www.nm.shahrood.ac.ir
نانومواد: ۵۷:۱۶ (۱۴۰۳) ۵۰-۳۹

مقاله پژوهشی

اثر ترکیب بهینه نانواکسید گرافن و نانوسیلیس بر دوام و خواص مکانیکی بتن غیر مسلح ساخته شده از سیمان پرتلند

کمال نصیری[۱]، محمد کارکن*[،۱]، لیلا شهریاری[۲] و اکبر قنبری[۱]

۱- گروه عمران، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران
۲- گروه عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۲/۰۹/۳۰، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۲/۱۲/۰۵

چکیده

در این پژوهش اثرات ترکیب درصدهای مختلفی از نانواکسید گرافن و نانوسیلیس در بتن غیرمسلح ساخته شده از سیمان پرتلند بر خواص مکانیکی و دوام بتن مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب ۱۶ نمونه طرح اختلاط بتن حاوی نانومواد تهیه و خصوصیات فناوری نانو در آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاصل از آزمایشات خصوصیات مکانیکی بتن شامل مقاومت فشاری، ذوب و یخبندان و نفوذپذیری بررسی گردید. با توجه به بررسی نتایج ملاحظه شد که خواص مکانیکی بتن حاصل از ترکیب نانوسیلیس و نانواکسیدگرافن بستگی مستقیم به نوع و درصد مصالح مصرفی در طرح اختلاط دارد. استفاده همزمان این دو نانومواد در ساخت نمونه‌های بتنی عموما تاثیر منفی بر روی خواص مکانیکی بتن و پارامترهای دوام دارد، پس از آزمون و خطا بوسیله ترکیب درصدهای متفاوت این دو نانومواد، مشخص گردید که در صورت استفاده از ترکیب بهینه این دو ماده، مقاومت فشاری نمونه بتنی حاوی ترکیب ۳٪ نانوسیلیس به همراه ۰/۱٪ نانواکسید گرافن ($Ns_3g_{0/1}$) با افزایش ۱۳٪ مواجه شده و مقاومت کششی نمونه بتنی حاوی ترکیب ۲٪ نانوسیلیس به همراه ۰/۱٪ نانواکسید گرافن ($Ns_2g_{0/1}$) افزایش ۱۰٪ نسبت به نمونه شاهد حاصل شده و البته بهبود دوام توسط نمونه‌های حاوی ۳٪ نانوسیلیس با نرخ افزایش ۹٪ کسب شده است. ماتریس بتن تا درصد مشخصی ظرفیت پذیرش سیلیس در جهت بهبود کیفیت خصوصیات مکانیکی و پارامترهای دوام را دارا می‌باشد، پس از آن در ابتدا دچار کاهش مقاومت و سپس کاهش پارامترهای دوام بتن می‌گردد که نتایج حاصل شده از این پژوهش گواه بر این امر است.

***واژه‌های کلیدی:* نانواکسیدگرافن، نانوسیلیس، فناوری نانو، دوام، نفوذپذیری، ذوب و یخبندان، خواص مکانیکی بتن.**

۱- مقدمه

بتن به دلیل داشتن خصوصیات منحصر به فرد خود استفاده زیادی در پروژه‌ها عمرانی و ساخت و سازه‌های مهم در سطح جهان را به خود اختصاص داده است. افزایش خواص مکانیکی بتن مانند مقاومت فشاری و خمشی ، می‌تواند باعث کاهش مقدار سیمان مورد نیاز و ابعاد سازه‌های بتنی گردد [۱].

* **عهده‌دار مکاتبات:** محمد کارکن
نشانی: گروه عمران، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران
تلفن: ۰۷۱-۵۲۲۵۱۰۰۲، **دورنگار:** ۰۷۱-۵۲۲۴۸۹۱، **پست الکترونیکی:** mo.karkon@iau.ac.ir

بتن غیرمسلح یکی از انواع بتن‌های مورد استفاده در دنیا می‌باشد. در این بتن از هیچ‌گونه المان مسلح کننده‌ای استفاده نشده است و اجزای اصلی آن سیمان، سنگدانه و آب می‌باشد. امروزه با پیشرفت علم و تکنولوژی، مطالعات و پژوهش‌های زیادی جهت افزایش خواص مکانیکی آن انجام شده، که یکی از راه‌های افزایش خواص مذکور استفاده از فناوری نانو در بتن می‌باشد. فناوری نانو عبارت است از گسترش، تولید و استفاده از ابزار و موادی که ابعادشان در حد نانومتر است (نانومتر برابر با یک میلیاردم متر یا 10^{-9}متر است) [۲].

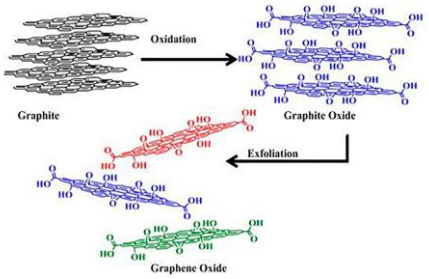
نانومواد به دلیل دارا بودن خواص در مقیاس نانو می‌توانند به طور موثر ساختار منافذ را پرکنند. بنابراین وقتی که ذرات در حد نانومتر کوچک می‌شوند باعث تغییراتی در خواص فیزیکی و شیمیایی مواد از جمله افزایش نسبت سطح به حجم می‌دهند. لذا با افزایش سطح یک ماده امکان تغییر و واکنش تعداد بیشتری از اتم‌ها امکان‌پذیر می‌گردد و با تغییر آرایش اتم‌ها خواص ماده نیز تغییر می‌یابد [۳،۴]. همین ابعاد کوچک دلیلی بر وجود خصوصیات مثبت نانومواد و همچنین انعطاف‌پذیری بهتر آن‌ها نسبت به مواد دیگر شده است. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که بیشترین آسیب‌های وارد شده به بتن در نقص‌های شیمیایی ساختار سیمان است و می‌توان با استفاده از نانومواد این نقص را برطرف نمود. همچنین یکی از این مزیت‌ها افزایش هیدراتاسیون سیمان می‌باشد که باعث بهبود خصوصیات مکانیکی سازه بتنی می‌گردد [۵].

دی‌اکسید سیلیس فراوان‌ترین ترکیب اکسیدی موجود در پوسته زمین است که به ذرات این ماده که کوچکتر از ۳۰۰ نانومتر می‌باشد نانوسیلیس می‌گویند [۵]. نانوسیلیس از افزودنی‌های مهم در بتن بوده که همانند میکروسیلیکا بر پایه یک ترکیب پوزولانی است. نانوسیلیس دارای خواصی از قبیل تاثیر مستقیم بر استحکام و افزایش مقاومت بتن در برابر فشارهای کششی خارجی، مقاومت در برابر خوردگی و عوامل مخرب محیطی در بتن، واکنش‌های خوب شیمیایی، جلوگیری از فرسایش و استهلاک سازه‌ها، افزایش تراکم و انسجام ترکیب بتن [۶،۷]، غیرقابل‌نفوذ بودن ترکیب نسبت به هوا و آب، قابلیت ترکیب با هرنوع سیمان می‌باشد [۸]. بتن حاوی ۳٪ نانوسیلیس به حداکثر مقاومت خمشی می‌رسد. که نسبت به بتن شاهد دارای مقاومت بهتری است. استفاده از نانوسیلیس در نسبت‌های زیاد موجب افزایش فوق‌العاده ویسکوزیته بتن در اثر جذب آب موجود در آن و اختلال در هیدراتاسیون سیمان و در نتیجه موجب تخلخل در بتن و پائین آمدن کیفیت بتن‌ها می‌گردد. اما بدلیل فعالیت پوزولانی نانوسیلیس ، مقاومت فشاری در سنین اولیه نسبت به سنین بعدی بتن افزایش می‌یابد [۹].

