

# بررسی تأثیر اندازه و مقدار ذرات نانوسیلیس در پارامترهای مقاومتی و دوام بتن متراکم شده‌ی غلتکی در سیکل‌های متناوب ذوب - یخبندان

امیرحسام‌الدین آرمان‌پور (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

محمد مهدی امیری\* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران

محسن آدابی (استادیار)

گروه مهندسی مخابراتی و مواد، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

احسان درویشان (استادیار)

گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۴۰۱ (۱۴۰۱)  
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۱/۲، ص. ۱۴۵-۱۵۴، (پادداست نشی)

بتن متراکم شده‌ی غلتکی طبق تعریف، بتن متراکم شده توسط غلتک است که در حالت سخت شده با استفاده از غلتک متراکم می‌شود. استفاده از بتن متراکم شده‌ی غلتکی این امکان را به وجود آورده است که بسیاری از سدها و روسازی‌های جدید، با صرفه‌ی اقتصادی زیاد ناشی از کاهش هزینه‌های اجرا که با استفاده از روش‌های سریع ساخت ممکن شده است، احداث شود. به دلیل اینکه سازه‌های اخیر در معرض عوامل جوی قرار می‌گیرند، دوام آن‌ها به خصوص در برابر سیکل‌های متناوب ذوب - یخبندان، مسئله‌ی حائز اهمیتی است. در پژوهش حاضر، با افزودن نانوذرات سیلیسی به ترکیب بتن غلتکی با سه قطر مختلف و سه مقدار متفاوت مقاومت فشاری، ابعاد نمونه و وزن نمونه‌ها پس از اعمال ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ چرخه‌ی ذوب و یخ بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها حاکی از عملکرد بهتر مقاومتی و دوامی مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس نسبت به مخلوط‌های بدون افزودنی بوده است.

hesam.armanpour@yahoo.com  
amiri@iaufb.ac.ir  
adabi@riau.ac.ir  
darvishan@riau.ac.ir

واژگان کلیدی: بتن متراکم شده‌ی غلتکی، نانوسیلیس، ذوب - یخبندان، مقاومت، دوام.

## ۱. مقدمه

اندازه‌ی کافی نیز مرطوب باشد، تا اجازه‌ی پخش مناسب ملات چسبنده‌ی داخل بتن را در زمان اختلاط و انجام عملیات ویریه به آن بدهد. تا پایان سال ۱۹۹۷، ۱۵۰ پروژه با استفاده از مصالح ذکر شده در ایالات متحده تکمیل شده است. اولین کاربرد موفق فناوری بتن متراکم غلتکی در سال ۱۹۷۴ به نمایش گذاشته شد و تعمیر فرورفتگی‌های تونل ورودی سد تار بلا<sup>۱</sup> ثابت کرد که مصالح بتن غلتکی، بسیار مقاوم و با دوام‌اند.<sup>[۱-۳]</sup>

مصالح بتن غلتکی عموماً در مقابل گزینه‌ی خاک سیمان در پروژه‌ها استفاده می‌شود. خاک سیمان و بتن غلتکی هر دو مخلوط‌های کاملاً متراکم شده‌ی سیمان، سنگدانه و آب هستند، ولی تفاوت اصلی آن‌ها در نوع و اندازه‌ی سنگدانه‌هاست. خاک سیمان اصولاً ریزدانه‌ی طبیعی گردگوشه است، در حالی که بتن غلتکی شامل دانه‌های با بیش از ۱۹ میلی‌متر است. امروزه خاک سیمان به عنوان محافظ شیب سدهای خاکی استفاده می‌شود، در حالی که بتن غلتکی بیشتر در مقاطع بتن حجیم، مانند سدهای وزنی استفاده می‌شود.<sup>[۲]</sup>

