

بررسی تأثیر استفاده از انواع مختلف فوق روان کننده بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی ملات‌های سیمانی حاوی اکسید گرافن و روباره کوره بلند آهن‌گدازی

حسین تسلیمی خراط محله

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد فومن و شفت، دانشگاه آزاد اسلامی، فومن، ایران.

میرعلیمحمد میرگذارلنگرودی *

استادیار گروه مهندسی عمران، واحد فومن و شفت، دانشگاه آزاد اسلامی، فومن، ایران.

حمیدرضا حسین زاده

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد فومن و شفت، دانشگاه آزاد اسلامی، فومن، ایران.

سید مجتبی استوار چماچایی

مربی گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران.

چکیده

یکی از انواع نانوموادى که در تحقیقات اخیر، اثرات تقویت‌کنندگی آن بر مخلوط‌های سیمانی مشاهده شده است، اکسید گرافن می‌باشد. باوجود این، پخش شونده‌گی یکنواخت و پایدار این نانوصفات در کامپوزیت‌های سیمانی، موردی است که استفاده از آن را به چالشی جدی تبدیل کرده است. یکی از روش‌های پیشنهادی به منظور پخش یکنواخت اکسید گرافن، استفاده از افزودنی‌های فوق روان‌کننده و پوزولان‌ها می‌باشد. لذا این مطالعه به ارزیابی تأثیر استفاده از انواع مختلف فوق روان‌کننده بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی ملات‌های سیمانی حاوی اکسید گرافن و روباره کوره بلند آهن‌گدازی می‌پردازد. در این راستا، مخلوط‌هایی حاوی درصد‌های مختلف از اکسید گرافن، روباره کوره بلند آهن‌گدازی و سه نوع مختلف از فوق روان‌کننده ساخته شده و با هدف ارزیابی مشخصات فیزیکی و مکانیکی و همچنین، تأثیر نوع روان‌کننده مصرفی بر این مشخصات، در سنین مختلف تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن است که استفاده از اکسید گرافن به میزان ۰/۰۵ درصد وزنی بهترین عملکرد را از حیث اصلاح خواص فیزیکی و مکانیکی به همراه داشته است. از سویی دیگر، با حضور روباره در اختلاط، استفاده از اکسید گرافن به میزان ۰/۰۳ درصد وزن مصالح سیمانی منجر به بهبود مشخصات ملات‌های حاصل گردید. همچنین، استفاده از فوق روان‌کننده لیگنو-کربوکسیلات در اختلاط با و بدون حضور روباره منجر به بروز مشخصات مقاومتی بالاتر گردید که این امر می‌تواند گواهی بر پخش مناسب تر و پایداری بیشتر نانوصفات اکسید گرافن در ماتریس سیمانی باشد.

واژه‌های کلیدی: ملات سیمانی، روباره کوره بلند آهن‌گدازی، اکسید گرافن، مشخصات فیزیکی و مکانیکی، SEM.

* نویسنده مسئول: ali.mirgozar@iau.ac.ir

۱- مقدمه

سیمانی ایجاد می کنند، سبب بهبود مشخصات مکانیکی از جمله مقاومت فشاری و خمشی می گردند [۱۰-۱۲]. محققین با مقایسه کامپوزیت های سیمانی ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی و نمونه های حاوی سیمان آمیخته با ۰/۰۳ درصد وزنی اکسید گرافن، افزایش ۴۶ درصدی در مقاومت فشاری را گزارش نموده اند [۴]. رادمان و جورابچی طی مطالعه ای، افزایش ۱۸ درصدی در سن ۱۴ روز و ۱۵ درصدی در سن ۲۸ روز را برای مقاومت فشاری نمونه های حاوی اکسید گرافن گزارش نمودند. آن ها همچنین با اضافه کردن مقادیر مختلفی از اکسید گرافن از صفر تا ۰/۰۵ درصد، نشان دادند که تغییرات مقاومت فشاری در محدوده مورد استفاده، روندی افزایشی و خطی را دنبال می کند [۱۳]. پن و همکاران مشاهده کردند که بهبود مقاومت خمشی ناشی از استفاده از اکسید گرافن، نسبت به بهبود مقاومت فشاری، قابل توجه تر بوده است [۴]. با وجود این، تحقیقات لو و همکاران نشان داده است که افزایش مقادیر مختلف اکسید گرافن، به صورت خطی باعث بهبود مقاومت های فشاری و خمشی نمی شود. نتایج آنها حاکی از آن است که با افزودن اکسید گرافن تا ۰/۰۳ درصد، مقاومت خمشی بهبود می یابد. این در حالیست که اضافه کردن مقادیر بیشتر اکسید گرافن منجر به ایجاد کاهش اندکی در مقاومت خمشی خواهد شد [۱۰]. پنگ و همکاران نیز طی آزمایش های خود تأیید کردند که مقاومت های خمشی و فشاری نمونه های حاوی اکسید گرافن ابتدا افزایش یافته و سپس با افزایش در مقدار اکسید گرافن مصرفی در ساخت مخلوط ها، مقادیر مقاومت روند کاهشی به خود می گیرد. آنها حداکثر مقاومت به دست آمده را برای مقاومت های خمشی و فشاری در درصد های مختلفی از میزان اکسید گرافن مصرفی گزارش نمودند [۱۴]. دوی و خان با افزایش درصد اکسید گرافن تا ۰/۰۸ درصد، افزایش مقاومت های فشاری و کششی در نمونه های کامپوزیت سیمانی حاوی درصد های بالاتری از اکسید گرافن را تأیید کردند [۱۵].

باید به این نکته توجه کرد که اگرچه نانو صفحات اکسید گرافن با استفاده از انرژی فراصوت متوسط، پخش پذیری مناسبی در آب را از خود نشان می دهند، ولی زمانی که در محیط با قلیائیت بالای سیمانی پخش می شوند، به دلیل مقادیر بالای یون های چند ظرفیتی

خمیر سیمان سخت شده به عنوان ماده اصلی چسباننده بتن دارای نواقصی همچون شکنندگی و مقاومت کششی کم است. معرفی نانومواد و استفاده از آنها در کامپوزیت های سیمانی سبب بهبود در مشخصات مکانیکی، دوام و اصلاح ساختار در مقیاس نانو گردید [۱]. بسیاری از محققان در راستای بهبود مشخصات کامپوزیت های سیمانی با استفاده از اعمال اصلاحات در مقیاس نانو، پژوهش های متنوعی را توسعه دادند که در نتیجه آنها، خواص مطلوب تری نسبت به کامپوزیت های سیمانی ساده حاصل گردید. در دهه اخیر، اکسید گرافن^۱ با توجه اثرات تقویت کنندگی که بر کامپوزیت های سیمانی می گذارد بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲-۴]. این ماده از صفحاتی با پایه کربنی تشکیل شده است که با استفاده از روش هومر اصلاح شده از گرافیت بدست می آید [۵]. استفاده از روش طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)^۲ نشان می دهد که بخش قابل توجهی از توده اکسید گرافن را لایه هایی از اتم های کربن با هیبریداسیون SP² و همچنین گروه های عاملی کربوکسیل، هیدروکسیل، اپوکسید و کربونیل تشکیل می دهند [۶-۸]. این گروه های عاملی اکسیژن دار که در بالا و کناره های صفحات اکسید گرافن قرار دارند، آنها را آب دوست کرده و منجر به پخش پذیری مناسب تری در آب می شوند. بعلاوه، این گروه های عاملی فعال، به همراه سطح ویژه بالای صفحات اکسید گرافن، می توانند با به وجود آوردن کانون های هسته زایی، سبب تسریع فرایند هیدراسیون سیمان شوند. همچنین این امکان وجود دارد که واکنش شیمیایی مابین محصولات هیدراسیون و این گروه های عاملی، منجر به تشکیل پیوندهای کووالانسی شود. این امر تأثیر مثبتی را در انتقال نیرو و جلوگیری از تمرکز تنش در ماتریس سیمانی به همراه خواهد داشت [۷, ۸]. از سوی دیگر، تحلیل تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)^۳ نشان دهنده سطح ویژه بالا و همچنین مورفولوژی چین خورده در صفحات اکسید گرافن است. این چین خوردگی در صفحه ها می تواند در قفل شدن و تقویت پیوند بین لایه های اکسید گرافن و خمیر سیمان نقش قابل توجهی ایفا کند [۹].

