نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۱۱، سال ۱۴۰۱، صفحات ۴۳۴۳ تا ۴۳۶۴
DOI: 10.22060/ceej.2022.21040.7603

کاربرد نانو اکسید آلومین در بهبود برخی خواص مکانیکی و افزایش مقاومت در برابر سایش بتن

حامد یوسفی نژاد، محمد مهدی جباری*

دانشکده مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

خلاصه: امروزه با توسعه نانو فناوری، کاربرد این ماده در زمینه دستیابی به برخی خواص مورد نظر در مصالح ساختمانی به ویژه بتن، بسیار اهمیت دارد. در این راستا استفاده از نانو اکسید آلومین می‌تواند باعث تغییر در برخی مشخصات فیزیکی و خواص مکانیکی بتن گردد. با توجه به سختی بالای آلومین انتظار می‌رود تا بتوان با کمک این ماده در مقیاس نانو، مقاومت سایشی بتن را افزایش داد. در این تحقیق، با بررسی تاثیر نانو اکسید آلومین بر روی مشخصات بتن، ضمن بهینه‌یابی میزان استفاده از این مواد، امکان استفاده در کاربردهای خاص به ویژه پوشش‌ها و کف‌سازی‌های بتنی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقادیر نانو اکسید آلومین به کار رفته در طرح مخلوط بتن این تحقیق، در نسبت های وزنی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد جایگزین بخشی از سیمان می باشد. همچنین با هدف کاهش هزینه و اجرای راحت‌تر، پاشش محلول نانو اکسید آلومین به صورت رقیق شده طی یک الی چهار لایه بر روی سطح بتن نیز مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن ۰/۵٪ پودر نانو اکسید آلومین در بتن می تواند ضمن بهبود نسبی برخی از خواص مکانیکی مورد آزمایش، مقاومت سایشی بتن را نیز تا ۷۷٪ افزایش دهد. همچنین نتایج تست سایش نشان داد که ایجاد لایه نانو اکسید آلومین بر روی سطح بتن با وجود بهبود اثربخشی با افزایش تعداد لایه پوشش، در مقایسه با طرح مخلوط ترکیبی از اثرگذاری کمتری برخوردار است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۸
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵

کلمات کلیدی:
نانو اکسید آلومین
نانو مواد
دوام سایشی
سایش بتن
کف‌سازی بتنی

۱- مقدمه

سایش رویه بتن از متداول‌ترین علل زوال و خرابی سطح بتن می‌باشد. سایش اغلب در اثر اصطکاک بین اجسام سخت، روی سطح بتن اتفاق می‌افتد [۱]. سیمان سخت شده در بتن مقاومت کمی در مقابل سایش، به خصوص زیر اثر بارهای متناوب دارد. همچنین به دلیل عبور پیاپی وسایل نقلیه و افراد در کارگاه‌ها و کارخانه‌ها، کف‌سازی‌های بتنی در معرض سایش قرار می‌گیرند. در برخی از مکان‌ها به دلیل قرارگیری کف‌سازی‌ها در محیط باز، سیکل متناوب یخ و ذوب شدن‌های متوالی در بتن رخ می‌دهد که باعث ایجاد ترک‌های کوچک می‌شود و این ترک‌ها به مرور زمان با نفوذ آب و دیگر عوامل خورنده و همچنین سایش همزمان، گسترده‌تر و بزرگ‌تر شده و منجر به تخریب کل کف‌سازی می‌شود. بتن‌های معمولی با توجه به تخلخل زیاد و مقاومت کم در مقابل سایش، بسیار ضعیف هستند. یکی از شیوه‌های نوین افزایش دوام و مقاومت بتن در برابر سایش استفاده از نانو مواد در طرح مخلوط بتن است [۲ و ۱].

سیمان از ذرات کوچک ژل‌های سیلیکات کلسیم، آلومینیوم و کریستال‌های بزرگ هیدراته شده به همراه تک حفره‌های با اندازه نانو و حفرات مویینه توزیع شده در میان آن‌ها تشکیل شده است. علاوه بر آن تشکیل فضای خالی و مویینه بین سنگدانه‌های شن و ماسه و همچنین خلل و فرج موجود در سنگدانه‌ها سبب ایجاد فضای خالی در خمیره بتن گردیده که عمده ترک‌های مویینه از آنجا شروع می‌شود. بنابراین فضاهایی برای نانو ذرات وجود دارد تا خواص خمیره بتن را بهبود بخشد. تحقیق‌های انجام شده نشان می‌دهد که پخش یکنواخت نانو ذرات در بتن، به عمل هیدراتاسیون سیمان به دلیل فعالیت بالای خود سرعت می‌بخشد [۲]. علاوه بر این، فضای خالی موجود در بتن و حفرات را پر کرده و مقاومت را افزایش می‌دهند.

در طی سالیان اخیر با توجه به توسعه فناوری نانو و استفاده از نانو مواد در تکنولوژی بتن و با توجه به خصوصیاتی که این مواد می‌توانند در بتن ایجاد کنند، سبب افزایش استفاده از نانو مواد در تولید بتن شده است. از جمله دلایل استفاده از نانو مواد در بتن را می‌توان به مسائل زیست محیطی، ارتقای کیفیت و نیاز به بتن‌های خاص برای شرایط ویژه نام برد. بعضی از

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: jabbari@iaushiraz.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

شکل ۱. فرسایش و زوال سطح رویه بتن [۲ و ۱]

Fig. 1. Erosion and deterioration of the concrete top surface [1-2]

این نانو مواد به دلیل تأثیرات مثبت در حال استفاده می‌باشند و تاثیر برخی دیگر بر رفتار انواع بتن هنوز مورد بحث و بررسی می‌باشد [۳]. از جهتی دیگر انتخاب مناسب نانو ذرات و میزان استفاده بهینه آن‌ها با توجه به خواص منحصر به فرد آن‌ها باید مورد آزمایش قرار گرفته و اثبات شود تا بتواند تاثیر ویژه‌ای را به مواد سیمانی موجود در بتن ایجاد کند.

امروزه به دلیل وجود برخی مشکلات، بهره‌برداری از نانو تکنولوژی در صنعت بتن در مقیاس تجاری به چند محصول قابل عرضه در صنایع محدود گردیده است [۴]. در حال حاضر هزینه‌های بالای نانو ذرات مانع از توسعه روزافزون این محصولات و استفاده آن‌ها در صنعت می‌گردد. مشکل دیگر در زمینه استفاده از نانو موادها توزیع یکنواخت آن‌ها در ماتریس بتن است. معمولاً این مواد در حین افزوده شدن به بتن به صورت کلوخه در می‌آیند و در مخلوط به خوبی توزیع نمی‌شوند، البته برای این حل مشکل می‌توان از دستگاه‌های مخلوط‌کن مکانیکی یا انواع فوق روان کننده‌ها استفاده کرد [۴ و ۳]. چالش دیگر در این زمینه جذب آب بسیار بالای ذرات نانو است. این ذرات به علت سطح ویژه بسیار بزرگی که دارند مقدار زیادی آب جذب می‌کنند و ممکن است بر میزان روانی بتن تاثیر بگذارند [۵]. همچنین امکان‌سنجی تولید و حمل و نقل آن نیازمند تکنولوژی خاصی می‌باشد که در حال حاضر در دسترس برخی از کشورها می‌باشد [۴]. در نهایت موارد ذکر شده چالش‌هایی هستند که باید قبل از گسترش استفاده از نانو در صنعت بتن حل شوند.

آلومینیوم یا آلومین با نماد شیمیایی Al_2O_3 یکی از مواد سرامیکی است که دارای کاربردهای متنوعی در زمینه‌های مختلف می‌باشد. آلومینیوم از خانواده ترکیبات غیرآلی است. این، یک آمورف است و نام‌های تجاری متنوعی مانند آلومین، کوراندوم و غیره شناخته می‌شود. یکی از ترکیبات موجود در بتن، آلومین است که در ضمن واکنش، تولید می‌شود. به همین دلیل می‌توان گفت آلومین یکی از مهم‌ترین بخش‌های سیمان است و اهمیت زیادی در اثر چسبندگی، اجزای بتن دارد. آلومین با انجام واکنش‌های شیمیایی هیدروکسید کلسیم آزاد شده موجود در بتن را مصرف می‌کند و از خاصیت قلیایی آن می‌کاهد. همچنین می‌توانند با تشکیل نانو کریستال‌ها مشخصات بتن را ارتقا بخشند. آلومین یک عایق الکتریکی است اما دارای رسانایی گرمایی نسبتاً بالایی است. به دلیل بالا بودن نقطه‌ی ذوب آلومین این ماده مقاومت و ثبات حرارتی بالایی دارد [۳ و ۱]. سختی آلومین در مقیاس ماوس[1]، ۹ است [۱۷]. در این طبقه‌بندی پس از الماس، آلومین در رتبه‌ی دوم قرار دارد. آلومین، پر مصرف‌ترین ساینده مورد استفاده می‌باشد. سختی بالای آلومین باعث شده است تا این ماده به عنوان یک ماده مناسب برای کاربردهای ساینده و ابزارهای برش به حساب آید. همچنین از آلومین به عنوان ماده آسیاب کننده در محدوده وسیعی از فرآیندهای کاهش اندازه ذرات استفاده می‌شود [۵ و ۱]. ویژگی‌هایی که آلومین دارد، باعث شده تا بتوان از آن در کاربردهای بسیاری استفاده کرد.

تاکنون مطالعات محدودی در زمینه استفاده از نانو اکسید آلومین در بتن صورت گرفته است. در بررسی‌های انجام شده، اذعان شده که نانو اکسید آلومین در بتن تأثیر قابل توجهی بر روی مقاومت فشاری خواهد داشت [۶]. نظری و همکارانش در تحقیقات دیگری تأثیر استفاده از سیمان آمیخته به نانو اکسید آلومین را بررسی کردند. نتایج حاکی از آن می‌باشد که مقاومت

1 ماوس یک نوع مقیاس سنجش میزان سختی ماده است و بر مبنای مقاومت یک ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک در سطح آن به دست می‌آید.

فشاری با افزایش نانو اکسید آلومین ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. البته این افزایش در سنین بالا کمتر می‌باشد ولی در سنین پایین افزایش مقاومت فشاری بیشتر می‌باشد که این حاکی از تأثیر زود سفت شدن خمیر سیمان در بتن و افزایش گیرایش اولیه بتن می‌باشد [۱]. در تحقیقات دیگری تأثیر نانو اکسید آلومین بر بتن خود متراکم برای سنین مختلف بررسی شده است که نتایج حاکی از کاهش مقاومت فشاری بتن خودمتراکم می‌باشد. البته تنها برای مقدار ۲٪ نانو اکسید آلومین مقاومت در سنین اولیه بیشتر از نمونه کنترلی بوده است [۷].

