International Journal of Engineering Research
Sirte University
Faculty of Engineering

IJER@su.edu.ly

Special Issue, Oct. 2022

تزامن تأثير إضافة النانو سيليكا على تحسين بعض الخواص الميكانيكية والفيزيائية للخرسانة عالية المقاومة والخرسانة عالية الأداء

مفتاح محمد سريح[1]، محمد علي كريم[2]

s_sreh@elmergib.edu.ly

1 محاضر بقسم الهندسة المدنية - كلية الهندسة جامعة المرقب، الخمس، ليبيا
2 أستاذ مشارك بقسم الهندسة المدنية - كلية الهندسة جامعة المرقب، الخمس، ليبيا

الملخص

هذا البحث مخصص لدراسة تأثير إضافة النانو سيليكا Nano Silica (NS) كمادة بوزلانية على مقاومة الضغط ونسبة الامتصاص والمسامية للخرسانة عالية المقاومة والخرسانة عالية الأداء، وذلك من خلال إجراء دراسة معملية على ثلاث رتب مختلفة من الخرسانة أولها خرسانة عالية المقاومة 55 ن/مم^2 والثانية والثالثة تمثل خرسانة عالية الأداء 80 ن/مم^2 90 ن/مم^2 بمحتوى اسمنت 350، 450 و600 كجم/م^3 وبنسبة ماء إلى الإسمنت تساوي 0.45، 0.32 و0.26 على التوالي. النسبة المضافة من النانو سيليكا هي 0.5، 1.0، 1.5 و2.0% كنسبة وزنية مضافة من وزن الإسمنت. تم إجراء اختبار مقاومة الضغط على عينات الخلطات المدروسة المغمورة في الماء بعد عمر 1، 3، 7، 28 و180 يوم. وتم إجراء اختبار نسبة الامتصاص والمسامية بعد عمر 180 يوم، وتم مقارنة جميع النتائج بنتائج عينات الخلطات المرجعية التي لا تحتوي على النانو سيليكا. أظهرت النتائج تحسن واضح في مقاومة ضغط العينات التي تحتوي على النانو سيليكا في مختلف الأعمار ومختلف الرتب ويزداد هذا التحسن غالباً مع زيادة نسبة إضافة النانو سيليكا حتى نسبة 1.5% تم يتراجع قليلاً عند نسبة إضافة 2.0%، حيث زادت مقاومة الضغط للخرسانة عالية المقاومة ذات الرتبة 55 ن/مم^2 بنسبة 9.3%، 12.2%، 16.9% و16.0% للخلطات التي تحتوي على 0.5%، 1.0%، 1.5% و2.0% من النانو سيليكا مقارنة مع الخلطة المرجعية. هذا وأن استخدام النانو سيليكا في الخرسانة ذات الرتب المختلفة أظهر بشكل واضح انخفاض في نسبة الامتصاص والمسامية مما يؤكد تحسن البنية الداخلية وبالتالي ارتفاع كفاءة ديمومتها مع الزمن.

كلمات مفتاحية: نانو سيليكا، خرسانة عالية الأداء، مقاومة الضغط، المسامية.

1. المقدمة

تعتبر الخرسانة من أكثر مواد البناء شيوعاً واستخداماً حول العالم، وأصبح التسابق مؤخراً حول كيفية صناعة الخرسانة مع تقليل محتوى الإسمنت باستخدام مواد بديلة. وحيث أنه في الآونة الأخيرة حاز العمل في مجال تقنية النانو على تركيز كبير من قبل الباحثين والأكاديميين في مختلف التخصصات حول العالم، هذا وأن استخدام تقنيات النانو في مجال البناء والتشييد أصبح من ضمن التحديات الكبيرة في القرن الحالي لما له من فوائد ومزايا كثيرة، فإضافة المواد النانو مترية مثل النانو سيليكا (NS) والنانو ألومينا (Nano alumina) ونانو كربونات الكالسيوم (NC) وغيرها إلى الخرسانة كبديل جزئي من الإسمنت لتحسين خواصها والرفع من كفاءتها هو المجال البحثي المسيطر حالياً حول صناعة خرسانة المستقبل.

إضافة المواد البديلة للإسمنت مثل السيليكا فيوم (SF) أو المايكرو سيليكا (MS) والرماد المتطاير (FA) وخبث الأفران

(Slag) إلى الخرسانة يؤدي إلى تحسين خواصها إلى حد ما، وفيما يتعلق بالتأثير الفيزيائي والكيميائي للمايكرو سيليكا فإن استخدامها في الخرسانة يؤدي إلى تحسين خواصها على المدي القريب والبعيد [1-3]. في الوقت الحالي ازداد استخدام الإضافات المعدنية للخرسانة مثل السيليكا فيوم والرماد المتطاير وذلك بسبب تحسينها للخواص التشغيلية والميكانيكية للخرسانة ورفع كفاءة متانتها وديمومتها ودورها في الأثر البيئي [4, 5]. عند مقارنة الاسمنت البورتلاندي العادي مع السيليكا فيوم فتظهر أنها أنعم بمرتين ولها أثر بوزلاني أعلى، ومع ذلك فإن مستوى مقاس حبيباتها (Micro-Level) لا يعطي رؤية كافية حول قدرات المواد المستخدمة في مواد البناء، لذلك يكسب مقاس النانو اهتماماً واسعاً ومتزايداً. وحيث أن الأبحاث المعنية باستخدام مواد مناسبة بمقاس النانو في الخرسانة لازالت قيد الدراسة والبحث، بل وأنها قليلة ونادرة عند استخدامها مع خرسانة عالية المقاومة أو خرسانة عالية الأداء، لذلك جاء بحثنا هذا لتغطية هذا الجانب العلمي المهم .

عادة ما يتم تصنيف المواد النانومترية على أساس أبعادها حيث يتراوح مقاسها ما بين 1 إلى 100 نانو متر وهي تعمل غالباً كمادة مالئة وكمادة بوزلانية داخل الخرسانة وبالتالي تزيد من قوتها وتعزز من مقاومتها [6, 7]. وتعمل النانو سيليكا على تسريع عملية إماهة الإسمنت مع الماء وتحديداً إماهة مركب ثلاثي سيليكات الكالسيوم أحد المركبات الأساسية للإسمنت وذلك بسبب مساحتها السطحية العالية [8]، وعلى نفس المنهاج فالنعومة العالية للنانو سيليكا تزيد من خاصية مليء الفراغات وبالتالي زيادة كثافة الخرسانة وعندها تتحسن قدرة مقاومتها للظروف البيئية المحيطة وترتفع متانتها وتزداد ديمومتها [9-11]. كل ذلك يحدث عند إضافة النانو سيليكا إلى الخرسانة التقليدية بمحتوى اسمنت عادي لا يزيد عن 400 كجم/م^3 ومقاومة ضغط لا تزيد عن 45 ن/مم^2 ، أما عند إضافة النانو سيليكا إلى بعض الأنواع الخاصة من الخرسانة كالخرسانة عالية المقاومة والتي مقاومتها للضغط تكون مساوية أو أعلى من 55 ن/مم^2 [12] والخرسانة عالية الأداء فالنتائج محدودة لذلك فإن دراستنا الحالية هي دراسة معملية تم فيها إجراء دراسة هذا الموضوع.