بتن متراکم شده‌ی غلتکی طبق تعریف دستورالعمل ACI 116، بتن متراکم شده توسط غلتک است که در حالت سخت شده با استفاده از غلتک متراکم شده است. بتن غلتکی در حجم‌های بالا در مخلوط‌کن‌های پیوسته و یا تجهیزات پیمانان و ساخت کارگاهی مخلوط می‌شود و به وسیله‌ی کامیون یا نوار نقاله‌ی حمل و به وسیله‌ی بلدوزر، بر روی لایه‌های از قبل متراکم شده پخش می‌شود. در بتن متراکم شده‌ی غلتکی می‌توان از محدوده‌ی وسیع‌تری از مصالح نسبت به بتن متعارف استفاده کرد.<sup>[۱،۲]</sup> مخلوط بتن در حالت سخت نشده باید وزن یک غلتک را تا زمانی که متراکم شود، تحمل کند. تفاوت بتن غلتکی با بتن متعارف اساساً در پایداری و استحکام آن است. برای استحکام و یکپارچگی مؤثر، مخلوط بتن باید به اندازه‌ی کافی خشک باشد تا از فرورفتگی و نشست تجهیزات غلتکی ارتعاشی جلوگیری شود؛ اما باید به

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۳/۱، اصلاحیه ۱۴۰۰/۹/۲۱، پذیرش ۱۴۰۰/۱۰/۵

DOI:10.24200/J30/2021.58139.2958

گستره‌ی دوام بتن غلتکی به مراتب وسیع‌تر از موضوع مقاومت آن است. تعیین مقاومت بتن غلتکی به ویژه مقاومت فشاری آن امری است که طی سال‌های گذشته به انجام رسیده است و به نظر می‌رسد حاوی نکات پیچیده‌ی نباشد، هر چند جزئیات خاصی دارد و به هر حال در سن خاصی در کوتاه‌ترین زمان ممکن اندازه‌گیری می‌شود. اما در مورد دوام، پیچیدگی بیشتری به دلیل سازوکارهای متفاوت و آزمایش‌های گوناگون وجود دارد. با توجه به اینکه اصولاً عمده‌ی کاربرد بتن غلتکی در سدسازی و روسازی است، و از سوی دیگر، مصالح مذکور در معرض عوامل جوی، نظیر: سیکل‌های متناوب تر شدن - خشک شدن و ذوب - یخبندان قرار می‌گیرند، هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن‌ها، مسئله‌ی دوام آن‌ها را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. از آنجایی که از دیرباز به موضوع اضافه‌کردن دوده‌ی سیلیس به سیمان در جهت بهبود خواص مقاومتی آن توجه شده است، با توسعه‌ی این شاخه و امکان دسترسی به اکسیدسیلیس در ابعاد نانو، بحث اضافه‌کردن نانوسیلیس به بتن مطرح شده است. در این بین، پژوهشگران زیادی اکسیدهای مختلفی با مقیاس نانو را برای بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی و دوام بتن استفاده کرده‌اند. از آن جمله می‌توان به نانوسیلیس، نانواکسید آهن، نانولوله‌های کربنی، نانواکسید تیتانیوم و نانواکسید آلومینیوم اشاره کرد. استفاده از ذرات مذکور در بتن با توجه به میزان ریزودن، سطح مخصوص، واکنش پذیری و قابلیت فعال‌سازی بالای آن‌ها و از طرفی، ساختار متخلخل بتن و وجود حفره‌هایی در ابعاد نانو، می‌تواند به بهبود خواص بتن کمک کند.<sup>[۴]</sup>

با نگرشی جامع به بتن غلتکی می‌توان دریافت که بتن غلتکی، ماده‌ی متخلخل ساخته شده از ترکیب شن، ماسه، سیمان، و آب است. بتن غلتکی، یک ماده‌ی مرکب با ساختاری نانومتری محسوب می‌شود که به دلیل تفاوت اندازه‌ی مواد سازنده‌ی آن، ریزساختاری با خلل و فرج بسیار و با ابعاد مختلفی از چند میلی‌متر تا چند نانومتر دارد. بنابراین احساس عمومی پژوهشگران علم نکتولوژی بتن این است که احتمالاً نانوذرات به دلیل اندازه‌ی بسیار کوچک دانه‌ها نسبت به مواد و مصالح با ترکیب‌های شیمیایی مشابه، می‌توانند با پر کردن حفره‌های موجود در بتن غلتکی، نقش بسیار مؤثری در بهبود خواص بتن غلتکی داشته باشند. چنین فرضیه‌ی احتمالاً منجر به تولید مصالحی فوق‌العاده توانمند در آینده‌ی نه چندان دور خواهد شد.

