

Investigation of the Effect of Liquid Graphene Oxide Colloid and NanoAl₂O₃ on the Permeability and Mechanical Properties of Concrete and Optimization of Its Mix Design

Ashkan khodabandehlou¹, Mohammad Javad Zare Ghanat Novi²

1-Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran

2-Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran

a.khodabandehlou@iaui.ac.ir

Received: 05 October 2025 Revised: 03 December 2025 Accepted: 14 February 2026

Research paper

Abstract

Reinforced concrete structures exposed to continuous or intermittent water flow, hydrostatic pressure, and aggressive environments are subjected to serious threats caused by the ingress of harmful chloride and sulfate ions. Continuous contact with saline water, combined with flow-induced stresses, pressure fluctuations, abrasive action of suspended particles, and repeated wetting-drying cycles, accelerates corrosion and deterioration processes. One of the major challenges in such structures is the high permeability of concrete to moisture and water, which leads to cracking, reduction of the effective reinforcement section, and diminished long-term durability. Hence, reducing concrete permeability is a key strategy for enhancing the durability of hydraulic and water-related structures. In this study, to reduce permeability and improve the durability of ordinary concrete against water penetration, a combination of liquid graphene oxide colloid (GO) at 0.1%, 0.3%, 0.5%, 0.7%, and 1% by the weight of mixing water, together with a constant 0.5% nano-Al₂O₃ by the weight of cement, has been used. Various tests, including unit weight, slump, 7- and 28-day compressive strength, Brazilian tensile strength, abrasion resistance, water penetration depth, and microstructural analysis, have been performed. The results have shown that incorporating the graphene oxide colloid (GO)/nano-Al₂O₃ blend has simultaneously reduced the 28-day compressive strength by 1.6% to 19.8%, Brazilian tensile strength by 8.3% to 37.5%, and abrasion resistance by 22.4% to 69.8% compared with the control mix. However, the permeability of concrete against water has decreased by up to approximately 82%. Subsequently, sensitivity analysis and a multicriteria optimization process were performed on the mix designs, the results of which identified the CON3 mix as the optimal design with an emphasis on improving concrete impermeability.

Keywords: Concrete Permeability, Nano Colloidal Graphene Oxide, NanoAlumina, Nanomaterials, Optimization.

*Corresponding Author: Ashkan khodabandehlou

KhodaBandehLou A., Zare Ghanat Novi M. J. Investigation of the Effect of Liquid Graphene Oxide Colloid and Nano Al₂O₃ on the Permeability and Mechanical Properties of Concrete and Optimization of Its Mix Design. J. Concr. Struct. Mater., 2026; 10(1): 70-102. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2026.544913.1398>

2538-5828/ © 2026The 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 تأثیر نانو کلئید اکسید گرافن و نانو دی اکسید آلومینا بر نفوذپذیری و خواص مکانیکی بتن و بهینه سازی طرح اختلاط آن

اشکان خدابندهلو^{۱*}، محمد جواد زارع قنات نوی^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.khodabandehlou@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده:

سازه های بتن مسلح که در معرض جریان های دائمی یا متناوب آب، فشار هیدرواستاتیک و شرایط خورنده قرار دارند با تهدیدهای جدی ناشی از نفوذ یون های مخرب کلراید و سولفات مواجه هستند. تماس مداوم این سازه ها با آب های حاوی املاح، همراه با تنش های ناشی از جریان، تغییرات فشار، پدیده های سایشی ناشی از ذرات معلق و چرخه های متوالی خیس و خشک شدن، فرآیندهای خوردگی و تخریب را تسریع می کند. یکی از مهم ترین چالش های این سازه ها، نفوذپذیری زیاد بتن در برابر رطوبت و آب است که منجر به ترک خوردگی، کاهش مقطع آرماتور و افت دوام می شود. بنابراین کاهش نفوذپذیری بتن، راهکاری کلیدی برای ارتقای دوام سازه های هیدرولیکی و آبی است. در این تحقیق، برای کاهش نفوذپذیری و ارتقای دوام بتن معمولی در برابر نفوذ آب، از ترکیب نانو کلئید اکسید گرافن مایع به میزان ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱٪ وزنی آب و نانو دی اکسید آلومینا به میزان ثابت ۰/۵٪ وزنی سیمن استفاده شده است. آزمایش های متعددی شامل وزن مخصوص، اسلامپ، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه، مقاومت کشش برزیلی، مقاومت سایشی، میزان نفوذ آب و بررسی ریز ساختار بتن انجام گرفته است. نتایج نشان داده است که افزودن ترکیب نانو کلئید اکسید گرافن مایع و نانو دی اکسید آلومینا موجب کاهش همزمان مقاومت فشاری ۲۸ روزه به میزان ۱/۶٪ تا ۱۹/۸٪، مقاومت کشش برزیلی ۸/۳٪ تا ۳۷/۵٪ و مقاومت سایشی ۲۲/۴٪ تا ۶۹/۸٪ نسبت به طرح شاهد شده است. اما میزان نفوذپذیری بتن در برابر آب را تا حدود ۸۲٪ کاهش می دهد. در ادامه، آنالیز حساسیت و فرآیند بهینه یابی چند معیاره بر روی طرح های اختلاط انجام شد که نتایج آن، طرح CON-3 را به عنوان بهینه ترین طرح با تاکید بر بهبود نفوذناپذیری بتن معرفی کرد.

کلیدواژه ها: نفوذپذیری بتن، نانو کلئید اکسید گرافن، نانو دی اکسید آلومینا، نانو مواد، بهینه یابی.

بتن به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح، کاربرد گسترده‌ای در سازه‌های آبی و ساحلی دارد که از جمله می‌توان به اسکله‌ها، موج‌شکن‌ها، پل‌های ساحلی، کانال‌ها و جداول آبی، حوضچه آرامش و المان‌های محوطه‌سازی اشاره کرد. محیط آبی به دلیل وجود عوامل مهاجم متعددی نظیر یون‌های کلراید، سولفات‌ها، دی‌اکسید کربن، چرخه‌های تر و خشک شدن، تغییرات دمایی ناگهانی و حضور دائمی رطوبت زیاد، بستر مناسبی برای تخریب سازه‌های بتنی فراهم می‌آورد. یکی از اصلی‌ترین دلایل کاهش دوام این سازه‌ها، مکانیزم نفوذ آب و مواد شیمیایی به ساختار داخلی بتن است [۱]. نفوذ آب در بتن به دلیل ساختار متخلخل آن رخ می‌دهد که شامل منافذ موئینه، ترک‌های ریز و مجراهای داخلی است. ورود این یون‌ها به داخل بتن می‌تواند واکنش‌های شیمیایی متعددی را ایجاد کند. محصولات این فرایند، مانند اکسید آهن با افزایش حجم خود فشار داخلی را زیاد کرده و باعث ترک‌خوردگی بتن می‌شوند. این ترک‌ها، مسیرهای جدیدی برای نفوذ بیشتر آب و مواد مخرب فراهم کرده و تخریب سازه را تسریع می‌کنند [۲]. از دیگر تبعات نفوذ آب، واکنش سولفات‌ها با ترکیبات هیدراته سیمان است که به تشکیل محصولات حجیم و پراکنده مانند اترینگایت می‌انجامد. علاوه بر این، نفوذ دی‌اکسید کربن محیطی از طریق آب به داخل بتن، باعث پیشروی کربناسیون و کاهش pH بتن می‌شود که در نهایت به حذف خاصیت محافظت قلیایی اطراف میلگردها منجر خواهد شد [۳]. نفوذپذیری بتن به طور مستقیم تحت اثر عوامل مختلف قرار دارد. استفاده از مواد افزودنی مانند میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره نیز اثر زیادی در کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن دارند [۴]. علاوه بر این، استفاده از آب‌بندکننده‌های شیمیایی که در ترکیب بتن مخلوط می‌شوند، می‌توانند ساختار بتن را در برابر نفوذ آب و یون‌های خورنده ایمن‌تر سازند [۵]. راهکارهای نوین برای کاهش نفوذپذیری بتن با هدف بهبود مقاومت آن در شرایط مهاجم روزبه‌روز در حال توسعه هستند. اتخاذ رویکردهای علمی و کاربردی برای کاهش نفوذپذیری بتن، می‌تواند دوام، عمر مفید و بهره‌وری این سازه‌ها را تضمین کرده و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را به شکل محسوسی کاهش دهد.

در سال‌های اخیر، یکی از مهم‌ترین راهکارهای مقابله با آسیب‌های ناشی از محیط‌های آبی، بهبود ساختار داخلی بتن و کاهش نفوذپذیری آن از طریق فناوری‌های نوین، به‌ویژه فناوری نانو بوده است [۶]. نانو ذرات با اندازه بسیار کوچک، قابلیت پر کردن منافذ ریز و ترک‌های موئینه در ماتریس سیمان را دارند و با ایجاد ساختاری متراکم‌تر، مسیر نفوذ مواد مهاجم مانند یون‌های کلراید را مسدود می‌کنند [۷]. این ویژگی موجب کاهش قابل توجه نفوذپذیری و بهبود مشخصات مکانیکی بتن می‌شود. از جمله نانو ذرات مورد توجه در این زمینه می‌توان به نانو ذرات گرافن اشاره کرد [۸]. نانو گرافن به دلیل ساختار لای‌های و مشخصات مکانیکی منحصر به فرد خود، علاوه بر بهبود مشخصات مکانیکی و دوام بتن در کاهش ترک خوردگی نقش مؤثری دارند [۹]. همچنین، نانو دی‌اکسید آلومینا با ایجاد واکنش‌های شیمیایی اصلاح کننده علاوه بر افزایش تراکم، مقاومت بتن را در برابر سایش تقویت می‌کند [۱۰].

مطالعات انجام شده نشان داده‌اند که استفاده از نانوذرات اثر بسیار زیادی بر مشخصات مکانیکی، دوام و ریزساختار بتن دارد. لئو و همکاران (۲۰۲۳) با بررسی چهار نوع نانو ذره شامل اکسید آلومینا^۱، سیلیس^۲ و روی^۳ دریافتند که مقادیر بهینه این مواد در محدوده ۰/۵٪ تا ۱/۵٪ وزنی سیمان، زمان سخت‌شدگی را به میزان ۱۰٪ تا ۱۸٪ کاهش داده، مقاومت فشاری ۲۸ روزه را حدود ۱۲٪ تا ۲۵٪ افزایش داده و سرعت اولیه هیدراتاسیون را ۸٪ تا ۱۵٪ بهبود می‌دهند. اما استفاده بیش از حد از این نانوذرات (بالتر از ۲٪) موجب کاهش ۱۰٪ تا ۲۰٪ سیالیت و بروز پدیده کلوخگی می‌شود [۱۱]. ونگ‌کیو و همکاران (۲۰۲۲) اثر اکسید گرافن^۴ را بر

^۱ Al₂O₃

^۲ SiO₂

^۳ ZnO

^۴ GO

روی بتن بررسی کرده و دریافتند که افزودن مقادیر بسیار کم این ماده (معمولاً کمتر از 0.3% تا 0.5% وزنی)، می‌تواند مقاومت فشاری و خمشی بتن را به ترتیب تا 20% تا 30% و 25% تا 40% افزایش دهد [۱۲]. هونجی یانگ و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که استفاده از نانوگرافن^۵ در مقادیر بهینه 0.5% تا 1% موجب افزایش 12% تا 28% مدول الاستیسیته و افزایش 15% تا 32% مقاومت کشش برزلی بتن می‌شود، اما مقادیر زیاد آن (بیش از 15%) نتایج منفی به همراه داشته و کاهش 5% تا 12% مقاومت فشاری را ایجاد می‌کند [۱۳]. لیجی وای و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که استفاده از نانو مواد (نانو کربن ۶) در محدوده 0.1% تا 0.3% موجب کاهش 10% تا 18% نفوذپذیری بتن و افزایش 8% تا 20% مقاومت فشاری بتن می‌شود [۱۴]. ژو و همکاران (۲۰۲۱) نیز بیان کردند که استفاده از مقادیر محدود اکسید گرافن (حدود 0.2% تا 0.5% وزنی سیمان) موجب افزایش چشمگیر مقاومت فشاری به میزان 15% تا 25% و مقاومت خمشی به میزان 20% تا 35% همچنین موجب بهبود قابل توجه فرآیند هیدراتاسیون می‌شود [۱۵]. فیاض جهانی و همکاران (۲۰۲۱) و احسانی و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که دی‌اکسید آلومینا در درصدهای کم (0.5% تا 1%) باعث افزایش 10% تا 22% مقاومت سایشی بتن می‌شود. همچنین مقادیر بیشتر از 15% موجب کاهش 6% تا 14% مقاومت فشاری بتن می‌شود [۱۶، ۱۷]. نظری و همکاران (۲۰۲۰) درصد بهین‌های از دی‌اکسید آلومینا (حدود 0.8%) را برای بتن خودمترکم معرفی کردند که موجب تسریع 12% تا 18% فرآیند هیدراتاسیون و افزایش 10% تا 20% مقاومت خمشی در سنین اولیه می‌شود [۱۸]. سالمی و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که ترکیب نانوالومینا (حدود 1%) و الیاف پلی‌پروپیلن (حدود 0.2%) موجب افزایش 25% تا 35% دوام بتن در برابر چرخه‌های ذوب-انجماد می‌شود [۱۹]. لی و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش کردند که افزودن دی‌اکسید آلومینا در محدوده 0.5% تا 1% منجر به کاهش 20% تا 45% نفوذپذیری آب، کاهش 15% تا 30% نفوذ کلراید و افزایش 12% تا 22% مقاومت سایشی بتن می‌شود [۲۰]. سنگیز و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که نانوالیاف گرافن در مقادیر 0.2% تا 0.6% می‌تواند مقاومت خمشی بتن را 18% تا 40% افزایش دهد [۲۱]. دوی و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند که اکسید گرافن در درصدهای مختلف (0.2% تا 0.8%) می‌تواند مقاومت فشاری و کشش برزلی بتن را به ترتیب 10% تا 28% و 15% تا 35% بهبود دهد [۲۲]. اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی مکانیزم سه‌گانه دی‌اکسید آلومینا در ماتریس بتن، افزایش 12% تا 20% مقاومت فشاری و تراکم بیشتر خمیر سیمان را گزارش کردند [۲۳]. محمدی و همکاران (۲۰۱۸) نیز تایید کردند که افزودن پودر نانو اکسید گرافن (حدود 0.3% تا 0.5%) نسبت به سایر نانوذرات، افزایش بیشتری در تقویت مشخصات مکانیکی بتن ایجاد کرده و مقاومت فشاری را تا حدود 25% تا 35% تقویت می‌کند [۲۴]. بیرقی و همکاران (۲۰۱۶) نیز اعلام کردند که ترکیب نانو اکسید آلومینا (حدود 1%) و الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری را 15% تا 25% افزایش دهد [۲۵]. شهریاری و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی اثر نانوکلوئید اکسید گرافن و نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر مشخصات مکانیکی و نفوذ یون کلراید در بتن پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از نانو دی‌اکسید تیتانیوم به میزان 1% وزنی سیمان و نانو کلوئید اکسید گرافن به میزان 0.3% تا 0.1% وزنی سیمان می‌تواند شار عبوری یون کلراید را 35% تا 60% کاهش دهد [۲۷].