صفحات اکسید گرافن با ایجاد پیوند مستحکمی که با ماتریس

³ . Scanning Electron Microscopy

¹ . Graphene Oxide Nanosheets

² . Energy-dispersive X-ray Spectroscopy

در نمونه‌های سیمانی را گسترش دادند [۲۲]. وانگ و همکاران، با افزودن همزمان خاکستر بادی و اکسید گرافن به نمونه‌های سیمانی، بهبود عمل هیدراتاسیون، کاهش تخلخل مخلوط سیمانی و توزیع بهتر اکسید گرافن در مخلوط را نتیجه گرفتند [۲۳]. پژوهش‌های بیشتر بر روی این موضوع گواه بر افزایش مقاومت فشاری و خمشی و همچنین کاهش جذب آب در استفاده هم‌زمان از پوزولان و اکسید گرافن در مخلوط سیمانی است [۲۴، ۲۵]. از دیگر روش‌ها برای توزیع بهتر ذرات اکسید گرافن در نمونه‌های سیمانی می‌توان به استفاده از فوق‌روان‌کننده اشاره کرد. ساختار شیمیایی این مواد باعث جدا شدن نانوذرات اکسید گرافن از یون‌های کلسیم در سیمان می‌شود. ژائو و همکاران با افزودن فوق‌روان‌کننده و کاهش نسبت آب به سیمان، توزیع بهتر اکسید گرافن در مخلوط سیمانی را مورد مطالعه قرار دادند که در نتیجه، منجر به افزایش ۲۲/۵۹ و ۲۴/۵۶ در مقاومت‌های فشاری و خمشی گردید [۲۶]. مطالعه حاضر، به بررسی آزمایشگاهی اثر هم‌زمان استفاده از نانوصفحات اکسید گرافن و روباره کوره بلند آهن‌گذاری در اختلاط، در حضور سه نوع فوق‌روان‌کننده مختلف می‌پردازد و بررسی مشخصات فیزیکی و مکانیکی و نیز تأثیر هر یک از انواع فوق‌روان‌کننده‌ها بر مشخصات اختلاط مورد هدف است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

برای ساخت کامپوزیت‌های سیمانی مورد مطالعه از سیمان پرتلند نوع دو، تولید شده در کارخانه سیمان هگمتان استفاده شده است. سیمان مصرفی حائز شرایط استاندارد ASTM C150 [۲۷] بوده و مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

ماسه مصرفی گردگوشه و رودخانه‌ای بوده که بر اساس استاندارد ASTM C136 [۲۸] دانه‌بندی شده و دارای چگالی در حالت اشباع با سطح خشک برابر 2600 Kg/m^3 ، جذب آب ۲/۴٪ و مدول نرمی برابر ۲/۷۵ است. آب مصرفی در تمامی مراحل آزمایش اعم از شست و شوی سنگ‌دانه‌ها، اختلاط و عمل‌آوری نمونه‌ها مطابق با مبحث نهم مقررات ملی ساختمان است. نمودار

(به طور خاص یون‌های کلسیم) که می‌توانند با اثر پل زدگی، اکسید گرافن تک لایه را به چند لایه تبدیل کنند، بلافاصله کلوخه می‌شوند. این امر نه تنها باعث می‌شود که از خواص این نانوصفحات به خوبی استفاده نشود، بلکه حتی منجر به ایجاد نواحی ضعیف و در نتیجه، حصول نتیجه عکس در خواص کامپوزیتهای سیمانی گردد [۷، ۱۶]. اخیراً تحقیقاتی در خصوص اثر مواد پوزولانی بر پخش پذیری نانو صفحات اکسید گرافن و تأثیر استفاده توأمان اکسید گرافن و پوزولان‌ها بر مشخصات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی انجام شده است [۱۷، ۱۸]. فرضیاتی که برای بهبود پخش پذیری اکسید گرافن بوسیله مواد پوزولانی مطرح شده است شامل اثر ممانعت فضایی بین اکسید گرافن و یون‌های کلسیم و همچنین کاهش غلظت یون کلسیم از طریق واکنش پوزولانی می‌باشد.

از جمله پوزولان‌های رایج در ساخت کامپوزیت‌های سیمانی می‌توان به روباره کوره بلند آهن‌گذاری اشاره نمود. افزودن این روباره به مخلوط‌های سیمانی به وضوح موجب افزایش مقاومت آن‌ها خواهد شد [۱۹]. البته بر اساس تحقیقات صورت گرفته، استفاده از روباره کوره بلند آهن‌گذاری به‌عنوان افزودنی سیمانی در اختلاط، منجر به کاهش مقاومت مکانیکی مخلوط‌ها در سنین اولیه می‌شود. بستنسی و همکاران، طی مطالعاتی، کاهش مقاومت در سنین اولیه را تأیید کردند و این کاهش مقاومت را متناسب با افزایش مقدار روباره گزارش دادند [۲۰]. این کاهش مقاومت مکانیکی را می‌توان به کاهش سرعت فرایند هیدراتاسیون در سنین اولیه نسبت داد. کاهش در سرعت هیدراتاسیون در سنین اولیه، منجر به باقی ماندن بخشی از آب اختلاط - به دلیل عدم ورود به واکنش هیدراتاسیون - و در نتیجه آن، افزایش مقدار آب به سیمان می‌شود و در نهایت، مقاومت مکانیکی پایین‌تری را نتیجه می‌دهد. بالعکس، با گذشت زمان، روباره در حضور آب با هیدروکسید کلسیم^۱ حاصل از هیدراتاسیون واکنش می‌دهد و منجر به تولید مقادیر بیشتری از ژل کلسیم سیلیکات هیدرات^۲ می‌گردد که این واکنش ثانویه، منجر به تشکیل ساختاری به مراتب قوی‌تر در مقایسه با ماتریس سیمانی نمونه‌های فاقد روباره می‌شود [۲۱]. محققان دیگر نیز مطالعه بر روی اثر توأمان اکسید گرافن و پوزولان

^۱ . Calcium hydroxide (CH)

^۲ . Calcium silicate hydrates (C-S-H)

منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی در این پژوهش و همچنین حدود پایین و بالای ماسه استاندارد در شکل ۱ نشان داده شده است.

مشخصات نانوصفحات اکسید گرافن استفاده شده در این پژوهش نیز در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانومواد مورد استفاده با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان

ترکیب شیمیایی	درصد های تشکیل دهنده
SiO ₂	۲۱/۳۲
Al ₂ O ₃	۴/۸۱
Fe ₂ O ₃	۳/۸۳
CaO	۶۲/۸۵
MgO	۱/۴۸
K ₂ O	۰/۶۹
Na ₂ O	۰/۴۷
SO ₃	۲/۳۲
TiO ₂	-
LOI	۲/۰۴

جدول ۳- خصوصیات فیزیکی روباره کوره بلند آهن گدازی

اندازه ذرات (μm)	سطح مخصوص (gr/cm ²)	وزن مخصوص (gr/cm ³)
۱۵۰	۲۴۳۰	۲,۳۱

جدول ۴- مشخصات شیمیایی روباره کوره بلند آهن گدازی

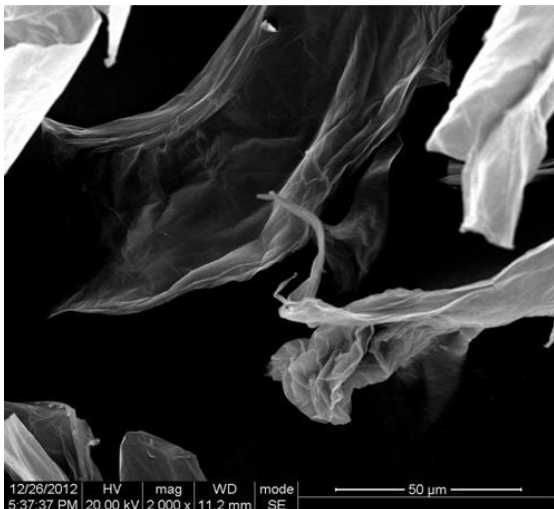
ترکیب شیمیایی	درصد های تشکیل دهنده
SiO ₂	۳۵/۸
Al ₂ O ₃	۱۵/۲۴
Fe ₂ O ₃	۰/۹۶
CaO	۳۱/۵۳
MgO	۱۲/۱۶
K ₂ O	۰/۷۲
Na ₂ O	۰/۵۳
SO ₃	۰/۹۷
TiO ₂	-
LOI	۰/۴۱

جدول ۵- مشخصات اکسید گرافن مورد استفاده [۲۹]

ظاهر	پودر مشکلی
سطح مخصوص (BET)	100-300
چگالی توده ای	0.3 gr/Cm ³
ساختار	۶ تا ۱۰ لایه
میانگین اندازه ذرات	3.4-7 nm
ابعاد جانبی ذرات	5-10 μm

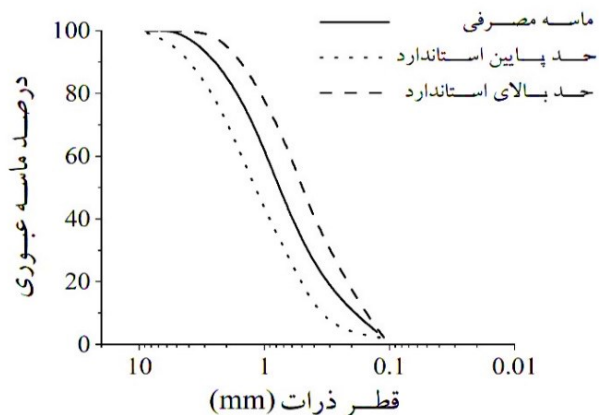
جدول ۲- خصوصیات فیزیکی سیمان

انقباض اتوکلاو (%)	گیرش نهایی (دقیقه)	گیرش اولیه (دقیقه)	سطح مخصوص (cm ² /gr)	وزن مخصوص (gr/cm ³)
۰/۰۷	۲۰۵	۱۵۰	۲۹۱۰	۳/۱۵



شکل ۲- تصویر SEM نانوصفحات اکسید گرافن با بزرگنمایی

۲۰۰۰ برابر [۲۹]



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی

روباره کوره بلند آهن گدازی این پژوهش نیز دارای خصوصیات

به منظور تأمین روانی لازم و همچنین، کمک به توزیع یکنواخت نانومواد در مخلوط سیمانی و در نتیجه آن، ساخت نمونه‌های با ساختار همگن، از سه نوع فوق‌روان‌کننده استفاده شده است. مشخصات روان‌کننده‌های مصرفی در جدول ۶ ارائه شده است.

در روند طرح اختلاط جهت ساخت و آماده‌سازی نمونه‌های مورد آزمایش این مطالعه، اکسیدگرافن و روباره کوره بلند آهن‌گذاری به صورت خشک با سیمان مخلوط شده و تحت عنوان مواد سیمانی در طرح اختلاط شرکت داشتند.

