

Mechanical Resistance and Durability of Concrete Modified with Various Combinations of Graphene Nano-Oxide and Nano-Silica under High Temperature

Kamal Nasiri¹, Leila Shahryari^{2*}, Mohammad Karkon³, Akbar Ghanbari⁴

1-Ph.D Student, Department of Civil Engineering, Lar.C., Islamic Azad University, Larestan, Iran

2-Associated Professor, Department of Civil Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

*leila.shahryari@iaau.ac.ir

3-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Lar.C., Islamic Azad University, Larestan, Iran

4-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Lar.C., Islamic Azad University, Larestan, Iran

Received: 07 June 2025 Revised: 01 December 2025 Accepted: 02 December 2025

Research paper

Abstract

This study examines the combined effects of nanosilica and nanographene oxide on the mechanical performance and durability of concrete exposed to elevated temperature. Sixteen mix designs with varying nanoparticle contents were prepared. Cubic specimens (150×150×150 mm) were tested for compressive and tensile resistance at 7, 28, and 90 days. The inclusion of 3% wt nanosilica enhanced compressive and tensile resistance by approximately 15%. In contrast, nanographene oxide, particularly at higher amounts, led to a reduction in mechanical performance. Exposure to 900 °C resulted in an average 65% loss in compressive resistance, which reached around 80% in samples with 0/3 wt% nanographene oxide. Moreover, water absorption increased by 50–80% after heating, indicating reduced durability. Overall, while certain mixes with combined nanoparticles showed moderate improvements in early-age performance, their use did not significantly improve the long-term durability of concrete under thermal exposure.

Keywords: Graphene nano-oxide, nano-silica, High temperature, concrete, durability and mechanical properties

Corresponding Author: Leila Shahryari

Nasiri K., shahryari L., Karkon M., Ghanbari A. Mechanical Resistance and Durability of Concrete Modified with Various Combinations of Graphene Nano-Oxide and Nano-Silica under High Temperature. J. Concr. Struct. Mater., 2024; 9(2): 215-234. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2025.528867.1391>

2538-5828/ © 2025 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

بررسی تغییرات مقاومت‌های مکانیکی و دوام بتن اصلاح شده با ترکیب‌های مختلف نانو اکسید گرافن و نانوسیلیس در اثر حرارت زیاد

کمال نصیری^۱، لیلا شهریاری^{۲*}، محمد کارکن^۳، اکبر قنبری^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: leila.shahryari@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

هدف این پژوهش، بررسی تأثیر هم‌افزایی نانو سیلیس و نانو اکسید گرافن بر خواص مکانیکی و دوام بتن در شرایط دمای زیاد است. به این منظور، تعداد ۱۶ طرح اختلاط مختلف بتن با مقادیر متفاوتی از نانوذرات طراحی و ساخته شد. نمونه‌های مکعبی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر تهیه گردید و آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام گرفت. نتایج حاصل نشان داد که افزودن ۳ درصد وزنی نانو سیلیس موجب بهبود مقاومت فشاری و کششی بتن تا حدود ۱۵ درصد گردید، در حالی که نانو اکسید گرافن، به‌ویژه در درصد‌های بالاتر، منجر به کاهش مقاومت مکانیکی شد. تحت تأثیر حرارت ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری بتن به‌طور میانگین تا ۶۵ درصد کاهش یافت، و در نمونه‌های حاوی ۰/۳ درصد نانو اکسید گرافن، این افت به حدود ۸۰ درصد رسید. همچنین، جذب آب نمونه‌ها پس از حرارت‌دهی بین ۵۰ تا ۸۰ درصد افزایش یافت که بیانگر کاهش دوام بتن در این شرایط است. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب نانو سیلیس و نانو اکسید گرافن، علیرغم بهبود نسبی مقاومت مکانیکی در برخی سنین، تأثیر چشمگیری در افزایش دوام بتن در برابر حرارت‌های زیاد ندارد.

کلمات کلیدی: نانو اکسید گرافن، نانو سیلیس، حرارت زیاد، بتن، دوام و خواص مکانیکی

به کارگیری افزودنی‌ها یکی از راهکارهای کلیدی برای بهبود عملکرد بتن، به‌ویژه هنگام مواجهه با شرایط محیطی نامساعد است. این مواد قادرند با افزایش مقاومت بتن در برابر محیط‌های اسیدی، از تخریب ساختاری آن جلوگیری کرده و همزمان، دوام و پایداری حرارتی آن را در چرخه‌های دمایی متغیر تضمین کنند. در میان انواع افزودنی‌ها، نانوذرات به عنوان یک دسته نوین و کارآمد، قابلیت ارتقاء چندمنظوره خواص بتن را فراهم می‌کنند. برای مثال، نانوسیلیس به طور گسترده‌ای برای بهبود عملکرد ماتریس سیمانی مورد استفاده قرار گرفته است [۷]، افزون بر این، نانوذرات دیگری نظیر، دی‌اکسید تیتانیوم [۹]، اکسید آلومینیوم [۱] و لوله‌های کربنی [۶] به عنوان ساختارهای مکمل در مواد سیمانی، قادرند هیدراتاسیون سیمان را بهبود بخشند. این نانومواد، علاوه بر تأثیر بر فرآیند هیدراتاسیون، نقش حیاتی در تنظیم ریزساختار کامپوزیت‌های سیمانی ایفا می‌کنند که به طور قابل توجهی کیفیت کلی آن‌ها را ارتقاء می‌دهد. همچنین، افزودن نانومواد می‌تواند اثر نانوپرکننده را در ماتریس سیمانی ایجاد کرده و به بهبود خواص عملکردی منجر شود. در همین راستا، نانو سیلیس و نانو اکسید گرافن از جمله افزودنی‌های پرکاربرد محسوب می‌شوند که به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردشان، کاربردهای وسیعی در صنایع گوناگون یافته‌اند [۵-۲-۱۳]. نانو سیلیس، که به نام نانوذرات دی‌اکسید سیلیکون نیز شناخته می‌شود، دارای سطح ویژه‌ای است که بسته به روش سنتز، می‌تواند از ۵۰ تا ۶۰۰ متر مربع بر گرم (m^2/g) متغیر باشد. این سطح ویژه^۱ بالا، نانو سیلیس را به ماده‌ای ایده‌آل برای کاربردهای گوناگون، از جمله استفاده در داروسازی، کاتالیزورها و به عنوان عامل تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها، تبدیل کرده است. در مقابل، نانو اکسید گرافن مشتقاتی از گرافن است که دارای گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن بوده و می‌تواند خواص آن را به طور چشمگیری تغییر دهد. سطح ویژه نانو اکسید گرافن می‌تواند از ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متر مربع بر گرم (m^2/g) متغیر باشد، که آن را به ماده‌ای بسیار کارآمد با قابلیت کاربرد گسترده در ذخیره انرژی، حسگرها و پوشش‌های پیشرفته تبدیل می‌کند. از منظر خواص حرارتی و مکانیکی، تفاوت‌های چشمگیری بین این دو نانوماده وجود دارد. نانو سیلیس معمولاً رسانایی حرارتی در حدود ۱ وات بر متر-کلوین (W/mK) نشان می‌دهد. این در حالی است که نانو اکسید گرافن می‌تواند رسانایی حرارتی بسیار بالاتری تا ۳۰۰۰ وات بر متر-کلوین (W/mK) داشته باشد و بدین ترتیب به یکی از رساناترین مواد از نظر حرارتی شناخته شده تا کنون تبدیل می‌شود. از نظر مدول الاستیک نیز، نانو سیلیس دارای مدول الاستیک معمولی بین ۳۰ تا ۷۰ گیگاپاسکال (GPa) است، در حالی که نانو اکسید گرافن با مدول الاستیک چشمگیر حدود ۳۴۰ گیگاپاسکال (GPa)، به عنوان یکی از سفت‌ترین مواد کشف‌شده شناخته می‌شود. در مجموع، هر دو نانو سیلیس و نانو اکسید گرافن به دلیل برخورداری از خواص منحصربه‌فرد، برای طیف وسیعی از کاربردها در صنایع مختلف بسیار مطلوب هستند. سطح ویژه، هدایت حرارتی و مدول الاستیک این مواد، همگی به پتانسیل آن‌ها در ایجاد تحول در زمینه‌هایی نظیر فناوری نانو و علم مواد کمک شایانی می‌کنند. در زمینه فناوری بتن، نانوذرات نانو سیلیس و اکسید گرافن به دلیل خواص قابل توجه و توانایی در ارتقاء ویژگی‌های مختلف بتن، مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. هنگامی که نانو سیلیس به بتن افزوده می‌شود، فضاهای خالی میکروسکوپی بین دانه‌های سیمان را پر می‌کند و در نتیجه، ترکیبی متراکم‌تر و فشرده‌تر ایجاد می‌شود. این پدیده منجر به بهبود مقاومت، دوام و مقاومت بتن در برابر نفوذ آب و مواد شیمیایی می‌گردد. علاوه بر این، نانو سیلیس به کاهش تخلخل بتن کمک کرده و آن را کمتر در معرض ترک‌خوردگی قرار می‌دهد که به طور کلی عملکرد آن را افزایش می‌دهد. در سوی دیگر، نانوذرات اکسید گرافن با سطح ویژه بالا و خواص مکانیکی عالی خود، می‌توانند مقاومت کششی بتن را به میزان قابل توجهی افزایش دهند [۳-۴]. پژوهشی دیگر به بررسی اثر هم افزایی نانولوله‌های کربنی و نانوسیلیس پرداخت و نشان داد که ترکیب بهینه این نانوذرات با مقادیر یک دهم درصد CNT و یک و نیم درصد NS، از

^۱ Specific surface

طریق مکانیزم های پُرکنندگی و پُل زنی روی ترک ها، مقاومت فشاری و کششی را در سن بیست و هشت روزه به ترتیب صد و بیست و پنج و صد و ده درصد افزایش می‌دهد. این افزایش ناشی از اصلاح ریزساختار، تراکم ناحیه انتقال سطحی و کاهش تخلخل است و پتانسیل بالای استفاده همزمان از نانومواد کربنی و سیلیسی را در ارتقای عملکرد مکانیکی بتن نشان می‌دهد. [۱۹].

