

بهینه‌سازی نفوذپذیری و دوام بتن معمولی با استفاده از نانوذرات اکسید سیلیس

فرهاد پیرمحمدی علیشاه *

گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شبستر، شبستر، ایران.

چکیده

دوام سازه‌های بتنی یکی از عوامل اساسی در تعیین عمر مفید آن‌هاست، به‌ویژه هنگامی که بتن در معرض محیط‌های مهاجم قرار می‌گیرد. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر نانوذرات اکسید سیلیس (SiO_2) بر بهبود دوام و کاهش نفوذپذیری بتن است. در این تحقیق، نانوذرات سیلیس با درصدهای مختلف جایگزین بخشی از سیمان در طرح اختلاط بتن شده و نمونه‌ها از نظر نفوذپذیری، تخلخل و مقاومت در برابر حملات سولفاتی مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد استفاده از نانوذرات، در صورت پراکندگی مناسب، موجب افزایش همگنی و انسجام بتن، کاهش نفوذپذیری و تخلخل، و بهبود چسبندگی خمیر سیمان می‌شود. واکنش پوزولانی نانوذرات با هیدروکسید کلسیم سبب تشکیل ژل‌های مقاوم‌تر و کاهش مسیرهای نفوذ عوامل مخرب گردیده است. همچنین بتن حاوی نانوذرات از مقاومت بالاتری در برابر حملات سولفاتی برخوردار بوده و دوام آن در بلندمدت افزایش یافته است. به‌طور کلی، افزودن نانوذرات اکسید سیلیس را می‌توان راهکاری کارآمد برای ارتقای دوام و پایداری بتن در شرایط محیطی مهاجم دانست.

واژه‌های کلیدی: بتن، نانوذرات اکسید فلزی، مقاومت فشاری، نفوذپذیری، ریزاختار

* نویسنده مسئول: Petrofarhad@iaushab.ac.ir

۱- مقدمه

مهاجم مورد کاوش قرار خواهد گرفت تا راهکاری مؤثر برای دستیابی به عمر طولانی تر سازه های بتنی ارائه شود.

۲- پیشینه تحقیق

۲-۱- تاریخچه و مبانی نانوفناوری

مفهوم نانوفناوری، با وجود آغاز رسمی آن در دهه های اخیر، ریشه در مفاهیم علمی قدیمی تری دارد. ایده دستکاری مستقیم ماده در مقیاس اتمی و مولکولی برای اولین بار توسط ریچارد فاینمن در سخنرانی معروف خود با عنوان "There's Plenty of Room at the Bottom" در سال ۱۹۵۹ [۱] مطرح شد. واژه "نانوتکنولوژی" نیز برای اولین بار توسط استاد دانشگاه علوم توکیو، نوریو تانیگوجی، در سال ۱۹۷۴ [۲] برای توصیف ساخت مواد یا وسایل دقیق با ابعادی در حد نانومتر به کار رفت. با این حال، تعریف مجدد و ظهور مفهوم مدرن نانوفناوری به کتاب اریک درکسلر در سال ۱۹۸۶ [۳] با عنوان "Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology" نسبت داده می شود که در رساله دکترای خود به بحث در مورد ساخت "ماشین های نانوسیستم" پرداخت. کشف میکروسکوپ تونلی روبشی^۵ در اوایل دهه ۱۹۸۰ و به دنبال آن، کشف فولرین در سال ۱۹۸۶ [۴] و نانولوله های کربنی، توسعه این حوزه را تسریع بخشید. پیشرفت های بعدی شامل توسعه میکروسکوپ های نیروی اتمی^۶ بود که امکان بررسی اتم ها را فراهم کرد و منجر به افزایش شدید تولید نانوذراتی مانند نقاط کوانتومی و نانوذرات اکسید فلزی گردید.

۲-۲- کاربرد نانوذرات در بتن

استفاده از نانوذرات در صنعت بتن با هدف اصلاح ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی و دوامی صورت گرفته است. نانوذرات اکسیدهای فلزی (مانند SiO_2 ، TiO_2 و Al_2O_3) به دو شیوه اصلی بر عملکرد بتن تأثیر می گذارند:

اثر پرکنندگی^۷: نانوذرات به عنوان ذرات ریز، خلل و فرج های موجود در خمیر سیمان را پر کرده و چگالی و همگنی ریزساختار را افزایش می دهند.

ساخت و ساز سازه های بتنی به دلیل مقاومت بالا و هزینه نسبتاً پایین، در میان پرکاربردترین مصالح مهندسی سازه ای در جهان است. با این حال، دوام^۱ این سازه ها، به ویژه در معرض شرایط محیطی مهاجم و طولانی مدت، همواره چالشی اساسی در مهندسی عمران محسوب شده است. دوام بتن مستقیماً تحت تأثیر عواملی مانند نرخ نفوذپذیری^۲ آن قرار دارد، زیرا یون های مهاجم و مواد شیمیایی مخرب محیطی (مانند سولفات ها و کلریدها) برای آغاز فرایندهای تخریب باید از طریق شبکه منفذی بتن به داخل آن نفوذ کنند. بنابراین، کنترل و کاهش نفوذپذیری بتن به عنوان یک پارامتر کلیدی در تضمین عمر مفید سازه های بتنی مطرح می شود.

در سال های اخیر، رویکردهای مبتنی بر فناوری نانو تحولی چشمگیر در اصلاح خواص بتن ایجاد کرده اند. در این میان، استفاده از نانوذرات اکسید سیلیس^۳ به دلیل ماهیت پوزولانی قوی و ابعاد بسیار کوچک، توجه ویژه ای را به خود جلب نموده است. این نانوذرات می توانند با پر کردن خلل و فرج های میکروسکوپی و همچنین شرکت در واکنش های هیدراتاسیون سیمان (به ویژه از طریق واکنش با هیدروکسید کلسیم آزاد)، ساختار بتن را به طور قابل توجهی متراکم و همگن سازند. با وجود مطالعات گسترده در زمینه تأثیر نانوذرات بر مقاومت فشاری بتن، همچنان نیاز به بررسی دقیق تر و کمی تر تأثیر آن ها بر مکانیسم های کاهش نفوذپذیری در بلندمدت، و همچنین مطالعه هم زمان اثرات پوزولانی و اثرات پرکنندگی^۴ وجود دارد. علاوه بر این، درک بهتر چگونگی تأثیر نانوذرات بر مقاومت در برابر حملات شیمیایی، نظیر حمله سولفات، که یکی از مهم ترین عوامل تخریب در سازه های مدفون یا مجاور آب های زیرزمینی است، برای دستیابی به بتنی با دوام فوق العاده ضروری است.

هدف اصلی این پژوهش، بررسی تجربی و کمی تأثیر سطوح مختلف نانوذرات اکسید سیلیس بر کاهش نفوذپذیری و بهبود دوام کلی بتن معمولی است. در این راستا، علاوه بر ارزیابی مقاومت فشاری، مکانیسم های ریزساختاری بهبود یافته از طریق تحلیل های پیشرفته، و تأثیر این افزودنی بر رفتار بتن در برابر عوامل

^۵ STM^۶ AFM^۷ Filler Effect^۱ Durability^۲ Permeability^۳ Nano SiO_2 ^۴ Filler Effect

بتن می‌شود. با توجه به مرور مطالعات پیشین، می‌توان گفت که بیشتر پژوهش‌ها بر تأثیر نانوذرات در مقاومت فشاری متمرکز بوده‌اند، درحالی‌که بررسی هم‌زمان مقاومت فشاری و ویژگی نفوذپذیری به‌ویژه برای بتن معمولی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این پیشینه نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات به بتن یک استراتژی قدرتمند برای ارتقاء خواص است، اما بهینه‌سازی نسبت اختلاط و درک دقیق مکانیسم‌های حاکم بر کاهش نفوذپذیری، همچنان زمینه‌ای برای تحقیقات دقیق‌تر در این پژوهش است. لذا، تحقیق حاضر با هدف تکمیل این خلأ علمی، تأثیر نانوذرات اکسید فلزی بر مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن معمولی را در سنین ۷ و ۲۸ روز مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار داده است.

۳- روش تحقیق

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی دقیق و کمی تأثیر افزودنی‌های نانوذرات بر عملکرد بتن، از یک رویکرد تحقیق تجربی^۴ در محیط آزمایشگاهی بهره برده است. این روش اجازه می‌دهد تا اثر متغیر مستقل (نوع و درصد نانوذرات) به طور کنترل شده بر متغیر وابسته (خواص بتن) مورد سنجش قرار گیرد.

۳-۱- تعریف و آماده‌سازی مواد اولیه

در این مرحله، کیفیت و مشخصات فنی کلیه مواد اولیه مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتنی به دقت مورد ارزیابی قرار گرفت:

سیمان: سیمان پرتلند تیپ II مورد استفاده قرار گرفت و خواص فیزیکی و شیمیایی آن مطابق با استانداردهای ملی (مانند ASTM C150 [۹] یا معادل ملی) مورد تأیید قرار گرفت.