جدول ۶- مشخصات انواع فوق‌روان‌کننده مصرفی

مشخصات فنی	نوع ۱	نوع ۲	نوع ۳
اسم	ژیکا پلاست ZP	Strusin R50	Struplast L70
پایه	پلی کربو کسيلات اصلاح شده	پلی کربو کسيلات اتر	ترکیبی لیگنو-کربو کسيلات
رنگ	کهربایی روشن	عسلی یا قهوه ای	قهوه ای
حالت فیزیکی	مایع	مایع	مایع
وزن مخصوص (Kg/Lit)	۱-۱/۲	۰/۰۲ ± ۱/۱۱	۰/۰۲ ± ۱/۱
تولید کننده	ژیکاوا	بسپار بتن ایرانیان هوشمند	بسپار بتن ایرانیان هوشمند

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش

به منظور دستیابی به نتایج قابل اعتماد از آزمایش‌ها، حصول اطمینان از توزیع یکنواخت اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط امری بدیهی است. این امر به‌ویژه در حین استفاده از نانوذرات در اختلاط از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌شود. چرا که کلوخه شدن نانوذرات منجر به عدم عملکرد مناسب آنها در مخلوط خواهد شد. لذا در این پژوهش ضمن به‌کارگیری الزامات استاندارد ASTM C305 [۳۰]، اقدامات لازم در روش اختلاط برای استفاده از مواد فوق‌روان‌کننده و بررسی تأثیر آنها در همگن‌سازی مخلوط معمول می‌گردد. از این جهت، نخست برای به‌دست آوردن درصد مناسب مواد فوق‌روان‌کننده، ملات‌های آزمایشی با درصدهای مختلف فوق‌روان‌کننده ساخته و روانی نمونه‌ها توسط میز جریان کنترل می‌گردد. برای ساخت ملات‌ها ابتدا محلول آب-فوق‌روان‌کننده را در جام مخلوط‌کن ریخته و دستگاه با سرعت کم (5 ± 140 دور در دقیقه محوری و ۶۲ دور در دقیقه مداری) روشن می‌شود. پس از اضافه کردن مواد سیمانی به محلول، اختلاط به مدت یک دقیقه ادامه می‌یابد. در ادامه، تمامی ماسه به آرامی و در مدت ۳۰ ثانیه به مخلوط اضافه می‌گردد. پس از اتمام ریختن ماسه، سرعت متوسط گردش جام اختلاط را تا مقدار (5 ± 140 دور در دقیقه محوری و ۶۲ دور در دقیقه مداری) افزایش داده و عمل اختلاط به مدت ۳۰ ثانیه ادامه خواهد یافت. پس از استراحت ملات‌ها به مدت ۹۰ ثانیه، اختلاط نهایی به مدت یک دقیقه انجام و ساخت ملات‌ها به پایان می‌رسد. کلیه نمونه‌های ساخته‌شده به

مدت ۲۴ ساعت در قالب مناسب آزمایش نگه‌داری شده و پس از آن تا زمان انجام آزمایش در حوضچه آب نگه‌داری خواهد شد. جهت بررسی تأثیر نوع روان‌کننده بر مشخصات کامپوزیت‌های سیمانی حاوی اکسید گرافن و روباره کوره بلند آهن‌گذاری، اختلاط‌های حاوی صفر، ۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۵ و ۰/۰۵ درصد وزنی اکسیدگرافن در حضور صفر و ۱۰ درصد وزنی روباره، با اضافه کردن سه نوع فوق‌روان‌کننده طراحی شد. مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها در سنین مختلف ۷، ۱۴ و ۲۸ روز اندازه‌گیری و مقایسه شد. همچنین آزمایش‌های جذب آب و چگالی حجمی در سن ۲۸ روز نمونه‌ها انجام گردید. در تمامی طرح‌های اختلاط این پژوهش، نسبت آب به سیمان و نیز نسبت ماسه به سیمان به ترتیب برابر ۰/۵ و ۲/۷۵ لحاظ شده‌است. در جدول شماره ۷ که مشخصات طرح‌های اختلاط این پژوهش نمایش داده شده است، حرف C نشان‌دهنده نمونه بدون روباره، حرف S بیان‌کننده طرح با حضور ۱۰ درصد روباره، حرف G و عدد جلوی آن بیانگر صدم درصد شرکت نانوصفحات اکسیدگرافن و همچنین حرف P و عدد پس از آن بیان‌کننده نوع فوق‌روان‌کننده مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها می‌باشد.

۲-۳- روند انجام آزمایش‌ها

۲-۳-۱- چگالی حجمی و جذب آب

مقدار جذب آب در یک نمونه سیمانی در واقع بیان‌گر حجم و گستردگی حفرات مویینه و به عبارتی نشان‌دهنده میزان تخلخل آن می‌باشد.

جدول ۷- طرح‌های اختلاط بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب

ردیف	اسم طرح	سیمان	روباره کوره آهنگدازی	نانو اکسید گرافن	ماسه	آب	نوع فوق روان کننده	درصد استفاده فوق روان کننده
۱	CP1	۵۴۰	۰	۰	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۱	۰/۳
۲	CG1P1	۵۴۰	۰	۰/۰۵۴	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۱	۰/۳
۳	CG3P1	۵۴۰	۰	۰/۱۶۲	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۱	۰/۳
۴	CG5P1	۵۴۰	۰	۰/۲۷۰	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۱	۰/۳
۵	CP2	۵۴۰	۰	۰	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۲	۰/۳
۶	CG1P2	۵۴۰	۰	۰/۰۵۴	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۲	۰/۳
۷	CG3P2	۵۴۰	۰	۰/۱۶۲	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۲	۰/۳
۸	CG5P2	۵۴۰	۰	۰/۲۷۰	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۲	۰/۳
۹	CP3	۵۴۰	۰	۰	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۳	۰/۳
۱۰	CG1P3	۵۴۰	۰	۰/۰۵۴	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۳	۰/۳
۱۱	CG3P3	۵۴۰	۰	۰/۱۶۲	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۳	۰/۳
۱۲	CG5P3	۵۴۰	۰	۰/۲۷۰	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۳	۰/۳
۱۳	SP1	۴۸۶	۵۴	۰	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۱	۰/۵
۱۴	SG1P1	۴۸۶	۵۴	۰/۰۵۴	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۱	۰/۵
۱۵	SG3P1	۴۸۶	۵۴	۰/۱۶۲	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۱	۰/۵
۱۶	SG5P1	۴۸۶	۵۴	۰/۲۷۰	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۱	۰/۵
۱۷	SP2	۴۸۶	۵۴	۰	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۲	۰/۵
۱۸	SG1P2	۴۸۶	۵۴	۰/۰۵۴	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۲	۰/۵
۱۹	SG3P2	۴۸۶	۵۴	۰/۱۶۲	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۲	۰/۵
۲۰	SG5P2	۴۸۶	۵۴	۰/۲۷۰	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۲	۰/۵
۲۱	SP3	۴۸۶	۵۴	۰	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۳	۰/۵
۲۲	SG1P3	۴۸۶	۵۴	۰/۰۵۴	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۳	۰/۵
۲۳	SG3P3	۴۸۶	۵۴	۰/۱۶۲	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۳	۰/۵
۲۴	SG5P3	۴۸۶	۵۴	۰/۲۷۰	۱۴۸۵	۲۷۰	نوع ۳	۰/۵

دو ساعته به داخل آب برگردانده شده و پس از خشک کردن سطح آن‌ها، دوباره توزین خواهند شد. این مراحل تا زمانی که اختلاف جرم بین دو توزین متوالی، کمتر از ۰/۵ درصد وزن اندازه گیری شده سبک تر گردد، ادامه خواهد یافت. حال نمونه به کمک یک توری پلاستیکی که خاصیت جذب آب ندارد به داخل آبی که وزن ظرف و آب آن از قبل اندازه گیری شده است منتقل می‌شود. اختلاف وزن ایجاد شده به‌عنوان جرم غوطه‌وری نمونه یادداشت می‌گردد. سپس نمونه را از آب خارج کرده و پس از خشک کردن رطوبت سطح آن، توزین می‌شود و این جرم به‌عنوان جرم اشباع با سطح خشک منظور می‌شود.

در این پژوهش، آزمایش چگالی حجمی و جذب آب تحت استاندارد ASTM C948 [۳۱] بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵ سانتی‌متر انجام گردید. نتیجه نهایی به صورت میانگینی از آزمایش بر روی ۳ نمونه مکعبی گزارش شده است. جهت اندازه گیری چگالی حجمی، دو مقدار جرم اشباع با سطح خشک و جرم غوطه‌وری نمونه در آب مدنظر می‌باشد. بدین منظور نمونه‌های سیمانی پس از خشک شدن در محیط آزمایشگاه، در درون مخزن آب با دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. نمونه‌ها به مدت زمان بیشتر از ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور مانده و سپس سطح آنها به طور کامل خشک گردیده و توزین می‌شوند. پس از آن مجدداً نمونه‌ها در بازه های زمانی

سرعت اعمال بار 45 N/s در نظر گرفته شد. پس از طی مراحل آزمایش، مطابق رابطه ۳ مقاومت خمشی نمونه در دسترس خواهد بود.

$$S_f = \frac{3pl}{2bh^2} \quad (3)$$

S_f : مقاومت خمشی بر حسب مگاپاسکال

p : نیروی اعمالی در وسط دهانه بر حسب نیوتن

b : عرض مقطع بر حسب میلی متر

h : ارتفاع مقطع بر حسب میلی متر

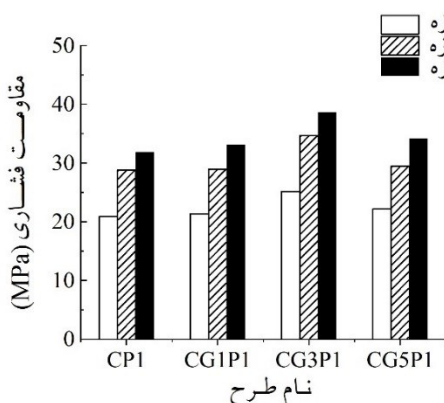
l : فاصله بین دو تکیه گاه بر حسب میلی متر

۳- تفسیر نتایج آزمایش‌ها

با توجه به جدول ۷، آزمایش‌ها بر روی ۲۴ سری طرح اختلاط با حضور سه نوع فوق‌روان‌کننده، چهار درصد وزنی صفر، ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ درصد اکسید گرافن و همچنین دو درصد وزنی صفر و ۱۰ درصد روبراه کوره بلند آهن‌گذاری انجام شد.

