

# بررسی تأثیر کاربرد نانوذرات سیلیس پایروژنیک بر مقاومت بتن توانمند در برابر خوردگی میل‌گردهای مدفون در بتن

محمدحسین مبینی\* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ

علیرضا خالو (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران شریف، زمستان (۱۳۹۹)  
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۴/۲، ص. ۹۰-۸۱

هدف از این تحقیق، ارزیابی تأثیر کاربرد نسبت‌های کم جایگزینی نانوذرات سیلیس با سطح ویژه‌های مختلف بر مقاومت بتن توانمند در محافظت از میل‌گردهای فولادی مدفون در بتن در برابر خوردگی است. آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی و آزمون غیرمخرب برای بررسی تأثیرات نانوذرات سیلیس بر ویژگی‌های بتن‌های توانمند انجام شده است. نتایج نشان داد با کاهش نسبت  $w/b$  بتن‌های توانمند از ۰/۳۵ تا ۰/۲۵، نانوذرات سیلیس با سطح ویژه کمتر عملکرد بهتری نسبت به ذرات ریزتر داشتند. هرچند که تأثیر بر مقاومت‌های فشاری و همچنین مقاومت الکتریکی متغیر بود؛ زیرا تفاوت در عملکرد نانوذرات سیلیس ویژگی‌های مکانیکی و دوامی را تحت تأثیر قرار داد. همچنین با کاهش نسبت  $w/b$ ، با افزایش مقاومت الکتریکی، مقاومت بتن در محافظت از میل‌گرد در برابر خوردگی افزایش یافت. علاوه بر این، نوع درشت‌تر نانوسیلیس عملکرد بهتری در بهبود ویژگی‌های مکانیکی نسبت به نوع ریزتر نشان داد. هرچند نوع ریزتر نانوسیلیس، مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به نانوسیلیس درشت‌تر داشت؛ بنابراین، مقاومت بتن در محافظت از میل‌گردها در برابر خوردگی در این حالت بیشتر بود.

واژگان کلیدی: بتن توانمند، نانوذرات سیلیس، ویژگی‌های مکانیکی، مقاومت الکتریکی، خوردگی میل‌گرد.

mobini@usc.ac.ir  
khaloo@sharif.edu

## ۱. مقدمه و تاریخچه‌ی تحقیقات

باید با ایجاد تغییرات در روند تولید مصالح سیمانی به ایجاد صنعتی پایدار اقدام شود؛ یکی از مهم‌ترین و در عین حال ساده‌ترین راهبردهای پایدارسازی صنعت بتن، طراحی و ساخت محصولات با دوام و دارای کیفیت بالاست؛ زیرا در این روش فقط تغییرات در محصول موجود اعمال می‌شود و نیاز به توسعه و ساخت محصول جدیدی نیست. از طرفی افزایش طول عمر سازه و کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را شاهد خواهیم بود و از طرف دیگر به تعویق افتادن زمان تخریب سازه‌ی مورد نظر سبب ایجاد نخاله‌های کمتر در یک بازه‌ی زمانی مشخص می‌شود.

با توجه به مباحث مطرح شده، توسعه‌ی ساخت بتن‌های توانمند<sup>۱</sup> می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد پایدار در صنعت بتن مد نظر قرار گیرد. بتن‌های توانمند با دارا بودن رفتار مقاومتی و دوامی قابل توجه در ساخت سازه‌های زیرساختی نظیر تونل‌ها و پل‌ها و همچنین سایر سازه‌های خاص مانند اسکله‌ها و بتادر مورد استفاده قرار می‌گیرند. بتن‌های توانمند در مقایسه با بتن‌های معمولی شامل مصالح پوزولانی با عملکرد بالا، نسبت پایین‌تر آب به مواد سیمانی، دانه‌بندی ریزتر سنگ‌دانه‌ها و عیار

امروزه، صنعت بتن یکی از مهم‌ترین صنایع جهان است. حجم عظیم منابع اولیه‌ی مورد استفاده در این صنعت و مباحث زیست‌محیطی از یک سو و دخالت نیروی انسانی عظیم در این بخش از سوی دیگر سبب گره خوردن این صنعت با زندگی روزمره‌ی مردم در سراسر جهان شده است.<sup>[۱]</sup> به‌طوری‌که بدون شک و بر اساس آمار، بتن دومین ماده‌ی پرمصرف بعد از آب در جهان است.<sup>[۲]</sup>

جامعه‌ی جهانی بنا به اثرات غیر قابل جبرانی که ایجاد آلودگی‌ها و از بین بردن محیط زیست بر زندگی روزمره و آینده‌ی نسل بشر دارد، تأکید بر مفهوم «توسعه‌ی پایدار» دارد. بدین معنی که در توسعه‌ی فناوری به نحوی رفتار شود که رفع نیازهای زمان حال خطری برای رفع نیازهای نسل‌های آینده‌ی ایجاد نکند.<sup>[۳]</sup> در نتیجه از آن‌جا که صنعت بتن و محصولات بتنی نیز از این امر مستثنا نیستند،

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۰/۲، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱/۱۳، پذیرش ۱۳۹۹/۲/۲۰.

DOI:10.24200/J30.2020.54746.2667

بیشتر مواد سیمانی است.<sup>[۴]</sup> به همین منظور می توان بتن های توانمند را نوع مهندسی شده ی بتن های معمولی به شمار آورد.

همان گونه که اشاره شد، یکی از پارامترهای طراحی بتن های توانمند حضور مصالح پوزولانی در ساختار آن هاست. این موضوع از آن جهت دارای اهمیت است که مواد پوزولانی با تولید محصول متراکم تری مانند کلسیم - سیلیکات - هیدرات<sup>۲</sup> نسبت به بلورهای کلسیم هیدروکسید<sup>۳</sup> و نیز پر کردن خلل و فرج موجود در ساختار بتن های توانمند کمک شایانی به تراکم ریزساختاری این نوع بتن ها می کنند. این موضوع یکی از عوامل نفوذپذیری پایین بتن های توانمند در مقایسه با بتن های معمولی یا بتن های خودتراکم است.<sup>[۵-۱۱]</sup>

نانوفتوری به عنوان یکی از مهم ترین فتوری های قرن حاضر مطرح است. در میان محصولات مختلف نانوفتوری، نانوذرات به عنوان مهم ترین محصول مورد توجه زیادی قرار گرفته اند. نانوذرات با محدودی وسیعی از کاربردها در ساخت محصولات مختلف از نانوداروها گرفته تا محصولات نوین الکترونیکی در حدود تقریباً یک دهه است که به صنعت بتن نیز پای گذاشته اند. در این مدت عملکرد انواع مختلفی از نانوذرات در ساختار مصالح سیمانی بررسی و ارزیابی شده است.<sup>[۵-۱۱]</sup> در نتیجه ی تحقیقات صورت گرفته، نانوذرات سیلیس (نانوسیلیس) مناسب ترین نانوذرات در ساخت محصولات سیمانی شناخته شده اند.<sup>[۵]</sup> البته هزینه ی پایین تولید این محصول نسبت به سایر نانو مواد و دسترسی بیشتر به آن در بازار مصالح پیشرفته نیز از عوامل مؤثر در گسترش کاربرد نانوسیلیس در تولید محصولات پایه ی سیمانی به شمار می روند.

در ساخت بتن های توانمند معمولاً از نسبت های آب به مواد سیمانی در حدود ۰/۲۵ الی ۰/۳۵ بهره گرفته می شود؛ اما در تحقیقات صورت گرفته با نسبت های بالاتری از آب به مواد سیمانی (۰/۴۵ و ۰/۵) نیز بتن های توانمند تولید شده اند.<sup>[۱۲،۱۳]</sup> در پژوهشی که توسط جلسن و همکاران صورت پذیرفت،<sup>[۱۳]</sup> تأثیر مستقیم میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن های توانمند با نسبت های آب به مواد سیمانی متفاوت ۰/۲۵ و ۰/۴ بررسی شد. بر اساس تحقیقات صورت گرفته،<sup>[۱۴-۱۷]</sup> افزودن نانوسیلیس به مخلوط تازه ی مصالح سیمانی سبب افت کارپذیری آن ها می شود. افزایش گرانروی و تنش تسلیم به عنوان دو پارامتر اساسی رفتار شارشی مخلوط های تازه ی سیمانی با افزایش مقدار نانوسیلیس در ماتریس مؤید این مطلب است. افت کارپذیری مخلوط های سیمانی دارای نانوسیلیس به سطح ویژه ی بسیار بالای این ذرات نسبت داده می شود. بدین معنی که در زمان افزودن نانوذرات سیلیس به مخلوط، این ذرات مولکول های آب را در اطراف خود جمع می کنند و حاصل ایجاد یک ژل با خاصیت بالای نگهداری آب است.<sup>[۱۴،۱۶]</sup> در تحقیقی که توسط بامین و همکاران صورت گرفت،<sup>[۱۶]</sup> عملکرد سه نوع بتن توانمند با مقاومت های مشخصه ی ۶۰، ۷۰ و ۸۰ مگاپاسکال با و بدون نانوسیلیس در ارتباط با چرخه های مختلف ذوب و یخ بررسی شد. در تحقیقی که توسط خالو و همکاران صورت گرفت، تأثیر درصدهای مختلف انواع نانوسیلیس پایداریک بر کارایی، دوام و مقاومت بتن های توانمند بررسی شد<sup>[۱۸]</sup> و در مطالعه ی دیگری، تأثیر الیاف فولادی و پلی پروپیلن بر بتن های توانمند شامل نانوسیلیس بررسی شده است.<sup>[۱۹]</sup>

در این تحقیق، تأثیر کاربرد دو نوع نانوسیلیس پایداریک با سطح ویژه ی مختلف در دو درصد ۰/۲۵ و ۰/۵ از نظر مقاومت مکانیکی و ریزساختار در بتن توانمند بررسی شده است. همچنین بر اساس ۱ - ACI ۲۲۲R<sup>[۲۰]</sup> مقاومت بتن توانمند شامل نانوسیلیس های مختلف با درصدهای متفاوت در برابر خوردگی میلگردها بررسی و مطالعه شده است.

