

بررسی اثرات ترکیب نانوسیلیکا و اکسید گرافن بر مقاومت فشاری، کششی، خمشی و سایشی ملات سیمانی خودمتراکم پرمقاومت

بابک موسوی، علیرضا صادقی‌راد، وحید لطفی

1- بابک موسوی Babakmsvi@gmail.com

2- علیرضا صادقی‌راد sadeghirad@aut.ac.ir

خلاصه :

اثرات اکسید گرافن (GO) و نانوسیلیکا (NS) بصورت جداگانه به عنوان افزودنی بر مشخصات مکانیکی ملات سیمان و بتن در مقالات متعددی بررسی شده‌اند. در مقاله حاضر، اثرات ترکیب NS و GO بر مشخصات مکانیکی ملات سیمانی خودمتراکم پرمقاومت (SCHSCM) مورد بررسی قرار گرفته است. چهار ملات سیمانی شامل مقادیر متفاوت کلئوئید NS و GO به منظور تعیین مقاومت فشاری، کششی، خمشی و سایشی ملات تقویت شده با این افزودنی‌ها تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. در این آزمایشات، 0.0٪ و 0.01٪ وزن سیمان GO و 0.0٪ و 3٪ وزن سیمان NS برای بررسی مقاومت فیزیکی ملات به کار رفته‌اند. نشان داده شده است که استفاده همزمان از این دو افزودنی شامل 0.01٪ وزن سیمان GO و 3٪ وزن سیمان NS، مقاومت فشاری، کششی و خمشی SCHSCM را 26٪، 14٪ و 25٪ افزایش می‌دهد که به طور مشخص از اثر جداگانه هریک از این نانومواد بر روی ملات سیمانی بیشتر است. مقاومت سایشی ملات سیمانی با افزودن این محلول‌ها اندکی کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: ملات سیمانی؛ اکسید گرافن؛ نانوسیلیکا؛ مشخصات مکانیکی؛

1. مقدمه

از روزگاران قدیم که انواع مختلف ملات جهت ساخت و ساز (پوشش، پرکننده، بنایی و کف‌سازی) مورد استفاده قرار می‌گرفت، بررسی خواص مکانیکی آن‌ها همواره مورد توجه بوده است [6-1]. در میان تمامی انواع ملات‌ها، ملات سیمانی از مهم‌ترین مصالح ساختمانی به شمار می‌رود [6-4]. در سال‌های اخیر، ملات‌های سیمانی خودمتراکم پرمقاومت فراوانی توسعه یافته و تحت آزمایش قرار گرفته تا برای ترمیم سازه‌ها و زیرساخت‌ها و همچنین قطعات پیش‌ساخته بکار روند [7]. در این ملات‌ها، سیمان به عنوان عضو متصل کننده، سنگدانه به عنوان پر کننده و افزودنی جهت بهبود عملکرد ملات می‌باشد که امروزه دستیابی به خواص مکانیکی و رئولوژی بالا بدون این مواد افزودنی غیرممکن است [11-9]. اخیراً نانومواد نیز به جمع این افزودنی‌ها اضافه شده که می‌توان به تیتانیوم دی‌اکسید، نانو لوله کربنی، اکسید گرافن (GO) و اکسید سیلیس (NS) اشاره نمود. این قبیل افزودنی‌ها، سبب افزایش دوام، مقاومت و کارایی ملات‌های سیمانی شده-اند [15-12]. GO و NS جهت استفاده در بتن عمدتاً به صورت محلول در آب بوده و به هنگام انجام فرآیند هیدراتاسیون سیمان با ذرات سیمان واکنش می‌یابند [18-16]. به طور کلی افزودن این دو نانومواد به خمیر سیمان منجر به پر نمودن فضاهای خالی، افزایش واکنش پیوزولانی و بهبود استحکام ملات سیمانی سخت شده گشته و بدین‌سان مقاومت افزایش

