نشریه علمی مدیریت استاندارد و کیفیت
Journal of Quality & Standard Management (JQSM)
www.jstandardization.ir

نوع مقاله: پژوهشی

استانداردسازی و بهبود کیفی خواص مکانیکی و ریز ساختارها به کمک ساخت و مشخصه‌یابی بتن‌های حاوی نانوذرات

محمدرضا عارفی[۱]

۱ گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران

سابقه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰

چکیده

هدف اصلی پژوهش حاضر، استانداردسازی و بهبود کیفی خواص مکانیکی و ریز ساختارها به کمک ساخت و مشخصه‌یابی بتن‌های حاوی نانوذرات با قطرهای مختلف به منظور نوآوری دانش صنعت ساختمانی می‌باشد. در این آزمایش بتن‌هایی شامل ذرات سیلیس با اندازه ذره و درصدهای مختلف ساخته شدند و خواص مکانیکی آن‌ها به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفتند. با توجه به روش ساخت، ذرات سیلیس به طور همگن در کل خمیر سیمان پخش شده‌اند که حتی با اضافه کردن ۱٪ نانوذرات سیلیس به بتن خواص مکانیکی به طور قابل توجهی افزایش یافته است (مقامت فشاری بیش از ۱۰۰ درصد افزایش یافته است). نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری، خمشی و کششی در روز هفتم در بتن‌های حاوی ذرات سیلیس بیشتر از بتن معمولی است. تجزیه و تحلیل‌های وزن سنجی حرارتی ، میکروسکوپ الکترونی روبشی ، تحلیل حرارتی افتراقی و مقاومت در برابر نفوذ آب در مورد ساختار بتن حاوی ذرات سیلیس و بتن معمولی نشان داد که نانو ذرات و ذرات میکرونی خلل و فرج را کاملاً پر کرده و $CaOH_2$ ترکیبی با هیدرات‌ها را کاهش می‌دهد. این سازوکار کل عملکرد مکانیکی بتن همراه با ذرات سیلیس را توضیح داد.

1. Mr-arefi@tvu.ac.ir

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

کلمات کلیدی: میکرو SiO2، SiO2، نانو SiO2، استحکام بتن، ریزساختار

۱ مقدمه

بتن به عنوان پرکاربردترین و مهمترین مصالح ساختمانی در ساخت و ساز استفاده می‌شود. به دلیل پیشرفت علم و فناوری ساخت، سیستم‌های جدید سازه‌ای و همچنین گسترش ساخت و ساز، نیاز به مصالح ساختمانی جدید و با کارایی بیشتر، بسیار محسوس می‌باشد (ابنا و مظلوم، ۱۴۰۱). بتن در اثر هیدراتاسیون سیمان با آب و تشکیل ماده چسبی مستحکم در فضای بین سنگدانه ایجاد می‌شود. در فرایند تولید سیمان مقدار قابل توجهی دی اکسیدکربن تولید خواهد شد و به عبارتی تولید هر تن سیمان با تولید حدود ۱ تن دی اکسیدکربن همراه است. همچنین بازگشت ضایعات ناشی از اتمام عمر مفید سازه‌های بتنی به چرخه محیط زیست، دردسرساز قلمداد می‌شود (رمضانیان پور و همکاران، ۱۴۰۱). به دلایل مختلف، بخش قابل توجهی از بتن همواره ترک می‌خورد. دلیل ترک خوردگی می‌تواند سازه‌ای یا غیرسازه‌ای باشد. اما عمده ترکها ناشی از ضعف ذاتی این ماده در کشش هستند. برای مثال، جمع‌شدگی در بتن دارای قید، ترک ایجاد می‌کند. بیشتر وزن بتن را مصالح درشت‌دانه و ریزدانه آن تشکیل می‌دهد، و معمولاً حدود ۶۰ درصد از حجم بتن را شامل می‌شود. حجم زیاد سیمان مصرفی خودتراکم در بتن خودتراکم، هم از نظر اقتصادی و هم از نظر مسائل زیست محیطی مناسب نمی‌باشد. علاوه بر آن عیار زیاد سیمان، دمای هیدراتاسیون را بیش از حد بالا می‌برد و بتن ترک می‌خورد. به منظور کاهش اثرهای زیست محیطی و کاهش عیار سیمان، از پوزولان به عنوان جایگزین قسمتی از سیمان استفاده می‌شود. استفاده از پوزولان، مقاومت فشاری و کششی بتن را بهبود می‌بخشد (پاچیده و قلهکی ، ۲۰۲۰).

ضعف اساسی بتن در کشش را به صورت عملی با مسلح کردن آن با آرماتورهای فولادی برطرف می‌کنند. شایان ذکر است که در موارد متعددی، جهت نیروهای کششی به طور دقیق معلوم نیست. همچنین با عنایت به اینکه آرماتور، بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می‌دهد، تصور اینکه مقطع بتن یک مقطع هموژن و ایزوتروپ باشد، صحیح نخواهد بود. به منظور ایجاد شرایط ایزوتروپ و کاهش ضعف شکنندگی و تُردی بتن، استفاده از پوزولان متداول شده است (مظلوم و میرزا محمدی، ۲۰۱۹). پوزولان یک ماده سیلیسی یا سیلیسی-آلومینی است، که به

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

تنهایی خاصیت سیمانی ندارد؛ اما زمانی که به صورت ریز آسیاب می‌شوند، در دمای محیط و با حضور رطوبت، به طور شیمیایی، با آهک آزاد شده از هیدراتاسیون سیمان پرتلند واکنش داده، و ترکیباتی با خاصیت سیمانی تشکیل می‌دهد. ایران نیز منابع سرشاری از پوزولان‌های طبیعی در دست دارد؛ که بهره گرفتن از آنها در صنعت سیمان می‌تواند مزایای متنوعی به همراه داشته باشد. از جمله این مزایا، بهبود خواص دوامی بتن از طریق فعالیت پوزولانی می‌باشد؛ که طی یک واکنش ثانویه ساختار خمیر سیمانی از طریق مصرف کلسیم هیدروکسید حاصل از فرایند هیدراتاسیون و تولید ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده اصلاح می‌شود (رودریگوز و اوریب عفیف ، ۲۰۰۲). در هزاره جدید افق فعلی علم را نانوفناوری ترسیم کرده است. نانوفناوری به معنای توسعه، ساخت، طراحی و استفاده از محصولاتی است که اندازه آنها بین یک تا صد نانومتر قرار دارند. استفاده از نانوسیلیس خصوصیات مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشیده و با افزایش عمر مفید سازه، آلودگی‌های زیست محیطی همچون تولید گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن را کاهش داده و دستیابی به توسعه پایدار را تسهیل می نماید (رازانی و همکاران، ۱۴۰۱).

در قرن جدید، استفاده از مواد نانو ساختاری به سرعت در حال رشد و توسعه است و به زودی بسیاری از مواد را در برخواهد داشت. نانوذرات برخلاف ذرات معمولی به خاطر داشتن سطح مخصوص زیاد، خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فردی را نسبت به مواد معمولی از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل نانوذرات بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند و در زمینه‌های زیادی به منظور ساخت مواد جدید با عملکردهای بدیع کاربرد پیدا کرده‌اند (گلشن و همکاران، ۱۴۰۲). نانو فناوری در برخی از حوزه‌ها مانند مصالح ساختمانی و معدنی از جمله بتن وارد شده است. در حال حاضر گزارشات کمی در مورد استفاده از نانوذرات در بتن گزارش شده است. برای نمونه یی و همکاران (۲۰۰۷) اثر اضافه کردن نانوذرات SiO_2 و سیلیکا فوم را بر خواص مکانیکی خمیر سیمان سخت شده بررسی کردند. مشخص شد که مقاومت فشاری سیمان با افزایش مقدار نانوذرات SiO_2 افزایش می‌یابد؛ این افزایش مخصوصاً در سنین ابتدایی بیشتر است. ولی مقاومت فشاری سیمان با افزایش مقدار سیلیکا فوم در سنین اولیه کاهش ولی در سنین پایانی افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد در نمونه‌های حاوی نانوذرات SiO_2 قدرت پیوند در فصل مشترک خمیر- سنگ‌دانه از نمونه مرجع و نمونه حاوی سیلیکا فوم بیش‌تراست. در سال‌های اخیر استفاده از نانوذرات برای بهبود خواص بتن، چشم‌انداز جدیدی را

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

در فناوری بتن ایجاد نموده است. تحقیقات تجربی صورت گرفته در این زمینه نشان دهندهٔ بهبود خواص بتن و کسب مقاومت‌های بالاتر است. در این میان نانوسیلیس و نانولوله‌های کربنی به عنوان دو نوع از مهم‌ترین محصولات نانو تکنولوژی که در بتن قابل استفاده‌اند به شمار می‌روند (نادری، ۱۳۹۳). به علاوه مشاهدات عملی در مورد استحکام بخشی در طی ۱۱ سال اخیر نشان داده است که مواد اعمال شده قابل قبول نبوده و در اثر پرتوهای فرابنفش، رطوبت محیر و سایر عوامل دچار تغییر شده است. با توجه به تحقیقات انجام شده نانوسیلیس باعث پیشرفت فرایند هیدراتاسیون در خمیر سیمان شده و تولید ژل کلسیم سیلیکات هیدراته را می‌کند و باعث پر شدن خلل و فرج در بتن می‌شود. نانوسیلیس به علت سطح سطح ویژه بالا و ریزیِ زیاد باعث ایجاد تراکم بالا و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری در بتن تازه می‌شود. نانوسیلیس عمدتاً در طرح اختلاط‌هایی که مقاومت فشاری در سنین اولیهٔ ۷ و ۲۸ روزه مدنظر است قابل استفاده می‌باشد. در این تحقیق از ذرات سیلیس با قطرهای متفاوت (۱۲ نانومتر، ۶۰ نانومتر و ۱ میکرون و با درصدهای ۱، ۳ و ۵ درصد) استفاده شده تا اثر تغییر قطر ذرات سیلیس بر خواص مکانیکی و ریز ساختار بتن مورد آزمایش قرار گیرد. در نهایت به این سوال پاسخ داده شود که آیا در جهت نوآوری دانش صنعت ساختمانی، خواص مکانیکی و ریز ساختارها می‌توانند به کمک ساخت و مشخصه یابی بتن‌های حاوی نانوذرات با قطرهای مختف، موجب استانداردسازی و بهبود کیفی شوند؟