سنگ‌دانه‌ها: سنگ‌دانه ریز (ماسه) و درشت (شن) با رعایت دانه‌بندی، وزن مخصوص و درصد رطوبت بهینه انتخاب و آماده‌سازی شدند.

افزودنی نانوذرات: نانوذرات مورد نظر (مانند SiO_2) در غلظت‌های مشخص (مثلاً ۱٪، ۳٪ و ۵٪ درصد وزنی نسبت به سیمان) به‌عنوان متغیر اصلی تحقیق انتخاب شدند. روش پخش و دیسپرسیون نانوذرات در آب اختلاط یا افزودن مستقیم به مواد

اثر پوزولان^۱: نانوذرات فعال با هیدروکسید کلسیم^۲ آزاد شده در فرایند هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و محصولات جانبی پایداری (مانند C-S-H) تولید می‌کنند که این امر منجر به کاهش تخلخل و نفوذپذیری می‌شود.

۳-۲- پیشینه‌های مرتبط با دوام و نفوذپذیری

تحقیقات متعددی بر تأثیر نانوذرات بر دوام بتن متمرکز شده‌اند: مطالعات بر استحکام و نفوذپذیری: مطالعاتی نظیر آنچه در سال ۲۰۱۱ توسط عارف و همکاران انجام شد، بر بررسی اثر افزودن نانوذرات Al_2O_3 بر خواص مکانیکی و ریزساختار بتن تمرکز کردند و نتایج بهبود یافته‌ای را در غلظت‌های پایین (مانند ۱ و ۳ درصد وزنی) نشان دادند. همچنین، پژوهش‌هایی مانند مطالعه سیمانی‌ها در سال ۲۰۱۱ نشان داد که افزودن نانوذرات SiO_2 با نسبت‌های مشخص (مانند ۰٫۵ تا ۱٫۵ درصد) می‌تواند بهبود قابل توجهی در استحکام خمشی بتن داشته باشد.

تأثیر بر حملات شیمیایی: در رابطه با دوام، جلال و همکاران در سال ۲۰۱۲ بر روی تأثیر نانوذرات TiO_2 بر خواص حرارتی بتن کامپوزیت تحقیق کردند. همچنین، تحقیقات به بررسی مکانیسم‌های حمله سولفات و تأثیر بتن‌های نانوکامپوزیتی بر مقاومت در برابر این حملات پرداخته‌اند، که این موضوع مستقیماً با کاهش نفوذپذیری مرتبط است.

پژوهش‌های [۵] Li et al. (2019) و [۶] Nazari & Riahi (2011) نشان داده‌اند که استفاده از نانوذرات TiO_2 تا مقدار بهینه حدود ۳ تا ۵ درصد وزنی سیمان، بیشترین تأثیر را بر افزایش مقاومت فشاری دارد. از سوی دیگر، برخی مطالعات مانند [۷] Sanchez & Sobolev (2010) هشدار داده‌اند که مصرف بیش از حد نانوذرات ممکن است موجب ایجاد توده‌های تجمعی^۳ و کاهش یکنواختی در مخلوط گردد که خود منجر به تضعیف خواص مکانیکی بتن می‌شود. بنابراین، تعیین مقدار بهینه نانوذرات، نوع اکسید فلزی، و مقادیر مختلف سیمان از عوامل مهم در بررسی عملکرد بتن نانویی هستند. همچنین، تحقیقات Hosseini et al. (2015) [۸] گزارش کرده‌اند که کوچک‌تر شدن اندازه ذرات موجب بهبود تراکم خمیر سیمانی و کاهش ضریب نفوذ کلراید در

³ agglomeration

⁴ Experimental Research

¹ Pozzolanic Effect

² Ca(OH)_2

خشک، بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد و ملاحظات مربوط به گردیدن (جدول ۱).
جلوگیری از کلوخه شدن، تعیین و اعمال گردید.

اختلاط: نمونه‌ها در میکسر آزمایشگاهی با رعایت ترتیب اضافه کردن مواد و زمان‌های اختلاط دقیق (برای اطمینان از یکنواختی پخش نانوذرات) تهیه شدند.

۲-۳- طرح اختلاط و تهیه نمونه‌ها

برای مقایسه علمی و استخراج نتایج دقیق، طرح اختلاط شاهد (Control Mix) که فاقد نانوذرات بود، در کنار طرح‌های اختلاط آزمایشی تهیه شد.

طرح اختلاط: بر اساس روش اختلاط حجمی یا وزنی استاندارد مانند [۱۰] (ACI 211)، طرح اختلاط پایه تنظیم شد. سپس، طرح‌های اختلاط جدید با جایگزینی درصد معینی از سیمان با نانوذرات (یا افزودن نانوذرات به مخلوط خشک) تعریف شدند.

جدول ۱- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی با $W/C=0.35$

عیار مواد	نسبت آب	ابر روان کننده	مقدار سیمان	مقدار نانو	مقدار ماسه	مقدار ابر	نانو مواد (%)
سیمانی (gr)	به سیمان (%)	نسبت به مواد سیمانی (%)	در اختلاط (gr)	مواد در اختلاط (gr)	در اختلاط (gr)	آب در اختلاط (gr)	
۳۵۰	۰/۳۵	۱	۲۸۸/۷۵	۰	۱۳۱۵/۸۸	۱۰۱/۰۶	۰
۴۰۰	۰/۳۵	۱	۳۳۰	۰	۱۲۹۵/۲۵	۱۱۵/۵	۰
۴۵۰	۰/۳۵	۱	۳۷۱/۲۵	۰	۱۲۷۸/۲۵	۱۲۹/۹۴	۰
۳۵۰	۰/۳۵	۱	۲۸۵/۸۶	۲/۸۸۷۵	۱۳۱۵/۸۸	۱۰۱/۰۶	۱
۴۰۰	۰/۳۵	۱	۳۲۶/۷	۳/۳	۱۲۹۵/۲۵	۱۱۵/۵	۱
۴۵۰	۰/۳۵	۱	۳۶۷/۵۴	۳/۷۱۲۵	۱۲۷۸/۷۵	۱۲۹/۹۴	۱
۳۵۰	۰/۳۵	۱	۲۸۰/۰۹	۸/۶۶۲۵	۱۳۱۵/۸۸	۱۰۱/۰۶	۳
۴۰۰	۰/۳۵	۱	۳۲۰/۱	۹/۹	۱۲۹۵/۲۵	۱۱۵/۵	۳
۴۵۰	۰/۳۵	۱	۳۶۰/۱۱	۱۱/۱۳۷۵	۱۲۷۸/۷۵	۱۲۹/۹۴	۳
۳۵۰	۰/۳۵	۱	۲۷۴/۳۱	۱۴/۴۳۷۵	۱۳۱۵/۸۸	۱۰۱/۰۶	۵
۴۰۰	۰/۳۵	۱	۳۱۳/۵	۱۶/۵	۱۲۹۵/۲۵	۱۱۵/۵	۵
۴۵۰	۰/۳۵	۱	۳۵۳/۶۹	۱۸/۵۶۲۵	۱۲۷۸/۷۵	۱۲۹/۹۴	۵

تست با نرخ بارگذاری استاندارد قرار گرفتند تا مقاومت فشاری در سنین تعیین شده اندازه‌گیری شود.

آزمایش دوام (نفوذپذیری): روش‌های کمی مانند آزمایش نفوذ آب تحت فشار (بر اساس ASTM C1202 [۱۱]) یا روش‌های مشابه (یا اندازه‌گیری نفوذپذیری ناشی از نفوذ گاز (مانند استفاده از روش‌های مبتنی بر اکسیژن یا CO_2 در صورت لزوم) به کار

۳-۳- آزمون‌های ارزیابی خواص

آزمایش‌های کلیدی برای ارزیابی تأثیر نانوذرات بر عملکرد بتن به شرح زیر در سنین مشخص (معمولاً ۷ و ۲۸ روزه) انجام گرفت: ارزیابی خواص تازه (در صورت لزوم): اندازه‌گیری روانی^۱ برای اطمینان از حفظ کارایی بتن پس از افزودن نانوذرات. آزمایش مقاومت فشاری: نمونه‌ها تحت بارگذاری در دستگاه

^۱ Drop Slump Test

گرفته شد.

۴- مصالح مورد استفاده

۴-۱- سیمان

سیمان مورد استفاده جهت ساخت بتن، سیمان پرتلند پوزولانی ساخت شرکت سیمان صوفیان تحت عنوان سیمان‌های آمیخته مطابق با استاندارد ASTM C 496 [۱۲] می‌باشد. جدول ۲ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد استفاده را نشان می‌دهد. این خواص در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و با خواص سیمان پرتلند پوزولانی استاندارد [۱۳] مقایسه شده است.