این تحقیق با هدف بررسی امکانپذیری بهبود دوام و کاهش نفوذپذیری بتن از طریق کاربرد همزمان نانوکلوئید اکسید گرافن^۶ مایع و نانو اکسید آلومینیوم^۸ انجام شده است. نوآوری این تحقیق در بهره‌گیری ترکیبی از این دو نانو ماده با کارکردهای مکمل، تعیین مقادیر بهینه مصرف بر مبنای نتایج آزمایشگاهی، ارزیابی عملکرد بتن بر اساس الزامات آیین‌نامه بتن ایران (آبا) و ارائه تحلیل

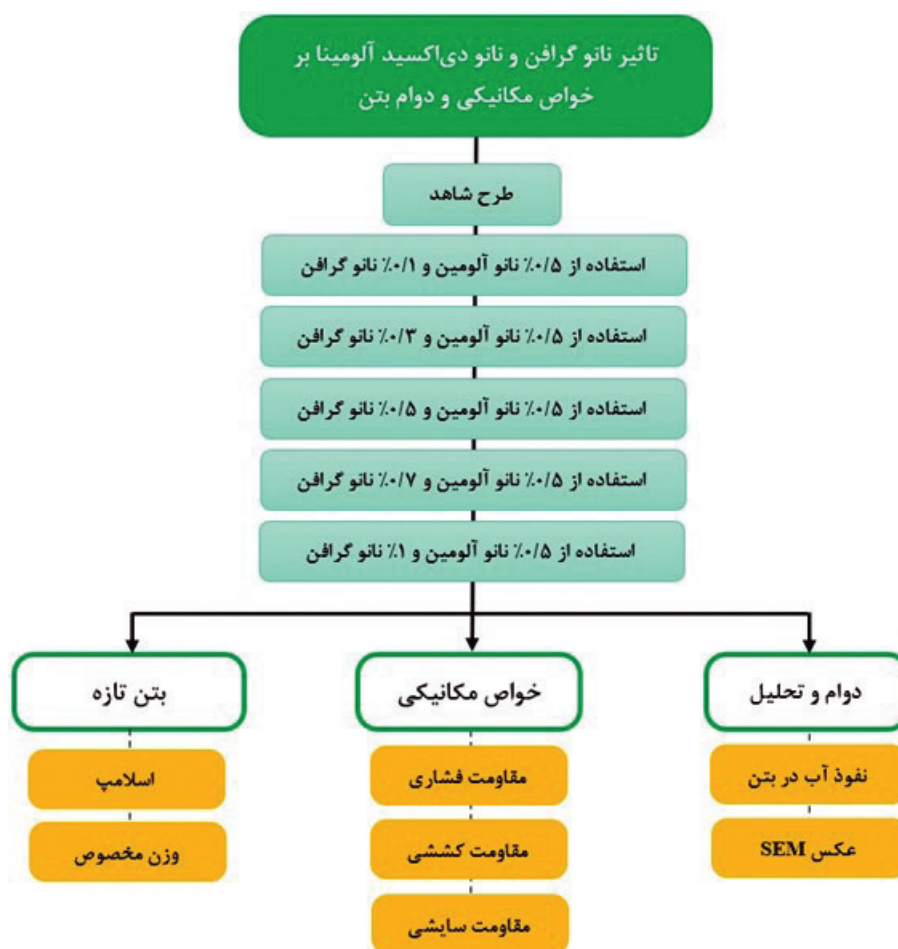
^۵ GN

^۶ C-Nano

^۷ GO-Nano

^۸ Al₂O₃-Nano

جامع ریزساختاری با استفاده از تصاویر SEM به منظور تبیین مکانیزم‌های فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر کاهش نفوذپذیری و ارتقای یکپارچگی ماتریس سیمان است. شکل شماره ۱ مراحل انجام این تحقیق را نشان می‌دهد.



شكل ١ مراحل انجام تحقيق

٢. مواد و مصالح

۲-۱. سنگدانه‌ها

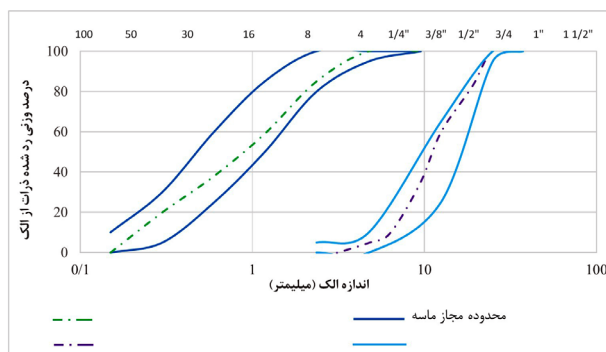
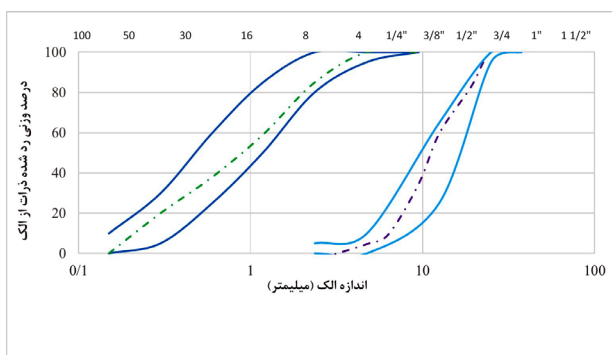
سنگدانه‌های مورد استفاده در این تحقیق از معادن واقع در منطقه نظرآباد تامین شده است. ماسه مصرفی با حداکثر اندازه ذرات ۴/۷۵ میلی‌متر بوده و وزن مخصوص ظاهری آن در حالت اشباع با سطح خشک (SSD) برابر ۲۵۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب اندازه‌گیری شده است. این ماسه قابلیت جذب آب تا ۲/۳٪ وزن خود را داشته و مدول نرمی آن ۲/۹ تعیین گردیده است. همچنین شن به کار رفته، ترکیبی از دانه‌های نخودی و بادامی با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر بود که وزن مخصوص ظاهری آن در حالت اشباع با سطح خشک (SSD)، معادل ۲۶۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب و میزان جذب آب آن ۱/۶٪ ثبت شده است. آزمون تعیین میزان جذب آب سنگدانه‌ها بر اساس روش استاندارد ASTM-C136 انجام گرفته است. جدول شماره ۱ مشخصات سنگدانه مصرفی در این تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مشخصات سنگدانه مصرفی

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	میزان جذب آب	وزن مخصوص (حالت SSD)	مدول نرمی
	(mm)	(%)	(kg/m ³)	
ماسه	۴/۷۵	۲/۳	۲۵۷۰	۲/۹
شن	۱۹	۱/۶	۲۶۱۰	-

۲-۲. دانه‌بندی سنگدانه‌ها

در این تحقیق آزمایش دانه‌بندی به منظور تعیین توزیع اندازه ذرات سنگدانه‌ها انجام شده است. بدین ترتیب نمونه مصالح سنگی پس از خشک شدن بر روی مجموع‌های از الک‌های استاندارد شماره‌گذاری شده قرار گرفته است. سپس با استفاده از دستگاه لرزاننده مکانیکی^۹ عملیات غربال کردن طبق الزامات استاندارد ASTM-C136 انجام شده است. برای مصالح درشت‌دانه (شن)، نمونه ابتدا به کمک دستگاه تقسیم کننده (مقسم) یکنواخت گردیده است. پس از غربال کردن، جرم ذرات باقیمانده روی هر الک اندازه‌گیری و درصد عبوری جمع‌بندی محاسبه شده است. این نتایج با محدوده‌های مجاز مندرج در استاندارد ASTM-C33 مقایسه گردیده است. در شکل شماره ۲، منحنی دانه‌بندی ماسه (خط چین سبز)، منحنی دانه‌بندی شن (خط چین بنفش) و محدوده‌های مجاز دانه‌بندی طبق ASTM-C33 (خط آبی) نمایش داده شده است.



شکل ۲ دانه بندی شن و ماسه مورد استفاده جهت ساخت بتن و انطباق آن با محدوده استاندارد

⁹ Sieve Shaker

۳-۲. سیمان

سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ ۲، تولید شرکت سیمان دماوند بوده است. چگالی این سیمان برابر با ۳/۱۰ گرم بر سانتیمتر مکعب است. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مورد استفاده، بر اساس داده‌های فنی شرکت سازنده [۲۷]، در جدول‌های شماره ۲ و ۳ ارائه شده است.

جدول ۲ مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی [۲۷]

نام عنصر	نماد شیمیایی	مقدار (%)
اکسید آلومینیوم	AL ₂ O ₃	۴/۲
اکسید آهن	Fe ₂ O ₃	۳/۲
اکسید منیزیم	Mgo	۲/۵
اکسید سیلیس	SiO ₂	۲۰/۳
اکسید کلسیم	CaO	۶۱/۵
اکسید سدیم	Na ₂ O	۰/۶۵
اکسید گوگرد	SO ₃	۲/۴
اُفت حرارتی	L.O.I	۱/۴۵
تری کلسیم آلومینات	C ₃ A	۳/۸

جدول ۳ مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی [۲۷]

سطح مخصوص بلین	زمان گیرش (دقیقه)	انقباض	مقاومت فشاری (MPa)	چگالی
(gr/cm ²)	(اولیه)	(نهایی)	(۳ روزه)	(۲۸ روزه)
۳۲۰۰	۱۵۰	۲۴۰	۱۸	۳۷
			۲۶	۳/۱۰ (gr/cm ³)

۴-۲. افزودنی کاهنده آب

استفاده از افزودنی‌های کاهنده آب یا روانکننده به منظور بهبود مشخصات مکانیکی و دستیابی به روانی مطلوب بتن رایج بوده و نقش مهمی در کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش مقاومت و دوام دارد [۲۸]. در این تحقیق برای ساخت بتن و تأمین روانی مدنظر از آبروان کننده پایه پلی کربوکسیلات استفاده شده است که با ایجاد ممانعت فضایی و پراکندگی یکنواخت ذرات سیمان عملکرد مؤثری در بهبود کارایی دارد. خصوصیات این افزودنی که بر اساس داده‌های فنی شرکت سازنده [۲۷]، در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

جدول ۴ مشخصات فیزیکی آبروان کننده مصرفی [۲۹]

رنگ	وزن مخصوص	استاندارد	یون کلر	pH	حالت فیزیکی	مقدار پیشنهادی
قهوه‌ای	gr/cm ³ ۱/۱۵	ASTM-C1017	کمتر از ۰/۱٪	۵/۷	مایع	کمتر از ۲٪ وزنی سیمان

۲-۵. نانو دیاکسید آلومینا

نانو دی اکسید آلومینا مصرفی در این تحقیق به صورت پودر با خلوص بیش از ۹۹٪، ساختار کروی کریستالی آلفا و اندازه ذرات حداکثر ۵۰ نانومتر استفاده شده است. این محصول تولید شرکت US Research Nanomaterials بوده و سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بر اساس داده‌های فنی شرکت سازنده [۳۰] در جدول‌های شماره ۵ و ۶ ارائه شده است.

برای جلوگیری از کلوخه شدن نانو اکسید آلومینا و تقویت پراکندگی آن در ماتریس سیمان، ابتدا مقدار ۵/۰٪ وزنی سیمان از نانو اکسید آلومینا با ۱٪ وزنی سیمان ابرروان کننده پایه پلی کربوکسیلاتی مخلوط شد. اختلاط اولیه نانوذره و روان کننده با استفاده از همزن به مدت ۳ دقیقه انجام گرفت تا یک محلول پایدار و یکنواخت ایجاد شود. محلول تهیه شده به مدت ۱۰ دقیقه در حالت سکون باقی ماند تا حباب‌های ایجاد شده در اثر اختلاط از بین بروند، سپس بلافاصله (کمتر از ۲ دقیقه قبل از افزودن باقی اجزای بتن) به مخلوط کن بتن اضافه شد. شکل شماره ۳ پودر نانو اکسید آلومینا و تهیه محلول نانو اکسید آلومینا با ابرروان کننده پیش از افزودن به بتن را نشان می‌دهد.