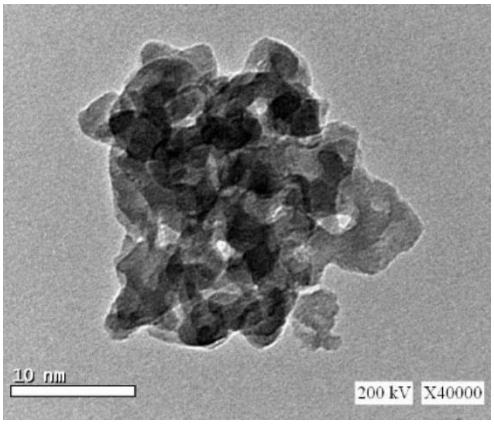
2. الدراسة المعملية

في هذا البحث تم إعداد ثلاث رتب مختلفة من الخرسانة أولها خرسانة عالية المقاومة رتبتها 55 ن/مم^2 والثانية والثالثة تمثل خرسانة عالية الأداء برتب 80 ن/مم^2 و90 ن/مم^2 بمحتوى اسمنت 350، 450 و600 كجم/م^3 وبنسبة ماء إلى الإسمنت تساوي 0.45، 0.32 و0.26 على التوالي، لكل رتبة ثم قياس مقاومة الضغط لعدد 75 مكعب مقاس 10×10×10 سم اختبرت عند عمر 1، 3، 7، 28 و180 يوم من الغمر في الماء. لكل رتبة من الخرسانة تم إعداد 5 خلطات من ضمنها الخلطة المرجعية التي لا تحتوي على النانو سيليكا والأخريات تم فيها إضافة النانو سيليكا بأربعة نسب وزنية مختلفة هي 0.5%، 1.0%، 1.5% و2.0% من وزن الاسمنت. النانو سيليكا تم تعريضها للموجات فوق الصوتية بأسلوب sonication technique ومن ثم استخدم الخلط الميكانيكي لتحضير الخرسانة، تأثير إضافة نسب مختلفة من النانو سيليكا إلى الخرسانة مع محتويات مختلفة من الاسمنت كان من ضمن أهداف الدراسة. ثم إضافة الملدنات الفائقة (superplasticizer) للخلطات للمحافظة على تناسق تشغيليتها، حيث تم إجراء خلطات تجريبية لمختلف الرتب لتحديد جرعة الملدنات الفائقة المطلوبة للمحافظة على أن يكون الهبوط من ضمن القيمة التصميمية المحددة مسبقاً (120-150 ملم).

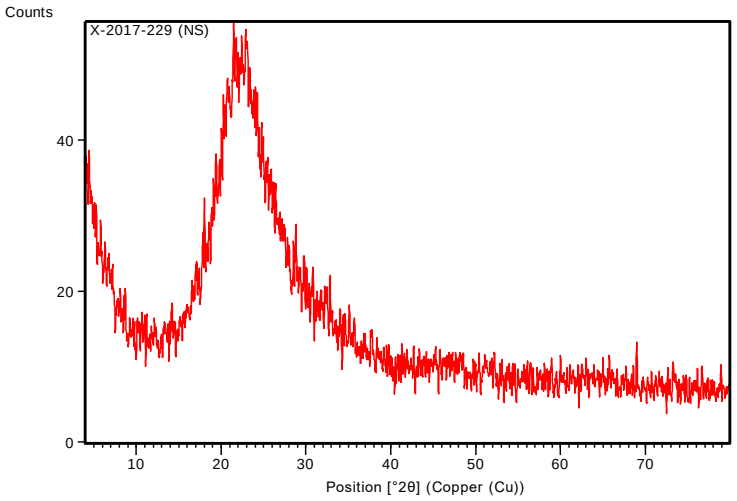
1.2 المواد

في هذه الدراسة تم استخدام اسمنت بورتلاندي عادي CIM I 52.5 N مطابق للمواصفات المصرية ESS 4756-1 واستخدمت سيليكا فيوم من النوع dry-densified بمحتوي سيليكات 93.5% (SiO2)، كما استخدمت الملدنات الفائقة (Polycarboxylate based superplasticizer (SP) بوزن نوعي 1.08. النانو سيليكا المستخدمة NS (Nano-SiO2) تم تصويرها بالماسح الإلكتروني شكل (1) واختبرت بالأشعة السينية (XRD) شكل (2) للتأكد من كونها ذات طبيعة

غير متبلورة (amorphous nature) ويمكنها العمل كمادة بوزلانية، كما تم اختبار التدرج الحبيبي للنانو سيليكا بواسطة Dynamic Light Scattering شكل (3) وتبين أن مقاس حبيباتها يتراوح بين 40-90 نانو متر. الجدول (1) يبين نتائج التركيب الكيميائي لكل من الاسمنت البورتلاندي المستخدم والسيليكا فيوم والنانو سيليكا باستخدام اختبار XRF. الركام الناعم المستخدم هو رمل سيليسي له معامل نعومة يساوي 2.61، والركام الخشن المستخدم هو كسر أحجار الدولوميت تم غسله قبل الخلط وهو بحجم أقصى اسمي 10 ملم، والجدول (2) يبين التدرج الحبيبي والخواص الفيزيائية للركام الناعم والخشن. الماء المستخدم للخلط وللمعالجة هو ماء صالح للشرب pH = 7 .



شكل (1): شكل حبيبات النانو سيليكا باستخدام التصوير المجهري SEM .



شكل (2): تحليل XRD للنانو سيليكا.

جدول (1): التركيب الكيميائي للإسمنت البورتلاندي والسيليكا فيوم والنانو سيليكا.

Items	Chemical Composition (%)		
	OPC 52.5 N	SF	NS
SiO_2	20.8	93.5	98.98
Al_2O_3	4.6	1	0.033
Fe_2O_3	2.8	1.5	0.015
CaO	65.4	0.5	0.13
MgO	1.9	1	< 0.01
SO_3	2.2	-	< 0.01
Na_2O	0.31	1	0.18
K_2O	0.44	1.5	< 0.01
TiO_2	-	-	0.025
Cl	-	-	0.27
Lol	-	-	0.32
Physical properties			
Specific gravity	3.15	2.23	2.3
Average particle size	1-10 µm	0.1 µm	65 nm
Specific surface area (m^2/g)	0.35	18	135.5
Density	-	0.55 (kg/L)	-

جدول (2): خواص الركام الناعم والركام الخشن.

