

افزایش عملکرد بتن خودتراکم سبک با نانوذرات اکسید گرافن سنتز شده و سیلیکا

سید علی حسینی مرادی *
هیات علمی دانشگاه پدافند هوایی - استادیار.

چکیده

تأثیر تخلخل بتن بر جذب آب و پایداری محصولات سیمانی دارای اهمیت بالایی است. نفوذپذیری بتن اجازه ورود مولکول‌های واکنش‌پذیر را می‌دهد که می‌تواند باعث از دست دادن پایداری شیمیایی بتن شود. بتن با نفوذپذیری کم، مقاومت در برابر نفوذ آب، یون‌های سولفات، یون‌های کلرید و سایر آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد. این خاصیت مربوط به ساختار منافذ بتن است که شامل منافذ مویرگی با حجم و اندازه‌های مختلف می‌باشد. در این پژوهش، از نانوذرات اکسید گرافن و سیلیکا برای بهبود عملکرد بتن خودتراکم سبک استفاده شد. نتایج نشان دادند که با افزودن ۰/۰۵ درصد نانوذرات اکسید گرافن و ۱۰ درصد نانوذرات سیلیکا، مقاومت فشاری و کششی بتن به ترتیب ۲۸/۶ و ۳۵ درصد افزایش یافت. همچنین، در آزمایش‌های جذب آب، نمونه‌های تولیدی تا ۴۶ درصد کمتر آب جذب کردند و مقاومت الکتریکی آن‌ها ۷۹ درصد بیشتر بود. این بهبودها ناشی از کاهش تخلخل و افزایش چگالی ساختار بتن در اثر افزودن نانوذرات بود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات اکسید گرافن و سیلیکا می‌تواند به‌طور مؤثری خواص مکانیکی و دوام بتن خودتراکم سبک را بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: بتن، گرافن اکسید، گرافن، سیلیکا، مقاومت مکانیکی، جذب آب، مقاومت الکتریکی، بتن نانو کامپوزیتی.

* نویسنده مسئول: Physicplasma2011@gmail.com

۱- مقدمه

بتن به عنوان یکی از مصالح ساختمانی پرمصرف و اقتصادی جهان شناخته می‌شود. شکل‌پذیری، دسترسی آسان به اجزاء تشکیل‌دهنده، و پایایی نسبتاً بالا، توجه به این مخلوط را افزایش داده است. اما انتخاب مناسب اجزاء، ساخت صحیح، و کنترل کیفیت از عوامل تأثیرگذار در بهره‌وری بتن هستند [۱]. بتن خودتراکم که به منظور بهبود کیفیت ساخت و ساز و حل مشکلات بتن معمولی در دانشگاه توکیو در سال ۱۹۸۶ توسعه یافت، برای پر شدن مناسب قالب و عملکرد بهینه در نقاط با تراکم بالای آرماتور و محدودیت‌های بتن‌ریزی استفاده می‌شود. این نوع بتن افزایش بهره‌وری در ساخت و ساز، کاهش هزینه، و توسعه پایدار و محیط‌زیستی را فراهم کرده است [۲،۳].

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در طراحی ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله، به‌ویژه ساختمان‌های بلند و پل‌های طویل از جنس بتن، وزن مرده‌ی مصالح مورد استفاده است. برای حل این مشکل، استفاده از بتن‌های سبک با خصوصیات مکانیکی مناسب می‌تواند به امتیازهای متعددی منجر شود، از جمله کاهش بار مرده و نیروی زلزله که این اقدام منجر به اقتصادی‌تر شدن طراحی و کاهش خسارت‌ها خواهد شد. با این حال، از آنجایی که معمولاً خصوصیات مقاومت بتن با وزن مستقیم رابطه دارد، توصیه می‌شود که از بتن‌های سبک به‌تنهایی استفاده نشود. به همین دلیل، تحقیقات برای بهبود خواص مکانیکی بتن سبک با افزودن مواد مختلف به آن، همواره در دستور کار پژوهشگران بوده است. بتن سبک خودتراکم یک نوع بتن با عملکرد بالا است که از ترکیب خصوصیات بتن سبک و بتن خودتراکم به‌وجود آمده است [۴-۶]. این نوع بتن نسبت به تغییرات در خصوصیات اجزای مخلوط و نسبت اختلاط حساسیت بالایی دارد. مشخصات استاندارد در فرایند اختلاط بتن سبک خودتراکم، که برای تضمین خواص بتن تازه ضروری است، می‌تواند تأثیر مهمی بر ویژگی‌های نهایی بتن داشته باشد، از جمله مقاومت فشاری، پایداری ابعادی و دوام [۷]. برای مثال، مقاومت فشاری بتن سبک خودتراکم تحت تأثیر عواملی نظیر نوع سنگ‌دانه‌ها، نسبت آب به سیمان، و نسبت آب به مواد پودری قرار می‌گیرد [۸-۱۰]. روش‌های متعددی برای تولید بتن سبک وجود دارد، از جمله حذف بخش ریزدانه از سنگ‌دانه‌ها یا ایجاد حباب‌های هوا با افزودنی‌های شیمیایی. استفاده از

سنگ‌دانه‌های سبک در بتن به عنوان متداول‌ترین روش برای تولید بتن سبک است [۹-۱۱]. همچنین، نانو سیلیس در ابعاد نانومتری با بلورهای هیدروکسید کلسیم واکنش داده و ژل سیلیکات کلسیم هیدراته تولید کرده و مقاومت سنن اولیه خمیر سیمان و بتن را افزایش می‌دهد [۱۲].

بتن سبک سازه‌ای طبق آیین‌نامه ۳۱۸-۱۴ ACI به‌طور کلی به بتنی اطلاق می‌شود که چگالی خشک آن 1840 kg/m^3 بوده و مقاومت فشاری استوانه‌ای کمتر از ۲۸ روزه آن بیشتر از 10 MPa باشد. وزن مخصوص بتن سبک طبق آیین‌نامه ۱۰۴۵-۱۷/۲ EN BS 206:2013 و DIN شامل اغلب کشورهای اتحادیه اروپا در محدوده ۸۰۰ تا 2000 kg/m^3 محدود شده است [۱۳]. تولید سیمان منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی محیط‌زیست و غیره می‌شود. یکی از راه‌حل‌های این مشکلات استفاده از مواد پوزولانی در بتن است. پوزولان‌ها خواص مکانیکی و شیمیایی خمیر سیمان را بهبود می‌دهند [۱۴]. میکرو سیلیس ماده‌ای بسیار ریز و آمورف است که باعث بهبود پایایی و مقاومت بتن می‌گردد Shannag. نشان داد که با افزایش مقدار میکرو سیلیس به ۱۵ درصد، مقاومت بتن افزایش می‌یابد [۱۵].

تاکنون تلاش‌های بسیاری برای تولید بتن سبک با مقاومت مناسب انجام شده است. تحقیقات نوشچنو و ویتکومب [۱۶] نشان داده است که با به‌کارگیری دانه‌های سیلیسی منبسط با سیمان تا 1 kg/m^3 و ۵۲۰ میکروسیلیس به نسبت ۲۰٪ وزن سیمان، می‌توان به مقاومت 70 MPa با وزن مخصوص 1860 kg/m^3 دست یافت. کیهی و همکاران [۱۷] نشان داده‌اند که با استفاده از دانه‌های بازالت-پومیس، سیمان 450 kg/m^3 و ۱۰٪ وزن سیمان میکروسیلیس، مقاومت فشاری 43 MPa با وزن مخصوص خشک 1 kg/m^3 در ۱۸۲۰ بعد از ۳ ماه قابل دست‌یافت است. تحقیقات روسیگنولو، آگنسنی و همکاران [۱۸] نشان داده‌اند که با استفاده از دانه‌های سبک برزیلی، می‌توان به مقاومت ۲۸ روزه $53/6 \text{ MPa}$ با وزن مخصوص خشک 1605 kg/m^3 دست یافت. مالهورا [۱۹] نیز با استفاده از سنگ‌دانه‌های سنگ‌رسی منبسط به بتن با مقاومت فشاری 70 MPa در ۳۶۵ روز و وزن مخصوص 2000 kg/m^3 دست یافت. بهترین نسبت اختلاط نیز با استفاده از 500 kg/m^3 مواد سیمانی شامل سیمان نوع III، خاکستر بادی و محلول میکروسیلیس به‌دست می‌آید.

سازه‌های بتنی بهبود می‌یابد [۳۱-۳۴].