در یافته‌های پژوهشی اخیر آمده است که افزودن ۰/۵٪ وزنی اکسید گرافن به بتن M30 می‌تواند منجر به افزایش ۴۰٪ در مقاومت فشاری و بهبود چشمگیر در عملکرد بتن تحت دماهای زیاد و شرایط آتش‌سوزی می‌گردد [۱۵]. یکی دیگر از مطالعات جامع در این زمینه، نشان می‌دهد ترکیب اکسید گرافن (GO) در سیمان، به طرز چشمگیری رفتار مکانیکی و پایداری حرارتی آن را بهبود می‌بخشد. این پژوهش نشان داده است که با افزودن ۰/۱٪ و ۰/۳٪ GO (نسبت به وزن چسباننده)، مقاومت فشاری نمونه‌ها به ترتیب تا ۱۰۶/۷۸٪ و ۱۰۹/۲۱٪ افزایش می‌یابد؛ این بهبود در مدت زمان ۵۶ روز برای نمونه‌های حاوی ۰/۳٪ GO به ۱۲۰/۹۲٪ نیز می‌رسد. همچنین، معرفی GO می‌تواند پایداری حرارتی خمیر سیمان را افزایش داده و به متراکم‌تر شدن ریزساختار کمک کند، که این امر بتن را قادر می‌سازد عملکرد پایداری را حتی در معرض دماهای زیاد از خود نشان دهد [۱۷].

همسو با این دستاوردها، پژوهش دیگری نشان می‌دهد که افزودن ۲۰٪ خاکستر بادی و ۰/۰۸٪ اکسید گرافن به بتن، عملکرد مکانیکی آن را در دماهای زیاد به طرز چشمگیری بهبود می‌بخشد. این مطالعه تأکید می‌کند که دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، بهینه‌ترین دما برای افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن حاوی این ترکیبات است. در این دما، هم‌افزایی خاکستر بادی و اکسید گرافن به کاهش تخریب حرارتی کمک کرده و پایداری بتن را در برابر آتش‌سوزی افزایش می‌دهد، که نشان‌دهنده پتانسیل بالای این کامپوزیت‌ها برای سازه‌های مقاوم در برابر حرارت است [۱۸]. در کنار این ترکیبات پیشرفته، استفاده از نانومواد معدنی مانند نانوسیلیس نیز مورد توجه قرار گرفته است. همچنین افزودن نانوسیلیس (NS) به ملات ماسه-سیمان، خواص مکانیکی و پایداری حرارتی آن را به طرز چشمگیری بهبود می‌بخشد. یافته‌ها نشان می‌دهد که با جایگزینی ۱۵٪ سیمان با NS، افت مقاومت فشاری نمونه‌ها در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس، از ۵۷٪ (برای نمونه‌های فاقد NS) به ۵۲٪ کاهش می‌یابد. این بهبود به دلیل کاهش کریستال‌های هیدروکسید کلسیم و افزایش نانوساختارهای C-S-H است که منجر به متراکم‌تر شدن ریزساختار و پایداری بیشتر ملات در دماهای زیاد می‌شود [۲۰]. در پژوهشی دیگر با مقایسه دو نوع نانوسیلیس پیروژنیک با سطوح ویژه ۲۰۰ و ۳۸۰ متر مربع بر گرم در بتن توانمند دریافتند که برخلاف انتظار، نانوذرات درشت‌تر با دوز یک و نیم درصد عملکرد بهتری داشته و مقاومت فشاری را تا بیست و یک و نیم درصد افزایش دادند. آنالیزهای ریزساختاری شامل SEM و XRD علت این پدیده را کلوخه شدن شدید ذرات ریزتر ناشی از انرژی سطحی بالا دانستند، در حالی که ذرات NS200 با توزیع یکنواخت و تولید ژل C S H متراکم، ضمن پر کردن حفرات موئین مقاومت الکتریکی و دوام در برابر خوردگی را به طور چشمگیری ارتقا دادند [۲۱].

این نانوذرات به عنوان تقویت‌کننده در ترکیب بتن عمل کرده، مقاومت آن را در برابر بارهای وارده بهبود می‌بخشند و خطر ترک‌خوردگی را کاهش می‌دهند. همچنین، اکسید گرافن قابلیت بهبود رسانایی بتن را نیز دارد که آن را به ماده‌ای ایده‌آل برای کاربردهایی که نیاز به هدایت الکتریکی یا حرارتی دارند، تبدیل می‌کند.

به طور کلی، ترکیب نانوذرات نانو سیلیس و اکسید گرافن در بتن، منجر به بهبود چشمگیر خواص مکانیکی، دوام و مقاومت آن در برابر عوامل محیطی می‌شود. این مواد پیشرفته، پتانسیل بالایی در ایجاد انقلاب در صنعت ساخت‌وساز با امکان توسعه سازه‌های بتنی با کارایی بالا و پایدار دارند. یکی از شرایط حیاتی که رفتار بتن باید در آن مورد مطالعه دقیق قرار گیرد، واکنش بتن به حرارت‌های زیاد است؛ چرا که دماهای زیاد می‌تواند به طور قابل توجهی بر مقاومت و دوام آن تأثیر بگذارد [۳-۴]. هنگامی که بتن در معرض دماهای زیاد قرار می‌گیرد، دستخوش تغییرات مختلفی می‌شود؛ این تغییرات شامل افزایش فشار منافذ، کاهش خواص مکانیکی و

پوسته شدن احتمالی است [۸-۱۰]. افزودن نانو سیلیس و نانو اکسید گرافن به بتن می‌تواند عملکرد آن را در دماهای زیاد به شکل چشمگیری بهبود بخشد [۱۲]. در کنار نانو اکسید گرافن، نقش نانوسیلیس در ترکیب با مواد پوزولانی نیز به صورت مستقل مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین ترکیب بهینه‌ی ۴٪ نانوسیلیس (NS) و ۲۰٪ سرباره کوره بلند دانه‌بندی‌شده (GGBFS) موجب بهبود چشمگیر خواص مکانیکی و دوام بتن می‌شود. براساس یافته‌ها، این ترکیب منجر به افزایش حدود ۱۲٪ در مقاومت چسبندگی و کاهش قابل توجه ۲۶٪ در نفوذ یون کلرید و ۲۰٪ در نفوذ آب شد. همچنین، نمونه‌های حاوی این ترکیب، حتی در دماهای زیاد تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، عملکرد پایداری از خود نشان دادند؛ به گونه‌ای که در این دما، کاهش مقاومت فشاری تنها ۱۰/۵٪ بود، در حالی که نمونه شاهد ۴۵٪ افت مقاومت را تجربه کرد [۱۶]. در مجموع، نانو سیلیس می‌تواند خواص مکانیکی بتن را افزایش داده، دوام آن را ارتقاء داده و احتمال ترک خوردگی در دمای زیاد را کاهش دهد. به همین ترتیب، نانو اکسید گرافن، بتن را در برابر دماهای زیاد مقاوم‌تر می‌سازد. ساختار دوبعدی منحصربه‌فرد گرافن، خواص مکانیکی عالی و رسانایی حرارتی زیادی را ارائه می‌دهد که می‌تواند به دفع مؤثرتر گرما در بتن کمک کند. هنگامی که این نانو مواد در بتن، در معرض دماهای زیاد قرار می‌گیرند، می‌توانند با بهبود خواص مکانیکی کلی و پایداری حرارتی بتن، اثرات منفی گرما را کاهش دهند. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر اختلاط نانو اکسید گرافن و نانو سیلیس بر خواص بتن است. این تحقیق بر شاخص‌های مقاومت مکانیکی، شامل مقاومت فشاری و مقاومت کششی، و نیز دوام بتن از طریق اندازه‌گیری نرخ جذب آب، پیش و پس از قرارگیری در معرض حرارت، تمرکز دارد. ارزیابی عملکرد این ترکیب در شرایط گرمایی، جنبه‌ای نو از مطالعات مرتبط را برجسته می‌سازد که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به منظور ارائه چارچوبی برای ادامه پژوهش، شرایط آزمایشگاهی و روش‌شناسی در بخش‌های بعدی مقاله تشریح خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، مجموعه آزمایش‌ها و مصالح به کار رفته در ساخت بتن و ارزیابی عملکرد حرارتی آن تشریح می‌شود. این بخش به تفصیل به معرفی مصالح، استانداردها و روش‌های آزمایشی مورد استفاده می‌پردازد.

۲-۱- سیمان و مواد افزودنی

در این مطالعه، نانو اکسید گرافن و نانو سیلیس به عنوان مواد افزودنی به سیمان مورد استفاده قرار گرفتند. (جدول ۱) مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان و این مواد افزودنی سیمانی را ارائه می‌دهد. نانو سیلیس مورد استفاده از شرکت نانو ایستیس با درجه خلوص ۹۸٪ تهیه شده بود. همچنین، اکسید گرافن به کار رفته در این تحقیق دارای درجه تحقیقاتی بوده و با درجه خلوص ۹۹٪ از مرکز تحقیقات شرکت نانومواد، هیوستون، ایالات متحده آمریکا تهیه گردید. برای بهبود کارایی و تسهیل فرآیند اختلاط، از یک فوق روان‌کننده پلیمری تولید شده توسط شرکت نامکاران استفاده شد.