مخلوط‌های دارای درصدهای کمی از نانوسیلیس (۰٪/۷۵) در مقایسه با مخلوط‌های دارای درصد بالای نانوسیلیس (۱/۵٪ و ۲٪) کمتر دچار ترک می‌گردند که دلیل آن فعالیت پوزولانی مواد نانوسیلیس است که باعث تشکیل ژل C-S-H شده و در نتیجه حفره‌های بزرگ بتن را پر کرده و مقاومت بتن را افزایش می‌دهد ولی پس از مدت زمان زیادی که این ژل‌ها خشک می‌شوند ترک ایجاد می‌گردد. ترک‌های کوچکی که در بتن ایجاد می‌گردد به دوزهای نانوسیلیس بستگی دارند [۱۰]. با اضافه کردن ۳٪ نانوسیلیس نسبت به وزن سیمان به دلیل فعالیت پوزولانی در سنین اولیه ساخت، حداکثر مقاومت فشاری حاصل می‌گردد. بتن حاوی ۳٪ نانوسیلیس به حداکثر مقاومت خمشی می‌رسد. که نسبت به بتن شاهد دارای مقاومت بهتری است. اما استفاده از ۲٪ نانوسیلیس در بتن به دلیل اینکه تاثیر مستقیم در کارائی بتن دارد بهترین مقدار درصد پیشنهاد محققین می‌باشد. به دلیل اندازه کوچک ذرات نانوسیلیس و قرار گرفتن در فضای خالی حفره‌های سنگدانه‌ها و در نتیجه کاهش اندازه حفره‌های درون بتن، بهبود رفتار و دوام بتن را به همراه داشته و باعث تراکم بهتر بتن می‌گردد که این امر به بتن اجازه می‌دهد استحکام خود را افزایش داده و از نشت و نفوذ گاز و مواد شیمیایی با تاثیر منفی بر رفتار بتن جلوگیری کند [۵،۱۰]. از خواص افزودن نانو سیلیس به بتن، افزایش مقاومت در برابر

نفوذ کلرید به دلیل پرشدن فضاهای خالی بین مصالح سنگی بتن با نانوسیلیس می‌باشد. خواص مهم مقاومت در برابر نفوذپذیری کلرید و انجماد ذوب دو عنصر مهم برای دوام بتن می‌باشند. لازم به یادآوری است که دوام بتن یکی از عوامل مهم برای ارزیابی طول عمر بتن می‌باشد. هنگامی که نسبت آب به سیمان کم باشد و نانوذرات کوچک هم به شکل موثری پراکنده نگردند محل‌های تجمع آن‌ها به شکل حفره‌های ضعیف خواهد بود [۱،۱۱].

گرافیت و الماس از عمومی‌ترین شکل کریستالی اتم کربن می‌باشند که با نحوه قرارگیری اتم‌های کربن، گرفیت نرم و یا الماس سخت بوجود می‌آید. گرافیت خود از چند لایه گرافن بوجود آمده است و گرافن نیز از یک لایه اتمی نازک کربن تشکیل شده است. اتم کربن در حالت عادی یک ماده چهار ظرفیتی است یعنی در لایه ظرفیت آن ۴ الکترون دارد. اما در گرافن تنها ۳ پیوند کووالانسی بین الکترون‌ها برقرار می‌شود و یکی از این الکترون‌ها به صورت آزاد روی این صفحه گرافنی قرار دارد که این الکترون آزاد به گرافن خواص الکتریکی و حرارتی ویژه‌ای می‌دهد [۱۲]. نحوه قرارگرفتن اتم‌های گرافن باعث تشکیل سبک‌ترین و قوی‌ترین ماده در طبیعت می‌گردد که از خصوصیات آن سفتی، کشش، استحکام فوق‌العاده [۱۳]، مساحت سطح بسیار بالا و رسانایی الکتریکی و حرارتی را می‌توان نام برد. یکی از مشکلات اساسی استفاده ازگرافن در بتن، آب گریز بودن ذرات گرافن است که این مشکل تمایل به کلوخه شدن آن‌ها و عدم‌ترکیب مناسب را در پی خواهد داشت. از این رو برای حل این مشکل می‌توان از نانواکسید گرافن استفاده کرد.گرافن اکساید ماده‌ای دو بعدی است با ساختار شش ضلعی و کریستالی که به صورت تک لایه ساخته شده است که بر روی صفحات آن اکسیژن وجود دارد. گروه‌های اکسیژنی باعث به هم ریختن ساختار اصلی گرافن می‌شوند بنابراین خواص اصلی آن مانند رسانایی (الکتریکی–حرارتی) را تحت تاثیر قرار داده و آن‌را کاهش می‌دهند. اما وجود گروه‌های اکسیژنی اجازه می‌دهد این ماده برهم کنش بهتری با مواد دیگر داشته باشد و این امکان را به ما می‌دهد که با استفاده از پیوندهای کووالانسی این صفحات را به پلیمرها یا مواد دیگر پیوند بزنیم. زیست‌سازگاری بهتر این ترکیب نسبت به گرافن کاربردپذیری آن‌را نیز بهبود می‌بخشد. مطابق با شکل شماتیک ۱ نانواکسید گرافن در واقع همان صفحات دو بعدی گرافنی هستند که روی صفحات آن گروه‌های اکسیژنی وجود دارد. [۱۲].



شکل ۱: روش تبدیل گرافن به اکسید گرافن.

افزودن نانوگرافن، دوام بتن را در چرخه‌های ذوب و یخبندان به میزان زیادی افزایش می‌دهد، که دلیل احتمالی آن می‌تواند عدم‌وجود ترک یا سوراخ ریز بین کریستال‌ها در بتن حاوی گرافن باشد، که همین امر نفوذ آب به بتن را تا حد زیادی کم می‌کند، پس انجماد را کاهش و در نتیجه مقاومت در برابر انجماد و ذوب مواد را بهبود می‌دهد [۱۳]. نانوذرات گرافن با پر کردن حفره‌ها باعث رشد محصولات هیدراتاسیون و در نتیجه شکل و اندازه کریستال هیدراتاسیون می‌شوند. ساختار محصولات حاصله از هیدراتاسیون نمونه‌ها که با نانوگرافن ساخته می‌شوند ساختاری فشرده‌تر و یکنواخت‌تر تولید می‌کنند که ریز کریستال‌های متقاطع آن‌ها باعث بهبود خواص مکانیکی بتن شده و مقاومت بتن در برابر ذوب و یخبندان را ارتقاء می‌دهد [۱۴]. با افزودن نانوگرافن، محققین مشاهده کردند که تخلخل کمتری در نمونه‌های بتنی رخ می‌دهد و باعث بوجود آمدن یک ریزساختار جمع و جور می‌گردد و در نتیجه جذب آب کمتری دارند و در مقایسه با نمونه‌های بتنی کنترلی در تمام اقدامات مقاومت به یخزدایی آسیب سطحی کمتری می‌بینند [۱۵]. طبق تحقیقات

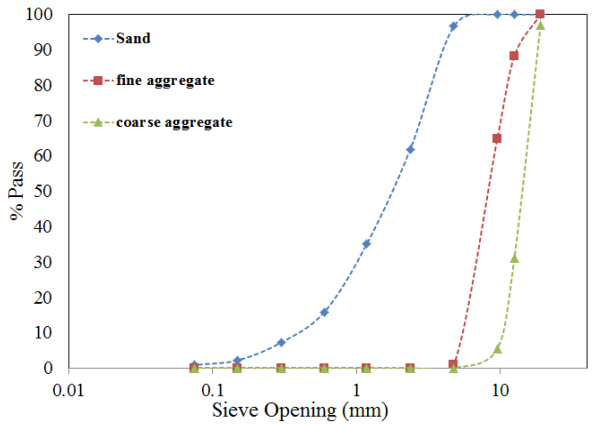
صورت گرفته اضافه نمودن نانواکسید گرافن در بتن تاثیرات مثبت و بهبود خصوصیات چشم‌گیر نتیجه داده است. پیشتر اثرات استفاده از نانواکسید گرافن در بتن‌های غلطکی با مقاومت بالا توسط محققین بررسی شده است که نتایج آزمایشات بررسی شده نشان‌گر افزایش محدود خصوصیات مکانیکی و بهبود دوام بتن می‌باشد [۱۶].