## ۲. مصالح مورد استفاده و روش تحقیق

### ۱.۲. سیمان

ماده ی چسباننده در نظر گرفته شده در این مطالعه، شامل سیمان و ذرات نانوسیلیس با سطوح ویژه ی مختلف است. سیمان پرتلند نوع II که منطبق بر ملاحظات ASTM C۱۵۰ است،<sup>[۲۱]</sup> استفاده شده است. این سیمان از کارخانه ی سیمان تهران تهیه شد و بدین ترتیب مورد استفاده قرار گرفت که ابتدا سیمان های تهیه شده در سطل های بزرگ ریخته شدند و به طور مناسب مخلوط شدند، سپس نمونه برداری انجام گرفت و برای آزمایش دانه بندی ارسال شد. این کار باعث می شود که سیمان مورد استفاده برای ساخت همه ی نمونه ها تقریباً یکنواخت باشد و همچنین ویژگی مصالح در تمامی نمونه ها یکسان باشد. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

### ۲.۲. نانوسیلیس

در این مطالعه از دو نوع نانوسیلیس مختلف با سطوح ویژه ی ۲۰۰ m<sup>۲</sup>/g و ۳۸۰ m<sup>۲</sup>/g استفاده شد. همان طور که پیش از این توضیح داده شد، این نانو مواد با نسبت های جایگزینی با سیمان کم برابر با ۰/۷۵ و ۱/۵۰ درصد به کار گرفته شده است. نانوسیلیس های به کار گرفته شده در این تحقیق از نوع پایداریک هستند؛ بنابراین به صورت پودری اند. نمونه هایی از هر دو نوع نانوسیلیس برای آزمایش به آزمایشگاه پژوهشگاه پلیمر و رنگ ارسال شد. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی نانوسیلیس های مورد استفاده در جدول ۲، شکل ۱ و جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی سیمان.

ترکیبات شیمیایی	درصد وزنی (%)
CaO	۶۳/۰
SiO <sub>۲</sub>	۲۰/۴
Al <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	۴/۹
Fe <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	۳/۹
MgO	۱/۷
SO <sub>۳</sub>	۲/۰
Na <sub>۲</sub> O + K <sub>۲</sub> O	۰/۹
افت ناشی از احتراق (LOI)	۱/۵
خصوصیات فیزیکی	
وزن مخصوص	۳/۱۲
سطح مخصوص (m <sup>۲</sup> /kg) (Blaine)	۲۹۵
ابعاد متوسط ذرات (mμ)	۲۶

جدول ۲. ابعاد دانه ی ذرات نانوسیلیس مورد استفاده.

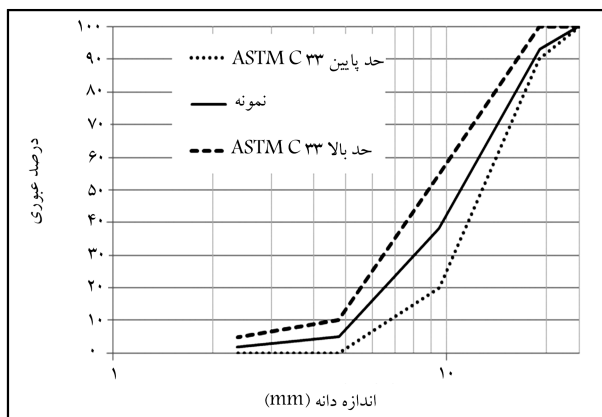
نوع نانوسیلیس	ابعاد دانه (نانومتر)*	ابعاد کلوخه (میکرومتر)**
NS۲۰۰	۱۲	۱۸
NS۳۸۰	۷	۲۷

\* بر اساس اطلاعات تولیدکننده

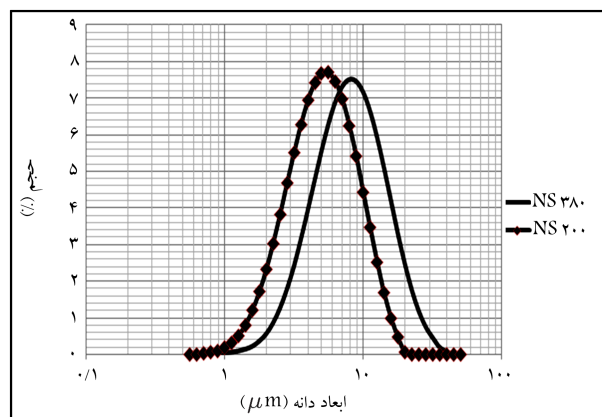
\*\* مطابق با نتایج آزمون تحلیل ابعاد دانه (شکل ۱)

جدول ۳. ویژگی های نانوذرات سیلیس مورد استفاده در این تحقیق (اطلاعات کارخانه ای سازنده).

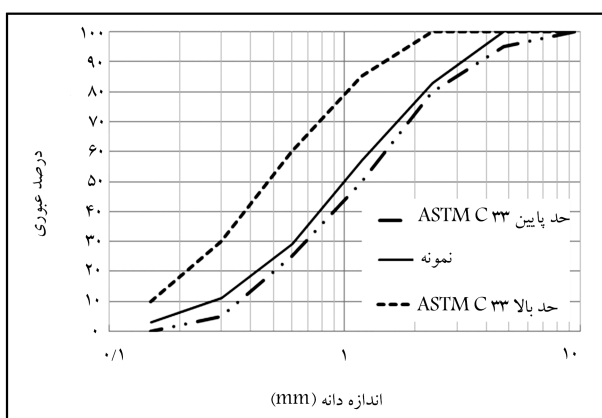
نام محصول	نام مستعار در تحقیق	متوسط ابعاد ذرات (nm)	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	وزن مخصوص	درصد خلوص (%)	کارخانه سازنده
AEROSIL ® ۲۰۰	NS۲۰۰	۱۲ (BET)	۲۰۰ ± ۲۵	۲٫۲۰	> ۹۹/۸	Degussa, Germany
AEROSIL ® ۳۸۰	NS۳۸۰	۷ (BET)	۳۸۰ ± ۳۰	۲٫۲۰	> ۹۹/۸	Degussa, Germany



شکل ۲. منحنی دانه بندی درشت دانه ای مورد استفاده در تحقیق.



شکل ۳. توزیع اندازه ی دانه (کلوخه های) نانوذرات سیلیس مورد استفاده در پژوهش.



شکل ۴. منحنی دانه بندی ریزدانه ای مورد استفاده در تحقیق.

ویژگی های دوامی بتن حائز اهمیت هستند، با استناد به تحقیقات پیشین صورت گرفته،<sup>[۲۲]</sup> مقدار ماده ی چسباننده برابر با ۵۵۰ kg/m<sup>۳</sup> در نظر گرفته و برای تمام مخلوط های HPC ثابت نگه داشته شد. علاوه بر این، نسبت درشت دانه به ریزدانه ۱٫۵ در نظر گرفته شد. سه نسبت آب به بیندر ۰٫۲۵، ۰٫۳ و ۰٫۳۵ معرف نسبت آب به سیمان «بسیار کم»، «کم» و «متوسط» برای ساخت مخلوط های HPC انتخاب شد. همچنین، همان طور که پیش از این توضیح داده شد، بخشی از سیمان پرتلند با نانوذرات سیلیس در دو نسبت ۰٫۷۵٪ و ۱٫۵٪ وزنی جایگزین شد. به منظور داشتن یک اسلامپ ثابت (۲۶ ± ۱ cm)، فوق روان کننده یی با مشخصات ارائه شده در بخش ۳٫۲، با مقادیر مختلف برای همه ی مخلوط ها به کار گرفته شد.

برای ساخت مخلوط های HPC یکنواخت فرایند اختلاط زیر به کار گرفته شد:

### ۳٫۲. فوق روان کننده

از یک فوق روان کننده ی پایه ی پلی کربوکسیلاتی (با ۱ ± ۰٫۴٪ ترکیبات جامد و ۱ ± ۷ pH و وزن مخصوص ۱٫۱۲ ± ۰٫۰۵ در دمای ۲۰/۴°C) برای کمک به توزیع نانوذرات و همچنین استحصال جریان پذیری مناسب در مخلوط های HPC استفاده شد.