خواهد یافت [19-21]. NS با حضور در حفرات ساختار میکرو خمیر سیمان و ایجاد هرچه بیشتر سیلیکات کلسیم هیدراته شده (C-S-H)، ملات را یکپارچه نموده و از توسعه ترک در ملات جلوگیری می‌نمایند [22, 24]. به علاوه، NS پارامترهای دوام ملات سیمانی، نظیر جذب آب را نظر به آنچه پیشتر گفته شد، کاهش خواهد داد [24]. مطالعات پیشین نشان داده که هرچه سطح مخصوص نسبت به جرم NS بالاتر باشد، اثر آن بر خواص ملات بیشتر و درصد بهینه مصرفش کاهش خواهد یافت که البته لازم به ذکر است که کاربرد NS بصورت پودر یا محلول نیز تعیین کننده است [23, 24]. [28]. برخلاف NS، گرافن که از ذرات کربن تشکیل شده [29]، توانایی برقراری پیوند مستقیم با خمیر سیمان را ندارد. در واقع اتصال ترکیبات پایه اکسیژن نظیر هیدروکسیل و اپوکسی است که به گرافن امکان اتصال شیمیایی با C-S-H را داده و بدین خاطر در فرایند هیدراتاسیون سیمان مشارکت می‌نماید [30, 31]. این واکنش شیمیایی منجر به ارتقاء خواص شیمیایی و مکانیکی مصالح پایه سیمان می‌گردد. بدین طریق که کلئید GO به سطح ژل C-S-H چسبیده و استحکامش را افزایش داده و سبب می‌گردد تا نقشش به عنوان پیوند دهنده در ماتریس ملات را بهتر ایفا نماید [25]. نیاز به اشاره است که تغییر اندک در ترکیبات شیمیایی GO می‌تواند به شدت قابلیت‌های این افزودنی در خمیر سیمان را تحت تأثیر قرار دهد [26, 27]. میزان اثرگذاری GO بر روی خواص مکانیکی ملات سیمانی، بسیار بسته به سطح مخصوص، مدول الاستیسیته درون صفحه و برون صفحه و کرنش شکست آن می‌باشد [32].

در دهه گذشته، محققان اثرگذاری دزهای مختلف نانو افزودنی‌های پیش گفته بر روی مقاومت، کارایی و دوام ملات پایه سیمانی را در معرض آزمایش قرار داده‌اند. هدف این تحقیقات عمدتاً تعیین درصد بهینه این افزودنی‌ها در طرح اختلاط، جهت دستیابی به بالاترین مشخصه‌های فیزیکی ملات است [16, 18, 27, 33-44]. آزمایشات نشان داده که مقاومت فشاری و کششی بتن با استفاده از NS و خاکستر بادی، حتی پس از 28 روز عمل‌آوری، به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد [33]. دو و همکاران [34]، همچنین گزارش نموده‌اند که افزودن 0.3% و 0.9% وزن سیمان NS، دوام بتن را افزایش می‌دهد. در این بین لی و همکاران [35] نیز به این نتیجه رسیدند که استفاده مرکب از ژل میکروسیلیس و NS، مصرف فوق‌العاده در بتن را کاهش می‌دهد. به علاوه مقاومت فشاری بتن در این پژوهش افزایش یافته است. در تحقیقی دیگر مشخص شده که با استفاده از مقدار ثابت NS در بتن‌هایی با درصد آب به سیمان متغیر (از 0.5 به 0.65)، مقاومت بتن در روز بیست و هشتم عمل‌آوری افزایش خواهد یافت [36]. در پژوهشی که توسط وانگ و همکاران [27] انجام شده است با افزودن تنها 0.03% از GO افزایش مقاومت فشاری، خمشی و کششی ملات سیمانی به ترتیب برابر 21.4%، 40% و 54% گزارش شده است. سوماسری و همکاران [37] نیز 17%، 40% و 28% افزایش مقاومت فشاری، خمشی و کششی بتن خودمتراکم و پرمقاومت را با افزودن تا 0.1% وزن سیمان GO مشاهده نموده‌اند. برخلاف خواص مکانیکی خمیر سیمان که با اضافه شدن GO ارتقا می‌یابد، شانگ و همکاران [38] دریافتند که این افزایش، کارایی خمیر سیمان را کاهش خواهد داد. در نهایت، مقادیر بهینه افزودن NS و GO جهت افزایش مقاومت مصالح پایه سیمانی در مطالعات پیشین گزارش شده است [39-41, 44-42].

اثر همزمان (GO) و (NS) در مصالح پایه سیمانی نیز در تعداد اندکی کارهای پژوهشی مورد مطالعه قرار گرفته است. ژائو و همکاران [20] نشان داده‌اند که استفاده همزمان از GO و NS واکنش پوزولانی را افزایش داده و اثر بالاتری بر مشخصه‌های مکانیکی نسبت به استفاده مجزا از این نانومواد دارد. با این وجود، کمبود مطالعات اثر همزمان استفاده از این افزودنی‌ها در متریال پایه سیمان مشهود است.

در پایان این بخش بایستی اشاره نمود که هدف از این تحقیق، بررسی میزان صحیح استفاده از GO و NS برای ارتقاء مشخصات فیزیکی و مقاومت سایشی SCHSCM است. تأثیرات کاربرد همزمان این دو بر خمیر سیمان در این پژوهش با انجام آزمایش بر روی چندین نمونه SCHSCM و اندازه‌گیری مقاومت‌های فشاری، کششی، خمشی و سایشی، مورد بررسی قرار گرفته است.