Aggregate	Specific gravity	Bulk density (t/m^3)	F.M.	Absorption %	Percentage passing by weight through sieve size (mm)						
					9.75	*4.75*	*2.36*	*1.18*	*0.6*	*0.3*	*0.15*
Fine	2.60	1.56	2.61	0.55	100	100	89	75	42	19	5
Coarse	2.63	1.55	-	2.40	100	52	28	8	5	3	1

2.2 الخلطات الخرسانية

ثلاث رتب من الخرسانة تم صناعتها لإجراء هذه الدراسة، أولها خرسانة برتبة 55 ن/مم^2 وهي خرسانة عالية المقاومة (HSC) تحقق متطلبات هذا النوع من الخرسانة وفق المواصفات الأمريكية[12] ACI 363-10 ، والأخرى خرسانة برتبة 80 ن/مم^2 وخرسانة برتبة 90 ن/مم^2 وهما خرسانة عالية الأداء (HPC) حيث أن نتائج مقاومة الضغط عند الأعمار المبكرة والمتأخرة تحقق متطلبات هذا النوع من الخرسانة [13]. تم إضافة النانو سيليكا بنسب 0.5%، 1.0%، 1.5% و2.0% من وزن الاسمنت.

الجدول (3) يوضح مكونات الخلطات الخرسانية المختلفة موضوع الدراسة.

جدول (3): مكونات الخلطات الخرسانية.

Concrete Type	Concrete Grade	Dosage of Nano-Silica	Mix proportions (Kg/m^3)						
			Water	Cement	SF	Dolomite	Sand	SP	NS
HSC	G55	Control	158	350	-	1090	800	4.375	-
		NS 0.5%	158	350	-	1090	800	4.375	1.75
		NS 1.0%	158	350	-	1090	800	4.375	3.5
		NS 1.5%	158	350	-	1090	800	4.375	5.25
		NS 2.0%	158	350	-	1090	800	4.375	7.0
HPC	G80	Control	145	450	45	1080	740	9.158	-
		NS 0.5%	145	450	45	1080	740	9.158	2.25
		NS 1.0%	145	450	45	1080	740	9.158	4.5
		NS 1.5%	145	450	45	1080	740	9.158	6.75
		NS 2.0%	145	450	45	1080	740	9.158	9.0
	G90	Control	158.5	600	60	1126	593	14.19	-
		NS 0.5%	158.5	600	60	1126	593	14.19	3.0
		NS 1.0%	158.5	600	60	1126	593	14.19	6.0
		NS 1.5%	158.5	600	60	1126	593	14.19	9.0
		NS 2.0%	158.5	600	60	1126	593	14.19	12.0

3.2 طريقة الخلط

في البداية يتم تحضير محلول النانو سيليكا وذلك بخلط حبيبات النانو سيليكا مع جزء من ماء الخلط باستخدام آلة تحريك وخلط عالية السرعة لمدة دقيقتان، ثم يتم إضافة الملدن الفائق إلى المحلول والاستمرار في الخلط لمدة دقيقتين، يتم وضع هذا المحلول في جهاز الموجات فوق الصوتية المخصص شكل (3) لمدة 15 دقيقة ويتم ضبطه بحرارة 60 درجة مئوية وذلك للتأكد من تشتت حبيبات النانو سيليكا في المحلول. الاسمنت والسيليكا فيوم يتم وضعها في خلاطة الخرسانة وخلطها على الجاف ومن ثم يتم إضافة الركام الناعم والركام الخشن ويستمر الخلط لمدة نصف دقيقة، بعدها يتم إضافة الماء المتبقي من خلط المحلول إلى خلاط الخرسانة ويستمر الخلط لمدة نصف دقيقة أخرى، ثم يتم إضافة المحلول المحضر إلى خلاطة الخرسانة تدريجيا مع استمرار الخلط لمدة ثلاث دقائق .

شكل (3): جهاز الموجات فوق الصوتية.(sonication)

4.2 الاختبارات

تحقيقاً لأهداف هذا البحث تم دراسة وفحص متغيرات الدراسة المعملية وذلك بإجراء عدد من الاختبارات، منها اختبار قياس مقاومة الضغط على عينات مكعبة مقاسها 100×100×100 ملم وفق المواصفة BS 1881-116: 2002 [14] والمواصفة BS EN 206: 2013 [15] والمواصفة المكملة لها BS 8500-2: 2015 [16]، حيث تم فك جميع العينات من القوالب بعد الصب بيوم واحد وبعدها ثم غمرها في الماء حتى يوم الاختبار. والاختبار الآخر اختبار قياس نسبة الامتصاص للخرسانة (water capillary absorption) وفق المواصفة ASTM C642-13 [17] وأيضاً اختبار قياس المسامية الكلية للخرسانة (total porosity) وفق المواصفة ASTM C642-13 [17].

3. تحليل ومناقشة النتائج

1.3 نتائج مقاومة الضغط للخرسانة

الجدول (4) يبين نتائج اختبار مقاومة الضغط لكل خلطة عند عمر 1، 3، 7، 28 و180 يوم وكل نتيجة تمثل متوسط نتائج ثلاث عينات. إن تأثير إضافة نسب مختلفة من النانو سيليكا على مقاومة الضغط للخرسانة عالية المقاومة (HSC) ذات الرتبة 55 ن/مم^2 (G55) يظهر بشكل واضح في الشكل (4). من النتائج المعملية لهذا الاختبار يظهر وبشكل واضح أن استخدام النانو سيليكا في الخرسانة له تأثير إيجابي على زيادة مقاومة الضغط عند الأعمار المختلفة مقارنة مع الخلطة المرجعية والتي من نفس الرتبة ولكن لا تحتوي على نانو سيليكا. ويتضح أن مقاومة الضغط تزداد مع زيادة نسبة النانو سيليكا في الخلطة الخرسانية وفي مختلف الأعمار، ولكن يقل هذا التأثير بعد استخدام نسبة 1.5% من النانو سيليكا، بمعنى آخر أن نتائج استخدام نسبة 2.0% من النانو سيليكا في الخلطة الخرسانية لا تختلف كثيراً عن نتائج استخدام نسبة 1.5% منها، وعليه فيمكن اعتبار أن نسبة 1.5% من النانو سيليكا هي الأمثل لتحسين مقاومة الضغط لهذا النوع من الخرسانة. التأثير الإيجابي لاستخدام النانو سيليكا في الخرسانة لتحسين مقاومة الضغط هو بسبب عملها كمادة مالئة للفراغات والمسامات الدقيقة داخل العجينة الإسمنتية والفراغات بين سطح حبيبات الركام والعجينة الإسمنتية أيضاً هذا ينتج عنه خرسانة كثيفة ذات مقاومة أعلى. بالإضافة لذلك فإن التفاعل البوزلاني بين النانو سيليكا النشطة وهيدروكسيد الكالسيوم الحر (CH) ينتج عنه كمية إضافية من منتج هلام CSH وهو المسؤول الأساسي عن مقاومة الخرسانة. الشكل (5) يظهر نتائج مقاومة الضغط للخرسانة عالية المقاومة عند إضافة النانو سيليكا لها بنسب مختلفة عند عمر 7 و28 يوم، ومن هذا الشكل يمكن استنتاج أن نسبة الزيادة في مقاومة الضغط للخرسانة عالية المقاومة ذات الرتبة

55 ن/مم^2 في عمر 28 يوم عند استخدام النانو سيليكا بنسب 0.5%، 1.0%، 1.5% و2.0% تكون 9.3%، 12.2%، 16.9% و16.0% على التوالي مقارنة مع نتائج الخلطة المرجعية. نتائج هذه الدراسة تتوافق مع ما توصل إليه الباحث Varghese, J., et al [7] والباحث Alhawat, M., et al. [18] والباحث Safi, B., et al. [19].