استفاده از مقدار ۰/۳ درصد نانواکسید گرافن نسبت به وزن سیمان باعث بیشترین مقاومت فشاری و خمشی به دلیل تقویت گرافن در منطقه الاستیک و ایجاد پیوند قوی بین سیمان و سنگدانه‌ها در مقایسه با بتن شاهد می‌گردد[۳]. استفاده از یک فوق روان‌کننده در بتن حاوی ۰/۰۳٪ وزن سیمان از نانواکسید گرافن، بهترین اثر را نشان می‌دهد. بنابراین با افزایش نانواکسید گرافن، ریزساختار بتن هم تغییر کرده و مقاومت فشاری سیمان نیز بهبود می‌یابد [۶،۱۳]. طبق مطالعات و نتایج فوق استفاده از درصدهای مشخصی از نانوذرات سیلیس و اکسید گرافن در بتن باعث افزایش خواص مکانیکی و کاهش نفوذپذیری یون کلرید گردیده اند [۴،۱۷]. نانوهیبریدهای اکسید گرافن بر عملکرد خمیر سیمان تاثیر منفی می‌گذارد اما امکان افزایش مقاومت فشاری تا ۱۲٪ وجود دارد [۱۸]. با توجه به ساختار گرافن و انتظار خواص فیزیکی و شیمیایی بالای آن و همچنین عدم‌پژوهش و بررسی تاثیر ترکیب همزمان این دو نانومواد در نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند باعث شد تا خواص مکانیکی، نفوذپذیری و ذوب و یخبندان نمونه‌های مذکور با ترکیب این دو نانومواد با نمونه‌های شاهد مورد بررسی قرار گیرد [۱۵،۱۹]. برخی پژوهش‌گران با افزودن نانوگرافن بصورت محلول در آب و بدون هیچ افزودنی دیگری، افزایش تا ۹۵٪ برای مقاومت فشاری، کششی و جذب مشاهده گردیده که این بهبود باعث افزایش استحکام و دوام بتن می‌گردد [۲۰].

۲- فعالیت‌های تجربی

پس از مطالعه پژوهش‌های انجام شده توسط محققین داخلی و خارجی، جهت بهبود انعطاف‌پذیری و ظرفیت کششی بتن از نانواکسید گرافن و جهت بهبود خواص مکانیکی بتن، از نانوسیلیس استفاده استفاده گردید. لازم به ذکر است که مواد آزمایش شده بصورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و در صورت استفاده ترکیبی در بتن، ممکن است خواص آن‌ها بهبود و یا تضعیف گردد. ابتدا مصالح موردنیاز را دسته‌بندی کرده و پس از انجام آزمایش‌های اولیه و پایه، اقدام به ساخت بتن و نمونه‌گیری و در انتها خصوصیات مقاومتی بتن بررسی گردیده است.

مصالح مورداستفاده برای این پژوهش، سیمان پرتلند تیپ ۲ تولیدشده توسط شرکت فارس نو، شن و ماسه مصرفی تولیدشده از معدن کوهی مرادی واقع در شیراز و فوق روان‌کننده دیسپرسیون پلیمری تولیدشده توسط شرکت نامیکاران استفاده‌شده است. همچنین، آب مورداستفاده در این بتن، آب شرب شهرجدید صدرا شیراز می‌باشد. جهت دانه‌بندی مصالح استفاده‌شده، مقدار ۵۰۰gr از مصالح سنگی را به‌صورت تماما خشک، الک کرده و نمودار دانه‌بندی مصالح در شکل ۲ ترسیم‌شده است.



شکل ۲. دانه‌بندی مصالح سنگی.

نانوسیلیس استفاده شده در این پژوهش تولید شرکت نانوایساتیس با خلوص ۹۸٪ می‌باشد. همچنین نانواکسید گرافن مصرفی از نوع تحقیقاتی تولید شده در شرکت US Research Nanomaterial هوستون امریکا با خلوص ۹۹٪ می‌باشد.

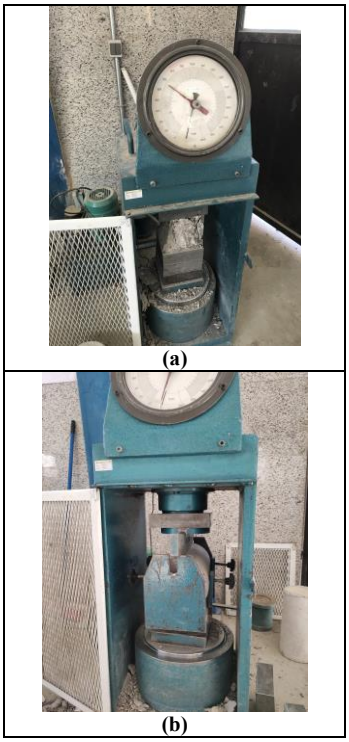
در ابتدا بر اساس روابط و ضوابط آیین نامه ACI 211-09 طرح اختلاط اولیه طراحی گردید، سپس بوسیله آزمون و خطا طرح نهایی با مشخصات روانی مد نظر انتخاب شد. بصورت کلی در این پژوهش ۱۸ طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفت که شامل ۱ طرح اختلاط به عنوان نمونه شاهد، ۳ طرح اختلاط حاوی نانواکسید گرافن (جهت مشخص شدن درصد بهینه این ماده)، ۵ طرح اختلاط حاوی نانوسیلیس بوده و در ۹ طرح اختلاط دیگر هم بصورت ترکیبی از نانوسیلیس و نانواکسید گرافن با درصدهای مشخص استفاده شده است. جزئیات طرح اختلاط در جدول ۱ آورده شده است. لازم به توضیح است که جهت کوتاه کردن نام نمونه‌ها، طرح‌های اختلاط حاوی نانواکسید گرافن با نام N_g و طرح‌های حاوی نانوسیلیس با N_s مشخص‌شده‌اند. نانواکسید گرافن با سه درصد ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی جایگزین سیمان گردیده و به همین ترتیب نانوسیلیس با ۱، ۲، ۳، ۴ و ۶ درصد وزنی جایگزین سیمان شده است. جهت بررسی مقاومت فشاری بتن، ۳ نمونه در اندازه ۱۵۰×۱۵۰mm برای سن ۷ روزه، ۳ نمونه برای سن ۲۸ روزه و ۳ نمونه هم برای سن ۹۰ روزه تهیه گردید. در محاسبه این طرح اختلاط، نسبت شن درشت‌دانه به ریزدانه ۳۵ به ۶۵ قرار داده‌شده است. درصد رطوبت مصالح سنگی بر اساس استاندارد ASTM C127 اندازه‌گیری شده و نحوه انجام آزمایش بدین‌صورت می‌باشد که مقداری از مصالح سنگی وزن گردیده، درون دستگاه خشک‌کن (Oven) به مدت زمان ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰°C قرارگرفته و سپس دوباره توزین گردیده و درصد رطوبت مصالح بر اساس خشک محاسبه گردید [۲۱]. سپس درصد رطوبت محاسبه‌شده از مقدار آب اختلاط کسر شده است. به منظور ترکیب صحیح نانواکسید گرافن بوسیله امواج التراسونیک به مدت ۶۰ دقیقه در آب اختلاط کاملا پراکنده گردیده، سپس نانوسیلیس به آب اضافه شده، دستگاه به مدت ۱۵ دقیقه عملیات ترکیب را ادامه داده و در نهایت محلول بدست آمده به طرح اضافه گردیده است. در طرح‌های اختلاط طراحی‌شده، به جهت اختلاط بهتر از فوق روان‌کننده استفاده نموده و سعی شده در تمامی طرح‌ها مقدار روانی بتن ۵۰±۱۰mm باشد [۲۲].