جدول ۵ خصوصیات شیمیایی نانو اکسید آلومینا [۳۰]

نام عنصر	نماد شیمیایی	مقدار (%)
اکسید آلومینیوم	AL ₂ O ₃	۹۹/۹۰
اکسید آهن	Fe ₂ O ₃	۰/۰۱
اکسید منیزیم	MgO	۰/۰۲
اکسید سیلیس	SiO ₂	۰/۰۲
اکسید کلسیم	CaO	۰/۰۱
اکسید سدیم	Na ₂ O	۰/۰۳
اکسید بوریک	B ₂ O ₃	۰/۰۱

جدول ۶ خصوصیات فیزیکی نانو اکسید آلومینا مورد استفاده [۳۰]

خلوص ماده (%)	حداکثر اندازه ذرات (nm)	مساحت سطح ویژه (m ² /gr)	ساختار	رنگ ظاهری	نماد شیمیایی
۹۹	۵۰	۱۹	آلفا	سفید	AL ₂ O ₃



شکل ۳ نمایی از پودر نانو اکسید آلومینا (تصویر چپ) و تهیه محلول نانو اکسید آلومینا با ابرروان کننده پیش از افزودن به بتن (تصویر راست)

۶-۲. نانو کلونید اکسید گرافن

نانوکلونید اکسید گرافن از اتم‌های کربن در شبکه شش ضلعی ساخته شده و استحکام کشش برزلی زیاد، هدایت حرارتی مناسب، انعطاف‌پذیری و سازگاری زیست محیطی دارد. این ماده به دلیل ماهیت کلونیدی نماد شیمیایی ثابت ندارد و از ذرات بسیار ریز گرافن اکسید شده در محیط مایع تشکیل شده است. از منظر زیست‌محیطی، فرآیندهای متداول تولید اکسید گرافن، دارای پسماندهای اسیدی نظیر یون‌های سولفات و نیترات هستند که در صورت عدم خنثی‌سازی می‌توانند آثار نامطلوب بر محیط‌زیست داشته باشند. اما تولیدکنندگان معتبر فرآیندهای خنثی‌سازی، فیلتراسیون و بازیافت پساب را در خط تولید اعمال کرده و پسماندی را به سطح قابل پذیرش استانداردهای زیست‌محیطی می‌رسانند. افزون بر این، به دلیل غلظت کم (حدود ۵٪) و ماهیت پایدار محلول کلونیدی، مصرف اکسید گرافن در بتن عملاً پسماند ثانویه ایجاد نمی‌کند و در ماتریس سیمانی محصور می‌شود. این ماده در کاربردهای صنعتی گوناگون از جمله تولید کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده، پوشش‌های ضد خوردگی، فیلترهای تصفیه آب، باتری‌های لیتیومی، حسگرهای الکتروشیمیایی، غشاهای جداسازی و ادوات رسانای انعطاف‌پذیر نیز استفاده می‌شود. مجموعه این ویژگی‌ها موجب شده است که اکسید گرافن به عنوان یک نانوماده پیشرفته با قابلیت سازگاری بالا با محیط و مقیاس‌پذیری صنعتی مطرح شود [۳۱].

در این تحقیق از نانوکلونید اکسید گرافن تک لایه با فاز مایع و غلظت ۵٪ استفاده شده است که محصول شرکت دانش بنیان نانو مقیاس برهان (ایران) می‌باشد. مشخصات شیمیایی و فیزیکی بر اساس داده‌های فنی شرکت سازنده [۳۱] در جدول‌های شماره ۷ و ۸ ارائه شده است [۳۲]. همچنین شکل شماره ۴ نانو کلونید اکسید گرافن مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۷ ساختار شیمیایی نانو کلونید اکسید گرافن مصرفی [۳۲]

نام عنصر	نماد شیمیایی	مقدار (%)
نیتروژن	N	۰/۶
هیدروژن	H	۰/۹
گوگرد	S	۰/۵
اکسیژن	O	۲۶
کربن	C	۷۲

جدول ۸ مشخصات فیزیکی نانو کلونید اکسید گرافن مصرفی [۳۲]

نماد	(Graphene G)
شکل ظاهری	مایع
رنگ	سیاه
خلوص	۵٪
تعداد لایه	۱
هدایت حرارتی	m/k ۳۰۰۰
نام شرکت ارائه دهنده محصول	نوآوران نانو مقیاس برهان / ایران



شکل ۴ نانو کلونید اکسید گرافن مورد استفاده

۳. روش آزمایش

برنامه آزمایشگاهی ساخت بتن در این تحقیق مجموعاً متشکل از ۵۴ آزمون در ۶ سری طرح مخلوط می‌باشد. آزمایش‌های انجام شده شامل تعیین وزن مخصوص، اسلامپ، مقاومت‌های فشاری در سنین مختلف، مقاومت کشش برزلی، سایشی و اندازه‌گیری میزان نفوذ آب در بتن می‌باشد. جدول شماره ۹ استاندارد روش انجام آزمایش، تعداد نمونه به تفکیک هر آزمایش، ابعاد و نوع نمونه بتن و شرح آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۹ شرح آزمایش، نوع و تعداد نمونه و شماره استاندارد آزمایش بکار رفته در این تحقیق

ردیف	شماره استاندارد	تعداد نمونه	ابعاد نمونه (mm)	نوع نمونه	شرح آزمایش
۱	ASTM-C143	-	-	بتن تازه	اسلامپ
۲	ASTM-C138	-	-	بتن تازه	وزن مخصوص
۳	BS-EN-12390-3	۳۶	۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰	مکعبی	مقاومت فشاری
۴	ASTM-C496	۶	۳۰۰×۱۵۰	استوان‌های	مقاومت کشش برزلی
۵	ASTM-C779	۶	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰	مکعبی	سایش
۶	BS-EN-12390-8	۶	۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰	مکعبی	نفوذ آب در بتن

در این آزمایش، برای ساخت طرح مخلوط‌های بتنی، تمامی سنگدانه‌ها به حالت اشباع با سطح خشک (SSD) بوده‌اند. بدین ترتیب ابتدا شن، ماسه و نیمی از آب مورد نیاز داخل مخلوطکن ریخته و به مدت ۶۰ ثانیه مخلوط شدند. پس از آن، سیمان به مخلوط اضافه شده است و اختلاط به مدت ۶۰ ثانیه دیگر ادامه یافته است. سپس، نانو دی‌اکسید آلومینا که قبلاً با آب‌روان کننده مخلوط گردیده بود، همراه با نانو کلونید اکسید گرافن و باقیمانده آب و آب‌روان کننده به آرامی به مخلوط بتن اضافه گردید و تمام عناصر به مدت ۳ دقیقه دیگر با یکدیگر مخلوط شده است. در انتها، آزمایش‌های وزن مخصوص و اسلامپ بر روی بتن تازه انجام گرفته است.

جهت جلوگیری از چسبیدن بتن به دیواره‌های قالب، پیش از ریختن بتن، ابتدا سطح داخلی قالب با یک لایه نازک روغن معدنی بر پایه آب پوشانده گردید و سپس بتن در قالب ریخته شده است. نمونه‌های بتن پس از قالب‌گیری، به مدت ۲۴ ساعت در دمای 23 ± 1 درجه سانتی‌گراد نگهداری شده است. پس از طی این مدت و گیرش نسبی، نمونه‌ها از قالب خارج شده و به حوضچه آب منتقل گردیده است تا به مدت ۷، ۲۸ روز عمل‌آوری شوند.

۴. طرح مخلوط

طرح مخلوط بتن شاهد در این تحقیق، بر پایه تجربیات آزمایشگاهی و بر اساس نوع مصالح مصرفی نظیر سیمان و سنگدانه‌ها طراحی شده است. در طرح شاهد، مقدار سیمان در نمونه شاهد ۴۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب بتن استفاده شده است. همچنین نسبت آب به سیمان ۰/۴ در نظر گرفته شده است. مصرف آبروان کننده برای بتن بر اساس توصیه شرکت تولید کننده و همچنین نتایج آزمایش‌های سعی و خطا، معادل ۱٪ وزنی سیمان انتخاب شده است [۱۶-۱۸]. در ادامه، جهت افزایش نفوذپذیری و بهبود استحکام سایشی بتن، از نانو کلئید اکسید گرافن و نانو دی‌اکسید آلومینا بهره گرفته شده است.

برای تعیین بهترین میزان مصرف نانو دی‌اکسید آلومینا جهت افزایش مقاومت سایشی، درصدهای ۰٪، ۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪ وزنی سیمان به بتن افزوده و نمونه‌ها پس از ۷ روز عمل‌آوری، تحت آزمایش مقاومت سایشی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که مصرف بیش از ۰/۵٪ وزنی سیمان اثر قابل توجهی بر افزایش مقاومت سایشی ندارد. بنابراین در تمامی طرح‌های اختلاط میزان نانو دی‌اکسید آلومینا برابر با ۰/۵٪ وزنی سیمان به صورت ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین برای کاهش نفوذپذیری بتن، نانو کلئید اکسید گرافن به صورت محلول مایع (با غلظت ۵٪)، در ترکیب با آب و آبروان کننده به مخلوط بتن تازه اضافه شده است. میزان مصرف این افزودنی بر پایه مطالعات پیشین و توصیه شرکت تولید کننده، برابر با ۱/۱٪، ۰/۳٪، ۰/۵٪، ۰/۷٪ و ۱٪ وزنی آب طرح اختلاط انتخاب گردیده است [۳۱، ۳۲]. جزئیات مقدار مصالح مصرفی در طرح‌های مختلف اختلاط، در مقیاس یک متر مکعب، در جدول شماره ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰ طرح اختلاط و مقادیر وزنی مصالح برای ساخت هر متر مکعب بتن (kg/m^3)

ردیف	نام	سیمان (kg/m^3)	شن (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	آبروان کننده (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	نانو دی‌اکسید آلومینا (kg/m^3)	نانو کلئید اکسید گرافن (kg/m^3)	وزن مخصوص (kg/m^3)
۱	CONTROL	۴۰۰	۶۵۰	۱۱۵۰	۴	۱۶۰	۲	۰	۲۳۶۴
۲	CON-1	۴۰۰	۶۵۰	۱۱۵۰	۴	۱۶۰	۲	۰/۱۶	۲۳۶۰
۳	CON-2	۴۰۰	۶۵۰	۱۱۵۰	۴	۱۶۰	۲	۰/۴۸	۲۳۷۲
۴	CON-3	۴۰۰	۶۵۰	۱۱۵۰	۴	۱۶۰	۲	۰/۸	۲۳۶۸
۵	CON-4	۴۰۰	۶۵۰	۱۱۵۰	۴	۱۶۰	۲	۱/۱۲	۲۳۷۴
۶	CON-5	۴۰۰	۶۵۰	۱۱۵۰	۴	۱۶۰	۲	۱/۶	۲۳۶۹

۵. نتایج آزمایش‌ها

۵-۱. اسلامپ

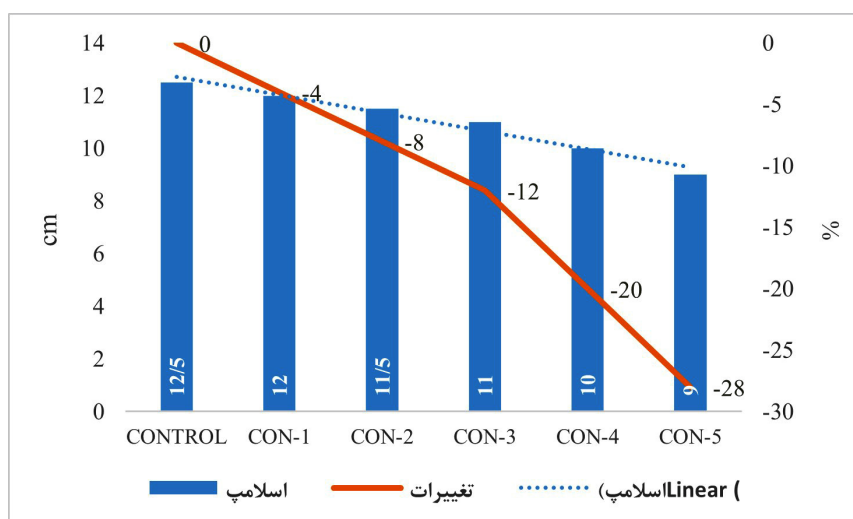
جدول شماره ۱۱ و شکل شماره ۶ میزان اسلامپ طرح‌ها را نشان می‌دهد و با یکدیگر مقایسه می‌کند. بر اساس نتایج بدست آمده، روند کاهش اسلامپ کاملاً تدریجی و وابسته به مقدار نانوکلوئید اکسید گرافن است. اسلامپ طرح شاهد ۱۲/۵ سانتیمتر بوده و افزودن ۰/۱٪ از این افزودنی تن‌ها ۴٪ کاهش اسلامپ ایجاد کرده است که نشان می‌دهد در مقادیر بسیار کم گرافن، میزان آب جذب شده محدود باقی می‌ماند. با افزایش مقدار افزودنی به ۰/۳٪ و ۰/۵٪، میزان کاهش اسلامپ به ترتیب به ۸٪ و ۱۲٪ رسیده است. این روند افزایشی نشان دهنده افزایش اصطکاک داخلی بین ذرات است. در مقادیر بالاتر (۰/۷٪ و ۱٪)، کاهش اسلامپ به ۲۰٪ و ۲۸٪ رسیده که بیانگر کاهش اسلامپ بصورت غیرخطی است. این رفتار غیرخطی ناشی از جذب گسترده آب آزاد توسط صفحات گرافن، تشکیل لایه‌های پیوندی سطحی با ذرات سیمان و ایجاد تجمعات ورق‌های و کلوخ‌های است که هم‌زمان موجب افزایش گراندرویی، کاهش روانی و تشدید سخت‌شدن اولیه مخلوط می‌شود. حضور هم‌زمان نانوکلوئید اکسید گرافن و نانو دی‌اکسید آلومینا، اگرچه در مقادیر پایین موجب بهبود نسبی ساختار خمیر و کاهش بخشی از افت روانی می‌شود، اما در مقادیر بالای گرافن نقش آن در اصلاح رفتار رئولوژیک محدود شده و سازوکار جذب آب و تشکیل ساختارهای شبه‌ژلاتینی ناشی از گرافن غالب می‌شود. نتیجه این فرآیندها کاهش تدریجی تراکم‌پذیری، افزایش تخلخل موضعی و سخت‌تر شدن فرآیند تراکم بتن تازه است. با وجود این، مقدار اسلامپ‌نمایی طرح‌های CON-4 و CON-5، به ترتیب ۹ و ۱۰ سانتیمتر، همچنان در محدوده قابل قبول برای بتن سازه‌ای قرار گرفته و نشان داده است که افت روانی در حد بحرانی نبوده و با تنظیم دوز ابرروان‌کننده یا اصلاح دانه‌بندی سنگدانه قابل جبران است. رفتار ثبت شده در این تحقیق کاملاً با گزارش‌های ادبیات موضوع هم‌خوانی دارد [۲۶-۱۲] و تایید می‌کند که گرافن در فاز مایع علاوه بر محدود کردن آب آزاد، هیدراتاسیون اولیه را تسریع کرده و سفت‌شدن زود هنگام مخلوط را افزایش می‌دهد. بر این اساس، محدوده مناسب مصرف گرافن برای حفظ روانی مطلوب کمتر از ۰/۷٪ ارزیابی می‌شود. شکل شماره ۵ تصویری از آزمایش اسلامپ را نشان می‌دهد.