در این حوزه صداقت و همکاران [۳۵] پژوهش‌های قابل توجهی در زمینه خواص فیزیکی کامپوزیت سیمان و گرافن برای بتن‌های سازه‌ای انجام گرفته است. تحقیقات در مورد تغییرات حرارتی و ریزساختاری در کامپوزیت گرافن-سیمان هیدراته متمرکز شده و نفوذ حرارتی و هدایت الکتریکی این کامپوزیت‌ها با درصد‌های مختلف جایگزینی گرافن به جای سیمانبررسی شده است. تحقیقات اخیر Ming Li Chao و همکاران [۳۷] در سال ۲۰۱۹ نشان داد که افزودن گرافن با محتوای ۰,۲٪ به بتن، بالاترین مقاومت مکانیکی را حاصل کرده و بهبود قابل توجهی در مقاومت خمشی و فشاری ۲۸ روزه داشته است. استفاده از گرافن در بتن با چالش‌هایی همچون هیدروفوب بودن ذرات گرافن و میل به کلوخه شدن آن‌ها روبه‌رو است. راه‌حل‌های مختلفی مانند استفاده از مواد سورفکتانت (فعال سطحی) جهت حل این مشکل ارائه شده‌اند. در این تحقیق، نانو صفحات گرافن اکسید با روش هامر اصلاح شده از پولک‌های گرافیتی تولید شده و سپس این ذرات هیدروفیل به ساختار بتن افزوده شده و در نهایت از طریق احیای حرارتی به گرافن تبدیل شده‌اند. در ادامه، تأثیر این مواد بر برخی خواص مکانیکی و دوام بتن‌های ساخته شده با سیمان پرتلند مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به مزایای استفاده از گرافن در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن، در سال‌های اخیر به بررسی تأثیر این نانو ماده در بتن‌های پیشرفته مانند بتن خودتراکم سبک پرداخته شده است. Novoselov و همکاران [۳۸] در تحقیقات خود نشان دادند که گرافن به دلیل خواص منحصربه‌فردی همچون استحکام کششی بالا (حدود ۱۳۰ گیگاپاسکال)، هدایت حرارتی و الکتریکی عالی (حدود ۵۰۰۰ وات بر متر-کلین)، و سطح ویژه بسیار بالا (۲۶۳۰ مترمربع بر گرم)، به عنوان یک ماده افزودنی امیدوارکننده در بتن شناخته شده است. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند که گرافن بتواند به‌طور مؤثری در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن نقش ایفا کند. Du و Pang [۳۹] در مطالعه‌ای جامع نشان دادند که افزودن مقادیر بسیار کمی از گرافن (معمولاً کمتر از ۰,۱٪ وزن سیمان) می‌تواند مقاومت فشاری بتن را تا ۳۰٪ افزایش دهد. این بهبود به دلیل توانایی گرافن در پر کردن منافذ ریز و ایجاد اتصالات قوی‌تر در ساختار خمیر سیمان است. همچنین، آن‌ها گزارش

تأثیر تخلخل بر جذب آب و نفوذپذیری بتن اهمیت زیادی دارد. نفوذ آب به داخل ساختار بتن می‌تواند پایداری شیمیایی محصولات سیمانی را تخریب کند. عواملی چون درجه حرارت، زمان عمل‌آوری و رطوبت در شکل‌گیری ساختار داخلی بتن تأثیرگذار هستند. استفاده از نانو ذرات با ابعاد چند نانومتر می‌تواند ساختار ناهمگن بتن را بهبود بخشیده و اتصالات منافذ را به‌طور چشمگیری تقویت کند [۲۰]. وجود گرادیان دمایی در سطح داخلی و خارجی بتن نیز می‌تواند به دوام آن آسیب بزند. گرادیان دمایی بالا باعث تشکیل تنش‌های کششی در حجم بتن می‌شود و این می‌تواند به مقاومت کششی آن آسیب برساند و ترک‌های حرارتی ایجاد و گسترش یابد. به کاهش گرادیان دمایی می‌تواند منجر به جلوگیری از ترک‌های حرارتی و افزایش دوام بتن شود [۲۱].

در دهه‌های اخیر، تکنولوژی نانو به عنوان یک فناوری نوظهور، فرصت‌های فراوانی برای بهبود خواص مواد مختلف فراهم کرده است. این تکنولوژی به تأثیر اندازه ذرات در ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر و کاربردهای آن می‌پردازد. با توجه به این که ویژگی‌های بتن از ساختار در ابعاد میکرو و نانو مشتق می‌شوند، استفاده از تکنولوژی نانو به منظور بهبود خواص بتن مورد توجه قرار گرفته است. از آنجایی که نانو ذرات گرافن خصوصیات منحصربه‌فردی دارند، امیدهای زیادی برای بهبود خواص بتن از این طریق وجود دارد [۲۲-۲۵]. گرافن به عنوان یک ورقه دوعبده با پیوند سه‌اتم کربن ایجاد می‌شود و از اتصال اتم‌های کربن در سلول‌های شش‌وجهی تشکیل می‌شود، که هر اتم کربن به سه اتم دیگر متصل است. هر ورق گرافن تنها دارای ضخامت یک اتم است و به عنوان یک مولکول مجزا در نظر گرفته می‌شود، با ساختاری شبیه به نانولوله‌های کربنی، با این تفاوت که گرافن به شکل مسطح و نانولوله‌ها به شکل استوانه‌ای هستند [۲۶-۲۹]. در زمینه استفاده از نانو گرافن در بتن، تاکنون مطالعات محدودی در سطح جهان صورت گرفته است. به دلیل کمبود شناخت کامل از نانو گرافن و اثرات آن، اکثر مقالات به بررسی تأثیرات اولیه استفاده از این ماده بر خمیر سیمان هیدراته می‌پردازند [۳۰]. یافته‌های تازه نشان می‌دهد که افزودن مقادیر بسیار کمی از گرافن به بتن، باعث افزایش مقاومت و خواص هدایت حرارتی خمیر سیمان هیدراته می‌شود و با کاهش پتانسیل ترک‌خوردگی حرارتی، دوام

آب و مقاومت الکتریکی) بتن خودتراکم سبک مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین، تأثیر ترکیبی نانوذرات اکسید گرافن و سیلیکا بر بهبود ساختار میکرو و نانویی بتن و کاهش تخلخل آن نیز مطالعه خواهد شد.

۲- مصالح و ساخت نمونه‌ها

سیمان پرتلند نوع ۱ برای این پژوهش آزمایشگاهی استفاده شد. سنگ‌دانه‌ها بین ماسه طبیعی شسته شده و ماسه خرد شده با حداکثر قطر ۲۰ میلی متر انتخاب شدند. نسبت جذب آب سنگ‌دانه‌های درشت و ریز به ترتیب ۱/۷۱ و ۱/۸۵ درصد و مدول الاستیک آنها ۲/۸۵ است. مشخصات شیمیایی مصالح مصرفی در جدول های ۱-۵ آورده شده است.

در این مطالعه از نانو سیلیس با خلوص ۹۹/۹ درصد و چگالی ۲/۶۵ گرم بر سانتی متر مکعب استفاده شد و اندازه ذرات آن از ۵ تا ۱۰۰ نانومتر است. نانوذرات اکسید گرافن با استفاده از روش هامر اصلاح شده سنتز شدند و خواص آن‌ها با آنالیز XRD و FTIR تعیین شد. برای اطمینان از پراکندگی کارآمد ذرات در محلول نانوگرافن، از یک فوق روان کننده مبتنی بر پلی کربوکسیلات نسل سوم استفاده شد. آب مورد استفاده برای تهیه نمونه آب آشامیدنی شهری است.

کردند که گرافن با کاهش نفوذپذیری بتن، دوام آن را در برابر عوامل مخرب محیطی مانند یون کلرید و سولفات به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. به طور خاص، در نمونه‌های حاوی ۰/۰۵٪ گرافن، نفوذ یون کلرید تا ۴۰٪ کاهش یافت.

LV و همکاران [۴۰] نیز در تحقیقات خود به بررسی تأثیر گرافن اکسید بر خواص مکانیکی و دوام بتن پرداختند. آن‌ها دریافتند که افزودن ۰/۰۳٪ گرافن اکسید به بتن، مقاومت کششی را تا ۲۵٪ و مقاومت خمشی را تا ۲۰٪ افزایش می‌دهد. این بهبود به دلیل تشکیل ساختار نانویی قوی‌تر در ماتریس بتن و کاهش تخلخل است. همچنین، آن‌ها گزارش کردند که گرافن اکسید با کاهش نفوذپذیری آب و یون‌های مخرب، دوام بتن را در شرایط محیطی نامساعد به طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. با این حال، تحقیقات در مورد استفاده از گرافن در بتن خودتراکم سبک بسیار محدود است. بتن خودتراکم سبک به دلیل ترکیب ویژگی‌های بتن سبک و بتن خودتراکم، نیازمند بررسی‌های ویژه‌ای در زمینه تأثیر افزودنی‌های نانو است.