سارگونان.ک[1] و همکاران در سال ۲۰۲۲ میلادی به بررسی آزمایشگاهی مشخصات مکانیکی بتن با استفاده از نانو اکسید آلومین و نانو رس پرداختند. هدف این تحقیق ارتقای مشخصات مکانیکی بتن و مقایسه تاثیر افزودن نانو اکسید آلومین و نانو رس جایگزین بخشی از سیمان بوده است. دوزهای مصرفی نانو ماده در این تحقیق به صورت تک و در بخش دیگری به صورت ترکیب مساوی در نسبت‌های مختلف وزنی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد جایگزین سیمان گردیده است. سپس در طول مدت ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه آزمایشات مقاومت فشاری، کششی مدول الاستیسیته، جذب آب انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن نانو اکسید آلومین به میزان ۱٪ و نانو رس به میزان ۲٪ و ترکیب هر دو به میزان ۱/۵٪ باعث خواهد شد تا بتن به بیشترین مقاومت فشاری و کششی دست یابد. همچنین استفاده از نانو اکسید آلومین و نانو رس، خصوصیات مکانیکی بتن را تا حدود ۳۰٪ و به طور موثر بهبود می‌دهد [۵].

موزنسکی.ا[2] و همکاران در سال ۲۰۱۹ میلادی به بررسی تاثیر نانو اکسید آلومین بر روی بتن‌های با مقاومت بالا (پرمقاومت) پرداختند. در این تحقیق نقل شده که افزایش تراکم بتن توسط ریز ساختار نانو مواد باعث کاهش ترک‌های موئینه خواهد شد و بعضاً می‌تواند جلوی رشد ترک‌ها را هم بگیرد. همچنین نانو اکسید آلومین پتانسیل قابل توجهی در افزایش میزان مقاومت فشاری مواد سیمانی را دارد. در این تحقیق، اثر افزودن نانو اکسید آلومین در بتن به میزان ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزنی جایگزین بخشی از سیمان بررسی شده است. همچنین به جهت طراحی بتن مستحکم با مقاومت بالا نیاز به دانه‌بندی دقیق سنگدانه، استفاده از سیمان خاص و مقادیر به اندازه دوده سیلیس و فوق روان کننده توام با عمل‌آوری تحت فشار بخار آب نیاز است که در این تحقیق رعایت و انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از مقادیر کمی از نانو اکسید آلومین در بتن می‌تواند مقاومت فشاری را به بیش از ۲۵ مگاپاسکال افزایش دهد که این مقاومت در استفاده دوز کمتری از نانو اکسید آلومین در مقایسه با دوده سیلیس به دست آمد. لذا تصور می‌شود که ماتریس سیمانی با مقاومت بالا به دلیل تقویت لایه‌های هیدرات سیلیکات کلسیم که در اطراف نانو مواد تشکیل شده‌اند، اتفاق می‌افتد. این تحقیق نشان داد که استفاده از نانو اکسید آلومین در دوز بسیار کم به میزان ۰/۲۵٪ وزنی سیمان باعث می‌شود تا ۳۰٪ افزایش مقاومت فشاری حاصل شود [۹].

بهفرنیا.ک[3] و همکاران در سال ۲۰۱۳ میلادی به بررسی اثرات نانو سیلیس و نانو اکسید آلومین بر مقاومت و دوام بتن در برابر سیکل ذوب و انجماد پرداختند. در این تحقیق نانو ذرات به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در نسبت‌های وزنی ۱، ۲ و ۳ درصد استفاده شده است. همچنین جهت سنجش دوام بتن در برابر یخ زدگی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C666 تحت سیکل‌های انجماد و ذوب در آب قرار گرفتند و میزان مقاومت فشاری، کاهش جرم، تغییر طول و جذب آب نمونه‌ها پس از ۳۰۰ سیکل از چرخه‌های انجماد و ذوب اندازه‌گیری شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقاومت بتن دارای نانو ذرات به دلیل ریزساختار آن‌ها، متراکم‌تر و به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که مقاومت یخ زدگی بتن دارای ۳٪ وزنی پودر نانو اکسید آلومین تا ۱۱۷٪ بیشتر از بتن دارای همان مقدار نانو سیلیس است اما میزان مقاومت فشاری بتن معمولی دارای ۳٪ وزنی پودر نانو سیلیس تا ۵۴٪ بیشتر از بتن دارای همان مقدار نانو اکسید آلومین می‌باشد [۸].

قدیم تکمه داش.ف[4] و همکاران در سال ۱۳۹۸ شمسی به بررسی برخی از خصوصیات دوام رویه‌های بتنی حاوی نانو مواد پرداختند. در این تحقیق استفاده از ظرفیت نانو مواد جهت تاثیر میزان نفوذپذیری، مقاومت در برابر سایش و مقاومت فشاری رویه‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. در همین راستا از چهار نوع نانو ماده به صورت فلزات سیلیسیوم، تیتانیوم، آلومینیوم و آهن با درصدهای مختلف استفاده شده است که به صورت یکنواخت پخش و به مخلوط اضافه شده‌اند. برای کاهش هزینه‌ی تمام شده و استفاده‌ی کمتر از نانو مواد، نمونه‌ها در دو لایه ساخته شده‌اند. به این صورت که از یک لایه بتن خود تراکم دارای نانو مواد به ضخامت ۱ سانتی‌متر بر روی نمونه‌های بتنی معمولی که ضخامت آن بسته به آزمون‌های مختلف متفاوت می‌باشد، استفاده شده است. نتایج نشانگر بهبود مشخصه‌های رویه بتنی حاوی نانو مواد در مقایسه با نمونه کنترل است. برای

1 K.Sargunan
2 Scott Muzenski
3 Kiachehr Behfarnia
4 Farzin Ghadim Takmeh Dash

مثال، در نمونه‌های حاوی نانو تیتانیا به مقدار ۳٪ وزنی سیمان، مقاومت در برابر نفوذپذیری به میزان ۸۴٪ افزایش یافته است. همچنین مقاومت در برابر سایش برای نمونه‌ی حاوی ۱٪ نانو سیلیکا به مقدار ۱/۸۸٪ و مقاومت فشاری نمونه‌ی حاوی ۳٪ نانو سیلیکا به میزان ۸۸٪ افزایش یافته است [۶].

کالوندی.م[1] و همکاران در سال ۱۳۹۲ شمسی به بررسی برخی خواص مهندسی بتن معمولی حاوی نانو اکسید آلومین و نانو سیلیس پرداختند. در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر نانو ذرات آلومین و سیلیس بر خواص مهندسی بتن معمولی نمونه‌های بتن با ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی نانوسیلیس و ۰/۵، ۱، ۱/۵ درصد وزنی نانو اکسید آلومین جایگزین سیمان گردیده و عمل‌آوری شدند. در ادامه نتایج آزمایشات مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روزه، مقاومت کششی ۲۸ روزه، تعیین درصد جذب آب ۲۸ روزه و نفوذپذیری تحت فشار آب ۲۸ روزه با نمونه شاهد مقایسه گردید. نتایج نشان داد که نانو سیلیس به دلیل خاصیت پرکنندگی و پوزولانی بالا با کریستال‌های هیدروکسید کلسیم واقع در ناحیه انتقال واکنش داده، ژل سیلیکات کلسیم هیدراته را تولید و باعث متراکم‌تر شدن ساختار بتن می‌گردد. نانو اکسید آلومین نیز با همگن‌سازی مناسب، به عنوان پر کننده برای بهبود ریزساختار بتن و بهبود دهنده واکنش پوزولانی عمل می‌کند. همچنین با افزایش درصد نانو ذرات سیلیس و آلومین مقاومت فشاری و کششی در کلیه نمونه‌ها افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش درصد نانو ذرات، جذب آب و نفوذپذیری نمونه‌ها نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه‌گیری این تحقیق آمده است که نانو ذرات سیلیس عملکرد بهتری نسبت به نانو ذرات آلومین دارند که می‌تواند به دلیل بالا بودن خاصیت پوزولانی نانوسیلیس نسبت به نانو اکسید آلومین باشد [۱۰].

با توجه به پیشینیه موضوع می‌توان دریافت که عمدتاً دوز مصرفی نانو اکسید آلومین در بتن بسیار متغیر است و در بعضی از مراجع به دوز مصرفی بالای ۱٪ و عمده تحقیقات نسبت وزنی کمتر از ۱٪ را توصیه کرده‌اند. بنابراین بهتر است نوع و میزان استفاده از این ماده در بتن بر اساس آزمایش یا توصیه کارخانه سازنده صورت گیرد زیرا با توجه به نوع و ویژگی محصول، روش ساخت، میزان خلوص و پایه شیمیایی آن می‌تواند میزان اثرگذاری آن تغییر یابد. همچنین جدید بودن و گران بودن استفاده از این تکنولوژی همواره یکی از چالش‌هایی است که باید قبل از ورود به صنعت برای آن پاسخ پیدا کرد. از طرفی میزان اثرگذاری این ماده در بتن در طی مدت زمان طولانی (گذشت چندین سال) همواره از ابهامات استفاده از این ماده است که تاکنون پاسخی برای آن یافت نشده است. بنابراین در این تحقیق با هدف بهینه‌یابی میزان استفاده از نانو اکسید آلومین و تاثیر آن بر روی مشخصات بتن خصوصاً مقاومت سایشی برای بهره‌برداری در پوشش و کف‌سازی‌های بتنی این مطالعه انجام گرفته است. همچنین در ادامه جهت کاهش هزینه ساخت و اقتصادی نمودن این طرح به بررسی پوشش لایه نانو اکسید آلومین به صورت رقیق شده طی لایه‌های مختلف روی بتن آزمایش و نتایج آن مورد مقایسه قرار گرفته است. استفاده از درصدهای مختلف نانو اکسید آلومین برای بهینه‌یابی ساخت بتن (قبل از ساخت) و بررسی اثر استفاده از لایه پوششی نانو اکسید آلومین رقیق شده جهت ترمیم سطح کفپوش‌های بتنی (بعد از ساخت) از جنبه نوآوری این تحقیق می‌باشد. همچنین تاکنون از نانو اکسید آلومین در خصوص پوشش بر روی بتن استفاده نشده است. لذا مقایسه بین طرح مخلوط ترکیبی با پوشش‌های چند لایه می‌تواند در انتخاب و تصمیم‌گیری جهت استفاده در صنایع مفید و موثر واقع شود.

۲- مواد و مصالح

۲- ۱- شن

درشت دانه مورد استفاده جهت ساخت بتن مورد آزمایش در این تحقیق، مخلوط نخودی و بادامی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر می‌باشد که از معدن مرادی (دوکوهک) تهیه گردیده است. وزن مخصوص ظاهری در حالت SSD ، ۲۷۳۰ کیلوگرم در هر متر مکعب و در حالت خشک نیز ۱۳۵۰ کیلوگرم در هر متر مکعب می‌باشد. میزان جذب آب درشت دانه نیز برابر با ۲/۳٪ می‌باشد.

۲- ۲- ماسه

ماسه مورد استفاده برای ساخت بتن در این آزمایش از نوع ماسه شکسته کوهی معدن مرادی (دوکوهک) مورد استفاده قرار گرفته. ماسه مذکور دارای وزن مخصوص ظاهری با سطح اشباع (SSD) ۲۵۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب و در حالت خشک نیز ۱۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شده است. میزان جذب آب ماسه مطابق با استاندارد ASTM-C128 نیز ۱/۵۷٪ می‌باشد. در این آزمایش، حداکثر اندازه دانه‌بندی ماسه بین ۰ تا ۴/۷۵ میلی‌متر می‌باشد. مدول نرمی ماسه استفاده شده در این تحقیق به استناد از استاندارد ASTM-C136 نیز ۲/۹ می‌باشد.