### ۴٫۲. سنگ دانه ها

مصالح سنگی مورد استفاده شامل درشت دانه و ریزدانه از معدن متوساک در منطقه ی شهر یار تهران تهیه شد. دانه های شن با اندازه ی بیشینه ی ۱۹ میلی متر، وزن مخصوص ۲٫۷۳ و جذب آب ۱٫۶۱٪ مورد استفاده قرار گرفت. ریزدانه ها، ماسه ی طبیعی رودخانه یی با وزن مخصوص ۲٫۶۳ و جذب آب ۲٫۵۹٪ و مدول نرمی ۳٫۱۷ بودند. هم ریزدانه ها و هم درشت دانه ها منطبق بر ملاحظات ASTM C ۳۳ انتخاب شدند. همچنین از آب آشامیدنی برای آماده سازی مخلوط های HPC استفاده شد. منحنی های دانه بندی درشت دانه و ریزدانه به ترتیب در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

### ۳. آزمایش ها

کلیه ی آزمایش های این تحقیق در دانشگاه صنعتی شریف انجام شده است؛ به این صورت که مراحل ساخت نمونه ها و آزمایش های مکانیکی، شارشی و دوام در آزمایشگاه مصالح دانشکده ی مهندسی عمران و آزمایش های ریزساختاری در پژوهشکده ی علوم و فناوری نانو دانشگاه صنعتی شریف صورت پذیرفته است. با توجه به این که هدف، ساخت بتن توانمند است و در این بتن علاوه بر مقاومت زیاد

• ریزدانه و درشت‌دانه‌های اشباع با سطح خشک (SSD) در داخل مخلوط‌کن به مدت یک دقیقه مخلوط شدند؛

• سیمان داخل مخلوط‌کن ریخته شد و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شد؛

• نانوسیلیس (در صورتی که در طرح اختلاط وجود داشته باشد)، به‌صورت لجن به مخلوط اضافه و به مدت ۲ دقیقه مخلوط می‌شود؛

• آب باقی‌مانده‌ی مخلوط (در مخلوط‌های شامل نانوسیلیس) یا کل مقدار آب (در مخلوط کنترل) به همراه فوق روان‌کننده، داخل مخلوط‌کن ریخته می‌شود و اختلاط به مدت ۴ دقیقه ادامه می‌یابد.

برای بهبود کارایی نانوذرات سیلیس در ماتریس HPC، یک روش پیش توزیع استفاده شد. در هر نسبت  $\frac{w}{b}$  (نسبت آب به ماده چسباننده)، لجن نانوسیلیس، به فرم توزیع کلوتیدی با میزان محلول ۱۰٪، به وسیله‌ی اختلاط مکانیکی با یک مخلوط‌کن با سرعت برشی بالا (۱۵۰۰ rpm) آماده شد. آب مورد نیاز برای آماده‌سازی لجن نانوسیلیس نسبتی از آب اختلاط است.

مخلوط تازه‌ی باقی‌مانده در سه لایه‌ی داخل قالب‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری آغشته به روغن برای آزمایش‌های مقاومت فشاری، آزمایش‌های مقاومت الکتریکی<sup>[۴]</sup> و اندازه‌گیری سرعت پالس فراصوت<sup>۵</sup> ریخته شد. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب بیرون آورده شدند و در حوضچه‌های مخلوط آب آهک در دمای  $21 \pm 2^\circ\text{C}$  برای مدت‌های ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه عمل‌آوری شدند. مقاومت الکتریکی ماتریس بتن بر اساس انتقال (مهاجرت) یونی (همچون یون‌های کلراید) در محلول حفره‌یی است. بنابراین، هر چقدر مقاومت الکتریکی بتن بیشتر باشد، میزان نرخ خوردگی میل‌گردها کمتر خواهد بود.<sup>[۲۰]</sup>

در این تحقیق، آزمایش مقاومت فشاری با جک بتن‌شکن تمام خودکار ELE ADR بر اساس استاندارد BS ۱۸۸۱-۱۱۶<sup>[۲۱]</sup>، آزمایش مقاومت الکتریکی با دستگاه CRM ۲/۲ ساخت شرکت رهنمای کویر بر اساس استاندارد ASTM C۱۸۷۶<sup>[۲۲]</sup> و آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک با دستگاه TICO بر اساس استاندارد ASTM C۵۹۷<sup>[۲۵]</sup> صورت پذیرفته است.

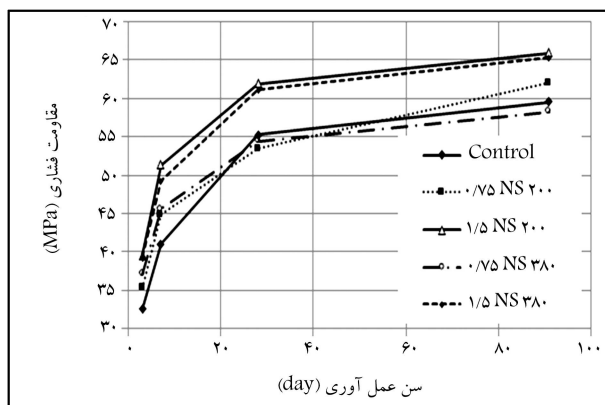
آزمون سنجش سرعت پالس فراصوت عبوری از درون نمونه‌های بتنی به‌عنوان یک آزمون غیرمخرب به‌منظور بررسی کیفیت بتن اجرا شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر همین اساس از این آزمایش در این تحقیق در راستای بررسی غیرمخرب کیفیت بتن‌های توانمند بهره گرفته شد. همچنین نمونه‌های مورد استفاده برای انجام آزمون سنجش پالس فراصوت همان نمونه‌های مورد استفاده برای آزمون مقاومت فشاری‌اند و این آزمون غیرمخرب قبل از آزمون مقاومت فشاری انجام می‌شود. پس از انجام آزمون‌های مخرب و غیرمخرب مقاومت فشاری و سنجش سرعت پالس فراصوت و کسب نتایج حاصل، ارتباط میان نتایج این دو آزمون برای پژوهش پیش رو در مرحله‌ی آزمایشگاهی از طریق رگرسیون خطی دومتغیره به‌دست خواهد آمد تا از طریق این رابطه و انجام آزمون غیرمخرب سنجش سرعت پالس فراصوت بتوان در آینده بدون انجام آزمون مخرب، مقاومت فشاری بتن‌های توانمند نانوسیلیسی را پیش‌بینی کرد.

امروزه مقاومت الکتریکی یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین غیرمستقیم میزان نفوذپذیری نمونه‌های بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌همین منظور در این پژوهش برای ارزیابی ساختار تخلخل و دوام بتن‌های آماده از آزمون غیرمخرب سنجش مقاومت الکتریکی بهره گرفته شد.

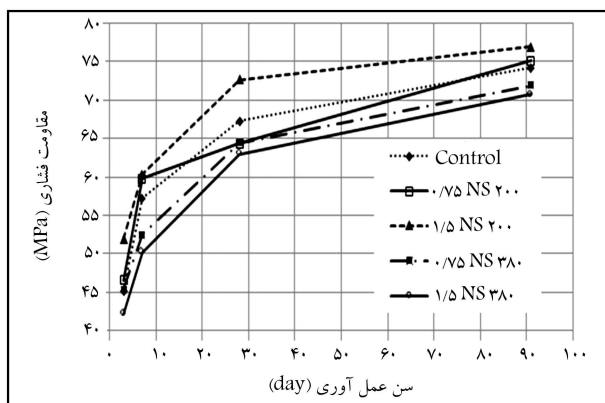
## ۴. نتایج و بحث

### ۴.۱. مقاومت فشاری

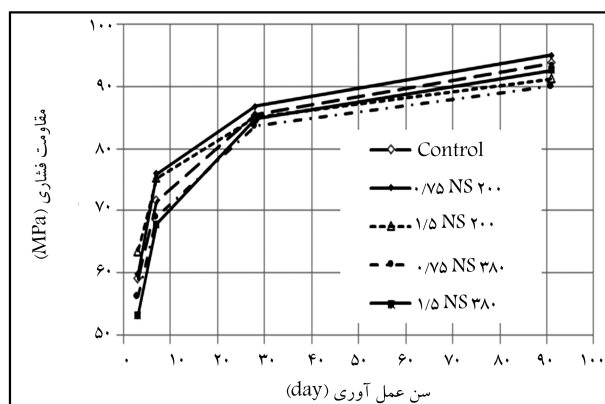
شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری بر مخلوط‌های HPC با نسبت‌های  $\frac{w}{b}$  برابر با ۰/۳۵، ۰/۳۰ و ۰/۲۵ را به ترتیب نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۴، در نرخ بالاتر جایگزینی (۱/۵٪)، نوع درشت‌تر نانوسیلیس (NS۲۰۰) و در نرخ کمتر جایگزینی (۰/۷۵٪)، نوع ریزتر نانوسیلیس (NS۳۸۰) در بهبود مقاومت فشاری HPC مؤثرتر بودند. بیشترین مقاومت فشاری در سنین عمل‌آوری مختلف در نسبت جایگزینی



شکل ۴. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن توانمند با  $w/b = 0.35$ .