² Ground Granulated Blast Furnace Slag

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی و خواص فیزیکی سیمان و مواد افزودنی سیمان

اکسید گرافن	سیلیس	سیمان	مصالح ترکیبات شیمیایی (درصد وزنی)
	۹۷/۱	۲۰/۱	سیلیس (SiO ₂)
	۰/۶	۴/۵	اکسید آلومینیوم
	۰/۶	۶۷/۱	اکسید کلسیم
	۰/۷	۰/۹	اکسید منیزیم
۰/۵	۰/۹	۳/۵	اکسیدهای آهن
۱/۲	۰/۵	۱/۹	سولفور
	۱/۶	-	اکسید سدیم
	۰/۵	۰/۷	اکسید پتاسیم
		۱/۳	بقیه مواد
۰/۲۱	۲/۲۷	۳/۱۴	چگالی ویژه
۸/۱۱×۱۰۴	۲/۴۱×۱۰۴	۳۶۱/۱۲	سطح ویژه (m ² /kg)

۲-۲-دانه‌بندی شن و مواد مصرفی

در مرحله نخست، تفکیک شن و ماسه با استفاده از مجموعه الک ۱۸ اینچی ساخت شرکت آزمون مینا ایران، به همراه شیکر مخصوص و با بهره‌گیری از الک شماره ۴ (با قطر ۴/۷۵ میلی‌متر) انجام شد. در این فرآیند، سنگدانه‌های باقیمانده روی الک شماره ۴ به‌عنوان شن و ذرات عبوری به‌عنوان ماسه دسته‌بندی گردیدند. دانه‌بندی شن با انجام اصلاحات لازم و مطابق با استاندارد مربوطه تنظیم شد. حداکثر اندازه سنگدانه‌ها در شن برابر ۱۲/۵ میلی‌متر و در ماسه برابر ۹/۵ میلی‌متر تعیین گردید. به‌منظور انجام دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM C33، مقدار ۱۰۰۰ گرم از شن اصلاح‌شده با ترازویی با دقت ۱ گرم توزین شد. سپس این نمونه با استفاده از مجموعه‌ای از الک‌ها با قطر سوراخ‌های ۱۲/۵، ۹/۵، ۴/۷۵، ۲/۳۶ و ۱/۱۸ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

جدول ۲: نتایج دانه بندی شن مصرفی

درصد عبوری از الک	درصد تجمعی روی الک	وزن مانده (گرم)	شماره الک (اینچ)	قطر روزه الک (میلیمتر)
۱۰۰	۰	۰	۱/۲	۱۲/۵
۹۰	۱۰	۱۰۰	۳/۸	۹/۵
۲۵/۱	۷۴/۹	۶۴۹	۴	۴/۷۵
۶/۶	۹۳/۴	۵۸۱	۸	۲/۳۶
۰	۱۰۰	۶۶	۱۶	۱/۱۸

جدول ۳: نتایج دانه بندی ماسه مصرفی

درصد عبوری از الک	درصد تجمعی روی الک	وزن مانده (گرم)	شماره الک (اینچ)	قطر روزه الک (میلیمتر)
۱۰۰	۰	۰	۰/۳۷۵	۹/۵
۹۷/۱	۲/۹	۲۹	۴	۴/۷۵
۸۶/۱	۱۳/۹	۱۱۰	۸	۲/۳۶
۶۵/۵	۳۴/۵	۲۰۶	۱۶	۱/۱۸
۳۹/۶	۳۹/۶	۲۵۹	۳۰	۰/۶
۱۴/۲	۱۴/۲	۲۵۴	۵۰	۰/۳
۲/۴	۲/۴	۱۱۸	۱۰۰	۰/۱۵
۰	۰	۲۴		زیر الک

۲-۳- آماده سازی نمونه‌ها

در این پژوهش، مجموعاً ۱۶ طرح اختلاط بتن مورد بررسی قرار گرفت. این طرح‌ها شامل یک نمونه شاهد، سه طرح حاوی نانو اکسید گرافن، و سه طرح حاوی نانو سیلیس بودند که با هدف تعیین درصد بهینه‌ی مصرف هر یک از این نانوذرات طراحی شدند. علاوه بر آن، ۹ طرح اختلاط ترکیبی به منظور ارزیابی اثر هم افزایی نانو سیلیس و نانو اکسید گرافن به صورت هم زمان مد نظر قرار گرفت. مشخصات تمامی طرح‌های اختلاط در جدول ۴ ارائه شده است؛ در این جدول، نمونه‌های حاوی نانو اکسید گرافن با برچسب N-G و نمونه‌های حاوی نانو سیلیس با برچسب N-S مشخص شده‌اند. در این طرح‌ها، جایگزینی سیمان با نانو اکسید گرافن به میزان وزنی ۰/۱٪، ۰/۲٪، ۰/۳٪ و ۰/۴٪ و با نانو سیلیس به مقادیر وزنی ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪ و ۶٪ صورت پذیرفت.

برای ارزیابی مقاومت فشاری، نمونه‌های مکعبی بتن با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر قالب‌گیری شدند و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه تحت آزمایش قرار گرفتند. نسبت ماسه درشت به ماسه ریز در طرح اختلاط برابر ۳۵ به ۶۵ در نظر گرفته شد و مقدار کل سنگدانه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C127 تنظیم گردید. کلیه‌ی مصالح پیش از اختلاط، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد خشک شدند؛ سپس، درصد رطوبت با استفاده از اختلاف وزن قبل و بعد از خشک‌شدن محاسبه و از مقدار کل آب اختلاط کسر گردید. به منظور دستیابی به پراکندگی یکنواخت نانوذرات اکسید گرافن در مخلوط، ابتدا این ذرات به مدت ۶۰ دقیقه در آب اختلاط و تحت تأثیر امواج اولتراسونیک پراکنده شدند. در ادامه، نانو سیلیس به آب اضافه گردید و فرایند پراکندگی به مدت ۱۵ دقیقه ادامه یافت. محلول نهایی حاصل، به ترکیب بتن اضافه شد. همچنین، برای حفظ روانی مناسب و بهبود کارایی طرح‌های اختلاط، از فوق‌روان‌کننده استفاده گردید. مقدار روانی در تمامی نمونه‌ها در بازه‌ی 10 ± 50 میلی‌متر کنترل شد.

جدول ۴: مواد تشکیل دهنده در طرح‌های اختلاط مختلف

نمونه	آب	نانو سیلیس	نانو اکسید گرافن	سیمان	ماسه	نخودی	شن بادامی	فوق روان کننده
kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	gr/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
شاهد	۱۶۵/۵	-	-	۴۳۶/۲۰	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-G-1	۱۶۵/۵	-	۴۳۶	۴۳۵/۷۶	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-G-2	۱۷۴	-	۸۷۲	۴۳۵/۳۲	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-G-3	۱۷۴	-	۱۳۰۹	۳۴۳/۸۹	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-S-1	۱۷۴	۴/۳۶	-	۴۳۱/۸۴	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-S-2	۱۷۴	۸/۷۲	-	۴۲۷/۴۸	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-S-3	۱۷۴	۱۳/۰۹	-	۴۲۲/۳۴	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-S-4	۱۷۴	۱۷/۴۵	-	۴۱۸/۷۵	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-S-5	۱۷۴	۲۶/۱۷	-	۴۱۰/۰۲	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-G-S-1	۱۷۴	۴/۳۶	۴۳۶	۴۳۱/۴۰	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-G-S-2	۱۷۴	۴/۳۶	۸۷۲	۴۳۰/۹۶	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-G-S-3	۱۷۴	۴/۳۶	۱۳۰۹	۴۳۰/۵۳	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-G-S-4	۱۷۴	۸/۷۲	۴۳۶	۴۲۷/۰۴	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-G-S-5	۱۷۴	۸/۷۲	۸۷۲	۴۲۶/۶۰	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-G-S-6	۱۷۴	۸/۷۲	۱۳۰۹	۴۲۶/۱۶	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-G-S-7	۱۷۴	۱۳/۰۹	۴۳۶	۴۲۲/۶۸	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-G-S-8	۱۷۴	۱۳/۰۹	۸۷۲	۴۲۲/۲۴	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-G-S-9	۱۷۴	۱۳/۰۹	۱۳۰۹	۴۲۱/۸۰	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-G-S-10	۱۷۴	۱۷/۴۵	۸۷۲	۴۱۷/۸۸	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴
N-G-S-11	۱۷۴	۲۶/۱۷	۱۳۰۹	۴۰۸/۷۲	۶۶۰	۳۶۰	۶۶۵	۶/۵۴

۳- آزمایش‌ها و استانداردهای مورد استفاده

۳-۱- آزمایش‌های خواص مکانیکی و دوام بتن

خواص مکانیکی نمونه‌های بتن، شامل نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حرارت‌داده شده، با اتکا به نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی مورد بررسی قرار گرفت. این نمونه‌ها مطابق با مشخصات بیان‌شده در بخش پیشین آماده‌سازی شده و پیش از و پس از اعمال حرارت، با استفاده از دستگاه فشاری با ظرفیت ۲۰۰ تن مورد آزمایش قرار گرفتند. تجهیزات به‌کاررفته در این فرآیند از نوع آنالوگ بوده‌اند و پیش از آغاز آزمون‌ها توسط شرکت‌های ذی‌ربط کالیبره شده‌اند (شکل ۴).

دوام بتن نیز با بهره‌گیری از روش‌های استاندارد مورد سنجش قرار گرفت. یکی از رایج‌ترین روش‌های ارزیابی دوام، آزمون جذب آب است [۱۴]. در این تحقیق، تعیین میزان جذب آب بر اساس استاندارد DIN 1048 انجام شد. مطابق این استاندارد، نمونه‌های بتنی به مدت ۷۲ ساعت در آب با فشار ۵ اتمسفر قرار داده شده و تغییرات وزن آن‌ها پیش و پس از غوطه‌وری ثبت گردید. کاهش نرخ جذب آب، به‌عنوان شاخصی برای افزایش دوام بتن در نظر گرفته شده است.