2. آماده سازی مواد اولیه

به منظور انجام آزمایشات، در ساخت ملات سیمانی خودمتراکم پرمقاومت از سیمان پرتلند تیپ I 525 و میکروسیلیس برای اجزا چسباننده آن استفاده شده است. ترکیبات شیمیایی این اجزاء در جدول شماره 1 ارائه شده است. برای سنگدانه نیز ماسه سیلیسی سفید خالص با ویژگی‌هایی منطبق بر مقررات ASTM C-144 [45] منظور شد که دانه‌بندی آن در جدول شماره 2 ارائه شده است.

جدول شماره 1. ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ I 525 و میکروسیلیس مورد استفاده در آزمایش

سیمان	میکروسیلیس	نوع ماده چسباننده
درصد (%)	درصد (%)	ترکیبات شیمیایی
20.3	96.4	SiO ₂
5.65	1.32	Al ₂ O ₃
3.3	0.87	Fe ₂ O ₃
65.7	0.49	CaO
1.3	≤0.1	MgO
2.2	≤0.1	SO ₃
0.4	–	Total alkali
1.12	–	LOI*
0.03	–	Cl
–	0.34	C
–	0.5	Sic
≤0.1	≤0.1	H ₂ O

loss on ignition: LOI*

جدول شماره 2. دانه بندی ماسه سیلیسی سفید خالص

اندازه و شماره الک	وزن مانده روی الک (گرم)
4.75 mm No. 4	-
2.36 mm No. 8	-
1.18 mm No. 16	239.0
600 μm No. 30	543.0
425 μm No. 40	447.0
300 μm No. 50	256.0
150 μm No. 100	89.0
75 μm No. 200	22.0

<75 μ m <No. 200 0.0

کارایی این ملات ویژه با استفاده از فوق روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات توسعه یافته براساس استانداردهای ASTM C-494 [46] و ISIRI-2930 [47] و با درصد ترکیبات جامد حداقل 40٪ تأمین و حفظ گردید. همچنین NS و GO به صورت محلول در آب مورد استفاده قرار گرفتند. مشخصات فیزیکی و شیمیایی NS در جدول شماره 3 و آنالیز عنصری GO در جدول شماره 4 ذکر شده است.

جدول شماره 3. مشخصات فیزیکی و شیمیایی (NS)

ویژگی و روش آزمایش	مقدار
CTAB adsorption سطح مخصوص ویژه	220-250 m ² /gr
TEM Image متوسط اندازه ذرات	20-30 nm
متوسط اندازه ذرات کلوخه شده	20-22 μ m
ISO-787-11 جرم مخصوص حالت فشرده شده	200-220 Kg/m ³
SiO ₂ مقدار ISO 3262-17	>98.5%

جدول شماره 4. آنالیز عنصری (GO)

اکسیژن	سولفور	نیتروژن	کربن
33-38%	1-2%	0-2%	58-63%

3. فرآیند مخلوط کردن مواد:

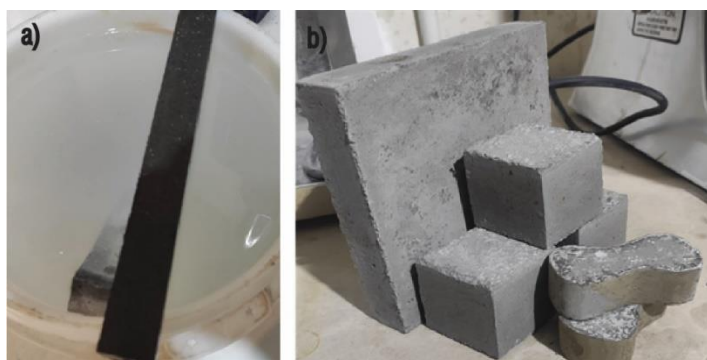
چهار ملات پایه سیمانی SCHSCM با طرح اختلاط‌های ذکر شده در جدول شماره 5 مدنظر قرار گرفتند. با هدف ارزیابی اثر همزمان افزودنی‌های نانو مقیاس GO و NS، چهار ملات SCHSCM با درصد‌های 0 تا 3٪ افزودنی NS و 0.0٪ و 0.01٪ وزن سیمان افزودنی GO ساخته شدند. میزان 0.01٪ وزن سیمان برای GO در ادبیات فنی بعنوان مقدار بهینه برای کاربرد تنهای آن معرفی شده است [48] لذا از این مقدار برای GO استفاده شده است و مقدار NS بر اساس پژوهش‌های پیشین بین 0 تا 3٪ وزن سیمان تغییر داده شد، تا ترکیب بهینه کاربرد همزمان GO و NS شناسایی گردد.