در این پژوهش، هدف اصلی بررسی تأثیر نانوذرات اکسید گرافن سنتز شده و سیلیکا بر عملکرد بتن خودتراکم سبک است. در این راستا، تأثیر این نانوذرات بر خواص مکانیکی (مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته) و دوام (مانند جذب

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

ذرات (%)	L.O.I (%)	CL (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)
۰/۷۷	۲/۴	۰/۰۴	۰/۷۱	۰/۴۲	۲/۰۹	۳/۴۴	۶۲/۰۲	۲/۹۶	۳/۸۳	۲۱/۳۲

جدول ۲- نتایج آزمایش سوزن وی کات سیمان مصرفی

ته نشینی اولیه (دقیقه)	ته نشینی نهایی (ساعت)
۱۴۰	۳:۱۰

جدول ۳- خواص فیزیکی و مکانیکی سیمان مصرفی

انبساط در اتوکلاو (٪)	نرمی: آزمایش بلین (cm ² /g)
۰/۱۴	۳۳/۷
مقاومت فشاری دوازده (MPa)	مقاومت فشاری ۲۲ روزه (MPa)
۲۲	۴۸/۸

جدول ۴- مشخصات شیمیایی سبک دانه لیکا

SiO ₂ (%)	۶۶/۰۵	P ₂ O ₅ (%)	۰/۲۱
Al ₂ O ₃ (%)	۱۶/۵۷	MnO (%)	۰/۰۹
Fe ₂ O ₃ (%)	۷/۱۰	TiO ₂ (%)	۰/۷۸
CaO (%)	۲/۴۶	MgO (%)	۱/۹۹
Na ₂ O (%)	۰/۶۹	KO ₂ (%)	۲/۶۹
SO ₃ (%)	۰/۰۳	مجموع	۹۸/۶۶

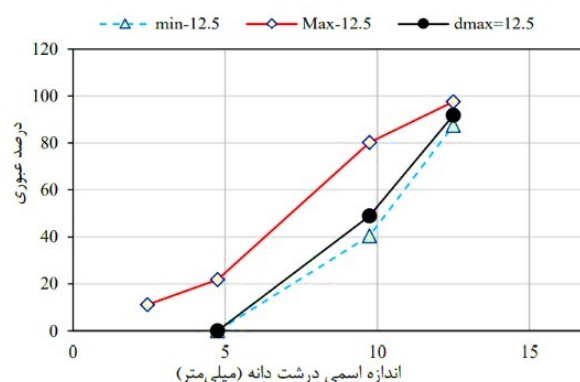
جدول ۵- مشخصات شیمیایی پودر سنگ

Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaCO ₃ (%)
۰/۱	۰/۳	۰/۰۳	۰/۲	۹۹/۳

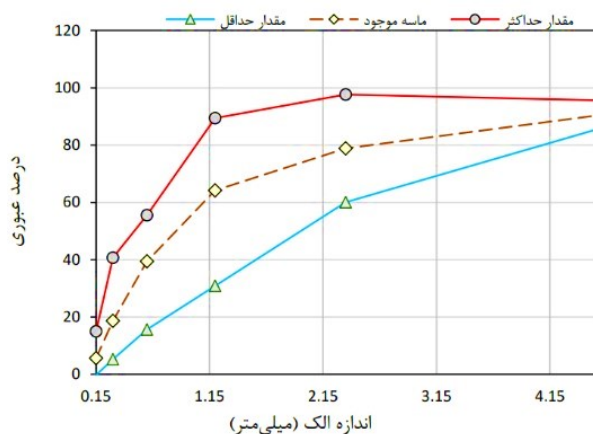
سپس دمای مخلوط در یک حمام آب یخ به صفر درجه سانتیگراد کاهش یافت. پرمیونگات پتاسیم به تدریج اضافه شده و دمای واکنش به ۴۵ درجه سانتیگراد افزایش می یابد. مخلوط را در این دما به مدت ۲ ساعت هم زده و سپس آب دوبار مقطر با دمای ۸۰ درجه سانتیگراد را به مخلوط اضافه و به مدت ۴۰ دقیقه هم زده شد. سپس با افزودن آب دوبار مقطر و آب اکسیژن ۴۰ درصد، واکنش متوقف می شود. برای تولید اکسید گرافن تک لایه، سوسپانسیون حاصل در فرکانس ۳۵ کیلوهرتز به مدت ۴۰ دقیقه التراسونیک می شود. اکسید گرافن تهیه شده با یک حلال HCl ۳ درصد در آب کاملاً شسته و با استفاده از قیف بوختر فیلتر شد. در مرحله بعد سوسپانسیون حاصل دوباره با آب مقطر شسته می شود. لازم به ذکر است که سوسپانسیون پس از هر بار شستشو فیلتراسیون می شود. در نهایت مواد به دست آمده را به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۳۰ درجه سانتیگراد قرار داده و خشک شد [۳۴].

۴- ساخت و نگهداری نمونه ها

چهار طرح مخلوط بتن در آزمایشات ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز استفاده شد (جدول ۶). آزمون های مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مدول الاستیسته بر روی نمونه ها انجام شد. نتایج در زیر فهرست شده است. طرح اول نسبت اختلاط نمونه شاهد را نشان می دهد. نمونه اول به عنوان نمونه کنترل در نظر گرفته شده است، نمونه دوم با دی اکسید سیلیکون با نسبت ۱۰ درصد، نمونه سوم با نانو اکسید گرافن با نسبت ۰/۰۵ درصد و نمونه چهارم



شکل ۱- دانه بندی سبک دانه بر اساس استاندارد ASTM C136



شکل ۲- دانه بندی ماسه

۳- سنتز نانوذرات گرافن اکسید

از تکه های گرافیت به عنوان ماده اولیه برای تولید اکسید گرافن استفاده شد. ابتدا گرافیت را با اسید سولفوریک غلیظ در یک لیوان مخلوط کرده، در حین هم زدن نیترات سدیم به آن اضافه شد.

مخلوط شدن با مواد باقی مانده، مقدار کمی فوق روان کننده به آن اضافه می شود. این عمل توزیع ذرات گرافن را بهبود می بخشد و امکان تولید رسوبات گرافن با بهترین خواص را فراهم می کند. هنگام ساخت بتن، سنگ دانه ها با مقداری آب مورد نیاز در مخلوط کن مخلوط می شوند. رسوب اکسید نانو گرافن همزمان با مخلوط سیمان و مقدار باقیمانده آب اضافه می شود. نمونه ها پس از اختلاط کامل و رسوب کافی شکل داده شده و به مدت ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاهی نگهداری می شوند. پس از این مدت قالب ها باز شده و نمونه ها پس از ثبت مشخصات به اتاق عمل آوری منتقل می شوند.

توسط نانو گرافن اکسید و دی اکسید سیلیکون در نسبت ۰/۰۵ و ۱۰ درصد تحت شرایط محیطی مورد بررسی قرار گرفتند. در پروژه حاضر مخلوط کنترل با ۳۵۰ کیلوگرم سیمان و نسبت آب به سیمان ۰/۵ طراحی شد. در همه مخلوط ها، ترکیب سیمان و نسبت آب به سیمان مشابه ترکیبات کنترل است. برای تبدیل اکسید گرافن نانو در بتن به نانو گرافن، مخلوط نمونه های شماره ۴ در فشار بالا و دمای بالا (اتوکلاو) تیمار شدند. برای فعال کردن مقایسه، نمونه های پروژه ۱ نیز تحت شرایط پردازش یکسان مورد آزمایش قرار گرفتند. برای مخلوط های حاوی اکسید نانو گرافن، آن را با آب مناسب در حمام اولتراسونیک مخلوط کرده و قبل از