۴-۳- تحلیل داده‌ها

داده‌های حاصل از تمام آزمایش‌ها به صورت کمی جمع‌آوری شده و سپس از طریق روش‌های آماری توصیفی (محاسبه میانگین، انحراف معیار) و استنباطی مانند تحلیل واریانس^۱ برای تعیین معنادار بودن تفاوت نتایج بین گروه‌های شاهد و گروه‌های نانوذره‌دار، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد استفاده

ترکیب شیمیایی		خواص فیزیکی و مکانیکی بتن		
مقدار درصد	نام ترکیب	سیمان استفاده شده	ویژگی استاندارد	نام ویژگی
۱/۵۰	L.O.I	۳۴۰	۳۰۰	نرمی (متر مربع بر کیلوگرم)
۰/۵۳	Na ₂ O			سلامت
۲/۸۴	MgO	۰/۹۸	۱/۰ حداکثر	انبساط کلی (میلی متر)
۴/۵۷	Al ₂ O ₃	۰/۰۷۷	۰/۸ حداکثر	انبساط در کوره (درصد)
۲۲/۵	SiO ₂			زمان گیرش (دقیقه)
۰/۱	P ₂ O ₅	۱۱۰	۳۰ حداقل	اولیه
۲/۰۱	SO ₃	۱۶۰	۶۰۰ حداکثر	نهایی
۰/۹۶	K ₂ O			مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
۶۲/۱۲	CaO	۳۳	۱۶ حداقل	۳ روزه
۰/۲۳	TiO ₂	۴۱	۲۲ حداقل	۷ روزه
۰/۱۵	MnO	۵۲	۳۳ حداقل	۲۸ روزه
۲/۴۹	Fe ₂ O ₃	-	-	-

۴-۲- سنگ‌دانه‌ها

دیوریت، بازالت، توف و سنگ‌های رسوبی نیز شامل لوماشل، ماسه‌سنگ و دولومیت می‌باشد. نمونه‌های گنایس و مرمر نیز در رده سنگ‌های دگرگونی قرار می‌گیرند. پس از شناسایی ابتدایی سنگ‌ها در معدن، از آنها نمونه‌گیری شده و پس از بسته بندی به آزمایشگاه انتقال یافته است. این معادن در استان آذربایجان شرقی و در مناطق مختلف نظیر شبستر، تبریز، مراغه، اهر و مرند قرار دارند. برای مطالعه خواص سنگ‌شناسی از نمونه‌ها مقطع نازک تهیه و با میکروسکوپ مطالعه شد. در بررسی مقاطع میکروسکوپی، بافت، ساخت و دگرسانی مطالعه گردید. برای پی بردن به کانی‌های تشکیل دهنده و مطالعه بیشتر، آنالیز شیمیایی نیز

سنگ‌دانه‌های استفاده شده در این تحقیق طبق تقسیم‌بندی انجمن بتن آمریکا [۱۴] سنگ شکسته می‌باشند که از فرایند سنگ‌شکنی سنگ‌هایی که در ادامه توصیف می‌شوند، بدست آمده است (شکل‌های ۱، ۲ و ۳).

۴-۲-۱- خواص سنگ‌شناسی سنگ‌دانه‌ها

در انتخاب سنگ‌دانه‌ها دقت شده است که از گروه‌های مختلف و همچنین دارای خواص فیزیکی و مقاومتی متفاوت باشد. سنگ‌دانه‌های آذرین به کار گرفته شده شامل آندزیت، گرانیت،

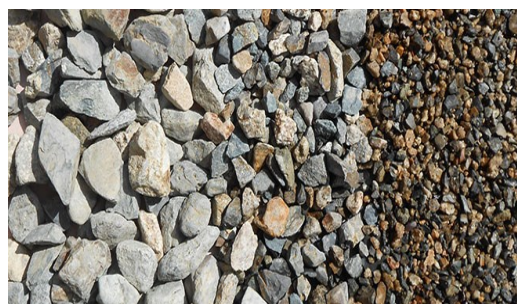
^۱ ANOVA

از نمونه‌ها تهیه گردید [۱۵]. خصوصیات سنگ‌شناسی سنگ‌دانه‌های استفاده شده در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- خصوصیات سنگ‌شناسی سنگ‌دانه‌ها

نام تجاری	نام پترولوژی	دگرسانی و هوازدگی	رخ و شیستوزیته	کانی‌های عمده
لوماشل	آواری-زیستی	هوازدگی زیاد	ندارد	کوارتز، خرده صدف، فلدسپار
توف	توف	دگرسانی زیاد	ندارد	کوارتز، فلدسپات، پلاژیو کلاز
ماسه سنگ	ماسه سنگ	هوازدگی زیاد	ندارد	کوارتز، پلاژیو کلاز، فلدسپار
آندزیت	تراکی داسیت	دگرسانی ناچیز	ندارد	پلاژیو کلاز، بیوتیت، فلدسپار
دیوریت	کوارتز مونزونیت	دگرسانی بیوتیت	ندارد	کوارتز، بیوتیت، فلدسپار

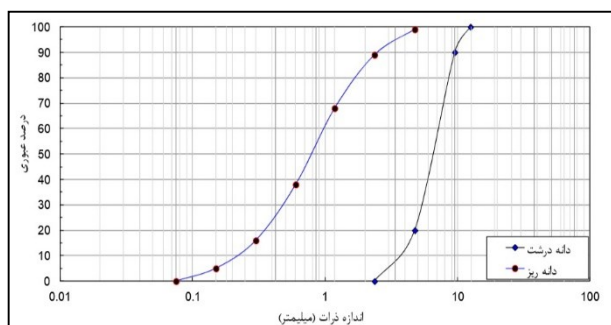
که روشی دقیق و استاندارد شده‌ای برای تعیین شکل سنگ‌دانه‌ها می‌باشد. در این مطالعه از سنگ‌دانه‌های شکسته استفاده شده است. به دلیل تاثیر شکل سنگ‌دانه‌ها از خصوصیات دستگاه سنگ شکن، از دستگاهی استفاده شده که ذرات را بطور تقریبی بصورت مکعبی خرد می‌نماید. تعیین ضریب تورق و تطویل سنگ‌دانه‌ها بر اساس BS EN 933-4:2008 و BS 812-105:1:1989 [۱۸] انجام شده است. از آنجایی که همه نمونه‌ها با یک دستگاه سنگ شکن شکسته شده‌اند، ضریب تورق و ضریب تطویل آنها اختلاف کمی نشان داده و کمتر از ۴۰ می‌باشد. همچنین جهت اطمینان از یکسان بودن شکل سنگ‌دانه‌های استفاده شده، پس از شکستن سنگ‌دانه‌ها و سرند کردن آنها، میزان ذرات پولکی شکل در سنگ‌دانه‌های مورد استفاده به کمتر از ۵ درصد محدود شده است (جدول ۴).



شکل ۱- سنگ‌دانه‌های آذرین مصرفی



شکل ۲- سنگ‌دانه‌های رسوبی مصرفی



شکل ۴- منحنی دانه‌بندی مصالح ریزدانه و درشت‌دانه



شکل ۳- سنگ‌دانه‌های دگرگونی مصرفی

۴-۲-۳- خصوصیات مکانیکی سنگ‌دانه‌ها

جهت کسب خواص مکانیکی سنگ‌دانه‌ها آزمایش‌های متعددی انجام شده است. در ابتدا از نمونه‌ها مغزه‌هایی با قطر ۵۴ میلی متر با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر تهیه شده است. پس از آماده‌سازی مغزه‌ها، آزمایش‌های لازم در شرایط خشک و اشباع بر روی آنها صورت

۴-۲-۲- خصوصیات فیزیکی سنگ‌دانه‌ها

الف - شکل سنگ‌دانه: سنگ‌دانه‌های طبیعی از لحاظ زمین‌شناسی براساس اندیس گردشدگی و کرویت تقسیم‌بندی می‌شوند. روش آنالیز شکل سنگ‌دانه‌ها در فضای دو بعدی توسط [۱۶] پیشنهاد شده است. این روش بر پایه روش توسعه یافته توسط [۱۷] می‌باشد

گرفته است (جدول ۵). استقرار در دستگاه با سرعت ۰/۱ تا ۰/۳ مگاپاسکال در ثانیه تا حد

الف- مقاومت فشاری تک محوری سنگ دانه ها: برای انجام گسیختگی بارگذاری می شود.
 آزمایش مقاومت تک محوری فشاری طبق روش پیشنهادی ب- مقاومت کششی برزلی سنگ دانه ها: این آزمایش بر اساس روش پیشنهادی [۱۹] ISRM از نمونه هایی به شکل استوانه ای با نسبت ارتفاع به قطر ۲ الی ۲/۵ استفاده شده است. نمونه مورد آزمایش پس از قطر ۰/۵ در دو حالت خشک و اشباع انجام شده است.