با توجه به اینکه افزودن نانوسیلیس در ابعاد و سطح ویژه‌های مختلف کمتر بر روی بتن غلتکی بحث و بررسی نشده است که این قسمت جنبه‌ی نوآورانه‌ی پژوهش حاضر است، بخش حاضر به مرور مطالعات پیشین در تأثیر نانوسیلیس در بتن و ملات‌های سیمانی اشاره شده است: لی<sup>۲</sup> (۲۰۰۴)،<sup>[۴]</sup> مکانیزم‌های افزایش مقاومت فشاری توسط نانوسیلیس را دو عامل ذکر کرده است. اولاً، نانوسیلیس‌ها عملکرد پرکنندگی دارند، فضاهای داخلی ریزساختار سخت شده‌ی خمیر سیمان را پر می‌کنند، و بدین ترتیب منجر به افزایش مقاومت فشاری، کاهش نفوذپذیری، و بالطبع افزایش دوام مخلوط می‌شوند. ثانیاً، خصوصیات پوزولانی دارند که با واکنش نانوسیلیس و هیدروکسیدکلسیم، ژل جدید سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) تشکیل می‌شود، و در نتیجه مقاومت مخلوط بهبود می‌یابد.

لی و همکاران (۲۰۰۴)،<sup>[۵]</sup> نیز مشاهده کردند که جایگزینی ۶٪ سیمان با وزن جامد نانوسیلیس (تهیه شده به شکل سل سیلیس یا سیلیس محلول با قطر در ۲۰ نانومتر) به صورت افزوده به سیمان، حجم کلی تخلخل را از روش نفوذ جیوه در نسبت آب به سیمان برابر، کاهش داده است. همچنین ایشان گزارش کرده‌اند که با جایگزینی نانوسیلیس، حجم کلی منافذ به میزان ۲/۱۸ کاهش و حجم منافذ کوچک‌تر از ۱۰ نانومتر به میزان ۱/۲۲ افزایش یافته است.

بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی مطالعه‌ی ژئی<sup>۳</sup> (۲۰۰۴) و بهمنی و همکاران (۲۰۱۴)،<sup>[۷،۶]</sup> نشانگر آن است که در سن ۷ روز، ملات‌های حاوی نانوسیلیس نسبت

به ملات‌های بدون افزودنی و حاوی میکروسیلیس، دارای ساختار فشرده‌تر محصولات هیدراسیون هستند که سبب ساختن مخلوطی یکتواخت‌تر می‌شود. ساریوسیری و موهونتان<sup>۴</sup> (۲۰۰۹)،<sup>[۸]</sup> نیز بر این نکته تأکید داشتند که افزودن مقادیر اندک سیلیس پودری علاوه بر وزن سیمان به خمیر سیمانی حاوی دوده‌ی سیلیس منجر به ریزساختار متراکم نسبت به خمیر کنترل و خمیر حاوی دوده‌ی سیمان شده است. براساس عکس‌های به‌دست آمده، ساختار همگن و ناپوستگی‌ها کمتر شده است.

آجرلو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۲)،<sup>[۹]</sup> تأثیر جایگزینی ۳، ۵، و ۱۰ درصد وزنی سیمان با نانوسیلیس دارای قطر ۱۵nm را در خصوصیات مکانیکی خمیرهای سیمانی بررسی کردند و دریافتند که با افزایش مقدار نانوسیلیس، میزان تأثیر آن در افزایش مقاومت بیشتر شده است، به صورتی که در ۱۰٪ جایگزینی سیمان با نانوسیلیس مقاومت فشاری به میزان ۲۶٪ در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه‌ی کنترل افزایش یافته است. فخاریان و همکاران (۲۰۱۲)،<sup>[۱۰]</sup> نیز افزایش مقاومت خمیرهای سیمانی در حضور نانوسیلیس را در سن ۲۸ روز مشاهده کرده‌اند.