۳-۲- تحلیل حرارتی بتن

تغییرات مشاهده‌شده در خواص مکانیکی و دوام نمونه‌های بتن در دماهای مختلف، عمدتاً به واکنش‌های شیمیایی وابسته به حرارت نسبت داده می‌شود. این واکنش‌ها منجر به تولید محصولات جانبی گازی، نظیر کربن و اکسید گوگرد می‌شوند. به منظور بررسی این تحولات، از مجموعه‌ای از آزمون‌های حرارتی مبتنی بر توزین نمونه‌ها در دماهای مختلف استفاده شد. سه تکنیک تحلیلی شامل تحلیل وزنی حرارتی TGA^3 ، مشتق‌گیری حرارتی DTG^4 و تحلیل حرارتی تفاضلی DTA^5 ، به منظور پایش دقیق تغییرات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها، به کار گرفته شدند.

۳-۳- تحلیل وزنی - حرارتی (TGA)

تحلیل وزنی حرارتی، یکی از روش‌های مؤثر در ارزیابی حرارتی مواد است که بر مبنای اندازه‌گیری تغییرات جرم نمونه با افزایش دما انجام می‌شود. این روش مطابق با استاندارد ASTM E2550-11 تعریف شده است [۱۱]. تکنیک TGA عمدتاً برای بررسی مواد مستعد تجزیه حرارتی یا واکنش‌های گازی به کار می‌رود. در این فرآیند، تغییرات جرم نمونه به کمک ترازوی الکترونیکی با دقت بالا ثبت شده و نموداری از تغییر جرم بر حسب دما یا زمان ترسیم می‌شود، که امکان تحلیل دقیق مراحل تخریب حرارتی را فراهم می‌سازد.

۳-۴- مشتق وزنی - حرارتی (DTG)

با وجود آن‌که تحلیل TGA اطلاعات مهمی در خصوص تغییرات جرمی نمونه ارائه می‌دهد، تفسیر دقیق خواص حرارتی از روی این نمودار می‌تواند دشوار باشد. به‌منظور افزایش دقت در شناسایی فرآیندهای حرارتی، از مشتق‌گیری منحنی TGA نسبت به دما استفاده شد. این فرآیند از طریق افزودن بخش تکمیلی به دستگاه، امکان ترسیم نمودار مشتق TGA در برابر دما را فراهم می‌سازد.

³ Thermogravimetric Analysis

⁴ Derivative Thermogravimetry

⁵ Differential Thermal Analysis

در نمودار حاصل، هر نقطه عطف در منحنی TGA به صورت یک پیک مشخص در منحنی DTG ظاهر می‌شود. این رویکرد تحلیلی، امکان بررسی دقیق‌تر رفتار حرارتی ماده را در حین تجزیه فراهم کرده و سبب کاهش هم‌پوشانی (overlap) فرآیندهای مختلف در نمودارها می‌شود. شدت هر پیک در نمودار DTG، نشان‌دهنده نرخ تغییر جرم در آن بازه دمایی است و رابطه مستقیمی با شیب نمودار TGA دارد. همچنین، تحلیل سطح زیر پیک‌ها در نمودار DTG امکان مقایسه کمی بین فرآیندهای تجزیه جرمی مختلف را فراهم می‌سازد.

۵-۳- تحلیل حرارتی مقایسه‌ای (DTA)

در روش تحلیل حرارتی تفاضلی (DTA)، نمونه مورد بررسی هم زمان با یک نمونه مرجع خنثی تحت فرآیند حرارتی قرار می‌گیرد. در این فرآیند، اختلاف دمای بین دو نمونه به صورت تابعی از دما یا زمان ثبت می‌شود. تغییرات گرمایی در نمونه آزمون که ناشی از واکنش‌های گرماگیر یا گرمازا هستند، در مقایسه با نمونه مرجع بی‌اثر قابل شناسایی خواهند بود. تحلیل DTA نه تنها برای تشخیص فرآیندهایی که با تبادل گرما همراه هستند مفید است، بلکه در شناسایی تغییرات فازی بدون تغییر محسوس در آنتالپی نیز کاربرد دارد. در نمودار DTA، پیک‌های رو به پایین (مینیمم) معرف فرآیندهای گرمازا، و پیک‌های رو به بالا (ماکزیمم) بیانگر فرآیندهای گرماگیر هستند. این پیک‌ها به عنوان شاخص‌هایی برای تعیین دمای وقوع واکنش‌ها و نوع تبادل حرارتی به کار گرفته می‌شوند و در ارزیابی دقیق خواص حرارتی نمونه نقش کلیدی ایفا می‌کنند.

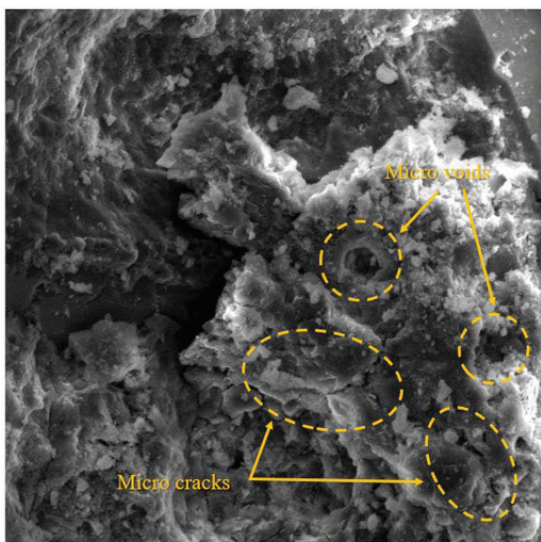
۶-۳- آزمایش‌های تحلیل حرارتی

مدل STA6000 ساخت شرکت Perkin Elmer (ایالات متحده) یک دستگاه تحلیل حرارتی همزمان (STA) با دقت یک میکروگرم است که محدوده دمایی آن از دمای محیط تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد را در بر می‌گیرد. این دستگاه برای دستیابی به چنین بازه دمایی گسترده، از سنسورهای متنوعی بهره می‌برد. فرآیند کاری این دستگاه شامل گرم کردن نمونه از دمای محیط تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد در حضور گاز نیتروژن به عنوان محیط خنثی بود. در این محدوده دمایی، اجزای مختلف نمونه دچار تجزیه حرارتی شده و در نتیجه، کاهش وزن مشاهده شد. در ادامه، نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و تحت گاز اکسیژن، به منظور تسهیل فرآیند احتراق و بررسی علمی رفتار آن، حرارت داده شد. پس از اتمام این مرحله، فرآیند حرارتی متوقف گردید، سیستم خنک‌کننده فعال شد و دمای محفظه به ۲۷ درجه سانتی‌گراد بازگشت.

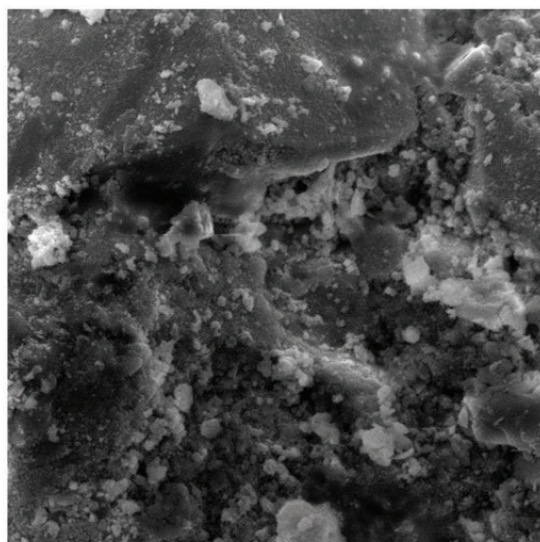
۴- ریزساختار نمونه‌های بتن

تصاویر ESEM دو نمونه بتن تقویت‌شده با ترکیبی از نانو سیلیس و نانو اکسید گرافن، پیش و پس از قرارگیری در معرض دمای زیاد، ارائه شده‌اند (شکل ۱). این تصاویر نشان می‌دهند که با افزایش مقدار نانو اکسید گرافن در ترکیب، ساختار بتن منسجم‌تر شده و تعداد حفره‌های داخلی کاهش می‌یابد. در نمونه‌های حاوی نانو سیلیس و نانو اکسید گرافن، کریستال‌های قابل توجهی مشاهده نمی‌شود و منافذ تا حد زیادی پر شده‌اند که این امر منجر به ساختاری منسجم‌تر و تخلخل کمتر می‌شود. در مقابل، نمونه‌های شاهد فاقد نانو اکسید گرافن دارای حفره‌های بزرگ و ساختاری نامنظم هستند. افزایش مقدار نانو اکسید گرافن در مخلوط بتن، پیوندهای قوی‌تری در خمیر سیمان ایجاد می‌کند که نفوذپذیری و تشکیل فضاهای خالی را کاهش می‌دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که ترکیب نانوذرات، مانند نانو سیلیس و نانو اکسید گرافن، ساختار و خواص بتن را بهبود می‌بخشد. افزایش مقدار نانو اکسید گرافن باعث

ارتقاء خواص مکانیکی، کاهش تخلخل، کاهش نفوذپذیری و تقویت مقاومت بتن می‌شود. پیش از قرارگیری در معرض دمای زیاد، ماتریس بتن فاقد ریزحفره یا ریزترک قابل مشاهده است؛ اما پس از مواجهه با دمای زیاد، برخی ریزحفره‌ها و ریزترک‌ها در نمونه‌ها شکل می‌گیرند. شایان ذکر است که یک نمونه از میان نمونه‌های فاقد نانو اکسید گرافن و نمونه دیگر از ترکیب نانو سیلیس و نانو اکسید گرافن انتخاب شده‌اند. وجود نانو اکسید گرافن به دلیل خواص کربنی این نانوماده، به صورت کمی و کیفی موجب افزایش ریزحفره‌ها و ریزترک‌ها می‌شود.