1 Mohsen Kalvandi

جدول ۱. مشخصات شن مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن

Table 1. specifications of gravel used in concrete production

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	میزان جذب آب	وزن مخصوص SSD	وزن مخصوص خشک
بادامی و نخودی	mm	%	kg/m³	kg/m³
	۱۹	۲/۳	۲۷۳۰	۱۳۵۰

جدول ۲. مشخصات ماسه مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن

Table 2. specifications of sand used in concrete production

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	مدول نرمی	وزن مخصوص خشک	وزن مخصوص SSD	جذب آب
	mm		kg/m³	kg/m³	%
ماسه	۴/۷۵	۲/۹	۱۶۵۰	۲۵۹۰	۱/۵۷

جدول ۳. ساختار شیمیایی سیمان تیپ دو فیروزآباد [۱۶]

Table 3. Chemical structure of Firoozabad type two cement [16]

SiO_4	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	L.O.I	I.R	C_3S
٪۲۴	٪۷	٪۵	٪۳	٪۳	٪۲	٪۰/۵	٪۵۵

۲- ۳- ماسه سیلیسی

ماسه مورد استفاده برای تهیه ملات ماسه و سیمان در این آزمایش از نوع ماسه سیلیسی می‌باشد. ماسه سیلیسی، یک نوع ماسه طبیعی و دارای ذرات گرد گوشه، تمیز و خالص و کاملاً همگن است که اندازه دانه‌های آن بین ۰/۰۸ تا ۲ میلی‌متر می‌باشد. این محصول از لحاظ کیفی با کلیه الزامات استاندارد ISO-9001 مطابقت دارد. وزن مخصوص آن ۲۶۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب و میزان رطوبت آن ۰/۲٪ رطوبت و میزان جذب آب آن ۰/۷٪ می‌باشد [۱۸]. جهت ساخت ملات، ماسه مذکور در حالت اشباع (SSD) مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- ۴- سیمان

سیمان مصرفی در آزمایش انجام شده از نوع سیمان تیپ ۲ فیروزآباد می‌باشد. چگالی این سیمان ۳/۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب است. آنالیز شیمیایی این سیمان در جدول شماره ۳ که منطبق بر شناسه فنی شرکت سازنده این محصول می‌باشد ضمیمه شده است [۱۶].

۲- ۵- انو اکسید آلومین

نانو اکسید آلومین به کار رفته در این آزمایش، به صورت پودر دارای خلوص بیش از ۹۹٪ استفاده شده است. این ماده ساختار کروی کریستالی آلفا دارد و حداکثر اندازه آن ۵۰ نانومتر می‌باشد. این ماده آب دوست است که جهت حفظ کارایی یا اسلامپ بتن از فوق روان کننده استفاده شده است. سایر مشخصات فیزیکی و شیمیایی این محصول مطابق با جدول شماره ۴ و ۵ است [۱۷].

جدول ۴. خصوصیات شیمیایی نانو اکسید آلومین مورد استفاده [۱۷]

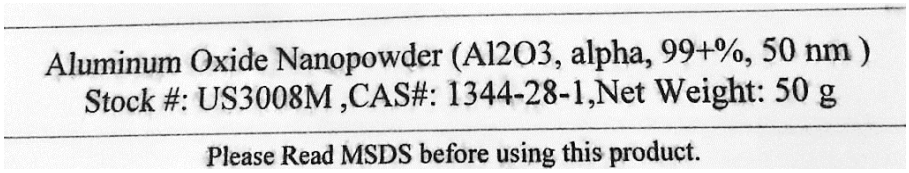
Table 4. Chemical properties of nano oxide aluminum used [17]

Al_2O_3	B_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	SiO_2
٪۹۹/۹۰	٪۰/۰۱	٪۰/۰۱	٪۰/۰۱	٪۰/۰۲	٪۰/۰۳	٪۰/۰۲

جدول ۵. خصوصیات فیزیکی نانو اکسید آلومین مورد استفاده [۱۷]

Table 5. Physical properties of nano oxide aluminum used [17]

رنگ ظاهری	ساختار	مساحت سطح ویژه	قطر دانه	خلوص ماده
		m^2/gr	nm	%
سفید	آلفا	۱۹	۵۰	۹۹



شکل ۲. برچسب محصول مشخصات و نام تجاری نانو آلومین مورد استفاده

Fig. 2. Product label, specification and brand name of nano aluminum used

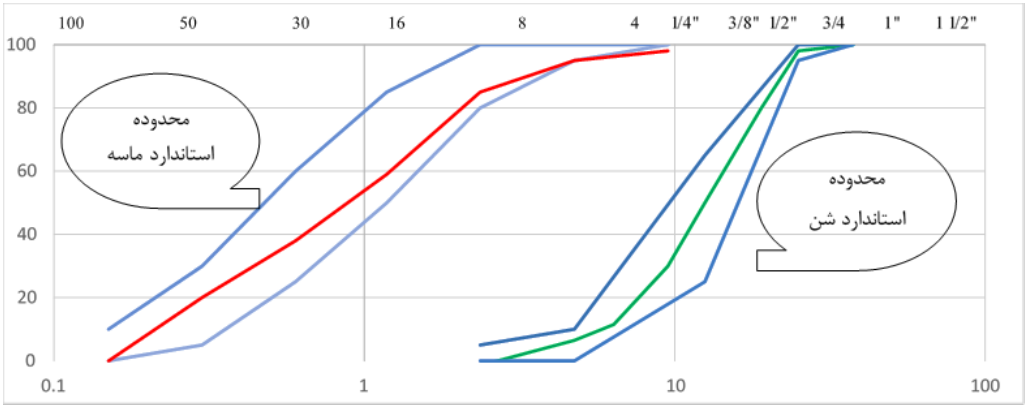
جدول ۶. خصوصیات فیزیکی فوق روان کننده مورد استفاده [۱۹]

Table 6. of the physical properties of the superlubricant used [19]

مقدار جایگزینی	حالت فیزیکی	PH	یون کلر	استاندارد	وزن مخصوص	رنگ
۰/۱ تا ۰/۵٪ وزن سیمان	مایع	۵/۵۸	ندارد	ASTM C1017	۱/۱ gr/cm^3	قهوه ای روشن

۲- ۶- فوق روان کننده

در مطالعات گذشته، تأثیر فوق روان کننده بر روی پخش نانو مواد و پایداری پخش در مدت زمان مورد نیاز مورد بررسی و نتیجه گیری قرار داده شده است [۱]. برای رسیدن به پخش یکنواخت و پایدار نانو مواد در مطالعه حاضر از فوق روان کننده استفاده شده است. همچنین استفاده از روان کننده‌ها یا کاهنده‌های آب، به جهت افزایش کیفیت خصوصیات مکانیکی و رئولوژی بتن و نیز دستیابی به روانی مطلوب بسیار مرسوم بوده و مورد استفاده قرار گرفته است. فوق روان کننده مورد استفاده در این تحقیق بر پایه پلی کربوکسیلات اِتر می‌باشد که جزء جدیدترین نسل فوق روان کننده به حساب می‌آیند. این نوع فوق روان کننده با داشتن زنجیره‌های بلند جانبی در ساختار مولکولی علاوه بر دافعه شدید ذرات سیمان و پخش و یکنواخت کردن آن درون بتن با ایجاد ممانعت فضایی بین ذرات مانع از نزدیک شدن و چسبیدن دوباره ذرات شده و بیشترین اثر روان کنندگی را ایجاد می‌کند [۱۹].



نمودار ۱. دانه‌بندی شن و ماسه مورد استفاده جهت ساخت بتن و انطباق آن با محدوده استاندارد ASTM-C33

Chart 1. Granulation of sand used to make concrete and its compliance with ASTM-C33 standard range

۲- ۷- دانه‌بندی

در آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌ها، مصالح سنگی با ایجاد لرزه توسط الک‌های مختلف شماره‌بندی شده عبور داده می‌شوند و اندازه دانه‌های روی هر الک و مقدار آن مشخص می‌گردد. البته قابل ذکر است که برای دانه‌بندی مصالح درشت دانه یا شن از دستگاه یکنواخت کننده دانه استفاده می‌شود. مطابق با استاندارد ASTM-C33 دانه‌بندی از الک‌های سیمی استاندارد با سوراخ‌های مربعی استفاده می‌گردد که در نمودار شماره ۱ نشان داده شده است. با محاسبه مقادیر درصد تجمعی میزان عبور کرده از هر الک که بر اساس شماره‌بندی استاندارد روی یکدیگر قرار گرفته‌اند، می‌توان این مقادیر را با منحنی استاندارد ASTM-C33 مقایسه نمود [۱۱]. در منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها، محور عمودی نمایش دهنده درصد تجمعی عبور داده شده از هر الک و محور افقی بیانگر اندازه یا شماره الک می‌باشد.

۳- برنامه آزمایشگاهی

طرح مخلوط مورد استفاده برای ساخت بتن در این تحقیق بر مبنای استاندارد وزنی ACI-211 می‌باشد که بر اساس نوع و جنس مصالح، به روش سعی و خطا بهینه‌یابی شده است. حداکثر اندازه اسمی درشت دانه ۱۹ میلی‌متر و نسبت آب به سیمان ۰/۴ در نظر گرفته شد. همچنین به دلیل جذب آب بالای نانو اکسید آلومین در بتن [۱] و لزوم حفظ کارایی بتن از فوق روان کننده بر پایه کربوکسیلات به میزان ۰/۶٪ وزنی سیمان استفاده شد. در جدول شماره ۷ مقادیر مصالح مصرفی برای تهیه یک متر مکعب بتن به ازای طرح مخلوط‌های مختلف آورده شده است.

برای ساخت بتن، ابتدا درشت دانه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در آب غوطه‌ور شده و پس از آبکش کردن و رسیدن به SSD (حالت اشباع با سطح خشک) به همراه ماسه طبیعی به داخل میکسر ریخته شده و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شدند. سپس سیمان و نصف آب مورد نیاز اضافه و پس از ۲ دقیقه مخلوط، فوق روان کننده به همراه پودر نانو اکسید آلومین به همراه نصف دیگر آب اضافه و به مدت ۲ دقیقه دیگر مخلوط شدند. پس از آن آزمایش وزن مخصوص بتن تازه و اسلامپ بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و سپس قالب‌گیری شدند. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده و بعد از آن به مدت ۷ و ۲۸ روز در حوضچه آب عمل‌آوری شدند.

برنامه آزمایشگاهی ساخت بتن شامل ساخت ۶ نمونه ملات ماسه و سیمان و تعداد ۵۶ نمونه بتن مطابق جدول شماره ۸ می‌باشد. در ابتدا جهت به دست آوردن مقدار بهینه استفاده از نانو اکسید آلومین در بتن نیز اقدام به ساخت ملات ماسه و سیمان با ماسه سیلیسی در قالب مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متری گردید. طرح مخلوط مورد استفاده جهت ساخت ملات ماسه سیمان به نسبت ۱:۶ می‌باشد که از ماسه سیلیسی با حداکثر اندازه ۲ میلی‌متر استفاده گردیده است. مقدار مصرف نانو اکسید آلومین در ملات ماسه و سیمان در نسبت‌های مختلف وزنی ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۳ درصد جایگزین بخشی از سیمان قرار گرفت. پس از ۷ روز عمل‌آوری و آزمایش میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها، مشخص گردید که حدود میزان بهینه استفاده از نانو اکسید آلومین در محدوده ۰/۵٪ وزنی جایگزین سیمان می‌باشد. همچنین نتایج به دست آمده از سایر تحقیقات صورت گرفته در وضعیت مشابه موید این موضوع خواهد بود [۱۱، ۵ و ۲]. بدین ترتیب برنامه آزمایشگاهی این تحقیق بر مبنای درصدهای ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ وزنی سیمان در نظر گرفته شد.