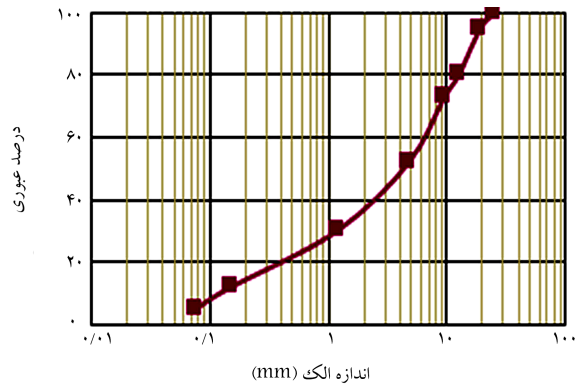
همچنین صدیقی و همکاران (۲۰۱۳)،<sup>[۱۱]</sup> مطالعه‌ی بر روی ملات‌های سیمانی حاوی نانوسیلیس پودری با قطر ۴۰nm و سطح مخصوص ۶۰ مترمربع بر گرم، در شرایط عمل‌آوری در آب انجام دادند و دریافتند که مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های حاوی نانوسیلیس در تمام درصدهای جایگزینی این ماده با سیمان، بیشتر از مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه‌ی ملات شاهد در نسبت آب به مواد سیمانی برابر است که نشانگر نقش نانوسیلیس در افزایش مقاومت است.

در مطالعه‌ی ظاهری و تانوسکا<sup>۶</sup> (۲۰۱۲)،<sup>[۱۱]</sup> در حضور نانوسیلیس، سه نوع ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) شکل گرفته است: گروه اول، مستقیماً از هیدراسیون فازهای سیمان پدید آمده بودند؛ گروه دوم، از واکنش سیلیس بی‌شکل و هیدروکسیدکلسیم ایجاد شده بودند؛ و گروه سوم، از واکنش سیلیس بی‌شکل و ژل‌های C-S-H تشکیل شده در مراحل قبلی ایجاد شده بودند. البته سیلیس بیشتر تمایل دارد با هیدروکسید واکنش دهد تا با ژل C-S-H، بنابراین تا زمانی که هیدروکسیدکلسیم موجود باشد، تمایل به واکنش سیلیس با ژل C-S-H کم است و تشکیل ژل C-S-H با درجه‌ی پلیمریزاسیون بالا (ژل نوع سوم) امکان‌پذیر نیست.

همچنین نتیجه‌ی مطالعه‌ی ساسانیان و نیوسن<sup>۷</sup> (۲۰۱۴)،<sup>[۱۲]</sup> حاکی از آن بوده است که افزودن نانوسیلیس‌ها با سطح و ویژه‌ی بالاتر، سبب بهبود قابل توجه پارامترهای مقاومت برشی مخلوط می‌شود؛ در حالی که افزایش در مقدار نانوسیلیس‌ها، تأثیر مستقیمی در پارامترهای مقاومتی ندارد که دلیل آن را می‌توان به ایجاد خوشه‌های اضافی سیلیکات کلسیم هیدراته در حضور مواد با سطح ویژه‌ی بالاتر بیان کرد.

اشوینی و راو<sup>۸</sup> (۲۰۲۱)،<sup>[۱۳]</sup> از نانوسیلیس و پودر آلومینیوم با درصدهای مختلف در ترکیب بتن استفاده کردند و با انجام سه نوع دانه‌بندی مختلف به ۱۵٪ پودر آلومینیوم و ۳٪ نانوسیلیس به بتن، آزمایش‌های مقاومت فشاری، تراکم، اولتراسونیک، مدول دینامیکی و ضریب دوام را بر روی نمونه‌ها انجام دادند و دریافتند که مصالح حاوی نانوسیلیس از مصالح حاوی پودر آلومینیوم، نتایج بهتری چه از لحاظ دوامی و چه از لحاظ مقاومتی از خود نشان داده‌اند.

رن و لای<sup>۹</sup> (۲۰۲۱)،<sup>[۱۵]</sup> از نانوسیلیس و نانوتیتانیوم در مخلوط با بتن استفاده و خواص آن‌ها را بر روی دوام و مقاومت در ذوب و یخبندان و حملات یون سولفات ارزیابی کردند. مقاومت فشاری، تغییرات وزن، و ریزساختار بحث و بررسی شد و نتایج نشان داد که نانوسیلیس‌ها بهبود مقاومت را تا ۶۷٪ افزایش می‌دهند، اما بر دوام مخلوط تا ۱۲٪ روز احاطه دارند و پس از آن نقش مؤثری ایفا نمی‌کنند. همچنین نتایج ایشان نشان داد که حمله‌ی توأمان سولفات و ذوب و یخبندان در روزهای اولیه، تأثیر منفی در نمونه‌های حاوی نانوذرات نخواهد داشت.