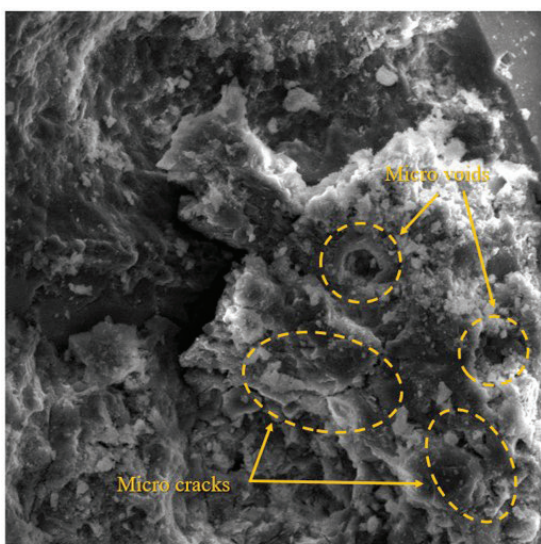


پس از قرارگیری در برابر حرارت زیاد

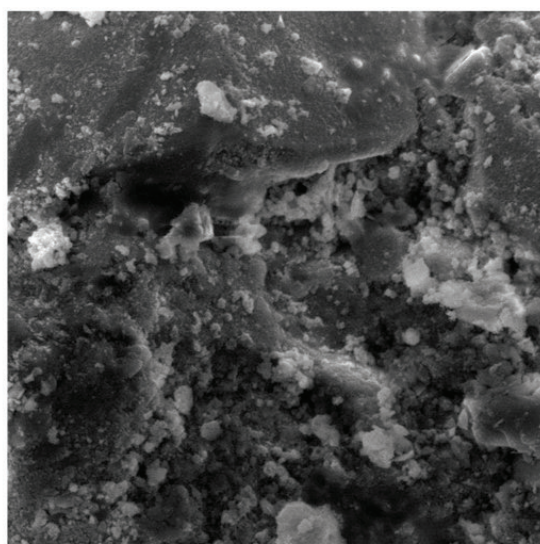


پیش از قرارگیری در برابر حرارت زیاد

N-S-4



پس از قرارگیری در برابر حرارت زیاد



پیش از قرارگیری در برابر حرارت زیاد

N-G-S-11

شکل ۱: تصاویر ESEM⁶ از نمونه‌ها قبل و بعد از قرار گرفتن در معرض دما

⁶ Environmental Scanning Electron Microscopy

۵- نتایج و بحث

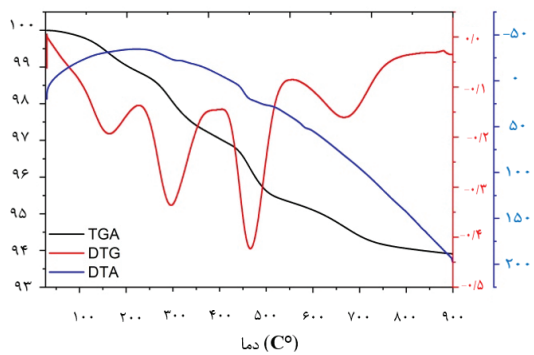
یکی از ویژگی‌های کلیدی بتن، مقاومت مکانیکی آن است؛ از این رو، هدف این بخش، تحلیل و ارزیابی رفتار حرارتی و مکانیکی نمونه‌های بتن معمولی و بتن تقویت‌شده با نانو سیلیس و نانو اکسید گرافن در دماهای مختلف است. ابتدا نتایج حاصل از تحلیل حرارتی همزمان مورد بررسی قرار می‌گیرند و در ادامه، به تحلیل رفتار مکانیکی این نمونه‌ها پرداخته می‌شود. این بررسی‌ها، اطلاعات ارزشمندی در خصوص تأثیر افزایش دما بر کاهش یا پایداری مقاومت مکانیکی بتن در حضور نانوذرات ارائه می‌دهند.

۵-۱- تفسیر نمودارهای حرارتی

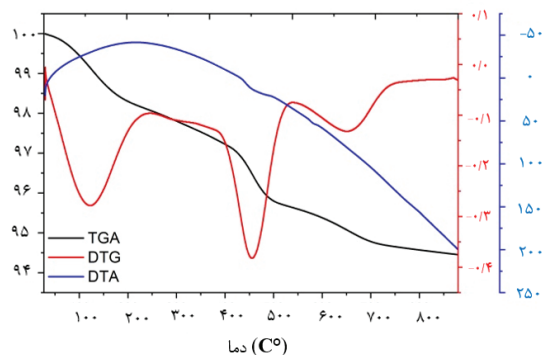
تحلیل حرارتی همزمان بر روی ۱۰۰ نمونه مختلف انجام شد (مطابق جدول ۴ و شکل ۲) که شامل نمودارهای و TGA، DTG و DTA می‌باشد. تمامی نمودارها روندی مشابه را نشان می‌دهند؛ به طوری که دو ناحیه عمده کاهش وزن در نمونه‌ها قابل مشاهده است: نخست، در حدود دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، و دوم، در بازه دمایی ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد. کاهش وزن در ناحیه اول به تبخیر آب جذب‌شده طی فرآیند هیدراتاسیون سیمان نسبت داده می‌شود. این پدیده بیانگر از دست رفتن رطوبت سطحی و میان‌لایه‌ای بتن است که با شروع فرآیند گرمادهی به سرعت اتفاق می‌افتد. در مقابل، کاهش وزن دوم به دلیل تجزیه حرارتی ترکیبات آلی نظیر CaC_2O_4 و آزادسازی گازهای مونوکسید کربن (CO) و دی‌اکسید کربن (CO_2) رخ می‌دهد. در این مرحله، هم‌زمان با تجزیه حرارتی، فرآیند تشکیل کربنات کلسیم ($CaCO_3$) نیز آغاز می‌شود که بیانگر پایداری نسبی ساختار معدنی بتن در دماهای زیادتر است. واکنش شیمیایی مربوط به این فرآیند در رابطه (۱) ارائه شده است.



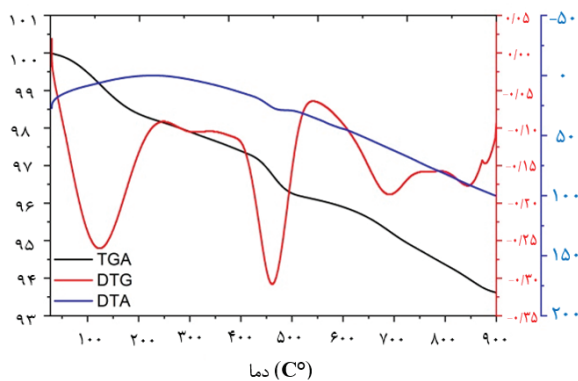
همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، کاهش وزن مشاهده‌شده در تمامی نمودارها را می‌توان عمدتاً ناشی از تأثیر مستقیم حرارت بر ساختار سیمان دانست. نتایج حاصل از بررسی نمونه‌های حاوی نانو سیلیس و نانو اکسید گرافن نیز مؤید آن است که در خارج از بازه‌های دمایی مشخص، کاهش وزن چشمگیری رخ نمی‌دهد. با این وجود، نمونه‌ی N-G-S-7 در دمای ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد افت وزنی محسوسی نشان می‌دهد، در حالی که این افت برای نمونه‌های N-G-S-9 و N-G-S-11 عمدتاً در دمای ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مشاهده می‌شود. این سه نمونه دارای درصد‌های بالاتری از نانومواد مذکور هستند و افت وزنی آن‌ها احتمالاً به تجزیه‌ی کربنات کلسیم ناشی از فرآیند کربناته شدن کنترل‌نشده مرتبط است.