جدول ۷. طرح مخلوط مورد استفاده جهت انجام آزمایش

Table 7. The mixture design used for the experiment

ردیف	نام	ماسه	شن	سیمان	٪ نانو اکسید آلومین	مقدار نانو اکسید آلومین	آب	فوق روان کننده	توضیحات
		kg/m³	kg/m³	kg/m³	%	kg/m³	kg/m³	kg/m³	
۱	M-SH	۱۲۰۰	-	۲۰۰	۰	۰	۲۶۵	-	طرح مخلوط جهت ساخت ملات ماسه و سیمان
۲	M-NA-0.5	۱۲۰۰	-	۱۹۹	۰/۵	۱	۲۶۵	-	
۳	M-NA-1	۱۲۰۰	-	۱۹۸	۱	۲	۲۶۵	-	
۴	M-NA-1.5	۱۲۰۰	-	۱۹۷	۱/۵	۳	۲۶۵	-	
۵	M-NA-2	۱۲۰۰	-	۱۹۶	۲	۴	۲۶۵	-	
۶	M-NA-3	۱۲۰۰	-	۱۹۴	۳	۶	۲۶۵	-	
۷	C-SH	۹۷۰	۷۳۰	۴۰۰	۰	۰	۱۶۰	۲/۴	طرح مخلوط جهت ساخت بتن
۸	C-NA-0.25	۹۷۰	۷۳۰	۳۹۹	۰/۲۵	۱	۱۶۰	۲/۴	
۹	C-NA-0.5	۹۷۰	۷۳۰	۳۹۸	۰/۵	۲	۱۶۰	۲/۴	
۱۰	C-NA-0.75	۹۷۰	۷۳۰	۳۹۷	۰/۷۵	۳	۱۶۰	۲/۴	
۱۱	C-NA-1L	۹۷۰	۷۳۰	۴۰۰	یک لایه پوششی آلومین		۱۶۰	۲/۴	لایه پوششی روی بتن
۱۲	C-NA-2L	۹۷۰	۷۳۰	۴۰۰	دو لایه پوششی آلومین		۱۶۰	۲/۴	
۱۳	C-NA-3L	۹۷۰	۷۳۰	۴۰۰	سه لایه پوششی آلومین		۱۶۰	۲/۴	
۱۴	C-NA-4L	۹۷۰	۷۳۰	۴۰۰	چهار لایه پوششی آلومین		۱۶۰	۲/۴	

جدول ۸. مبنای استاندارد و تعداد و ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش

Table 8. Standard basis and number and dimensions of tested samples

ردیف	شرح آزمایش	شماره استاندارد	نمونه ۷ روزه	نمونه ۲۸ روزه	ابعاد نمونه (سانتی‌متر)
۱	تعیین مقاومت فشاری بتن	ASTM-C109	۴	۴	۱۵×۱۵×۱۵ مکعبی
۲	تعیین مقاومت فشاری ملات	ASTM-C109	۶	-	۵×۵×۵ مکعبی
۳	تعیین مقاومت کششی	ASTM-C496	-	۴	۳۰×۱۵ استوانه‌ای
۴	جذب آب بتن سخت شده	ASTM-C642	-	۴	۱۰×۱۰×۱۰ مکعبی
۵	نفوذ آب در بتن سخت شده	BS EN 12390-8	-	۴	۱۰×۱۰×۱۰ مکعبی
۶	تست سایش بتن	ASTM-C779	۱۸	۱۸	۱۸×۹×۲/۵ مکعب مستطیل

شکل ۳. نمونه های بتنی آغشته به لایه های پوششی نانو اکسید آلومین رقیق شده

Fig. 3. Concrete samples coated with diluted aluminum oxide nanocoating layers

در ادامه روند این تحقیق جهت کاهش هزینه و کاهش میزان استفاده از نانو اکسید آلومین در بتن و بررسی طرح اقتصادی افزایش دوام سایشی آن، اقدام به ساخت نمونه‌های بتنی با قالب به ابعاد ۲/۵ ×۹ ×۱۸ سانتی‌متر مکعب گردید. سپس نمونه‌ها پس از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری توسط نانو اکسید آلومین رقیق شده طی یک الی چهار لایه آغشته شدند. لایه پوششی نانو اکسید آلومین به وسیله فوق روان کننده در نسبت حجمی ۳:۴ (۷۵٪ نانو اکسید آلومین، ۲۵٪ فوق روان کننده) رقیق شده و به مدت ۳ دقیقه مخلوط شدند تا محلولی یکدست و یکنواخت به دست آید. سپس این محلول بر روی سطح بتن اسپری و به طور یکنواخت پخش گردید و به مدت ۲۴ ساعت در معرض هوای آزاد قرار داده شد تا محلول کاملاً خشک و به سطح بتن چسبیده شود. شکل شماره ۳ نمونه‌های بتنی آغشته به لایه‌های پوششی نانو اکسید آلومین رقیق شده را نشان می‌دهد.

۴- یافته‌ها

۴- ۱- مقاومت فشاری ملات

طبق نتایج به دست آمده که در جدول شماره ۹ آورده شده نیز مشخص گردید که حدود بهینه و موثر این افزودنی در بتن کمتر از ٪۱ می‌باشد و نیز بهینه‌ترین حالت آن ۰/۵٪ وزنی سیمان موجود در ملات یا بتن می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن پودر نانو اکسید آلومین به طرح مخلوط ذکر شده باعث رشد حداکثری ۴۴٪ نسبت به نمونه شاهد در ملات ماسه سیمان می‌گردد. اما با افزایش بیش از حد مجاز این ماده در طرح مخلوط به دلیل کاهش حجم سیمان و نیز کاهش چسبندگی ملات به تدریج از میزان مقاومت فشاری کسب شده، کاسته می‌شود.

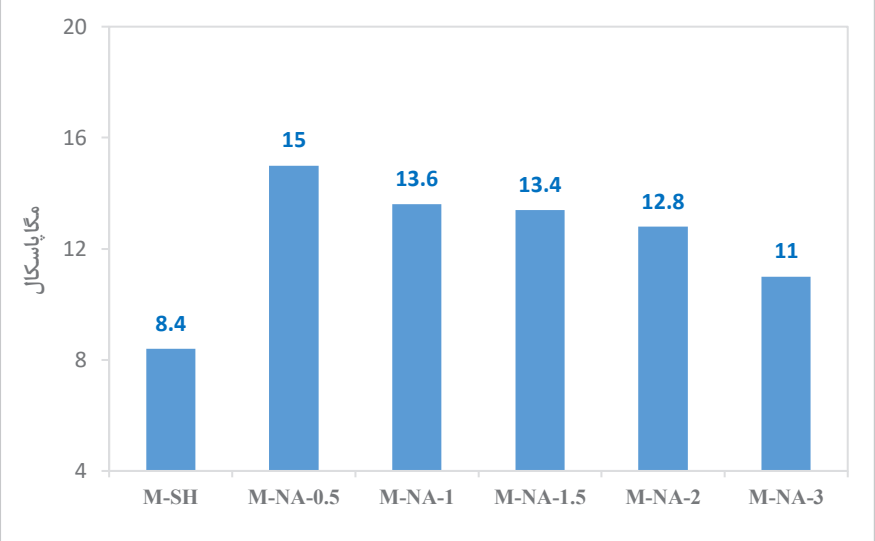
۴- ۲- مقاومت فشاری بتن

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری از جک هیدرولیکی دیجیتال استفاده گردید. سرعت بارگذاری ۰/۸ بر ثانیه اعمال شد که به محض رخ دادن اولین ترک در نمونه بتنی، اعمال نیرو به صورت خودکار قطع می‌شود. نتایج به دست آمده برحسب جدول شماره ۱۰ نشان می‌دهد که نمونه دارای ۰/۲۵ افزودنی پودر نانو در سن ۷ روز ۱۵٪ و در سن ۲۸ روز ۱۴٪ افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد را تجربه می‌کند، اما میزان رشد مقاومت طرح C-NA-0.5 که دارای ۰/۵٪ افزودنی پودر نانو می‌باشد در سن ۷ روزه در مقایسه با نمونه شاهد نیز ۳۳٪ و در سن ۲۸ روزه هم نیز ۳۳٪ افزایش مقاومت را نشان می‌دهد. در طرح C-NA-0.75 که دارای ۰/۷۵٪ افزودنی پودر نانو می‌باشد نیز علی‌رغم دارا بودن مقادیر بیشتری از افزودنی نانو در مقایسه با طرح C-NA-0.5 نیز شاهد عدم تغییر یا حتی کاهش مقاومت می‌باشیم. این مهم می‌تواند به دلیل عدم تاثیر پودر نانو در مقادیر بیش از ۰/۵٪ وزنی سیمان در بتن باشد. همچنین کاهش حجم سیمان باعث کاهش چسبندگی بین سنگدانه‌های موجود در بتن می‌گردد که در نتیجه کاهش مقاومت را به همراه دارد. در این طرح مخلوط مقاومت فشاری نمونه ۷ روزه نسبت به نمونه شاهد ۲۶٪ و در سن ۲۸ روزه ۲۹٪ افزایش مقاومت داشته است.

جدول ۹. مقایسه نتایج به دست آمده از تست مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان

Table 9. Comparison of the results obtained from the compressive strength test of cement-sand mortar

ردیف	نام طرح	سن نمونه	مقاومت فشاری	رشد مقاومت
		days	Mpa	%
۱	M-SH	۷ روزه	۸/۴	–
۲	M-NA-0.5		۱۵	۴۴
۳	M-NA-1		۱۳/۶	۳۸
۴	M-NA-1.5		۱۳/۴	۳۷
۵	M-NA-2		۱۲/۸	۳۴
۶	M-NA-3		۱۱	۲۴



نمودار ۲. مقایسه نتایج به دست آمده از تست مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان

Chart 2. Comparison of the results obtained from the compressive strength test of cement-sand mortar