جدول ۱: طرح اختلاط بتن.

نام نمونه	شن (kg/m^3)		ماسه (kg/m3)	سیمان (kg/m3)	نانو اکسید گرافن (kg/m^3)	نانو سیلیس (kg/m3)	آب (kg/m3)	فوق روان‌کننده (kg/m^3)
	بادامی(٪۶۵)	نخودی(٪۳۵)						
control	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۳۶/۲۰	–	–	۱۶۵/۵	۶/۵۴
$Ng_{0/1}$	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۳۵/۷۶	۰/۴۳۶۲	–	۱۶۵/۵	۶/۵۴
$Ng_{0/2}$	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۳۵/۳۲	۰/۸۷۲۴	–	۱۷۴	۶/۵۴
$Ng_{0/3}$	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۳۴/۸۹	۱/۳۰۸۶	–	۱۷۴	۶/۵۴
Ns_1	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۳۱/۸۳۸	–	۴/۳۶۲	۱۷۴	۶/۵۴
$Ns_1\ g_{0/1}$	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۳۱/۴	۰/۴۳۶۲	۴/۳۶۲	۱۷۴	۶/۵۴
$Ns_1\ g_{0/2}$	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۳۰/۹۶	۰/۸۷۲۴	۴/۳۶۲	۱۷۴	۶/۵۴
$Ns_1\ g_{0/3}$	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۳۰/۵۳	۱/۳۰۸۶	۴/۳۶۲	۱۷۴	۶/۵۴
Ns_2	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۲۷/۴۷۶	–	۸/۷۲۴	۱۷۴	۶/۵۴
$Ns_2\ g_{0/1}$	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۲۷/۰۴	۰/۴۳۶۲	۸/۷۲۴	۱۷۴	۶/۵۴
$Ns_2\ g_{0/2}$	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۲۶/۶	۰/۸۷۲۴	۸/۷۲۴	۱۷۴	۶/۵۴
$Ns_2\ g_{0/3}$	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۲۶/۱۶	۱/۳۰۸۶	۸/۷۲۴	۱۷۴	۶/۵۴
Ns_3	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۲۲/۳۴	–	۱۳/۰۸۶	۱۷۴	۶/۵۴
$Ns_3\ g_{0/1}$	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۲۲/۶۸	۰/۴۳۶۲	۱۳/۰۸۶	۱۷۴	۶/۵۴
$Ns_3\ g_{0/2}$	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۲۲/۲۴	۰/۸۷۲۴	۱۳/۰۸۶	۱۷۴	۶/۵۴

$Ns_3\ g_{0/3}$	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۲۱/۸	۱/۳۰۸۶	۱۳/۰۸۶	۱۷۴	۶/۵۴
Ns_4	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۱۸/۷۵۲	–	۱۷/۴۴۸	۱۷۴	۶/۵۴
Ns_6	۶۶۵	۳۶۰	۶۶۰	۴۱۰/۰۲	–	۲۶/۱۷۲	۱۷۴	۶/۵۴

به‌صورت کلی جهت بررسی امکان اجرایی بودن این نوع بتن برای بتن‌های سازه‌ای مقاومت فشاری نمونه‌ها بررسی گردیده است. بدین منظور قالب‌گیری در نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵ انجام گردیده و پس از گذشت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری در آب، نمونه‌ها از حوضچه خارج‌شده و به مدت حداکثر ۳ ساعت در گرمخانه با دمای $^{\circ}C$ ۳۰ قرار داده‌شده تا سطوح نمونه خشک شوند، سپس زیر جک بتن شکن قرار داده و با آهنگ بارگذاری ۰/۳ MPa/s بصورت یکنواخت برای تمامی نمونه‌ها، مقاومت فشاری محاسبه گردیده است. آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد BS EN 12390 در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز انجام‌شده و لازم به ذکر است، پیش از انجام آزمایش‌ها، دستگاه نیز کالیبره شده است (شکل ۳-a). این دستگاه آنالوگ بوده و ظرفیت اعمال نیروی حداکثر ۲۰۰ تن را دارا می‌باشد [۲۳،۲۴].



شکل ۳: a) جک بتن شکن و b) محفظه تست کششی.

جهت محاسبه مقاومت کششی، نمونه‌گیری در قالب استوانه‌ای ۳۰×۱۵ انجام شده و پس از گذشت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری در آب، نمونه‌ها از حوضچه خارج‌شده و به مدت حداکثر ۳ ساعت در گرمخانه با دمای $^{\circ}C$ ۳۰ قرار داده شده تا سطوح نمونه خشک شوند، سپس مطابق شکل ۳-b در محفظه مخصوص تست مقاومت کششی قرار داده شده و محفظه زیر جک بتن شکن قرار داده و با آهنگ بارگذاری ۰/۳ بصورت یکنواخت، نمونه به دو نیم تقسیم شده است و مقاومت کششی نمونه بدست آمده است.

آزمایش ذوب و یخبندان پی در پی در مجاورت آب یا هوا و کنترل کاهش وزن، کاهش مقاومت، افزایش حجم و کاهش مدول ارتجاعی دینامیکی مانند استاندارد ASTM C666 انجام می‌گیرد. آزمایش‌های ذوب و یخبندان در حالت اشباع طبق استاندارد فوق از پارامتر کاهش مدول ارتجاعی دینامیکی استفاده می‌گردد. بعد از تعداد مشخصی سیکل ذوب و یخبندان، درصد مدول ارتجاعی دینامیکی اولیه بدست می آید. که این حداقل درصد قابل قبول، یک ملاک یا ضابطه تلقی می‌شود. مثل بتنی که پس از ۳۰۰ سیکل یخبندان و آب شدگی مکرر، حداقل ۶۰ و یا ۸۰ درصد مدول ارتجاعی دینامیکی را دارا باشد آن بتن با دوام تلقی می‌گردد [۲۵].

از دست دادن جرم در آزمایش ذوب و یخبندان:

$$\Delta m_{ni} = \left(1 - \frac{m_{ni}}{m_{0i}}\right) \times 100\% \qquad (۱)$$

Δm_{ni} : نسبت از دست دادن جرم هر نمونه

m_{ni}: جرم نمونه i بعد از چرخه nام

m_{0i}: جرم نمونه i قبل از چرخه است.