۳-۱- مقاومت فشاری

نتایج حاصل از انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در شکل‌های ۳ الی ۹ ارائه شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، استفاده از اکسید گرافن در تمامی طرح‌ها سبب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه حاوی سیمان معمولی شده است. اما با توجه به روند کلی نمودارها، مشاهده می‌شود که استفاده از اکسید گرافن از صفر تا ۰/۰۳ درصد وزنی در ابتدا باعث افزایش مقاومت فشاری خواهد شد و روند کلی مقاومت فشاری صعودی خواهد بود. اما این روند پس از تجربه بیشینه مقاومت، حین استفاده از اکسید گرافن به میزان ۰/۰۳ درصد وزنی، با افزایش مقدار اکسید گرافن شکل کاهشی به خود گرفته و مقادیر مقاومت فشاری تقلیل می‌یابند.



شکل ۳- مقاومت فشاری: فاقد روبراه- فوق‌روان‌کننده نوع ۱

حال با توجه به رابطه ۱، چگالی نمونه به دست خواهد آمد.

$$\text{جرم حجمی} = \frac{B}{B-A} \quad (1)$$

A: جرم غوطه وری B: جرم اشباع با سطح خشک

برای تعیین میزان جذب آب نمونه‌ها، پس از قرار دادن آنها در گرمخانه با دمای ۱۰۰ الی ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، اقدام به توزین نمونه خشک می‌گردد. سپس نمونه را در بازه‌های زمانی ۲ ساعته به داخل اون برگردانده و مجدداً اقدام به توزین آن می‌شود. این روند تا زمانی که تفاضل جرم بین دو اندازه گیری متوالی کمتر از ۰/۵ وزن اندازه گیری شده سبک تر گردد، ادامه خواهد داشت. در نهایت جرم آخرین نمونه به عنوان جرم خشک نمونه در محاسبه مقدار جذب آب طبق رابطه ۲ منظور می‌شود.

$$\text{جذب آب} = \frac{B-C}{C} \times 100 \quad (2)$$

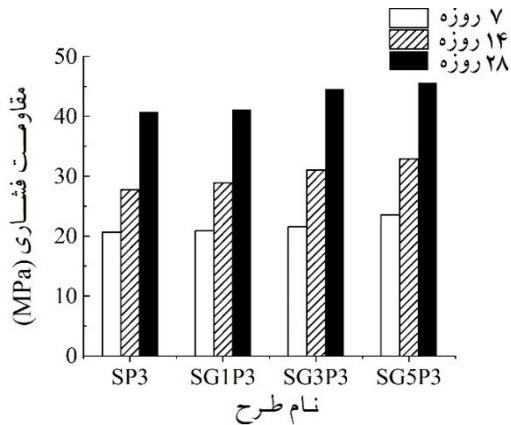
B: جرم اشباع با سطح خشک C: جرم خشک شده در اون

۳-۲- مقاومت فشاری

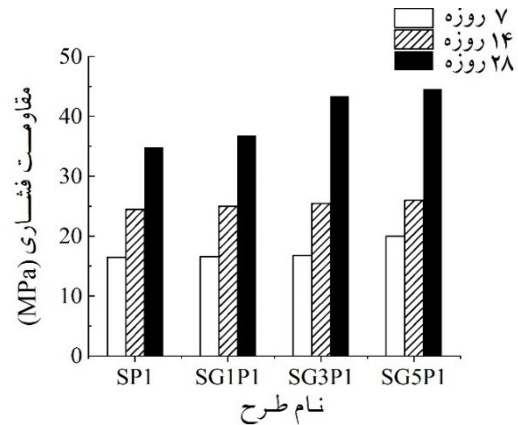
مطابق استاندارد ASTM C109 [۳۲] از نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵ سانتی‌متر در آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های سیمانی استفاده شده است. ملات طی ۴ مرحله درون قالب قرار گرفته و در هر مرحله با ۸ ضربه کوبیده می‌شود. سپس سطح آن‌ها صاف و هموار و از دانه‌های سست و ذرات اضافه عاری می‌گردد. بارگذاری با سرعت ۸۵۰ N/s انجام و نتیجه آزمایش بر اساس میانگین مقاومت‌های فشاری ۳ نمونه گزارش شده است.

۳-۳- مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی نیز بر روی نمونه‌هایی با شکل هندسی منشور و به ابعاد ۴×۴×۱۶ سانتی‌متر انجام و در آن سعی بر رعایت حدود الزامات استاندارد ASTM C348 [۳۳] گردید. پر کردن قالب‌ها از ملات سیمانی با متراکم کردن و سپس صاف کردن سطح نمونه‌ها صورت می‌پذیرد. زدودن سطح نمونه‌ها از ذرات سست چسبیده و صاف کردن آن‌ها جهت مناسب بودن محل اعمال بار به نمونه و درستی انتقال بار امری ضروری است. پس از عمل آوری و در سن انجام آزمایش، نمونه‌ها پس از استقرار بر روی تکیه‌گاه‌هایی با فاصله ۱۲ سانتی‌متر از یکدیگر، به صورت عمود بر طول منشور و در وسط دهانه بارگذاری خواهند شد.



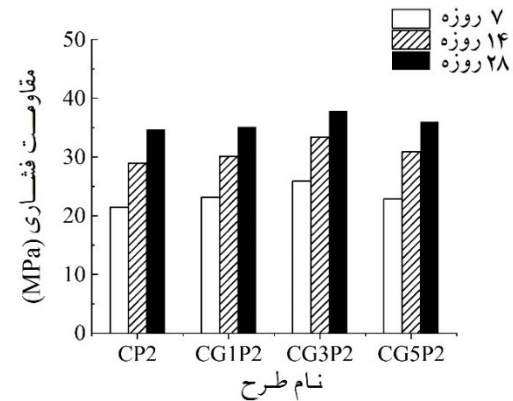
شکل ۳- مقاومت فشاری: با روباره- فوق‌روان‌کننده نوع ۳



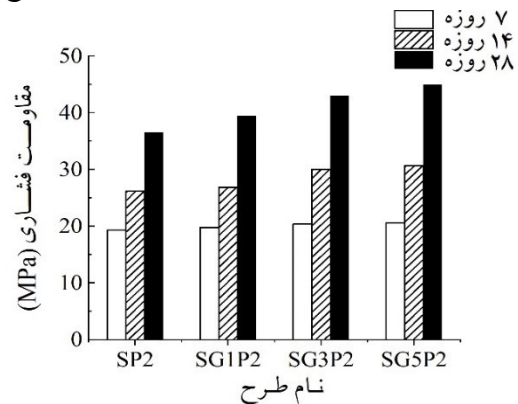
شکل ۴- مقاومت فشاری: با روباره- فوق‌روان‌کننده نوع ۱

بر اساس نتایج حاصل، استفاده از روباره کوره بلند آهن گذاری در کلیه اختلاط‌ها منجر به کسب مقاومت فشاری بیشتر در سن ۲۸ روز نسبت به کلیه طرح های متناظر فاقد روباره می گردد. نکته قابل توجه دیگر در طرح حاوی روباره آن است که بر خلاف طرح های فاقد روباره که پس از بیشینه مقاومت در ۰/۰۳ درصد وزنی نانوذرات اکسیدگرافن، روندی نزولی در مقاومت فشاری را تجربه می کنند، نمودارهای مقاومت فشاری طرح های حاوی روباره همواره در حالت صعودی بوده و با افزایش مقادیر نانوذرات اکسیدگرافن، سطوح بالاتری از مقاومت فشاری را تجربه می نماید. با توجه به توضیح های بیان شده، واضح است که در پژوهش حاضر بیشترین مقاومت فشاری مربوط به طرح حاوی ۰/۰۵ درصد اکسیدگرافن و روباره می باشد. همچنین، با دقت در نتایج می توان دریافت که استفاده از فوق‌روان‌کننده نوع سوم (لیگنو + کربوکسیلات) در طرح های حاوی اکسیدگرافن، مقاومت های فشاری بیشتری را نسبت به نمونه های حاوی دو نوع فوق‌روان‌کننده دیگر نشان می دهد. با دقت در نتایج ارائه شده در شکل ۷ مشاهده می گردد که مقاومت فشاری طرح های حاوی ۰/۰۳ درصد وزنی نانوذرات اکسیدگرافن در سنین مختلف به ترتیب ۱۷، ۱۵ و ۲۳ درصد از مقاومت فشاری نمونه های معمولی بیشتر است.