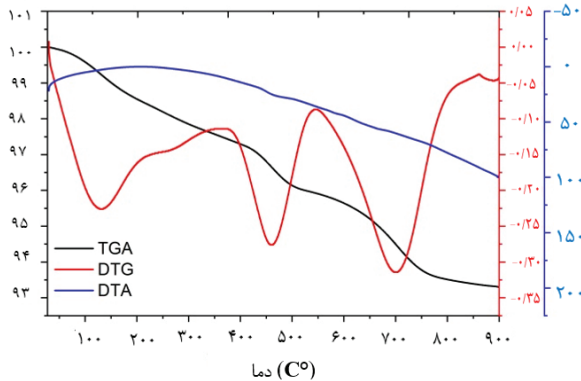
N-G-2



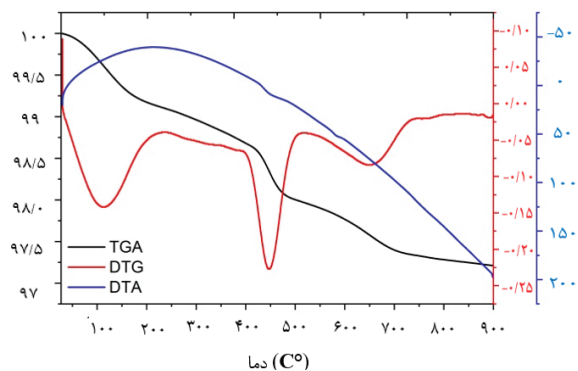
N-S-3



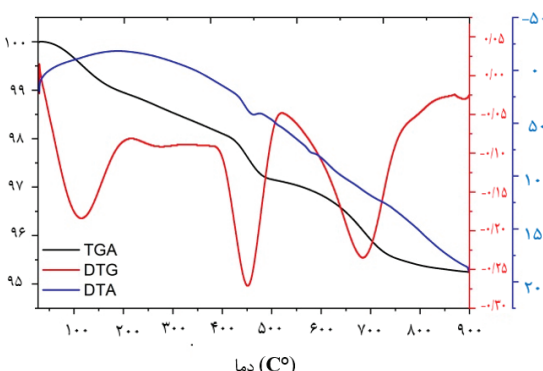
N-S-4



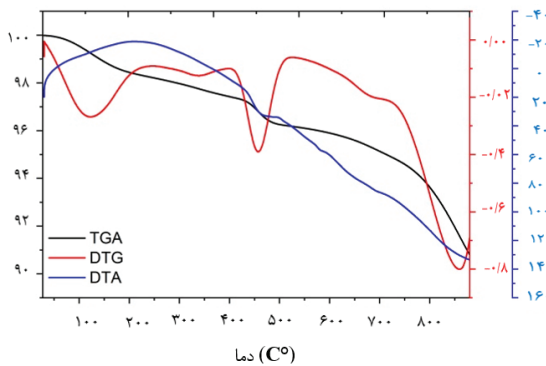
N-G-S-1



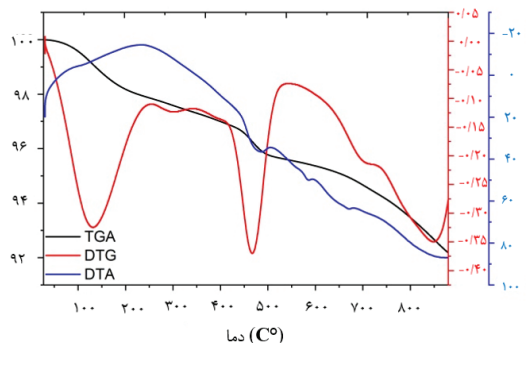
N-G-S-10



N-G-S-7



N-G-S-9

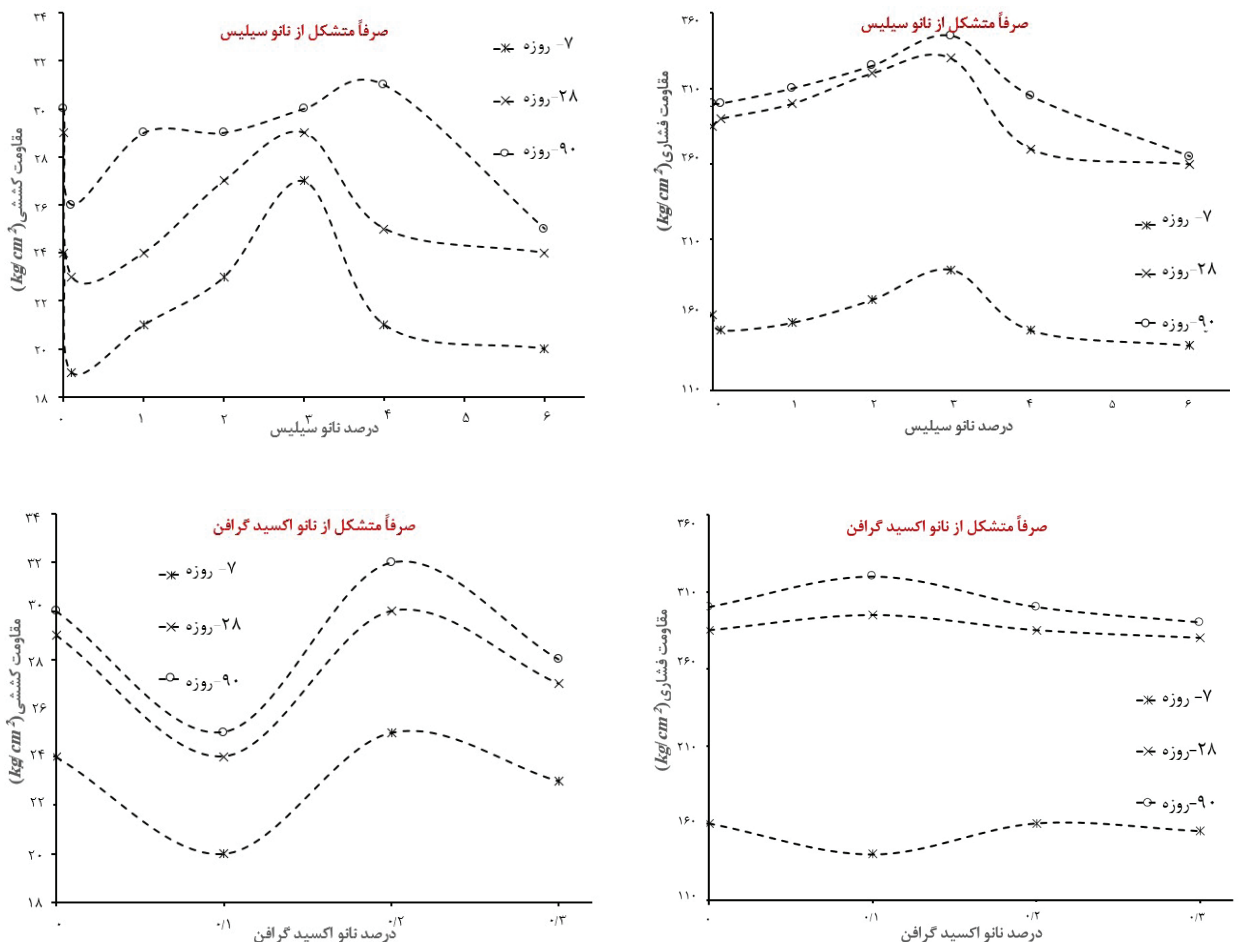


N-G-S-11

شکل ۲: تحلیل حرارتی همزمان بتن اصلاح شده با نانو سیلیس، نانو اکسید گرافن و ترکیب آن‌ها

۲-۵- خواص مکانیکی نمونه‌های بتن با افزودنی‌ها در برابر حرارت

استفاده از ترکیب نانو سیلیس و نانو اکسید گرافن به عنوان افزودنی در بتن، موجب تغییراتی در خواص مکانیکی بتن می‌گردد. این حال، برای ارزیابی دقیق تأثیر این نانوذرات، لازم است عملکرد مکانیکی نمونه‌های بتن پیش از قرارگیری در معرض دماهای زیاد بررسی شود. شکل ۳، تغییرات مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتن را در سنین مختلف (۷، ۲۸ و ۹۰ روزه) در حضور مقادیر متفاوتی از نانو اکسید گرافن نشان می‌دهد. این سنین به ترتیب به عنوان مراحل رشد اولیه، میان مدت و نهایی مقاومت مکانیکی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که افزودن نانو اکسید گرافن به تنهایی، تغییر محسوسی در مقاومت مکانیکی ایجاد نمی‌کند. به طور میانگین، نمونه‌های حاوی نانو اکسید گرافن در حدود ۶۰ تا ۶۵ درصد مقاومت فشاری نهایی خود را تا روز هفتم کسب می‌کنند. این رقم در خصوص مقاومت کششی بیش از ۷۰ درصد است. همچنین، در پایان ۲۸ روز، مقاومت مکانیکی نمونه‌ها به بیش از ۹۰ درصد مقدار نهایی خود نزدیک می‌شود.

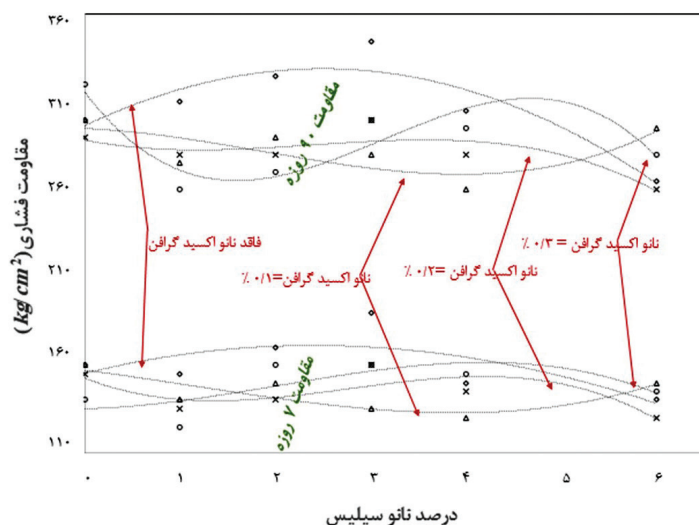


شکل ۳: تغییرات مقاومت (a) کششی و (b) فشاری نمونه‌های بتن در سنین مختلف، تحت تأثیر درصدهای مختلف نانو (NS⁷) و (GO⁸)

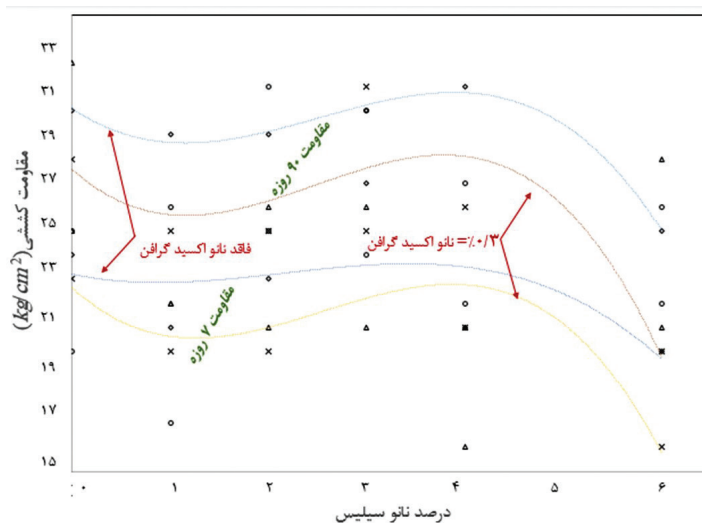
⁷ Nano-Silica

⁸ Graphene Oxide

در این مطالعه مشاهده شد که نانو سیلیس، همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، موجب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود؛ به‌عنوان نمونه، افزودن حدود ۳٪ از این ماده منجر به افزایش حدود ۱۵٪ در مقاومت فشاری گردید. با این حال، مصرف بیش از حد این افزودنی ممکن است موجب اشباع ساختار و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری گردد. از سوی دیگر، داده‌های ارائه‌شده در شکل ۳ نشان می‌دهند که نانو سیلیس تأثیر محسوسی بر افزایش مقاومت کششی ندارد و در برخی موارد ممکن است باعث کاهش آن شود. همچنین، نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۴ و شکل ۵ نشان می‌دهند که زمان گیرش در نمونه‌های حاوی نانو سیلیس با نمونه‌های دارای نانو اکسید گرافن تفاوت چندانی ندارد؛ به‌عبارتی، زمان گیرش بیش‌تر تحت تأثیر نوع سیمان مصرفی است تا نوع افزودنی.