شکل ۵. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن توانمند با  $w/b = 0.30$ .



شکل ۶. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن توانمند با  $w/b = 0.25$ .

۱/۵٪ از نانوسیلیس درشت تر (NS۲۰۰) کسب شد. مقاومت فشاری مخلوط HPC به ترتیب تا ۲۱/۵٪، ۲۵٪، ۱۲٪ و ۱۱٪ در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز با اضافه کردن ۱/۵٪ نانوسیلیس درشت تر (NS۲۰۰) افزایش یافت.

همان طور که در شکل ۵ ملاحظه می شود، در  $\frac{w}{b} = 0/3$ ، نانوسیلیس با سطح ویژه کمتر (NS۲۰۰) سبب بهبود بیشتر در مقاومت فشاری نسبت به نانوسیلیس با سطح ویژه بالاتر (NS۳۸۰) است. درصد کمتر (۷۵٪) نانوسیلیس درشت تر (NS۲۰۰) عملکرد بهتری نسبت به نانوسیلیس ریزتر (NS۳۸۰) در هر دو نسبت جایگزینی (۱/۵٪ و ۷۵٪) داشت. علاوه بر این، نانوذرات با سطح ویژه کمتر (NS۲۰۰) در نسبت جایگزینی بیشتر (۱/۵٪) و نانوذرات با سطح ویژه بیشتر (NS۳۸۰) در نسبت جایگزینی کمتر (۷۵٪) عملکرد بهتری را نشان دادند. در نسبت های بالاتر  $\frac{w}{b}$  (به ویژه ۰/۳۵)، مقادیر بیشتر نانوذرات سیلیس، تأثیرات بیشتری بر بهبود مقاومت فشاری داشتند. زیرا در نسبت های  $\frac{w}{b}$  بالاتر، تخلخل بیشتری خواهیم داشت و نانوذرات سیلیس بیشتری برای ساخت ماتریس و ITZ چگال تر نیاز است.

هر چند با کاهش نسبت  $\frac{w}{b}$  (به ویژه نسبت ۰/۲۵، شکل ۶)، درصد کمتر (۷۵٪) نانوسیلیس عملکرد بهتری را نسبت به جایگزینی بیشتر (۱/۵٪) نشان داد. این نتیجه می تواند به درجه ی کاهش یافتن هیدراسیون با کاهش نسبت  $\frac{w}{b}$  نسبت داده شود.<sup>[۲۶]</sup> زمانی که نسبت  $\frac{w}{b}$  کاهش می یابد، نرخ تولید کریستال های کلسیم هیدروکسید (Ca(OH)<sub>۲</sub>) کاهش می یابد. بنابراین، در یک نسبت  $\frac{w}{b}$  کمتر و در یک دوره ی عمل آوری ویژه، مقدار کمتری کلسیم هیدروکسید (Ca(OH)<sub>۲</sub>) برای واکنش با نانوذرات سیلیس موجود است. در نتیجه، فعالیت پوزولانی نانوذرات سیلیس در محیط های سیمانی کاهش می یابد و تأثیر کلوخه های نانوذرات بیشتر می شود. کاهش ابعاد نانوذرات سیلیس، احتمال تشکیل کلوخه های سیلیس بزرگ را افزایش می دهد. بنابراین، در نسبت  $\frac{w}{b}$  کمتر، ذرات ناوی سیلیس بزرگتر، عملکرد بهتری نسبت به ذرات ریزتر نشان می دهند. به طور کلی با به کارگیری نانوذرات سیلیس در مخلوط های پایه ی سیمانی، این ذرات عملکرد چهارگانه یی را به نمایش می گذارند.<sup>[۲۷]</sup> در بین این بهبودها، دارا بودن فعالیت پوزولانی بالا مهم ترین نکته به حساب می آید. نانوذرات سیلیس با مولکول های آب در محلول حفره یی<sup>۶</sup> واکنش می دهند و گروه های سیلانول<sup>۷</sup> را تولید می کنند.<sup>[۲۸]</sup> گروه های سیلانول سپس با یون های  $Ca^{+2}$  آزاد شده از کریستال های کلسیم هیدروکسید (Ca(OH)<sub>۲</sub>) در محلول حفره یی واکنش می دهند و C-S-H را تولید می کنند.<sup>[۲۹]</sup> ذرات نانوسیلیس سطوح ویژه ی بالایی در مقایسه با مصالح پوزولانی مانند خاکستر بادی دارند، سطوح آنها بسیار فعال است و بر همین اساس نانوذرات دارای فعالیت پوزولانی حساس در محیط های سیمانی هستند. نانوذرات سیلیس بهبودهای دیگری نیز علاوه بر فعالیت پوزولانی دارند. این نانوذرات می توانند به عنوان یک هسته در ساختار C-S-H برای تسریع تشکیل C-S-H و پیوندهای قوی بین ذراتش باشند. علاوه بر این، تشکیل کریستال های نامطلوب (کلسیم هیدروکسید و اترنژیت)<sup>۸</sup> به دلیل حضور تعداد زیادی نانوذرات در بین محصولات هیدراسیون با جلوگیری از رشد این کریستال ها و نقش محدودکننده ی آنها، کنترل خواهد شد. در نهایت، ذرات نانوسیلیس می توانند حفره های میکرومتری و نانومتری در ریزساختار را به ویژه در ناحیه ی انتقالی ITZ<sup>۹</sup> بین خمیر سیمان و سنگ دانه ها پر کنند. این موضوع به توسعه ی یک ITZ متراکم تر و افزایش در مقاومت آن کمک می کند. مشابه با ۰/۳۵ =  $\frac{w}{b}$ ، درصد های بیشتر نانوذرات سیلیس برای بهبود مقاومت فشاری مورد نیاز بود. هر چند که این مسئله فقط در مخلوط های HPC شامل نانوسیلیس درشت تر (NS۲۰۰) قابل مشاهده بود و همچنین عملکرد معکوسی برای نانوذرات ریزتر (NS۳۸۰) مشاهده شد. این عملکرد مربوط به احتمال بیشتر کلوخه یی شدن نانوذرات ریز حتی در نسبت های

جایگزینی کم است. این موضوع می تواند به فعالیت سطحی بسیار بالای آنها مرتبط باشد، که بازده عملکرد چهارگانه ی نانوذرات سیلیس در مخلوط سیمانی را کاهش می دهد. مخلوط کنترلی مقاومت فشاری بالاتری از مخلوط های شامل درصد های مختلف نانوسیلیس ریزتر (NS۳۸۰) را نشان داد. هیچ روش ویژه یی برای توزیع بهتر نانوذرات سیلیس در ماتریس تازه ی مخلوط های بتنی در این مطالعه استفاده نشد؛ به کارگیری روش های پرهزینه مانند اختلاط فراصوت می تواند به توزیع مناسب نانوذرات در ریزساختار منجر شود. بنابراین، عملکرد نانوذرات سیلیس می تواند با روش های اختلاط ویژه که در این مطالعه به علت ساده سازی و کاهش هزینه های ساخت بت های توانمند مسلح به نانوذرات مورد استفاده قرار نگرفت، بهبود یابد. همان طور که در شکل های ۴ تا ۶ نشان داده شده است، به طور کلی، مشاهده شد که نانوذرات درشت تر، بازده بیشتری در بهبود مقاومت فشاری داشتند. همچنین برای مخلوط های شامل نانوذرات درشت تر (NS۲۰۰)، مقاومت فشاری بیشتری در درصد جایگزینی کمتر (۷۵٪) به دست آمد.

اگرچه در نسبت  $\frac{w}{b} = 0/25$ ، جایگزینی ۷۵٪ از نانوسیلیس درشت تر (NS۲۰۰)، مقاومت فشاری را به ترتیب تا ۱٪، ۶٪، ۲٪ و ۱٪ به ترتیب در سنین عمل آوری ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز بهبود بخشید، اما بهبود در مقاومت فشاری به عنوان نتیجه یی از افزودن مقادیر کم نانوذرات سیلیس (۷۵٪ و ۱/۵٪ در این مطالعه) ناچیز است.