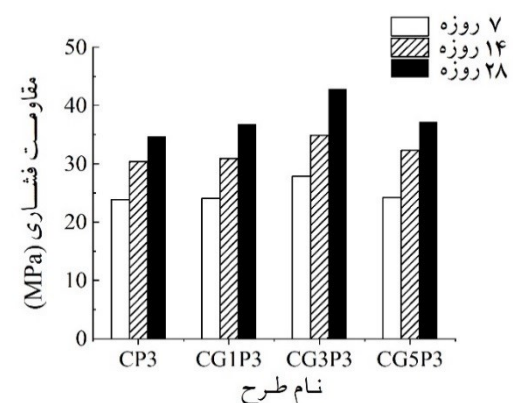
بر اساس نتایج حاصل، استفاده از روباره در ابتدا و در سنین پایین (۷ روز) منجر به کاهش مقاومت نسبت نمونه های سیمانی معمولی می شود. این کاهش مقاومت در نتایج حاصل از تحقیقات سایر محققین نیز مشهود است. جزئیات نتایج حاکی از آن است که طرح اشاره شده (SG5P3) در سن ۷ روزه به ترتیب ۳ و ۱ درصد



شکل ۵- مقاومت فشاری: فاقد روباره- فوق‌روان‌کننده نوع ۲



شکل ۶- مقاومت فشاری: با روباره- فوق‌روان‌کننده نوع ۲

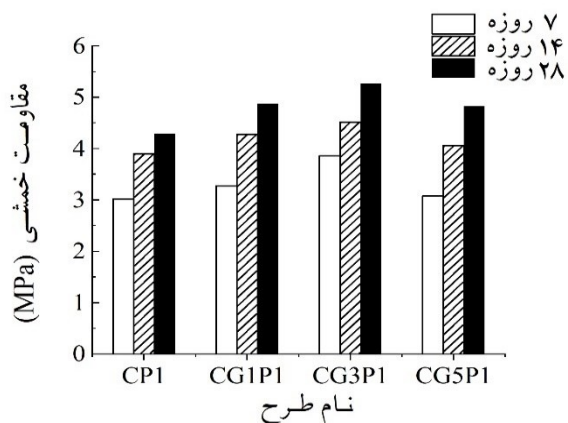


شکل ۷- مقاومت فشاری: فاقد روباره- فوق‌روان‌کننده نوع ۳

۲-۳- مقاومت خمشی

نمودارهای حاصل از انجام آزمایش مقاومت خمشی بر روی نمونه های مورد مطالعه در شکل های ۱۰ الی ۱۵ ارائه شده است.

بر اساس نتایج، ملاحظه می گردد که افزودن نانوصفحات اکسید گرافن به مخلوط سیمانی- در هر دو حالت حضور و عدم حضور روبراره- موجب رشد مقاومت خمشی می شود. با توجه به نتایج ارائه شده در نمودارهای شکل ۱۰، در طرح های فاقد روبراره با حضور فوق روان کننده پلی کربوکسیلات اصلاح شده، رشد مقاومت در سنین ۷ تا ۱۴ روز به مراتب بیشتر از سنین بالاتر است. بر اساس نتایج نشان داده شده، در سنین ۱۴ و ۲۸ روز، به ترتیب رشد مقاومتی در حدود ۳۳ و ۱۹ درصدی حاصل شده است. همانند مقاومت فشاری، در یک روند کلی، مقاومت خمشی طرح های فاقد روبراره نیز بیشینه مقدار خود را به هنگام مشارکت ۰/۰۳ درصد اکسید گرافن تجربه می کند.



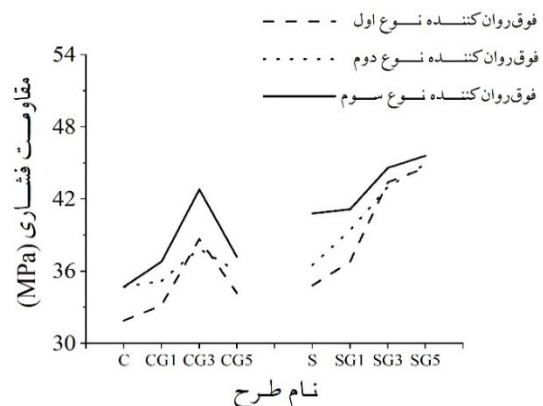
شکل ۱۰- مقاومت خمشی: فاقد روبراره- فوق روان کننده نوع ۱

شکل ۱۱ نشان می دهد که در حضور روان کننده نوع اول، اگرچه افزودن روبراره در سنین پایین موجب کاهش مقاومت خمشی نسبت به نمونه سیمانی معمولی و نمونه فاقد روبراره می شود، اما اضافه کردن اکسید گرافن به مرور باعث رشد مقاومتی می گردد. به نحوی که نمونه حاوی ۰/۰۳ درصد اکسید گرافن رشد مقاومتی ۸۴، ۷۱ و ۶۲ درصدی را در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز تجربه خواهد کرد.

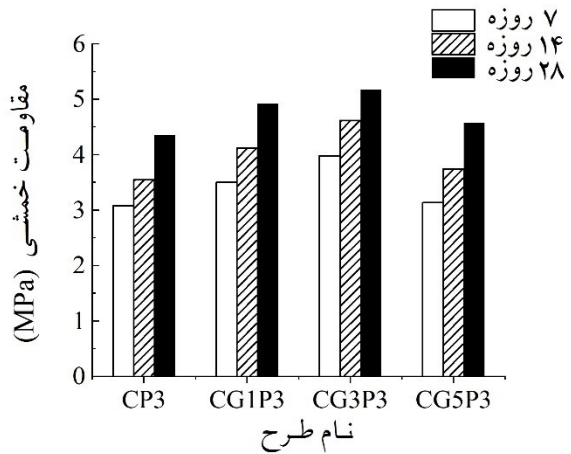
نمودارهای مقاومت خمشی با حضور فوق روان کننده های نوع دوم و سوم طی شکل های ۱۲ تا ۱۵ در دسترس است. به جز طرح های فاقد روبراره و حاوی فوق روان کننده نوع دوم که نتایج آزمایش تعیین مقاومت خمشی آنها در شکل ۱۲ به نمایش در آمده و بر

کاهش مقاومت فشاری نسبت به طرح های اصلاح شده فاقد روبراره (CG5P3) و طرح سیمان معمولی (CP3) داشته است. اما با افزایش سن نمونه ها، مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز به ترتیب ۲۲ و ۳۱ درصد نسبت به طرح های اصلاح شده فاقد روبراره (CG5P3) و طرح اختلاط شاهد حاوی فوق روان کننده نوع سوم (CP3) افزایش پیدا می کند.

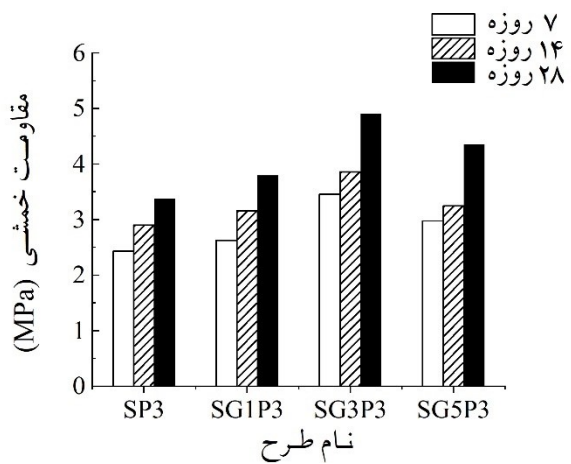
نمونه های حاوی دو نوع فوق روان کننده دیگر نیز در کسب مقاومت فشاری، روندی مشابه با فوق روان کننده نوع سوم را تجربه می کنند. بدین ترتیب که استفاده از اکسید گرافن در نمونه های فاقد روبراره به طور کلی منجر به افزایش مقاومت فشاری شده است. اما بیشترین نتیجه در استفاده از ۰/۰۳ درصد وزنی اکسید گرافن مشاهده شده است. شکل ۹ مقاومت های فشاری ۲۸ روزه نمونه های ساخته شده با سه نوع متفاوت فوق روان کننده را در دو حالت صفر و ۱۰ درصد روبراره را با یکدیگر مقایسه می نماید. در شکل، بیشینه مقاومتی مرتبط با طرح های فاقد روبراره با ۰/۰۳ درصد وزنی اکسید گرافن و طرح های حاوی روبراره با ۰/۰۵ درصد وزنی اکسید گرافن کاملاً مشهود است. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۹ می توان دریافت که استفاده از فوق روان کننده لیگنو + کربوکسیلات منجر به افزایش بیشتری در پارامتر مقاومت فشاری در مقایسه با دو نوع دیگر فوق روان کننده شده است. این افزایش در سنین بالاتر نمود بیشتری پیدا می کند. به ترتیبی که در طرح های فاقد روبراره، مقاومت نمونه مورد نظر به ترتیب ۱۱/۴ و ۹/۵ درصد مقاومت بیشتری نسبت به نمونه های ساخته شده با فوق روان کننده های نوع دوم و اول به دست آمده است. در نمونه های حاوی روبراره نیز افزایش مقاومت فشاری در طرح های حاوی فوق روان کننده نوع سوم کاملاً مشهود است



شکل ۹- مقاومت های فشاری در سن ۲۸ روز



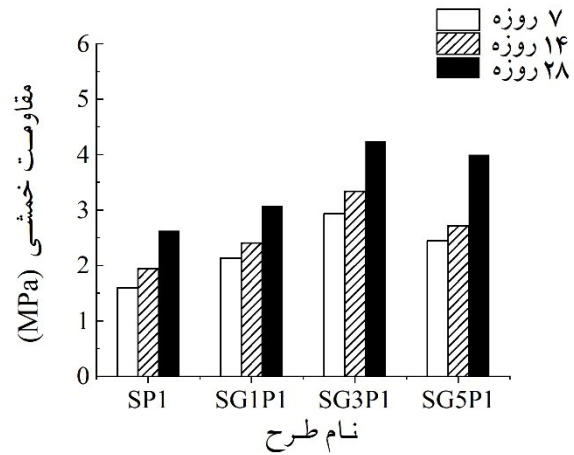
شکل ۱۴- مقاومت خمشی: فاقد روباره- فوق روان کننده نوع ۳