۲ پیشینه تحقیق

میکروسیلیس یکی از موادی است که در دهه‌های اخیر استفاده از آن در بتن به طور جدی مورد توجه مهندسین ساختمان قرار گرفته است. به دلیل خصوصیات بارز پوزولانی میکروسیلیس، استفاده از آن برای بهبود خواص مکانیکی و افزایش دوام بتن در کشورهای پیشرفته رو به افزایش است. استفاده از آن در بتن دارای فواید بسیار زیادی از جمله کاهش ترک‌های ناشی از هیدراتاسیون سیمان، دوام بهتر در مقابل آسیب‌های سولفات‌ها و آب‌های اسیدی و دست یافتن به مقاومت‌های نهایی بالا با استفاده از انواع سوپر روان‌کننده‌های بتن می‌باشد. از دیگر مزایای مصرف میکروسیلیس کاهش تحرک یون‌های کلر و در نتیجه کاهش عمق نفوذ کلر در بتن بویژه در نواحی ساحلی جنوب ایران می‌باشد. از موارد مصرف آن می‌توان در بتن‌ریزی‌های مربوط به ساخت اسکله‌های دریائی، شمع‌ها، ستون‌ها و قطعات پیش ساخته،

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

فونداسیون ماشین‌آلات و کلیه سازه‌های بتنی که در معرض حملات شیمیایی بویژه یون کلر و سولفات‌ها قرار دارند نام برد (دشتی رحمت آبادی و سرگلزائی، ۱۴۰۱). میکروسیلیس باعث سیالیت بالای بتن شده و دوام بتن را نیز افزایش می‌دهد و نقش‌های مهمی در چسبندگی بتن و پراکندگی در توسعه بتن با عملکرد بالا دارد. میکروسیلیس دارای حدود ۹۰ درصد دی اکسید سیلیس می‌باشد. نتایج مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس نشان می‌دهد که میکروسیلیس قادر است مقاومت فشاری کوتاه‌مدت و بلندمدت بتن را افزایش دهد. از طرفی سرعت کسب مقاومت در سنین اولیه نسبت به سنین بالاتر، بیشتر می‌باشد (برنجیان و کهساری، ۱۳۹۰).

مقاومت فشاری ۷ روزه بتن خودتراکم با افزایش میزان میکروسیلیس تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن نیز با افزایش میکروسیلیس افزایش می‌یابد، اما این افزایش خطی نبوده و با اضافه کردن ۱۰ درصد میکروسیلیس شاهد یک جهش در افزایش مقاومت نسبت به نمونه حاوی ۵ درصدمیکروسیلیس خواهیم بود. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها در مقادیر بیش از ۱۰ درصد میکروسیلیس تغییرقابل توجهی نداشته است. با توجه به نتایج می‌توان پیش بینی کرد که درصد بهینه میکروسیلیس بین ۱۰ تا ۱۵درصد می‌باشد (فرخ زاد و مهرپویا، ۱۳۹۵). با بررسی مقاومت فشاری مشخص می‌شود که با استفاده از میکروسیلیس می‌توان به مقاوم نهایی فشاری مطلوبی دست یافت و با افزایش مقدار میکروسیلیس مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد. این امر به دلیل وجود ذرات بسیار ریز میکروسیلیس است که با قرارگیری در خلل و فرج مابین سنگدانه‌ها و سیمان و نیز با پخش شدن در ماتریس خمیر سیمان، کانون‌های واکنش برای هیدراتاسیون سیمان را فراهم کرده و موجب تسریع واکنش و حرارت‌زایی ترکیبات سیمان و افزایش مقاومت می‌شود (برنجیان و کهساری، ۱۳۹۰).

نانو ذرات دسته‌ای از مواد هستند که به فراوانی در حفاظت میراث فرهنگی و سایر زمینه‌ها استفاده شده و به دلیل نتایجی که ارائه می‌دهند بسیار قابل استقبال هستند. از این جمله می‌توان به نتایج تحقیقات غلامیان و جاوید (۲۰۲۱) اشاره کرد که از نانو ساختار به عنوان پوششی برای افزایش مقاومت مصنوعات چوبی در برابر حفاظت از آتش و به عبارتی کاهش اشتعال‌پذیری آن استفاده کرده‌اند. اما این مواد در شرایطی اثربخشی قابل قبولی را نمایان می‌سازند که دست‌کم به مدت یک سال در شرایط جوی فضای خارج قرار گیرند

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

(اسکاتی و همکاران ، ۲۰۰۸). پـژوهش‌هـایی نیـز در مـورد نـانو سـیلیس انجام شده‌اند که نتایج حاصـل، از درمـان بـه علـت گرانـروی و ضـریب شکست کم، قطبیت بالا و کشش سطحی زیاد و توانایی نفوذ بـه عمـق ماده، موفق شناخته شده‌اند و به علاوه تاکنون هیچ اثر مضر زیستی نیز از این ماده گزارش نشده اسـت (پرایس و دوهین ، ۲۰۱۲؛ اسکاتی و همکاران، ۲۰۰۸). در پـژوهش دیگـری که در مورد نانو ذرات سیلیسی روی سنگ آهک انجام شده مشـاهده می‌شود که این ماده در موارد خواص مانند سازگاری با رنگ بدنه اصلی سنگ تطابق داشته، اما در مورد چرخه نمـک عملکـرد قابـل قبـولی در بحث مقاومت از خود نشان نداده است که طبق فرضیه پژوهش به نظـر می‌رسد بتوان با بهینه‌سازی و افزودن اجزاء دیگر، این عملکرد را بهبود بخشید (اسکاتی و همکاران، ۲۰۰۸).

هوی و همکاران (۲۰۰۶) مقاومت سایشی بتن حاوی نانو ذرات TiO_2 و SiO_2 را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد مقاومت سایشی بتن حاوی نانو ذرات به طور چشمگیری بهبود یافته و مقاومت سایشی بتن حاوی نانوذرات TiO_2 بیشتر از مقاومت سایشی بتنی است که حاوی همان مقدار نانوذراتSiO_2 می‌باشد. همچنین هوی و همکاران (۲۰۰۷) رفتار خستگی خمشی بتن حاوی نانوذرات را بررسی کرده و از دو نوع نانوذرات TiO_2 و نانو SiO_2 استفاده کردند. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد بتن حاوی ۱ درصد وزن مواد سیمانی نانو ذرات TiO_2 دارای بهترین عملکرد خستگی خمشی می‌باشد که به مراتب بهتر از عملکرد بتن حاوی الیاف‌های پلی پروپیلن است که به طور گسترده برای بهبود رفتار خستگی بتن کف‌سازی استفاده می‌شود. وانگ و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که افزودن نانوذرات سیلیس به بتن موجب افزایش مقاومت بتن با عمکرد بالا در برابر انجماد می‌شود. علی نظری و همکاران (۲۰۱۰الف، ۲۰۱۰ب) ثابت کردند که افزودن نانو ذرات TiO_2 و ZrO_2 حداکثر تا ۱ درصد وزن سیمان، مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهد. تحقیقاتی که تا کنون انجام شده نشان می‌دهد افزودن نانو ذرات سیلیس به بتن خواص مکانیکی آنها را تقویت کرده و ریز ساختار آن را بهبود می‌بخشد.

از طرفی مطالعات اخیر، اثربخشی مناسب جایگزینی برخی نانوذرات با سیمان را از طریق یک ویژگی منحصر به فرد به نام هسته‌زایی نشان می‌دهد. در این میان، نانوسیلیس و نانوصفحات اکسید گرافن، حجم بالایی از مطالعات را به خود اختصاص می‌دهند. لیو همکارانش (۲۰۱۹) تأثیر ۱٪ تا ۴٪ نانوسیلیس بر مقاومت سنین اولیه سیمان‌های حاوی خاکستر بادی با درصد

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

جایگزینی بالا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد مقاومت فشاری آزمون‌های حاوی نانوسیلیس، پس از ۹ ساعت عمل‌آوری و طی یک فرآیند با گرمادهی معین، تا ٪۱۰۶ نسبت به آزمون‌های فاقد آن افزایش داشته است. همچنین مقاومت فشاری با افزایش درصد جایگزینی نانوسیلیس افزایش می‌یابد. نظری و ریاحی (۲۰۱۱) نیز در تحقیقات خود با جایگزینی ۱ تا ۵ درصد نانوسیلیس به نتایج مشابهی دست یافتند. علاوه بر نوع نانوسیلیس جایگزین شده با سیمان، اندازه ذرات (گیوی و همکاران ، ۲۰۱۰)، درصد جایگزینی (لطیفی و همکاران ، ۲۰۱۱؛ گوفرچ و همکاران ، ۲۰۱۱ و همچنین توزیع یکنواخت ذرات در ماتریس سیمانی نیز بسیار حائز اهمیت است. از سویی دیگر یکی از کشف‌های بسیار مهم بشر در سالهای نزدیک ماده‌ای با خواص شگفت‌انگیز به نام گرافن بوده است. گرافن یک ابر رسانای بسیار قوی است که از یک لایه گرافیت با ساختار شش ضلعی ساخته شده و به همین دلیل سطح ویژه‌ای در حدود g دارد که اکثر خصوصیات آن نشأت گرفته از همین ویژگی است (شمسایی و همکاران ، ۲۰۱۸).