جدول ۴- خصوصیات فیزیکی سنگ دانه ها

نام	بافت (%)	هوازدهی (%)	تخلخل (%)	جذب آب (%)	وزن مخصوص	سرعت موج فشاری (m/s)
شرایط	درشت	درشت	درشت	درشت	ریز	خشک
توف	۸۰	۲۷	۱۷	۵/۱۴	۸/۲۷	۲/۵۰
ماسه سنگ	۸۱	۹۶	۱۲	۵/۱۲	۵/۴۵	۲/۵۰
مرمر	۳۲	۸	۹	۳/۱۳	۳/۴۰	۲/۶۴
لوماشل	۹۶	۹۴	۲۳	۷/۰۰	۱۲	۲/۵۵
گرانیت	۱۱	۷	۸	۳/۳۰	۴/۱۴	۲/۶۵
گنایس	۱۶	۹۴	۱۰	۴/۱۰	۶/۷۸	۲/۶۶
دولومیت	۷۲	۲۳	۱۸	۳/۵۸	۳/۷۴	۲/۶۷
دیوریت	۲۱	۹۷	۱۷	۶/۰۰	۷/۴۱	۲/۳۵
بازالت	۲۷	۷۶	۱۲	۳/۶۸	۴/۷۳	۲/۷۹
آندزیت	۳۴	۲۴	۲۹	۵/۱۴	۷/۴۵	۲/۵۵

جدول ۵- خصوصیات مکانیکی سنگ دانه ها

نام	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	ارزش ضربه (%)	ارزش فشاری (%)	عدد سختی	چکش اشمیت
شرایط	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع
توف	۱۰۷/۰۳	۵۷/۸۸	۱۱/۵۰	۹/۹۴	۱۲/۳۱	۱۷/۲۱
ماسه سنگ	۱۷/۰۰	۱۵/۰۰	۳/۵۰	۳/۲۰	۲۴/۰۰	۲۸/۰۰
مرمر	۹۷/۷۴	۶۸/۷۸	۸/۱۵	۵/۷۳	۲۶/۹۹	۳۱/۸۳
لوماشل	۱۱/۴۰	۶/۲۸	۱/۶۰	۱/۱۰	۴۶/۰۲	۵۳/۲۰
گرانیت	۱۲۰/۳۲	۱۱۵/۶	۱۱/۶۶	۸/۶۵	۱۷/۵۹	۱۸/۵۶
گنایس	۶۹/۹۰	۵۳/۳۰	۷/۶۸	۶/۹۴	۱۷/۹۱	۲۱/۱۱
دولومیت	۸۹/۵۶	۶۹/۲۹	۷/۰۸	۵/۴۷	۱۲/۳۲	۱۶/۰۸
دیوریت	۳۵/۰۰	۲۸/۰۰	۲/۹۰	۲/۷۰	۲۶/۶۸	۲۹/۰۱
بازالت	۹۲/۰۰	۷۸/۰۰	۱۰/۲۶	۷/۶۹	۱۳/۱۷	۱۵/۱۹
آندزیت	۶۷/۷۱	۵۶/۷۹	۹/۰۱	۷/۰۸	۱۸/۶۲	۲۱/۳۴

ج- ارزش فشاری سنگ دانه ها (ACV): این آزمایش طبق استاندارد BS 812-110:1990 (BS EN 1097-2:1998) د- ارزش ضربه ای سنگ دانه ها (AIV): این آزمایش نیز طبق استاندارد BS 812-112:1990 (BS EN 1097-2:1998) بر روی نمونه ها به صورت خشک و اشباع انجام گرفته است [۱۹].

لخته‌های سیمانی را نیز آزاد و صرف بهبود روانی مخلوط می‌کند. فوق روان‌کننده‌ها بر پایه پلی کربوکسیلیک اتر، علاوه بر افزایش مقاومت فشاری در سنن اولیه و دراز مدت، باعث افزایش مقاومت خمشی، افزایش مدول الاستیسیته و بهبود چسبندگی بتن و آرماتور شده و مقاومت بهتر را در برابر کربناتاسیون و خواص مکانیکی بیشتر را در پی دارند. اما استفاده بیش از اندازه آنها به دلیل هوازایی موجب کاهش مقاومت بتن می‌گردد. این ماده جهت حفظ یا افزایش کارایی بتن هنگام بتن‌ریزی و کاهش مقدار آب و دما بتن و تأخیر دهنده گیرش بتن می‌باشد. مشخصات فوق روان‌کننده مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۷ آمده است.

جدول ۶- مشخصات نانو پودر اکسید سیلیس (نانو سیلیکا)

سایز ذرات نانو سیلیکا	۲۰-۳۰ نانو متر آب دوست
چگالی حقیقی (چگالی ذره ای)	۲/۴ گرم بر سانتی متر مکعب
روش ساخت نانو ذرات سیلیس	روش احتراق دمای بالا
خلوص نانو پودر اکسید سیلیس	۹۹/۵٪
مساحت سطح ویژه نانو ذرات	۱۸۰-۶۰۰ متر مربع بر گرم
رنگ نانو پودر سیلیکا	سفیدرنگ
چگالی بالک (چگالی توده ای)	۰/۱ گرم بر سانتی متر مکعب

جدول ۷- مشخصات فوق روان‌کننده مصرفی

مشخصات فنی	نوع
اسم	Strusin R50
پایه	پلی کربوکسیلات اتر
رنگ	عسلی یا قهوه ای
حالت فیزیکی	مایع
وزن مخصوص (Kg/Lit)	۱/۱ ± ۰/۰۲
تولید کننده	بسیار بتن ایرانیان هوشمند

۵- ساخت بتن بر اساس آیین‌نامه (ACI 211-82)

طرح اختلاط نمونه‌های بتنی بر اساس آیین‌نامه ACI 211-82 و به روش وزنی انجام شده است (جدول ۸).

۵-۱- شرایط محیطی و مواد اولیه

تمامی مواد اولیه (سیمان، ماسه، آب) و همچنین سالن کار باید در دمای $20 \pm 2^\circ\text{C}$ درجه سانتی گراد باشند. رطوبت نسبی هوا در سالن کار نباید از ۶۵ درصد کمتر باشد.

ه- سختی و اجتهشی چکش اشمیت سنگ‌دانه‌ها: آزمایش سختی و اجتهشی چکش اشمیت مطابق با ISRM [۱۹] بر روی سطح صاف نمونه‌های سنگ بکر انجام شده است. نوع چکش به کار رفته N34 بوده که دارای انرژی برخوردی ۰/۷۴ و عمود بر نمونه انجام شده است.

۴-۳- آب

برای ساخت بتن از آب شهر شبستر استفاده شده است که طبق استاندارد BS 3148: 1990 (BS EN 1008:2002) [۲۰] این آب از لحاظ اسیدیته و یون کلر برای مصرف در بتن مناسب می‌باشد. همچنین آب عاری از مواد روغنی، جلبک و مواد زاید دیگر بوده است [۲۰].

۴-۴- نانو سیلیس (SiO_2)

نانو سیلیس مورد استفاده شده در این تحقیق (شکل ۵)، از شرکت پیشگامان نانو مواد ایران تهیه شده است که ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی آن به شرح زیر می‌باشد (جدول ۶).



شکل ۵- نانو سیلیس مورد استفاده، تهیه شده از شرکت پیشگامان نانو مواد ایران

۴-۵- کاهنده قوی آب بتن

عملکرد کلی فوق روان‌کننده‌ها، جدایش و پراکندن دانه‌های سیمان از یکدیگر به کمک نیروهای دافعه ناشی از بارهای الکترواستاتیکی می‌باشد. این مواد در زمان اختلاط، جذب سطح دانه‌های سیمان شده و به آنها بار منفی می‌دهند، این عمل منجر به ایجاد نیروی دافعه بین ذرات سیمان و پراکندن آنها می‌شوند. این اثر به نام پخش‌کنندگی شناخته می‌شود. مکانیزم پخش‌کنندگی الکترواستاتیکی علاوه بر پخش دانه‌های سیمان، آب محبوس در

است. به طور خلاصه، نحوه ساخت بتن بر اساس در این تحقیق، بر کنترل دقیق محیطی و فرایند اختلاط مرحله ای برای اطمینان از دیسپرسیون صحیح نانوذرات تأکید شده است (شکل ۶).



شکل ۶- تصویری از نمونه های بتنی ساخته شده در آزمایشگاه بتن و مراحل عمل آوری آنها

از مهمترین معایب این نوع طرح اختلاط می توان با توجه به پیمانه حجمی مصالح هنگام بتن ریزی با وسایل (فرغون، بیل و سطل) استفاده از مصالح نامرغوب و تغییر دانه بندی و رطوبت مصالح در پروژه ها و فصول مختلف، استفاده از یک اختلاط (با فرمول مشخص) با بتن ریزی های متفاوت مناسب نیست.