جدول شماره 5. طرح اختلاط ملات‌های SCHSCM

نام آزمایش	سیمان (گرم)	W/C	GO کلونید (wt%)	NS محلول (wt%)	میکروسلیس (wt%)	فوق روان کننده (گرم)
GO-0.0%-NS-0%	919	0.26	0	0	30	13.7
GO-0.01%-NS-0%	919	0.26	0.01	0	30	13.7
GO-0.01%-NS-1.5%	919	0.26	0.01	1.5	30	13.7
GO-0.01%-NS-3%	919	0.26	0.01	3	30	13.7

روش مخلوط کردن برای هر یک از ملات‌ها به این طریق بوده است که: در ابتدا سیمان، پودر میکروسلیس و سنگدانه برای 2 دقیقه در مخلوط کن آزمایشگاهی مخصوص ملات ترکیب شدند. سپس، فوق روان‌کننده در آب تعیین شده برای

ساخت ملات حل شده و نهایتاً به مخلوط اضافه گشتند که پس از ایجاد ملاتی خودمتراکم، افزودنی‌های نانو-مقیاس اضافه گردیدند. لازم به اشاره است که مقدار آب مخلوط شده با فوق روان‌کننده و میزان آب افزودنی‌های GO و NS، کل حجم آب در نظر گرفته شده برای ملات‌ها را شامل می‌شدند. در نهایت، فرآیند مخلوط کردن برای مدت 5 دقیقه دیگر با حداکثر سرعت مخلوط کن ادامه یافت. ملات SCHSCM آماده شده سپس در قالب‌هایی که پیش‌تر روغن کاری شده بودند ریخته شد و روی میز ویبره متراکم گشتند و پس از طی 12 ساعت تا گیرش نهایی ملات‌ها، نمونه‌های تهیه شده در مخزن آب و در دمای اتاق نگهداری شده تا آزمایش شوند. در شکل شماره 1، نمونه‌های آماده شده برای انجام آزمایش‌های فشاری، کششی، خمشی و سایشی قابل مشاهده است.



شکل شماره 1. نمونه‌های تهیه شده جهت بررسی مقاومت و دوام در برای سایش. الف) نمونه‌های مخصوص تست خمشی ب) نمونه‌های مخصوص تست فشاری، کششی و سایشی

در این بین شایان ذکر است که آماده سازی افزودنی NS با حداقل 25٪ ترکیبات جامد، به کمک همگن‌ساز اولتراسونیک انجام شد که در ابتدا، NS آب‌دوست با آب به مدت 1 دقیقه به صورت دستی مخلوط شد و سپس همگن‌ساز به مدت 5 دقیقه مورد استفاده قرار گرفت تا محلولی یک‌پارچه آماده گردد. برای افزودنی GO نیز بر اساس روش هومر عمل گردید و از شرکت نانومواد گستران پارس تهیه گردید.

4. روش آزمایش

4.1. آزمایش مقاومت فشاری

با توجه به آیین نامه [49] ASTM C-109، جهت انجام تست مقاومت فشاری از قالب‌های مکعبی شکل به اندازه-های 5*5*5 سانتی‌متر استفاده گردید. همچنین بارگذاری با سرعت 0.6 مگاپاسکال بر ثانیه بر قالب مکعبی، به کمک جک هیدرولیکی نشان داده شده در شکل شماره 2. الف انجام شد و برای بررسی نتایج مقاومت فشاری 28 روزه، متوسط مقاومت سه نمونه ملاک عمل قرار گرفت.

4.2. آزمایش مقاومت خمشی

بررسی متوسط مقاومت خمشی 28 روزه ملات (SCHSCM) نیز بنا بر [50] INSO 755-2، توسط 4 نمونه 2*2*20 سانتی‌متر انجام گرفت و اعمال نیرو توسط جک مخصوص تست خمسه نقطه‌ای و با سرعت 0.15 مگاپاسکال بر ثانیه صورت پذیرفت که شکل ماشین مورد استفاده جهت آزمایش در شکل شماره 2. ب آورده شده است.

4.3. آزمایش مقاومت کششی

حسب مفاد استاندارد [51] ASTM C-307، انجام تست کششی توسط دستگاه نمایش داده شده در شکل شماره 2. ج صورت گرفت که سرعت گیره بالایی دستگاه در 6 میلیمتر بر دقیقه تنظیم شد و تعیین مقاومت متوسط کششی ملات‌های تهیه شده به وسیله سه نمونه کششی بریکت مانند ممکن گردید.