پنگ هو و همکارانش (۲۰۱۹) در یک مطالعه آزمایشگاهی عملکرد ملات‌های حاوی گرافن اکساید را در درصدهای جایگزینی ۰/۰۱ ، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ و نسبت‌های آب به سیمان متفاوت مورد بررسی قرار دادند که در نهایت ۰/۰۳ درصد جایگزینی به عنوان مقدار بهینه موجب افزایش مقاومت فشاری و خمشی شد. موارد متعدد دیگری نیز وجود دارد که عملکرد گرافن اکساید را در بهبود خصوصیات مکانیکی ملات‌های سیمانی تأیید می‌کند و همه آنها در این که خاصیت پل‌زنی و هسته‌زایی عامل اصلی این پدیده است اتفاق نظر دارند (لی و همکاران ، ۲۰۱۷؛ مختار و همکاران ، ۲۰۱۷). در نهایت مواردی را نیز می‌توان یافت که برهمکنش‌ها میان نانوسیلیس و گرافن اکساید و تاثیر حضور همزمان آنها در ملات‌ها یا سایر ترکیبات سیمانی را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در همین راستا در سال ۲۰۱۸ لیو و همکاران ملات حاوی ترکیب GO/NS را با ملات کنترل و همچنین با ملات‌های حاوی نانوسیلیس و یا گرافن اکساید منفرد مقایسه کردند. آنها دریافتند علاوه بر بهبود پراکنش ذرات سیلیس با حضور گرافن اکساید در محلول مایع منفذی که توسط آب و کلسیم هیدروکسید شبیه‌سازی شده بود، خصوصیات مکانیکی، انتقالی و ریزساختاری ملات‌های حاوی نانو کامپوزیت ترکیبی از سایر ملات‌ها بهتر است. در مطالعه دیگر لین و همکاران (۲۰۲۰) در حین بررسی یک نانو کامپوزیت حاوی نانوسیلیس و گرافن اکساید متوجه شدند پیوندهای کوالانسی O-Si که در نتیجه تشکیل پوشش سیلیکونی بر سطح ورق‌های گرافن تشکیل می‌شوند از کلوخه شدن ورقه گرافنی در

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

محلول قلیایی جلوگیری می‌کند. در ادامه عملکرد نانو کامپوزیت حاوی نانوسیلیس و گرافن اکساید در ملات سیمانی مورد بررسی قرار گرفت که افزایش مقاومت فشاری و کششی از جمله مشاهدات آنها است.

دیپندرا و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی اثرات اختلاط نانو سیلیس، در حضور دوده سیلیس و نرم‌کننده، در ملات سیمان و بتن، به منظور تعیین مناسب بودن و مزایای آنها برای ساختمان بتنی پرداختند. بر اساس بررسی تجربی، افزایش قوام و کاهش درIST، FST و جریان با افزایش مقدار نانوسیلیس شناسایی شد. تشدید مقاومت فشاری در سنین پایین بیشتر از مقاومت در سنین بالا بود. حداکثر مقاومت فشاری در مخلوط‌های بتن برای نمونه حاوی ۳ درصد نانو سیلیس در حضور ۱۰ درصد دوده سیلیس مشاهده شد و پس از آن کاهش مقاومت مشاهده شد اما همچنان بیشتر از نمونه شاهد بود. یافته‌های حاصل از SEM نشان داد که نانو ذرات نه تنها به‌عنوان پُرکننده، بلکه به‌عنوان محرک فرایند هیدراتاسیون نیز عمل می‌کنند که ریزساختار بتن را بهبود می‌بخشد و در نتیجه استحکام بالاتری ایجاد می‌کند. بنابراین استفاده مناسب از نانو سیلیس ممکن است عملکرد مواد سیمانی را افزایش دهد.

هامادا و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهش خود با مروری دقیق از مطالعات انجام شده قبلی به بررسی تأثیر نانوسیلیس (NS) در کامپوزیت‌های سیمانی برای ارزیابی خواص مکانیکی و دوام پرداختند. تاثیر NS بر حالت تازه، یعنی زمان گیرش و کارایی، و در حالت سخت شده، یعنی مقاومت کششی فشاری، خمشی و شکاف در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، دوام طولانی مدت مورد بحث قرار گرفته است که شامل نفوذپذیری، مقاومت در برابر حمله اسید و باز، مقاومت در برابر سایش و مقاومت در برابر کربناته شدن است. علاوه بر این، پایداری حجمی و ریزساختار بتن با NS ارائه شده است. تعداد زیادی از مطالعات اثر مثبت NS با محتوای بهینه را برای بهبود خواص بتن نشان دادند، در حالی که اثر منفی با استفاده از محتوای اضافی NS مشاهده شد. گنجاندن NS در کامپوزیت‌های سیمانی به طور قابل ملاحظه‌ای خواص مکانیکی، دوام و ریزساختار را افزایش می‌دهد. در همین حال، پراکندگی بهتر، کلید تضمین اثر تقویتی NS است که با تغییر شکل/ اندازه NS، میزان بهینه‌سازی روش هم زدن و افزودن سورفکتانت‌ها بهبود می‌یابد. بررسی بیشتر کاربرد NS در بتن ویژه برای توسعه آن است و اثر NS بر ریزساختار محصولات هیدراتاسیون اصلی باید بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

به دلایل مختلف، بخش قابل توجهی از بتن همواره ترک می‌خورد. دلیل ترک‌خوردگی می‌تواند سازه‌ای یا غیرسازه‌ای باشد. با این حال، عمده ترک‌ها ناشی از ضعف ذاتی این ماده در کشش هستند. برای مثال، جمع‌شدگی در بتنِ دارای قید، ترک ایجاد می‌کند. بیشتر وزن بتن را مصالح درشت‌دانه و ریزدانه آن تشکیل می‌دهد، و معمولاً حدود 06/ درصد از حجم بتن خودتراکم را شامل می‌شود. حجم زیاد سیمان مصرفی در بتن خودتراکم، هم از نظر اقتصادی و هم از نظر مسائل زیست‌محیطی مناسب نمی‌باشد. علاوه بر آن عیار زیاد سیمان، دمای هیدراتاسیون را بیش از حد بالا می‌برد، و بتن ترک می‌خورد (پرهیزکاری و همکاران، ۱۴۰۲). به منظور کاهش اثرهای زیست‌محیطی و کاهش عیار سیمان، از پوزولان به عنوان جایگزین قسمتی از سیمان استفاده می‌شود. استفاده از پوزولان، مقاومت فشاری و کششی بتن را بهبود می‌بخشد (جعفری نسب و همکاران، ۱۴۰۲). در تحقیقات اخیر رابطهٔ بین کارایی و استحکام بتن مطالعه شده است. در این بررسی‌ها از میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان و از پودر سنگ آهک به عنوان پُرکننده استفاده شده است. در واقع آنها اشاره می‌کنند که میکروسیلیس سبب افزایش مقاومت فشاری بتن شده است. (ثقفی لاسمی و همکاران، ۱۴۰۲). در نهایت آنها اعلام کردند که میکروسیلیس دوام و خواص مکانیکی این بتن را افزایش داده است (یوسفی نژاد و جباری، ۱۴۰۱؛ رمضانیان پور و همکاران، ۱۴۰۱).

ضعف اساسی بتن در کشش را در عمل با مسلح کردن آن با آرماتورهای فولادی برطرف می‌کنند. شایان ذکر است که در موارد متعددی، جهت نیروهای کششی به طور دقیق معلوم نیست. همچنین با عنایت به اینکه آرماتور، بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می‌دهد، تصور اینکه مقطع بتن یک مقطع همگن و ایزوتروپ باشد، صحیح نخواهد بود (رمضانیان پور و آرشید داداش، ۱۳۹۱). از آنجا که امروزه از مصالح بتنی به وفور استفاده می‌شود، حتی پیشرفت و بهبود اندکی در خصوصیات آن، تأثیر قابل توجه و چشمگیری در فناوری دارد، و مزایای اقتصادی نیز به همراه می‌آورد. موضوع استفاده از نانوذرات تقویت‌کننده برای غلبه بر تُردی، افزایش مقاومت، شکل‌پذیری و دوام، در پروژه‌های تحقیقاتی بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است (مدنی و همکاران، ۱۳۹۷). نانوذرات و الیاف در بتن به صورت تصادفی و در جهت‌های مختلف توزیع می‌شوند؛ از این رو می‌توانند با ایجاد پُل بین دو لبهٔ ترک، در نواحی و جهت‌های مختلف مانع از ایجاد و رشد ترک شوند. ترک‌های بتن از نظر اندازه در دو مقیاس میکرو و ماکرو طبقه‌بندی می‌شوند. گسترش و به هم پیوستن ترک‌های میکرو، ترک‌های ماکرو را شکل

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

می‌دهند. در واقع به کمک روش‌ها و آزمون‌های مختلفی، اثر این عوامل ارزیابی شده است (صفرخانی و نادری، ۱۴۰۲). نانوسیلیس به علت سطح ویژه بالا و ریزی زیاد باعث ایجاد تراکم بالا و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری در بتن تازه می‌شود. نانوسیلیس عمدتاً در طرح اختلاط‌هایی که مقاومت فشاری در سنین اولیه ۷ و ۲۸ روزه مدنظر می‌باشد قابل استفاده است. در این تحقیق از ذرات سیلیس با قُطرهای متفاوت (۱۲ نانومتر، ۶۰ نانومتر و ۱ میکرون و با درصد های ۱، ۳ و ۵ درصد) استفاده شده تا اثر تغییر قُطر ذرات سیلیس بر خواص مکانیکی و ریز ساختار بتن آزمایش شود.