۶- بحث و نتیجه گیری

در پروژه حاضر، ۲۷ نمونه مکعبی برای طرح اختلاط شاهد و بیش از ۷۲ نمونه با درصد های مختلف نانو ذرات (۱ و ۳ و ۵ درصد نانو اکسید سیلیس) در نظر گرفته شده است. نتایج ارایه شده میانگین مقاومت فشاری حاصل از شکستن نمونه ها برای هر طرح اختلاط و در سنین ۷ و ۲۸ روزه نمونه ها می باشد.

۶-۱- نتایج آزمایش های مقاومت فشاری

برای انجام آزمایشی مقاومت فشاری مخلوط های مختلف بتنی، اقدام به ساخت ۷۲ نمونه مکعبی $5 \times 5 \times 5$ سانتیمتر (۶ نمونه برای عیار سیمانی برای هر کدام از نسبت های نانو اکسید سیلیس و برای هر یک از سنین ۷ و ۲۸ روزه) گردیده است. با توجه به اینکه نسبت آب به سیمان در این آزمایش برای تمامی عیار های سیمانی مقداری ثابت در نظر گرفته شده است ($w/c=0.35$) میانگین ۳ مقاومت بدست آمده برای هر یک از عیار سیمانی به عنوان مقاومت مبنا در جدول ۹ درج گردیده است.

جدول ۸- طرح اختلاط وزنی جهت هر سنگ دانه

نوع مصالح	سیمان (kg)	آب (kg)	هوا (%)	ماسه (kg)	شن (kg)
توف	۳۴۰	۱۵۰	۱	۷۷۰	۸۹۶
ماسه سنگ	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۰۲	۹۳۱
مرمر	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۴۷	۹۶۰
لوماشل	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۱۹	۹۹۸
گرانیت	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۵۰	۹۵۵
گنایس	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۵۳	۹۹۹
دولومیت	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۵۵	۹۸۱
دیوریت	۳۴۰	۱۵۰	۱	۷۵۴	۸۶۰
بازالت	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۹۶	۱۰۳۸
آندزیت	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۰۲	۹۱۳

۵-۲- مراحل اختلاط در میکسر

برای اطمینان از پخش مناسب نانوذرات و جلوگیری از پدیده ی توده ای شدن^۱، مراحل اختلاط با دقت دنبال شده است:

آماده سازی محلول حاوی نانوذرات: ابتدا تمام مقدار نانوذرات (در این مورد، نانوذراتی که در محلول آب/افزودنی آماده شده اند) به داخل میکسر ریخته می شود و میکسر با سرعت کم روشن می گردد. مرحله اول اختلاط اولیه: مخلوط به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت کم (حدود $5 \pm 140 \text{ rpm}$ ۵ دور در دقیقه) مخلوط می شود تا نانوذرات در آب پخش شوند.

اضافه کردن ماسه: در حالی که میکسر همچنان با سرعت کم کار می کند، تمام ماسه لازم به آرامی و در مدت زمان ۳۰ ثانیه به داخل مخلوط کن ریخته می شود.

توقف اختلاط: پس از اضافه شدن ماسه، میکسر برای مدت کوتاهی خاموش می شود. (نکته: این توقف برای افزودن سیمان یا سایر اجزا است که در متن به طور کامل مشخص نشده است، اما روش معمول این است که در این مرحله سیمان اضافه شده و سپس اختلاط با سرعت متوسط ادامه یابد.

برای پخش مناسب نانوذرات، اقدام به ریختن نانو مواد در آب و مخلوط نمودن آن ها برای مدت ۵ دقیقه در دستگاه التراسونیک با همزن های دور بالا، قبل از اضافه کردن سیمان شد. این مرحله پیش اختلاط فوق صوت^۲ برای بهبود همگنی مخلوط بسیار حیاتی

² Sonication

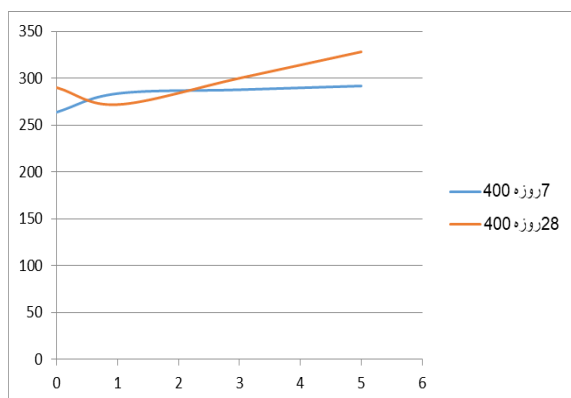
¹ Agglomeration

جدول ۹- نتایج مقاومت فشاری نمونه های نانو دی اکسید سیلیس

عیار سیمانی	۳۵۰			۴۰۰			۴۵۰					
	نمونه	%۱	%۳	%۵	نمونه	%۱	%۳	%۵	نمونه	%۱	%۳	%۵
درصد نانو	شاهد				شاهد				شاهد			
۷ روزه	۲۰۴	۲۰۸	۲۲۰	۲۳۶	۲۶۴	۲۸۴	۲۸۸	۲۹۲	۲۹۰	۲۷۲	۳۰۰	۳۲۸
۲۸ روزه	۳۰۸	۲۸۸	۲۶۴	۳۲۰	۲۸۰	۳۰۰	۳۰۴	۲۸۰	۳۲۸	۳۳۲	۳۳۶	۳۱۶

علت این امر آن است که:

الف) به نظر میرسد نانو مواد با ایجاد ساختاری متراکم تر و کم تخلخل در مخلوط بتن باعث بهبود مقاومت مکانیکی می شود.
 ب) نانو ذرات با هیدروکسید کلسیم^۱ واکنش داده و از رشد بیشتر این بلورها جلوگیری می کند، در نتیجه این واکنش ژل متراکم C-S-H تولید می گردد که باعث متراکم تر شدن ساختار بتن می گردد.



شکل ۹- نمودار مقاومت فشاری بتن با عیار سیمانی ۴۵۰

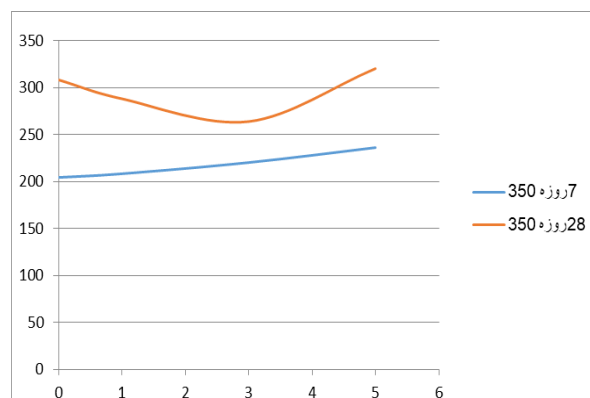
ج) با توجه به سطح ویژه بسیار بالای نانو ذرات و در نتیجه انرژی سطحی بسیار زیاد، نانو ذرات مانند هسته اتم عمل کرده و یک چسبندگی قوی با سیمان هیدراته شده ایجاد می کنند که به آن هسته ای می گویند. در نتیجه این اثر به دلیل واکنش پذیری بالای نانو ذرات، روند هیدراته شدن ادامه می یابد و مقاومت های مکانیکی افزایش می یابد.

اما همان طور که از نتایج جدول ها ملاحظه می شود، جایگزینی نانو ذرات در عیار های مختلف و درصد نانو های متفاوت در برخی موارد منجر به کاهش مقاومت نسبت به نمونه شاهد می گردد.

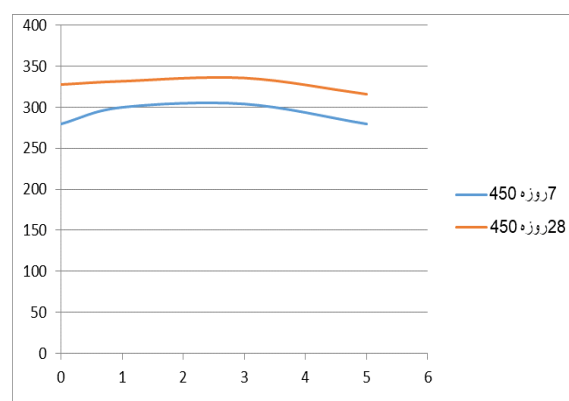
علت این امر آن است که:

الف) در اثر افزایش بیش از حد بهینه درصد جایگزینی نانو مواد، این ذرات در داخل مخلوط بتن به صورت توده در می آیند و

شکل های ۷، ۸ و ۹ نمودار تغییرات مقاومت فشاری را نسبت به درصد جایگزینی نانو ذرات نشان می دهد. در این نمودارها بر ای هر عیار سیمان محور افقی درصد جایگزینی نانو مواد و محور عمودی مقاومت فشاری را بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مربع نشان می دهد.