شکل ۱. منحنی دانه بندی استفاده شده در آزمایش.



شکل ۲. نانوسیلیس های استفاده شده در آزمایش (به ترتیب از راست به چپ: نانوسیلیس ۱۰، نانوسیلیس ۱۵ و نانوسیلیس ۳۰).

در پژوهش حاضر، از سه نوع نانوسیلیس در سه درصد مختلف (۱، ۳ و ۵ درصد نسبت به وزن سیمان) با سه مقدار جایگزینی با سیمان متفاوت استفاده شده است. خصوصیات و شکل ظاهری نانوسیلیس های مذکور در جدول ۳ و شکل ۲ به ترتیب ارائه شده است. یادآور می شود که برای تعیین سطح مخصوص نانوسیلیس ها از آزمایش BET (Brunauer, Emmett and Teller) استفاده شده است که مطابق آن، قطر و سطح مخصوص نانوذرات به دست آمده اند.

در بخش حاضر، با توجه به مصالح معرفی شده از نمودار دانه بندی مذکور حدود ۱۴۵۰ کیلوگرم در مترمکعب با عیار سیمان مینای  $250 \text{ Kg/m}^3$  با (نانوذرات جایگزین سیمان با مقادیر ۲/۵، ۷/۵ و ۱۲/۵ کیلوگرم بر مترمکعب) به همراه نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵ در طرح اختلاط استفاده شده است (جدول ۴).

## ۲.۲. برنامه ی آزمایشگاهی

### ۲.۲.۱. آزمایش مقاومت فشاری

جهت تعیین مقاومت فشاری، نمونه های استوانه یی  $15 \times 30$  سانتی متر ساخته شدند و در دستگاه جک فشاری  $300$  تن قرار گرفتند. سپس پس از عمل آوری شدن در مدت زمان های معین و پس از سیکل های متعدد ذوب - یخبندان، آزمایش شدند. آزمایش مقاومت فشاری به صورت کرنش کنترل شده بود و بارگذاری تا انتهای باربری نمونه ها ادامه داشت. لازم به ذکر است آزمایش های مقاومت فشاری بر روی دو نمونه انجام و میانگین آن ها به عنوان نتیجه ی آزمایش ارائه شده است.

### ۲.۲.۲. آزمایش تغییرات قطر نمونه

یکی از آزمایش های دوامی نمونه های بتن غلتکی، آزمایش تغییر ابعاد (قطر) نمونه است که ابعاد نمونه ها در چند مرحله (ابتدای ساخت، پس از ۵، ۱۰ و ۳۰)

چنگیزی و همکاران (۲۰۲۱)<sup>[۱۶]</sup> نیز برای بررسی خواص نانوسیلیس بر روی تثبیت خاک رس در سیکل های متناوب ذوب و یخبندان، آزمایش های متفاوتی بر روی رس معمولی و رس تثبیت شده با نانوسیلیس انجام دادند و دریافتند که مقاومت های فشاری و برشی نمونه ی تثبیت شده افزایش یافته است. پس از ۹ سیکل ذوب و یخبندان، مقاومت های فشاری و برشی نمونه به ترتیب ۱۶ و ۲۱ درصد نسبت به نمونه ی معمولی افزایش یافته است. همچنین ایشان نتیجه گرفتند که تأثیر مهم نانوذرات در ریزساختار مصالح است و راه نفوذ آسیب های خارجی بر بتن را می بندد.

ژانگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۱)<sup>[۱۷]</sup> اثر نانوسیلیس و خاکستر بادی در خواص مکانیکی، مقاومت ضربه یی، و نفوذ یون کلر در سیکل های ذوب - یخبندان مخلوط بتنی را بررسی کردند و با اضافه کردن نانوذرات در ۵ اندازه ی متفاوت به بتن دریافتند که دوام در برابر نفوذ یون کلر به شدت در سیکل های متناوب ذوب و یخبندان افزایش یافته است. همچنین پارامترهای مقاومتی، نظیر مقاومت های فشاری و ضربه یی بین ۱۵ الی ۳۰ درصد افزایش و در مقادیر بهینه ی نانوسیلیس، میزان درز و ترک ها در بتن کاهش یافته است.