4.4. آزمایش مقاومت سایشی

آزمون مقاومت سایشی توسط دستگاه سایش چرخ پهن و منطبق بر ضوابط INSO 755-2 صورت گرفت. به منظور انجام این آزمون از دو نمونه مکعبی به ابعاد $15*15*3$ سانتیمتر استفاده شد تا بتوان مقاومت سایشی متوسط ملات (SCHSCM) را اندازه‌گیری نمود. عملکرد دستگاه سنجش دوام سایشی به این صورت است که چرخ دوار با ساییدن سطح نمونه این عمل را انجام داده و مادامی که چرخ در حال گردش است، ماسه آلومینیوم اکسید ذوب شده مابین نمونه و صفحه دوار ریخته می‌شود. پهنای چرخ اشاره شده 70 میلیمتر بوده و در هر دقیقه 75 بار دوران دارد. تصویر دستگاه یاد شده در شکل شماره 2.د نشان داده شده است.



شکل شماره 2. الف) آزمایش مقاومت فشاری به کمک جک فشاری هیدرولیکی، ب) آزمایش مقاومت خمشی توسط جک مخصوص تست خمش سه نقطه‌ای، ج) آزمایش مقاومت کششی توسط دستگاه مخصوص تست کشش ملات، د) آزمایش مقاومت سایشی توسط دستگاه سایش چرخ پهن.

5. مقاومت فشاری

مقاومت فشاری 7 و 28 روزه نمونه‌های ملات SCHSCM در جدول شماره 6 گزارش گردیده است. مقاومت فشاری تمامی ملات‌ها با رسیدن سن نمونه‌ها از 7 روز به 28 روز افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده نمود که افزودن 0.01٪ وزن سیمان GO به ملات‌ها، اثرات قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت نهایی فشاری می‌گذارد (نزدیک به 22٪). در نهایت افزودنی NS نیز اثری مطلوب بر مقاومت ملات دارد. افزایش میزان NS از 1.5٪ به 3٪، تاثیر مثبتی بر مقاومت ملات ندارد. با افزودن 1.5٪ از این نانومواد، مقاومت فشاری 7 و 28 روزه به ترتیب قریب به 10 و 5 درصد ارتقاء یافته است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که استفاده همزمان از این دو افزودنی نانومقیاس، رشد مقاومت فشاری حتی نمونه‌های 7 روزه را باعث می‌شود که به طور خاص گزارش‌های ژائو و همکاران [20] را تأیید می‌نماید. این افزایش مقاومت مستقیماً ناشی از افزایش سطح هیدراتاسیون سیمان و تولید بیشتر ژل C-S-H است که با افزودن NS و GO رخ می‌دهد.

جدول شماره 6. نتایج مقاومت فشاری ملات‌ها در سنین عمل‌آوری 7 روزه و 28 روزه به مگاپاسکال

نام آزمایش	مقاومت فشاری 7	مقاومت فشاری
	روزه	28 روزه
GO-0.0%-NS-0%	77.2	104
GO-0.01%-NS-0%	86.1	122.6
GO-0.01%-NS-1.5%	94.4	127.2
GO-0.01%-NS-3%	94	130.8

6. مقاومت کششی

نتایج بدست آمده از نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی، خمشی و سایشی نمونه‌های خمیر سیمانی در جدول شماره 7 گزارش شده‌اند. در آزمایشات انجام شده، اضافه کردن 0.01٪ وزن سیمان GO افزایش 9.8٪ مقاومت کششی را باعث گردیده است. همچنین اضافه کردن 0.0٪ تا 3٪ وزن سیمان NS باعث افزایش مقاومت کششی شده است بدین ترتیب که افزودن 1.5٪ و 3٪ وزن سیمان NS موجب افزایش به ترتیب 2.8٪ و 3.3٪ مقاومت کششی ملات SCHSCM گردیده است. در مجموع، اضافه کردن 0.01٪ وزن سیمان GO به اتفاق 3٪ وزن سیمان NS، بیشترین مقاومت کششی را نتیجه می‌دهد. این افزایش مقاومت کششی در مقیاس نانو، ناشی از پیوند شیمیایی ژل C-S-H با GO است که تقویت این ژل و کاهش ترک‌های میکرو ملات را به همراه دارد.