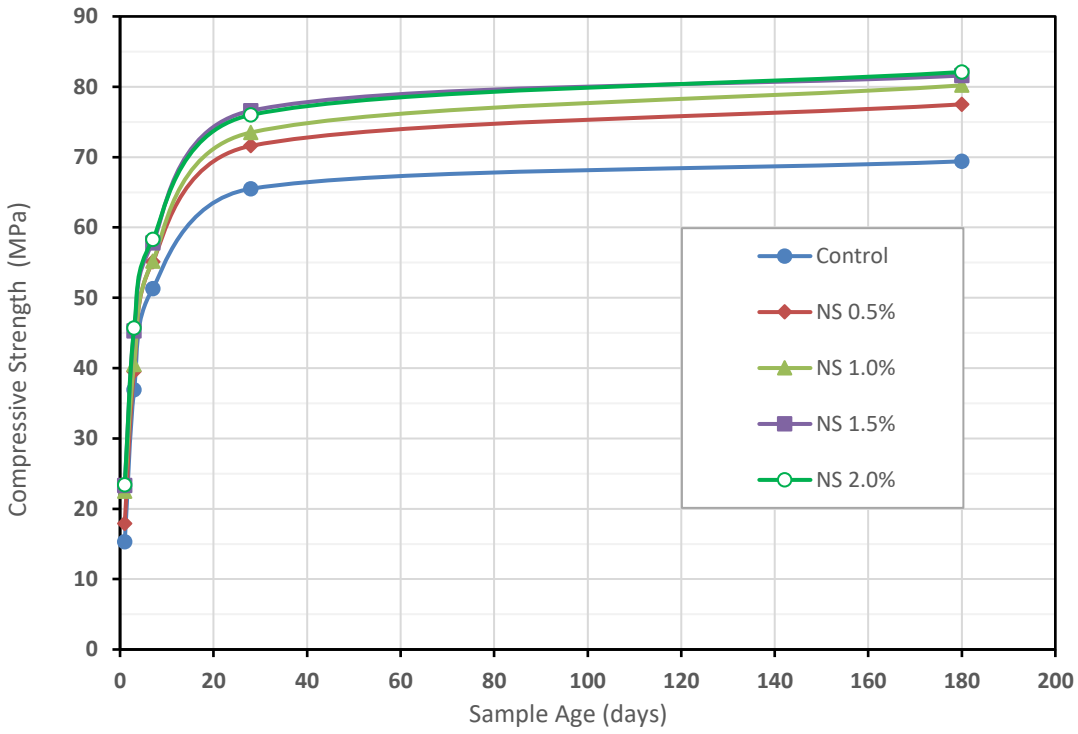
جدول (4): نتائج مقاومة الضغط لجميع الخلطات.

Concrete Type	Concrete Grade	Dosage of Nano-Silica	Compressive Strength (MPa)				
			1 day	*3 days*	*7 days*	*28 days*	*180 days*
HSC	G55	Control	15.3	36.9	51.3	65.5	69.4
		NS 0.5%	17.9	39.5	55.1	71.6	77.5
		NS 1.0%	22.5	40.5	55.2	73.5	80.2
		NS 1.5%	23.3	45.3	57.8	76.6	81.6
		NS 2.0%	23.4	45.7	58.3	76.0	82.1
HPC	G80	Control	36.3	63.7	76.5	90.1	95.5
		NS 0.5%	42.1	68.8	80.1	94.3	101.7
		NS 1.0%	43.1	69.5	83.2	96.1	102.8
		NS 1.5%	43.8	73.1	86.2	101.8	103.2
		NS 2.0%	44.0	75.2	86.9	102.3	103.4
	G90	Control	42.1	73.2	91.2	102.3	104.4
		NS 0.5%	46.3	77.5	96.2	106.6	107.3
		NS 1.0%	47.9	79.5	100.0	107.4	110.8
		NS 1.5%	48.8	83.3	103.4	110.2	115.2
		NS 2.0%	49.3	84.0	104.3	111.4	116.1

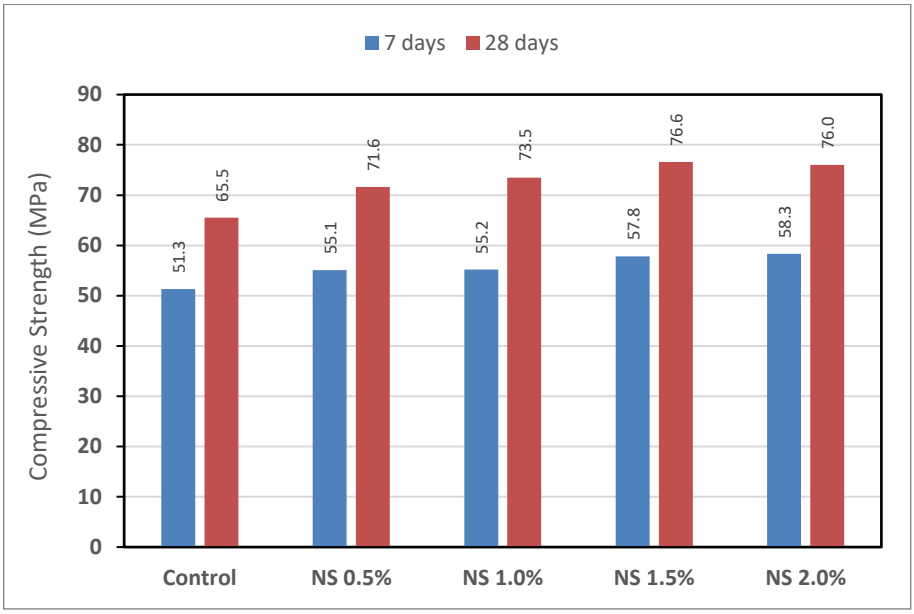
1.1.3 مقاومة الضغط للخرسانة عالية المقاومة