همان طور که از روند مطالعات پیشین مشاهده می شود<sup>[۱۸-۲۰]</sup> غالب آن ها در مورد پارامترهای مقاومتی و دوامی بتن متعارف هستند که با توجه به طرح اختلاط کاملاً متفاوت آن با بتن غلتکی (عیار سیمان پایین تر و نسبت آب کمتر، که خود از عوامل مهم کاهش دوام و مقاومت فشاری بتن است)، پی بردن به عملکرد مقاومتی و دوامی بتن غلتکی در شرایط مختلف نیاز به قرار گرفتن در شرایط ذکر شده و طی شدن زمان قابل توجهی دارد و معمولاً امکان انجام پژوهش در شرایط واقعی وجود ندارد و یا از حوصله ی دست اندرکاران خارج است. برای اینکه مشخص شود آیا بتن غلتکی در شرایط اشاره شده به طور مناسب و مطلوب عمل می کند، نیاز به آزمایش هایی است که در آن ها عوامل تأثیرگذار در مقاومت و دوام مخلوط بتن غلتکی سنجیده شود. در پژوهش حاضر، با افزودن نانوذرات سیلیسی به ترکیب بتن غلتکی با سه قطر مختلف (۱۰، ۱۵ و ۳۰ نانومتر) و سه میزان مختلف (۱، ۳ و ۵ درصد وزنی سیمان)، ساخته شد و پس از قرارگیری در سه سیکل ۱۰۰، ۵۰ و ۳۰۰ تغییرات مقاومت فشاری، ابعاد نمونه و وزن نمونه ها بررسی شده است.

## ۲. مصالح و روش انجام آزمایش

### ۲.۱. مصالح

در پژوهش حاضر از دانه بندی مصالح شن و ماسه (جدول ۱) مطابق شکل ۱ استفاده شده است. در تمام آزمایش ها از سیمان پرتلند نوع II مطابق استاندارد C150 ASTM با وزن مخصوص ۳/۱ گرم بر سانتی مترمکعب استفاده شده است. این تذکر لازم است سیمان مذکور، مقاومت خوبی در مقابل حمله ی سولفاتی دارد و گرمای هیدراسیون مناسبی تولید می کند و در جدول ۲، میزان ترکیب های شیمیایی آن ارائه شده است.

جدول ۱. طبقه بندی سنگ دانه های استفاده شده در آزمایش.

طبقه بندی		ضریب	
متحد	آشتو	یکنواختی	انحنا
SW	A-۳	۷۵	۱/۳

جدول ۲. ویژگی های شیمیایی سیمان آزمایش شده.

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	ترکیب شیمیایی
۰/۸	۵/۲۱	۳/۳۳	۰/۶۳	۰/۷۸	۲/۲	۳/۳۴	۰/۱۲	مقدار (%)

جدول ۳. ویژگی های محصولات سیلیسی آزمایش شده.

نوع	قطر متوسط ذرات (نانومتر)	درصد خلوص سیلیس بی شکل	سطح ویژه متوسط ذرات (مترمربع بر گرم)	PH
نانوسیلیس ۱۰	۱۰	< ۹۹/۹٪	۱۰۰	۹
نانوسیلیس ۱۵	۱۵	< ۹۹/۹٪	۲۰۰	۹
نانوسیلیس ۳۰	۳۰	< ۹۹/۹٪	۳۰۰	۹

جدول ۴. طرح اختلاط مصالح.

طرح اختلاط حاوی نانوسیلیس	مصالح دانه بی (کیلوگرم در مترمکعب)	سیمان پرتلند (کیلوگرم در مترمکعب)	نانوسیلیس (کیلوگرم در مترمکعب)
۱٪ نانوسیلیس	۱۴۵۰	۲۴۷/۵	۲/۵
۳٪ نانوسیلیس	۱۴۵۰	۲۴۲/۵	۷/۵
۵٪ نانوسیلیس	۱۴۵۰	۲۳۷/۵	۱۲/۵

جدول ۵. نمایه ی کدگذاری شده ی اختلاط مصالح.