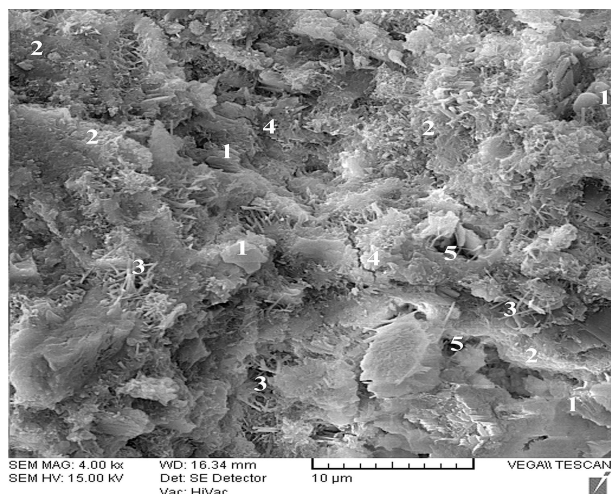
علاوه بر این، درصد کمتر نانوذرات سیلیس ریزتر (NS۳۸۰)، عملکرد بهتری در سنین اولیه (۳ و ۷ روز عمل آوری) نسبت به سنین بیشتر (۲۸ و ۹۱ روز عمل آوری) داشتند. در نتیجه، درصد های کمتر نانوذرات سیلیس ممکن است در ماتریس بهتر توزیع شوند. زیرا در استفاده از مقادیر کمتر نانوذرات، احتمال تشکیل کلوخه های بزرگ کاهش می یابد. به عنوان یک نتیجه، نسبت های جایگزینی کمتر نانوذرات، به دلیل فعالیت زیادشان، در سنین اولیه بسیار کارآمدترند.

در نسبت های بالاتر  $\frac{w}{b}$  (به ویژه ۰/۳۵)، مقادیر بیشتر نانوذرات سیلیس، تأثیرات بیشتری بر بهبود مقاومت فشاری داشتند. زیرا در نسبت های  $\frac{w}{b}$  بالاتر، تخلخل بیشتری خواهیم داشت؛ بنابراین نانوذرات سیلیس بیشتری برای ساخت ماتریس و ITZ چگال تر نیاز است.

هر چند با کاهش نسبت  $\frac{w}{b}$ ، درصد کمتر (۷۵٪) نانوسیلیس عملکرد بهتری را نسبت به جایگزینی بیشتر (۱/۵٪) نشان داد. این نتیجه می تواند به درجه ی کاهش یافتن هیدراسیون با کاهش نسبت  $\frac{w}{b}$  نسبت داده شود.<sup>[۲۶]</sup> زمانی که نسبت  $\frac{w}{b}$  کاهش می یابد، نرخ تولید کریستال های کلسیم هیدروکسید (Ca(OH)<sub>۲</sub>) کاهش می یابد. بنابراین، در یک نسبت  $\frac{w}{b}$  کمتر و در یک دوره عمل آوری ویژه، مقدار کمتری کلسیم هیدروکسید (Ca(OH)<sub>۲</sub>) برای واکنش با نانوذرات سیلیس موجود است. در نتیجه، فعالیت پوزولانی نانوذرات سیلیس در محیط های سیمانی کاهش می یابد و تأثیر کلوخه های نانوذرات بیشتر می شود. کاهش ابعاد نانوذرات سیلیس، احتمال تشکیل کلوخه های سیلیس بزرگ را افزایش می دهد. بنابراین، در نسبت  $\frac{w}{b}$  کمتر، ذرات نانوسیلیس بزرگتر، عملکرد بهتری نسبت به ذرات ریزتر را نشان می دهند.

## ۲.۴. آزمون دستگاه پراش پرتو X

شکل های ۷ و ۸ الگوهای XRD خمیرهای سیمان با و بدون نانوذرات سیلیس به ترتیب در سنین عمل آوری ۳ و ۲۸ روزه را نشان می دهند. پیک های اصلی مشاهده شده، کلسیم هیدروکسید (Ca(OH)<sub>۲</sub>) (در درجه ی ۲θ برابر با ۱۸/۱، ۲۸/۷، ۳۴/۱، ۴۷/۱ و ۵۰/۸) الایت C+S در درجه ی ۲θ برابر با ۲۹/۳، ۳۲/۱، ۳۲/۵



شکل ۹. حضور محصولات مختلف هیدراسیون در ماتریس مخلوط بتن توانمند کنترلی در نسبت  $w/b = 0.3$ .

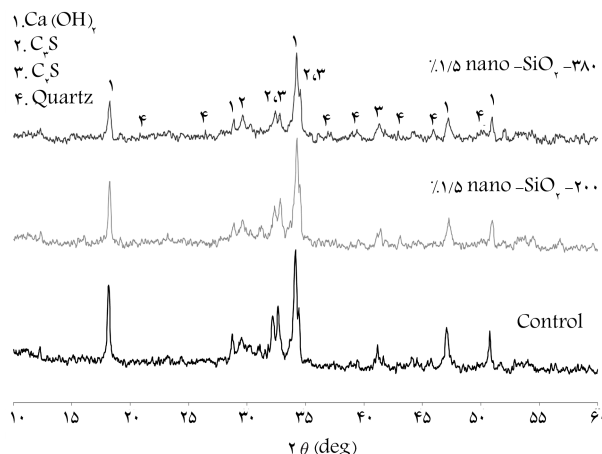
همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است، هر دو نوع نانوذرات سیلیس عملکرد بهتری (فعالیت پوزولانی و تسریع هیدراسیون) در سنین اولین (۳ روز) نسبت به سنین میانی (۲۸ روز) به دلیل انرژی سطحی زیادشان و پیوندهای غیراشباع متعدد در سطحشان نشان دادند که سبب فعالیت سریع برای نانوذرات سیلیس می‌شود.

پیک‌های کوارتز (نانوسیلیس) در خمیرسیمان شامل نانوسیلیس ریزتر ( $NS_{380}$ )، در مقایسه با خمیرسیمان با نانو سیلیس درشت‌تر ( $NS_{200}$ ) بیشتر قابل توجه بود که نشان‌دهنده حضور نانوذرات سیلیس واکنش نداده‌ی بیشتری در ماتریس خمیر شامل نانو ذرات سیلیس ریزتر بود. این ذرات واکنش نداده می‌توانند به نانوذرات موجود در کلوخه‌ها و نانوذرات خوب توزیع شده در ماتریس که هنوز واکنش نداده‌اند، تقسیم شوند. همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، شدت پیک‌های کوارتز در خمیرسیمان با نانو سیلیس ریزتر ( $NS_{380}$ ) در سن ۳ روز از عمل‌آوری نسبت به سن ۲۸ روز بیشتر بود. پیک‌های کوارتز در سن ۲۸ روز از عمل‌آوری کاهش یافت یا ناپدید شد. این نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات سیلیس واکنش نداده‌ی خوب توزیع شده در سنین دیرتر (۲۸ روز) مصرف شدند، در حالی‌که نانوذرات سیلیس محصور شده در کلوخه‌ها، واکنش نداده باقی می‌مانند. مقادیر نانوذرات سیلیس مورد استفاده در این مطالعه (۷۵٪) و ۱/۵٪) به عنوان نسبت‌های جایگزینی کم نانوذرات (۳٪) < طبقه‌بندی می‌شوند.

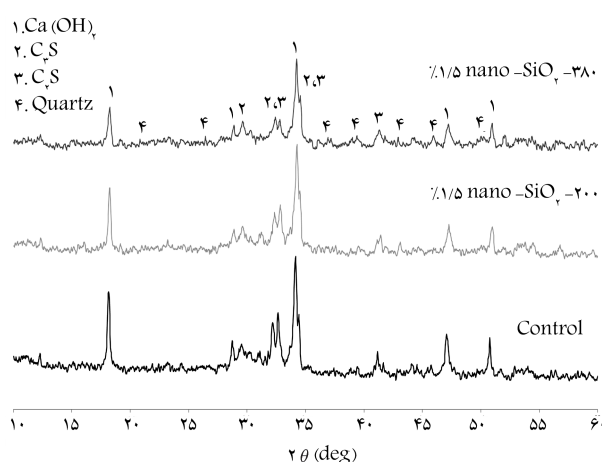
### ۳.۴. آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

شکل‌های ۹ تا ۱۴ مشخصه‌های مورفولوژیکی ریزساختار HPC با و بدون نانوذرات سیلیس را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، حضور کریستال‌های ناخوشایند، همچون کلسیم هیدروکسید  $Ca(OH)_2$  و اترنژیت سوزنی‌شکل و C-S-H در ریزساختار مخلوط HPC کنترلی قابل توجه است. علاوه بر این، بعضی حفره‌ها و ریزترها در ماتریس وجود دارند و ریزساختار به خوبی متراکم نشده است.

با استفاده از نانوذرات سیلیس در مخلوط‌های HPC، مقدار کریستال‌های ناخوشایند به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱) با توجه به



شکل ۷. طیف‌های XRD خمیرسیمان با و بدون انواع مختلف نانوسیلیس در سن ۳ روزه عمل‌آوری.



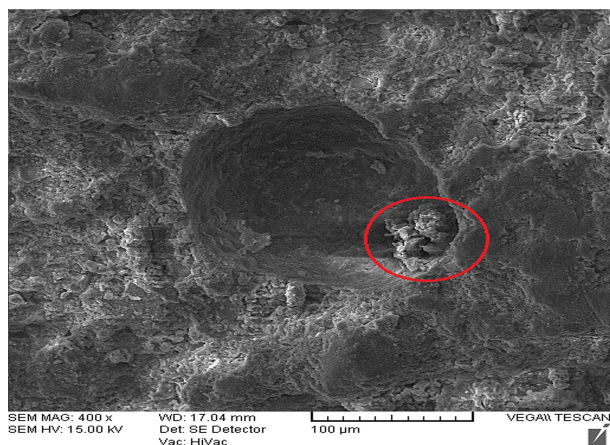
شکل ۸. طیف‌های XRD خمیرسیمان با و بدون انواع مختلف نانوسیلیس در سن ۲۸ روزه عمل‌آوری.