جدول ۶- نسبت های اختلاط

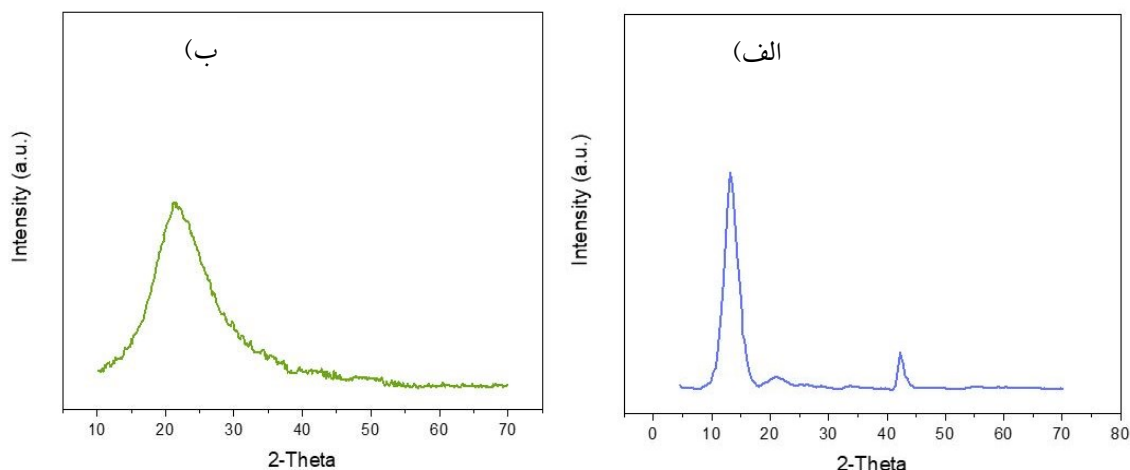
نمونه	آب (L/m ³)	سیمان (kg/m ³)	سیلیکا (kg/m ³)	اکسید گرافن (kg/m ³)	سبک دانه لیکا (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	پودر سنگ (kg/m ³)	روان کننده (kg/m ³)
S0G0	۱۷۵	۳۵۰	۰	۰	۲۱۰	۶۲۰	۱۸۰	۱۰
S1G0	۱۷۵	۳۱۵	۳۵	۰	۲۱۰	۶۲۰	۱۸۰	۱۰
S0G1	۱۷۵	۳۱۴/۸۱۵	۰	۰/۱۷۵	۲۱۰	۶۲۰	۱۸۰	۱۰
S1G1	۱۷۵	۳۱۴/۸۱۵	۳۵	۰/۱۷۵	۲۱۰	۶۲۰	۱۸۰	۱۰

۵- بررسی و ارائه نتایج

۵-۱- بررسی ویژگی های نانو ذرات استفاده شده

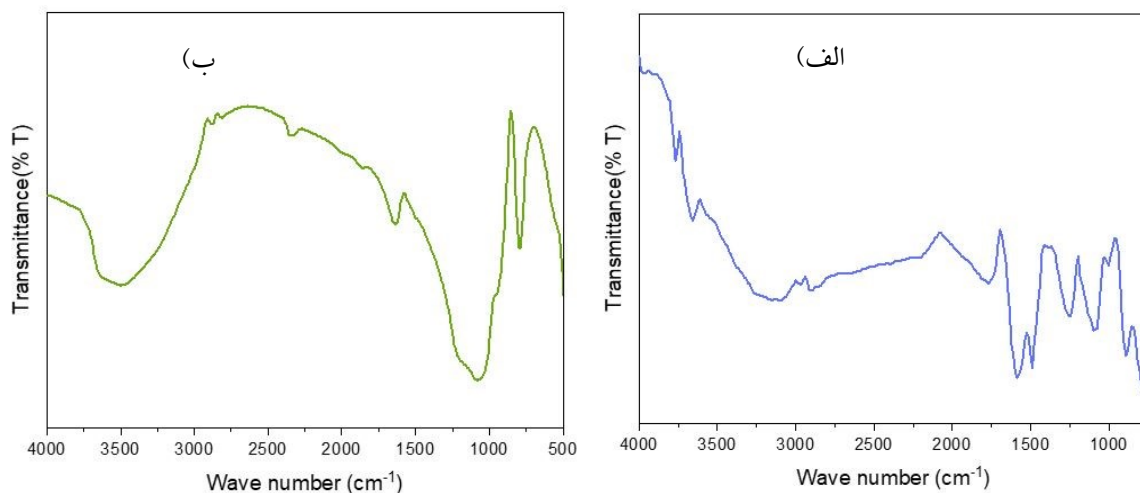
آمیز اکسید گرافن را نشان می دهد، با اوج مشخصه اکسید گرافن که در زاویه $2\theta = 14/15^\circ$ ظاهر می شود. این نتایج نشان دهنده موفقیت آمیز بودن فرایند سنتز اکسید گرافن است. با توجه به اینکه، پیک گرافن در زاویه $2\theta = 25/5^\circ$ ، نشان دهنده اکسیداسیون گرافن است نشان می دهد در این اکسیداسیون، پیک به زاویه کمتری تغییر می کند و فاصله بین لایه های گرافن افزایش می یابد. [۳۷-۳۵]

از آنجایی که گرافن در حضور آب تمایل به کلوخه شدن دارد، اکسیداسیون گرافن امکان پراکندگی بیشتر را فراهم می کند. بازسازی حرارتی اکسید گرافن موجود در بتن را به گرافن تبدیل می کند و خواص آبگریز و هدایت الکتریکی آن را بازیابی می کند. نتایج تجزیه و تحلیل XRD در شکل ۳-الف) سنتز موفقیت



شکل ۳- پراش اشعه ایکس الف) اکسید گرافن ب) سیلیکا

که امکان تشخیص مواد ناشناخته و غلظت آن‌ها را از هر نوع نمونه جامد، مایع و گاز می‌دهد. این روش اغلب برای تشخیص گروه‌های عاملی اکسید گرافن استفاده می‌شود. شکل ۴-الف) نتایج تجزیه و تحلیل FT-IR اکسید گرافن سنتز شده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، پیک در فرکانس ۳۴۱۷ متعلق به پیوند OH، پیک ۱۷۲۸ متعلق به گروه عاملی کربوکسیل -COOH، پیک ۱۶۲۶ متعلق به پیوند آروماتیک C=C در لایه گرافن و در نهایت پیک ۱۲۲۶ نیز برای گروه اپوکسی، C-O-C است. پیک ۱۰۵۷ شبیه پیک ۳۴۱۷ است که به پیوند OH متصل است. پیک‌های به دست آمده با مطالعات قبلی در مورد سنتز اکسید گرافن مطابقت دارد و قبلاً مشاهده شده است [۴۲، ۴۳].



شکل ۴- آنالیز FTIR (الف) اکسید گرافن (ب) سیلیکا

سن آزمایشی (۷، ۱۴ و ۲۸ روز)، سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. بارگذاری با نرخ ۰/۲۵ مگاپاسکال بر ثانیه و با استفاده از دستگاه آزمون یونیورسال انجام شد.

نتایج آزمایش مقاومت فشاری که در شکل ۵ ارائه شده است، نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی نانو اکسید گرافن (S0G1) در سن ۱۴ روزگی به مقاومت فشاری ۴۲ مگاپاسکال دست یافته‌اند که این امر بیانگر تأثیر سریع این نانوذرات در تسریع واکنش‌های هیدراتاسیون می‌باشد. این نمونه‌ها در سن ۲۸ روزگی به مقاومت ۵۱/۵ مگاپاسکال رسیدند که نشان‌دهنده افزایش ۳۸ درصدی نسبت به نمونه شاهد است. از سوی دیگر، نمونه‌های حاوی ترکیب نانوذرات (S1G1) بهترین عملکرد را با رسیدن به مقاومت ۵۳/۶ مگاپاسکال در ۲۸ روزگی نشان دادند که بهبودی معادل ۴۰ درصد

تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس نانوذرات سیلیس نشان داده شده در شکل ۳-ب) ماهیت آمورف نمونه‌های SiO₂ تهیه شده را تأیید کرد. به جز یک باند وسیع در مرکز ۲۲ درجه، یک اوج مشخصه برای SiO₂ آمورف، هیچ اوج پراش مشاهده نمی‌شود. نتایج همچنین با فایل JCPDS برای SiO₂ شد که نشان داد این ترکیب فاقد ناخالصی است. اندازه ذرات نیز با استفاده از فرمول Scherer محاسبه شد و بین ۲۱ تا ۳۱ نانومتر است [۳۸-۴۰]. طیف سنجی فروسرخ اولین تکنیک شناخته شده آنالیز ساختاری است و روشی برای تشخیص ساختار پیوند بین اتم‌ها بر اساس برهمکنش تابش مادون قرمز با ماده و جذب فرکانس تابشی که ماده جذب کرده و باعث ارتعاش ذرات می‌شود. FT-IR یک روش غیر مخرب است

همانطور که در شکل ۴-ب) نشان داده شده است، طیف FT-IR وجود نانوذرات SiO₂ سنتز شده را تأیید می‌کند. پیک وسیع بین ۳۰۰۰ تا ۳۷۰۰ نشان دهنده وجود یک گروه O-H است. به طور مشابه، یک قله خمشی ارتعاشی را می‌توان در ۱۶۴۹ مشاهده کرد که نشان‌دهنده وجود یک پیوند کششی O-H است. علاوه بر این، قله‌های قوی در ۱۰۹۳، ۴۵۹ و ۷۹۸ با پیوندهای کششی Si-O-Si مرتبط هستند. [۴۱].