کد نمونه	مقدار نانو سیلیس (%)	نوع نانوسیلیس (بر اساس قطر به نانومتر)	جهت آزمایش
RCC۳N۱۰	۳	۱۰	تاثیر نوع نانوسیلیس
RCC۳N۱۵	۳	۱۵	تاثیر نوع نانوسیلیس
RCC۳N۳۰	۳	۳۰	تاثیر نوع نانوسیلیس
RCC۱N۱۰	۱	۱۰	تاثیر نوع نانوسیلیس
RCC۳N۱۰	۳	۱۰	تاثیر نوع نانوسیلیس
RCC۵N۱۰	۵	۱۰	تاثیر نوع نانوسیلیس

برای آنکه مطالعه ی حاضر وابسته به یک پارامتر جهت مقایسه باشد، مقاومت فشاری، تغییر ابعاد و وزن نمونه ها پس از قرار گرفتن در سیکل های متمادی ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ با نمونه ی کنترلی مقایسه شد. روند کدگذاری طرح اختلاط نیز بدین گونه بود که هر نمونه در ابتدا RCC، سپس درصد نانوسیلیس (۱ و ۳ و ۵ درصد) و در انتها نوع نانوسیلیس که به قطر آن وابسته بود (۱۰، ۱۵ و ۳۰ nm) نام گذاری می شد. برای مثال، نمونه ی RCC۳N۱۰، نمونه ی حاوی ۳٪ نانوسیلیس با قطر ۱۰ نانومتر است. در جدول ۵، نمایه ی کدگذاری ها ارائه شده است.

سیکل متناوب ذوب - یخبندان) توسط کولیس دیجیتالی اندازه گیری و تغییرات نسبی قطر مطابق رابطه ی ۱ محاسبه شده است:

$$D^* = \frac{D - D^0}{D^0} \quad (1)$$

که در آن،  $D^0$  قطر نمونه پیش از قرارگیری در فریزر،  $D$  قطر نمونه پس از قرارگیری در فریزر (پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ سیکل متناوب ذوب - یخبندان) و  $D^*$  تغییر قطر نسبی نمونه هاست که بر روی دو نمونه انجام و میانگین آن ها به عنوان نتیجه ی آزمایش ارائه شده است.

#### ۳.۲.۲. آزمایش تغییرات وزن نمونه

یکی از آزمایش های دوام نمونه های بتن غلتکی، آزمایش تغییر وزن نمونه (افت وزنی) است که وزن نمونه ها در چند مرحله (ابتدای ساخت، پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ سیکل متناوب ذوب - یخبندان) توسط ترازوی دیجیتالی اندازه گیری شده است. یادآور می شود که وزن نمونه ها پس از بیرون آوردن آن ها از فریزر و خشک کردن آنها به مدت یک شبانه روز در دستگاه گرم کن صورت گرفته و تغییرات نسبی وزن مطابق رابطه ی ۲ محاسبه شده است:

$$W^* = \frac{W - W^0}{W^0} \quad (2)$$

که در آن،  $W^0$  وزن نمونه پیش از قرارگیری در فریزر،  $W$  وزن نمونه پس از قرارگیری در فریزر (پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ سیکل متناوب ذوب - یخبندان) و  $W^*$  تغییر وزن نمونه هاست که بر روی دو نمونه انجام و میانگین آن ها به عنوان نتیجه ی آزمایش ارائه شده است. کلیه ی نمونه های آزمایشگاهی، شامل نمونه های کنترلی و نمونه های حاوی نانوسیلیس بودند که در یک سیکل تکرارشونده (به مدت ۹ ساعت یخبندان و ۳ ساعت ذوب) قرار گرفتند، تا تعداد سیکل ها تکمیل شود. مطابق با استاندارد ASTM C666A، نمونه های مذکور پس از ۱۴ روز عمل آوری، از حوضچه خارج و پس از خشک کردن سطح توزین شدند.