تأثير إضافة نسب مختلفة من النانو سيليكا على مقاومة الضغط للخرسانة عالية المقاومة (HSC) ذات الرتبة 55 ن/مم^2 (G55) يظهر بشكل واضح في الشكل (4). من النتائج المعملية لهذا الاختبار يظهر وبشكل واضح أن استخدام النانو سيليكا في الخرسانة له تأثير إيجابي على زيادة مقاومة الضغط عند الأعمار المختلفة مقارنة مع الخلطة المرجعية والتي من نفس الرتبة ولكن لا تحتوي على نانو سيليكا. ويتضح أن مقاومة الضغط تزداد مع زيادة نسبة النانو سيليكا في الخلطة الخرسانية وفي مختلف الأعمار، ولكن يقل هذا التأثير بعد استخدام نسبة 1.5% من النانو سيليكا، بمعنى آخر أن نتائج استخدام نسبة 2.0% من النانو سيليكا في الخلطة الخرسانية لا تختلف كثيراً عن نتائج استخدام نسبة 1.5% منها، وعليه فيمكن اعتبار أن نسبة 1.5% من النانو سيليكا هي الأمثل لتحسين مقاومة الضغط لهذا النوع من الخرسانة. التأثير الإيجابي لاستخدام النانو سيليكا في الخرسانة لتحسين مقاومة الضغط هو بسبب عملها كمادة مالئة للفراغات والمسامات الدقيقة داخل العجينة الإسمنتية والفراغات بين سطح حبيبات الركام والعجينة الإسمنتية أيضاً هذا ينتج عنه خرسانة كثيفة ذات مقاومة أعلى. بالإضافة لذلك فإن التفاعل البوزلاني بين النانو

سيليكا النشطة وهيدروكسيد الكالسيوم الحر (CH) ينتج عنه كمية إضافية من منتج هلام CSH وهو المسؤول الأساسي عن مقاومة الخرسانة. الشكل (5) يظهر نتائج مقاومة الضغط للخرسانة عالية المقاومة عند إضافة النانو سيليكا لها بنسب مختلفة عند عمر 7 و28 يوم، ومن هذا الشكل يمكن استنتاج أن نسبة الزيادة في مقاومة الضغط للخرسانة عالية المقاومة ذات الرتبة 55 ن/مم^2 في عمر 28 يوم عند استخدام النانو سيليكا بنسب 0.5%، 1.0%، 1.5% و2.0% تكون 9.3%، 12.2%، 16.9% و16.0% على التوالي مقارنة مع نتائج الخلطة المرجعية. نتائج هذه الدراسة تتوافق مع ما توصل إليه الباحث Varghese, J., et al [7] والباحث Alhawat, M., et al. [18] والباحث Safi, B., et al. [19].



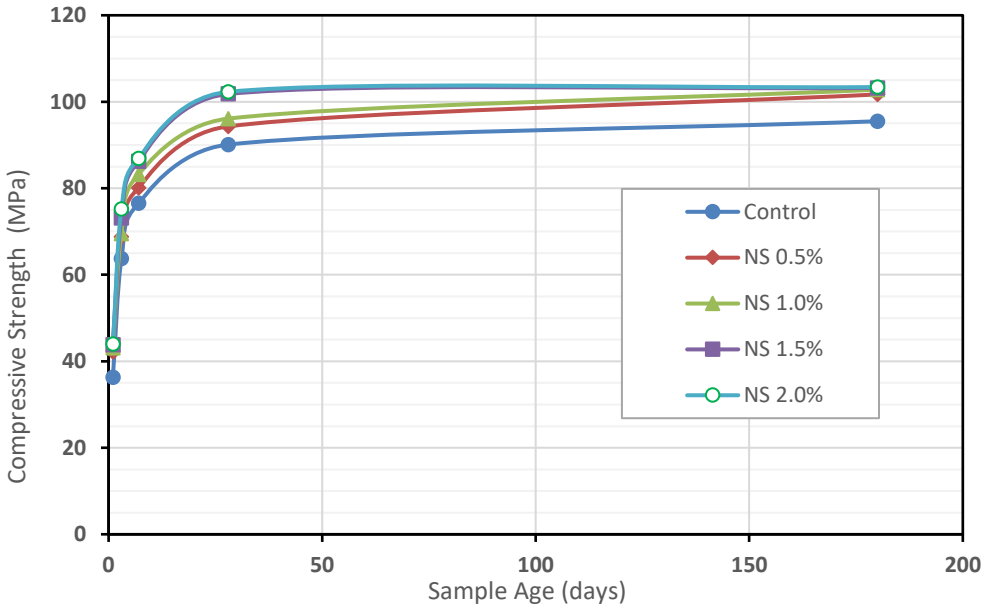
شكل (4): نمو مقاومة الضغط مع الزمن للخرسانة عالية المقاومة (HSC) ذات الرتبة 55 ن/مم^2 (G55) عند إضافة نسب مختلفة من النانو سيليكا.



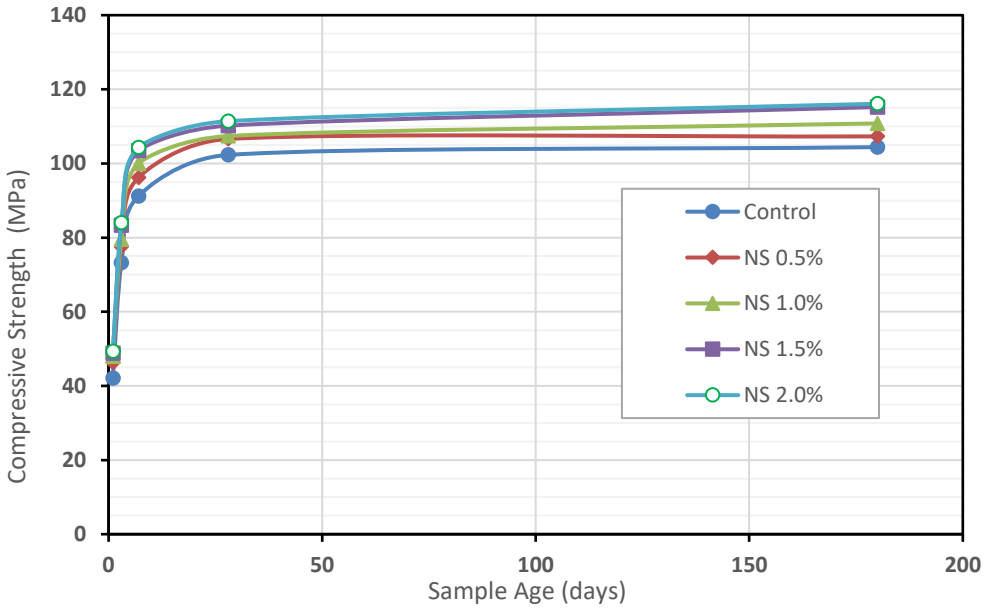
شكل (5): مقاومة الضغط للخرسانة عالية المقاومة (HSC) ذات الرتبة 55 ن/مم^2 (G55) بعد عمر 7 و28 يوم عند إضافة نسب مختلفة من النانو سيليكا.