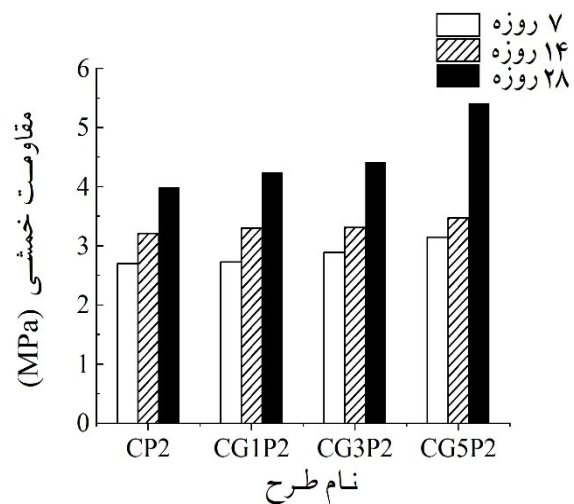
شکل ۱۵- مقاومت خمشی: با روباره- فوق روان کننده نوع ۳

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۴، برای نمونه‌های ساخته شده با فوق روان کننده نوع سوم حاوی ۰/۰۳ درصد اکسید گرافن و در غیاب روباره، به ترتیب ۲۹، ۳۰ و ۱۹ درصد افزایش در مقاومت خمشی برای سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در مقایسه با نمونه متناظر ساخته شده با سیمان معمولی حاصل گردید. همچنین، با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۱۵، حضور روباره در نمونه های حاوی ۰/۰۳ درصد اکسید گرافن که در آنها از فوق روان کننده نوع سوم استفاده شده بود، منجر به افزایش مقاومت خمشی به میزان ۳۳، ۴۲ و ۴۵ درصد در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در مقایسه با نمونه متناظر حاوی سیمان معمولی گردید. شکل ۱۶ نیز با مقایسه مقاومت های خمشی در سن ۲۸ روز، نشان می‌دهد که با استفاده از فوق روان کننده نوع سوم، برای کامپوزیتهای سیمانی حاوی اکسید گرافن و روباره، مقاومت خمشی بالاتری را می توان انتظار داشت. این درحالی است که این موضوع برای نمونه های فاقد روباره لزوما

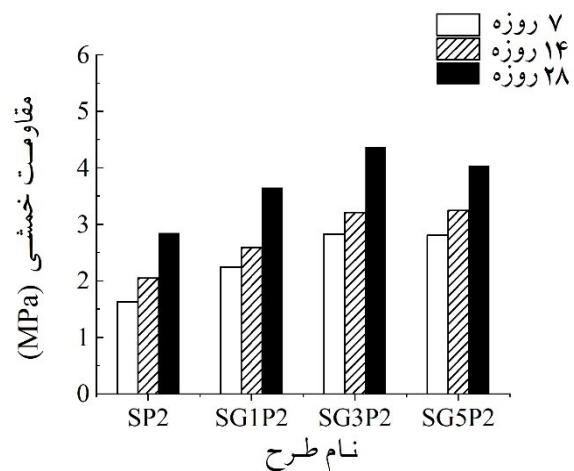
اساس نتایج حاصله، بیشینه مقاومتی خود را با ۰/۰۵ درصد اکسید گرافن تجربه می کنند، سایر طرح ها با مشارکت ۰/۰۳ درصد اکسید گرافن به بیشترین مقاومت خمشی می رسند.



شکل ۱۱- مقاومت خمشی: با روباره- فوق روان کننده نوع ۱

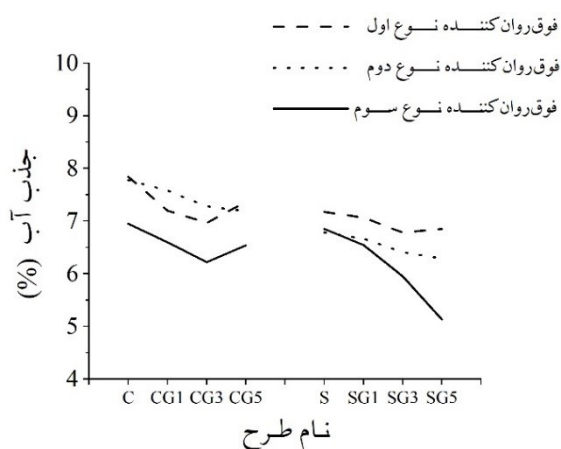


شکل ۱۲- مقاومت خمشی: فاقد روباره- فوق روان کننده نوع ۲



شکل ۱۳- مقاومت خمشی: با روباره- فوق روان کننده نوع ۲

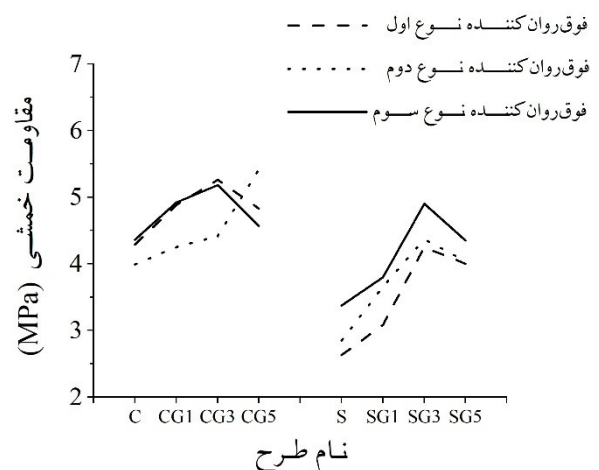
طرح‌های حاوی روبراره استفاده از فوق روان کننده نوع سوم بهترین نتیجه را حاصل می‌کند. به طوری که در طرح حاوی ۰/۰۵ درصد اکسید گرافن، کاهش ۲۵ درصدی مقدار جذب آب نتیجه شده است. همچنین با بررسی بیشتر نتایج می‌توان پی برد که اختلاف بین مقادیر جذب آب در طرح‌های با فوق روان کننده نوع سوم و دو نوع دیگر، با افزایش استفاده از اکسید گرافن افزایش می‌یابد. مقایسه طرح‌های ساخته شده با فوق روان کننده نوع سوم با نوع اول حاکی از اختلاف جذب آب ۵، ۷، ۱۲ و ۲۵ درصدی به ترتیب برای استفاده از ۰، ۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۵ درصد اکسید گرافن است. بر اساس نتایج مشاهده می‌شود که ارتباط معناداری بین نتایج حاصل از انجام آزمایش مقاومت فشاری و درصد‌های کاهش جذب آب نمونه‌ها وجود دارد. بدین ترتیب که کاهش جذب آب می‌تواند به مفهوم افزایش انسداد منافذ و حفرات مویینه و در نتیجه آن، کاهش تخلخل نمونه باشد و استفاده از اکسید گرافن و روبراره با کاهش در میزان جذب آب، بهبود در مقاومت مکانیکی نمونه سیمانی را به همراه خواهد داشت.



شکل ۱۷- نمودار درصد جذب آب در سن ۲۸ روز

چگالی حجمی نمونه‌های ساخته شده از کلیه اختلاط‌ها در سن ۲۸ روز در شکل ۱۸ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، تغییرات مشاهده شده در کلیه مخلوط‌های حاوی اکسید گرافن، با و بدون روبراره و ضمن استفاده از هر یک از سه نوع روان کننده مورد بحث نسبت به نمونه متناظر کمتر از ۳ درصد است. چگالی حجمی نمونه‌های حاوی اکسید گرافن با روبراره بین ۲۱۵۴ و ۲۲۱۳ و برای طرح‌های فاقد روبراره بین ۲۱۵۸ و ۲۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش شده است.

صادق نبوده و استفاده از فوق روان کننده پلی کربوکسیلات اصلاح شده نشان داده است که می‌تواند مقاومت‌های خمشی مطلوبی را سبب گردد. بر این اساس، به نظر می‌رسد که فوق روان کننده نوع سوم من حیث المجموع، بهترین عملکرد را در بهبود مقاومت خمشی نمونه‌ها از خود به نمایش گذاشته است. این امر می‌تواند به پخش مناسب نانوصفحات اکسید گرافن در کامپوزیت‌های سیمانی مورد مطالعه مرتبط باشد.



شکل ۱۶- مقاومت‌های خمشی در سن ۲۸ روز

۳-۳- جذب آب و چگالی حجمی

وجود منافذ مویینه و حفرات از عوامل اصلی ورود مایعات به بافت ماتریس سیمانی می‌باشد [۳۴]. بنابراین بدیهی است به کارگیری ذرات با ابعاد کوچک- که از ویژگی‌های آنها می‌توان به پرکنندگی و انسداد منافذ اشاره نمود- می‌تواند منجر به کاهش درجه نفوذپذیری کامپوزیت‌های سیمانی حاصل گردد. نتایج پژوهش حاضر نیز موید این موضوع است. به نحوی که با افزودن کلیه درصد‌های مورد مطالعه اکسید گرافن، از مقادیر جذب آب نمونه‌ها کاسته می‌شود. بر اساس نتایج، بیشترین میزان کاهش جذب آب در طرح‌های فاقد روبراره مربوط به نمونه‌هایی است که در حضور ۰/۰۳ درصد اکسید گرافن با فوق روان کننده‌های نوع اول و سوم ساخته شده‌اند که هر دو طرح کاهش جذب ۱۱ درصدی نسبت به میزان جذب آب مخلوط‌های متناظر فاقد اکسید گرافن در آنها گزارش شده است. در نمونه‌های ساخته شده با فوق روان کننده نوع دوم نیز در حضور ۰/۰۵ درصد اکسید گرافن به میزان ۸ درصد از جذب آب نمونه کم می‌شود. همچنین در

ساختارهای ضعیف داخلی بر هم خورده و توسعه ترک‌ها در این نقاط تضعیف شده مشهود است.