۳ مبانی نظری

نانو سیلیس در بتن

اکسید سیلیس با انجام واکنش‌های شیمیایی هیدروکسید،کلسیم آزاد شدهٔ موجود در بتن را مصرف کرده و از خاصیت قلیایی آن می‌کاهد و در کنار آب به صورت شوره از بتن خارج شده و از خوردگی آرماتورهای فولادی قرار گرفته در بتن جلوگیری می‌کند. حملات شیمیایی به فولاد درون بتن نیز از طریق منافذ بتن بوده و فولاد را اکسید می‌کند که باعث خورندگی، ترک و در نهایت شکست بتن می‌شود. نانو سیلیس به عنوان یک ماده افزودنی بسیار مهم مطرح است که باعث مقاومت و دوام ساختار بتنِ در معرض خورندگی نمک می‌شود. به طور کلی افزودن نانوسیلیس در بتن و واکنش آن در مقیاس نانو باعث افزایش دوام و مقاومت بتن می‌شود. اما اگر به مقدار زیاد نانوسیلیس افزوده شود بتن را تُرد و شکننده می‌کند، پس ضروری است مقداری که باید افزوده شود به دقت محاسبه شود (شوش پاشا و همکاران، ۱۳۹۷). با توجه به ریز ساختار بتن و وجود حفراتی در ابعاد نانو در آن، استفاده ار نانو ذرات می‌تواند در پُر کردن تخلخل‌های بسیار ریز خمیر سیمان و افزایش مقاومت و بخصوص دوام بتن موثر باشد. در بسیاری از موارد که عامل مخرب بتن در محیط خارج وجود دارد، نفوذپذیری بتن نقش بسیار مهمی در پایایی و سرعت تخریب خواهد داشت. استفاده از نانو پودرهایی مانند نانو ذرات کلسیم هیدراته در این زمینه می‌تواند بسیار مؤثر باشد، از سوی دیگر این ذرات با انجام واکنش‌هایی می‌توانند ترکیبات شیمیایی خمیر را نیز تغییر دهند. یکی از موارد جالب توجه در این زمینه نانوسیلیس می‌باشد (رمضانیان پور و همکاران، ۱۴۰۱). افزودن نانو سیلیس به بتن موجب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی، کاهش زمان گیرش وکاهش نفوذپذیری و

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

همچنین مقاومت بالاتر در برابر حمله‌های شیمیایی می‌شود. آزمایشات انجام شده روی نانو سیلیس، نشان داده‌اند که این ذرات نه تنها برای محیط زیست مشکل‌ساز نیستند، بلکه نتایج بهتری در مقایسه با میکرو سیلیس ارائه می‌کنند. نانو سیلیس، دی اکسید سیلیسیم در ابعاد نانومتر است که متشکل از ذرات کروی با قُطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر به صورت ذرات خشک پودری یا معلق در مایع محلول می‌باشد. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که واکنش نانوسیلیس با هیدروکسید کلسیم در مقایسه با میکروسیلیس بسیار سریعتر انجام گرفته و مقدار بسیار کم استفاده از نانو سیلیس همان تأثیر پوزولانی مقدار بسیار بالای میکروسیلیس را در سنین اولیه در بتن خودمتراکم می‌گذارد. این خاصیت به دلیل ریزتر بودن ذرات نانو سیلیس نسبت به میکروسیلیس می‌باشد (ابنا و مظلوم، ۱۴۰۱).

اثر نانوسیلیس در آب انداختن بتن تازه

بتنِ حاوی نانوسیلیس عموماً دارای آب انداختگی به مراتب کمتر از بتن عادی می‌باشد. این خاصیت به دلیل سطح ویژه زیاد نانوسیلیس است که آب را به خود جذب می‌کند و در نتیجه آب آزاد کمی باقی می‌ماند که بخواهد موجب آب انداختگی بتن شود. همچنین دلیل دیگر این امر، تنگ شدن لوله‌های موئینه بتن است. افزودن نانوسیلیس یا میکروسیلیس، بر زمان گیرش بتن موثر بوده و باعث افزایش آبگیری مواد سیمانی می‌شود و زمان گیرش اولیه را کاهش می‌دهد (پاچیده و قلهکی ، ۲۰۲۰).

اثر نانوسیلیس بر دوام در برابر یخبندان

افزودن موادی نظیر نانوسیلیس به بتن که منجر به افزایش قابل ملاحظه مقاومت مکانیکی آن می‌شود می‌تواند بر هر کدام از عوامل موثر بر دوام بتن در برابر یخبندان اثر بگذارد. به عنوان مثال با افزایش مقاومت مکانیکی، مقاومت کششی بتن هم زیاد شده و در نتیجه دوام آن در برابر یخبندان نیز افزایش می‌یابد. با کاهش تخلخل بتن، تنش‌های ناشی از یخبندان کم می‌شود، زیرا مقدار این تنش‌ها به سطح مقطع نسبی یخ و جسم توپُر سنگ و ضریب تغییر شکل نسبی یخ، سنگ و بتن بستگی دارد (پاجیده و همکاران، ۲۰۱۹).

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

۴ مواد و روش‌ها

۴-۱ مواد

سیمان: در این تحقیق از سیمان پُرتلند تیپ دو[1] کارخانه آباده منطبق بر آیین‌نامه ASTM C150 استفاده شده است.

نانو سیلیس: از ذرات سیلیس که به صورت پودر ساخت شرکت skyspring Nanomaterials,Inc با اندازه ذرات ۱۲ نانومتر، ۶۰ نانومتر، ۱ میکرون استفاده شده است. مشخصات در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خواص نانوذرات SiO۲

اقلام	قُطر	مساحت سطح مرتبط (m^2/g)	غلظت و تراکم (g/cm^3)	درصد خلوص
SiO_2	۱۲ نانومتر	۶۵۰	<۰,۱۴	۹۹٪/۹
SiO_2	۶۰-۸۰ نانو متر	۴۶۰-۵۵۰	<۰,۱۴	۹۹٪/۹
SiO_2	۱ میکرومتر	۱۰		۹۹٪

روان‌کننده: از فوق روان‌کنندهٔ «وند سوپر پلاستم۶۳» با فرمول نفتالین فرمالدئید سولفونات استفاده شده است. این فوق روان‌کننده بر پایه ملامین است که پایه شیمیایی آن دیسپرسیون پلیمری ملامین سولفات است که از شرکت ابر روان‌کننده (ایران) تهیه شده است؛ وزن مخصوص آن ۱/۱۵ گرم بر لیتر می‌باشد.

آب: از آب لوله‌کشی شهری (آزمایشگاه) استفاده شده است.

1.Portland type II cement

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

سنگدانه: از ماسه سیلیسی منطقه ملایر ایران که بزرگترین دانه این سنگدانه ۴/۷۵ میلی‌متر می‌باشد چگالی این سنگدانه 33/3 3^ 〖cm〗 /gr و مدول نرمی طبق استاندارد ASTM C33 برابر ۲/۶ است.

۴-۲ طرح اختلاط

نسبت اختلاط مواد برای بتن معمولی و بتن‌های حاوی نانو و میکرو سیلیکات در جدول ۲ ارایه شده است. نسبت آب به مواد سیمانی (سیمان و ذرات سیلیس) (۴۲/۰ water/binder (w/b در نظر گرفته شده است. نانو سیلیس با قطرهای 12 nm و 60 nm و میکرو سیلیس با قُطر ۱ میکرو متر و در ۳ درصد ۱، ۳ و ۵ استفاده شده است.

جدول ۲. نسبت اختلاط نمونه‌ها (kg/m^3)

نوع مخلوط	آب	سیمان	ماسه	نانو دی اکسید سیلیسیم	فوق روان‌کننده (SP)
CO	۱۵۰	۳۶۰	۱۸۰۰	—	—
1NS12	۱۵۰	۳۵۶/۴	۱۸۰۰	۳/۶	۸/۴
3NS12	۱۵۰	۳۴۹/۲	۱۸۰۰	۱۰/۸	۶/۰۸
5NS12	۱۵۰	۳۳۶/۵	۱۸۰۰	۲۳/۵	۷/۳۶
1NS60	۱۵۰	۳۵۶/۴	۱۸۰۰	۳/۶	۴/۴۸
3NS60	۱۵۰	۳۴۹/۲	۱۸۰۰	۱۰/۸	۵/۷۶
5NS60	۱۵۰	۳۳۶/۵	۱۸۰۰	۲۳/۵	۶/۷۲
1MS1	۱۵۰	۳۵۶/۴	۱۸۰۰	۳/۶	۳/۸۴
3MS1	۱۵۰	۳۴۹/۲	۱۸۰۰	۱۰/۸	۴/۴۸
5MS1	۱۵۰	۳۳۶/۵	۱۸۰۰	۲۳/۵	۶/۰۸

۴-۳ ساخت نمونه‌ها

در این آزمایش به منظور پخش همگن ذرات سیلیس در داخل سیمان لازم است سوسپانسیون پایدار و با پخش‌شدگی خوبی از ذرات سیلیس تهیه شود. برای این منظور، پودر نانوسیلیس را با آب مقطر مخلوط کرده و با سرعت 300-250 rpm و با توجه به قطر و درصد ذرات به مدت

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

۶-۱۰ساعت در هم‌زن مخلوط کردیم. یک مخلوط‌کن چرخشی برای مخلوط کردن بکار می‌رود. در ابتدا سوسپانسیون ذرات سیلیس با روان‌کننده در داخل مخلوط‌کن به مدت ۱/۵ دقیقه با هم خوب مخلوط می‌شود؛ همزمان با مخلوط شدن سوسپانسیون ذرات سیلیس و روان کننده، سیمان را به تدریج اضافه می‌کنیم. بعد از آن، سنگدانه‌های سیلیسی به ترتیب از ریزدانه تا درشت دانه به داخل مخلوط‌کن ریخته و اختلاط تا همگنی کامل ادامه دارد. و بعد از آن، ملات را داخل قالب‌های مورد نظر می‌ریزیم. به منظور ساخت نمونه‌ها برای تست خمشی، بتن داخل قالب‌هایی به ابعاد 160×40×40 mm و در دو لایه که هر لایه توسط ۱۵ ضربه میله فولادی متراکم می‌شود قالب‌گیری می‌شود. به منظور ساخت نمونه‌ها برای تست کششی از قالب‌های استخوانی شکل با طول۲۰۰ میلی‌متر و عرض و ضخامت ۲۵ میلی‌متر استفاده شده است. بتن‌ریزی در دو لایه و هر لایه با ۴ ضربه توسط میله فولادی متراکم می‌شود.