میانگین نسبت تلفات جرمی هر گروه از نمونه‌ها باید مقدار متوسط حسابی نتایج آزمایش Δm_{ni} سه نمونه به عنوان مقدار اندازه‌گیری شده باشد. هنگامی که یک مقدار منفی از یک نتیجه آزمایش بدست می‌آید، باید صفر را در نظر گرفت. سپس، جرم مقدار متوسط حساب شده سه نمونه است. هنگامی که تفاوت بین حداکثر مقدار یا حداقل مقدار و مقدار متوسط بیش از ۱ باشد ، این مقدار باید حذف شود و سپس مقدار میانگین حسابی دو مقدار باقی‌مانده به عنوان مقدار نماینده در نظر گرفته شود. هنگامی که تفاوت بین حداکثر مقدار و حداقل مقدار و مقدار متوسط همه بیشتر از ۱٪ باشد، مقدار متوسط باید به عنوان مقدار نماینده در نظر گرفته شود. بنابراین، برای هر گروه نسبت از دست دادن جرم Δm_n به شرح زیر تعریف شد:

$$\Delta m_{ni} = \frac{\sum_{i=1}^{3} \Delta m_n}{3} \times 100\% \qquad \text{رابطه ۲}$$

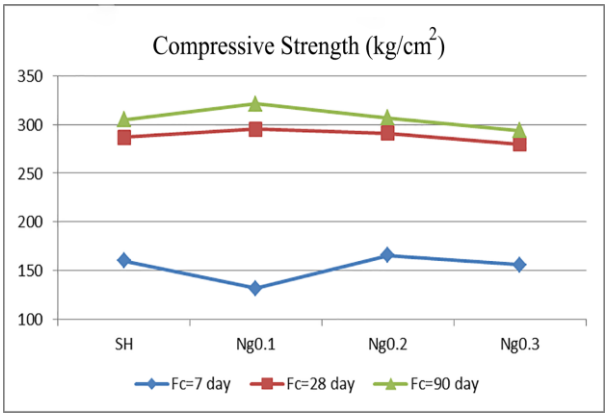
در این تحقیق، آزمایش ذوب و یخبندان طبق استاندارد ASTM C666 در مجاورت هوا با دستگاه آزمایش ذوب و یخبندان بتن ساخت شرکت آزمون ساز مبنا مدل CO 726 انجام گردیده است.

شکل ٤: دستگاه اندازه‌گیری نفوذپذیری آب.

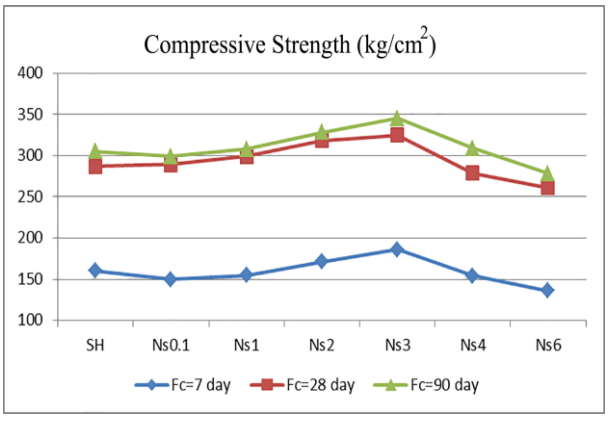
نفوذپذیری بتن را از طریق محاسبه مقدار آبی که تحت فشار از یک نمونه بتنی در یک مدت زمان مشخص عبور می‌کند مشخص و تعیین می‌کنند. که بر اساس استاندارد DIN1048 نمونه‌های بتن پس از عمل‌آوری در دستگاه آزمایش نفوذپذیری (شکل ۴) تحت فشار ثابت ۵ اتمسفر در مدت زمان ۷۲ ساعت قرار داده و مقدار نفوذ آب اندازه‌گیری گردید [۲۶].

۳- نتایج و بحث

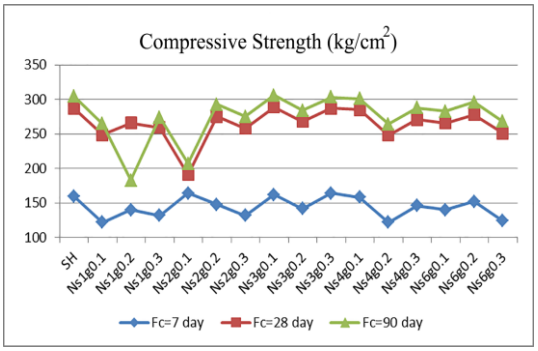
پس از گذشت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز از نمونه‌گیری، نمونه‌ها از حوضچه نگهداری بتن خارج کرده و پس از خشک شدن، خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها اندازه‌گیری گردیده است.



شکل ٥: مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانواکسید گرافن.



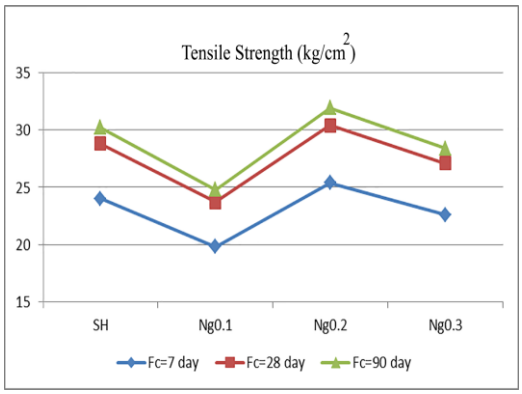
شکل ٦: مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوسیلیس.



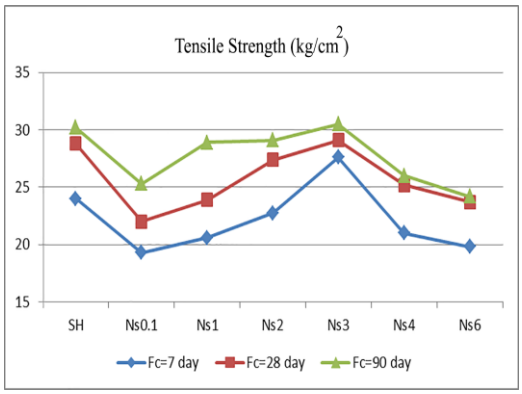
شکل ۷: مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و نانواکسید گرافن.

شکل ۸: تصویر نمونه پس از اعمال بار در تست مقاومت فشاری.