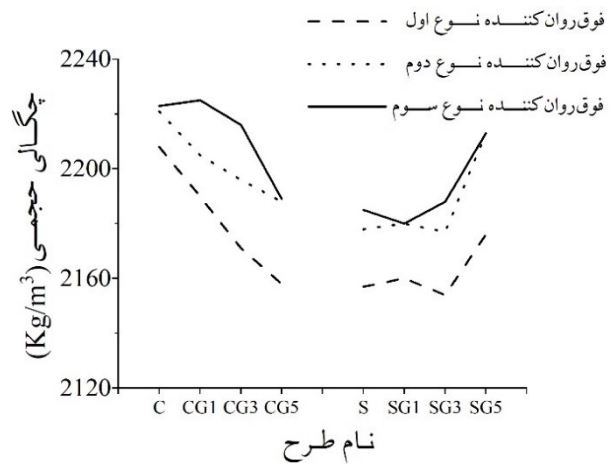


شکل ۱۹- نمونه فاقد اکسید گرافن و روباره (۵۰۰ برابر)

با ورود روباره و اکسید گرافن به ماتریس سیمانی (شکل ۲۰)، افزایش تراکم به وضوح قابل تشخیص است و نحوه توسعه تراکها و کاهش ابعاد آنها عملکرد مسلح کنندگی اکسید گرافن را نشان می‌دهد. در مقایسه با شکل ۱۹، گسیختگی قطعات و جدا شدن آنها از بافت ماتریس سیمانی در ابعاد کوچک‌تر بوده و حاصل از توسعه ترک‌ها نمی‌باشد.



شکل ۲۰- نمونه حاوی اکسید گرافن و روباره (۵۰۰ برابر)

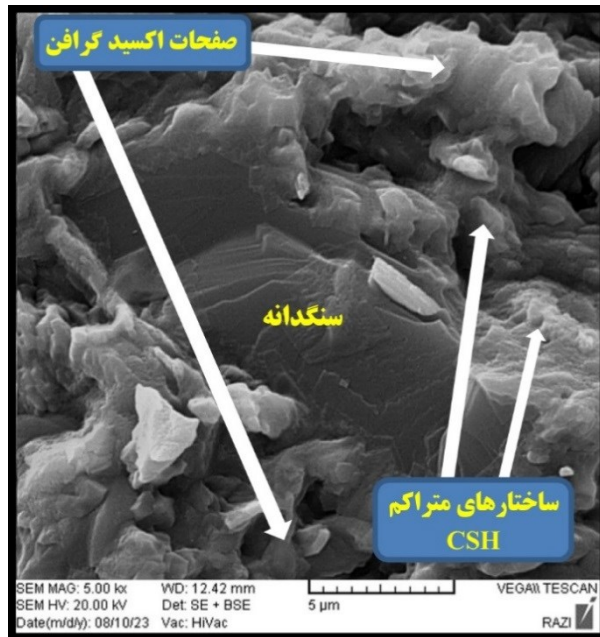


شکل ۱۸- چگالی حجمی در سن ۲۸ روز

بر اساس نتایج، مشاهده می‌شود که بطور کلی استفاده از اکسید گرافن در نمونه‌های فاقد روباره سبب کاهش چگالی حجمی خواهد شد و این کاهش در مقادیر چگالی حجمی، با افزایش میزان اکسید گرافن مصرفی نسبت مستقیم دارد. همچنین افزودن روباره به نمونه‌ها با توجه به کمتر بودن چگالی روباره نسبت به سیمان تأثیر کاهشی بر روی چگالی حجمی خواهد داشت. نتایج بیان گر آن است که به جز طرح‌های حاوی ۰/۰۵ درصد اکسید گرافن، سایر نمونه‌های حاوی روباره به میزان ۱ الی ۲ درصد چگالی کمتری نسبت به طرح‌های فاقد روباره را تجربه خواهد کرد. با بررسی تأثیر فوق‌روان‌کننده بر چگالی طرح‌های حاوی روباره می‌توان دریافت که استفاده از فوق‌روان‌کننده نوع سوم، نمونه‌های چگال‌تری نسبت به دو نوع دیگر را نتیجه می‌دهد. علت این مورد را می‌توان در توزیع یک‌خواخت تر ذرات در مخلوط سیمانی و در نتیجه آن، تراکم بیشتر نمونه جست‌وجو نمود. این تراکم سبب کمتر شدن خلل و فرج و چگال شدن نمونه و در نتیجه بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن می‌گردد. در مقابل استفاده از فوق‌روان‌کننده نوع اول کامپوزیت‌هایی با چگالی به مراتب کمتر را حاصل می‌کند. این موضوع با نتایج مقاومت‌های فشاری و خمشی و جذب آب این مطالعه تطابق کافی دارد.

۳-۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)

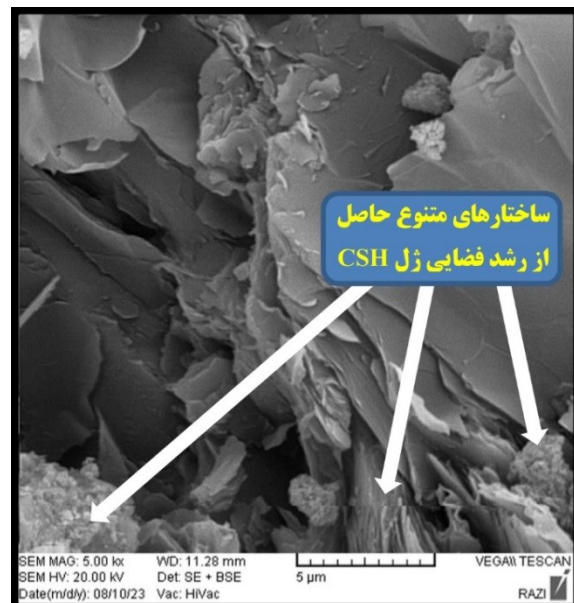
در شکل ۱۹ که نمونه فاقد روباره و اکسید گرافن با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر به نمایش در آمده، گسیختگی و جداشدگی بخشی از ماتریس سیمانی در اثر شکست مکانیکی دیده می‌شود. بافت یکنواخت ماتریس در بعضی نقاط بر اثر وجود تخلخل و



شکل ۲۲- نمونه حاوی اکسید گرافن و روباره (۵۰۰۰ برابر)

پس از توسعه طرح‌های اختلاط و آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی، جذب آب و چگالی حجمی بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت اکسید گرافن در هر دو حالت حضور و عدم حضور روباره می‌باشد. بیشترین رشد مقاومت فشاری با میزانی در حدود ۱۸ درصد در نمونه‌های فاقد روباره در صورت حضور فوق‌روان کننده لیگنو-کربوکسیلات، در نمونه‌های حاوی ۰/۰۳ اکسید گرافن مشاهده شد. در طرح‌های حاوی روباره، با افزایش میزان اکسید گرافن مورد استفاده، مقاومت‌های فشاری و خمشی بالاتری حاصل گردید. بهترین عملکرد در این سری از طرح‌ها مربوط به نمونه‌های حاوی ۰/۰۵ درصد اکسید گرافن و فوق‌روان کننده لیگنو-کربوکسیلات با افزایش ۱۵ درصدی مقاومت فشاری است. همچنین اضافه شدن اکسید گرافن به نمونه‌های حاوی روباره ضعف خمشی این نمونه‌ها در سنین پایین را پوشش داده و رشد مقاومتی در سنین ۷ الی ۱۴ روز قابل توجه است. نتایج جذب آب و چگالی حجمی نیز موید این موضوع است که با افزودن ذرات اکسید گرافن و روباره خلل و فرج مخلوط سیمانی کاهش یافته و به تبع، رشد مقاومتی نمونه‌های مورد مطالعه از این مورد نیز متاثر است. بررسی تصاویر SEM نشان‌دهنده بهبود ریزساختار، افزایش تراکم، کاهش ابعاد ریز ترک‌ها و ایجاد پیوستگی مناسب در ناحیه ITZ در نمونه‌های حاوی اکسید گرافن و روباره کوره بلند آهن

بدون حضور روباره و اکسید گرافن، ماتریس سیمانی، توسعه فضایی پیچیده‌ای بین سنگ‌دانه‌ها یافته و بسته به ماهیت هندسی فضای آزاد و نحوه قرارگیری سنگ‌دانه‌ها، توسعه ژل CSH با روندهای مختلفی رویرو خواهد شد. همانطور که در شکل ۲۱ دیده می‌شود، نحوه شکل‌گیری CSH در اطراف سنگ‌دانه و پیوند آن با جداره سنگ‌دانه در بخش‌های مختلف، منجر به ایجاد ساختارهای متفاوتی شده است که این توسعه فضایی نامنظم و وابسته به موقعیت، در نهایت به تشکیل مسیرهای تضعیف ساختار و کسب مشخصات مکانیکی ضعیف‌تر می‌انجامد.



شکل ۲۱- نمونه فاقد اکسید گرافن و روباره (۵۰۰۰ برابر)

در بزرگمایی ۵۰۰۰ برابر، ماتریس سیمانی حاوی روباره و اکسید گرافن (شکل ۲۲) تنوع فضایی بسیار کمتری را در ژل CSH نشان می‌دهد و پیوستگی ماتریس با سنگ‌دانه به شکل چشمگیری افزایش یافته است. در برخی نقاط صفحات اکسید گرافن دیده می‌شوند که پیوند خوبی با ژل CSH برقرار کرده‌اند. روباره نیز طی واکنش پوزولانی از پرتلندیت آزاد در ماتریس سیمانی کاسته و به افزایش همواری و پیوستگی ماتریس با سنگ‌دانه کمک کرده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی تأثیر اکسید گرافن و روباره کوره آهن‌گدازی در حضور سه نوع فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اصلاح‌شده، پلی‌کربوکسیلات اتر و ترکیبی لیگنو-کربوکسیلات، بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی پرداخته شد.