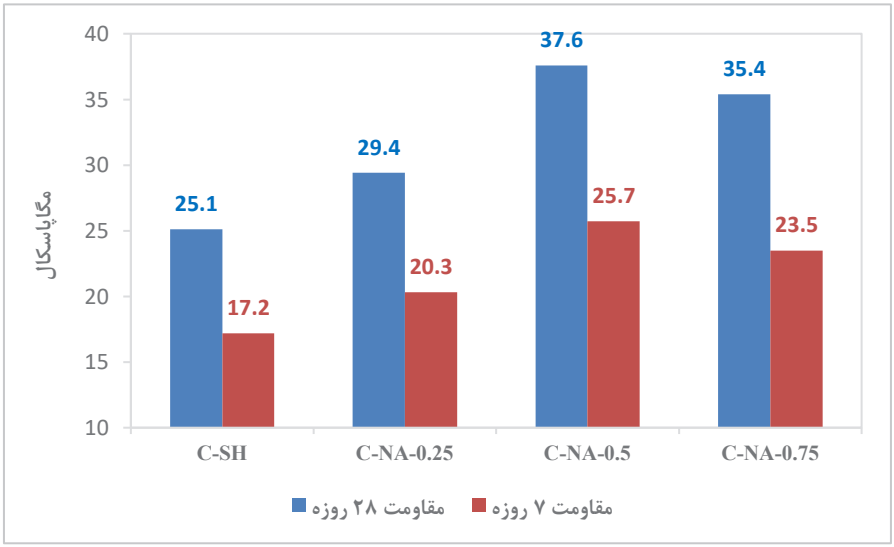
۴- ۳- مقاومت کششی

آزمون کشش بتن به روش تقسیم یا دو نیم کردن بر نمونه‌ی استوانه‌ای، روشی برای تعیین مقاومت کششی بتن می‌باشد. رویه آزمون مبتنی بر استاندارد ASTM-C496 می‌باشد. مطابق با جدول شماره ۱۱ میزان مقاومت کششی بتن شاهد ۳/۷ مگاپاسکال به دست آمد. در ادامه نیز میزان مقاومت کششی نمونه C-NA-0.25 با ۸٪ رشد، نمونه C-NA-0.5 با ۲۱٪ رشد و نمونه C-NA-0.75 با ۱۷٪ رشد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشته‌اند. مشخص است که مقاومت کششی و فشاری بتن رابطه‌ی مستقیمی با هم دارند و عواملی که باعث بروز چنین رفتاری می‌شوند نیز همانند عواملی هستند که باعث افزایش مقاومت فشاری بتن گردیده است. بنابراین می‌توان از جمله دلایل افزایش میزان رشد کششی در نمونه‌های حاوی پودر نانو اکسید آلومین را به دلیل خاصیت پرکنندگی حفرات خالی و فضای مویینه و نیز خاصیت چسبندگی و کمک به بهبود عمل هیدراسیون سیمان را نیز نام برد.

جدول ۱۰. مقایسه نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

Table 10. Comparison of compressive strength results of concrete samples

ردیف	نام طرح	سن نمونه	وزن مخصوص	اسلامپ	مقاومت فشاری	رشد مقاومت
		days	kg/m³	mm	MPa	%
۱	C-SH	۷ روزه	۲۲۶۸	۹۱	۱۷/۲	-
		۲۸ روزه			۲۵/۱	-
۲	C-NA-0.25	۷ روزه	۲۲۶۶	۸۲	۲۰/۳	۱۵
		۲۸ روزه			۲۹/۴	۱۴
۳	C-NA-0.5	۷ روزه	۲۲۶۳	۶۶	۲۵/۷	۳۳
		۲۸ روزه			۳۷/۶	۳۳
۴	C-NA-0.75	۷ روزه	۲۲۶۰	۵۱	۲۳/۵	۲۶
		۲۸ روزه			۳۵/۴	۲۹



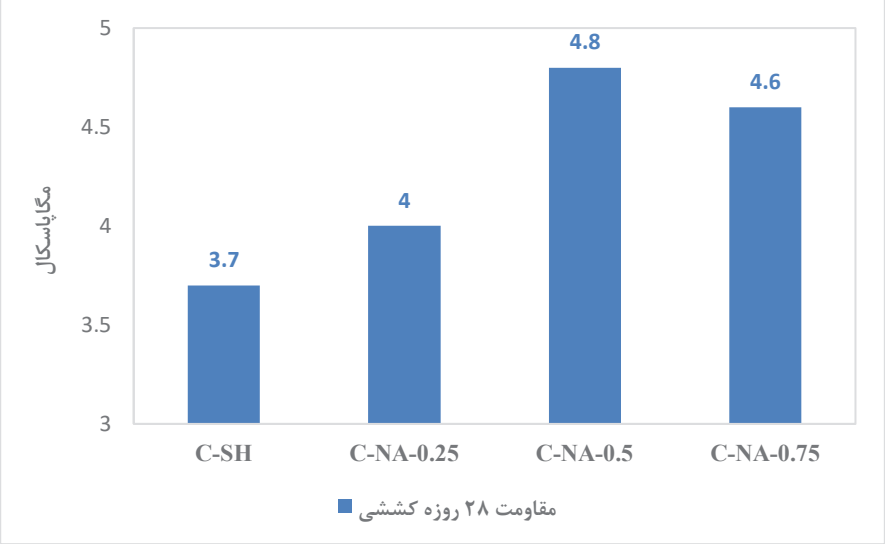
نمودار ۳. مقایسه نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

Chart 3. Comparison of compressive strength results of concrete samples

جدول ۱۱. مقایسه نتایج مقاومت کششی نمونه‌های بتنی

Table 11. Comparison of tensile strength results of concrete samples

ردیف	نام طرح	سن نمونه	مقاومت کششی	رشد مقاومت
		days	MPa	%
۱	C-SH	۲۸ روز	۳/۷	-
۲	C-NA-0.25	۲۸ روز	۴	۸
۳	C-NA-0.5	۲۸ روز	۴/۵	۱۷
۴	C-NA-0.75	۲۸ روز	۴/۷	۲۱



نمودار ۴. مقایسه نتایج مقاومت کششی نمونه‌های بتنی

Chart 4. Comparison of tensile strength results of concrete samples

۴- ۴- جذب آب بتن سخت شده

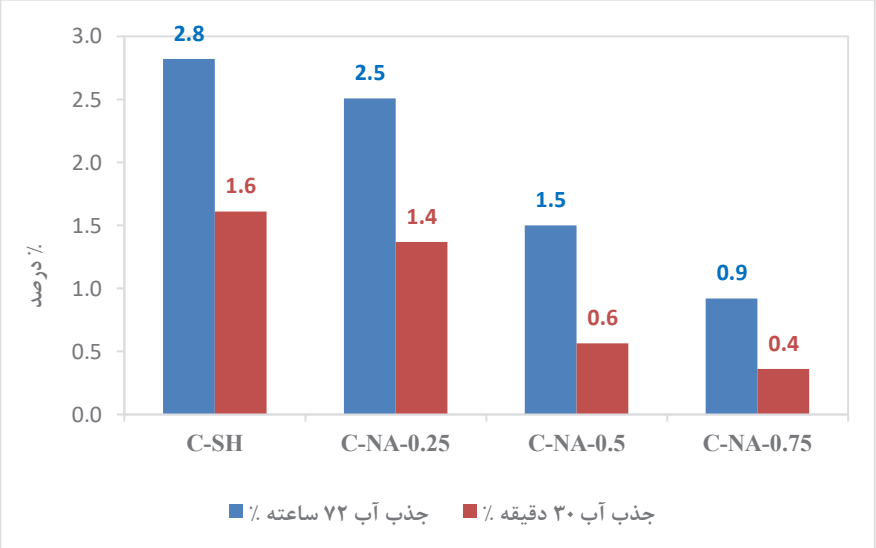
آزمایش جذب آب مطابق آنچه بیان شد نیز بر مبنای استاندارد ASTM-C642 انجام گرفته است. نمونه‌ها پس از خشک شدن در گرمای ۱۱۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت نیز طی ۳۰ دقیقه و ۷۲ ساعت تحت نفوذ آب قرار گرفتند و وزن هر کدام از آن‌ها نیز یادداشت گردید. بر مبنای نتایج به دست آمده نیز مشخص گردید که افزودن پودر آلومین، میزان تخلخل موجود در بتن را کاهش می‌دهد که پیرو این کاهش، میزان جذب آب بتن هم کاهش می‌یابد [۱۵].

با توجه به این آزمایش نیز مشخص گردید که نمونه بتن شاهد دارای ۱/۶٪ جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای و ۲/۸٪ جذب آب ۲۸ روزه می‌باشد. در نمونه‌های دارای ۰/۲۵٪، ۰/۵٪ و ۰/۷۵٪ نیز میزان جذب آب ۳۰ دقیقه و ۷۲ ساعته به ترتیب ۱/۴٪، ۲/۵٪ و ۰/۶٪ و ۱/۵ ٪ و ۰/۴٪، ۰/۹٪ کاهش جذب آب داشته‌اند. با این حال می‌توان اذعان داشت که افزودنی‌های نانو سبب می‌گردند تا میزان جذب آب بتن کاهش یابد. میزان تراکم ایجاد شده به دلیل پُر شدگی قسمت‌های مویینه بتن توسط نانو اکسید آلومین باعث جذب آب کمتر بتن نیز می‌گردد.

جدول ۱۲. مقایسه میزان جذب آب نمونه‌های بتنی

Table 12. Comparison of water absorption of concrete samples

ردیف	نام طرح	سن نمونه	وزن نمونه خشک	وزن نمونه اشباع ۳۰ دقیقه	وزن نمونه اشباع ۷۲ ساعت	٪ جذب رطوبت ۳۰ دقیقه	٪ جذب رطوبت ۷۲ ساعت
		days	gr	gr	gr	%	%
۱	C-SH	۲۸ روز	۲۴۴۵	۲۴۸۵	۲۵۱۶	۱/۶	**۲/۸**
۲	C-NA-0.25	۲۸ روز	۲۴۴۹	۲۴۸۳	۲۵۱۲	۱/۴	**۲/۵**
۳	C-NA-0.5	۲۸ روز	۲۴۷۱	۲۴۸۵	۲۵۰۷	۰/۶	**۱/۵**
۴	C-NA-0.75	۲۸ روز	۲۴۷۸	۲۴۸۷	۲۵۰۱	۰/۴	**۰/۹**

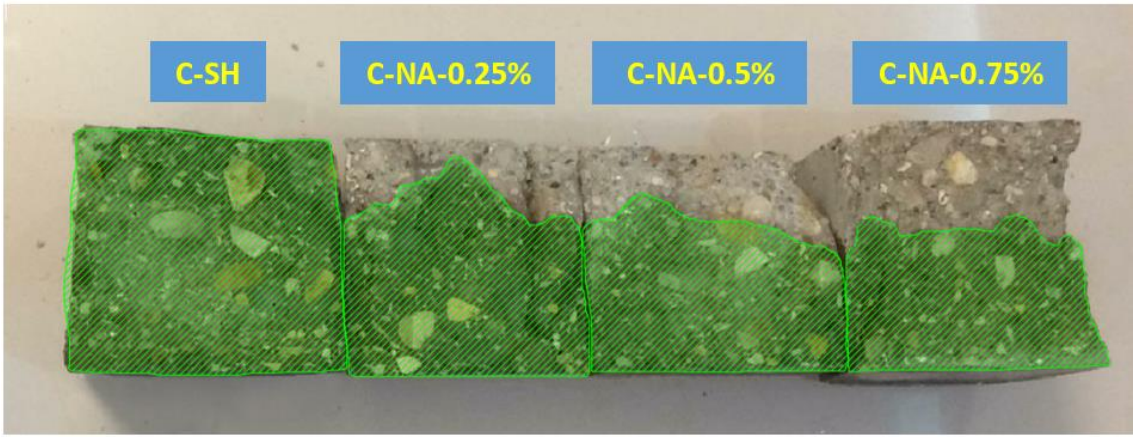


نمودار ۵. مقایسه میزان جذب آب نمونه‌های بتنی

Chart 5. Comparison of water absorption of concrete samples

۴- ۵- نفوذ آب در بتن سخت شده

برای سنجش میزان نفوذ آب در بتن از استاندارد بریتانیایی BS EN 12390-8 استفاده شده است. در این روش نمونه مکعبی درون دستگاه نفوذپذیری جا گرفته و تحت فشار آب برابر با ۵ بار به مدت ۷۲ ساعت قرار می‌گیرد. سپس بعد از طی این مدت زمان، میزان آب مصرفی که بر حسب میلی‌متر بر روی دستگاه درج می‌گردد، ثبت می‌شود. پس از اتمام آزمایش نفوذپذیری، نمونه از دستگاه خارج می‌گردد و در ادامه سطحی از نمونه که در معرض فشار آب بوده، خشک گردیده تا آب اضافی آن پاک شود. در ادامه نمونه عمود بر سطحی که در معرض فشار آب بود، به دو قسمت تقسیم گردیده و حداکثر عمق نفوذ آب تحت شرایط آزمایش ثبت و به عنوان عمق نفوذ آب در نظر گرفته می‌شود [۳]. شکل شماره ۴ میزان نفوذ آب در نمونه‌های بتن به تفکیک طرح مخلوط‌های ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴. میزان نفوذ آب در نمونه بتن مورد آزمایش