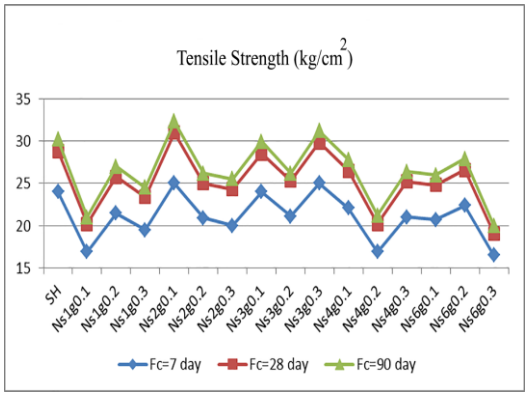
بواسطه جایگزینی نانوسیلیس با بخشی از مواد چسبنده طرح اختلاط، شاهد افزایش مقاومت فشاری بوده و روند افزایش مقاومت فشاری تا ۳٪ جایگزینی ادامه پیدا کرده است که در این مقدار جایگزینی، افزایش ۱۳ درصدی در سنین ۲۸ روز نتیجه گردید. با افزایش جایگزینی مقدار نانوسیلیس، نمودار مقاومت فشاری با شیب زیاد، دچار کاهش مقاومت گردید. در مجموعه نمونه‌های حاوی نانواکسید گرافن، نمونه حاوی ۰/۱٪ نانوگرافن، افزایش ۵٪ مقاومت فشاری نتیجه گردید. در مجموعه‌های حاوی ترکیب نانواکسید گرافن و نانوسیلیس، بیشترین مقدار مقاومت را نمونه حاوی ۰/۱٪ نانواکسید گرافن و ۳٪ نانوسیلیس کسب نموده، که البته با وجود افزایش مقاومت، به نتیجه نمونه شاهد رسیده و در واقع مساله کاهش مقاومت ناشی از نانواکسید گرافن جبران شده است. هر دو ماده در مقیاس نانو استفاده گردیده، اما تمامی نمونه‌ها دچار افزایش مقاومت نشده است، شاید این مساله نشان‌گر این امر باشد که ماتریس بتن، تا مقدار مشخصی ظرفیت افزایش سیلیس را دارا می‌باشد و اضافه شدن بیش از ظرفیت، کاهش مقاومت نتیجه خواهد داد. لازم به ذکر است تمامی نمونه‌های ساخته شده، شکست مطلوب از خود نشان داده که در شکل ۸ نشان داده شده است.



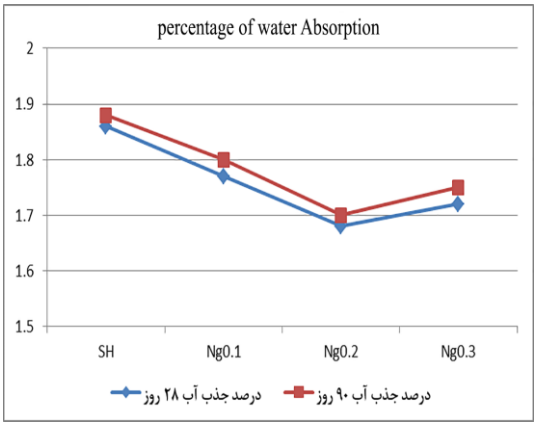
شکل ۹: مقاومت کششی نمونه‌های حاوی نانواکسید گرافن.



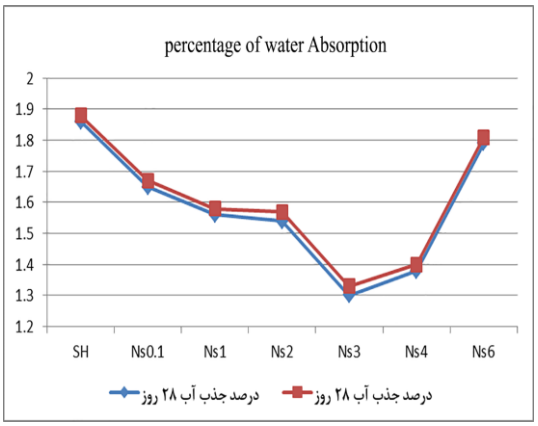
شکل ۱۰: مقاومت کششی نمونه‌های حاوی نانوسیلیس.



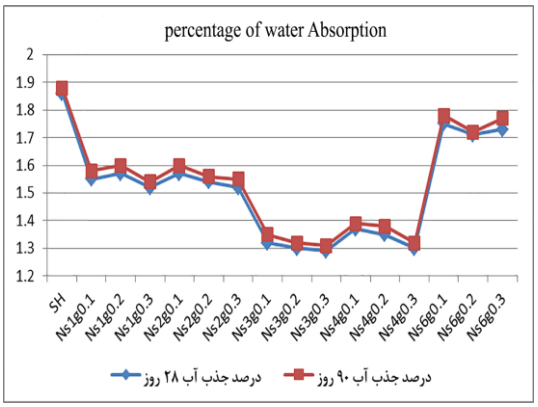
شکل ۱۱: مقاومت کششی نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و نانواکسید گرافن.



شکل ۱۲: درصد جذب نمونه‌های حاوی نانواکسید گرافن.



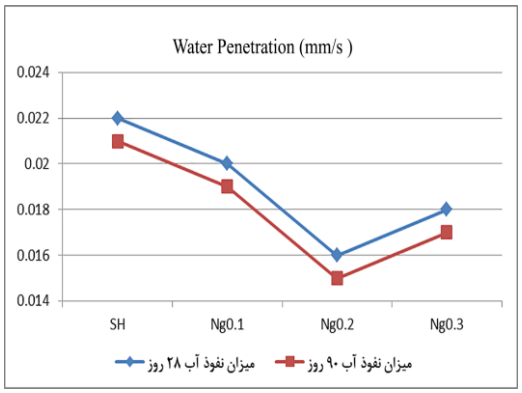
شکل ۱۳: درصد جذب نمونه‌های حاوی نانوسیلیس.



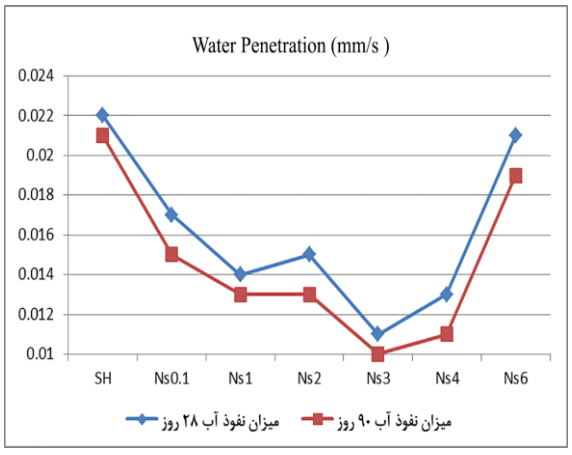
شکل ١٤: درصد جذب نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و اکسید گرافن.

مقدار بهینه نانواکسید گرافن در آزمون کشش باعث بهبود ۱۰٪ مقاومت کششی بتن گردیده که نسبت به نمونه حاوی مقدار بهینه نانوسیلیس عملکرد بهتری از خود نشان داده است. وجود مقدار ۱٪ نانوسیلیس و ۰/۳٪ نانواکسید گرافن باعث افزایش ۱۰ درصد مقاومت کششی گردیده اما نمونه‌های Ns1g0/1، Ns4g0/2 و Ns6g0/3 با کاهش شدید و غیرقابل جبران مقاومت کششی مواجه گردیده است.

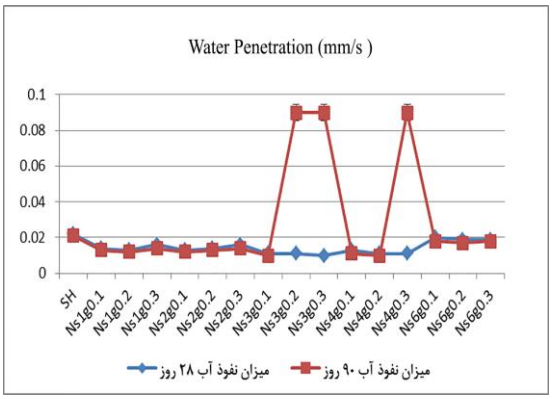
بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایشات انجام شده که در تصاویر ۱۲ الی ۱۴ نشان داده شده است، با اضافه شدن نانواکسید گرافن به طرح اختلاط، جذب آب بتن کاهش می‌یابد. کمترین میزان جذب آب مربوط به نمونه حاوی ۰/۲٪ نانو اکسید گرافن بود که با کاهش ۱۳٪ مواجه گردید. پس از ۰/۲٪ نانو اکسید گرافن، جذب آب بتن روند صعودی در پیش گرفت. در ترکیبات حاوی نانوسیلیس روند کاهش جذب آب تا مقدار ۳٪ نانوسیلیس ادامه داشت و در نمونه حاوی ۳٪ با کاهش ۳۱٪ جذب آب حاصل گردید. لازم بذکر است که با افزایش جایگزینی نانوسیلیس، جذب آب بتن افزایش یافت که احتمالا این امر به علت جذب آب بالای نانوسیلیس می‌باشد.