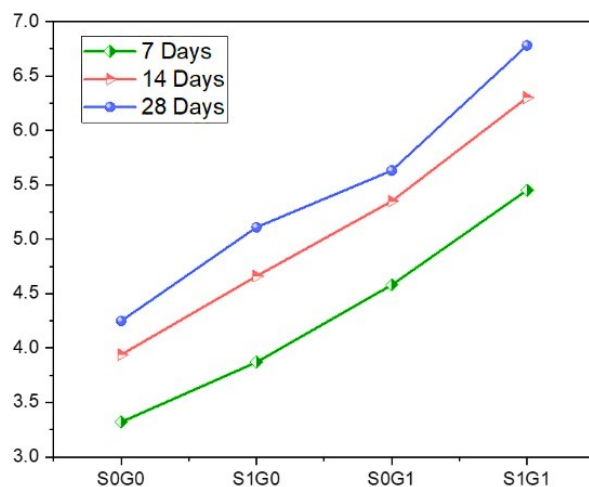
۵-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C39 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد (قطر ۱۵ سانتیمتر، ارتفاع ۳۰ سانتیمتر) انجام شد. برای هر یک از چهار طرح اختلاط و در هر

آزمایش قرار گرفت که در مجموع شامل ۲۴ نمونه بود. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه Universal Testing Machine (UTM) با ظرفیت ۱۰۰ کیلو نیوتن و با نرخ بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر دقیقه انجام شد. کلیه نمونه‌ها قبل از آزمایش به مدت ۲۴ ساعت در آب اشباع شدند تا شرایط رطوبتی یکسانی داشته باشند.

نتایج آزمایش‌ها در شکل ۶ ارائه شده است. بر اساس این نتایج نمونه‌های حاوی نانو اکسید گرافن در سن ۷ روزگی به بیشترین مقاومت کششی (۴/۸ مگاپاسکال) دست یافتند که نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه این نانوذرات در تسریع واکنش‌های هیدراتاسیون در سنین اولیه است. در سن ۲۸ روزگی، نمونه‌های حاوی ترکیب نانو اکسید گرافن و نانوسیلیس با رسیدن به مقاومت کششی ۵/۲ مگاپاسکال، بهترین عملکرد را نشان دادند که نسبت به نمونه شاهد ۳۰٪ بهبود را نشان می‌دهد. مقایسه با نتایج پژوهش‌های مشابه (Lv و همکاران، ۲۰۱۹) نشان می‌دهد که مقاومت کششی به دست آمده در این تحقیق حدود ۱۵٪ بالاتر از بهترین نتایج گزارش شده در تحقیقات پیشین است.

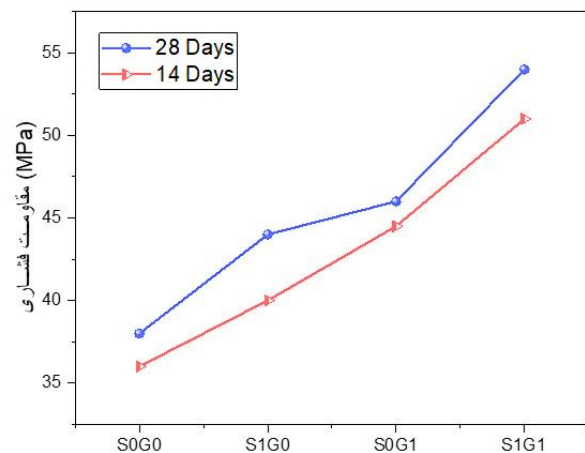
این بهبودهای مشاهده شده را می‌توان به دو مکانیزم اصلی نسبت داد: ۱) پرکنندگی منافذ ریز توسط نانوذرات که منجر به کاهش تخلخل و افزایش چگالی ماتریس سیمانی شده است. ۲) تشکیل ساختارهای سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) متراکم‌تر در حضور نانوذرات که استحکام پیوندهای بین‌ذره‌ای را افزایش داده است.



شکل ۶- نتایج مقاومت کششی نمونه‌های آزمایشی در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه

نسبت به نمونه شاهد محسوب می‌شود. این بهبود قابل توجه ناشی از اثر سینرژیستی بین نانو اکسید گرافن و نانوسیلیس است که از طریق پرکردن منافذ و تشکیل ساختار C-S-H متراکم‌تر حاصل شده است.

در مقایسه با تحقیقات مشابه، به ویژه مطالعه Novoselov و همکاران (۲۰۲۱)، نتایج این پژوهش نشان‌دهنده بهبود ۸ تا ۱۰ درصدی در مقاومت فشاری می‌باشد که این برتری مرهون بهینه‌سازی نسبت اختلاط و روش‌های عمل‌آوری بهبود یافته است. مکانیزم‌های اصلی بهبود مقاومت در این تحقیق شامل سه عامل کلیدی بوده است: نخست، پرکنندگی منافذ توسط نانوذرات که منجر به کاهش تخلخل شده است؛ دوم، تسریع هیدراتاسیون توسط نانو اکسید گرافن که استحکام اولیه را افزایش داده است؛ و سوم، تشکیل ساختار متراکم‌تر C-S-H در نتیجه ترکیب همزمان نانوذرات که چگالی ساختار را ارتقاء بخشیده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده هوشمندانه از نانوذرات می‌تواند راهکار مؤثری برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن‌های پیشرفته باشد.



شکل ۵- مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایشی در سنین ۱۴ و ۲۸ روزه

۳-۵- نتایج آزمایش مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی به روش برزلی (مطابق استاندارد ASTM C496) بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵ سانتیمتر و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر انجام شد. برای هر یک از ۴ طرح اختلاط (شاهد، حاوی نانوسیلیس، حاوی نانو اکسید گرافن و ترکیب هر دو) و در هر سن آزمایشی (۷، ۱۴ و ۲۸ روز)، ۲ نمونه مورد

نتایج این آزمایش به وضوح نشان می‌دهد که استفاده همزمان از نانو اکسید گرافن و نانوسیلیس می‌تواند راهکار مؤثری برای بهبود مقاومت کششی بتن‌های خودتراکم سبک باشد، به ویژه در کاربردهایی که مقاومت در برابر ترک خوردگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

نتایج این آزمایش به وضوح نشان می‌دهد که استفاده همزمان از نانو اکسید گرافن و نانوسیلیس می‌تواند راهکار مؤثری برای بهبود مقاومت کششی بتن‌های خودتراکم سبک باشد، به ویژه در کاربردهایی که مقاومت در برابر ترک خوردگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۵-۴- آزمایش مدول الاستیسیته دینامیکی بتن خودتراکم سبک

هدف اصلی از انجام آزمایش مدول الاستیسیته دینامیکی، ارزیابی سفتی و مقاومت الاستیک بتن خودتراکم سبک در برابر بارهای دینامیکی و بررسی تأثیر افزودن نانوذرات اکسید گرافن و سیلیکا بر بهبود خواص مکانیکی بتن بود. این آزمایش کمک می‌کند تا سفتی بتن را در سنین مختلف (۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه) ارزیابی کرده و رابطه بین سرعت امواج اولتراسونیک و مدول الاستیسیته تعیین شود.

برای انجام این آزمایش، نمونه‌های بتن خودتراکم سبک با چهار طرح اختلاط مختلف (شاهد، حاوی نانو سیلیکا، حاوی نانو اکسید گرافن و ترکیب هر دو) ساخته شدند. نمونه‌ها به شکل استوانه‌ای با قطر ۱۵ سانتیمتر و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر تهیه شدند و برای هر طرح اختلاط و هر سن آزمایش، دو نمونه در نظر گرفته شد. آزمایش بر

$$V = \frac{L}{t} \quad (1)$$

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1 - 2\mu)(1 + \mu)}{1 - \pi} \quad (2)$$

که در آن E_d مدول الاستیسیته دینامیکی (Mpa)، ρ وزن مخصوص بتن (Kg/m^3) و μ نسبت پواسون دینامیکی و V سرعت امواج اولتراسونیک (Km/sec) می‌باشند. محاسبه نسبت پواسون دینامیکی برای بتن معمولی قبلاً توسط محققین گزارش شده که مقدار آن برای بتن معمولی ۰/۲۲ می‌باشد. نتایج سرعت امواج اولتراسونیک در نقطه مورد آزمایش در سن‌های ۷، ۱۴، ۲۸ در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷- سرعت امواج اولتراسونیک (Km/sec) در نقطه مورد آزمایش در سن‌های ۷، ۱۴، ۲۸

نمونه	نمونه	نمونه	نمونه	سرعت امواج در هر نمونه	
				سن	روزه
S1G1	S0G1	S1G0	S0G0	(Km/sec)	(Km/sec)
۶/۷۲	۶/۲۱	۵/۹	۵/۴۵	۷ روزه	
۷/۹۳	۷/۶۵	۶/۴۲	۶/۲۳	۱۴ روزه	
۸/۹۴	۸/۰۱	۷/۱۲	۶/۷۸	۲۸ روزه	

بر مبنای نتایج به دست آمده از آزمایش اولتراسونیک در نقطه تعیین شده از نمونه‌های بتنی و با استفاده از فرمول (۲)، نحوه توزیع مدول الاستیسیته دینامیکی و نیز تغییرات احتمالی آن مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور میانگین سرعت امواج اولتراسونیک و مدول الاستیسیته دینامیکی در دو نمونه در هر سن اندازه گیری شده است و در جدول ۸ ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود مدول الاستیسیته دینامیکی بتن با افزایش سن بیشتر شده است، کمتر بودن مدول الاستیسیته دینامیکی در سنین پایین‌تر احتمالاً در نتیجه آب انداختن و تراکم کمتر باشد. نمودار تغییرات درصدی مقادیر نسبی مدول الاستیسیته دینامیکی طرح‌های بتن در سنین مختلف در شکل ۷ ارائه شده است.