شکل ۷- نمودار مقاومت فشاری بتن با عیار سیمانی ۳۵۰



شکل ۸- نمودار مقاومت فشاری بتن با عیار سیمانی ۴۰۰

با توجه به این شکل ها نتیجه می شود که مقاومت فشاری نمونه های بتن با افزایش مقدار جایگزینی نانو ذرات روند صعودی را طی کرده و در عیار های مختلف در درصدی مشخص از نانو مواد به مقدار بهینه می رسد.

^۱ Ca(OH)₂

اقدام به ساخت ۷۵ نمونه استوانه ای به ابعاد 15×5 سانتی متر (۳) نمونه برای هر سه نسبت آب به سیمان برای نسبت های نانو اکسید سیلیس برای هر یک از سنین ۷ و ۲۸ روزه گردیده است. میانگین ۳ ضریب بدست آمده برای هر یک از نسبت های آب به سیمان ۰/۴۵ به عنوان مقاومت آن طرح اختلاط، ثبت شد. در این مقاله به ارائه نتایج طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ که نتایج آن نسبت به بقیه از مقاومت فشاری بهتر بود ارائه شده است. نتایج حاصل از آزمایش ها در جدول ۱۰ و ۱۱ ارائه شده

تشکیل حفراتی را در داخل خمیر سیمان می دهند که موجب کاهش مقاومت های مکانیکی بتن می شود [۲۴].

ب) احتمالاً در اثر افزایش بیش از حد جایگزینی نانو مواد و با کاهش عیار سیمان به همان درصد در مخلوط بتن، مقدار چسبندگی بین ریز دانه ها کاهش یافته و اثرات منفی بر مقاومت های مکانیکی بتن می گذارد.

۲-۶- آزمایش نفوذپذیری

برای انجام آزمایش ضریب نفوذپذیری مخلوط های مختلف بتن، است.

جدول ۱۰- نتایج ضریب نفوذپذیری نمونه های بتن حاوی نانو اکسید سیلیس

کد طرح	شاهد	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۵
ضریب نفوذپذیری ۲۸ روزه (m/s)	۱۵-۱۰*۹	۱۵-۱۰*۷/۲	۱۵-۱۰*۵/۸	۱۵-۱۰*۳/۲۱
ضریب نفوذپذیری ۷ روزه (m/s)	۱۴-۱۰*۸/۷	۱۴-۱۰*۶/۷۲	۱۴-۱۰*۵/۱۵	۱۴-۱۰*۳/۶۱

جدول ۱۱- درصد کاهش ضریب نفوذپذیری نمونه های بتنی حاوی نانو اکسید سیلیس

درصد جایگزینی نانو	درصد کاهش ضریب نفوذ پذیری (m/sec)	
	۷ روزه	۲۸ روزه
۰/۰۵	۲۱/۴۵%	۲۱/۲%
۰/۱	۴۶/۸%	۳۰/۴%
۰/۱۵	۶۶/۳%	۴۸/۱%

استاندارد ASTM 1202 از بتن با نفوذ پذیری متوسط یا بالا به بتن با نفوذ پذیری کم یا خیلی کم برساند. نتایج آزمایش های اولیه نشان داد که افزودن نانوذرات، به ویژه در عیارهای ۱٪ و ۳٪، در سنین پایین تر (۷ روز) موجب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری در هر سه رده سیمان (۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب) شده است. این افزایش مقاومت در سنین اولیه به دلیل اثر هسته زایی^۱ نانوذرات است [۲۵]. نانوذرات سطح ویژه بالایی دارند و به عنوان مراکز فعال، سرعت هیدراسیون سیمان را تسریع می کنند. این امر منجر به تولید سریع تر و متراکم تر محصولات هیدراته مانند C-S-H (کلسیم سیلیکات هیدرات) می شود که استحکام اولیه بتن را به طور چشمگیری افزایش می دهد. همان طور که گزارش شد، بالاترین مقاومت فشاری در رده های ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در غلظت ۵٪ و در رده ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در غلظت ۳٪ مشاهده شد.

در جدول ۱۱ مقدار درصد کاهش ضریب نفوذ پذیری نسبت به نمونه شاهد نشان داده شده است. در این رابطه $N\%$ نشان دهنده درصد کاهش ضریب نفوذپذیری نمونه های بتنی هستند. اعداد بدست آمده در این جدول با توجه به فرمول شماره (۱) محاسبه و ثبت شده است:

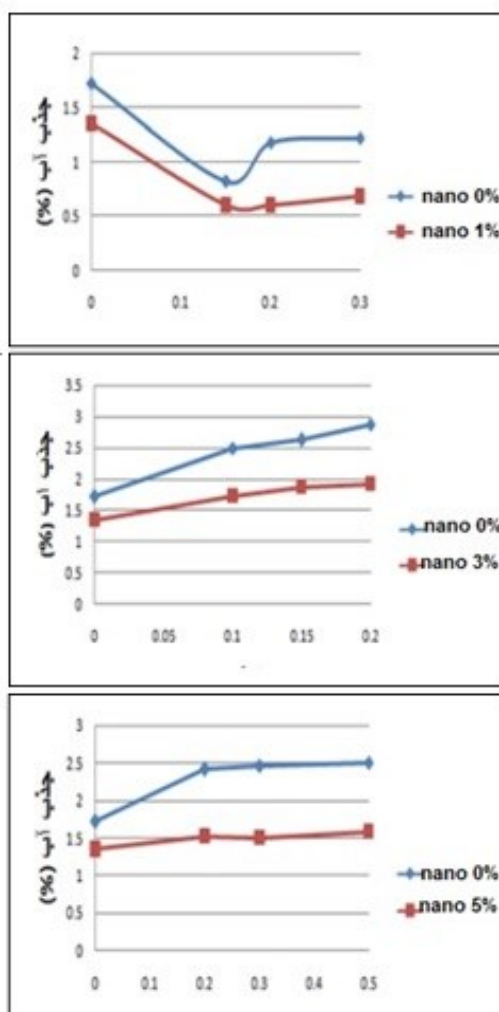
$$N\% = F_{ij}F - oFo \times 100 \quad (1)$$

۳-۶- تست نفوذ یون کلرید و جذب آب

تست نفوذ یون کلرید به روش تسریع شده مطابق آئین نامه ASTM C1202-97 و تست جذب آب برای تمامی طرح ها طبق استاندارد ASTM C 642 در سن ۷۰ روز انجام شد که نتایج آن در شکل ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. نتایج آزمایشات جذب آب و تسریع شده نفوذ یون کلر نشان می دهد که جایگزینی ۵ درصد نانو سیلیس بهینه می تواند وضعیت بتن را با توجه به معیارهای

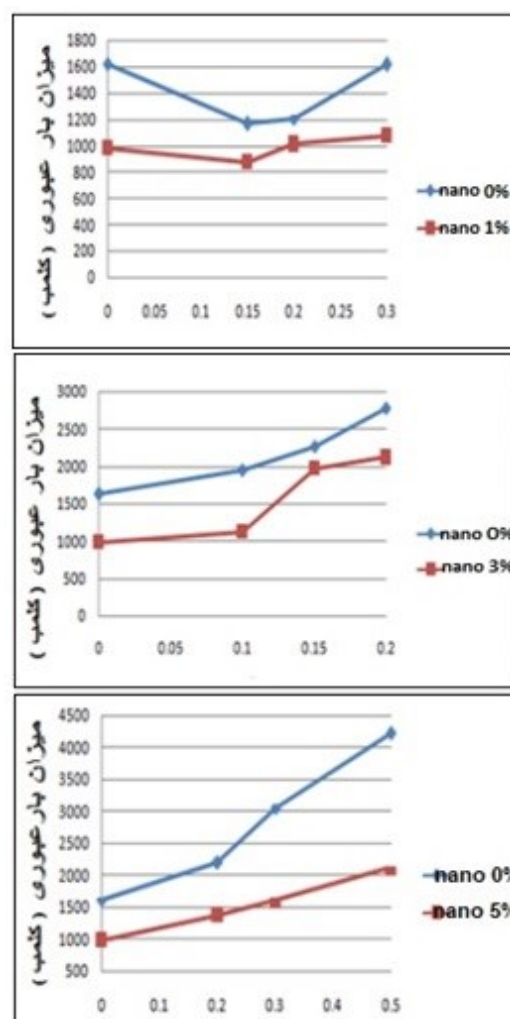
¹ Nucleation Effect

تصاویر ارائه شده میکروتترک‌ها، حفره‌ها و ساختارهای پرتلندیت (CH)، نانوساختار H-S-C و اترینگایت (Aft) قابل تشخیص است.