2.1.3 مقاومة الضغط للخرسانة عالية الأداء

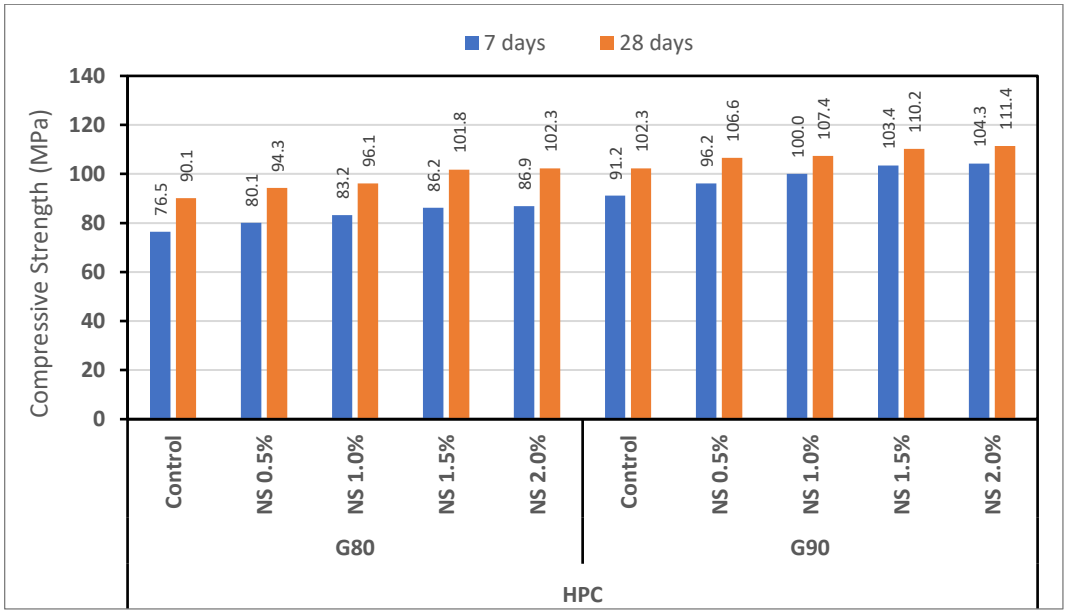
الشكل (6) والشكل (7) يبين العلاقة بين مقاومة الضغط للخرسانة عالية الأداء (HPC) ذات الرتبة 80 ن/مم^2 والرتبة 90 ن/مم^2 مع الزمن عند إضافة النانو سيليكا. تظهر النتائج وبشكل واضح أن استخدام النانو سيليكا في هذه الخرسانة له تأثير إيجابي على زيادة مقاومة الضغط عند الأعمار المختلفة مقارنة مع الخلطة المرجعية التي لا تحتوي على نانو سيليكا، ولكن يقل هذا التأثير عندما تزيد نسبة النانو سيليكا في الخلطة عن 1.5%، بمعنى أن نتائج استخدام نسبة 2.0% من النانو سيليكا في الخلطة الخرسانية لا تختلف كثيراً عن نتائج استخدام نسبة 1.5% منها، وعليه فيمكن اعتبار أن نسبة 1.5% من النانو سيليكا هي الأمثل لتحسين مقاومة الضغط لهذا النوع من الخرسانة. التأثير الإيجابي لاستخدام النانو سيليكا في الخرسانة لتحسين مقاومة الضغط هو بسبب عملها كمادة مالئة للفراغات والمسامات الدقيقة داخل العجينة الإسمنتية والفراغات بين سطح حبيبات الركام والعجينة الإسمنتية وهذا ينتج عنه خرسانة كثيفة ذات مقاومة أعلى. بالإضافة لذلك فإن التفاعل البوزلاني بين النانو سيليكا النشطة وهيدروكسيد الكالسيوم الحر (CH) ينتج عنه كمية إضافية من منتج هلام CSH وهو المسؤول الأساسي عن مقاومة الخرسانة. الشكل (8) يظهر نتائج مقاومة الضغط للخرسانة عالية الأداء عند إضافة النانو سيليكا لها بنسب مختلفة عند عمر 7 و28 يوم، ومن هذا الشكل يمكن استنتاج أن نسبة الزيادة في مقاومة الضغط للخرسانة عالية المقاومة ذات الرتبة 80 ن/مم^2 في عمر 28 يوم عند استخدام النانو سيليكا بنسب 0.5%، 1.0%، 1.5% و2.0% تكون 4.7%، 6.7%، 13.0% و13.5% على التوالي، وتكون 4.2%، 5.0%، 7.7% و8.9% على التوالي للخرسانة ذات الرتبة 90 ن/مم^2 (G90) عند نفس العمر (28 يوم). يتبين أيضاً أن معدل تحسن مقاومة الضغط للخرسانة عالية الأداء يقل مع زيادة الرتبة. هذه النتائج لا تختلف في مضمونها إلى ما توصل إليه الباحث Vivek, D., et al. [20] والباحث K. Elango, et al. [21].



شكل (6): نمو مقاومة الضغط مع الزمن للخرسانة عالية الأداء (HPC) ذات الرتبة 80 ن/مم^2 (G80) عند إضافة نسب مختلفة من النانو سيليكا.



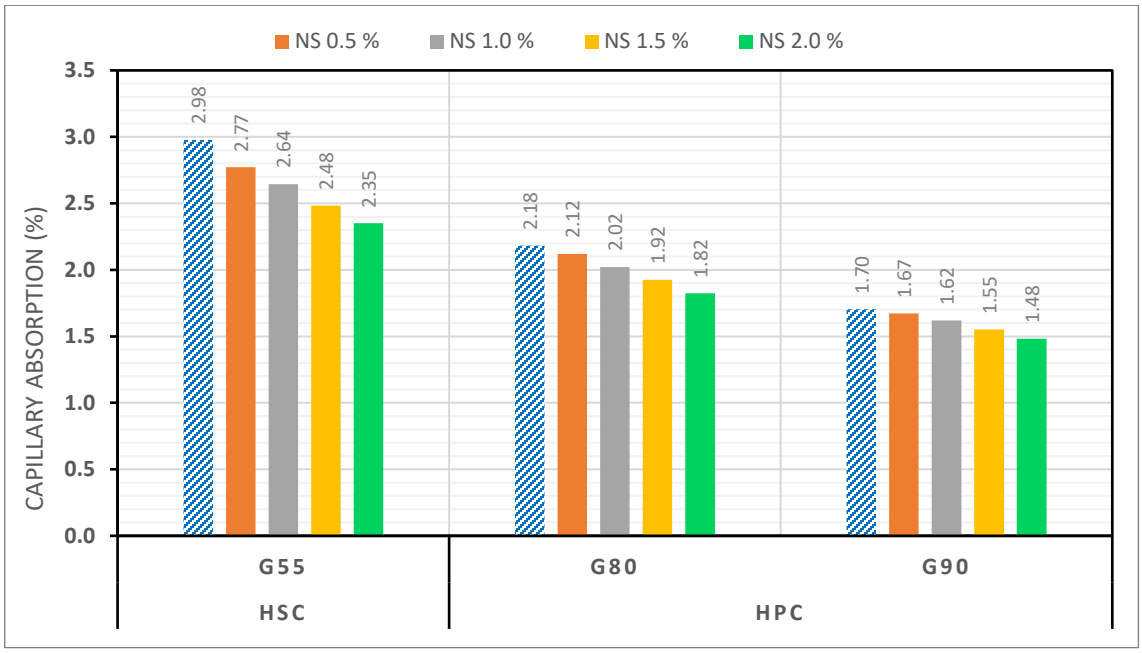
شكل (7): نمو مقاومة الضغط مع الزمن للخرسانة عالية الأداء (HPC) ذات الرتبة 90 ن/مم^2 (G90) عند إضافة نسب مختلفة من النانو سيليكا.