و (۳۴/۴)، بلایت  $C_2S$  (در درجه‌ی  $2\theta$  برابر با ۳۲/۱، ۳۴/۴ و ۴۱/۲) و (کوارتز در درجه‌ی  $2\theta$  برابر با ۲۰/۸، ۲۶/۶، ۳۶/۵، ۳۹/۴، ۴۴/۴، ۴۵/۷، ۵۰/۱ و ۵۴/۸) هستند.

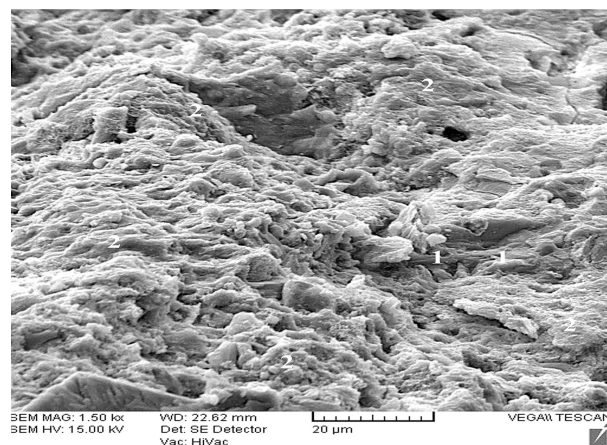
همان‌طور که در شکل ۷ و شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزودن نانوذرات سیلیس مختلف پیک‌های کلسیم هیدروکسید  $Ca(OH)_2$ ، الایت  $C_2S$  و بلایت  $C_2S$  در سنین عمل‌آوری ۳ و ۲۸ روز کاهش یافت. کاهش پیک‌های کلسیم هیدروکسید نماینده‌ی فعالیت پوزولانی است و کاهش پیک‌های الایت و بلایت نشان‌دهنده‌ی تسریع هیدراسیون سیمان است. بر اساس نتایج XRD، نانوسیلیس ریزتر ( $NS_{380}$ )، شدت واکنش پوزولانی و تسریع هیدراسیون بیشتری نسبت به نانوذرات سیلیس درشت‌تر ( $NS_{200}$ ) نشان داد.

این نتایج با تحقیق باقری و همکاران<sup>[۳۱]</sup> که عملکرد پوزولانی بیشتر و افزایش ارتقای هیدراسیون در حضور نانوذرات سیلیس ریزتر را بیان می‌کند، سازگار است. آن‌ها نتیجه گرفتند که اندازه‌ی اولیه کلوخه‌های نانوسیلیس بر فعالیت پوزولانی نانوذرات سیلیس اثر نمی‌گذارد. مقدار زیادی از نانوذرات سیلیس موجود در سطح کلوخه‌ها می‌توانند به سرعت در ریزساختار واکنش دهند، هر چند که بازده عملکرد آنها در مقایسه با زمانی که آنها به‌طور یکنواخت در ماتریس توزیع می‌شوند، کاهش می‌یابد.

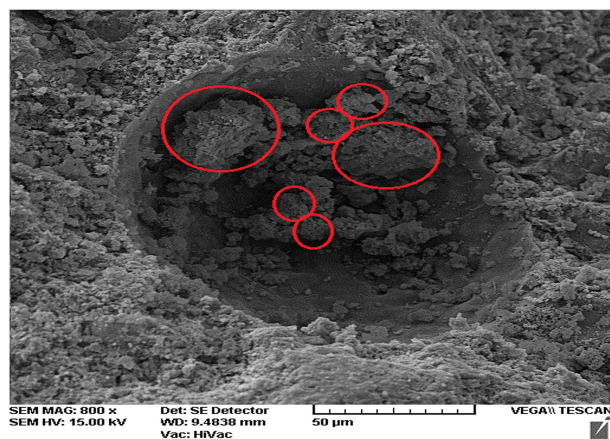




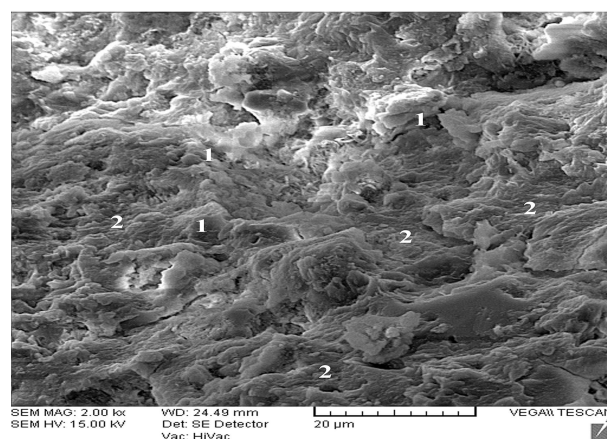
شکل ۱۲. حضور کلوخه‌های نانوسیلیس در حفره‌ی بتن توانمند شامل ۱/۵٪ نانوسیلیس درشت‌تر (NS۲۰۰).



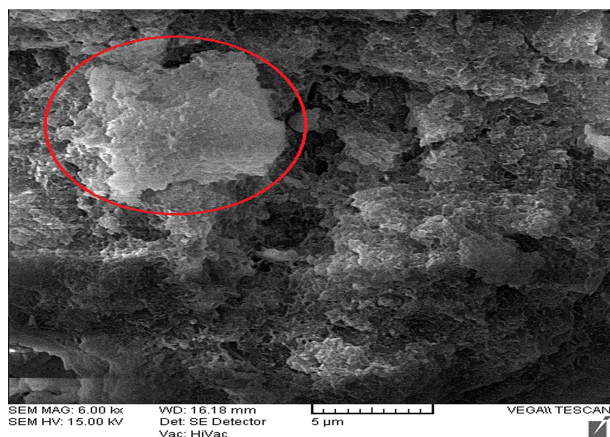
شکل ۱۰. ریزساختار بتن توانمند با ۱/۵٪ نانوسیلیس درشت‌تر: (NS۲۰۰) یک ریزساختار بسیار چگال تشکیل شده است  $1 = Ca(OH)_2$ ,  $2 = C - S - H$



شکل ۱۳. مقادیر زیاد کلوخه‌های نانوسیلیس موجود در حفره‌های هوای ماتریس بتن توانمند شامل ۱/۵٪ نانوسیلیس ریزتر (NS۳۸۰).



شکل ۱۱. ریزساختار بتن توانمند با ۱/۵٪ نانوسیلیس ریزتر: (NS۳۸۰) بعضی قسمت‌های ریزساختار یکنواخت‌تر و چگال‌تر از نمونه‌ی کنترلی هستند.  $1 = Ca(OH)_2$ ,  $2 = C - S - H$



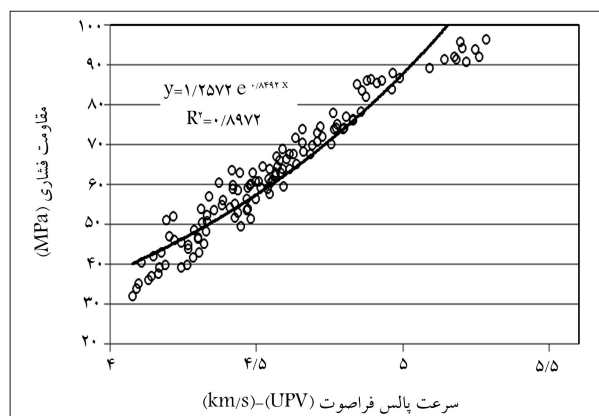
شکل ۱۴. مقادیر زیاد کلوخه‌های نانوسیلیس بین محصولات هیدراسیون در ماتریس بتن توانمند با ۱/۵٪ نانوسیلیس ریزتر (NS۳۸۰).

محصولات هیدراسیون، که حضور شدید کلوخه‌ها در ریزساختار مخلوط HPC شامل نانوذرات سیلیس ریزتر (NS۳۸۰) را نشان می‌دهد، وجود دارد. حضور کلوخه‌های نانوذرات سیلیس در حفره‌های ماتریس می‌تواند به تشکیل کلوخه‌ها در محلول حفره‌ی طبق مطالعه‌ی باقری و همکاران مرتبط شود.<sup>[۳۱]</sup> نهایتاً، ریزساختار

شکل‌های ۱۰ و ۱۱، حجم بیشتری از C-S-H مشاهده شده است و ریزساختارهای مخلوط‌ها در مقایسه با ماتریس HPC کنترلی بیشتر متراکم می‌شود. همان‌طور که پیش از این بحث شد، نانوذرات سیلیس عملکرد چهارگانه در ماتریس‌های سیمانی نشان می‌دهند؛ بنابراین ریزساختار متراکم‌تر و چگال‌تری را توسعه می‌دهند. این موضوع در ریزساختار ماتریس‌های HPC شامل هر دو نوع نانوسیلیس (NS۲۰۰) و (NS۳۸۰) مشاهده می‌شود؛ اما برخی تفاوت‌ها بین آنها وجود دارد (شکل ۱۰ و ۱۱).