شکل ۱۱- منحنی نتایج تاثیر نانوسیلیس در آزمایش جذب آب

در شکل ۱۳-ا نمونه فاقد نانوسیلیس تحت دمای 25°C نشان داده شده است، در دمای محیط، ماتریس ملات ماسه-سیمان نسبتاً فشرده است، بلورهای هیدروکسید کلسیم^۱ به صورت ساختار شش ضلعی و نانوساختار H-S-C به صورت لخته‌ای و نسبتاً نامنظم است و اندازه آن کوچک و مقدار آن کم است. ذرات سفیدرنگ کلسیت نیز قابل مشاهده است. ماتریس ملات به صورت چسبنده و تعداد کمی ریز ترک و حفره وجود دارد. سولفات موجود در آب حفره‌ای سنگ‌دانه‌ها در واکنش با سیمان، باعث تشکیل ساختار سوزنی شکل اترینگایت شده که بر عملکرد ملات ماسه-سیمان



شکل ۱۰- منحنی تاثیر نانوسیلیس در آزمایش نفوذ یون کلر

۶-۴- آزمایش طیف سنجی تفرق اشعه X

جهت دستیابی به معیاری مناسب جهت تخمین فعالیت پوزولانی نانو سیلیس، از آزمایش تفرق اشعه X بر روی پودر حاصل از آسیاب نمودن نمونه‌های خمیر سیمان در طرح‌های اختلاط در سن ۷۰ روز استفاده شد. طیف‌های بدست آمده با طیف‌های مرجع موجود برای هیدروکسید کلسیم مقایسه شده، و پس از شناسایی پیک‌های مربوط به هیدروکسید کلسیم از روی شدت آنها به مقایسه نمونه‌ها پرداختیم (شکل ۱۲).

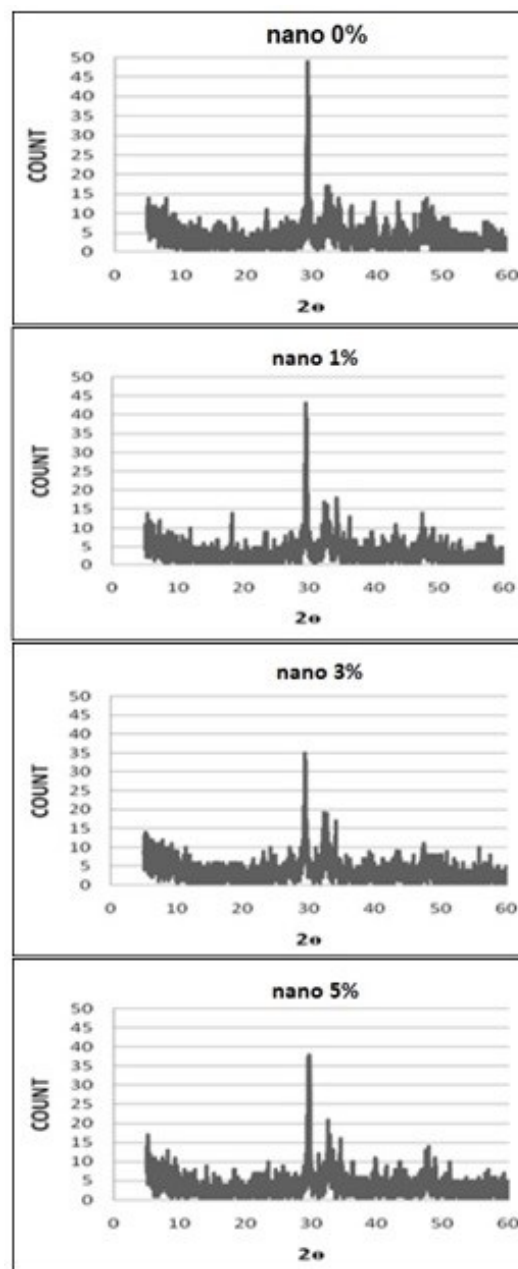
۶-۵- ریخت شناسی

شکل ۱۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی نمونه‌های اختلاط ۹۰ روزه را در دمای معمولی نشان می‌دهد. براساس

^۱ $\text{Ca}(\text{OH})_2$

تأثیر منفی دارد.

کریستال‌های CH می‌شود [۲۹]. نانوساختار سیمانی H-S-C روی یکدیگر قرار گرفته و همپوشانی دارند و در نتیجه با افزایش چگالی ماتریس ملات ماسه-سیمان، عملکرد را بهبود می‌بخشند. مقاومت فشاری نانوساختار سیمانی H-S-C بیشتر از کریستال‌های CH است که یکی از دلایل افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوسیلیس است [۳۰].



شکل ۱۲- نمودار تغییرات شدت (XRD)، خمیر سیمان نمونه حاوی ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد نانوسیلیس

شکل ۱۳- تصاویر SEM از نمونه ۹۰ روزه: a: فاقد نانوسیلیس، b: دارای ۵ درصد نانو سیلیس

تأثیر غلظت بهینه (۳٪ در رده ۴۵۰): این امر نشان می‌دهد که اثر مطلوب نانوذرات (پر کردن فضاهای خالی و بهبود دانه‌بندی) تا یک حد مشخصی ادامه دارد. در رده‌های سیمانی بالاتر (۴۵۰)، که ساختار اولیه متراکم‌تری دارد، ممکن است افزودن مقدار بیشتر نانوذرات (۵٪) به دلیل تراکم بیش از حد، افزایش ویسکوزیته

در شکل ۱۳-b نمونه حاوی ۵٪ نانوسیلیس تحت دمای ۲۵ °C نشان داده شده است. نمونه دارای نانوسیلیس بافت یکنواخت‌تری نسبت به نمونه فاقد نانوسیلیس شکل ۱۳-a دارد. خلل و فرج و ساختار نامرغوب و سوزنی شکل اترینگایت کاهش یافته است. ذرات نانوسیلیس می‌توانند با تسریع فرایند هیدراتاسیون سیمان، واکنش با کریستال‌های پرتلندیت (CH) تولید نانوساختار سیمانی H-S-C را افزایش دهند که باعث کاهش اندازه و مقدار

۷- نتیجه گیری

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر افزودن نانوذرات با درصدهای مختلف (۱٪، ۳٪ و ۵٪) به مخلوط بتن انجام پذیرفت. با تکیه بر بررسی ادبیات تحقیق و داده‌های استخراج شده از آزمایش‌های مقاومت فشاری و ضریب نفوذپذیری (شامل جداول ۷، ۸ و ۹)، نتایج اصلی به شرح زیر است:

- تأثیر مثبت بر مقاومت فشاری:

افزودن نانوذرات به مخلوط بتن در درصدهای بهینه (که به نظر می‌رسد ۱٪ و ۳٪ در شرایط مورد بررسی مؤثر بوده‌اند) منجر به افزایش روند صعودی مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز نسبت به بتن شاهد گردید.

- مکانیسم‌های بهبود خواص:

این بهبود مقاومت به دلایل زیر نسبت داده می‌شود: تراکم‌سازی ساختار: نانوذرات با ایجاد یک ساختار متراکم‌تر و کم‌تخلخل در مخلوط بتن، باعث بهبود مقاومت مکانیکی می‌شوند. واکنش پوزولانی: نانوذرات با هیدروکسید کلسیم آزاد شده Ca(OH)_2 واکنش داده و ژل C-S-H متراکم‌تری تولید می‌کنند که منجر به پر شدن منافذ و افزایش چگالی می‌گردد.

اثر هسته‌زایی: سطح ویژه بسیار بالای نانوذرات، به‌عنوان هسته اتم عمل کرده و چسبندگی قوی با سیمان هیدراته شده ایجاد می‌کنند.

- اهمیت مقدار بهینه:

نتایج نشان می‌دهد که اثرات مثبت نانو مواد در یک مقدار بهینه رخ می‌دهد. افزایش درصد جایگزینی به ۵٪ ممکن است به دلیل اشباع شدن واکنش‌ها یا مشکلات در پخش شدن (دیسپرسیون) نانوذرات در حجم زیاد، کارایی کمتری نسبت به درصدهای پایین‌تر داشته باشد.

- دوام و نفوذپذیری:

همانطور که اشاره شد، انتظار می‌رود این ساختار متراکم‌تر ناشی از افزودن نانوذرات، نفوذپذیری بتن را به طور قابل توجهی کاهش داده و دوام بتن را در برابر عوامل مهاجم محیطی افزایش دهد.

۸- قدردانی

اینجانب بر خود لازم می‌دانم از ریاست، معاونت پژوهشی و اساتید

مخلوط، یا شروع پدیده تجمعات^۱ باعث کاهش یکنواختی و در نتیجه کاهش مقاومت نهایی شود [۲۶].

- عملکرد بهتر ۵٪ در رده‌های پایین‌تر: در رده‌های سیمانی پایین‌تر (۳۵۰ و ۴۰۰)، کمبود ذاتی سیمای درشت‌تر بوده و نانوذرات نقش مؤثرتری در پر کردن حفره‌ها و افزایش تراکم داشته‌اند، که این مزیت تا ۵٪ نیز پایدار مانده است.