Fig. 4. The amount of water penetration in the tested concrete sample

جدول ۱۳. مقایسه نتایج میزان نفوذ آب در بتن

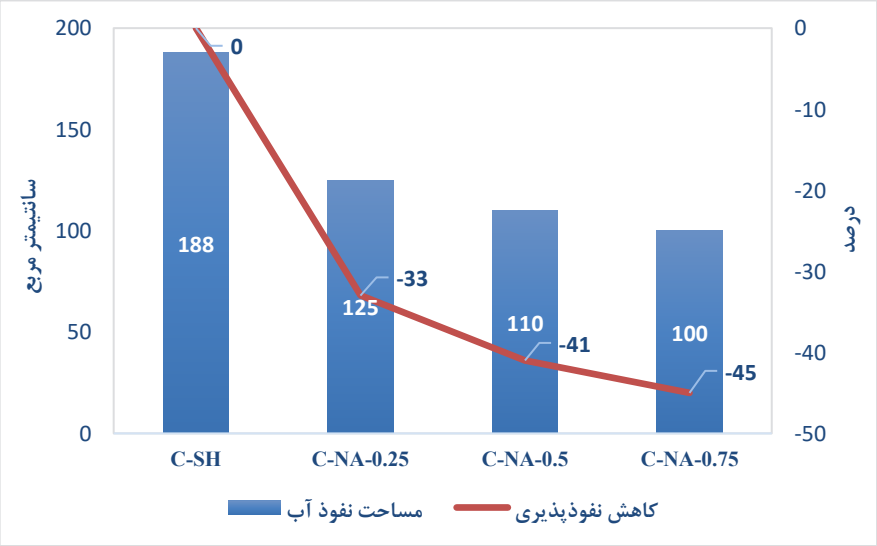
Table 13. Comparison of the results of water penetration in concrete

ردیف	نام طرح	سن نمونه	مساحت نفوذ آب	آب مصرفی	میزان نفوذپذیری
		days	cm²	ml	%
۱	C-SH	۲۸ روز	۱۸۸	۷۵	—
۲	C-NA-0.25	۲۸ روز	۱۲۵	۶۶	-۳۳
۳	C-NA-0.5	۲۸ روز	۱۱۰	۳۵	-۴۱
۴	C-NA-0.75	۲۸ روز	۱۰۰	۲۰	-۴۵

نتایج این آزمایش نشان داد که نمونه C-NA-0.25 در مقایسه با نمونه شاهد ۳۳٪، طرح C-NA-0.5 نیز ۴۱٪ و طرح C-NA-0.75 به میزان ۴۵٪ کاهش میزان نفوذپذیری در مقایسه با طرح شاهد دارند. به استناد از نتایج به دست آمده نیز محرز گردید که افزایش پودر نانو اکسید آلومین در بتن تاثیر موثر و محسوسی در کاهش سرعت نفوذپذیری آب و جلوگیری از گسترش آن در منافذ بتن دارد اما روند سرعت آن تناسبی با افزایش حجم نانو اکسید آلومین در بتن ندارد به طوری که تفاوتی چشمگیری بین طرح C-NA-0.75 با C-NA-0.25 مشاهده نمی‌شود. اما با اطمینان می‌توان به اثر مناسب نانو اکسید آلومین در کاهش میزان نفوذپذیری آب در بتن اشاره کرد.

۴- ۶- مقاومت سایشی بتن

مبنای تست سایش در این تحقیق، استاندارد ASTM-C779 می‌باشد [۱۵]. سایش سطح رویه نمونه بتنی با ابعاد مذکور توسط استوانه دوار فلزی زبر تحت شرایط استاندارد انجام شده است. مدت چرخش، چرخ دوار دستگاه با سرعت ثابت بر روی ۵۰۰ دور تنظیم و سپس نمونه، مورد سایش قرار گرفت. در انتها با اندازه‌گیری وزن نمونه بتنی قبل و بعد از سایش و تفریق این دو از یکدیگر نیز درصد ساییدگی را محاسبه نموده و نتایج مورد بحث و مقایسه قرار خواهند گرفت. شکل شماره ۵ نحوه آزمایش سایش بر روی نمونه‌های بتنی ساخته شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج کسب شده از گروه اول که دارای افزودنی نانو در طرح مخلوط



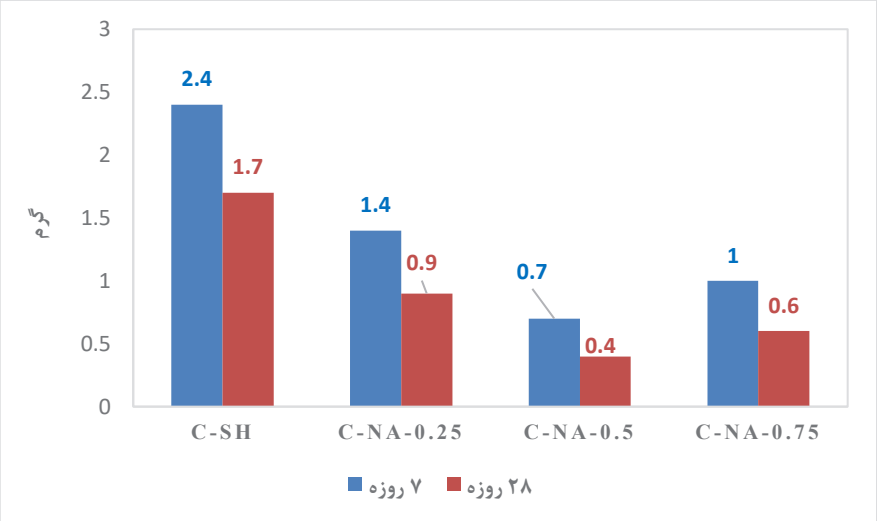
نمودار ۶. مقایسه میزان نفوذپذیری نمونه‌های بتنی با آب

Chart 6. Comparing the permeability of concrete samples with water

شکل ۵. تست سایش بر روی نمونه‌های بتنی مورد آزمایش

Figure 5. Abrasion test on tested concrete samples

بتن می‌باشند نیز مشخص شد که پودر نانو اکسید آلومین باعث افزایش مقاومت سایشی بتن به میزان قابل توجهی می‌گردد. میزان مقاومت سایشی طرح C-NA-0.25 در مقایسه با نمونه شاهد در سن ۷ روز ۴۱/۷٪ و در سن ۲۸ روز ۴۷٪ بهبود یا افزایش داشته است. همچنین طرح C-NA-0.5 در سن ۷ روز، ۷۰/۸٪ و در سن ۲۸ روز، ۷۶/۵٪ افزایش و نیز طرح C-NA-0.75 در سن ۷ روز ۵۸/۳٪ و در سن ۲۸ روز ۶۴/۷٪ افزایش مقاومت سایشی نسبت به نمونه شاهد را نشان می‌دهند. به استناد از نتایج به دست آمده مشخص شد که پودر نانو اکسید آلومین به دلیل سختی بالای خود نیز باعث افزایش سختی سطح بتن می‌گردد، اما این افزایش سختی با ترکیب ۰/۵ ٪ وزنی در ترکیب طرح مخلوط بتن بهترین نتیجه را در بر دارد. با افزایش بیش ۰/۵٪ پودر نانو اکسید آلومین در ترکیب بتن نیز شاهد کاهش چسبندگی بین ذرات بتن و در نتیجه شاهد اُفت مقاومت سایشی بتن خواهیم بود.



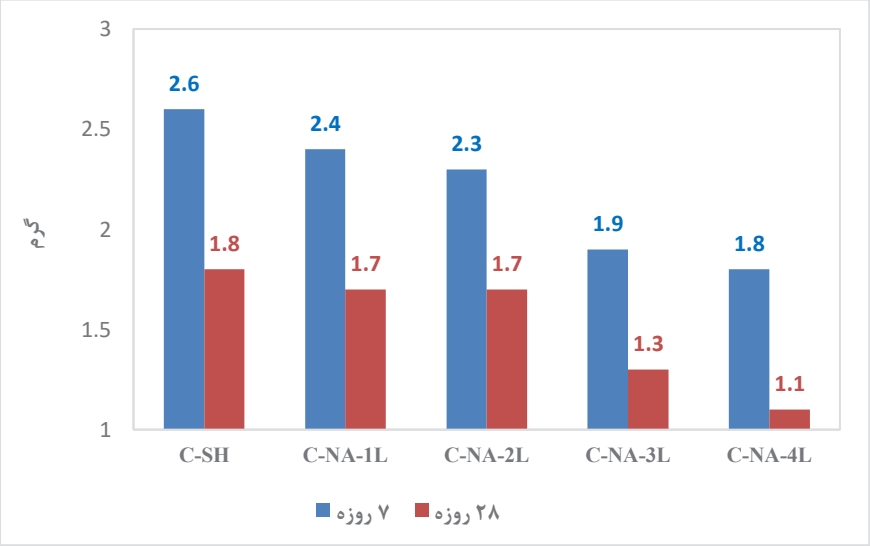
نمودار ۷. مقایسه کاهش وزن نمونه‌های دارای نانو آلومین پس از تست سایش

Chart 7. Comparison of weight loss of samples with nano aluminum after wear test

جدول ۱۴. مقایسه نتایج نمونه‌های دارای نانو اکسید آلومین پس از تست سایش بتن

Table 14. Comparison of the results of samples with aluminum nano oxide after the concrete wear test

ردیف	نام طرح	سن نمونه	نمونه اول	نمونه دوم	میانگین	بهبود مقاومت سایش
		day	gr	gr	gr	%
۱	C-SH	۷ روزه	۲/۳	۲/۵	۲/۴	–
		۲۸ روزه	۱/۷	۱/۷	۱/۷	–
۲	C-NA-0.25	۷ روزه	۱/۴	۱/۴	۱/۴	**۴۱/۷**
		۲۸ روزه	۰/۹	۰/۹	۰/۹	**۴۷**
۳	C-NA-0.5	۷ روزه	۰/۷	۰/۷	۰/۷	**۷۰/۸**
		۲۸ روزه	۰/۳	۰/۳	۰/۴	**۷۶/۵**
۴	C-NA-0.75	۷ روزه	۱/۱	۰/۹	۱	**۵۸/۳**
		۲۸ روزه	۰/۶	۰/۶	۰/۶	**۶۴/۷**