شکل ۵ تصویری از آزمایش اسلامپ

جدول ۱۱ نتایج آزمایش اسلامپ

تغییرات	اسلامپ	طرح
(%)	(cm)	
-	۱۲/۵	CONTROL
-۴	۱۲	CON-1
-۸	۱۱/۵	CON-2
-۱۲	۱۱	CON-3
-۲۰	۱۰	CON-4
-۲۸	۹	CON-5



شکل ۶ مقایسه اسلامپ طرح‌ها

۵-۲. مقاومت فشاری و انحراف از معیار داده‌ها

میزان انحراف معیار یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به‌طور میانگین داده‌ها چه میزان از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموع‌های از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند. در حالیکه انحراف معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها می‌باشد. به طور کلی واریانس و انحراف معیار، معیارهای پراکندگی هستند که درجه تغییرپذیری، گسترش یا پراکندگی یک متغیر را تعیین می‌کنند [۲۷]. مطابق نظر منابع، ضریب تغییرات مساوی یا کمتر از ۱۰٪ نشان‌دهنده کنترل کیفیت مناسب بتن است [۱۱]. در این تحقیق میزان انحراف از معیار داده‌ها از طریق رابطه ذیل الذکر محاسبه شده است.

در ابتدا از رابطه شماره ۱ میزان میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش تعیین می‌شود [۲۷]:

$$A = \frac{\sum \chi^i}{N} \quad (۱)$$

Σxi = مجموع مقاومت فشاری نمونه‌ها

N = تعداد نمونه‌ها

$$m = (\chi i - A)^2 \quad (2)$$

در گام دوم از رابطه شماره ۲ مربع اختلاف میزان هر داده محاسبه می‌شود [۲۷]:

در گام سوم از رابطه شماره ۳ انحراف معیار نمونه محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$S = \sqrt{\frac{\Sigma(\chi i - m)^2}{N - 1}} \quad (3)$$

در نهایت از رابطه شماره ۴ میزان ضریب تغییر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$V = \frac{S}{A} \times 100 \quad (4)$$

آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه انجام شد و میانگین سه آزمون برای هر طرح مخلوط به‌عنوان مقاومت نهایی در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج جدول شماره ۱۲، افزایش مقدار نانوکلوئید اکسید گرافن مایع موجب کاهش مقاومت فشاری بتن شده است. در نمونه شاهد، مقدار قابل توجهی از سیلیکات کلسیم هیدراته تشکیل شده است که نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش مقاومت فشاری دارد [۳۵]، اما با افزایش میزان گرافن، تشکیل C-S-H کاهش یافته و همین امر به‌صورت مستقیم کاهش مقاومت فشاری را به دنبال داشته است [۱۹، ۲۰]. در مقابل، ذرات ریز نانوالومینا سبب افزایش تراکم و بهبود نسبی مقاومت فشاری در مقادیر پایین گرافن شده‌اند [۳۷]. نتایج همچنین نشان داد که افزودن نانوکلوئید اکسید گرافن مایع برخلاف فرضیه اولیه، باعث کاهش پیوستگی، ناهمگنی ماتریس و تضعیف چسبندگی بین اجزای بتن شده است [۲۶]. احتمال می‌رود این ترکیب با کاهش محتوای هیدروکسید کلسیم و ایجاد اختلال در واکنش‌های سیمانی، بخشی از ساختار مکانیکی بتن را تضعیف کرده باشد. این یافته‌ها با گزارش‌های مطالعات پیشین سازگار است. به‌طوری‌که پژوهش‌های وُنْگ‌کیو و همکاران (۲۰۲۲) و ژو و همکاران (۲۰۲۱) نشان می‌دهد که استفاده از پودر نانو اکسید گرافن (حالت جامد) تن‌ها در مقادیر بسیار کم (کمتر از ۰/۳٪ وزنی سیمان) موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود [۳-۶]. تصاویر شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز شکست زودرس در ناحیه پیوند نمونه‌های حاوی ۱٪ گرافن را نشان می‌دهد که تاییدکننده ایجاد ضعف در ناحیه پیوند در مقادیر بالای این افزودنی است. کمترین مقاومت مربوط به طرح CON-5 در ۲۸ روز و بیشترین مقدار مربوط به CON-1 در ۷ روز مشاهده شد.

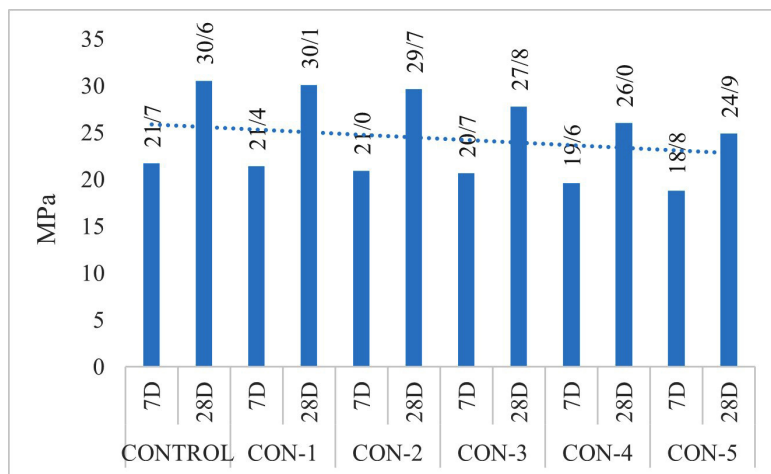
بررسی روند مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد که افزودن تدریجی نانوکلوئید اکسید گرافن مایع باعث بروز یک رفتار کاملاً غیرخطی و کاهشی شده است. کاهش مقاومت از طرح CON-1 آغاز می‌شود، اما شدت افت از محدوده طرح‌های CON-3 و CON-4 به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. در سن ۷ روزه، مقاومت از ۲۱/۷ مگاپاسکال در نمونه شاهد به ۱۸/۸ مگاپاسکال در CON-5 رسیده است (کاهش ۱۴/۷٪) و در سن ۲۸ روزه از ۳۰/۶ به ۲۴/۸ مگاپاسکال کاهش یافته است (کاهش ۱۹/۸٪) و این اختلاف نشان می‌دهد که اثر منفی گرافن در طول زمان تشدید می‌شود و نقش محدودکننده آن بر پیشرفت هیدراتاسیون در سنین بالا بارزتر است. در طرح‌های CON-1 و CON-2، کاهش مقاومت محدود باقی مانده است. زیرا در این مقادیر، سطح گرافن هنوز به حد اشباع نرسیده و کلوخه‌های پایدار تشکیل نمی‌شوند و حضور نانوالومینا امکان ترمیم نسبی ساختار را فراهم می‌کند. از طرح CON-3 به بعد، جذب شدید آب توسط گرافن، افزایش گرانیوی، کاهش اسلامپ و افت تراکم بتن تازه، موجب افزایش تخلخل متصل و کاهش تشکیل فازهای C-S-H پیرامون سنگدانه‌ها شده است. ماهیت لای‌های صفحات گرافنی نیز سبب تجمع ورق‌های

و ایجاد نواحی با چسبندگی پایین شده و بستر شکست زودرس را فراهم می‌کند. تفاوت بین رفتار ۷ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد که کاهش کلسیم هیدروکسید و اترینگایت [۲۶]، روند هیدراتاسیون دیررس را مختل کرده و ظرفیت افزایش مقاومت در سنین بالا محدود شده است. مطالعه انحراف معیار و ضریب تغییرات این الگو را تأیید می‌کند. طرح CON-5 به‌ویژه در ۲۸ روز، بیشترین مقادیر S و V را نشان داده است که بیانگر پراکندگی زیاد، ناهمگنی شدید و احتمال وجود حفرات ریز و کلوخه‌شدگی در مخلوط‌های حاوی گرافن بالا است. همچنین الگوی شکست نمونه‌ها در شکل ۹ و ۱۰ نیز این موضوع را تأیید می‌کند. نمونه شاهد عمدتاً از سنگدانه شکست خورده (شکست مطلوب)، در حالی که نمونه‌های حاوی گرافن اغلب از ناحیه پیوند دچار شکست برشی شده‌اند.

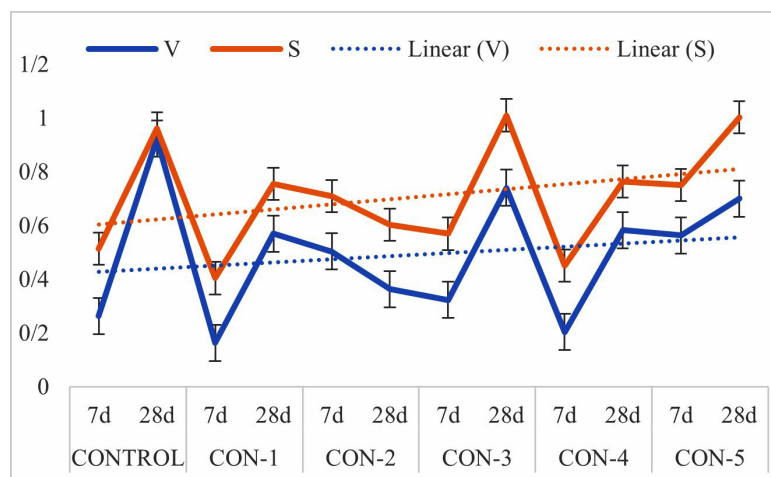
در جمع‌بندی، کاهش مقاومت فشاری ناشی از برهم‌خوردگی هم‌زمان سه فرآیند اصلی است. نخست، جذب آب توسط گرافن موجب کاهش رطوبت مؤثر هیدراتاسیون و تضعیف رشد فازهای سیمانی می‌شود. دوم، حضور هم‌زمان گرافن و نانوالومینا در مقادیر بالا باعث ایجاد ریزساختار ناهمگن و تشکیل کلوخه‌های پایدار می‌شود. سوم، تشکیل فازهای C-S-H مختل شده و ناحیه پیوند در اطراف سنگدانه‌ها به‌صورت ضعیف‌تری توسعه می‌یابد. بنابراین، اگرچه در مقادیر پایین گرافن نقش مثبت نانوالومینا در افزایش تراکم مشاهده می‌شود، اما در درصدهای بالاتر (CON-3 تا CON-5) اثرات مخرب گرافن غالب شده و کاهش محسوسی در مقاومت فشاری بتن ایجاد می‌کند.

جدول ۱۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری و مقایسه میزان درصد ضریب تغییرات و انحراف از معیار در مقاومت فشاری بین نمونه‌ها

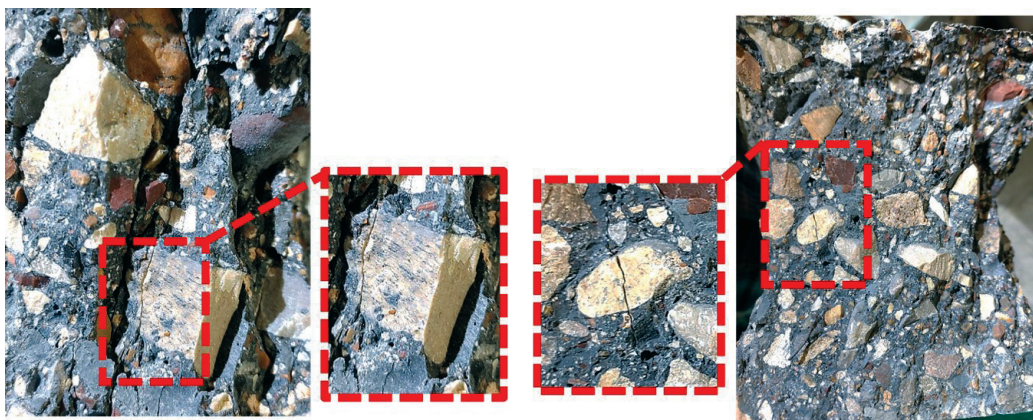
نام طرح	سن نمونه	میانگین مقاومت فشاری (MPa)	تغییرات (%)	درصد ضریب تغییرات (V)	انحراف از معیار (S)
CONTROL	۷ روزه	۲۱/۷	-	۰/۲۶۳	۰/۵۱۳
	۲۸ روزه	۳۰/۶	-	۰/۹۲۳	۰/۹۶۱
CON-1	۷ روزه	۲۱/۶	-۱/۵	۰/۱۶۳	۰/۴۰۴
	۲۸ روزه	۳۰/۱	-۱/۶	۰/۵۷	۰/۷۵۵
CON-2	۷ روزه	۲۱/۰	-۳/۹	۰/۵۰۳	۰/۷۰۹
	۲۸ روزه	۲۹/۵	-۳/۲	۰/۳۶۳	۰/۶۰۳
CON-3	۷ روزه	۲۰/۷	-۵/۴	۰/۳۲۳	۰/۵۶۹
	۲۸ روزه	۲۷/۸	-۹/۷	۰/۸۴	۰/۹۱۷
CON-4	۷ روزه	۱۹/۶	-۱۰/۶	۰/۲۰۳	۰/۴۵۱
	۲۸ روزه	۲۶/۰	-۱۵/۹	۰/۵۸۳	۰/۷۶۴
CON-5	۷ روزه	۱۸/۸	-۱۴/۷	۰/۵۶۳	۰/۷۵۱
	۲۸ روزه	۲۴/۸	-۱۹/۸	۱/۰۰۳	۱/۰۰۲