- Cement and Concrete Composites*, vol. 92, pp. 145-154, 2018.
- [۷] M. A. Atrian, K. Hosseini, S. Mirvalad, and A. Habibnejad Korayem, "Effect of Rice Husk Ash on Dispersion of Graphene Oxide in Alkaline Cementitious Environment," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 36, no. 3, p. 04023600, 2024.
- [۸] K. Hosseini, M. A. Atrian, S. Mirvalad, A. H. Korayem, and M. Ebrahimi, "Influence of ground granulated blast furnace slag on mechanical properties and durability of graphene oxide-reinforced cementitious mortars," *Structural Concrete*, vol. 24, no. 5, pp. 6270-6282, 2023.
- [۹] C. S. R. Indukuri, R. Nerella, and S. R. C. Madduru, "Workability, microstructure, strength properties and durability properties of graphene oxide reinforced cement paste," *Australian Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 73-81, 2020.
- [۱۰] S. Lv, Y. Ma, C. Qiu, T. Sun, J. Liu, and Q. Zhou, "Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites," *Construction and building materials*, vol. 49, pp. 121-127, 2013.
- [۱۱] J. Vera-Agullo *et al.*, "Mortar and concrete reinforced with nanomaterials," in *Nanotechnology in Construction 3: Proceedings of the NICOM3*: Springer, 2009, pp. 383-388.
- [۱۲] M. Mokhtar, S. Abo-El-Enein, M. Hassaan, M. Morsy, and M. Khalil, "Mechanical performance, pore structure and micro-structural characteristics of graphene oxide nano platelets reinforced cement," *Construction and Building Materials*, vol. 138, pp. 333-339, 2017.
- [۱۳] A. Radman and N. Joorabchi, "Property assessment of concretes with graphene oxide mixed cement," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 652, no. 1, p. 012043: IOP Publishing.
- [۱۴] H. Peng, Y. Ge, C. Cai, Y. Zhang, and گدازی می باشد. به عنوان یک نتیجه گیری کلی و با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می رسد در شرایط یکسان، استفاده از فوق روان کننده ترکیبی لیگنو-کربوکسیلاتی در طرح اختلاط کامپوزیت های سیمانی حاوی اکسید گرافن و روباره کوره بلند آهن گدازی، نتایج بهتری را در مقایسه با استفاده از فوق روان کننده های پلی کربوکسیلات اصلاح شده و پلی کربوکسیلات اتر به دست می دهد. این امر می تواند به پخش مناسب تر نانوصفحات اکسید گرافن در اختلاط مرتبط باشد.

۵- منابع

- [۱] P. Balaguru and K. Chong, "Nanotechnology and concrete: research opportunities," *Proceedings of the ACI session on nanotechnology of concrete: recent developments and future perspectives*, pp. 15-28, 2006.
- [۲] Y. Suo, R. Guo, H. Xia, Y. Yang, B. Zhou, and Z. Zhao, "A review of graphene oxide/cement composites: Performance, functionality, mechanisms, and prospects," *Journal of Building Engineering*, vol. 53, p. 104502, 2022.
- [۳] S. Chuah, Z. Pan, J. G. Sanjayan, C. M. Wang, and W. H. Duan, "Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide," *Construction and Building materials*, vol. 73, pp. 113-124, 2014.
- [۴] Z. Pan *et al.*, "Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite," *Cement and Concrete Composites*, vol. 58, pp. 140-147, 2015.
- [۵] L. Zhao *et al.*, "Investigation of the effectiveness of PC@ GO on the reinforcement for cement composites," *Construction and Building Materials*, vol. 113, pp. 470-478, 2016.
- [۶] X. Li, L. Wang, Y. Liu, W. Li, B. Dong, and W. H. Duan, "Dispersion of graphene oxide agglomerates in cement paste and its effects on electrical resistivity and flexural strength,"

- [۲۲] C. S. R. Indukuri, R. Nerella, and S. R. C. Madduru, "Effect of graphene oxide on microstructure and strengthened properties of fly ash and silica fume based cement composites," *Construction and Building Materials*, vol. 229, p. 116863, 2019.
- [۲۳] Q. Wang, S. Li, S. Pan, X. Cui, D. J. Corr, and S. P. Shah, "Effect of graphene oxide on the hydration and microstructure of fly ash-cement system," *Construction and Building Materials*, vol. 198, pp. 106-119, 2019.
- [۲۴] M. Newell and E. Garcia-Taengua, "Fresh and hardened state properties of hybrid graphene oxide/nanosilica cement composites," *Construction and Building Materials*, vol. 221, pp. 433-442, 2019.
- [۲۵] R. Roy, A. Mitra, A. T. Ganesh, and V. Sairam, "Effect of Graphene Oxide Nanosheets dispersion in cement mortar composites incorporating Metakaolin and Silica Fume," *Construction and Building Materials*, vol. 186, pp. 514-524, 2018.
- [۲۶] L. Zhao *et al.*, "Investigation of dispersion behavior of GO modified by different water reducing agents in cement pore solution," *Carbon*, vol. 127, pp. 255-269, 2018.
- [۲۷] A. Standard, "Standard specification for Portland cement," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2009.
- [۲۸] C. Astm, "Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates," *ASTM C136-06*, 2006.
- [۲۹] Available: <https://www.nanosany.com/>
- [۳۰] C. Astm, "305, Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency," *ASTM International*, 1999.
- [۳۱] A. ASTM, "Standard test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete," *ASTM C948-81*, 2016.
- [۳۲] A. S. f. Testing and M. C. C.-o. Cement, *Standard test method for compressive*
- Z. Liu, "Mechanical properties and microstructure of graphene oxide cement-based composites," *Construction and Building Materials*, vol. 194, pp. 102-109, 2019.
- [۱۵] S. Devi and R. Khan, "Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 27, p. 101007, 2020.
- [۱۶] A. Sabziparvar, E. Hosseini, V. Chiniforush, and A. Korayem, "Barriers to achieving highly dispersed graphene oxide in cementitious composites: An experimental and computational study," *Construction and Building Materials*, vol. 199, pp. 269-278, 2019.
- [۱۷] K. Amini, A. Ghasemi, S. S. Amiri, S. Mirvalad, and A. H. Korayem, "The synergic effects of metakaolin and polycarboxylate-ether on dispersion of graphene oxide in cementitious environments and macro-level properties of graphene oxide modified cement composites," *Construction and Building Materials*, vol. 270, p. 121462, 2021.
- [۱۸] X. Li *et al.*, "Incorporation of graphene oxide and silica fume into cement paste: A study of dispersion and compressive strength," *Construction and Building Materials*, vol. 123, pp. 327-335, 2016.
- [۱۹] P. Łukowski and A. Salih, "Durability of mortars containing ground granulated blast-furnace slag in acid and sulphate environment," *Procedia Engineering*, vol. 108, pp. 47-54, 2015.
- [۲۰] Ş. C. Bostancı, M. Limbachiya, and H. Kew, "Portland slag and composites cement concretes: engineering and durability properties," *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 542-552, 2016.
- [۲۱] C. Bilim, C. D. Atiş, H. Tanyildizi, and O. Karahan, "Predicting the compressive strength of ground granulated blast furnace slag concrete using artificial neural network," *Advances in Engineering Software*, vol. 40, no. 5, pp. 334-340, 2009.

strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). ASTM International, 2013.

- [۳۳] A. C348, "Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars," *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States*, 2008.
- [۳۴] A. Sadrmomtazi, B. Tahmouresi, and M. Amooie, "Permeability and mechanical properties of binary and ternary cementitious mixtures," *Advances in concrete construction*, vol. 5, no. 5, pp. 423-436, 2017.

An investigation on the Effects of Superplasticizer Type on Physical and Mechanical Properties of Cement Mortars Containing Graphene Oxide and Ground Granulated Blast Furnace Slag

Hossein Taslimi Kharratmahalleh

Department of Civil Engineering, Fouman and Shaft Branch, Islamic Azad University, Fouman, Iran

Mir Alimohammad Mirgozar Langaroudi *

Department of Civil Engineering, Fouman and Shaft Branch, Islamic Azad University, Fouman, Iran

Hamidreza Hosseinzadeh

Department of Civil Engineering, Fouman and Shaft Branch, Islamic Azad University, Fouman, Iran

Seyed Mojtaba Ostvar Chomachaei

Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

Abstract

Graphene oxide (GO) is a nanomaterial that has recently demonstrated promising reinforcing effects in cementitious composites. However, the uniform and stable dispersion of GO nanosheets within these composites remains a significant challenge. One proposed approach to achieve uniform GO dispersion is to utilize superplasticizers and pozzolans. This study evaluates the influence of different superplasticizers on the physical and mechanical properties of cement mortars containing GO and blast furnace slag (BFS). Mortar mixtures were prepared with varying GO and BFS content and three distinct superplasticizers. The physical and mechanical properties of these mortars were assessed at different ages to investigate their characteristics and the influence of superplasticizer type. The results indicate that the addition of 0.05 wt% GO yielded the most significant improvements in physical and mechanical properties. Furthermore, the incorporation of 0.03 wt% GO in BFS-containing mixtures led to enhanced mortar characteristics. Additionally, using a lignosulfonate-based superplasticizer with and without BFS resulted in superior strength properties. This suggests a more effective dispersion and enhanced stability of GO nanosheets within the cement matrix.

Keywords: Cement Mortar, Graphene Oxide, Ground Granulated Blast-Furnace Slag, Physical and Mechanical Properties, SEM.

* Corresponding ali.mirgozar@iaiu.ac.ir