شكل (8): مقاومة الضغط للخرسانة عالية الأداء (HPC) ذات الرتبة 90 ن/مم^2 (G90) بعد عمر 7 و28 يوم عند إضافة نسب مختلفة من النانو سيليكا.

2.3 نسبة الامتصاص للخرسانة

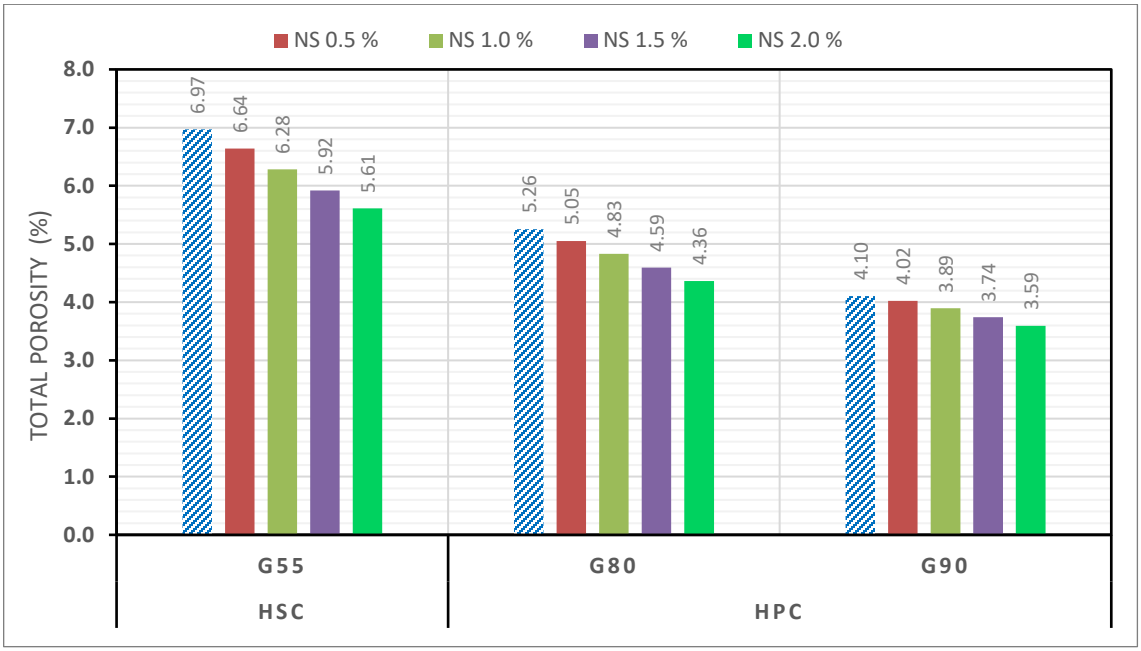
الصغر المتناهي لحجم حبيبات النانو سيليكا يجعلها تعمل بكفاءة عالية كمادة مالئة داخل جسم الخرسانة، وهذا ما يساعد على مليء الفراغات المجهرية وانسداد المسامات الدقيقة وبالتالي نقص القنوات التي تسمح بالسريان داخل كتلة الخرسانة، كل هذا بدوره يقلل قدرة الخرسانة على الامتصاص. الشكل (9) يوضح مدى تأثير إضافة النانو سيليكا على نتائج الامتصاص لعينات الخرسانة عالية المقاومة وعلى عينات الخرسانة عالية الأداء عند عمر 180 يوم. النتائج تبين أن إضافة النانو سيليكا للخرسانة عالية المقاومة والخرسانة عالية الأداء على حد سواء له تأثير إيجابي في تقليل قابليتها للامتصاص وهو ما يحسن من ديمومتها ومتانتها. وعلى سبيل المثال، نسبة نقصان معدل الامتصاص للخرسانة عالية المقاومة ذات الرتبة 55 ن/مم^2 (G55) عند إضافة النانو سيليكا بنسب 0.5%، 1.0%، 1.5 و2.0% تكون 7.0%، 11.4%، 16.8% و21.1% على التوالي، وللخرسانة عالية الأداء ذات الرتبة 80 ن/مم^2 تكون 2.8%، 7.3%، 11.9% و16.5% على التوالي، وللرتبة 90 ن/مم^2 تكون 1.8%، 4.7%، 8.8% و12.9% على التوالي مقارنة مع نتائج الخلطات المرجعية. كما يتبين لنا بشكل واضح أنه كلما زادت رتبة الخرسانة كلما قل تأثير إضافة النانو سيليكا على تقليل نسبة الامتصاص للخرسانة. الباحث Fallah et al. [22] والباحث Norhasri et al. [23] قام كل منهما بإجراء دراسات تطرقت لهذه النقطة وتحصلوا على نتائج متوافقة مع نتائج دراستنا الحالية.



شكل (9): نسبة الامتصاص (Capillary Absorption) للخرسانة عالية المقاومة (HSC) والخرسانة عالية الأداء (HPC) عند إضافة نسب مختلفة من النانو سيليكا.

3.3 المسامية الكلية للخرسانة

يوضح الشكل (10) مدى تأثير إضافة النانو سيليكا بجرعات مختلفة على الخرسانة عالية المقاومة (HSC) والخرسانة عالية الأداء (HPC) برتب مختلفة، فالنتائج المعملية لاختبار قياس المسامية الكلية للخرسانة تظهر بشكل واضح الأثر الإيجابي من إضافة النانو سيليكا بجرعاتها المختلفة على تقليل مسامية الخرسانة برتبها المختلفة، فعمل النانو سيليكا داخل خليط الخرسانة كمادة مالئة من جهة وكمادة بوزلانية منتجة إضافة للمادة الرئيسية المسؤولة عن تصلب الخرسانة (CSH) من جهة أخرى يحسن من البنية المجهرية لكتلة الخرسانة ويزيد من كثافتها ومتانتها وبالتالي تحسن ديمومتها مع الزمن. وعلى سبيل المثال، نسبة نقصان المسامية للخرسانة عالية المقاومة ذات الرتبة 55 ن/مم^2 (G55) عند إضافة النانو سيليكا بنسب 0.5%، 1.0%، 1.5 و2.0% تكون 4.7%، 9.9%، 15.1% و19.5% على التوالي، وللخرسانة عالية الأداء ذات الرتبة 80 ن/مم^2 تكون 4.0%، 8.2%، 12.7% و17.1% على التوالي، وللرتبة 90 ن/مم^2 تكون 2.0%، 5.1%، 8.8% و12.4% على التوالي مقارنة مع نتائج الخلطات المرجعية. وهذا يبين لنا بشكل واضح أنه كلما زادت رتبة الخرسانة كلما قل تأثير إضافة النانو سيليكا على تقليل مسامية الخرسانة.



