمن وصول الخرسانة إلى قطر 50 سم أثناء اختبار الهبوط
V-Funnel	V-Funnel test for time flow	اختبار القمع — V لتحديد زمن التدفق
w/c	Water to Cement ratio	نسبة الماء إلى الأسمنت

المراجع

- [1] Jeevetha, T., Vijayashanthi, S., Sivakumar, A. and Singh, N.B. (2021). Evaluation on strength parameters of self-compacting concrete incorporated with carbon and glass fibres, *Materials Today: Proceedings*, 45, 708-712. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.743.
- [2] Jagana, R. and Kumar, C.V. (2017). An experimental analysis of strength properties of high strength concrete using steel fibers, *International Journal of Engineering Sciences and Research Technology*, 6, 308-316.

- [3] Zeyad, A.M., Khan, A.H. and Tayeh, B.A. (2020). Durability and strength characteristics of high-strength concrete incorporated with volcanic pumice powder and polypropylene fibers, *Journal of Materials Research and Technology*, 9, 806-813. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.11.021.
- [4] Inqiad, W. Bin, Siddique, M.S., Alarifi, S.S., Butt, M.J., Najeh, T. and Gamil, Y. (2023). Comparative analysis of various machine learning algorithms to predict 28-day compressive strength of self-compacting concrete, *Heliyon*, 9, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22036.
- [5] Struct, J.C., Ahmad, J., Zhou, Z. and Deifalla, A. (2023). Self-compacting concrete with partially substitution of waste marble: a review, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17, doi: 10.1186/s40069-023-00585-5.
- [6] Uysal, M. and Yilmaz, K. (2011). Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Composites*, 33 (7), 771-776. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.04.005.
- [7] Kalaimani, R., Subha, C., Reymond, D.J. and Kumar, C.V. (2023). Investigation on strength characteristics of self compacting concrete incorporated with AR glass fibers, *E3S Web of Conferences*, 387, 1-15. doi: 10.1051/e3sconf/202338703005.
- [8] Zende, A.A., Momin, A.I.A., Khadiranaikar, R.B., Alsabhan, A.H., Alam, S., Khan, M.A. and Qamar, M.O. (2023). Mechanical properties of high-strength self-compacting concrete, *ACS Omega*, 8. doi: 10.1021/acsomega.3c01204.
- [9] Ali, A., Hussain, Z., Akbar, M., Elahi, A., Bhatti, S., Imran, M., Zhang, P. and Leslie N. (2022). Influence of Marble Powder and Polypropylene Fibers on the Strength and Durability Properties of Self-Compacting Concrete (SCC), *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022. doi: 10.1155/2022/9553382.
- [10] Smirnov, A., Dobshits, L. and Anisimov, S. (2020). Development of high-strength self-compacting concrete with low fineness modulus sand, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 869 (3). doi: 10.1088/1757-899X/869/3/032039.
- [11] Technical data sheet of Technohyper N, website: alsarh.ly/wp-content/uploads/2022/01/TECHNOHYPER-N.pdf.
- [12] Technical data sheet of Plastocrete® -N, website: egypt.sika.com/content/dam/dms/eg01/e/Plastocrete® -N.pdf.
- [13] Technical data sheet of Sikacrete® HD, website: tun.sika.com.
- [14] Technical data sheet of Durafiber 18, website: alsarh.ly/wp-content/uploads/2022/01/DURAFIBER-18.pdf.
- [15] نوري محمد الياسا، عائشة جمعة جبريل: تأثير غيرة الرخام على خصائص الخرسانة ذاتية الدمك. المؤتمر الثاني للعلوم الهندسية والتقنية. 9-1 (2019).
- [16] Specification and guidelines for self-compacting concrete, EFNARC (2005). The European SCC guidelines, May 2005, website: efnarc.org/publications.
- [17] Saba, A.M., Khan, A.H., Akhtar, M.N., Khan, N.A., Rahimian Koloor, S.S., Petru, M. and Radwan, N. (2021). Strength and flexural behavior of steel fiber and silica fume incorporated self-compacting concrete, *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1380-1390. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.03.066.
- [18] Abed, M.A., Fort, J., Naoulo, A. and Essa, A. (2021). Influence of polypropylene and steel fibers on the performance and crack repair of self-compacting concrete, *Materials*, 14. doi: 10.3390/ma14195506.
- [19] British Standards Institution (1983). Testing concrete, (7).

- [20] Vivek, S.S. and Dhinakaran, G. (2017). Fresh and hardened properties of binary blend high strength self-compacting concrete, *Engineering Science and Technology*, 20, 1173-1179. doi: 10.1016/j.jestch.2017.05.003.
- [21] Lisantono, A. and Pratama, Y.P.B. (2020). Effect of silica fume on the compressive strength and modulus elasticity of self-compacting high strength concrete, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 426. doi: 10.1088/1755-1315/426/1/012057.
- [22] Djono, L. and Karolina, R. (2018). The effect of admixture type F and silica fume on high early strength self-compacting concrete, In: proceedings of the 2nd Annual Conference of Engineering and Implementation on Vocational Education (ACEIVE 2018), Indonesia. doi: 10.4108/eai.3-11-2018.2285632.