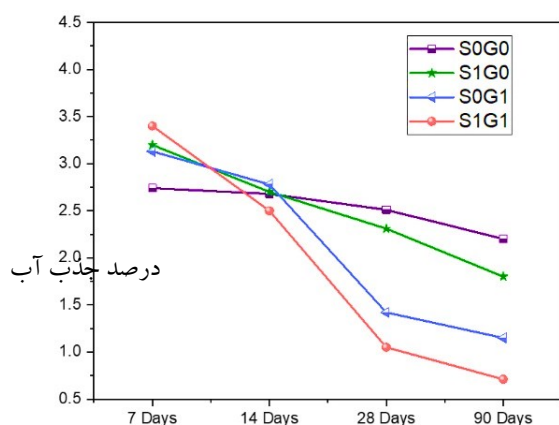
بر مبنای نتایج به دست آمده از آزمایش اولتراسونیک در نقطه تعیین شده از نمونه‌های بتنی و با استفاده از فرمول (۲)، نحوه توزیع مدول الاستیسیته دینامیکی و نیز تغییرات احتمالی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

برای این منظور میانگین سرعت امواج اولتراسونیک و مدول الاستیسیته دینامیکی در دو نمونه در هر سن اندازه گیری شده است

جدول ۸- مدول الاستیسیته دینامیکی نمونه های آزمایشی در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه

سن نمونه	مدول الاستیسیته دینامیکی ۷ روزه (Gpa)	مدول الاستیسیته دینامیکی ۱۴ روزه (Gpa)	مدول الاستیسیته دینامیکی ۲۸ روزه (Gpa)
S0G0	۵۷/۷	۶۶/۲۵	۸۱/۳۱
S1G0	۶۲/۸	۶۹/۰۷	۸۴/۱۶
S0G1	۶۴/۳۴	۷۷/۲۸	۹۵/۹۳
S1G1	۷۱/۱۳	۸۱/۹۸	۱۰۲/۵۲

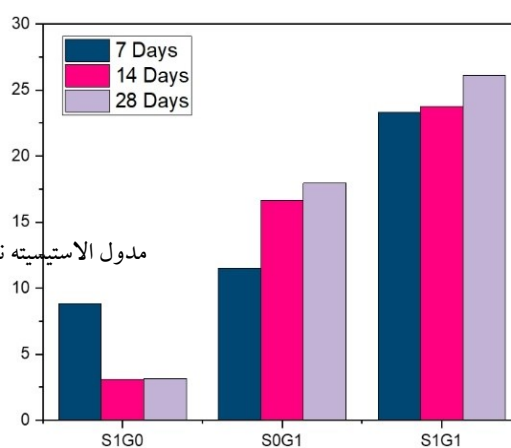
مکعبی ۱۰ در ۱۰ سانتیمتری انجام شد که نتیجه آن در نمودار شکل ۸ آمده است.



شکل ۸- نمودار جذب آب نمونه های آزمایشی در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه

همان طور که از نمودار مشخص است، جذب آب در سنین پایین ۷ و ۱۴ در نمونه های حاوی نانو موجب افزایش جذب شده است ولی نمونه های حاوی نانو در سن ۲۸ روز با شیب تندی روند کاهش جذب آب را طی کرده اند، که نمودار نمونه های حاوی نانو اکسید گرافن و سیلیکا، دارای شیب بیشتری نسبت به نمودارهای دیگر دارد. در این آزمایش نیز استفاده از نانو اکسید گرافن و سیلیکا بر کاهش میزان جذب آب نمونه های بتنی مؤثر بوده است. با این تفاوت که نانو اکسید گرافن اثر بیشتری در کاهش میزان جذب آب در مقایسه با نانو سیلیکا داشته است. از آنجاکه میزان جذب آب بیشتر مربوط به حفرات منقطع و سطحی بتن است و همان طور که از نمودار ۶ مشخص است نمونه بتنی که در نمونه های حاوی نانو اکسید گرافن، در سنین پایین موجب افزایش جذب آب شده که واکنش های پوزولانی دانست که این روند در سن ۲۸

با توجه به شکل ۷ ملاحظه می شود که در بتن حاوی سیلیکا نسبت به نمونه شاهد افزایش جزئی مدول الاستیسیته دینامیکی داشته، به خصوص در سن ۱۴ روزه که تا ۳/۱ درصد افزایش داشته است اما نمونه حاوی نانو اکسید گرافن و سیلیکا در سن ۲۸ روزه بیشترین افزایش را داشته و تا ۲۶/۹ درصد این افزایش رسیده است در نمونه های حاوی نانو اکسید گرافن این افزایش در سن ۲۸ روزه به ۱۷/۲ درصد رسیده است. نتایج آزمایش نشان داد که افزودن نانوذرات اکسید گرافن و سیلیکا به طور قابل توجهی سرعت امواج اولتراسونیک و مدول الاستیسیته دینامیکی را افزایش می دهد. این بهبود ناشی از کاهش تخلخل و افزایش چگالی ساختار بتن در اثر افزودن نانوذرات است.



شکل ۷- مدول الاستیسیته دینامیکی نمونه های آزمایشی نسبت به نمونه شاهد در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه

۵-۵- آزمایش جذب آب

آزمایش جذب آب برای تمامی طرح ها طبق استاندارد BSI ۱۸۸۱ در سن های ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز در ۴ طرح، و از هر طرح دو نمونه

مشخص است، افزودن نانو اکسید گرافن موجب افزایش ۵۲ درصدی و افزودن نانو سیلیکا موجب افزایش ۶/۳ درصدی مقاومت الکتریکی شده است. این در حالی است که در بتن حاوی نانو ذرات اکسید گرافن و سیلیکا به صورت هم زمان مقاومت الکتریکی به ۸۶/۲ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. دقت در مسیر افزایش مقاومت الکتریکی نمونه ها نشان می دهد نمونه های حاوی نانو اکسید گرافن سرعت زیادی در افزایش مقاومت الکتریکی داشته اند.

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

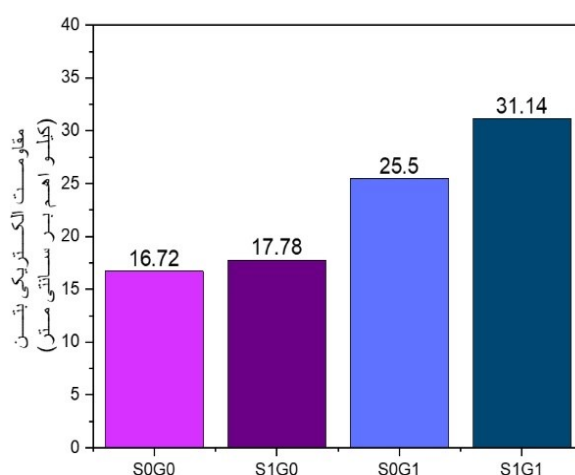
نانومهندسی شامل تکنیک هایی برای دستکاری ساختاری در مقیاس نانو برای ایجاد نسل جدیدی از کامپوزیت های سیمانی با خواص مکانیکی ایده آل است و امکان تولید بتن با خواص جدید و حتی هوشمند وجود دارد. بر این اساس، پژوهش حاضر با در نظر گرفتن خواص اکسید گرافن و نانوذرات سیلیس، به بررسی اثرات استفاده از این مواد در بتن پایه سیمان پرتلند پرداخت. با توجه به نتایج به دست آمده افزودن اکسید نانو گرافن و نانوذرات سیلیس به بتن در تمام سنین، مقاومت فشاری نمونه های بتن را افزایش داد. علاوه بر این، مقایسه اثر نانو اکسید گرافن و نانوذرات سیلیکا بر مقاومت فشاری نیز نشان می دهد که نانو اکسید گرافن نسبت به نانوذرات سیلیکا تأثیر بیشتری بر افزایش استحکام دارد. همچنین بر اساس نتایج تجربی، مشاهده شد که در ۷ روزگی، افزودن اکسید نانو گرافن و نانوذرات سیلیس به بتن بیشترین تأثیر را بر جای گذاشت و مقاومت کششی نمونه های بتن را افزایش داد. مقایسه نقاط قوت نمونه های طراحی مزیت نسبی استفاده از اکسید نانو گرافن برای دستیابی به استحکام کششی تارا به ویژه در سنین پایین نشان می دهد. میزان این روند (افزایش مقاومت) در سنین ۱۴ و ۲۸ سالگی کاهش یافت. در نمونه های حاوی نانو اکسید گرافن و نانوذرات سیلیس، مدول الاستیسیته بیشترین افزایش را در سن ۲۸ روزگی داشت.