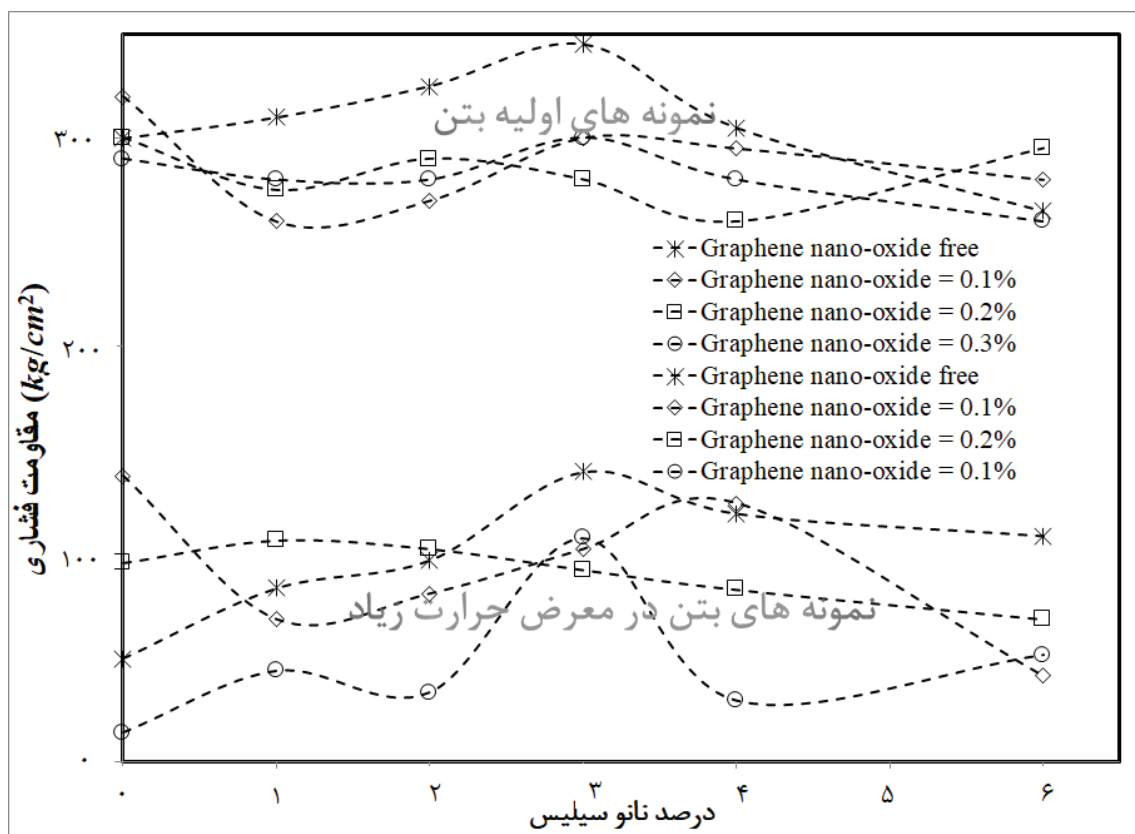


شکل ۴: تغییرات مقاومت فشاری بتن ۷ و ۹۰ روزه با درصدهای مختلف NS و GO

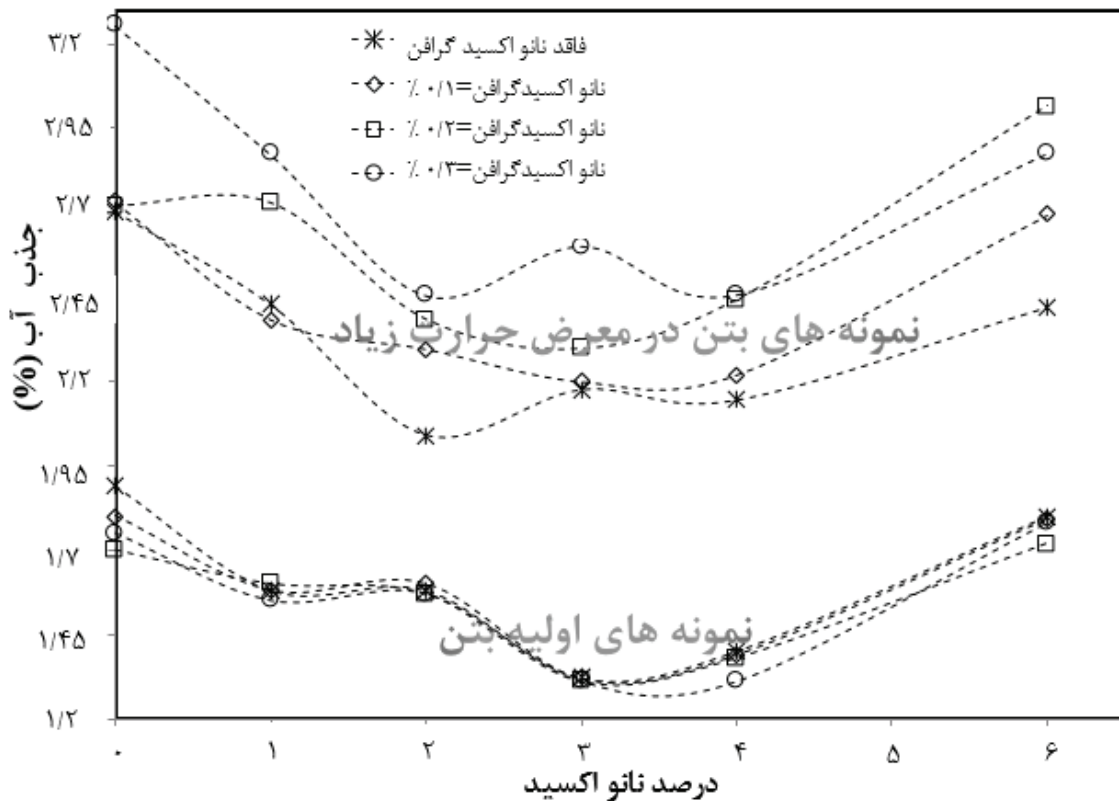


شکل ۵: تغییرات مقاومت کششی بتن ۷ و ۹۰ روزه با درصدهای مختلف نانو ذرات NS و GO

شکل‌های مذکور تأثیر ترکیبی دو افزودنی بر خواص مکانیکی بتن را نیز نمایش می‌دهند. به‌طور کلی، ترکیب این دو ماده منجر به کاهش مقاومت فشاری و کششی می‌شود. به‌ویژه، نمونه حاوی ۰.۲٪ نانو سیلیس و ۰.۱٪ نانو اکسید گرافن، با کاهش ۵۰ درصدی در مقاومت فشاری نهایی و ۲۰ درصدی در مقاومت کششی نهایی مواجه می‌شود. همان‌گونه که انتظار می‌رود، افزودنی‌ها تأثیر کمی بر زمان گیرش دارند و بیشتر نمونه‌ها در ۷ روز به حدود ۶۰٪ مقاومت فشاری و ۷۰٪ مقاومت کششی نهایی می‌رسند؛ در حالی که در ۲۸ روز به حدود ۹۰٪ مقاومت نهایی خود دست می‌یابند. پس از بررسی اثر افزودنی‌ها، شکل‌های ۶ و ۷ مقاومت نمونه‌های بتن را پس از قرار گرفتن در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد نمایش می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد اکثر نمونه‌ها با کاهش ۶۵٪ تا ۷۵٪ در مقاومت مواجه می‌شوند. اما، افزودنی نانو اکسید گرافن کاهش بیشتری در مقاومت ایجاد می‌کند؛ به‌ویژه، نمونه‌های حاوی ۰.۳٪ نانو اکسید گرافن تا ۸۵٪ کاهش مقاومت را نشان می‌دهند. در مقابل، نمونه‌هایی با نانو سیلیس کمتر (و بدون نانو اکسید گرافن) کاهش کمتری را تجربه می‌کنند. به‌طور خلاصه، داده‌های این بخش بیان می‌کنند که اگرچه نانو سیلیس تأثیر چندانی بر مقاومت کششی ندارد، ولی موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود. در مقابل، نانو اکسید گرافن نه تنها اثر مثبتی بر مقاومت ندارد، بلکه مقاومت کششی را نیز کاهش می‌دهد. همچنین، در مواجهه با دمای زیاد، مقاومت فشاری کاهش قابل توجهی می‌یابد که می‌توان با افزودن مقدار کمی نانو سیلیس (حدود ۱٪) آن را تعدیل کرد. در حالی که نانو اکسید گرافن، به دلیل ماهیت کربنی خود، باعث کاهش شدید مقاومت در دمای زیاد می‌شود.