نمونه‌های لقمه استخوانی حدود ۲۰۰ میلی‌متر طول، ۲۵ میلی‌متر عرض و حدود ۲۵ میلی‌متر ضخامت داشتند. برای ساخت نمونه‌های فشاری و آزمون نفوذپذیری بتن در سه لایه داخل قالب‌های مکعبی به ابعاد 50×50×50 mm ریخته شده و هر لایه با ۱۰ ضربه (میله فولادی) متراکم می‌شود. نمونه‌ها بعد از قالب‌گیری به مدت ۲۴ ساعت با یک لایه پلاستیکی پوشیده می‌شود. پس از ۲۴ ساعت قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها تا پایان روز هفتم در حوضچه آب عمل‌آوری می‌شود. از تمام نمونه‌ها سه عدد ساخته شده و نتایج نهایی حاصل از میانگین این سه نمونه است. برای انجام آزمون‌های مکانیکی (فشاری، کششی و خمشی) از دستگاه‌های ساخت شرکت ELE انگلستان استفاده شد. همچنین ریز ساختار نمونه‌ها با میکروسکوب الکترونی روبشی Hitachi مدل S- 4160 بررسی شد و آنالیزهای حرارتی DTA و TGA با دستگاه METTLER TOLEDO مدل TGA/SDTA 851 انجام شد. گرم کردن نمونه‌ها در اتمسفر هوا (در محیط) و در دمای بین ۱۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد با سرعت افزایش ۱۰ C/min صورت گرفت.

۵ تجریه و تحلیل یافته‌های تحقیق

۵-۱ خواص مکانیکی

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

نتایج مقاومت فشاری، کششی و خمشی بعد از هفت روز در جدول ۳ آورده شده است. از این جدول می‌توان دریافت که در تمام نمونه‌ها با اضافه کردن ذرات نانوسیلیس و میکروسیلیس به بتن، خواص مکانیکی نسبت به بتن معمولی بهبود یافته است. به دلیل نحوهٔ اختلاط و پخش همگن ذرات در خمیر سیمان، حتی با اضافه کردن ۱٪ ذرات سیلیس به بتن، خواص مکانیکی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. وقتی ذرات سیلیس به بتن یا سیمان اضافه می‌شود مانند یک پُرکننده شیمیایی، ساختار فیزیکی بتن را تقویت کرده و نقاط هسته‌دار را برای فرآورده‌های آب‌پوشی فراهم می‌کند؛ بعلاوه به عنوان یک پوزولان با CH شکل گرفته در طول آب‌پوشی سیمان واکنش می‌دهد و احتمالاً مقاومت پیوند بین خمیرـ مخلوط سنگی را افزایش می‌دهد (تیلور ، ۱۹۹۰؛ زلیک و همکاران ، ۲۰۰۰).

جدول ۳. خواص مکانیکی نمونه‌ها

شماره مخلوط	مقاومت فشاری در روز هفتم		استحکام کششی در روز هفتم		استحکام خمشی در روز هفتم	
	هدف (MPa)	**دامنه بهبودیافته (٪)**	***هدف (MPa)***	**دامنه بهبودیافته (٪)**	***هدف (MPa)***	**دامنه بهبودیافته (٪)**
CO	۱۱/۴۲	۰	۱/۴۶	۰	۱/۸۱	۰
1NS12	۲۵/۲۸	۱۲۱/۳۷	۲/۲۵	۵۴/۵۴	۳/۳۳	۸۳/۶۴
3NS12	۲۸/۶۱۳	۱۵۰/۵۵	۲/۷۰	۸۵/۵۲	۴/۰۸	۱۲۵/۱۹
5NS12	۲۳/۹۶	۱۰۹/۸۱	۱/۵۰	۲/۹۷۱	۳/۱۶	۷۴/۲۶
1NS60	۲۴/۲۷	۱۱۲/۴۹	۲/۵۶	۷۵/۴۵	۳/۵۹	۹۸/۱۶
3NS60	۲۹/۲۵	۱۵۶/۱۶	۳/۰۲	۱۰۷/۱۱	۴/۳۶	۱۴۰/۶۳
5NS60	۲۳/۲۹	۱۰۳/۰۹	۲/۴۸	۷۰/۲۴	۳/۴۷	۹۱/۱۸
1MS	۲۰/۶۴	۸۰/۷۳	۱/۹۶	۳۴/۰۸	۳/۴۷	۹۱/۱۸
3MS	۱۶/۵۵	۴۴/۸۹	۲/۰۸	۴۲/۴۶	۳/۱۳	۷۲/۴۳
5MS	۲۲/۸۲	۹۹/۸۲	۲/۱	۴۳/۷۶	۳/۸	۱۰۹/۳۹

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

از طرفی همانطور که از نتایج قابل مشاهده است، بتن‌های نانوذرات سیلیس خواص مکانیکی بهتری نسبت به بتن‌های حاوی ذرات میکرو سیلیس دارند. نانوذرات سیلیس سطح مخصوص و تعداد اتم‌های سطحی بیشتری نسبت به ذرات میکروسیلیس دارد. به دلیل وجود اتم‌های موجود در سطح نانو ذرات، پیوندهای آزاد و اشباع نشده و یا نیروهای والانسی پس‌مانده زیادی در سطح به وجود می‌آید که به وضعیت ناپایدار ترمودینامیکی منجر می‌شود. از سوی دیگر، با کاهش اندازه ذره و اتم‌های نامنظم زیاد، مساحت واکنش شیمیایی ماده افزایش می‌یابد (ژانگ و لی، ۲۰۰۲). به همین دلیل نانو ذرات، انرژی سطحی بالایی دارند و واکنش‌پذیری اتم‌ها در سطح آنها زیاد است که به واکنش اتم‌های سطحی با سایر اتم‌های بیرونی منجر می‌شود.

افزودن نانوذرات سیلیس در مقایسه با میکروسیلیس اثرات متفاوتی بر خواص خمیر سیمان دارد؛ NS به دلیل بالا بودن سطح مخصوص، پیوندهای اشباع نشده زیادی Si–O,Si-OH در سطح دارد. فرآیند واکنش بین SiO2 و $Ca(OH)^{-}2$ در آن به صورت زیر رخ می‌دهد (یی و همکاران، ۲۰۰۷):

رابطه (۱) $\equiv Si\text{-}O\text{-} + H\text{-}OH \rightarrow \equiv Si\text{-}OH$

رابطه (۲) $\equiv Si\text{-} + OH \rightarrow \equiv Si\text{-}OH$

رابطه (۳) $\equiv Si\text{-}OH + Ca(OH)_2 \rightarrow C\text{-}S\text{-}H$

به همین دلیل نانوسیلیس می‌تواند نقاط هسته‌دار بیشتری را نسبت به میکروسیلیس برای محصولات آب‌پوشی به وجود آورد و فعالیت پوزولانی بالایی دارد. بنابراین افزودن نانوذرات سیلیس می‌تواند خواص مکانیکی و قدرت پیوند در فصل مشترک خمیر-ریزدانه را افزایش دهد و نسبت به میکروسیلیس ساختار فصل مشترک را بیشتر تقویت نماید. بنابراین استفاده از مقدار کمی NS می‌تواند بر پایداری و خواص مکانیکی مواد سیمانی بیافزاید.

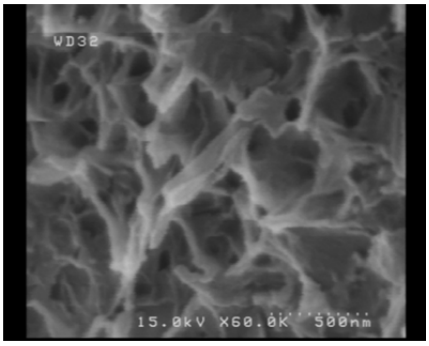
نمونه‌های حاوی نانو سیلیس۶۰ نانومتری مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی نانو سیلیس۱۲ نانومتری دارند. با کاهش قُطر ذرات نانو، به دلیل سطح مخصوص بالای ذرات، پخش همگن آن‌ها در خمیر سیمان مشکل می‌شود و احتمال بهم چسبیدن ذرات ۱۲ نانومتری بیشتر از ذرات۶۰ نانومتری است. با افزایش مقدار ذرات نانو سیلیس تا ۳ درصد، مقاومت افزایش یافته و سپس کاهش یافته است؛ یعنی بیش از ۳٪، ذرات نمی‌توانند به خوبی در ماتریس بتن توزیع

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

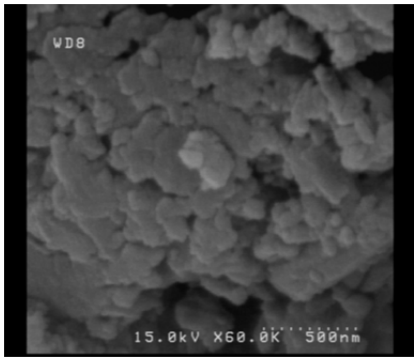
شوند، نانوذرات به دلیل داشتن سطح مخصوص بالا، بهم چسبیده و منطقه ضعیفی به شکل فضاهای خالی ایجاد می‌کنند. در نتیجه ساختار همگن و متراکمی نمی‌تواند شکل گیرد.