شکل ۷ نتایج آزمایش مقاومت فشاری

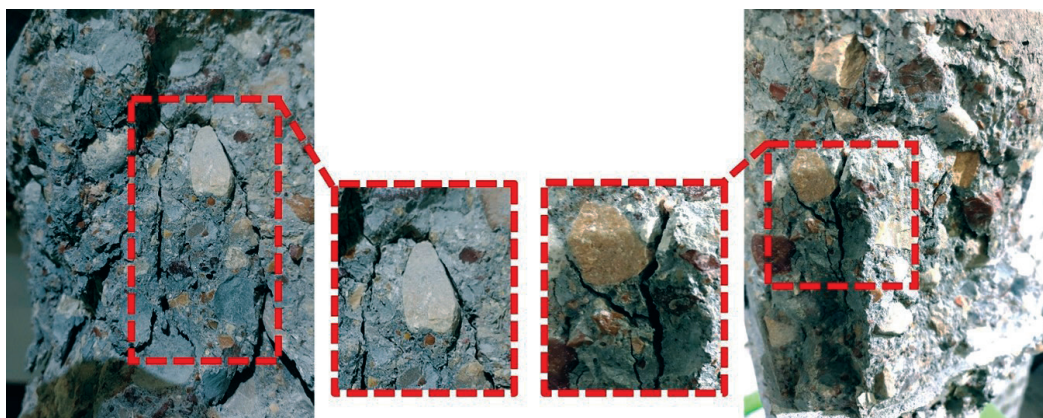


شکل ۸ مقایسه میزان درصد ضریب تغییرات و انحراف از معیار در مقاومت فشاری نمونه‌ها



شکل ۹ شکست نمونه کنترل تحت آزمایش مقاومت فشاری

نحوه شکست این طرح از ناحیه سنگدانه می‌باشد که شکست خوب تلقی می‌شود



شکل ۱۰ شکست نمونه حاوی نانو کلئوئید اکسید گرافن مایع تحت آزمایش مقاومت فشاری

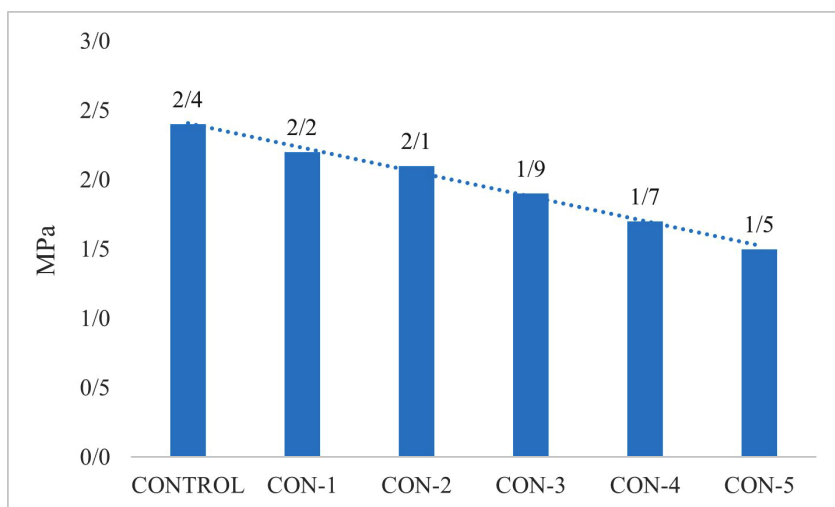
نحوه شکست این طرح از ناحیه پیوند می باشد که شکست زودرس تلقی می شود

۳-۵. مقاومت کشش برزیلی

جدول شماره ۱۳ و شکل شماره ۱۱ نتایج بدست آمده از این آزمایش را نشان می دهد. نتایج آزمایش مقاومت کشش برزیلی نشان داده است که عدم چسبندگی مناسب بین خمیر سیمان و سنگدانه در اثر ضعف ایجاد شده توسط نانو کلئوئید اکسید گرافن موجب کاهش مقاومت کشش برزیلی بتن می شود. بطوریکه میزان مقاومت کشش برزیلی طرح CON-1,2,3,4,5 نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۸/۳٪، ۱۲/۵٪، ۲۰/۸٪، ۲۹/۲٪، ۳۷/۵٪ کاهش یافته است. کاهش مقاومت کشش برزیلی بتن ناشی از تضعیف پیوستگی در ناحیه پیوند است که به دلیل کاهش تشکیل فاز سیلیکات کلسیم و اختلال در فرآیند هیدراتاسیون تحت اثر نانو کلئوئید اکسید گرافن ایجاد شده است. جذب زیاد آب توسط ذرات گرافن رطوبت مؤثر هیدراتاسیون را کاهش داده است و موجب تشکیل کلوخه ذرات و ناهمگنی در ماتریس سیمانی شده است که تداوم پیوند خمیر سیمان با سنگدانه ها را مختل ساخته است. همچنین روند کاهش مقاومت کشش برزیلی کاملاً با روند کاهش مقاومت فشاری مشاهده شده در طرح ها همسو است. زیرا همان ضعف ایجاد شده در ناحیه پیوند، کاهش تشکیل فازهای C-S-H و ناهمگنی ماتریس سیمانی که موجب افت مقاومت کششی می شود، دقیقاً همان ارتباطی است که ظرفیت باربری فشاری نمونه ها را نیز کاهش داده است و بنابراین هر دو رفتار از یک وجه ساختاری مشترک تبعیت می کنند. شکل شماره ۱۲ تصویری از آزمایش مقاومت کشش برزیلی را نشان می دهد.

جدول ۱۳ نتایج آزمایش مقاومت کشش برزیلی

نام طرح	مقاومت کشش برزیلی (MPa)	میزان تغییر (%)
CONTROL	۲/۴	-
CON-1	۲/۲	-۸/۳
CON-2	۲/۱	-۱۲/۵
CON-3	۱/۹	-۲۰/۸
CON-4	۱/۷	-۲۹/۲
CON-5	۱/۵	-۳۷/۵



شکل ۱۱ نتایج آزمایش مقاومت کشش برزیلی



شکل ۱۲ تصویری از آزمایش مقاومت کشش برزیلی

۴-۵. مقاومت سایشی

جدول شماره ۱۴ نتایج آزمایش سایشی و شکل شماره ۱۴ نحوه آزمایش سایش بر روی نمونه‌های بتنی را نشان می‌دهد. مقدار جرم ساییده شده نمونه شاهد برابر با ۱/۵ گرم بوده است که سطح مناسبی از مقاومت سایشی را نشان می‌دهد. افزودن ۱٪ نانوکلوئید اکسید گرافن (طرح CON-1) باعث افزایش وزن ساییده شده به ۱/۹ گرم شده است که نشان‌دهنده کاهش ۲۲/۴٪ مقاومت سایشی است. این مقدار افت، با توجه به مقدار کم افزودنی، بیانگر آن است که حتی در مقادیر پایین نیز گرافن بر شکل‌گیری پیوستگی چسبنده خمیر سیمان اثرگذار است. با افزایش مقدار افزودنی به ۳٪ (طرح CON-2)، میزان وزن ساییده شده نیز افزایش تصاعدی یافته و به ۲/۲ گرم رسیده است که کاهش ۳۲/۸٪ نسبت به نمونه شاهد را نشان می‌دهد. این روند افزایشی نشان می‌دهد که در این محدوده، اثرات مخرب نانوکلوئید گرافن بر هیدراتاسیون و ریزساختار بتن غالب می‌شود. در مقادیر ۵٪ (طرح CON-3)، جرم ساییده شده به ۲/۹ گرم افزایش یافته و کاهش مقاومت سایشی به ۴۸/۳٪ رسیده است. این تغییر نشان‌دهنده رفتار تسریع شده تخریب سطحی است. به‌گون‌های که ظرفیت باربری لایه سطحی در برابر سایش به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. با افزایش

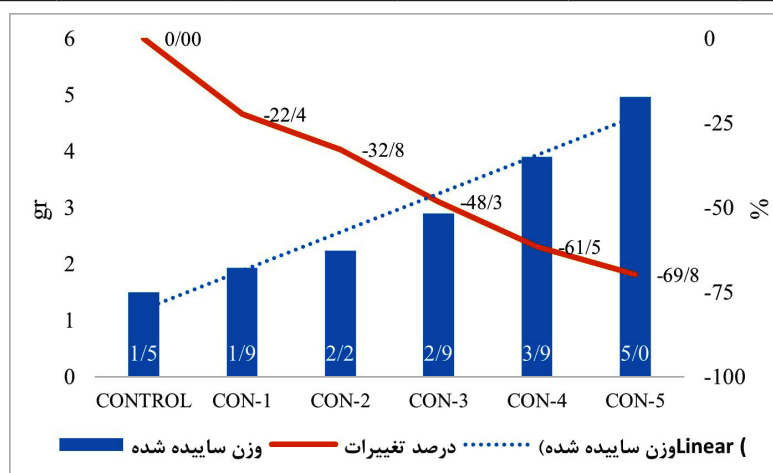
مقدار نانوکلوئید گرافن به میزان ۰/۷٪ و ۱٪ (طرح CON-4 و CON-5) میزان سایش به ترتیب ۳/۹ و ۵/۰ گرم رسیده است که معادل کاهش ۶۱/۵٪ و ۶۹/۸٪ نسبت به نمونه شاهد است. این مقادیر حاکی از آن است که ساختار خمیر سیمان در اثر مصرف زیاد نانوکلوئید گرافن دچار ناهمگنی شده و پیوندهای خمیر سیمان به سنگدانه به شدت تضعیف می‌شوند. در این سطح از مصرف، نانوکلوئید گرافن یک شبکه متراکم نامنظم ایجاد می‌کند که مانع رشد کامل فازهای CSH و Ca(OH)_2 شده و باعث افزایش تخلخل‌های موضعی می‌شود [۲۶]. این موضوع مقاومت سایش سطحی را به شدت کم می‌کند.

از نظر میکروساختاری، داده‌ها نشان می‌دهند که نانو دی‌اکسید آلومینا نقش مثبت در بهبود مقاومت سایشی نمونه کنترل داشته و مقدار جرم ساییده شده آن را در سطح قابل قبول نگه داشته است. اگر نانو آلومینا حضور نداشت، افزایش وزن ساییده شده می‌توانست بیش از این باشد. افزایش مقدار نانوکلوئید اکسید گرافن باعث شکل‌گیری ریزساختاری با پیوندهای ضعیف، افزایش نسبت تخلخل متصل و کاهش مقاومت لایه سطحی بتن می‌شود [۱۲]. این تغییرات، تحت بارگذاری سایشی، منجر به کنده شدن آسان ذرات و افزایش جرم ساییده شده می‌گردد. بنابراین، محدوده مناسب مصرف برای جلوگیری از افت شدید مقاومت سایشی کمتر از ۰/۳٪ پیشنهاد می‌شود و مقادیر بالاتر از ۰/۵٪ به‌طور واضح با تخریب قابل ملاحظه سطحی همراه هستند.

شکل شماره ۱۴ الگوی نحوه قرارگیری بتن در دستگاه سایش و تصاویری مربوط به آزمایش مقاومت سایشی بتن شامل نوع دستگاه، پودر کوراندوم جهت سایش و محل سایش برخی از نمونه‌ها را پس از انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۱۴ نتایج آزمایش سایش بتن

نام طرح	تست اول	تست دوم	تست سوم	میانگین	تغییرات
	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(%)
CONTROL	۱/۴	۱/۷	۱/۴	۱/۵	-
CON-1	۲/۱	۱/۹	۱/۸	۱/۹	-۲۲/۴
CON-2	۲/۲	۲/۳	۲/۲	۲/۲	-۳۲/۸
CON-3	۲/۸	۳	۲/۹	۲/۹	-۴۸/۳
CON-4	۴/۱	۴	۳/۶	۳/۹	-۶۱/۵
CON-5	۴/۷	۴/۹	۵/۳	۵/۰	-۶۹/۸



شکل ۱۳ نتایج آزمایش سایش بتن



شکل ۱۴ تصویری از آزمایش مقاومت سایشی بتن

۵-۵. نفوذ آب در بتن

دوام بتن در محیط‌های مختلف به میزان نفوذپذیری آن نسبت به آب و سایر مواد وابسته است. به همین علت، کنترل نفوذپذیری آب در بتن به ویژه در شرایط سخت اقلیمی اهمیت ویژه‌ای دارد. هرچه نفوذ آب بیشتر باشد، احتمال تخریب بتن نیز افزایش می‌یابد [۳۷]. نفوذپذیری بتن معمولاً با آزمایش‌های مختلف سنجیده می‌شود که نتایج آن‌ها عمدتاً نسبی است. در این تحقیق، برای آزمایش نفوذ آب از استاندارد BS-EN-12390-8 استفاده شد. همچنین آب^{۱۰} به منظور سنجش کیفیت بتن در آزمایش جذب آب، مقادیر مجاز مشخصه از آزمایش‌های نفوذ و دوام بتن برای تامین پایایی بتن را مطابق جدول شماره ۱۵ ارائه کرده است [۳۷].