شکل ۶: تغییرات مقاومت فشاری بتن با ترکیبات NS و GO قبل و بعد حرارت دهی



شکل ۸: تغییرات جذب آب بتن با ترکیبات مختلف NS و GO قبل و بعد از حرارت دهی

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر ترکیب‌های مختلف نانوذرات سیلیس و نانو اکسید گرافن بر مقاومت فشاری و کششی بتن، به علاوه ظرفیت جذب آب به عنوان شاخص دوام، در شرایط دمای اتاق و پس از مواجهه با دمای زیاد (۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها حاکی از آن هستند که:

- استفاده از نانوذرات سیلیس به تنهایی موجب افزایش جزئی در مقاومت مکانیکی و دوام بتن می‌شود. نسبت بهینه این ذرات برای افزودن به بتن، ۳ درصد وزن سیمان است؛ افزایش بیش از این مقدار باعث کاهش مقاومت مکانیکی و دوام می‌شود. ترکیب نانو اکسید گرافن با نانوذرات سیلیس نیز افزایش چشم‌گیری در مقاومت مکانیکی یا دوام بتن ایجاد نمی‌کند.
- افزایش میزان نانوذرات سیلیس تا ۱٪ باعث کاهش جذب آب می‌شود. در بازه ۱٪ تا ۲٪، تغییر قابل توجهی در درصد جذب آب و به تبع آن دوام بتن مشاهده نمی‌شود. با این حال، در محدوده ۲٪ تا ۳٪، جذب آب به‌طور چشمگیری کاهش یافته و دوام بتن بهبود می‌یابد. پس از عبور از ۳٪، جذب آب مجدداً افزایش یافته و دوام بتن کاهش می‌یابد.
- افزودن نانو اکسید گرافن به تنهایی تأثیر قابل توجهی بر مقاومت کششی و فشاری نمونه‌های بتن ندارد. نمونه‌ها پس از ۷ روز، در حدود ۶۰ تا ۶۵ درصد مقاومت فشاری و بیش از ۷۰ درصد مقاومت کششی نهایی را نشان می‌دهند. همچنین، در نقطه عطف ۲۸ روزه، بیش از ۹۰ درصد مقاومت نهایی به دست می‌آید.
- یافته‌ها نشان می‌دهند که میزان نانو اکسید گرافن تأثیر معناداری بر مقاومت کششی بتن ندارد. به گونه‌ای که افزودن ۱٪ نانو

اکسید گرافن به همراه ۲٪ نانوذرات سیلیس منجر به مقاومتی معادل با ترکیب ۴٪ نانوذرات سیلیس بدون نانو اکسید گرافن می‌شود (31 kg/cm^2).

● بر اساس نتایج حاصل از آزمون حرارت‌دهی، نمونه‌های فاقد نانو اکسید گرافن و حاوی حداکثر ۱٪ نانوذرات سیلیس، پیش و پس از مواجهه با دمای زیاد، کاهش مقاومت فشاری را تجربه می‌کنند. با افزایش مقدار نانو سیلیس تا ۳٪، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد؛ اما افزودن بیش از این مقدار (تا ۶٪) مجدداً منجر به افت مقاومت می‌شود.

قرارگیری در معرض دمای زیاد تأثیر قابل توجهی بر نمونه‌های آزمایش شده داشته است:

● در دمای حدود ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و در بازه ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، همه نمونه‌ها کاهش وزن قابل توجهی را تجربه کرده‌اند. افزودن هم زمان دو ماده نانو افزودنی به‌طور کلی موجب کاهش مقاومت نهایی فشاری و کششی بتن می‌شود؛ به‌عنوان نمونه، ترکیب حاوی ۲٪ نانو سیلیس و ۱٪ نانو اکسید گرافن کاهش ۵۰ درصدی در مقاومت فشاری نهایی و ۲۰ درصدی در مقاومت کششی نهایی را نشان می‌دهد.

● وجود نانو اکسید گرافن در نمونه‌ها خطر کاهش دوام پس از قرارگیری در معرض دمای زیاد را افزایش می‌دهد. به‌ویژه، داده‌ها نشان می‌دهند که درصد جذب آب در نمونه‌های حاوی ۳٪ نانو اکسید گرافن، پس از حرارت‌دهی، حدود ۸۰ درصد افزایش یافته است.

پس از حرارت‌دهی، نمونه‌های حاوی میزان بالای نانو اکسید گرافن (۳٪) بیشترین افزایش در جذب آب و در نتیجه بیشترین کاهش دوام را نشان می‌دهند. در مقادیر کمتر نانو اکسید گرافن، تغییرات درصد جذب آب وابسته به مقدار نانو سیلیس است. به‌عنوان نمونه، در غیاب نانو اکسید گرافن، تغییرات جذب آب حداقل بوده و مشابه شرایط بدون حرارت‌دهی، صرفاً تابع میزان نانو سیلیس باقی می‌ماند.

● در حالت حداکثر نانو اکسید گرافن (۳٪)، افزودن ۱٪ نانو ذرات سیلیس به مخلوط بتن منجر به افزایش مقاومت فشاری می‌شود؛ سپس تا میزان ۲٪ مقاومت فشاری تغییر قابل توجهی ندارد، اما تا ۳٪ مجدداً افزایش یافته و با افزودن مقادیر بیشتر نانو ذرات سیلیس، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

● نمونه‌های حاوی ۱٪ نانو اکسید گرافن و کمتر از ۳/۵٪ نانو ذرات سیلیس، کمترین افت مقاومت کششی را نشان می‌دهند؛ با افزایش میزان نانو سیلیس، این مقاومت پس از قرارگیری در معرض دمای زیاد به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

از متصدیان و کارکنان محترم آزمایشگاه بتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز و آزمایشگاه انتقال حرارت دانشگاه یاسوج کمال تشکر و قدردانی را دارم.

منابع

1. Baharavar, S.R., Esmaili, M. (2024). 'The effect of micro aluminum oxide and micro sil-ica on the physical and chemical properties of very high strength concrete', *New ap-proaches in civil engineering*, 8(1): 32-46, in persion.
2. Hazrati, M., Khorsand A., Doroudi . M., Hamidi, M. (2017). 'Fabrication and characteriza-tion of reduced graphene oxide-zinc oxide nanocomposite and investigation of its poten-tial for medi-cal applications', *Research on many-particle systems*, 7(13):61-70, in persion
3. Khiabani, M., Javaheri, M.R. (2023) . ' Determning the mechanical properties of fiber concrete types at high temperatures', *New approaches in civil engineering*, 7(4):53-68.

4. Moradi, M.S., Tavana, M.H., Habibi, M.R., Amiri, M. (2024), 'Investigating the effect of high temperatures on the mechanical properties of concretes containing different fibers', DOI: 10.22065/JSCCE.2024.441324.3354. in persion.
5. Namjouyan, Sh., Rajabi, A. (2019). 'Soroushzadeh, A., Aghaalikhani, M., 'Effect of nano-silica and tebuconazole on some physiological traits, growth and yield of white sugar beet under drought stress', *Sugar beet*, 35(2):157-173. in persion.
6. Ahmad, Jawad, and Zhiguang Zhou. (2023). 'Properties of concrete with addition carbon nanotubes: A review', *Construction and Building Materials*, 393: 132066.
7. Barbhuiya, Gulzar H., Maaz Abdul Moiz, Syed Danish Hasan, and Mohd Moonis Zaheer. (2020). 'Effects of the nanosilica addition on cement concrete: A review', *Materials Today: Proceedings*, 32: 560-66.
8. Bastos, Guillermo, Faustino Patiño-Barbeito, Faustino Patiño-Cambeiro, and Julia Armeño. (2016). 'Nano-inclusions applied in cement-matrix composites: A review', *Materials*, 9: 1015.
9. Devasena, M, and V Sangeetha. 2021. 'Implications of nano-titanium dioxide incorporation in cement matrix: A review', *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 102: 567-73.
10. Kalifa, Pierre, Francois-Dominique Menneteau, and Daniel Quenard. (2000). 'Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures', *Cement and Concrete Research*, 30: 1915-27.
11. Krishnaraja, AR, P Kulanthaivel, P Ramshankar, Vincent Herald Wilson, Ponnusamy Palanisamy, S Vivek, V Sampathkumar, P Ganeshan, MC Sashikkumar, and K Raja. (2022). 'Performance of polyvinyl alcohol and polypropylene fibers under simulated cementitious composites pore solution', *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022: 9669803.
12. Luhan, Salmabanu, Ismail Luhan, and Faiz Shaikh. (2022). 'Nano-modified green cementitious composites.' in, *Recent Advances in Nano-Tailored Multi-Functional Cementitious Composites (Elsevier)*.
13. Zhan, Peimin, Jing Xu, Juan Wang, Junqing Zuo, and Zhihai He. (2022). 'A review of recycled aggregate concrete modified by nanosilica and graphene oxide: Materials, performances and mechanism', *Journal of Cleaner Production*, 375: 134116.
14. Zhang, SP, and L Zong. (2014). 'Evaluation of relationship between water absorption and durability of concrete materials', *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014: 650373.
15. Rao PT, Prakash J, Alexander R, Shinde MJ, and Dasgupta K. (2024). Role of graphene oxide infusion in concrete to elevate strength and fire performance in construction concrete. *Diamond & Related Materials*, 147:111269.
16. Singh H, and Tiwary AK. (2024). Influence of Nanosilica and Ground Granulated Blast Furnace Slag on Mechanical and Durability Properties of Blended Concrete over Varied Fire Durations. *J. Mater. Civ. Eng.*, 36(9):04024260.
17. Han S, Hossain MS, Ha T, and Yun KK. (2024). Performance of carbon nanomaterials incorporated with concrete exposed to high temperature. *Nanotechnology Reviews*, 13:20240036.
18. Ramana I, and Parthasarathi N. (2025). Synergistic effects of fly ash and graphene oxide composites at high temperatures and prediction using ANN and RSM approach. *Sci. Rep.*, 15:1604.
19. Shahpari M, Khaloo A, Rashidi A, Saberian M, and Li J. (2023). Synergetic effects of hybrid nano-blended cement on mechanical properties of conventional concrete: Experimental and analytical evaluation. *Structures*, 48:1519-1536.

20. Nasehi, M., Amiri, M., Malekinejad ., M. (2023), 'Investigating the effect of using nano-silica on the mechanical properties of cement-sand mortar under the influence of heat with a view to changes in cement nanostructures', *Concrete research*,16(1): 57-72. in persion.
21. Mobini, M.H., Khaloo, A.R. (2020). 'Investigating the effect of using pyrogenic silica na-noparticles on the resistance of reinforced concrete against corrosion of rebars buried in concrete', *Sharif Civil Engineering*,36-2(4.2):81-90.in persion.