۵-۲ ریز ساختار نمونه‌ها

برای بررسی سازوکاری که آزمایشات خواص مکانیکی و جذب آب پیش‌بینی کرده، آزمایشات SEM انجام و مشخص شد که افزودن ذرات سیلیس، بر روند آب‌پوشی تاثیر گذاشته و باعث تفاوت‌هایی در ریز ساختار بتن می‌شود. ذرات سیلیس نه تنها به عنوان پُرکننده برای تقویت ریز ساختار بتن عمل می‌کند، بلکه به عنوان پیش‌برنده واکنش پوزولانی نیز عمل می‌کند (جو و همکاران ، ۲۰۰۷). بنابراین، افزودن ذرات سیلیس در بتن برای بالا بردن عملکرد بتن موثر می‌باشد. همانطور که در تصاویر SEM از نمونه‌های بتن معمولی و بتن‌های حاوی ۳٪ درصد سیلیس در شکل۱ دیده می‌شود، ذرات سیلیس به خاطر اندازه کوچکشان فاصله بین ذرات سیمان را پُرکرده‌اند، برای همین تراکم بتن بهبود یافته است. در این نمونه‌ها، نمونهٔ حاوی نانوذرات سیلیس۶۰ نانومتر که بهترین خواص مکانیکی را داراست، محصول یکنواخت‌تر و متراکم‌تر و منظم‌تر را نشان می‌دهد (شکل۳). با افزایش قُطر ذرات سیلیس، تراکم ریز ساختار بتن کاهش پیدا کرده (شکل۴) که این امر به این دلیل است که با افزایش قطر ذرات، سطح مخصوص آنها کاهش یافته و در نتیجه فعالیت پوزولانی کم می‌شود.

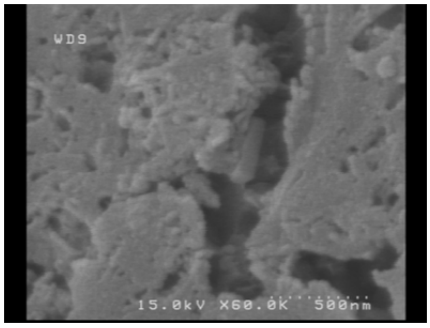


شکل ۱. بتن معمولی

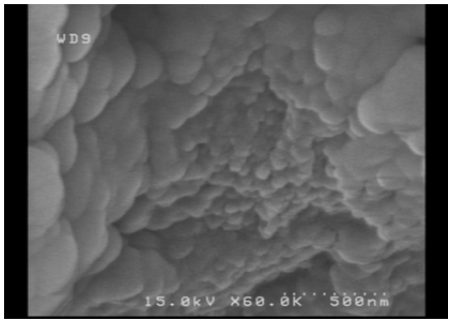


شکل۲. ۱۲ نانومتر

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470



شکل۳. ۱میکرومتر



شکل۴. ۶۰ نانومتر

۳-۵ آزمایش جذب آب

برای انجام آزمایش جذب آب از نمونه‌ها، بعد از اینکه بتن‌ها از قالب باز شدند، نمونه‌ها به مدت ۵ روز در حوضچه آب عمل‌آوری شده و به مدت ۲ روز در محیط اتمسفر خشک می‌شوند. پس از آن، نمونه‌ها را وزن می‌کنیم (W_(dry)) و سپس نمونه‌ها را به مدت ۲۴ ساعت در حوضچه آب نگه‌داری کرده و مجدداً آن‌ها را وزن می‌کنیم (W_(wet)) و طبق فرمول زیر درصد جذب آب (نفوذپذیری) را محاسبه می‌کنیم:

$$P\% = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}} \times 100$$ رابطه (۴)

نتایج در جدول۴ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بیشترین درصد جذب برای بتن معمولی است و کمترین درصد جذب مربوط به نمونه NS60۳ می‌باشد که تصاویر SEM نیز این نتایج را تایید می‌کند (شکل ۱)؛ یعنی بهترین نمونه با بیشترین تراکم مربوط به نمونه NS60۳ می‌باشد. همانطور که قبلاً در بخش خواص مکانیکی، نمونه‌های حاوی۳٪ نانوسیلیس بهترین مقاومت کششی، خمشی و فشاری را داشتند، در این آزمایش نیز بهترین مقاومت در برابر نفوذپذیری را داشتند.

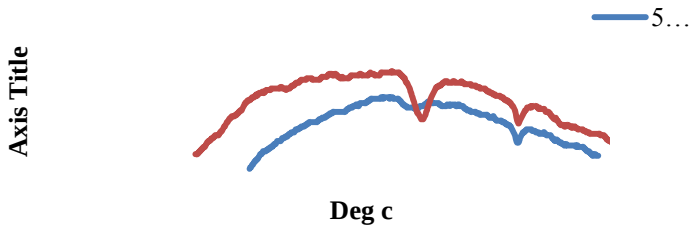
DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

جدول۴. مقایسه جذب آب با بتن‌های حاوی نانوذرات

شماره مخلوط	*CO*	*1NS12*	*3NS12*	*5NS12*	*1NS60*	*3NS60*	*5NS60*	*1MS*	*3MS*	*5MS*
نفوپذیری (درصد)	۴/۲۳	۲/۲۶	۲/۰۹	۲/۶۴	۱/۸۴	۱/۶۲	۳/۴	۱/۸۴	۲/۴۳	۲/۰۳

۴-۵ تحلیل حرارتی افتراقی (*DTA*) و تحلیل وزن‌سنجی حرارتی (*TGA*)

در شکل ۲ و ۳ گراف های DTA و TGA برای دو نمونه بتن معمولی و بتن 5NS12 را مشاهده می کنید در نمودار DTA گرفته شده برای دو نمونه دو پیک در ۴۳۰ و ۵۷۴ مشاهده می شود. پیک واقع در۴۳۰ درجه سانتیگراد مربوط به دی هیدراسیون هیدروکسید کلسیم است (ودالاکشم و همکاران[1]، ۲۰۰۳):



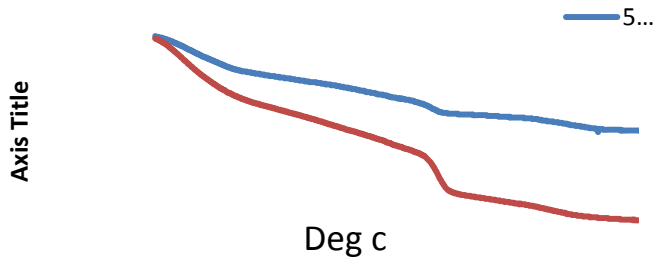
شکل ۵. گراف DTA برای دو نمونه بتن معمولی و بتن 5NS12

طبق شکل ۵ و ۶ اندازه پیک (آنتالپی واکنش) بتن معمولی با افزودن نانوذرات سیلیس کاهش یافته است. میزان Ca(OH)2 از کاهش وزن اندازه‌گیری شده در منحنی TGA تخمین زده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود با اضافه کردن نانوذرات سیلیس، قله کاهش پیدا کرده است:

1. Vedalakshm et al.

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

رابطه (۵) $Ca(OH)2 \rightarrow CaO + H2O\ (i)$



شکل ۶. گراف TGA برای دو نمونه بتن معمولی و بتن 5NS12

این بیانگر آن است که وجود نانوذرات سیلیس در طی فرایند تشکیل بتن باعث کاهش مقدار$Ca(OH)2$ در بتن شده است. بنابراین خود این مطلب گواه آن است که ذرات نانوسیلیس از رشد کریستال‌های$Ca(OH)2$ جلوگیری می‌کند، که به دنبال آن افزایش خواص مکانیکی را داریم؛ همین امر نیز در نتایج بخش‌های قبل مشاهده شد. اندازه پیک در هر دو نمونه بتن معمولی و بتن حاوی نانوذرات سیلیس مقدار ثابتی است.

۵-۵ آزمون پراش اشعه ایکس

تست XRD از بتن بعد از ۳۰ روز از نمونه‌های حاوی ۳٪ ذرات سیلیس گرفته شد. نتایج ترکیبات نشان می‌دهد که بعد از اضافه کردن $SiO2$ با اندازه‌های مختلف می‌تواند مقدار تولیدات اولیه واکنش را افزایش دهد، اما نمی‌تواند محصول جدیدی را تولید کند.

۶ نتیجه گیری و پیشنهادات

استفاده از یک رویکرد جامع و اصولی در مورد بتن و شناخت زیرساخت آن در مقایسه‌ای کوچک، زمینه تولید بتنی با خاصیت خودتراکمی را فراهم می‌کند. بتن‌های مذکور دارای دوام و پایداری بهتری نسبت به بتن‌های معمولی می‌باشند (فیروزمکان و همکاران، ۱۳۹۱). هدف از نانوتکنولوژی، رویکردی جدید در رشته‌های مختلف علوم با تغییر و یا کنترل خواص و رفتار

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

مواد و اشیا است. این امر از طریق تغییر چیدمان ملکولی و ریز ساختارهای آنها در مقیاس نـانو صورت می‌گیرد. نانوتکنولوژی در صنعت بتن، برای تولید بتن‌هایی با مقاومت کششی و فشـاری بیشتر و یا تولید بتنـی بـا سـطوح خودتمیزکننـدگی و خـودترمیمی کـاربرد بیشـتری دارد. از اکسیدهای مختلفی برای بهبود عملکرد و خواص بتن استفاده می‌شود که از آن جمله می‌تـوان به نانو اکسیدهای آهن، سیلیس، تیتانیوم، آلومینیوم و یا نـانو ذراتـی مثـل رس‌هـا، الیـاف‌هـا و لوله‌های کربنی اشاره کرد. در این پژوهش، استانداردسازی و بهبود کیفی خواص مکانیکی و ریز ساختارها به کمک ساخت و مشخصه‌یابی بتن‌های حاوی نانوذرات با قُطرهای مختلف به منظور نوآوری دانش صنعت ساختمان مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش، بتن‌هایی شـامل ذرات سیلیس با اندازه ذره و درصدهای مختلف ساخته شـدند و خـواص مکـانیکی آن‌هـا بـه صـورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفتند. با توجه به روش ساخت، ذرات سیلیس بـه طـور همگـن در کل خمیر سیمان پخش شده‌اند که حتی با اضافه کردن ۱٪ نانوذرات سیلیس به بتن خواص مکانیکی به طور قابل توجهی افزایش یافته است (مقامت فشاری بیش از ۱۰۰ درصـد افـزایش یافته است). نتایج نشان می‌دهد تمام نمونه‌ها با اضافه کردن ذرات نانوسیلیس و میکروسـیلیس به بتن، خواص مکانیکی‌شان (مقاومت فشاری، کششی و خمشی) نسبت به بتن معمولی بهبـود یافته است. حتی با اضافه کردن ۱٪ ذرات سیلیس به بتن، خواص مکانیکی به طور قابل توجهی افزایش یافته است که این به نحـوهٔ اخـتلاط و پخـش همگـن ذرات در خمیـر سـیمان مربـوط می‌شود. به دلیل سـطح مخصـوص بـالای نـانوذرات سـیلیس نسـبت بـه ذرات میکروسـیلیس، بتن‌های حاوی نانوذرات سیلیس خواص مکانیکی بهتری نسبت به بتن‌های حاوی ذرات میکـرو سیلیس دارند.