شکل ۱۵: مقدار نفوذ نمونه‌های حاوی نانواکسید گرافن.

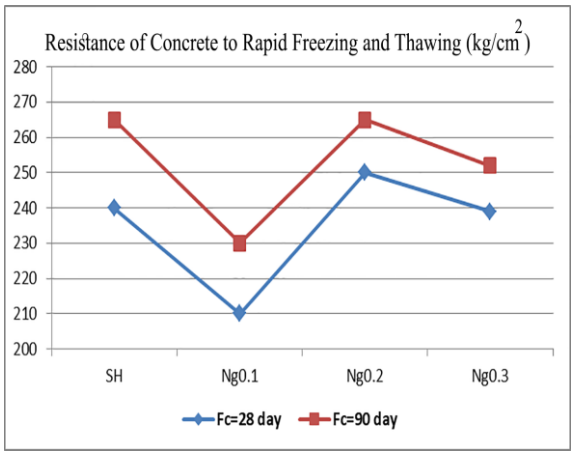


شکل ١٦: مقدار نفوذ نمونه‌های حاوی نانوسیلیس.

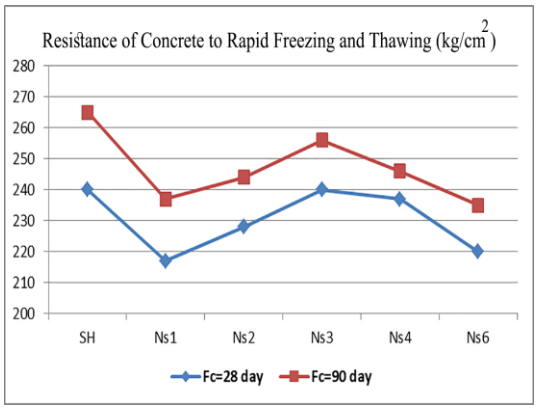


شکل ۱۷: مقدار نفوذ نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و نانواکسید گرافن.

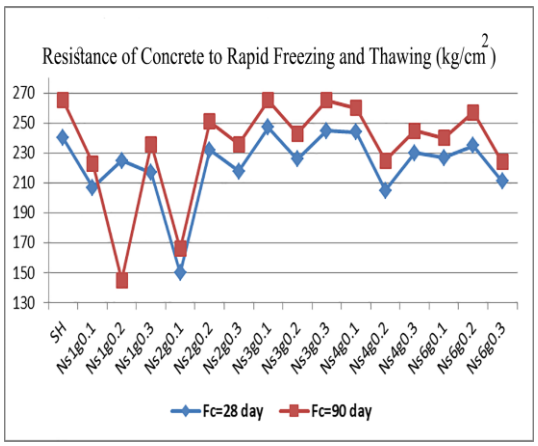
مطابق با تصاویر ۱۵ الی ۱۷، نتایج بدست آمده از آزمون نفوذپذیری گواه بر آب‌گریزی نانواکسید گرافن می‌باشد. با افزاش مقدار نانواکسید گرافن، منافذ بتن پر شده و پس از کاهش تخلخل، بتن نفوذناپذیرتر شده که این امر باعث افزایش دوام بتن می‌گردد. همچنین نانوسیلیس عملکرد بسیار قابل قبولی در برابر نفوذ آب از خود نشان داده و تا مقدار ۴٪ جایگزینی، نفوذپذیری کاهش ۵۵٪ نفوذ آب به همراه داشته است. در نمونه‌های حاوی ترکیب این دو ماده، تا درصدهای کمتر از ۶٪ نانوسیلیس و ۰/۳٪ نانواکسید گرافن، بهبود عملکرد بتن در مقابل نفوذ آب مشاهده گردیده است. بیشترین مقدار کاهش نفوذپذیری در سن ۲۸ روز مربوط به نمونه $Ns_3g_{0/3}$ می‌باشد که این نمونه کاهش ۵۶٪ نفوذپذیری را نتیجه داده است.



شکل ۱۸: ذوب و یخبندان نمونه‌های حاوی نانواکسید گرافن.

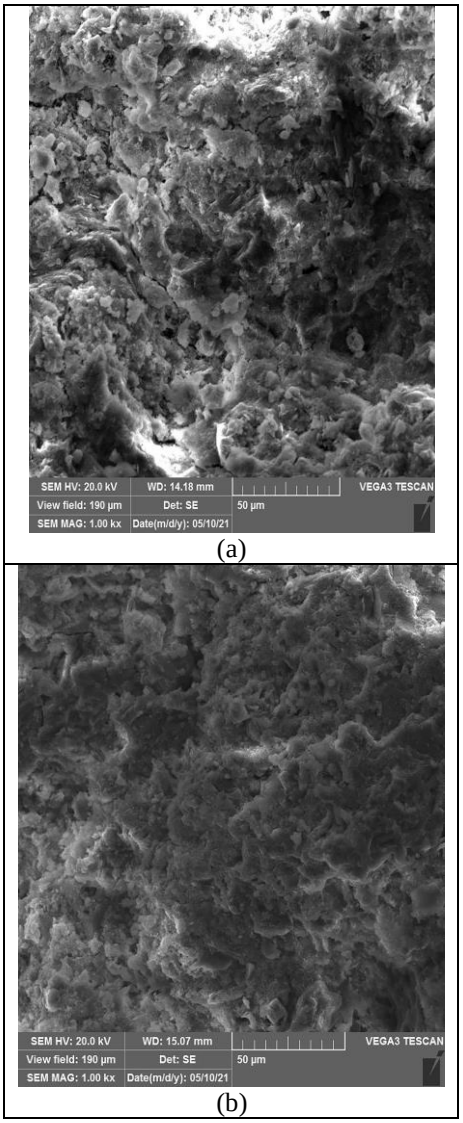


شکل ۱۹: ذوب و ندان نمونه‌های حاوی نانوسیلیس.



شکل ۲۰: ذوب و یخبندان نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و اکسید گرافن.

بتن پس از عبور از سیکل‌های ذوب و یخبندان، دچار کاهش مقاومت می‌گردد. مقدار رطوبت داخل بتن و میزان تخلخل بتن، بیشترین تاثیر را بروی کاهش مقاومت پس از سیکل‌های ذوب و یخبندان دارند. مطابق تصاویر ۱۸ الی ۲۰ در مجموعه حاوی نانوسیلیس، در بهترین حالت، با کاهش ۴٪ مقاومت فشاری مواجه شده اما در نمونه حاوی مقدار بهینه نانواکسید گرافن، مقاومت فشاری مشابه نمونه شاهد کسب گردید که نشان‌گر عملکرد قابل قبول نانواکسید گرافن در تغییرات محیطی شدید است. در نمونه‌های حاوی ترکیب این دو ماده، مقاومت فشاری پس از سیکل ذوب و یخبندان در نمونه‌های $Ns_3g_{0/1}$ و $Ns_3g_{0/3}$ مشابه با نمونه شاهد بدون تغییر بوده و بیشترین کاهش مقاومت مربوط به نمونه های $Ns_1g_{0/2}$ و $Ns_2g_{0/1}$ بوده است.