جدول ۱۵ مقادیر مجاز مشخصه از آزمایش‌های نفوذ و دوام بتن برای تامین پایایی بتن مطابق آبا [۳۷]

محدوده‌ی مجاز مقادیر مشخصه (دوام)			
(4)	(3)	(2)	(1)
شرایط XCS4	شرایط XCS3 و XCD4	شرایط XCS2 و XCD3 و XCD2	شرایط XCD1 و XCS1
۲۰	۳۰	۴۵	۶۰
حداکثر عمق نفوذ آب تحت فشار (در سن ۲۸ روز)، واحد میلیمتر، طبق استاندارد ملی ۵-۳۲۰۱			

^{۱۰} استاندارد بتن ایران

^{۱۱} شرایط محیطی XCD1 دارای رطوبت متوسط

شرایط محیطی XCS1: بتن در معرض نمک‌های کم موجود در هوا و دور از دریا

شرایط محیطی XCS2: بتن غرقاب یا درون خاک خیس یا خاک مرطوب

شرایط محیطی XCD2: مرطوب به ندرت خشک

شرایط محیطی XCD3: بتن در تماس مستقیم با خاک دارای یون کلراید

شرایط محیطی XCS3: بتن در معرض نمک زیاد موجود در هوا و بدون تماس مستقیم با آب دریا یا پاشش

شرایط محیطی XCD4: بتن در معرض چرخه‌های تر و خشک شدن

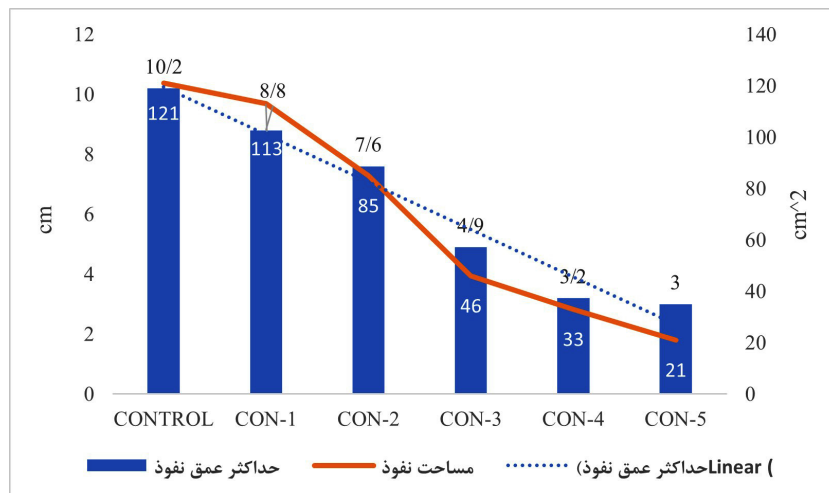
شرایط محیطی XCS4: نواحی در معرض پاشش جزر و مد دریا

جدول شماره ۱۶ و شکل‌های شماره ۱۵ و ۱۶ نتایج آزمایش نفوذ، عمق و مساحت نفوذ آب در بتن را نشان می‌دهد. همچنین شکل شماره ۱۷ تصویری از آزمایش نفوذ آب در بتن را نشان می‌دهد. نتایج این آزمایش نشان داده است که نمونه شاهد با عمق نفوذ ۱۰/۲ سانتیمتر و طرح CON-1 با ۸/۸ سانتیمتر بیشتر از حد مجاز طبقه ۱ بوده است و از نظر دوام مطابق این استاندارد در هیچ یک از طبقات قابل قبول قرار نمی‌گیرند. طرح CON-2 با ۷/۶ سانتیمتر بیشتر از سقف مجاز ۶/۰ سانتیمتری قرار گرفته است و تن‌ها در شرایط غیرمشمول الزامات سختگیرانه‌تر یا با تمهیدات حفاظتی ویژه قابل استفاده است. طرح CON-3 با ۴/۹ سانتیمتر به محدوده مجاز طبقه ۲ نزدیک است و با اندکی تغییر در ترکیب می‌تواند با این طبقه انطباق پیدا کند. طرح CON-4 با ۳/۲ سانتیمتر و CON-5 با ۳/۰ سانتیمتر، کمتر از سقف ۴/۵ سانتیمتری طبقه ۲ هستند و CON-5 دقیقاً در آستانه سقف ۳/۰ سانتیمتری طبقه ۳ قرار دارد که دوام بیشتر و امکان استفاده در شرایط XCS3 و XCD4 را نشان داده است. تن‌ها طرح‌های CON-4 و CON-5 به‌طور قطعی در محدوده الزامات استاندارد قرار گرفت‌ه‌اند و CON-5 بهترین عملکرد را از نظر دوام و محدودیت نفوذ آب طبق استاندارد ملی ارائه داده است.

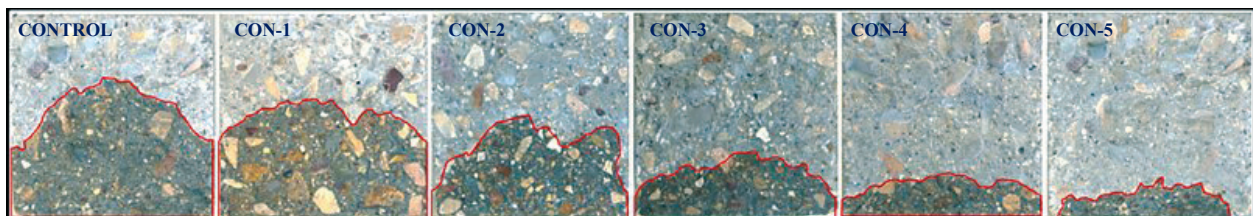
بر اساس نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار و طبقه‌بندی دوام بتن در آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، مشاهده می‌شود که استفاده از نانو کلئوید اکسید گرافن در بتن موجب کاهش چشمگیر نرخ نفوذ آب در بتن شده است. بطوریکه با افزایش میزان نانو کلئوید اکسید گرافن در بتن نیز میزان عمق نفوذ و مساحت نفوذ آب در بتن کمتر شده است. این تغییرات به تراکم میکروساختاری بتن ناشی از حضور گرافن مربوط است که منجر به کاهش کانال‌های نفوذ آب در بتن شده است. استفاده از نانو کلئوید اکسید گرافن موجب بهبود قابل ملاحظه‌ای در کیفیت بتن از منظر مقاومت محیطی شده است و دوام بیشتری را در برابر تماس با آب و رطوبت ایجاد کرده است. کاهش مساحت نفوذ آب، نشان دهنده یکنواخت شدن ساختار بتن و بسته شدن خلل و فرج داخلی آن است که در شرایط سخت محیطی مانند پروژه‌های آبی و ساحلی عملکرد بهتری فراهم کرده است. نتایج این آزمایش نشان داده است که حداکثر عمق نفوذ آب در نمونه شاهد برابر با ۱۰/۲ سانتیمتر و میانگین عمق نفوذ برابر با ۸ سانتیمتر بوده است که این مقادیر به ترتیب در نمونه CON-5 به ۳ و ۲/۵ سانتیمتر کاهش یافته است. همچنین مساحت نفوذ آب در نمونه کنترل برابر با ۱۲۱ سانتیمترمربع بوده که برای نمونه CON-5 به ۲۱ سانتیمترمربع رسیده است. این کاهش معادل ۸۲٪ کاهش نسبی مساحت نفوذ را نشان داده است که بیشترین اثر را در میان نمونه‌ها به خود اختصاص داده است.

جدول ۱۶ میزان عمق نفوذ و مساحت نفوذ آب در بتن

نام طرح	حداکثر عمق نفوذ	میانگین عمق نفوذ	مساحت نفوذ	تغییرات نسبی (بر حسب مساحت)
	(cm)	(cm)	(cm ²)	(%)
CONTROL	۱۰/۲	۸	۱۲۱	-
CON-1	۸/۸	۷/۴	۱۱۳	-۶
CON-2	۷/۶	۵/۸	۸۵	-۳۰
CON-3	۴/۹	۴/۴	۴۶	-۶۲
CON-4	۳/۲	۳/۲	۳۳	-۷۲
CON-5	۳/۰	۲/۵	۲۱	-۸۲



شکل ۱۵ نتایج آزمایش نفوذ آب در بتن



شکل ۱۶ میزان عمق نفوذ و مساحت نفوذ آب در بتن



شکل ۱۷ تصویری از آزمایش نفوذ آب در بتن

۵-۶. تصاویر الکترونی روبشی

شکل شماره ۱۸ تصاویر الکترونی روبشی از ساختار بتن با تمرکز بر وضعیت منافذ، تراکم و ریز ساختار بتن پس از افزودن نانو دی اکسید آلومینا و نانو کلئوید اکسید گرافن را نمایش می دهند.

شکل (الف) نشان می دهد که حضور نانو دی اکسید آلومینا موجب کاهش اندازه و تداوم ترک ها شده است و ناحیه پیوند بین

تجمع و تشکیل کلوخه پیدا می‌کنند. این تجمع‌ها که شواهد آن‌ها در تصاویر ریزساختاری نیز مشاهده شده است، نه تنها نقش تقویت کنندگی نانوکلوئید اکسید گرافن را از بین می‌برند، بلکه به عنوان نواحی تمرکز تنش عمل کرده و آغاز ترک‌های زودرس را تحت بارگذاری تسهیل می‌کنند. از سوی دیگر، نانوکلوئید اکسید گرافن به دلیل قابلیت بالای جذب آب، بخشی از آب آزاد موجود در مخلوط را به خود اختصاص می‌دهد. این پدیده باعث کاهش آب در دسترس برای ذرات سیمان شده و فرآیند هیدراتاسیون را مختل می‌کند. علاوه بر این، تجمع نانو ذرات مانع خروج هوای محبوس در اطراف این توده‌ها می‌شود و در نتیجه، حفرات ریز موضعی در ساختار شکل می‌گیرد که به کاهش مقاومت فشاری و کششی منجر می‌شود. این سازوکارها با نتایج عددی به دست آمده همخوانی دارند و کاهش مقاومت‌های فشاری و کششی گزارش شده در نمونه‌های مختلف، از جمله افت ۱/۶٪ تا ۱۹/۸٪ در مقاومت فشاری و کاهش ۸/۳٪ تا ۳۷/۵٪ در مقاومت کششی، را توجیه می‌کنند.

در مقابل، رفتار بتن از نظر دوام و نفوذپذیری آب روند متفاوتی را نشان می‌دهد. نتایج مدل‌سازی نفوذ آب حاکی از کاهش چشمگیر عمق نفوذ با افزایش مقدار نانوکلوئید اکسید گرافن است، به‌طوری که کاهش نفوذ آب در نمونه‌ها از ۶٪ تا ۸۲٪ نشان داده شده است. معادله استخراج شده و شیب تند نزولی بخش ابتدایی منحنی بیانگر آن است که حتی مقادیر محدود نانوذرات نیز تاثیر قابل توجهی بر آب‌بندی بتن دارند. این رفتار به نقش پرکنندگی نانو ذرات، به ویژه نانوکلوئید اکسید گرافن، مربوط است که با نفوذ به حفرات ریز و لوله‌های مویین، مسیرهای عبور آب را مسدود می‌کنند. علاوه بر آن، صفحات گرافن به دلیل هندسه صفحاتی خود مسیر نفوذ آب را طولانی و پیچیده می‌سازند، به‌گونه‌ای که مولکول‌های آب برای عبور از بتن نیازمند صرف زمان و انرژی بیشتری هستند. این ویژگی سبب شده است که علی‌رغم افت مقاومت‌های مکانیکی، عملکرد بتن از نظر نفوذناپذیری به‌طور محسوسی بهبود یابد و برای کاربرد در محیط‌های مرطوب و خورنده مناسب ارزیابی شود.

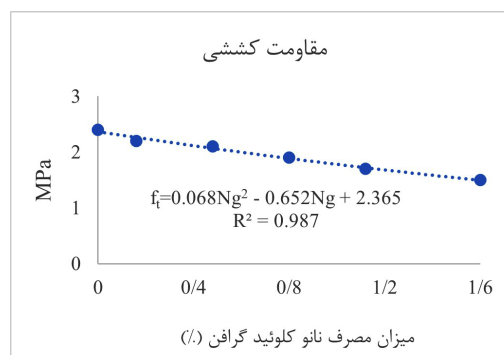
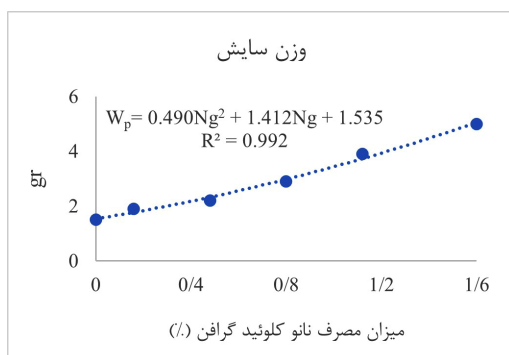
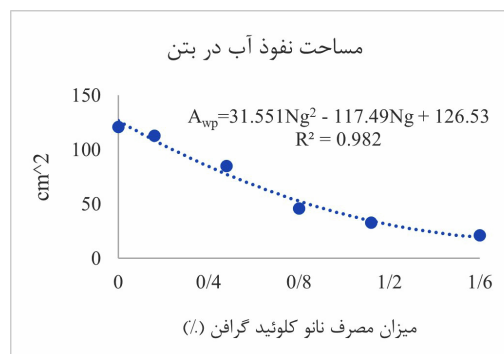
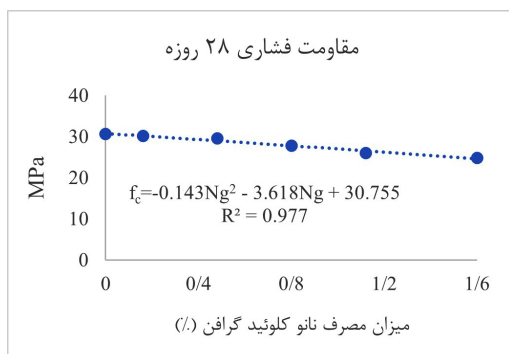
رفتار سایشی نیز با افزایش مقدار نانوکلوئید اکسید گرافن روند کاهشی نشان می‌دهد، بطوریکه وزن سایش از دست رفته در نمونه‌ها بین ۲۲/۴٪ تا ۶۹/۸٪ افزایش یافته است. مقاومت سایشی به طور مستقیم به سختی سطح و میزان پیوستگی خمیر سیمان با سنگدانه‌ها وابسته است. تجمع نانوکلوئید اکسید گرافن و تضعیف ناحیه انتقال بین‌فازی باعث می‌شود اتصال خمیر سیمان به سنگدانه‌ها کاهش یابد و در نتیجه، دانه‌های سطحی تحت اثر بارهای سایشی آسان‌تر جدا شوند. همچنین، اختلال در هیدراتاسیون سطحی منجر به تشکیل خمیر سیمانی نرم‌تر و متخلخل‌تر در لایه‌های رویی بتن می‌شود که مقاومت کمتری در برابر سایش مکانیکی دارد.