نمونه حاوی نانو سیلیس ۶۰ نانومتری خواص مکانیکی بهتر و ساختار متراکم‌تر و منظم‌تری را نسبت به بتن‌های حاوی نانوذرات سیلیس۱۲ نانومتر و ۱ میکرومتر از خود نشـان مـی‌دهـد؛ زیرا با کاهش قُطر ذرات نانو، به دلیل سطح مخصوص بالای ذرات، پخش همگن آن‌ها در خمیر سیمان مشکل می‌شود و احتمال بهم چسبیدن ذرات ۱۲ نانومتری بیشتر از ذرات ۶۰ نانومتری است. ذرات SiO_2 کریستال‌های هیدروکسید کلسیم را کـاهش مـی‌دهنـد کـه ایـن کـاهش در نمونه‌های حاوی ذرات نانو سیلیس به علت سطح مخصوص بالایشان از نمونه‌های حاوی میکـرو سیلیس بیشتر است. این امر باعث افزایش بیشـتر مقاومـت در بـتن‌هـای حـاوی نـانو سـیلیس می‌شود. در افزایش نانوذرات بیش از ۳٪، ذرات نمی‌تواننـد بـه خـوبی در مـاتریس بـتن توزیـع

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

شوند، درنتیجه ساختار همگن و متراکمی شکل نمی‌گیرد. بنابر این خواص مکانیکی شروع به کاهش می‌کند. در تمام نمونه‌ها با اضافه کردن ذرات نانوسیلیس و میکروسیلیس به بتن خواص مکانیکی نسبت به بتن معمولی بهبود یافته است. به دلیل نحوهٔ اختلاط و پخش همگن ذرات در خمیر سیمان، حتی با اضافه کردن ۱٪ ذرات سیلیس به بتن خواص مکانیکی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. وقتی ذرات سیلیس به بتن یا سیمان اضافه می‌شود مانند یک پُرکننده شیمیایی، ساختار فیزیکی بتن را تقویت و نقاط هسته‌دار را برای فرآورده‌های آب‌پوشی فراهم می‌کند؛ بعلاوه به عنوان یک پوزولان با CH شکل گرفته در طول آب‌پوشی سیمان واکنش می‌دهد و احتمالاً مقاومت پیوند بین خمیر- مخلوط سنگی را افزایش می‌دهد.

برای بررسی سازوکاری که آزمایشات خواص مکانیکی و جذب آب پیش‌بینی کرده، آزمایشات SEM انجام و مشخص شد که افزودن ذرات سیلیس، بر روند آب‌پوشی تاثیر گذاشته و باعث تفاوت‌هایی در ریز ساختار بتن می‌شود. ذرات سیلیس نه تنها به عنوان پُرکننده برای تقویت ریز ساختار بتن عمل، بلکه به عنوان پیش‌برنده واکنش پوزولانی نیز عمل می‌کند. برای انجام آزمایش جذب آب از نمونه‌ها، بعد از اینکه بتن‌ها از قالب باز شدند، به مدت ۵ روز در حوضچه آب عمل‌آوری می شوند و به مدت ۲ روز در محیط اتمسفر خشک می‌شوند. ملاحظه شد بیشترین درصد جذب برای بتن معمولی است و کمترین درصد جذب مربوط به نمونه NS603 می باشد که تصاویر SEM نیز این نتایج را تایید می کند. یعنی بهترین نمونه با بیشترین تراکم مربوط به نمونه NS603 می باشد. همچنین ملاحظه شد نمونه‌های حاوی ۳٪ نانوسیلیس دارای بهترین مقاومت کششی، خمشی و فشاری هستند؛ در این آزمایش نیز بهترین مقاومت در برابر نفوذ پذیری را داشتند. این بیانگر آن است که وجود نانوذرات سیلیس در طی فرایند تشکیل بتن باعث کاهش مقدار Ca(OH)2 در بتن شده است. بنابراین خود این مطلب گواه آن است که ذرات نانوسیلیس از رشد کریستال‌های Ca(OH)2 جلوگیری می‌کند. تست XRD از بتن بعد از ۳۰ روز از نمونه‌های حاوی ۳٪ ذرات سیلیس گرفته شد. نتایج ترکیبات نشان می‌دهد که بعد از اضافه کردن SiO۲ با اندازه‌های مختلف می‌تواند مقدار تولیدات اولیه واکنش را افزایش دهد، اما نمی‌تواند محصول جدیدی را تولید کند.

نتایج تحقیق فعلی و نیز تحقیقات گذشته نشان داده که استفاده از الیاف در بتن و نیز نانوذرات سیلیس سبب افزایش مقاومت سایشی، خمشی و کششی می‌شود. از یک سو، بتن خودتراکم، بتنی بسیار سیال و مخلوطی بسیار همگن است که بسیاری از مشکلات بتن معمولی

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

را مرتفع نموده و بدون نیاز به هیچگونه لرزاننده داخلی و خارجی، تحت اثر وزن خود، متراکم می‌شود. این ویژگی کمک شایانی به اجرای اعضای سازه‌ای با تراکم زیاد آرماتور می‌نماید. از سویی دیگر، فناوری نانو در سالیان اخیر موجب تحولات شگرفی در دانش بشری شده و نانو ذرات که نتیجه‌ای از فناوری نانو می‌باشند به عنوان یک پوزولان مصنوعی بسیار فعال درتکنولوژی بتن توانسته‌اند با کاربرد در ساخت مصالح پایه سیمانی ساختار آنها را تحت تاثیر قرار داده و بهبود بخشند. لذا استفاده از بتنی که خصوصیات بتن خودتراکم و الیافی را با هم داشته باشد و ریز ساختار ماتریس آن تقویت شده باشد کمک شایانی به ساخت سازه‌هایی با عملکرد بالا و با دوام می‌نماید. برای همین، به منظور انجام تحقیقات آینده، ساخت و مشخصه‌یابی بتن‌های حاوی نانوذرات که خصوصیات بتن خودتراکم و الیافی را با هم داشته باشند، پیشنهاد می‌شود.

۷ مراجع

منابع فارسی

- ابنا، امیر حسین.، مظلوم، موسی. (۱۴۰۱). تاثیر میکروسیلیس و نانوسیلیس بر روانی و مشخصات مکانیکی بتن خودتراکم حاوی الیاف پلی‌پروپیلن، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۴(۳)، ۱۱۰۱-۱۱۱۸.
- برنجیان، جواد.، کهساری، محمد. (۱۳۹۰). تأثیر پودر میکروسیلیس بر مشخصات تازه و سخت شده بتن خودمتراکم.
- پرهیزکاری، مجید، صابری ورزنه، علی، نادری، محمود. (۱۴۰۲). تاثیر مواد کاهنده نفوذ بر نفوذپذیری و مقاومت بتن با آزمون‌های "محفظه استوانه‌ای" و "پیچش ." نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۵(۱)، ۱۹-۴۰.
- ثقفی لاسمی، رضا، ضیایی، مسعود، علیزاده الیزئی، محمد هادی، اسماعیل آبادی، رضا. (۱۴۰۲). رفتار حرارتی بتن با لاستیک بازیافتی و پودر شیشه به عنوان بخشی از ریزدانه و سیمان .نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۵(۱)، ۸۵-۱۰۸.

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

- جعفری نسب، تانیا، منوری، سید مسعود، جوزی، سید علی، ماجدی، حمید. (۱۴۰۲). ارزیابی چرخه حیات محیط زیستی مصالح مصرفی در بلند مرتبه سازی شهر تهران . نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، در دست انتشار.
- دشتی رحمت آبادی، محمدعلی.، سرگلزائی، فرشید. (۱۴۰۱). مروری بر تاثیرگذاری میکرو سیلیس و نانو سیلیس در بهبود خواص بتن خود متراکم، ششمین کنفرانس بین المللی مطالعات جهانی در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، تهران.
- رازانی، مهدی.، نعمانی, لیلی.، منصوری اصفهانی، مهین. (۱۴۰۱). ارزیابی نانوذرات سیلیس در استحکام بخشی سنگ‌های ازاره برج مقبره شیخ حیدر، مشکین شهر، ایران .علوم و فناوری رنگ، ۱۶(۴)، ۳۴۳-۳۵۷.
- رمضانیان پور، علی اکبر.، زائری امیرانی، محمد مهدی.، میرولد، سید سجاد. (۱۴۰۱). عملکرد نانوصفحات گرافن اکساید بر دیسپرسیون نانوذرات اکسید سیلیس و تأثیر آن بر خصوصیات مکانیکی ملات سیمانی .نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۴(۱۰)، ۳۷۵۹-۳۷۷۶.
- رمضانیانپور، علی اکبر. (۱۳۹۱). مقایسه اثرات نانو سیلیس و دودهٔ سیلیس بر روی ریزساختار و دوام نمونه های بتنی .نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۴۴(۱)، ۶۵-۷۵.
- رمضانیانپور، علی اکبر، رشیدداداش، پانته آ. (۱۳۹۱). بتن الیافی هیبریدی مسلح به الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن .نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۴۴(۲)، ۷۵-۸۳.
- شوش پاشا، عیسی.، عباسی، مجتبی.، نجف نیا، هادی. (۱۳۹۷). بررسی اثر ترکیب سیمان و نانوسیلیس بر روی مقاومت برشی خاک ماسه ای بابلسر .نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۰(۱)، ۱۷۹-۱۸۸.
- صفرخانی، مهنا، نادری، محمود. (۱۴۰۲). ارزیابی مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن مسلح به گرافن‌اکساید با به بکارگیری نتایج حاصل از روش "محفظه استوانه‌ای ." نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۵(۲)، ۴۷۱-۴۹۰.