نمودار ۸. مقایسه کاهش وزن نمونه‌های دارای پوشش نانو آلومین پس از تست سایش

Chart 8. Comparison of weight loss of samples with nano aluminum coating after wear test

در گروه دوم طرح مخلوط نیز نمونه‌های بتنی با یک الی چهار لایه محلول نانو اکسید آلومین پوشش داده شده‌اند. نتایج به دست آمده حاصل از تست سایش این طرح مطابق با جدول شماره ۱۵ می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردید که پوشش نانو اکسید آلومین در مقایسه با طرح مخلوط گروه اول، اثر محسوسی ندارد اما با این حال در مقایسه با نمونه شاهد نیز افزایش مقاومت سایشی در بتن را خواهیم داشت. میزان مقاومت سایشی طرح C-NA-1L در مقایسه با نمونه شاهد در سن ۷ روز ۷/۷٪ و در سن ۲۸ روز ۵/۵٪ بهبود یا افزایش داشته است. همچنین طرح C-NA-2L در سن ۷ روز، ۱۱/۵٪ و در سن ۲۸ روز، ۵/۶٪ افزایش و نیز طرح C-NA-3L در سن ۷ روز ۲۷٪ و در سن ۲۸ روز ۲۸٪ افزایش مقاومت سایشی و طرح C-NA-4L در سن ۷ روز ۳۱٪ و در سن ۲۸ روز ۳۹٪ مقاومت سایشی را نسبت به نمونه شاهد نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لایه‌های نانو اکسید آلومین روی سطح بتن نیز مقاومت سایشی بتن نیز به مراتب افزایش خواهد یافت. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص است که نمونه دارای یک و دو لایه پوشش نانو در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه شاهد اثر محسوسی ندارد، در حالی که میزان این اثرگذاری در سن ۷ روزه بتن موثرتر واقع شده است که از جمله دلایل آن می‌توان به عدم چسبندگی مناسب لایه‌های پوششی به سطح بتن اشاره نمود.

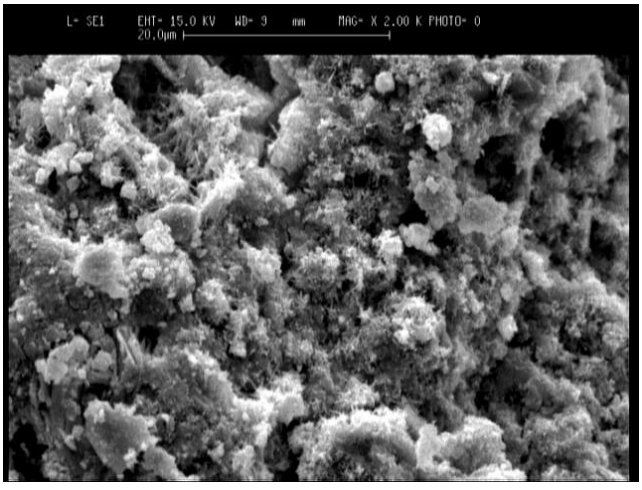
۴- ۷- تصاویر SEM

جهت عکس‌برداری الکترونی روبشی یا SEM نیز نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه شکسته شده در ابعاد حدود ۴ تا ۵ سانتی‌متر جمع‌آوری و برای جلوگیری از عمل هیدراسیون نیز در محلول پروپانل نگهداری شدند. شکل شماره ۶ تا ۹ مربوط به طرح مخلوط نمونه‌های بتن ترکیب شده با نانو اکسید آلومین در دوزهای مختلف وزنی می‌باشند که در مقیاس ۱۰۰۰x برابر بزرگ‌نمایی، نمایش داده شده است. مطابق با شکل شماره ۷ که مربوط به طرح مخلوط بتن دارای ۰/۲۵٪ نانو اکسید آلومین در بتن می‌باشد نیز مشخص است که نحوه پخش شدگی و پوشش نانو مواد در ترکیب بتن از کیفیت پایینی برخوردار است به طوری که حفرات در سطح این بتن کاملاً مشهود است که ناشی از عدم تناسب میزان و مقدار افزودنی نانو در این طرح مخلوط می‌باشد. شکل شماره ۸ و ۹ مربوط به طرح مخلوط بتن دارای ۰/۵ و ۰/۷۵٪ نانو اکسید آلومین است که کیفیت پخش و تراکم مناسب در سطح بتن را نشان می‌دهند. با توجه به تصاویر SEM می‌توان نتیجه گرفت که افزودن مقادیر بهینه‌ای از نانو اکسید آلومین در بتن علاوه بر توجیه اقتصادی نیز می‌تواند پخش یکنواخت و موثرتری داشته باشد و از کلوخه شدن در بتن جلوگیری کند جز در مواقعی که از انواع فوق روان کننده در بتن استفاده شود. افزودن بهینه نانو ماده در ساختار بتن با فاصله مناسب و پخش بهینه نیز باعث

جدول ۱۵. مقایسه نتایج نمونه‌های دارای پوشش نانو اکسید آلومین پس از تست سایش بتن

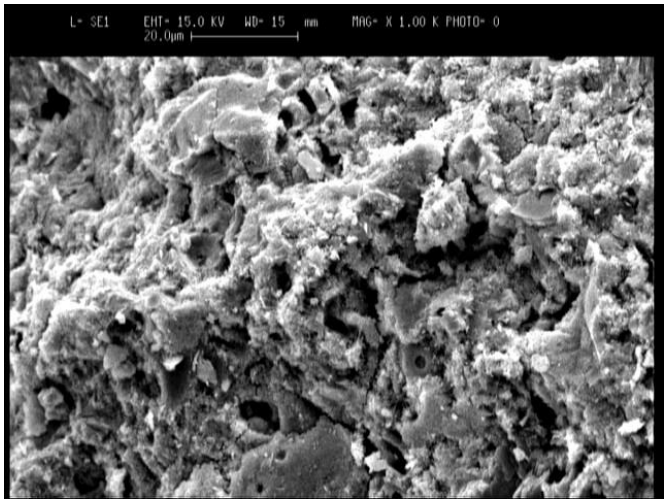
Table 15. Comparison of the results of samples with aluminum oxide nano coating after the concrete wear test

ردیف	نام طرح	سن نمونه	نمونه اول	نمونه دوم	میانگین	بهبود مقاومت سایش
		day	gr	gr	gr	%
۱	C-SH	۷ روزه	۲/۷	۲/۵	۲/۶	–
		۲۸ روزه	۱/۷	۱/۹	۱/۸	–
۲	C-NA-1L	۷ روزه	۲/۳	۲/۵	۲/۴	**۷/۷**
		۲۸ روزه	۱/۸	۱/۶	۱/۷	**۵/۵**
۳	C-NA-2L	۷ روزه	۲/۴	۲/۲	۲/۳	**۱۱/۵**
		۲۸ روزه	۱/۷	۱/۷	۱/۷	**۵/۶**
۴	C-NA-3L	۷ روزه	۱/۸	۲/۰	۱/۹	**۲۷**
		۲۸ روزه	۱/۳	۱/۳	۱/۳	**۲۸**
۵	C-NA-4L	۷ روزه	۱/۹	۱/۷	۱/۸	**۳۱**
		۲۸ روزه	۱/۱	۱/۱	۱/۱	**۳۹**



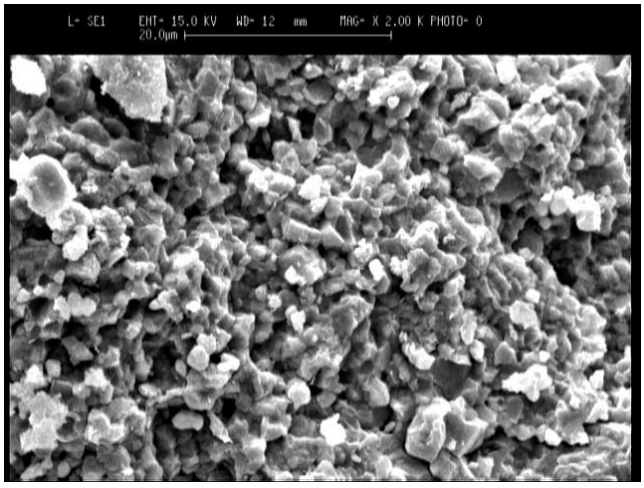
شکل ۶. تصویر SEM نمونه بتن شاهد

Fig. 6. SEM image of the control concrete sample



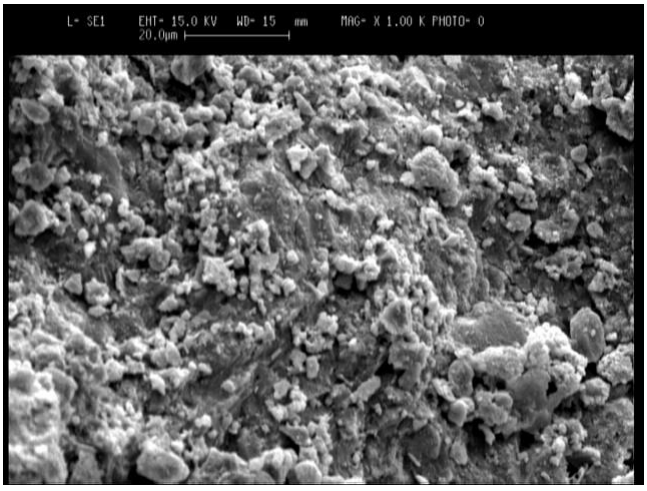
شکل ۷. تصویر SEM نمونه بتن دارای ۰/۲۵٪ نانو

Fig. 7. SEM image of concrete sample with 0.25% nano



شکل ۸. تصویر SEM نمونه بتن دارای ۰/۵٪ نانو

Fig. 8. SEM image of concrete sample with 0.5% nano



شکل ۹. تصویر SEM نمونه بتن دارای ۰/۷۵٪ نانو

Fig. 9. SEM image of concrete sample with 0.75% nano

اخلال در عمل هیدراسیون سیمان نخواهد شد و از طرفی سبب افزایش تراکم، ایجاد فضایی همگن و باعث پر شدن خلل و فرج و فضای خالی بتن خواهد شد که این مهم مستقیماً باعث بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام بتن خواهد شد.

همچنین افزودن میزان بهینه نانو اکسید آلومین در بتن می‌تواند باعث افزایش سیلیکات کلسیم در بتن شود که باعث بهبود خصوصیات بتن می‌گردد. قابل ذکر است که واکنش پوزولانی نانو اکسید آلومین به دلیل دارا بودن سطح مخصوص ریزتر جهت جانمایی در فضای بتن در مقیاس میکرو و سطح ویژه بالاتر جهت واکنش‌پذیری سریع‌تر در ساختار بتن است. لذا افزودن مقادیر بیش از حد بهینه نانو اکسید آلومین می‌تواند باعث تداخل در پخش مناسب، اثر سوء در واکنش‌پذیری و هیدراسیون سیمان، کاهش کارایی بتن و جلوگیری از رشد کافی کریستال‌های هیدروکسید کلسیم شود که در نهایت باعث افزایش خلل و فرج، تراکم ناکافی ریزساختار بتن و زوال مشخصات مکانیکی گردد. در تصاویر مشخص است که نانو ذرات آلومین به علت دارا بودن انرژی جذب بالا، توسط نیروهای واندروالسی جذب ساختار بتن شده‌اند.