همان‌طور که در بخش‌های پیشین مطرح شد، نانوذرات سیلیس با سطوح ویژه‌ی زیاد (مانند NS۳۸۰)، احتمال بیشتری برای تشکیل کلوخه‌های نانوذرات نسبت به نانوذرات سیلیس درشت‌تر (مانند NS۲۰۰) نشان می‌دهند. بنابراین بازده نانوذرات سیلیس درشت‌تر می‌تواند بیشتر از ذرات ریزتر باشد. شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ شدت کلوخه‌ی شدن نانوذرات سیلیس در ماتریس مخلوط HPC را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۲ و شکل ۱۳، برای مخلوط HPC با نانو سیلیس ریزتر (NS۳۸۰)، حجم و ابعاد کلوخه‌ها در حفره‌های هوا به طور قابل توجهی بزرگ‌تر از کلوخه‌ها در حفره‌های HPC شامل نانو سیلیس درشت‌تر (NS۲۰۰) بود.

بر اساس شکل ۱۴، کلوخه‌های نانو سیلیس در حجم کل ماتریس بین



شکل ۱۵. نمودار نتایج تغییرات UPV برحسب مقاومت فشاری برای نمونه‌های HPC.

مخلوط HPC شامل نانو سیلیس درشت‌تر (NS<sup>۲۰۰</sup>) نسبت به مخلوط با نانو سیلیس ریزتر (NS<sup>۳۸۰</sup>) متراکم‌تر بود که می‌تواند منجر به یک ماتریس پرمقاومت شود.

#### ۴.۴. آزمایش پالس اولتراسونیک

همان‌طور که تعداد زیاد مطالعات پیشین نشان می‌دهد، [۳۲،۳۳] ارتباط بین مقاومت فشاری و سرعت پالس فراصوت می‌تواند به‌وسیله یک تابع نمایی بیان شود. شکل ۱۵ رابطه‌ی نمایی بین مقاومت فشاری و مقادیر سرعت پالس فراصوت برای این مطالعه را نشان می‌دهد.

طبق معادله‌ی ۱، ضریب  $R^2$  برای مدل نمایی، ۰/۸۹۷۲ است که ارتباط مناسب بین نتایج مقاومت فشاری و سرعت پالس فراصوت را در این آزمایش نشان می‌دهد. بنابراین، مدل پیشنهادی می‌تواند برای پیش‌بینی مقاومت فشاری مخلوط‌های HPC شامل نانوذرات سیلیس با استفاده از اندازه‌گیری‌های سرعت پالس فراصوت به‌کار گرفته شود.

$$CS = 1/2572 e^{0.8972 UPV}; \quad R^2 = 0.8972 \quad (1)$$

که در آن CS<sup>۱</sup> مقاومت فشاری بر حسب MPa و UPV نتیجه‌ی آزمایش سرعت پالس فراصوت نمونه‌ی HPC بر حسب km/s است.

#### ۵.۴. میزان خوردگی میل‌گرد

مطابق با شکل ۱۶، افزودن نانوذرات سیلیس با سطوح ویژه متفاوت، مقاومت الکتریکی مخلوط‌های HPC را در نسبت‌های مختلف  $\frac{w}{b}$  و دوره‌های عمل‌آوری مختلف نسبت به مخلوط‌های کنترلی افزایش داد. افزایش در مقاومت مخلوط‌های HPC در حضور نانوذرات سیلیس می‌تواند به بهبود و پالایش سازه‌ی حفره‌ها و کاهش رسانایی محلول‌های حفره‌یی نسبت داده شود.

همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، جایگزینی بالاتر (۱/۵٪) از نانوذرات سیلیس مختلف (NS<sup>۳۸۰</sup> و NS<sup>۲۰۰</sup>) مقاومت الکتریکی را بیشتر از جایگزینی کمتر (۰/۷۵٪) افزایش داد. این موضوع می‌تواند به افزایش نرخ واکنش پوزولانی و واکنش هیدراسیون حاصل از افزایش مقدار نانوذرات سیلیس نسبت داد. در نسبت‌های بالاتر  $\frac{w}{b}$  (۰/۳ و ۰/۳۵)، نانوذرات سیلیس ریزتر

(NS<sup>۳۸۰</sup>) عملکرد بهتری نسبت به نانوذرات سیلیس درشت‌تر (NS<sup>۲۰۰</sup>) داشتند، در حالی که نانو سیلیس درشت‌تر (NS<sup>۲۰۰</sup>) در نسبت  $\frac{w}{b} = 0.25$  مؤثرتر بود. این موضوع می‌تواند به احتمال بیشتر تشکیل کلوخه‌های نانوذرات در نسبت‌های کمتر  $\frac{w}{b}$  نسبت داده شود که برای نانوذرات سیلیس ریزتر تأثیر بیشتری دارد. در نسبت‌های  $\frac{w}{b}$  کم (مانند ۰/۲۵) مخلوط HPC، گرانروی بیشتری از خود نشان داد که اختلاط و توزیع نانوذرات سیلیس در مخلوط تازه را مشکل ساخت.

مطابق با ۱ - ACI 222R [۲۰] نتیجه شده است که نرخ خوردگی میل‌گرد فولادی زمانی که مقاومت الکتریکی بتن از ۲۰ kΩ.cm تجاوز کند، کم است. بر همین اساس، همان‌طور که در شکل ۱۶ ملاحظه می‌شود، در  $\frac{w}{b} = 0.35$ ، مخلوط‌های HPC شامل انواع و درصدهای مختلف نانوذرات سیلیس، نرخ خوردگی کمتری در ۹۱ روز عمل‌آوری نشان دادند، در حالی که در  $\frac{w}{b} = 0.3$  این گرایش به روز ۲۸ ام عمل‌آوری تعمیم یافت. در نسبت کمتر،  $\frac{w}{b} = 0.25$ ، مخلوط‌های HPC با نانوذرات سیلیس می‌توانند به‌عنوان بتن با نرخ خوردگی کم حتی در سن ۷ روزه از عمل‌آوری طبقه‌بندی شوند.

#### ۵. نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از این مطالعه، موارد زیر به‌عنوان نتایج نهایی ارائه می‌شود:

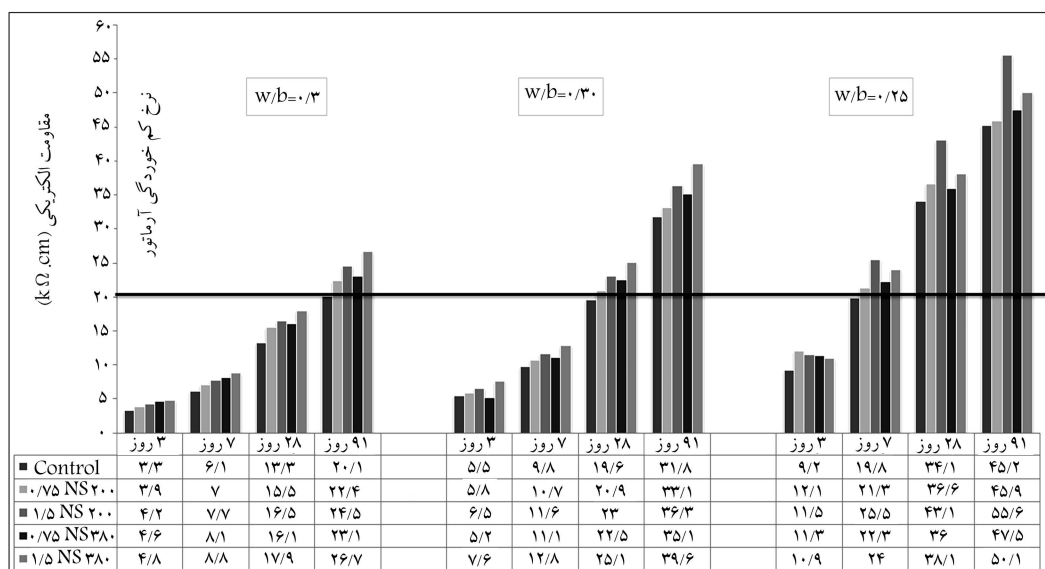
با کاهش نسبت  $\frac{w}{b}$  (از ۰/۳۵ تا ۰/۲۵)، نانوذرات سیلیس درشت‌تر (NS<sup>۲۰۰</sup>) در درصد کمتر (۰/۷۵٪)، مقاومت فشاری را نسبت به نانوذرات سیلیس ریزتر (NS<sup>۳۸۰</sup>) با نسبت جایگزینی بالاتر (۱/۵٪) بهتر بهبود دادند. این نتیجه در نسبت  $\frac{w}{b} = 0.25$  بسیار بارزتر بود.

بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی، یک تابع نمایی دوپارامتره برای تخمین مقاومت فشاری مخلوط‌های HPC شامل نانوذرات سیلیس با استفاده از UPV و نتایج آزمایش مقاومت فشاری پیشنهاد شد.

بر خلاف نتایج مقاومت مکانیکی، کاربرد هر دو نوع نانوذرات سیلیس درشت و ریز در نسبت‌های جایگزینی مختلف (۰/۷۵٪ و ۱/۵٪)، مقاومت الکتریکی را نسبت به مخلوط HPC کنترلی در سنین عمل‌آوری اولیه و میانی (۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه) برای نسبت‌های  $\frac{w}{b}$  بین ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ افزایش داد. نسبت جایگزینی بیشتر (۱/۵٪) نانوذرات سیلیس باعث افزایش بیشتری در مقاومت الکتریکی شد. نتایج آزمون XRD نشان داد که با کاربرد ذرات نانوسیلیس در بتن توانمند، کاهش پیک‌های کلسیم هیدروکسید، در سنین اولیه (۳ روز) واکنش پوزولانی شدت گرفته است و همچنین به دلیل کاهش یون‌های  $Ca^{2+}$  افزایش واکنش هیدراسیون نتیجه می‌شود.

از نتایج آزمایش SEM نتیجه شده که استفاده از نانوذرات درشت‌تر (NS<sup>۲۰۰</sup>) به دلیل واکنش و فعالیت کمتر آن‌ها نسبت به نانوذرات سیلیس ریزتر (NS<sup>۳۸۰</sup>)، در محلول حفره‌یی کمتر کلوخه می‌شوند و در نتیجه عملکرد بهتری خواهند داشت. در مخلوط‌های HPC با  $\frac{w}{b} = 0.35$ ، شامل انواع و درصدهای مختلف نانوذرات سیلیس، نرخ خوردگی کمتری در ۹۱ روز عمل‌آوری نشان دادند، در حالی که در  $\frac{w}{b} = 0.3$  این گرایش به روز ۲۸ ام عمل‌آوری تعمیم یافت. در نسبت کمتر،  $\frac{w}{b} = 0.25$ ، مخلوط‌های HPC با نانوذرات سیلیس می‌توانند به‌عنوان بتن با مقاومت زیاد در برابر خوردگی فولاد حتی در سن ۷ روزه از عمل‌آوری طبقه‌بندی شوند.





شکل ۱۶. مقاومت الکتریکی نمونه‌های مختلف با نسبت های w/b متفاوت، بررسی نرخ خوردگی میلگرد.

## پانویس‌ها

1. high performance concrete (HPC)
2. Calcium-silicate-hydrate
3. Calcium hydroxide-ca(OH)<sub>۲</sub>
4. electrical resistivity (ER)
5. ultrasonic pulse velocity (UPV)
6. pore solution
7. silanol groups (Si-OH)
8. CH & (CaO)<sub>۰.۵</sub>(Al<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub>)(SO<sub>۳</sub>)<sub>۰.۲۵</sub>H<sub>۲</sub>O
9. interfacial transition zone
10. compressive strength

## منابع (References)

1. Meyer, C. "The greening of the concrete industry", *Cement & Concrete Composites*, **31**, pp. 601-605 (2009).
2. Gagg, Colin R. "Cement and concrete as an engineering material: an historic appraisal and case study analysis", *Engineering Failure Analysis*, **40**, pp. 114-40 (2014).
3. WCED, Our common future. London: Oxford University Press (1987).
4. Neville, A. and Aitcin, P.C. "High performance concrete: an overview", *Materials and Structures*, **31**, pp. 111-117 (1998),
5. Hosseini, P., Booshehrian, A. and Farshchi, S. "Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on microstructure and mechanical properties of cement mortars for ferrocement", *Transportation Research Record*, **2141**, pp. 15-20 (2010).
6. Ozyildirim, C. and Zegetosky, C. "Exploratory investigation of nanomaterials to improve strength and permeability of concrete", *Transportation Research Record*, **2142**, pp. 1-8 (2010).
7. He, X. and Shi, X. "Chloride permeability and microstructure of portland cement mortars incorporating nanomaterials", *Transportation Research Record*, **2070**, pp. 13-21 (2008).
8. Oltulu, M. and Sahin, R. "Single and combined effects of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume", *Materials Science and Engineering A*, **528**, pp. 7012-7019 (2011).
9. Senff, L., Hotza, D., Repette, W.L. and et al. "Mortars with nano-SiO<sub>2</sub> and micro-SiO<sub>2</sub> investigated by experimental design", *Construction and Building Materials*, **24**, pp. 1432-1437 (2010).
10. Shih, J.Y., Chang, T.P. and Hsiao, T.C. "Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite", *Materials Science and Engineering A*, **424**, pp. 266-274 (2006).
11. Chang, T.P., Shih, J.Y., Yang, K.M. and et al. "Material properties of Portland cement paste with nanomontmorillonite", *Journal of Materials Science*, **42**, pp. 7478-7487 (2006).
12. Zain, M.F.M., Safiuddin, M. and Mahmud, H. "Development of high performance concrete using silica fume at relatively high water-binder ratios", *Cement and Concrete Research*, **30**, pp. 1501-1505 (2000).
13. Kjellsen, K.O., Wallevik, O.H. and Hallgren, M. "On the compressive strength development of high-performance concrete and paste - effect of silica fume", *Materials and Structures*, **32**, pp. 63-69 (1999).
14. Senff, L., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M. and et al. "Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars", *Construction and Building Materials*, **23**, pp. 2487-2491 (2009).
15. Said, A.M., Zeidan, M.S., Bassuoni, M.T. and et al. "Properties of concrete incorporating nano-silica", *Construction and Building Materials*, **36**, pp. 838-844 (2012).
16. Berra, M., Carassiti, F., Mangialardi, T. and et al. "Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of concrete", *Construction and Building Materials*, **36**, pp. 838-844 (2012).

- sive strength of Portland cement pastes", *Construction and Building Materials*, **35**, pp. 666-675 (2012).
17. Baomin, W., Lijiu, W. and Lai, F.C. "Freezing resistance of HPC with nano-SiO<sub>2</sub>", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, **23**(1), pp. 85-88 (2008).
18. Khaloo, A.R., Mobini, M.H. and Hosseini, P. "Influence of different types of nano SiO<sub>2</sub> particles on properties of high-performance concrete", *Con. Build. Mat.*, **113**, pp. 188-201 (2016).
19. Mobini, M.H., Khaloo, A.R., Hosseini, P. and et al. "Mechanical properties of fiber-reinforced high-performance concrete incorporating pyrogenic nanosilica with different surface area", *Con. Build. Mat.*, **101**, pp. 130-140 (2015).
20. ACI 222R-01. "Protection of metals in concrete against corrosion", American.
21. ASTM C 150. "Standard specification for portland cement", American Standards for Testing and Materials (2004).
22. Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M. and et al. "Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO<sub>2</sub> micro and nanoparticles", *Materials and Design*, **34**, pp. 389-400 (2012).
23. BS 1881-116. "Method for determination of compressive strength of concrete cubes", British Standards Institution (1983).
24. ASTM C 1876. "Standard test method for bulk electrical resistivity or bulk conductivity of concrete", (2019).
25. ASTM C 597. "Standard test method for pulse velocity through concrete", American Standards for Testing and Materials (2002).
26. Lam, L., Wong, Y.L. and Poon, C.S. "Degree of hydration and gel/space ratio of highvolume fly ash/cement systems", *Cem. Concr. Res.*, **30**, pp. 747-756 (2000).
27. Najigivi, A., Khaloo, A., Iraj Zad, A. and et al. "Investigating the effects of using different types of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on the mechanical properties of binary blended concrete", *Compos. Part B*, **54**, pp. 52-58 (2013).
28. Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K. and et al. "Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume", *Construction and Building Materials*, **21**, pp. 539-545 (2007).
29. Hosseinpourpia, R., Varshoe, A., Soltani, M. and et al. "Production of waste bio-fiber cement-based composites reinforced with nano-SiO<sub>2</sub> particles as a substitute for asbestos cement composites", *Constr. Build. Mater*, **31**, pp. 105-111 (2012).
30. Singh, L.P., Karade, S.R., Bhattacharyya, S.K. and et al. "Beneficial role of nanosilica in cement based materials - a review", *Constr. Build. Mater*, **47**, pp. 1069-1077 (2013).
31. Bagheri, A., Parhizkar, T., Madani, H. and et al. "The influence of different preparation methods on the aggregation status of pyrogenic nanosilicas used in concrete", *Materials and Structures*, **46**, pp. 135-143 (2013).
32. Ravindrarajah, R.S. "Strength evaluation of high-strength concrete by ultrasonic pulse velocity method", *NDT and E Int*, **30**, p. 260 (1997).
33. Yap, S.P., Alengaram, U.J. and Jumaat, M.Z. "The effect of aspect ratio and volume fraction on mechanical properties of steel fibre-reinforced oil palm shell concrete", *J. Civ. Eng. Manag.*, **22**(2), pp. 168-177 (2016). DOI: 10.3846/13923730.2014.897970