تفسیر:

- مسیرهای نفوذ: نفوذپذیری بتن عمدتاً توسط شبکه مرتبط از فضاهای خالی و موئینه‌ها کنترل می‌شود. نانوذرات با دو مکانیسم اصلی نفوذپذیری را کاهش می‌دهند [۲۷].

اثر پرکنندگی^۲: نانوذرات با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر، حفره‌های بین ذرات سیمان هیدراته‌شده و فضای ناحیه انتقال^۳ را پر می‌کنند. این پر شدن، طول و قطر مسیرهای نفوذ آب را کاهش داده و مسیرهای نفوذ را پیچیده‌تر می‌سازد.

اثر شیمیایی^۴: افزایش سرعت هیدراسیون و مصرف زودتر آهک آزاد (CH) توسط نانوذرات، ساختار محصولات هیدراته را متراکم‌تر کرده و منجر به تبلور مجدد در منافذ ریز می‌شود که اندازه منافذ موئین را به زیر ۱۰۰ نانومتر می‌رساند.

- بهترین عملکرد در ۳٪: کاهش نفوذپذیری بهینه در ۳٪، با نتایج مقاومت فشاری همبستگی دارد. این غلظت، تعادل مناسبی بین پرکنندگی فیزیکی و بهینه‌سازی واکنش‌های شیمیایی در ریزساختار فراهم کرده است. افزودن نانوذرات بیش از حد (۵٪) ممکن است منجر به تجمعات شده و منافذ بزرگ‌تری را تشکیل دهد که اثر مثبت بر نفوذپذیری را خنثی کرده است [۲۸]، هرچند این کاهش نفوذپذیری همچنان از نمونه شاهد بهتر است.

نتایج به‌دست آمده به‌طور کلی با روند گزارش شده در تحقیق حاضر مبنی بر افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری با افزودن نانوذرات اکسید فلزی همسو است. با این حال، پژوهش حاضر با تعیین غلظت بهینه مجزا (۳٪ در مقابل ۵٪) برای هر دو پارامتر مقاومت و نفوذپذیری در رده‌های مختلف سیمانی، یک دیدگاه جزئی‌تر و کاربردی‌تر از اثر نانوذرات در بتن معمولی ارائه می‌دهد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که تعیین غلظت بهینه، متأثر از عیار سیمان پایه است.

³ Interfacial Transition Zone - ITZ

⁴ Pore Refinement

¹ Agglomeration

² Filler Effect

M. Handbook of Concrete Construction (Dastnameh Ejraye Beton). Tehran: University of Tehran Press; 2002 First Edition.

[15] Pirmoghaddami F. Investigation of the Effect of Shape, Composition, and Type of Minerals Constituting Aggregates on the Compressive Strength of Concrete [Barris-e Ta'sir Shekl, Tarkib va No' Kaniha-ye Tashkil Dahandeh Sangdaneha bar Moqavemat Feshari Beton] [Master's thesis in Civil Engineering – Structures]. Shabestar Islamic Azad University; 2019/2020.

[16] Rittenhouse G, A, visual method of estimating 2-dimensional sphericity. Journal of Sedimentary Petrology. 13(2):7981.1943, 2006.

[17] Wadell H. Volume, shape and roundness of rock particles. J Geol. 1932;40:443–51.

[18] British Standard Institution. BS 812-105.1:(BS EN 933-4), Methods for determination of particle shape. Flakiness index. London: BSI; 2008.

[19] ISRM, in: E.T. Brown (Ed.), Rock Characterization Testing and Monitoring-ISRM Suggested Methods, Pergamon, Oxford, 211 pp, 1981.

[20] British Standard Institution. BS 3148:(BS EN-1008), Mixing Water for Concrete-Specification for Sampling, Testing and Assessing the Suitability of Water. London: BSI; 2002.

[21] ASTM C143 / C143M-12, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. Vol 4.08. Philadelphia, PA: ASTM; 1990.

[22] ASTM C39 / C39M-21, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2021.

[23] ASTM C39 / C39M-21, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2021.

[24] Hakamy A, Shaikh F, Low I. Characteristics of nanoclay and calcined nanoclay-cement nanocomposites. Compos Part B Eng. 2015;78:174–184. [25] Mansourghanaei MH, Beik Larian M, Mardoohpour A. Investigation of Permeability, Capillary Water Absorption, and Mass Loss in Geopolymer Concrete Containing Blast Furnace Slag, Nano-silica, and Polyolefin Fibers. Iran J Concr Res. 2024;16(2):97–110. DOI: 10.22124/jcr.2023.21447.1547

[26] Sajedi SF, Heidari E. Investigation and Comparison of the Effect of Micro-silica and Nano-silica on the Rheological and Mechanical Properties of Concrete. Iran J Concr Res. 2025;17(3):113–133. DOI: 10.22124/jcr.2024.21928.1567.

[27] Ghorbani A. Investigation of the Simultaneous Effect of Micro-silica and Nano-silica on Concrete

گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر و همچنین از آقای مهندس طباطبائی، کارشناس آزمایشگاه بتن دانشگاه به خاطر همکاری‌های صمیمانه، تشکر و قدردانی نمایم.

۹- مراجع

[1] Feynman R. There's Plenty of Room at the Bottom. Lecture presented at the American Physical Society meeting, California Institute of Technology (Caltech), United States; 1959. Published in Engineering and Science. 1959;23(5):22–36.

[2] Taniguchi N. On the Basic Concept of "Nanotechnology." In: Proceedings of the International Conference on Production Engineering, Tokyo, Japan. Japan Society of Precision Engineering; 1974. p. 18–23. [3] Drexler KE. Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology. Anchor Books; 1986.

[4] Kroto HW, Curl RF, Smalley RE, O'Brien SC, et al. C60: Entropy in Disorderly Molecular Systems. Nature. 1985;318(6042):162–163.

[5] Kroto HW, Curl RF, Smalley RE, O'Brien SC, et al. C60: Entropy in Disorderly Molecular Systems. Nature. 1985;318(6042):162–163.

[6] Nazeri A, Riahi S. Al₂O₃ Nanoparticles in concrete and different curing media. Energy Build. 2011;Pages 1480–1488.

[7] Sanchez F, Sobolev K. Nanotechnology in Concrete—A Review. Constr Build Mater. 2010;24:2060–2071.

[8] Hosseini P, Afshar A, Vafaei B, Booshehrian A, Molaei Raisi E, Esrafil A. Effects of nano-clay particles on the short-term properties of self-compacting concrete. Eur J Environ Civil Eng. 2015;1–21.

[9] ASTM C150-00, Standard Specification for Portland Cement. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[10] ACI 211.1-82, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. Detroit, USA: American Concrete Institute.

[11] ASTM C1202, Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[12] ASTM C496 / C496M-17, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2017.

[13] Gambhir ML. Concrete technology. 3rd ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill; 1986.

[14] Ramezaniapour AA, Tahooni Sh, Peydaish

- Properties. Iran J Concr Res. 2025. DOI: 10.22124/jcr.2021.17786.1456
- [28] Nasehi Goshuye M, Amiri M, Malekinejad M. Investigating the Effect of Using Nano-silica on the Mechanical Properties of Sand-Cement Mortar under the Influence of Heat with an Attitude Towards Changes in Cement Nanostructures. Iran J Concr Res. 2023;16(1):57–72. doi: 10.22124/jcr.2023.22616.159.
- [29] A. Khaloo, M.H. Mobini, P. Hosseini, Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance concrete, Construction and Building Materials 113 (2016) 188-201.
- [30] B.B. Mukharjee, S.V. Barai, Influence of nanosilica on the properties of recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials 55 (2014) 29-37.

Optimization of Permeability and Durability of Normal Concrete Using Silicon Dioxide Nanoparticles

Farhad Pirmohammadi Alishah *

Department of Civil Engineering, Shab.C., Islamic Azad University, Shabestar, Iran.

Abstract

The durability of concrete structures is a decisive factor in their service life, especially when exposed to aggressive environments. This study aims to investigate the effects of silica oxide nanoparticles (SiO_2) on improving the durability and reducing the permeability of concrete. In this research, SiO_2 nanoparticles were used as partial replacements for cement in various mix designs, and the prepared samples were tested for permeability, porosity, and resistance to sulfate attack. The results revealed that the incorporation of well-dispersed nanoparticles enhances the homogeneity and cohesion of concrete, significantly reduces permeability and pore volume, and improves the viscosity and bonding properties of the cement paste. The pozzolanic reaction between nanoparticles and calcium hydroxide leads to the formation of more durable gels, which block the pathways of harmful agents. Furthermore, concretes containing silica nanoparticles exhibited higher resistance to sulfate attack and improved long-term durability. Overall, the incorporation of silica oxide nanoparticles can be considered an effective approach to enhance concrete durability and stability in harsh environmental conditions.

Keywords: Concrete, Metal Oxide Nanoparticles, Compressive Strength, Permeability, Microstructure.

* Corresponding Author: Petrofarhad@iaushab.ac.ir