۵- بحث و بررسی نتایج

با عنایت به نتایج به دست آمده از آزمایشات انجام شده نیز مشخص گردید که استفاده از پودر نانو اکسید آلومین در بتن باعث افزایش مقاومت و دوام بتن در برابر سایش می‌گردد. همچنین به دلیل ایجاد تراکم ایجاد شده توسط نانو مواد نیز میزان جذب آب و نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد. درصد بهینه استفاده از افزودنی پودر نانو اکسید آلومین در طرح مخلوط بتن ۰/۵٪ وزنی سیمان به دست آمد. نتایج آزمایشات نشان داد که استفاده بیشتر از این میزان، باعث عدم تغییر محسوس در نتایج بتن یا در برخی موارد باعث ایجاد ضعف در بتن خواهد گردید. لذا از منظر اقتصادی هم با توجه به قیمت و هزینه تهیه و خرید نانو مواد نیز مقرون به صرفه نمی‌باشد. همچنین از نتایج به دست آمده از تست سایش بر روی نمونه‌های حاوی یک الی چهار لایه پوشش نانو مواد می‌توان اذعان نمود که ایجاد لایه‌ی پوششی تاثیر چندانی در افزایش دوام سایشی بتن نخواهد داشت و عمده علت آن عدم چسبندگی مناسب این لایه به سطح بتن می‌باشد. اما با افزایش ضخامت و تعداد لایه‌های نیز دوام سایشی نیز افزایش پیدا می‌نمود. نتیجه برخی از تحقیق‌های قبلی در استفاده از نانو اکسید آلومین در بتن نشان داد که تاثیر چندانی در افزایش مقاومت فشاری بتن نخواهد داشت و صرفاً جهت بهبود مدول الاستیسیته بتن نیز استفاده می‌گردد [۴ و ۳ و ۱]. اما در این تحقیق نیز ثابت گردید که افزودن ۰/۵٪ پودر نانو اکسید آلومین به طرح مخلوط بتن مذکور باعث افزایش حداکثر ۳۳٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه خواهد گردید که از جمله دلایل آن میزان سختی بالا و ریز دانه بودن ذرات نانو اکسید آلومین می‌باشد. به استناد از تصاویر SEM مشخص شد که استفاده از میزان بهینه‌ای از نانو مواد در بتن باعث ایجاد پخش و ایجاد تراکم و بهبود ناحیه انتقال مرزی در راستای جلوگیری از گسترش ترک‌های ریز و مویینه بتن می‌گردد.

با توجه به اینکه نانو ذرات باعث افزایش نیاز خمیر سیمان به آب می‌شوند، اگر نسبت‌های طرح مخلوط ثابت نگه داشته شوند، با افزودن نانو اکسید آلومین، کارایی بتن کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار نانو اکسید آلومین و ترکیب آن با آب نیز پخش یکنواخت آن‌ها در مخلوط دشوارتر خواهد شد. لذا در صورت رخداد این فرضیه، تجمع نانو مواد و ایجاد نواحی ضعیف در اثر کلوخه شدن نانو اکسید آلومین بسیار محتمل است که باعث شکست زودهنگام بتن خواهد شد. در نتیجه لزوم استفاده از فوق روان کننده جهت حفظ اسلامپ ناشی از جذب بالای آب بتن توسط نانو، جلوگیری از ته نشین شدن مصالح و پخش کاملاً یک‌دست برای جلوگیری از کلوخگی نانو در ترکیب بتن توصیه می‌شود.

۱- نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان داد که افزودن ۰/۵٪ پودر نانو در طرح مخلوط بتن می‌تواند تا ۳۳٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن را در مقایسه با نمونه شاهد افزایش دهد. همچنین این مقدار افزودنی تا ۲۱٪ میزان مقاومت کششی را افزایش می‌دهد که در بین تمامی طرح مخلوط‌های مورد مطالعه در این تحقیق نیز بیشترین مقاومت کسب شده می‌باشد.

۲-میزان جذب آب نهایی ۷۲ ساعته نمونه‌های دارای ۰/۲۵٪، ۰/۵٪ و ۰/۷۵٪ به ترتیب برابر با ۲/۵٪، ۱/۵٪ و ۰/۹٪ می‌باشد، که علت آن متراکم شدن فضای مویینه بتن توسط نانو مواد می‌باشد و باعث می‌گردد تا نفوذ آب در بتن جریان کمتری داشته باشد.

۳-نتایج به دست آمده از آزمایش میزان نفوذ آب در بتن مشخص نمود که بتن دارای ۰/۲۵٪، ۰/۵٪ و ۰/۷۵٪ افزودنی نانو نیز می‌تواند تا ۳۳٪، ۴۱٪ و ۴۵٪ میزان نفوذ آب را در بتن کاهش دهد که این مهم متاثر از کاهش میزان تخلخل بتن در اثر اضافه نمودن نانو مواد می‌باشد.

۴-نتایج مقاومت سایشی بتن نشان می‌دهد که میزان مقاومت سایشی نهایی طرح ۲۸ روزه دارای ۰/۲۵٪ پودر نانو تا ۴۷٪ افزایش به همراه دارد. همچنین طرح دارای ۰/۵٪ پودر نانو تا ۷۷٪ افزایش و در نهایت طرح دارای ۰/۷۵٪ پودر نانو تا ۶۴٪ افزایش مقاومت سایشی نسبت به نمونه شاهد را نشان دادند. افزایش مقاومت سایشی بتن با ترکیب ۰/۵٪ نانو در ترکیب طرح مخلوط بتن بهترین نتیجه را در بر دارد به طوری که با افزایش مقادیر بیشتری از نانو مواد در ترکیب بتن نیز باعث کاهش چسبندگی بین ذرات بتن و در نتیجه باعث اُفت مقاومت سایشی بتن خواهد گردید.

۵-میزان مقاومت سایشی طرح دارای یک و دو لایه پوششی پودر نانو در مقایسه با نمونه شاهد در سن ۲۸ روز تا ۵/۵٪ افزایش یافته است. همچنین طرح دارای سه لایه روکش پوششی نانو ۲۸٪ افزایش و در نهایت طرح دارای چهار لایه روکش پوششی نانو مواد تا ۳۹٪ مقاومت سایشی را در مقایسه با نمونه شاهد افزایش می‌دهد.

منابع

[1] Farzin Ghadim Takmeh Dash, Alireza Mohammad Jafari Sadeghi, Hassan Afshin, Investigation Of Some Durability Properties Of Concrete Pavements Containing Nanoparticles, Journal Of Amirkabir Civil Engineering (2021) 1-10 (In Persian)

[2] Ali Maarefvand, Amir Arefian, Parviz Alipour, Investigation Of Seismic Behavior Of Continuous Connection Of Steel Beam To Concrete Column Using Nanotechnology In Materials, Master Thesis, Islamic Azad University, Shahriar Branch, (2018) 24-39 (In Persian)

[3] Jamshid Ismaili, Keyvan Andalibi, Jamil Kasaei, Investigation Of The Effects Of Adding Nano-Alumina On The Mechanical Properties Of Concrete, 10th International Congress Of Civil Engineering, Faculty Of Civil Engineering, Tabriz (2015) 15-30 (In Persian)

[4] Javid Chakherloo, Bahman Shervani, Investigation Of The Effect Of Replacing Silica Sand With Sand And Quartz Powder On The Compressive Strength Of Reactive Powder Concrete, Scientific-Research Journal, Modares Civil Engineering, (2019) 1-11 (In Persian)

[5] K.Sargunana.Venkata Raob. Alex Rajeshc, Experimental investigations on mechanical strength of concrete using nano-alumina and nano-clay, International Conference on Emerging Trends in Material Science and Technology-(2022) 143-160

[6] Mahmoud Naderi, Alireza Kaboudan, The Effect Of Resistance, Time And Amount Of Water Pressure And Direction Of Concreting On Concrete Permeability, Amirkabir Civil Engineering Journal (2020) 1-19 (In Persian)

[7] Hossein Lashgarit, Mohammad Hosseinpour, Soroush Parvizi, Amir Momeni, Investigation Of The Effective Parameters On Al6061 / Al2o3.Wc.Sic Composite By

Friction Stir Process, The Second National Conference On Computational And Experimental Mechanics (2017) 10-18 (In Persian)

[8] Mahmoud Naderi, Alireza Kaboudan, Mohammadreza Keshtkar, Study Of Permeability And Strength Of Concrete Containing Silica Fume, Zeolite And Fly Ash Using British Standard Cylindrical Chamber Method, Journal Of Structural Engineering (2016) 92-113 (In Persian)

[9] Kiachehr Behfarnia, Niloofar Salemi, The Effects Of Nano-Silica And Nano-Alumina On Frost Resistance Of Normal Concrete, Construction And Building Materials 48 (2013) 580–584

[10] Scott Muzenski, Ismael Flores-Vivian, Konstantin Sobolev, Ultra-High Strength Cement-Based Composites Designed With Aluminum Oxide Nano-Fibers, Construction And Building Materials 220 (2019) 177–186

[11] Mohsen Kalvandi, Mahla Rezaei, Mohammad Kalvandi, Profile Of The Authors The Effect Of Iron Nanoparticles, Iron Oxide, Titanium And Silica Particles On The Properties And Durability Of Concrete, 2nd National Congress Of Civil Engineering And Construction Projects (2015) 20-31

[12] Farzad Lohrasbi, Amirhossein Bazai, Mohammad Mehdi Jabbari, The Effect Of Chloride Ion Penetration By Rcmt Method In Heavy Concrete Containing Ilmenite Powder, Civil And Project Journal, April (2016). 1-18 (In Persian)

[13] R.Polder, W.Peelen, W.Courage, Non-Traditional Assessment And Maintenance Methods For Aging Concrete Structures Technical And Non-Technical Issues, Materials And Corrosion, (2012) 1147-1153.

[14] R.Pillai, R.Gettu, M.Santhanam, S.Rengaraju, Y.Dhandapani, S.Rathnarajan, A.s. Basavaraj, Service Life And Life Cycle Assessment Of Reinforced Concrete Systems With Limestone Calcined Clay Cement (Lc3), Cement And Concrete Research, (2019) 111-119.

[15] ASTM C109/C109M-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [100-mm] Cube Specimens) www.astm.org

[16] ASTM C779/C779M-12, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces, www.astm.org

[17] Physical and chemical properties of Firoozabad type 2 cement-1400 www.farsnov.ir (in persian)

[18] Physical and chemical properties of aluminum oxide nanopowder / nanoparticles (AL_2O_3, Alpha, 99+%, 50 nm, hydrophilic)-1400 www.us-nano.com

[19] Physical and chemical properties of ottawa sand-1400 www.azmoontest.com (in persian)

[20] Physicochemical Properties Of Normal Carboxylate Based Superplasticizer Super Plast PC5000-1400 www.farsresin.com (In Persian)

[21] Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Yousefinezhad, M. Mahdi Jabbari, The Use Of Aluminum Oxide Nanoparticles In Improving Some Mechanical Properties And Increasing The Abrasion Resistance Of Concrete, Amirkabir J. Civil Eng., 54(11) (2023) 4343-4364.

DOI: 10.22060/ceej.2022.21040.7603

این صفحه عمداً خالی است