ضریب تعیین بسیار بالا و نزدیک به ۱ در معادلات استخراج شده نشان می‌دهد که تغییرات خواص بتن به طور مستقیم تابع مقدار نانوکلوئید اکسید گرافن بوده و تاثیر خطای آزمایشگاهی محدود است. نتایج مدل‌سازی عددی بیانگر وجود یک بازه بهینه در مصرف نانوکلوئید اکسید گرافن است که در آن باید میان الزامات مقاومت مکانیکی و نیاز به دوام و نفوذناپذیری تعادل برقرار شود. در شرایطی که هدف اصلی کاهش نفوذ آب و افزایش دوام باشد، استفاده از مقادیر بالاتر نانوکلوئید اکسید گرافن توجیه‌پذیر است، در حالی که برای کاربردهای سازهای که مقاومت فشاری اولویت دارد، استفاده از مقادیر بسیار محدود نانوکلوئید اکسید گرافن ضروری خواهد بود. نتایج بدست آمده به شرح جدول و شکل شماره ۱۷ و ۱۹ می‌باشد.

جدول ۱۷ خلاصه معادلات رگرسیونی و پارامترهای آماری استخراج شده برای مدل سازی رفتار بتن

رفتار کلی	دقت مدل (R2)	معادله استخراج شده	نوع مدل	پارامتر مورد بررسی
کاهش مقاومت فشاری با افزایش درصد نانو گرافن	0.977	$f_c = -0.143 Ng^2 - 3.618Ng + 30.755$	مقاومت فشاری	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
کاهش غیرخطی مقاومت کششی با افزایش درصد نانو گرافن	0.987	$f_t = 0.068Ng^2 - 0.652Ng + 2.365$		مقاومت کششی
بهبود چشمگیر (کاهش محسوس نفوذپذیری)	0.982	$A_{wp} = 31.551Ng^2 - 117.49Ng + 126.53$		مساحت نفوذ آب
کاهش مقاومت سایشی با افزایش درصد نانو گرافن	0.992	$W_a = 0.490Ng^2 + 1.412Ng + 1.535$		وزن سایش

Ng : نانو گرافن f_c : مقاومت فشاری f_t : مقاومت کششی A_{wp} : مساحت نفوذ آب در بتن
 W_a : مقاومت سایشی



شکل ۱۹ نمودارهای تحلیل حساسیت و برازش منحنی بر روی داده‌های آزمایشگاهی

۷. بهینه‌یابی

در این تحقیق، انتخاب طرح بهینه مستلزم گزینش گزینه‌های از میان چند طرح آزمایش شده است که بتواند معیارهای مختلف عملکردی را به طور همزمان در محدوده مطلوب قرار دهد. از آنجا که معیارهای مورد بررسی شامل خواص مکانیکی و شاخص‌های دوام هستند، بهینه‌یابی تک معیاره قادر به ارزیابی جامع عملکرد طرح‌ها نیست و استفاده از رویکرد چند معیاره ضرورت دارد. بهینه‌یابی چند معیاره امکان تجمع معیارهایی با ماهیت و واحدهای متفاوت را در قالب یک شاخص کلی فراهم می‌کند و مقایسه همزمان طرح‌ها را ممکن می‌سازد. با توجه به اینکه نتایج آزمایش‌ها به صورت گسسته و برای تعداد محدودی طرح به دست آمده‌اند، مسئله حاضر در دسته مسائل انتخاب از میان گزینه‌های محدود قرار می‌گیرد و به کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مبتنی بر امتیازدهی مناسب‌تر است. بر این اساس، در این تحقیق از روش تجمع وزن‌دار معیارها برای محاسبه شاخص عملکرد کلی هر طرح استفاده شده است. از آنجا که معیارهای عملکرد دارای مقیاس‌ها و واحدهای متفاوت هستند، پیش از ترکیب آن‌ها فرآیند نرمال‌سازی انجام شده است تا مقادیر به بازهای بدون بُعد تبدیل شده و امکان مقایسه و ترکیب ریاضی آن‌ها فراهم شود. برای معیارهایی که مقدار بیشتر آن‌ها نشان دهنده عملکرد بهتر است، نرمال‌سازی بر اساس رابطه شماره ۵ و برای معیارهایی که مقدار کمتر آن‌ها نشان دهنده عملکرد مطلوب‌تر است، رابطه نرمال‌سازی به شکل معکوس تعریف شده است که از طریق رابطه شماره ۶ محاسبه می‌شود:

$$N_{ij} = \frac{X_{ij} - X_j^{\min}}{X_j^{\max} - X_j^{\min}} \quad (5)$$

$$N_{ij} = \frac{X_j^{\max} - X_{ij}}{X_j^{\max} - X_j^{\min}} \quad (6)$$

X_{ij} مقدار معیار j برای طرح i است.

$X_{j\max}$ و $X_{j\min}$ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار معیار j در میان تمام طرح‌ها هستند.

X_{ji} مقدار نرمال شده معیار j برای طرح i است.

به کارگیری این رابطه موجب می‌شود که جهت اثر تمام معیارها یکسان شده و مقدار بیشتر همواره نشان دهنده عملکرد بهتر باشد. این جهت‌سازی شرط لازم برای ترکیب معتبر معیارها در مرحله بعدی محسوب می‌شود. از آنجا که معیارهای عملکرد دارای درجه اهمیت یکسانی نیستند، برای هر معیار یک وزن اختصاص داده شده است. وزن‌ها بیانگر سهم نسبی هر معیار در تصمیم‌گیری‌هایی هستند و مجموع آن‌ها برابر با واحد در نظر گرفته شده است که از طریق رابطه شماره ۷ محاسبه می‌شود.

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad (7)$$

w_j وزن معیار j است.

وزندهی موجب می‌شود معیارهای کلیدی اثر بیشتری در نتیجه‌نهایی داشته باشند. پس از نرمال‌سازی معیارها و تعیین وزن‌ها، شاخص عملکرد کلی هر طرح به عنوان معیار نهایی بهینه‌یابی محاسبه شده است. این شاخص به صورت مجموع وزن‌دار معیارهای نرمال‌شده تعریف می‌شود که از طریق رابطه شماره ۸ محاسبه می‌شود.

$$PI_i = \sum_{j=1}^m w_j N_{ij} \quad (8)$$

که در آن:

PI_i شاخص عملکرد طرح i است.

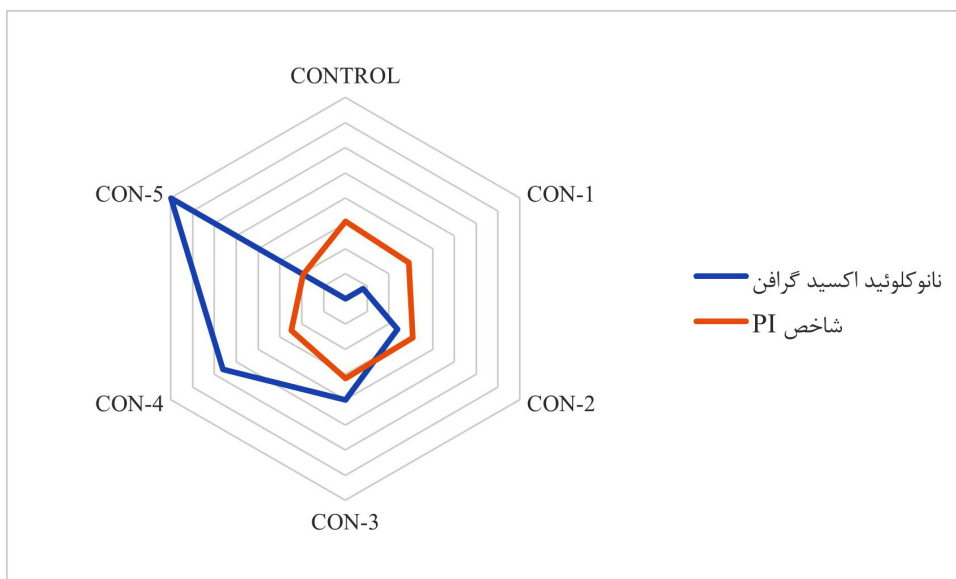
m تعداد کل معیارهای در نظر گرفته شده است.

شاخص عملکرد، معیار ارزیابی همزمان تمام پارامترهای موثر هر طرح است و طرحی که بیشترین مقدار این شاخص را کسب کند، به عنوان گزینه بهینه در تصمیم‌گیری چند معیاره انتخاب می‌شود. به منظور لحاظ کردن اهمیت نسبی معیارها، ضرایب وزنی متفاوتی اعمال شد. به گون‌های که شاخص‌های مقاومت فشاری ۷ روزه و مقاومت کششی با وزن ۰/۰۷۷، شاخص‌های مقاومت فشاری ۲۸ روزه و مقاومت سایشی با وزن ۰/۲۳۱ و شاخص نفوذپذیری با آب (مساحت نفوذ آب در بتن) با وزن ۰/۳۸۵، به دلیل نقش کاربردی برجسته‌تر در اهداف تحقیق، در نظر گرفته شد.

نتایج حاصل از محاسبه شاخص عملکرد (PI) که در جدول شماره ۱۸ و شکل شماره ۲۰ ارائه شده است. نتایج نشان داد طرح شاهد با کسب مقدار PI برابر با ۰/۶۱۵، عملکردی قابل قبول از خود نشان داده است که این موضوع عمدتاً به سطح بالای مقاومت‌های مکانیکی آن مربوط می‌شود. با این حال، این طرح در بخش دوام نمره صفر را به خود اختصاص داده است که بیانگر ضعف اساسی آن از منظر نفوذپذیری و پایداری بتن است. طرح‌های CON-1 و CON-2 اگرچه بخش عمده‌ای از مقاومت‌های مکانیکی خود را حفظ کرده‌اند، اما بهبود محسوسی در شاخص‌های مرتبط با نفوذپذیری نشان نمی‌دهند و در نتیجه شاخص عملکرد نهایی آن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۵۸۰ و ۰/۶۲۰ محاسبه شده است. این مقادیر بیانگر آن است که عملکرد کلی این طرح‌ها تفاوت معناداری با طرح شاهد نداشته و تغییر ایجاد شده در ترکیب، منجر به ارتقای همزمان مقاومت و دوام نشده است. بر اساس محاسبات انجام‌شده، طرح CON-3 با کسب بیشترین مقدار شاخص عملکرد (PI=۰/۶۳۱) به عنوان طرح بهینه شناسایی می‌شود. این طرح متعادل‌ترین رفتار را میان معیارهای مختلف از خود نشان داده و نقطه تلاقی مناسبی میان حفظ خواص مکانیکی و ارتقای دوام ایجاد کرده است. در این طرح، اگرچه مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است، اما این کاهش با بهبود قابل توجه در نفوذناپذیری و کاهش مساحت نفوذ آب جبران شده است. مقدار بالای شاخص عملکرد در این طرح نشان می‌دهد که مصالحه ایجاد شده میان مقاومت و دوام در این درصد از نانو کلئوئید اکسید گرافن، بیشترین بازدهی فنی را برای بتن فراهم کرده است. در طرح‌های CON-4 و CON-5، نفوذ آب به حداقل مقدار رسیده و شاخص دوام به بیشترین سطح خود دست یافته است، اما افت شدید مقاومت فشاری و مقاومت سایشی موجب کاهش چشمگیر شاخص عملکرد کلی شده است. بطوریکه مقادیر PI برای این طرح‌ها به ترتیب برابر با ۰/۴۹۷ و ۰/۳۸۵ به دست آمده است. نمودار راداری نشان می‌دهد که به ویژه در طرح CON-5، سطح پوشش نمودار عمدتاً به سمت محور دوام متمرکز شده و تعادل میان معیارهای عملکردی از بین رفته است. بر این اساس و با تکیه بر تحلیل جامع تصمیم‌گیری چندمعیاره، طرح اختلاط CON-3 به عنوان گزینه‌های معرفی می‌شود که بهترین هم‌پوشانی را میان الزامات سازه‌ای مرتبط با مقاومت و الزامات پایداری مرتبط با دوام بتن فراهم می‌کند.

جدول ۱۸ مقادیر نرمال‌شده و شاخص عملکرد نهایی (PI) محاسبه شده برای تعیین طرح اختلاط بهینه

نام	مقاومت فشاری ۷ روزه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	مقاومت کششی	وزن سایش	مساحت نفوذ آب در بتن	PI
CONTROL	۰/۰۷۷	۰/۲۳۱	۰/۰۷۷	۰/۲۳۱	۰	۰/۶۱۵
CON-1	۰/۰۷۴	۰/۲۱۱	۰/۰۶۰	۰/۲۰۴	۰/۰۳۱	۰/۵۸۰
CON-2	۰/۰۵۸	۰/۱۸۷	۰/۰۵۱	۰/۱۸۵	۰/۱۳۸	۰/۶۲۰
CON-3	۰/۰۵۰	۰/۱۱۹	۰/۰۳۴	۰/۱۳۸	۰/۲۸۸	۰/۶۳۱
CON-4	۰/۰۲۱	۰/۰۴۸	۰/۰۱۷	۰/۰۷۳	۰/۳۳۸	۰/۴۹۷
CON-5	۰	۰	۰	۰	۰/۳۸۵	۰/۳۸۵



شکل ۲۰ نمودار راداری مقایسه عملکرد طرح‌های مختلف بتن بر اساس شاخص ترکیبی مقاومت و دوام

۸. جمع‌بندی یافته‌های تحقیق

یافته‌های تحقیق نشان داده است که با افزایش مقدار نانو کلئوید اکسید گرافن مایع در بتن، مقاومت فشاری، کشش برزیلی و سایشی کاهش می‌یابد. این کاهش ناشی از آن است که نانو کلئوید اکسید گرافن، با ممانعت از تشکیل ترکیبات کلسیم و اترینگایت سیمان و ایجاد اختلال در واکنش هیدراتاسیون، عملکرد سیمان در بتن را تحت اثر قرار داده است. این در حالی است که نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از نانو کلئوید اکسید گرافن به صورت جامد (پودری) منجر به افزایش مقاومت فشاری و خمشی می‌شود [۴-۷]. به نظر می‌رسد گرافن مصرفی در این تحقیق به دلیل فعالیت فوتوکاتالیستی زیاد و رسانندگی الکتریکی قابل توجه صفحات گرافنی، باعث شکل‌گیری الکترون‌های نیم‌رسانا شده و در نتیجه از وقوع کامل واکنش هیدراتاسیون سیمان جلوگیری می‌کند [۲۶، ۳۲]. علاوه بر حالت مصرف نانو کلئوید اکسید گرافن، نوع ماده مصرفی و شرکت تولید کننده آن نیز می‌تواند عاملی تعیین‌کننده در نتایج باشد. با این حال، نانو کلئوید اکسید گرافن مصرفی در این تحقیق نقش قابل توجهی در کاهش میزان نفوذ آب به بتن داشته است. گرافن، به دلیل برخورداری از زنجیره‌های بلند و پیوسته، سطحی محافظ ایجاد می‌کند که در شرایط عدم اعمال بارهای سنگین به بتن، ویژگی‌های آب‌گریزی و نفوذناپذیری را به خوبی حفظ می‌کند.