7. مقاومت خمشی

نتایج آزمایش مقاومت خمشی ملات SCHSCM حاوی GO و NS نیز در جدول شماره 7 نمایش داده شده است. همانگونه که از این جدول استنباط می‌شود، اثر افزودنی‌های GO و NS بر نتایج مقاومت خمشی ملات SCHSCM قابل توجه است. افزودن 0.01٪ وزن سیمان GO به ملات SCHSCM مقاومت خمشی را 8.8٪ افزایش می‌دهد. نیز مشاهده می‌شود که افزایش افزودنی NS ارتقاء مقاومت خمشی را نتیجه داده و باعث افزایش مقاومت خمشی 28 روزه در حدود 11.3٪ در نتیجه اضافه کردن 1.5٪ از این افزودنی می‌شود و به بیشینه مقاومت 3.245 مگاپاسکال با افزودن 3٪ از این نانومواد می‌رسد. به طور کلی، این افزایش مقاومت خمشی از افزایش سطح واکنش‌های هیدراتاسیون و

تولید کریستال‌های سیمانی ناشی شده که با افزودن GO و NS رخ داده و سبب کاهش تمرکز تنش در ساختار سیمان می‌شود. این روند تا زمانی که مازاد GO و NS در ملات انباشته شده و تشکیل نواحی ضعیف در ماتریس سیمان دهند، ادامه خواهد یافت.

جدول شماره 7. نتایج آزمون‌های مقاومت کششی، خمشی و سایشی متوسط ملات‌ها در سن عمل‌آوری 28

روزه به مگاپاسکال

نام آزمایش	نتایج آزمون مقاومت کششی	نتایج آزمون مقاومت خمشی	نتایج آزمون مقاومت سایشی
GO-0.0%-NS-0%	20.09	2.6	14.35
GO-0.01%-NS-0%	22.06	2.83	17.18
GO-0.01%-NS-1.5%	22.68	3.15	20.785
GO-0.01%-NS-3%	22.79	3.245	15.95

8. مقاومت سایشی:

نتایج تست مقاومت سایشی ملات SCHSCM حاوی GO و NS نیز در جدول شماره 7 نمایش داده شده است. نتایج سایش نمونه‌ها پس از 28 روز عمل‌آوری ارائه شده است که بیانگر این می‌باشد که اضافه کردن 0.01٪ وزن سیمان GO موجب نفوذ بیشتر چرخ ماشین آزمایش در نمونه نسبت به ملات‌های بدون GO می‌شود که با نتایج ارائه شده در مرجع [52] همخوانی دارد. در سوی دیگر اما آزمایشات انجام شده با اضافه کردن NS بیانگر اثر متفاوت NS در مقایسه با GO است. اضافه کردن 3٪ وزن سیمان NS منجر به مقاوم‌ترین ملات SCHSCM در بین آزمایشات انجام شده می‌باشد.

9. نتیجه‌گیری:

در طی این پژوهش، اثرات افزودنی‌های NS و GO بر روی مقاومت فشاری، کششی، خمشی و سایشی ملات SCHSCM مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین تأثیر هم‌زمان هردوی این نانومواد و میزان بهینه آنها در این تحقیق تعیین شده است. از بررسی آزمایشات مشخص گردید که مقاومت کششی، فشاری و خمشی ملات SCHSCM با افزودن هم‌زمان NS و GO ارتقاء خواهد یافت اما مقاومت سایشی ملات سیمانی با افزودن این نانومواد اندکی کاهش می‌یابد.

10. مراجع

- 1.J. Elsen, Microscopy of historic mortars: A review, Cem. Conc. Advn 36: 1416-1424, (2006).
- 2.V. Kumar, R. Singh, I. P. S. Ahuja, M. S. J. Hashemi, On technological solutions for repair and rehabilitation of heritage sites: a review, Advances in materials and processing technologies, (2019).