در جدول ۹، نتایج مقاومت فشاری و کششی این پژوهش با پژوهش های دیگر مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود، ترکیب بهینه شده نانوذرات اکسید گرافن و سیلیس در تحقیق حاضر منجر به دستیابی به بالاترین مقادیر مقاومتی شده است.

روز، بالعکس شده و باعث کاهش جذب آب تا ۵۶/۳ درصد نسبت به نمونه شاهد است در نمونه های حاوی نانو سیلیکا مانند نمونه های حاوی نانو اکسید گرافن در سن ۷ روز باعث افزایش درصد جذب آب شده، ولی از سن ۱۴ روز، روند کاهش جذب آب را شروع کرده و در سن ۲۸ روز ۴۳/۴ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش جذب داشته است در حالی که نمونه شامل نانو ذرات اکسید گرافن و سیلیکا جذب آبی در حدود ۶۰ درصد کمتر از نمونه شاهد داشته اند که خاصیت پرکنندگی و تشکیل ژل سیلیکات را می توان دلیل آن دانست.

۶-۵- آزمایش مقاومت الکتریکی

به علت حرکت یون ها داخل محیط بتن دارای حرکت الکتریکی می باشد مقدار مقاومت الکتریکی بتن بستگی مستقیم به نفوذپذیری بتن و شرایط محیطی بتن (مقدار یون های نفوذی و رطوبت بتن) دارد و مسلماً هر چه نفوذپذیری بتن بیشتر باشد یون ها به راحتی و با سرعت بیشتری می توانند به داخل محیط بتن راه یابند هر چه مقادیر یون های نفوذی بیشتر باشد مقاومت الکتریکی بتن کمتر خواهد بود. بتن هایی که دارای مقاومت الکتریکی بالایی هستند، در برابر نفوذ یون کلراید و شروع خوردگی عملکرد بهتری خواهند داشت. آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی نمونه های بتنی ۴ طرح در سن ۹۰ روز نمونه ها انجام گردید که نمودار شکل ۹ نتایج کسب شده این آزمایش را نشان می دهند.



شکل ۹- آزمایش مقاومت الکتریکی نمونه های آزمایشی

افزودن نانو اکسید گرافن و سیلیکا به بتن موجب افزایش مقاومت الکتریکی نمونه ها شده است. همان طور که از نمودار شکل ۹

جدول ۹- مقایسه نتایج مقاومت فشاری و مقاومت کششی با پژوهش های مشابه

پژوهش	نوع بتن	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مرجع
Lv و همکاران	معمولی	42.3	4.1	[44]
Pang و Du	سبک	47.8	4.6	[45]
Novoselov و همکاران	خودتراکم	51.2	4.9	[46]
Zhang و همکاران	نانو کامپوزیت	49.5	4.7	[47]
Wang و همکاران	سبک	45.6	4.3	[48]
تحقیق حاضر	خودتراکم سبک	53.6	5.2	-

Reporting CO₂, World Business Council for Sustainable Development, 2016, <https://www.wbcsdcement.org/GNR2016/>, Accessed date: 19 June 2019.

[5] Y. Meng, T.-C. Ling, K.H. Mo, W. Tian, Enhancement of high temperature performance of cement blocks via CO₂ curing, *Sci. Total Environ.* 671 (2019) 827–837, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.411>.

[6] V.V.P. Kumar, D.R. Prasad, Influence of supplementary cementitious materials on strength and durability characteristics of concrete, *Adv. Concr. Constr.* 7 (2019) 75–85, <https://doi.org/10.12989/ACC.2019.7.2.075>.

[7] S.K. Kaliyavaradhan, T.-C. Ling, Potential of CO₂ sequestration through construction and demolition (C&D) waste—an overview, *J. CO₂ Util.* 20 (2017) 234–242, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.05.014>.

[8] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolio, Sustainable cement production—present and future, *Cement Concr. Res.* 41 (2011) 642–650, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>.

[9] T. Luukkonen, Z. Abdollahnejad, J. Yliniemi, P. Kinnunen, M. Illikainen, Comparison of alkali and silica sources in one-part alkali-activated blast furnace slag mortar, *J. Clean. Prod.* 187 (2018) 171–179, <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.202>.

[10] D.K. Ashish, S.K. Verma, Determination of optimum mixture design method for self compacting concrete: validation of method with experimental results, *Constr. Build. Mater.* 217 (2019) 664–678, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.034>.

[11] D.K. Ashish, Concrete made with waste marble powder and supplementary cementitious material for sustainable development, *J. Clean. Prod.* 211 (2019) 716–729, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.245>.

[12] D.K. Ashish, S.K. Verma, Cementing Efficiency of Flash and Rotary-Calcined

استفاده از گرافن و نانو سیلیس باعث کاهش جذب آب در نمونه های بتن شد. با این تفاوت که نانو اکسید گرافن تأثیر بیشتری در کاهش جذب آب نسبت به نانو سیلیس داشت. از آنجایی که مقدار آب جذب شده عمدتاً بر حفره های ناپیوسته و سطحی بتن تأثیر می گذارد و همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، نمونه بتنی حاوی نانو اکسید گرافن که به دلیل واکنش های پوزولانی در سنین جوانی جذب آب بیشتری را نشان داد، محدود شد از سن ۲۸ روز جذب آب کمتری نسبت به نمونه شاهد داشت. همین طور نمونه حاوی نانو اکسید گرافن و سیلیکا مقاومت الکتریکی بالایی از خود نشان داد که می تواند در برابر نفوذ یون کلراید و خوردگی عملکرد بهتری داشته باشد.

۷- مراجع

[1] T. Wilberforce, A. Baroutaji, B. Soudan, A.H. Al-Alami, A.G. Olabi, Outlook of carbon capture technology and challenges, *Sci. Total Environ.* 657 (2019) 56–72, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.424>.

[2] M. Mastali, Z. Abdollahnejad, F. Pacheco-Torgal, Carbon dioxide sequestration on fly ash/waste glassalkali-based mortars with recycled aggregates: compressive strength, hydration products, carbon footprint, and cost analysis, in: F. PachecoTorgal, C. Shi, A. Palomo Sanchez (Eds.), *Carbon Dioxide Sequestration Cem. Constr. Mater.* first ed., Woodhead Publishing, 2018, pp. 299–348, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102444-7.00013-7>.

[3] S. Drissi, T.-C. Ling, K.H. Mo, A. Eddhahak, A review of microencapsulated and composite phase change materials: alteration of strength and thermal properties of cement-based materials, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 110 (2019) 467–484, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.072>.