در این تحقیق کاهش پیوسته مقاومت فشاری، کشش برزیلی و سایشی از CON-1 تا CON-5 ارتباط مستقیم با یکدیگر دارند. این روند نشان می‌دهد که هرگونه کاهش در شکل‌گیری CSH و تضعیف پیوند در ناحیه پیوند ابتدا در مرحله باربری (فشار) و سپس در مرحله تخریب سطحی (سایش) بازتاب پیدا می‌کند. این همگرایی نتایج بیانگر آن است که مکانیزم غالب، اختلال در هیدراتاسیون اولیه ناشی از حضور نانو کلئوید اکسید گرافن است.

با توجه به این نتایج، ارائه راهکاری مبتنی بر ترکیب نانو کلئوید اکسید گرافن و نانو دی‌اکسید آلومینا به منظور ساخت محلولی برای ترمیم و مقاوم‌سازی سطح بتن جهت ایجاد سطحی آب‌گریز، نفوذناپذیر و مقاوم در برابر سایش، ایده‌های مناسب به نظر می‌رسد. جمع‌بندی نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از طرح CON-3 می‌تواند مشخصات منحصر به فردی را به بتن القا کند و گزینه‌های مناسب جهت ساخت بتن با نفوذپذیری کم ضمن حفظ سایر مشخصات مکانیکی بتن باشد.

۹. نتیجه گیری

برخی از مهمترین نتایج بدست آمده به شرح زیر می باشد:

۱. افزایش مقدار نانو کلئوئید اکسید گرافن مایع موجب کاهش تشکیل فازهای هیدراته شده است و در نتیجه پیوستگی خمیر سیمان و مقاومت های فشاری، کشش برزیلی و سایش بتن کاهش یافته است.
۲. حضور همزمان نانو دی اکسید آلومینا در همه طرح ها موجب افزایش تراکم ریزساختار شده است و بخشی از اثرات منفی گرافن بر مقاومت بتن تعدیل شده است.
۳. ترکیب نانو کلئوئید اکسید گرافن و نانو آلومینا موجب مسدود شدن مسیرهای نفوذ شده است و بنابراین نفوذپذیری و عمق نفوذ آب در بتن به طور چشمگیری کاهش یافته است.
۴. استفاده از نانو کلئوئید گرافن مایع به همراه نانو دی اکسید آلومینا باعث کاهش اسلامپ بتن می شود. بطوریکه طرح CON-1,2,3,4,5 نسبت به طرح شاهد به ترتیب ۴٪، ۸٪، ۱۲٪، ۲۰٪ و ۲۸٪ اسلامپ بتن را کاهش یافت.
۵. استفاده از نانو کلئوئید شاهد مایع باعث کاهش مقاومت فشاری بتن می شود. بطوریکه مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح CON-1,2,3,4,5 نسبت به طرح شاهد به میزان ۱۶٪، ۳۲٪، ۹۷٪، ۱۵۹٪، ۱۹۸٪ کاهش یافت.
۶. استفاده از نانو کلئوئید گرافن مایع باعث کاهش مقاومت کششی بتن می شود. بطوریکه مقاومت کششی طرح CON-1,2,3,4,5 نسبت به طرح شاهد به میزان ۸/۳٪، ۱۲/۵٪، ۲۰/۸٪، ۲۹/۲٪، ۳۷/۵٪ کاهش یافت.
۷. بیشترین افت مکانیکی در مقاومت کششی مشاهده شد که ناشی از حساسیت بالای میکروترک ها و ایجاد ضعف در ناحیه پیوند ناشی از مقادیر بالای نانو کلئوئید گرافن مایع است.
۸. استفاده از نانو کلئوئید گرافن مایع باعث کاهش مقاومت سایشی بتن می شود. بطوریکه در طرح CON-1,2,3,4,5 نسبت به طرح شاهد مقاومت سایشی بتن به ترتیب ۲۲/۴٪، ۳۲/۸٪، ۴۸/۳٪، ۶۱/۵٪، ۶۹/۸٪ کاهش یافت.
۹. استفاده از نانو کلئوئید گرافن مایع باعث کاهش میزان نفوذ آب در بتن می شود. بطوریکه در طرح CON-1,2,3,4,5 نسبت به طرح شاهد میزان نفوذ آب به ترتیب ۶٪، ۳۰٪، ۶۲٪، ۷۲٪ و ۸۲٪ کاهش یافت.
۱۰. بیشترین حساسیت به حضور نانو مواد در مقاومت کششی دیده شد که ناشی از تمرکز تنش در اطراف توده های نانو است. مقاومت کششی در طرح های مختلف نسبت به شاهد بین ۳/۸٪ تا ۵/۳۷٪ کاهش یافت.
۱۱. بر اساس تحلیل بهینه سازی چند معیاره و محاسبه شاخص عملکرد (PI)، طرح اختلاط CON-3 به عنوان طرح بهینه انتخاب گردید. این طرح با کسب بالاترین امتیاز ترکیبی، موفق ترین تعادل را میان حفظ خواص مکانیکی و ارتقای دوام و نفوذناپذیری ایجاد کرده است و به عنوان گزینه پیشنهادی برای محیط هایی که همزمان نیازمند مقاومت سازه های و آب بندی هستند، معرفی می شود.

قدردانی

تشکر فراوان از مهندسین و تکنسین های آزمایشگاه بتن ایمن سازه آزما، آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز، آزمایشگاه بتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارومیه و جناب آقای دکتر مهدی افضل دکتري برنامه نویسی و هوش مصنوعی که در جهت پیشبرد اهداف این تحقیق نهایت همکاری خود را مبذول داشتند.

- [1] Naderi, Saberi Varzaneh, Din, & Sardarvalli. (2025). *The relationship between surface resistance and water penetration depth in concrete using surface and cylindrical chamber pull-out tests and the development of a new theory*. *Amirkabir Civil Engineering Journal*, 57(4), 653-676.
- [2] Naderi N., Khoshkalam G., Rostami M. (2021). *Comparative application of titanium dioxide, nano-silica, and silicon fume in self-cleaning properties of concrete façade for sustainable development*. *Struct. Eng. Constr.*, 8 (Special Issue 2):44–58.
- [3] Yousefnia Nia H., Jabbari M. M. (2022). *Application of alumina nanoparticles to improve some mechanical properties and enhance wear resistance of concrete*. *Civil Eng. J. Amirkabir Univ.*, 54(11):4343–4364. Available: <https://doi.org/10.22060/ceej.2022.21040.7603>
- [4] Shokrani M., Naderi M. (2021). *Experimental study of the effect of graphene oxide nanoparticles on the mechanical behavior of cementitious composites and water transfer characteristics in concrete*. *Struct. Eng. Constr.*, 8 (Special Issue 3):39–56.
- [5] Shokrani M., Naderi M. (2023). *Evaluation of compressive strength and permeability of G-OX concrete using the ultrasonic method*. *Civil Eng. J. Amirkabir Univ.*, 55(2):471–490.
- [6] Farhmandzadeh D., Dashti M. (2023). *Nanomaterials and their applications in concrete*. *New Eng. Sci. Res.*, 48(8):9–16.
- [7] Akarsh P. K., Shrinidhi D., Marathe S., Bhat A. K. (2022). *Graphene oxide as a nanomaterial in developing sustainable concrete: A brief review*. *Mater. Today Proc.*, 60:234–246.
- [8] Semnani Rahbar, Kalantari, & Mohaddes Mojtahedi. (2025). *Investigation of microstructure, morphology and tensile properties of polypropylene nanocomposite fibers/graphene nanosheets in the presence of compatibilizer*. *Applied Research in Chemical-Polymer Engineering*, 4(1), 30-13.
- [9] Alizadeh Lasaki R., Ramazanianpour (2019). *Comparative tests on fresh self-compacting concrete containing nanoparticles*. *Civil Eng. Projects J.*, 1(3):57–67.
- [10] Ramazani Pour Y., Yadak Yiraghi Y., Zolghadr Nseb R., Ramazani Pour A. M. (2022). *Mechanical properties and chloride ion permeability of concretes containing calcined clay*. *Civil Eng. J. Amirkabir Univ.*, 54(3):1119–1132.
- [11] Liu Y., Zhang L., Wang H., Zhao D. (2023). *Effects of various nanoparticles on hydration process and mechanical properties of concrete*. *Constr. Build. Mater.*, 341:127892. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127892>
- [12] Wenqiu L., Chen F., Zhao Q. (2022). *Influence of graphene oxide on mechanical performance of cement-based materials*. *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(6):04022112. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003892](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003892)
- [13] Yang D. H., Lee S., Kim J. (2022). *Optimal dosage and effects of nanographene on elasticity and tensile strength of concrete*. *Mater. Lett.*, 307:130988. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130988>

- [1] Naderi, Saberi Varzaneh, Din, & Sardarvalli. (2025). *The relationship between surface resistance and water penetration depth in concrete using surface and cylindrical chamber pull-out tests and the development of a new theory. Amirkabir Civil Engineering Journal*, 57(4), 653-676.
- [2] Naderi N., Khoshkalam G., Rostami M. (2021). *Comparative application of titanium dioxide, nano-silica, and silicon fume in self-cleaning properties of concrete façade for sustainable development. Struct. Eng. Constr.*, 8 (Special Issue 2):44–58.
- [3] Yousefnia Nia H., Jabbari M. M. (2022). *Application of alumina nanoparticles to improve some mechanical properties and enhance wear resistance of concrete. Civil Eng. J. Amirkabir Univ.*, 54(11):4343–4364. Available: <https://doi.org/10.22060/ceej.2022.21040.7603>
- [4] Shokrani M., Naderi M. (2021). *Experimental study of the effect of graphene oxide nanoparticles on the mechanical behavior of cementitious composites and water transfer characteristics in concrete. Struct. Eng. Constr.*, 8 (Special Issue 3):39–56.
- [5] Shokrani M., Naderi M. (2023). *Evaluation of compressive strength and permeability of G-OX concrete using the ultrasonic method. Civil Eng. J. Amirkabir Univ.*, 55(2):471–490.
- [6] Farhmandzadeh D., Dashti M. (2023). *Nanomaterials and their applications in concrete. New Eng. Sci. Res.*, 48(8):9–16.
- [7] Akarsh P. K., Shrinidhi D., Marathe S., Bhat A. K. (2022). *Graphene oxide as a nanomaterial in developing sustainable concrete: A brief review. Mater. Today Proc.*, 60:234–246.
- [8] Semnani Rahbar, Kalantari, & Mohaddes Mojtahedi. (2025). *Investigation of microstructure, morphology and tensile properties of polypropylene nanocomposite fibers/graphene nanosheets in the presence of compatibilizer. Applied Research in Chemical-Polymer Engineering*, 4(1), 30-13.
- [9] Alizadeh Lasaki R., Ramazanianpour (2019). *Comparative tests on fresh self-compacting concrete containing nanoparticles. Civil Eng. Projects J.*, 1(3):57–67.
- [10] Ramazani Pour Y., Yadak Yiraghi Y., Zolghadr Nseb R., Ramazani Pour A. M. (2022). *Mechanical properties and chloride ion permeability of concretes containing calcined clay. Civil Eng. J. Amirkabir Univ.*, 54(3):1119–1132.
- [11] Liu Y., Zhang L., Wang H., Zhao D. (2023). *Effects of various nanoparticles on hydration process and mechanical properties of concrete. Constr. Build. Mater.*, 341:127892. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127892>
- [12] Wenqiu L., Chen F., Zhao Q. (2022). *Influence of graphene oxide on mechanical performance of cement-based materials. J. Mater. Civ. Eng.*, 34(6):04022112. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003892](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003892)
- [13] Yang D. H., Lee S., Kim J. (2022). *Optimal dosage and effects of nanographene on elasticity and tensile strength of concrete. Mater. Lett.*, 307:130988. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130988>

effective on the degree of bond between steel and concrete. *New Approaches in Civil Engineering*, 8(2), 45-61.

[41] Ghorbani, M. (2021). Sensitivity and failure analysis of concrete slab-column connections using the Monte Carlo method based on neural networks. *Concrete Research*, 14(2), 119-127.

[42] Khodabandehloo, A., Asadi Zeinali, M., & Amin, A. (2021). Optimization of the consumption rate of interweaved macro synthetic fibers for improving the mechanical properties of concrete. *Structural Engineering and Construction*, 8(10), 206-224.

[43] Keymanesh, M., Mohammadaliha, M., & Rabbani Nejad, F. (2024). Sensitivity analysis of JPCP concrete pavement to freeze-thaw cycles. *Transportation Research Journal*, 21(3), 141-162.