- 3.Y. Mohammadi, S. P. Singh, S. K. Kaushik, Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state, *Cons. Build. Mat* 22: 956-965, (2008).
- 4.H. E. Naddaf, R. Kazemi, Experimental evaluation of the effect of mix design ratios on compressive strength of cement mortars containing cement strength class 42.5 and 52.5 MPa, *procedia manufacturing* 22: 392-398, (2018).
- 5.A. Boumiz, C. Vernet, F. C. Tenoudjit, Mechanical properties of cement pastes and mortars at early ages: Evolution with time and degree of hydration, *Advn. Cem. Bas. Mat* 3: 94-106, (1996).
- 6.X. Chen, S. Wu, J. Zhou, Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar, *Cons. Build. Mat* 40: 869-874, (2013).
- 7.C. A. Issa, J. J. Assaad, Stability and bond properties of polymer-modified self-consolidating concrete for repair applications, *Mat. Struc* 50: 28, (2017).
- 8.M. K. G. Singh, H. K. Venkatanarayanan, Performance of self-consolidating high-strength mortars developed from Portland pozzolana cement for precast applications, *Mat. Civ. Eng* 32: 04019375, (2020).
- 9.M. Sahmaran, H. A. Christiano, I. O. Yaman, The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars, *Cem. Conc. Comp* 28: 432-440, (2006).
10. B. Xu, T. Chen, Y. Zhang, L. Jiang, Z. Liu, X. Li, Experimental study on preparation of high-strength mortar with abandoned super fine sand, *Advn. Eng. Res* 129: 336-342, (2017).
11. R. Huang, G. Li, C. Shi, Preparation of high strength mortar with silica fume and steel fiber, *Advn. Mat. Res* 739: 255-257, (2013).
12. G. Liao, W. Yao, A. She, C. Shi, J. Zuo, D. Wu, Interfacial design of nano-TiO₂ modified recycled concrete powder for building self-cleaning, *colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects* 661: 130925, (2023).
13. H. Sun, W. Wu, Y. Zhao, Y. Lin, S. Xu, T. Zhang, X. Zhang, F. Xing, J. Ren, Mechanical and durability properties of blended OPC mortar modified by low-carbon belite (C₂S) nanoparticles, *Journal of Cleaner Production* 305: 127087, (2021).
14. M. Almohammad-albakkar, K. Behfarnia, Effects of the combined usage of micro and nano-silica on the drying shrinkage and compressive strength of the self-compacting concrete, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, (2020).
15. P. V. R. K. Reddy, D. Ravi-Parsad, Graphene oxide reinforced cement concrete-a study on mechanical, durability and microstructure characteristics, *Fullerenes, nanotubes and carbon nanostructures* 31: 255-265, (2022).
16. E. Shamsaei, F. B. D. Souza, X. Yao, E. Benhelal, A. Akbari, W. Duan, Graphene-based nanosheets for stronger and more durable concrete: A review, *Cons. Build. Mat* 183: 642-660, (2018).
17. P. Sikora, P. Lukowski, K. Cendrowski, E. Horszczaruk, E. Mijowska, the effect of nanosilica on the mechanical properties of polymer-cement composites (PCC), *Procedia Engineering* 108: 139-145, (2015).
18. C. Zhuang, Y. Chen, the effect of nano-SiO₂ on concrete properties: a review, *Nanotechnol* 8: 562-572, (2019).
19. C. Zhou, F. Li, J. Hu, M. Ren, J. Wei, Q. Yu, Enhanced mechanical properties of cement paste by hybrid graphene oxide/carbon nanotubes, *Cons. Build. Mat* 134: 336-345, (2017).

20. L. Zhao, X. Guo, Y. Liu, C. Ge, L. Guo, X. Shu, J. Liu, Synergistic effects of silica nanoparticles/polycarboxylate superplasticizer modified graphene oxide on mechanical behavior and hydration process of cement composites, *RSC Adv.* 7: 16688–16702, (2017).
21. L. Zhao, X. Guo, C. Ge, Q. Li, L. Guo, X. Shu, J. Liu, Mechanical behavior and toughening mechanism of polycarboxylate superplasticizer modified graphene oxide reinforced cement composites, *Composites Part B* 113: 308–316, (2017).
22. A. M. Rashed, A comprehensive overview about the effect of nano-SiO₂ on some properties of traditional cementitious materials and alkali-activate fly-ash, *Cons. Build. Mat* 52: 437-464, (2014).
23. M. Shakiba, P. Rahgozar, A. R. Elahi, R. Rahgozar, effect of activated pozzolan with Ca (OH)₂ and nano-SiO₂ on microstructure and hydration of high-volume natural pozzolan paste, *Civ. Eng. Jour* 4 (10): 24-37, (2018).
24. M. Jalal, E. Mansouri, M. Sharifipour, A.R. Pouladkhan, Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles, *Mater. Des* 34:389-400, (2012).
25. C. Liu, X. Huang, Y. Wu, X. Deng, Z. Zheng, the effect of graphene oxide on the mechanical properties, impermeability and corrosion resistance of cement mortar containing mineral admixtures, *Cons. Build. Mat* 288, (2021).
26. S. Lv, Y. Ma, C. Qiu, T. Sun, J. Liu, Q. Zhou, Effect of graphene oxide nanosheets on microstructure and mechanical properties of cement composites, *Cons. Build. Mat* 49:121-127, (2013).
27. Y. Wang, J. Yang, D. Ouyang, Effect of graphene oxide on mechanical properties of cement mortar and its strengthening mechanism, *Materials*, 12, 3753, (2019).
28. L.P. Singh, S.R. Karade, S.K. Bhattacharyya, M.M. Yousuf, S. Ahalawat, Beneficial role of nanosilica in cement-based material – A review, *Cons. Build. Mat* 47:1069-1077, (2013).
29. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, Electric field effect in atomically thin carbon films, *Science* 306(5696):666-669, (2004).
30. X. Huang, L. Z. Liu, S. Zhou, J. J. Zhao, Physical properties and device applications of graphene oxide, *Front. Phys.* 15, (2020).
31. M. Chakraborty, M. S. Hashmi, Wonder material graphene: properties, synthesis and practical applications, *Advances in materials and processing technologies*, (2018).
32. M. Du, H. Jing, Y. Gao, H. Su, H. Fang, Carbon nanomaterials enhanced cement-based composites: advances and challenges, *nanotechnol* 9:115-135, (2020).
33. A.M. Said, M.S. Zeidan, M.T. Bassuoni, Y. Tian, Properties of concrete incorporating nano-silica, *Cons. Build. Mat* 36:838-844, (2012).
34. H. Du, S. Du, X. Liu, Durability performances of concrete with nano-silica, *Cons. Build. Mat* 73:705-712, (2014).
35. L.G. Li, J.Y. Zheng, J. Zhu, A.K.H. Kwan, Combined usage of micro-silica and nano-silica in concrete: SP demand, cementing efficiencies and synergistic effect, *Cons. Build. Mat* 168:622-632, (2018).
36. F. T. Isfahani, E. Redaelli, F. Lollini, W. Li, L. Bertolini, Effects of nanosilica on compressive strength and durability properties of concrete with different water to binder ratios, *Adv. Mat. Sci. Eng* 8453567, (2016).