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

- فرخ زاد، رضا.، مهرپویا، محسن. (۱۳۹۵). استفاده از میکروسیلیس و نانوسیلیس جهت ارتقاء خواص مکانیکی و دوامی بتن خود تراکم حاوی سنگدانه‌های حاصل از بازیافت بتن .آنالیز سازه – زلزله، ۱۳(۴)، ۱–۱۸.
- فیروزمکان، شبنم و رمضانیانپور، علی اکبر و عبادی، تقی و بهرامی، حامد. (۱۳۹۱). تاثیر نانو سیلیس بر خصوصیات مکانیکی و دوام بتن، فصلنامه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، دوره: ۴۲، شماره: ۶۶.
- گلشن، محمودرضا.، عوض نژاد، فرهاد.، شیبانی، حمیدرضا. (۱۴۰۲). بررسی آزمایشگاهی مقاومت فشاری، کششی و سایش بتن با رنگدانه معدنی گل ماش (لیمونیت) با تاکید بر زیباسازی شهری .علوم و فناوری رنگ، ۱۷(۱)، ۵۱–۶۳.
- مدنی، سید حسام، خاقانی بروجنی، امیر، پورجهانشاهی، امین. (۱۳۹۷). بررسی خواص مکانیکی، فوتوکاتالیستی و واکنش زایی نانو ذرات اکسیدروی در محیط سیمانی .نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۰(۲)، ۲۵۷–۲۶۸.
- نادری، مهدی. (۱۳۹۳). بررسی و مقایسه تاثیرات نانوسیلیس و نانولوله های کربنی بر خواص مکانیکی بتن، پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، دانشگاه ارومه.

منابع انگلیسی

- A. Guefrech, P. Mounanga, A. Khelidj, (2011). Experimental study of the effect of addition of nano-silica on the behaviour of cement mortars Mounir, Procedia Engineering, 10: 900-905.
-
- A. Nazari, S. Riahi, (2011). RETRACTED: The effects of SiO2 nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete, in, Elsevier, 2011.
- A.N. Givi, S.A. Rashid, F.N.A. Aziz, M.A.M. Salleh, (2010). Experimental investigation of the size effects of SiO2 nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete, Composites Part B: Engineering, 41(8): 673-677.

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

- Ali Nazari, Shadi Riahi, Shirin Riahi, Seyedeh Fatemeh Shamekhi and A. Khademno. (2010a). Assessment of the effects of the cement paste composite in presence TiO2 Nanoparticles, Journal of American Science; 6(4), 43-46.
- Ali Nazari, Shadi Riahi, Shirin Riahi, Seyedeh Fatemeh Shamekhi and A. Khademno. (2010b). An investigation on the Strength and workability of cement based concrete performance by using ZrO2 nanoparticles, Journal of American Science; 6(4), 29-33
- Deependra, P. B., Sandeep, S., Rishav, G. (2022). Experimental investigation on the effect of Nano-silica on the silica fume-based cement composites, Materials Today: Proceedings,Volume 57, Part 5, 2022, Pages 2338-2343.
- E. Shamsaei, F.B. de Souza, X. Yao, E. Benhelal, A. Akbari, W. Duan, (2018). Graphene-based nanosheets for stronger and more durable concrete: A review, Construction and Building Materials, 183: 642-660.
- Gholamiyan, H. Javid, A. (2021). Investigating the effect of clay nanoparticles and various coatings on increasing thermal properties and fire resistance of wood. J. Color Sci. Tech.15(2021), 165-176. [In Persian]
- H. Liu, Y. Yu, H. Liu, J. Jin, S. Liu, (2018). Hybrid effects of nano-silica and graphene oxide on mechanical properties and hydration products of oil well cement, Construction and Building Materials, 191: 311-319.
- H. Peng, Y. Ge, C. Cai, Y. Zhang, Z. Liu, (2019). Mechanical properties and microstructure of graphene oxide cement- based composites, Construction and Building Materials, 194:102-109.
- Hamada, H., Jinyan Shi, Salim T. Yousif, Mohammed Al Jawahery, Bassam Tayeh & Gul Jokhio. (2023). Use of nano-silica in cement-based materials – a comprehensive review, Journal of Sustainable Cement-Based Materials, DOI: 10.1080/21650373.2023.2214146
- Hui Li, Mao-hua Zhang, Jin-ping Ou. (2006). Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement, Wear 260, 1262–1266
- Hui Li, Mao-hua Zhang, Jin-ping Ou. (2007). Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement, International Journal of Fatigue 29, 1292–1301
- J. Lin, E. Shamsaei, F.B. de Souza, K. Sagoe-Crentsil, W.H. Duan, (2020). Dispersion of graphene oxide–silica nanohybrids in alkaline environment for improving ordinary Portland cement composites, Cement and Concrete Composites, 106: 103488.
- Jo BW, Kim CH, Tae G, Park JB. (2007). Characteristics of cement mortar with nano-SiO2 particles. Const Build Mater; 21(6): 1351-1355.
- M. Liu, H. Tan, X. He, (2019). Effects of nano-SiO2 on early strength and microstructure of steam-cured high volume fly ash cement system, Construction and Building Materials, 194: 350-359.

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

- M. Ltifi, A. Guefrech, P. Mounanga, A. Khelidj, (2011). Experimental study of the effect of addition of nano-silica on the behaviour of cement mortars, Procedia engineering, 10: 900-905.
- M. Mokhtar, S. Abo-El-Enein, M. Hassaan, M. Morsy, M. Khalil, (2017). Mechanical performance, pore structure and micro-structural characteristics of graphene oxide nano platelets reinforced cement, Construction and Building Materials, 138: 333-339.
- Mazloom, M., Mirzamohammadi, S. Fracture of fibrereinforced cementitious composites after exposure to elevated temperatures, Magazine of Concrete Research, (2019): 1-36
- Pachideh, G. Gholhaki, M. Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag, Journal of Structural Fire Engineering, (2020).
- Pachideh, G. Gholhaki, M. Moshtagh, A. On the post-heat performance of cement mortar containing silica fume or Granulated Blast-Furnace Slag, Journal of Building Engineering, 24 (2019) 100757.
- Price, C. A. Doehne E. (2012). Stone conservation: an overview of current research. Los Angeles: GCI. 2010 (Tramslated to Farsi by Mehdi razani, Hadi zand KArimi, Tehran: Faza.
- Rodrıguez-Camacho, R., Uribe-Afif. R. (2002). Importance of using the natural pozzolans on concrete durability, Cement and concrete research, 32(12): 1851-1858.
- Scotti, R. Bellobonom I. R., Canevali, C. Cannas, C. Catti, M. D'Arienzo, M. Morazzoni, F. 2008). Sol− gel pure and mixedphase titanium dioxide for photocatalytic purposes: relations between phase composition, catalytic activity, and charge-trapped sites. Chem. Mater. 20(2008), 4051-4061.
- Taylor, HFW. (1990). Cement chemistry. London, UK: Academic Press; p. 305–7, 374–8.
- Vedalakshm, R., Sundara Raj, A., Srinivasan, B.S., Ganesh Babu, A.K. (2003). Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique, Thermochimica Acta 407, 49–60.
- W. Li, X. Li, S.J. Chen, Y.M. Liu, W.H. Duan, S.P. Shah, (2017). Effects of graphene oxide on early-age hydration and electrical resistivity of Portland cement paste, Construction and Building Materials, 136: 506-514.
- WANG Baomin, WANG Lijiu, F C Lai. (2008). Freezing Resistance of HPC with Nano-SiO2, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., Vol.23 No.1, 85-88.

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

- Ye Qing, Zhang Zenan, Kong Deyu, Chen Rongshen. (2007). Influence of nano-SiO2 addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume, Construction and Building Materials 21, 539–545.
- Zelic J, Rusic D, Veza D, Krstulovic R. (2000). The role of silica fume in the kinetics and mechanisms during the early stage of cement hydration.Cem Concr Res; 30:1655–62.
- Zhang, YL, Li, CD. (2002). Nano-structured technology and nano-structured plastics. Beijing, China: China Light Industry Press; p. 8–15, 386–9. [in Chinese]

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470

Research paper

Standardization and qualitative improvement of mechanical properties and microstructures with the help of manufacturing and characterization of concretes containing nanoparticles

Mohammad Reza Arefi

Received:23/02/2023

Accepted:01/07/2023

Abstract

The main purpose of the current research is to standardize and improve the quality of mechanical properties and microstructures with the help of manufacturing and characterizing concretes containing nanoparticles with different diameters in order to innovate the knowledge of the construction industry. In this experiment, concretes containing silica particles with different particle sizes and percentages were made and their mechanical properties were studied in a laboratory. According to the manufacturing method, the silica particles are homogeneously distributed throughout the cement paste, and even by adding 1% of silica nanoparticles to concrete, the mechanical properties are significantly increased (the compressive strength is increased by more than 100%). The results show that the compressive, bending and tensile strength on the seventh day in concrete containing silica particles is higher than normal concrete. Thermal gravimetric analysis, scanning electron microscopy, differential thermal analysis and resistance to water penetration regarding the structure of concrete containing silica particles and ordinary concrete showed that nanoparticles and micron particles completely filled the voids and combined CaOH2 It reduces the hydrates. These mechanisms explained the entire mechanical performance of concrete with silica particles.

Keywords: micro SiO2, SiO2, nano SiO2, concrete strength, microstructure

DOI: 10.22034/jsqm.2023.387273.1470