[4] WBCSD, Getting the Numbers Right Project:

- production of cement and concrete – a review, *J. Environ. Chem. Eng.* 2 (2014) 1767–1775, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.03.016>.
- [23] K.A. Zaidi, S. Ram, M.K. Gautam, Utilisation of glass powder in high strength copper slag concrete, *Adv. Concr. Constr.* 5 (2017) 65–74, <https://doi.org/10.12989/ACC.2017.5.1.065>.
- [24] G. Chen, H. Lee, K.L. Young, P.L. Yue, A. Wong, T. Tao, K.K. Choi, Glass recycling in cement production—an innovative approach, *Waste Manag.* 22 (2002) 747–753, [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00047-8](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00047-8).
- [25] C. Shi, K. Zheng, A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete, *Resour. Conserv. Recycl.* 52 (2007) 234–247, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.013>.
- [26] R.C. Lewis, N. De Belie, M. Soutsos, E. Gruyaert (Eds.), *Silica Fume BT – Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials: State-Of-The-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4*, Springer International Publishing, Cham, 2018, pp. 99–121, https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1_3.
- [27] K.C. Williams, P. Partheeban, An experimental and numerical approach in strength prediction of reclaimed rubber concrete, *Adv. Concr. Constr.* 6 (2018) 87–102, <https://doi.org/10.12989/ACC.2018.6.1.087>.
- [28] A. Imam, V. Kumar, V. Srivastava, Review study towards effect of Silica Fume on the fresh and hardened properties of concrete, *Adv. Concr. Constr.* 6 (2018) 145–157, <https://doi.org/10.12989/ACC.2018.6.2.145>.
- [29] Y. Yue, J.J. Wang, Y. Bai, Tracing the status of silica fume in cementitious materials with Raman microscope, *Constr. Build. Mater.* 159 (2018) 610–616, <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.11.015>.
- [30] M. Mazloom, A. Allahabadi, M. Karamloo, Effect of silica fume and polyepoxidebased polymer on electrical resistivity, mechanical properties, and ultrasonic response of SCLC, *Adv. Concr. Constr.* 5 (2017) 587–911, <https://doi.org/10.12989/ACC.2017.5.6.587>.
- [31] S. Ahmad, A. Umar, A. Masood, M. Nayeem, Performance of self-compacting concrete at room and after elevated temperature incorporating Silica fume, *Adv. Concr. Constr.* 7 (2019) 31–37, <https://doi.org/10.12989/ACC.2019.7.1.031>.
- [32] M. Mastali, A. Dalvand, The impact resistance and mechanical properties of fiber reinforced self-compacting concrete (SCC) containing nano-SiO₂ and silica fume, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 22 (2018) 1767–1775, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002953](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002953) In press.
- [13] L.M. Federico, *Waste Glass-A Supplementary Cementitious Material*, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, 2013 <https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/13455/1/fulltext.pdf>.
- [14] M.C.G. Juenger, R. Siddique, Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete, *Cement Concr. Res.* 78 (2015) 71–80, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>.
- [15] R. Snellings, Assessing, understanding and unlocking supplementary cementitious materials, *RILEM Tech. Lett.* 1 (2016), <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.12.55-55>.
- [16] H. Toutanji, N. Delatte, S. Aggoun, R. Duval, A. Danson, Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete, *Cement Concr. Res.* 34 (2004) 311–319, <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2003.08.017>.
- [17] R. Siddique, Utilization of silica fume in concrete: review of hardened properties, *Resour. Conserv. Recycl.* 55 (2011) 923–932, <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2011.06.012>.
- [18] M. Djezzar, K. Ezziane, A. Kadri, E.-H. Kadri, Modeling of ultimate value and kinetic of compressive strength and hydration heat of concrete made with different replacement rates of silica fume and w/b ratios, *Adv. Concr. Constr.* 6 (2018) 297–309, <https://doi.org/10.12989/ACC.2018.6.3.297>.
- [19] M. Sarıdemir, Effect of silica fume and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete, *Constr. Build. Mater.* 49 (2013) 484–489, <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.08.091>.
- [20] Zahra Abdollahnejad, Mohammad Kheradmand, F. Pacheco-Torgal, Short-term compressive strength of fly ash and waste glass alkali-activated cement-based binder mortars with two biopolymers, *J. Mater. Civ. Eng.* 29 (2017) 4017045, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001920](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001920).
- [21] Z. Abdollahnejad, A. Dalvand, M. Mastali, T. Luukkainen, M. Illikainen, Effects of waste ground glass and lime on the crystallinity and strength of geopolymers, *Mag. Concr. Res.* (2018) 1–38, <https://doi.org/10.1680/jmacr.18.00300>.
- [22] Y. Jani, W. Hogland, Waste glass in the

- Kurmus, A. Arulrajah, S. Horpibulsuk, Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: a review, *Constr. Build. Mater.* 156 (2017) 443–467, <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.09.005>.
- [43] M. Belouadah, Z.E.A. Rahmouni, N. Tebbal, Effects of glass powder on the characteristics of concrete subjected to high temperatures, *Adv. Concr. Constr.* 6 (2018) 311–322, <https://doi.org/10.12989/ACC.2018.6.3.311>.
- [44] S. Lv, T. Liu, T. Ma, Effect of GO nanosheets on mechanical properties of cement composites, *Cement Concr. Compos.* 98 (2019) 33–42, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.003>.
- [45] H. Du, S.D. Pang, Enhancement of barrier properties of cement mortar with graphene nanoplatelets, *Constr. Build. Mater.* 240 (2020) 117931, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117931>.
- [46] K. Novoselov, A.K. Geim, I. Abrikosov, Graphene-reinforced self-compacting concrete: Mechanical and durability properties, *Mater. Des.* 199 (2021) 109406, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109406>.
- [47] L. Zhang, W. Chen, X. Li, Nanocomposite cement materials with graphene derivatives: A comprehensive review, *Compos. Part B-Eng.* 216 (2022) 108862, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108862>.
- [48] Y. Wang, R. Huang, J. Zhao, Lightweight structural concrete with nano-additives: Performance evaluation, *J. Mater. Civ. Eng.* 32(4) (2020) 04020035, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003092](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003092).
- 1–27, <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1177604>.
- [33] B. Viswanath, S. Kim, P. de Voogt (Ed.), Influence of Nanotoxicity on Human Health and Environment: the Alternative Strategies BT - Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, Springer International Publishing, Cham, 2017, pp. 61–104, https://doi.org/10.1007/398_2016_12.
- [34] P.H.M. Hoet, I. Brüske-Hohlfeld, O. V Salata, Nanoparticles - known and unknown health risks, *J. Nanobiotechnol.* 2 (2004) 12, <https://doi.org/10.1186/1477-3155-2-12>.
- [35] M.I. Khan, R. Siddique, Utilization of silica fume in concrete: review of durability properties, *Resour. Conserv. Recycl.* 57 (2011) 30–35, <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2011.09.016>.
- [36] R. Siddique, N. Chahal, Use of silicon and ferrosilicon industry by-products (silica fume) in cement paste and mortar, *Resour. Conserv. Recycl.* 55 (2011) 739–744, <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2011.03.004>.
- [37] S. Yaseri, G. Hajiaghvaei, F. Mohammadi, M. Mahdikhani, R. Farokhzad, The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste, *Constr. Build. Mater.* 157 (2017) 534–545, <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.09.102>.
- [38] P.-C. Aïtcin, 4 - supplementary cementitious materials and blended cements, in: P.C. Aïtcin, R.J. Flatt (Eds.), *Sci. Technol. Concr. Admixtures*, Woodhead Publishing, 2016, pp. 53–73, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00004-7>.
- [39] FHWA, User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, (2016) Washington, DC, USA <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/in-frastructure/structures/97148/intro.cfm>, Accessed date: 25 April 2019.
- [40] R.V. Silva, J. de Brito, C.Q. Lye, R.K. Dhir, The role of glass waste in the production of ceramic-based products and other applications: a review, *J. Clean. Prod.* 167 (2017) 346–364, <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.08.185>.
- [41] P. Turgut, E.S. Yahlizade, Research into concrete blocks with waste glass, *Int. J. Civ. Environ. Eng.* 3 (2009) 186–192 <https://waset.org/publications/6041/researchinto-concrete-blocks-with-waste-glass>, Accessed date: 28 April 2019.
- [42] A. Mohajerani, J. Vajna, T.H.H. Cheung, H.

Increasing concrete performance with synthesized graphene oxide nanoparticles and silica

Seyed Ali Hosseini Moradi *

Faculty of Basic Sciences, Department of Physics, faculty member of Khatam al-Anbia Air Defense University (PBUH) of Iran.

Abstract

The effect of concrete porosity on water absorption and stability of cement products is very important. The permeability of concrete allows the entry of reactive molecules that can cause the concrete to lose its chemical stability. Concrete with low permeability increases the resistance to the penetration of water, sulfate ions, chloride ions and other pollutants. This property is related to the pore structure. including small cracks in the contact spaces between aggregate and cement mortar. The so-called pore structure includes capillary pores that have different volumes and sizes. This structure is the result of the cement hydration reaction and consists of solid materials and pores. The porous network of cement paste forms the matrix necessary for liquid penetration into the concrete. The development of this network is influenced by concrete properties, initial sealing conditions, its duration, test age and weather conditions. Temperature, processing time and humidity are also important factors affecting the pore structure. In this research, graphene oxide and silica nanoparticles were used to make nanocomposite concrete resistant to penetration. The results showed that by adding 0.05% of graphene oxide nanoparticles and 10% of silica nanoparticles, the compressive and tensile strength of concrete increased by 28.6% and 35%, respectively. Also, in water absorption tests, the manufactured sample absorbed 46% less water and its electrical resistance was 79% higher.

Keywords: concrete, graphene oxide,, silica, mechanical resistance, water absorption, electrical resistance, nano composite concrete.

* Corresponding Author: Physicplasma2011@gmail.com