شكل (10): المسامية الكلية (Total Porosity) للخرسانة عالية المقاومة (HSC) والخرسانة عالية الأداء (HPC) عند إضافة نسب مختلفة من النانو سيليكا.

4. الاستنتاجات

من النتائج التي تم الحصول عليها من هذه الدراسة يمكن تلخيص الاستنتاجات التالية:

1. استخدام النانو سيليكا كإضافة للخرسانة عالية الرتبة بنسبة من 0.5% إلى 2.0% عموماً له أثر إيجابي على زيادة مقاومة الضغط لمختلف رتب الخرسانة (من 55 ن/مم^2 إلى 90 ن/مم^2).
2. الأثر الإيجابي من إضافة النانو سيليكا على زيادة مقاومة الضغط للخرسانة يقل مع زيادة رتبة الخرسانة.
3. النسبة الأمثل لاستخدام النانو سيليكا كإضافة للخرسانة لتحسين مقاومتها للضغط هي 1.5% من وزن الاسمنت.
4. إضافة النانو سيليكا للخرسانة تعمل على تقليل نسبة امتصاصها، وذلك لمختلف رتب الخرسانة، وكلما زادت نسبة النانو سيليكا في الخلطة الخرسانية كلما قل تأثيرها. وكلما زادت رتبة الخرسانة كلما قل تأثير النانو سيليكا على تقليل نسبة الامتصاص.
5. أظهرت النتائج أن مسامية الخرسانة تتحسن بشكل ملحوظ عند إضافة النانو سيليكا للخلطة الخرسانية، وذلك لمختلف الجرعات المستخدمة في هذه الدراسة من النانو سيليكا .
6. نتائج اختبار المسامية للخرسانة يؤكد نتائج اختبار نسبة الامتصاص لها أيضا، فهناك توافق وترابط كبير بين نتائج الاختبارين وهذا ما يؤكد عمل النانو سيليكا على تحسين هذا الجانب من الخواص.
7. تأثير إضافة النانو سيليكا تأثير مشترك ومتزامن على تحسين خواص الخرسانة الفيزيائية مثل نسبة الامتصاص والمسامية وهذا ما يساهم في الرفع من كفاءة ديمومتها مع الزمن.

5. التوصيات

- يوصى بتوسيع مجال النسب المستخدمة من النانو سيليكا لتتعدى النسب المستخدمة حالياً، ودراسة مدى موافقتها للنتائج المستخلصة في هذا البحث.
- توسيع دائرة الدراسة للبحث في مدى تأثير إضافة النانو سيليكا على الخواص الأخرى للخرسانة.
- استخدام أنواع مختلفة من النانو سيليكا والمقارنة فيما بينها.
- دراسة استخدام أنواع أخرى من المواد النانو مترية كإضافة للخرسانة مثل النانو ميتاكاولين والنانو كلي وغيرها.
- تطبيقات تقنية النانو في مجال البناء أصبح مستقبل الهندسة الإنشائية، ولكن العمل في هذا المجال يحتاج لدعم كبير وإمكانيات خاصة، عليه فيوصى بتشكيل هيئة خاصة تتابع وتدعم وتشجع الباحثين والعاملين في هذه الساحة.

6. المراجع

[1]. Alexander, M. and B. Magee, Durability performance of concrete containing condensed silica fume. Cement and concrete research, 1999. 29(6): p. 917-922.

[2]. Elsayed, A., Influence of silica fume, fly ash, super pozz and high slag cement on water permeability and strength of concrete. Jordan Journal of Civil Engineering, 2011. 5(2): p. 245-257.

[3]. Srivastava, V., V. Agarwal, and R. Kumar, Effect of Silica fume on mechanical properties of Concrete. J. Acad. Indust. Res, 2012. 1(4): p. 176-179.

[4]. Hallal, A., et al., Combined effect of mineral admixtures with superplasticizers on the fluidity of the blended cement paste. Construction and Building Materials, 2010. 24(8): p. 1418-1423.

[5]. Srivastava, V., et al., Effect of silica fume on workability and compressive strength of OPC concrete. Journal of Environmental Nanotechnology, 2014. 3(3): p. 32-35.

[6]. Sivasankaran, U., S. Raman, and S. Nallusamy. Experimental analysis of mechanical properties on concrete with nano silica additive. in Journal of nano research. 2019. Trans Tech Publ.

[7]. Varghese, J., et al., Influence of nano-silica on characteristics of cement mortar and concrete, in Sustainable Construction and Building Materials. 2019, Springer. p. 839-851.

[8]. Sobolev, K. and M.F. Gutiérrez, How nanotechnology can change the concrete world. American Ceramic Society Bulletin, 2005. 84(10): p. 14.

[9]. Al Ghabban, A., A.B. Al Zubaidi, and Z. Fakhri. Pozzolanic activity and durability of nano silica, micro silica and silica gel contained concrete. in AIP Conference Proceedings. 2018. AIP Publishing LLC.

[10]. Sharaky, I., et al., The influence of silica fume, nano silica and mixing method on the strength and durability of concrete. SN Applied Sciences, 2019. 1(6): p. 1-10.

[11]. Xu, S., et al., Environmental resistance of cement concrete modified with low dosage nano particles. Construction and Building Materials, 2018. 164: p. 535-553.

[12]. PRC, A., 363-10. Report on High-Strength Concrete. American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2010.

[13]. Mehta, P. and P. Monteiro, Microstructure and properties of hardened concrete. Concrete: Microstructure, properties and materials, 2006: p. 41-80.

[14]. BS 1881-116, Method for determination of compressive strength of concrete cubes. British Standards Institute; 2002.

[15]. Institution, B.S., BS EN 206: 2013 Concrete. Specification, performance, production and conformity. 2013.

[16]. Standard, B., 8500-2: 2015 Concrete—Complementary British Standard to BS EN 206. Specification for Constituent Materials and Concrete (+ A2: 2019). British Standards Institution: London, UK, 2015.

[17]. ASTM C642-13, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org.

[18]. Alhawat, M., A. Ashour, and A. El-Khoja, Properties of concrete incorporating different nano silica particles. Materials Research Innovations, 2019: p. 1-12.

[19]. Safi, B., et al. Incorporation mode effect of Nano-silica on the rheological and mechanical properties of cementitious pastes and cement mortars. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. IOP Publishing.

[20]. Vivek, D., et al., Mechanical and durability studies of high performance concrete (HPC) with nano-silica. Materials Today: Proceedings, 2021.

[21]. Vivek, D., et al., Effect of Nano-Silica in high performance concrete. Materials Today: Proceedings, 2021. 37: p. 1226-1229.

[22]. Fallah, S. and M. Nematzadeh, Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. Construction and Building Materials, 2017. 132: p. 170-187.

[23]. Norhasri, M.M., M. Hamidah, and A.M. Fadzil, Applications of using nano material in concrete: A review. Construction and Building Materials, 2017. 133: p. 91-97.