37. M. Somasri, B. N. Kumar, Graphene oxide as nano material in high strength self-compacting concrete, *Materials Today: Proceedings* 43:2280-2289, (2021).
38. Y. Shang, D. Zhang, C. Yang, Ya. Liu, Yo. Liu, Effect of graphene oxide on the rheological properties of cement pastes, *Cons. Build. Mat* 96:20-28, (2015).
39. J. Bjornstrom, A. martinelli, A. Matic, L. Borjesson, I. Panas, Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement, *Chem. Phys. Lett* 392:242-248, (2004).
40. K. Sobolev, I. Flores, L.M. Torres-Martinez, P.L. Valdez, E. Zarazua, E.L. Cuellar, Engineering of SiO₂ Nanoparticles for Optimal Performance in Nano Cement-Based Materials, *Nanotechnology in Construction* 3, (2009).
41. B.W. Jo, C.H. Kim, G.H. Tae, J.B. Park, Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles, *Cons. Build. Mat* 21:1351-1355, (2007).
42. L. Lu, D. Ouyang, Properties of Cement mortar and ultra-high strength concrete incorporating graphene oxide nanosheets, *Nanomater* 7:187, (2017).
43. F. Babak, H. Abolfazl, R. Alimorad, G. Parviz, Preparation and mechanical properties of graphene oxide: cement nanocomposites, *Sci. World* 2014, (2014).
44. B. Han, Q. Zheng, S. Sun, S. Dong, L. Zhang, X. Yu, J. Ou, Enhancing mechanisms of multi-layer graphene to cementitious composites, *Composites: Part A* 101:143-150, (2017).
45. ASTM C 144-02, Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar, (2002).
46. ASTM C 494/C 494M-99a, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, (1999).
47. INSO 2930-1, Admixtures for Concrete, Mortar and Grout-Part 1: Common Requirements, (2014).
48. A. Kedir, M. Gamachu, A. G. Alex, Cement-Based Graphene Oxide Composites: A Review on Their Mechanical and Microstructure Properties. *Journal of Nanomaterials* 6741000, (2023).
49. ASTM C109/C109M-13, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), (2013).
50. INSO 755-2, Terrazzo tiles- part 2: For External Uses Specifications and Test methods, (2014).
51. ASTM C307-03, Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacing, (2003).
52. Z. Rong, W. Sun, H. Xiao, G. Jiang, Effects of nano-SiO₂ particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites, *Cem. Conc. Comp* 56: 25-31, (2015).
53. S. Du, Z. tang, J. Zhong, Y. Ge, X. Shi, Effect of admixing graphene oxide on abrasion resistance of ordinary Portland cement concrete, *AIP Advances* 9, 105110, (2019).
54. H. Li, M. Zhang, J. Ou, Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement, *Wear* 260: 1262-1266, (2006).