شکل ۲۱: a) تصویر ریز ساختار نمونه شاهد و b) تصویر ریز ساختار نمونه Ns3g0/1.

به منظور شناخت و درک بهتر خواص ریزساختار نمونه‌ها، نمونه‌ها تحت آزمایش میکروسکوپ الکترونیکی قرار گرفتند. در واقع به کمک انجام این آزمایش می‌توان به ساختار دورنی بلوک‌های سلولی پی برده و اثر افزایش مقدار نانوگرافن بر ترکیب بلوک را مشاهده نمود. در تصویر ریز ساختار نمونه Ns3g0/1 که در شکل ۲۱-a و ۲۱-b آورده شده است، بافت بتن یکپارچه‌تر شده و در آن کریستال‌های بزرگ مشاهده نمی‌گردد. این تصویر بیان‌گر تکمیل محصولات هیدراسیون و به نوعی پر شدن خلل و فرج بتن و کاهش تخلخل بتن حاوی ترکیب نانوسیلیس و نانواکسید گرافن می‌باشند. همچنین در نمونه شاهد به علت عدم‌وجود نانوگرافن، حفرات بزرگ زیاد و ساختار بهم ریخته‌ای مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار نانوگرافن در ترکیب بتن، با ایجاد پیوندی منسجم و مستحکم بین خمیر سیمان، سبب کاهش مقدار نفوذپذیری و حفره در بلوک گردیده است.

٤- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های صورت پذیرفته، در نمونه‌های غیرترکیبی، نتایج نشان‌گر تاثیرات مثبت در خصوصیات مکانیکی بتن بوده، به‌طوری‌که نمونه‌های حاوی نانوسیلیس در حالت بهینه با افزایش ۱۵٪ برای مقاومت فشاری، ۳۰٪ مقاومت کششی در سنین ۲۸ روز و نمونه‌های حاوی نانواکسید گرافن در حالت بهینه با افزایش ۵٪ مقاومت فشاری و کاهش ۲۰٪ حالت بهینه و افزایش ۸٪ مقاومت کششی در حالت غیربهینه مشاهده گردید. در مورد خصوصیات دوام، تمامی نمونه‌های مورد بررسی بصورت جایگزینی غیرترکیبی، شاهد بهبود نتایج بوده به‌طوری‌که نمونه حاوی ۰/۲٪ نانواکسید گرافن با ۱۳٪ کاهش، بیشترین کاهش جذب در نمونه‌های حاوی نانواکسید گرافن داشته و نمونه حاوی ۳٪ نانوسیلیس، کاهش ۳۱٪ جذب حاصل شده اما در نمونه‌های حاوی ترکیب نانوسیلیس و نانواکسید گرافن، نمونه حاوی ۴٪ نانوسیلیس و ۰/۳٪ نانواکسید گرافن با ۳۰٪ کاهش، بیشترین کاهش جذب را کسب نموده است. در آزمایش نفوذپذیری نتایج شباهت بسیاری با آزمایش جذب آب داشت ودر حالت غیرترکیبی نمونه حاوی ۰/۲٪ نانواکسید گرافن با ۳۳٪ کاهش و نمونه حاوی ۴٪ نانوسیلیس کاهش ۵۵٪ حاصل گردیده اما در نمونه حاوی ترکیب بهینه این دو ماده کاهش بالقوه‌ای مشاهده نشده است. در آزمایش ذوب و یخبندان، مقاومت فشاری پس از اعمال چرخه‌های ذوب و یخ در نمونه حاوی ۳٪ نانوسیلیس با کاهش ۴٪ مقاومت فشاری، نمونه حاوی ۰/۱٪ نانواکسید گرافن با

کاهش ۱۳٪ و نمونه حاوی ترکیب ۳٪ نانوسیلیس و ۰/۱٪ نانواکسید گرافن بدون کاهش مقاومت مشاهده شده است.

بنابراین نانوذرات اکسید گرافن باعث بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام بتن می‌گردد که آب‌گریز بودن آن یکی از دلایل بهبود دوام بتن می‌باشد. نانوسیلیس تا زمانی که بتواند ماتریس ظرفیت سیلیسی بتن را پر نماید باعث بهبود کیفیت بتن می‌گردد. البته با ورود نانوسیلیس به بتن، بتن شکننده‌تر می‌گردد. با وجود تاثیرات مثبت هر دو نانومواد و استفاده ترکیبی در محدوده بهینه آن‌ها، تمامی نمونه‌ها دچار افزایش مقاومت و بهبود کیفیت نشده است، شاید این مساله نشان‌گر این امر باشد که ماتریس بتن، تا مقدار مشخصی ظرفیت افزایش سیلیس را دارا می‌باشد و اضافه شدن بیش از ظرفیت، با کاهش مقاومت نتیجه خواهد داد.

مراجع

[1] N. Chalangaran, N. Paslar, *CicilEng*, **1**, 2020, 264.
[2] G.V. Hartland, L.V. Besteiro, P. Johns, A.O. Govorov, *ACS Energy Letters*, **2**, 2017, 1641.
[3] S. Lv, *Construction and Building Materials*, **49**, 2013, 121.
[4] E. Shamsaei, *Construction and Building Materials*, **183**, 2018, 642.
[5] D. Napierska, *Particle and Fibre Toxicology*, **7**, 2010, 39.
[6] P.K. Akarsh, S. Marathe, A.K. Bhat, *Construction and Building Materials*, **268**, 2021, 121093.
[7] A. Nishchal, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, **7**, 2016, 345.
[8] M. Amin, K. Abu el-Hassan, *Construction and Building Materials*, **80**, 2015, 116.
[9] K. Behfarnia, N. Salemi, *Construction and Building Materials*, **48**, 2013, 580.
[10] H. Du, S. Du, X. Liu, *Construction and Building Materials*, **73**, 2014, 705.
[11] A.M. Said, *Construction and Building Materials*, **36**, 2012, 838.
[12] M. Devasena, J. Karthikeyan, *International Journal of Engineering Science Invention Research & Development*, **1**, 2015, 307.
[13] S.C. Devi, R.A. Khan, *Journal of Building Engineering*, **27**, 2020, 101007.
[14] Y. Xiong, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **19**, 2019, 7947.
[15] M. Gu, *Tissue Engineering Part B: Reviews*, **20**, 2014, 477.
[16] M. Mohammadi, J. Ahmadi, and S. Mohammadi, *Concrete Research*, **12**, 1970, 109.
[17] M. Somasri, B. Narendra Kumar, *Materials Today: Proceedings*, **43**, 2021, 2280.
[18] R. Mowlaei, *Construction and Building Materials*, **266**, 2021,121016.
[19] A.K. Geim, *Science*, **324**, 2009, 1530.
[20] S.P. Dalal, P. Dalal, *Construction and Building Materials*, **276**, 2021, 122236.
[21] A. ASTM, C128-07a Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, 2007.
[22] N. Holmes, A. Browne, C. Montague, *Construction and Building Materials*, **73**, 2014, 195.
[23] C. ASTM, ASTM C39: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM international West Conshohocken, PA, USA, 2001.
[24] B. Standard, Testing hardened concrete, Compressive Strength of Test Specimens, BS EN, 2009, 12390.
[25] AS. Standard, C666-97: Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, Annual Book of ASTM Standards, 4, 2000.
[26] G. Standard, DIN 1048 test methods of concrete impermeability to water: Part 2, Deutscher Institute Fur Normung, Germany, 1978.