### ۳. بحث و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

#### ۳.۱. آزمایش مقاومت فشاری

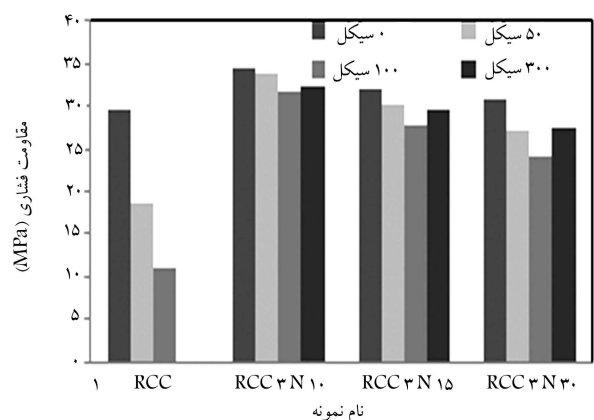
معمولاً مقاومت فشاری یکی از ویژگی‌های مورد نیاز محصولات بتنی است که تعیین آن نیز نسبتاً ساده است. بسیاری از ویژگی‌های دیگر مستقیماً با مقاومت فشاری در یک سن خاص مرتبط هستند (مانند دوام). مقاومت بتن غلتکی به کیفیت سنگدانه‌ها و دانه‌بندی آن‌ها، عیار سیمان، آب و درجه تراکم بستگی دارد. در پژوهش حاضر در دو زیربخش، عملکرد هم‌زمان نانوذرات سیلیسی و تعداد سیکل‌های ذوب - یخبندان بر روی مقاومت فشاری مصالح بتن غلتکی، تأثیر نوع و مقدار نانوسیلیس‌ها بحث و بررسی شده‌اند.

#### ۳.۱.۱. تأثیر نوع نانوسیلیس

با وجود مطالعات متعددی که پیرامون تأثیر نانوسیلیس‌ها در خواص مواد پایه سیمانی انجام شده است، هنوز میزان تأثیرگذاری آن‌ها در خواص مواد پایه سیمانی مشخص نیست و نتایج متفاوت و گاه متناقض گزارش شده است. برای مثال، خالو و همکاران (۲۰۱۶) [۳۳] مشاهده کردند که در نسبت آب به مواد سیمانی برابر، جایگزینی ۳٪ سیمان با نانوسیلیس، افزایش ۱۰۵ درصدی مقاومت فشاری ملات را در سن ۲۸ روز ایجاد کرده است. در حالی که جی [۳۴] گزارش کرده است که جایگزینی ۳٪ مواد سیمانی با نانوسیلیس پودری دارای اندازه‌ی میانگین ذرات ۱۵ نانومتر سبب کاهش مقاومت ۲۸ روزهی بتن به اندازه‌ی ۸٪ در نسبت آب به مواد سیمانی برابر شده است که به نظر می‌رسد تفاوت در نوع و اندازه‌ی نانوسیلیس‌های استفاده شده در مطالعات مواد پایه سیمانی، منشأ تفاوت در رفتار مواد مذکور باشد.

با توجه به توضیحات مقدماتی اخیر، برای یافتن تأثیر نوع نانوذرات در پارامترهای مقاومتی بتن غلتکی، مخلوط کنترلی (بدون افزودنی) به همراه مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس ۱۰، ۱۵، ۳۰ و ۵۰ (مطابق مشخصات جدول ۳) در حالت‌های ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ سیکل ذوب - یخبندان تحت آزمایش‌های فشاری محصور نشده قرار گرفتند، که نمودار کسب مقاومت هر سه نمونه به همراه نمونه کنترلی در شکل ۳ مشاهده می‌شود. یادآور می‌شود به دلیل اینکه درصد میانگین افزودنی ۳٪ بوده است، برای حالت متوسط و اینکه تأثیر نانوسیلیس مشخص شود (حد بالا و حد پایین روند آثار مطلوب را نشان نمی‌دهند)، از مخلوط‌های با ۳٪ جایگزینی در نمودار مذکور استفاده شده است.

با دقت در شکل اخیر مشاهده می‌شود که کاهش مقاومت فشاری در اثر



شکل ۳. نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های کنترلی و سیلیسی برای انواع نانوسیلیس.

سیکل‌های متناوب ذوب - یخبندان نمونه‌های حاوی نانوسیلیس بسیار کمتر از نمونه‌های فاقد نانوسیلیس بوده است که بیانگر عملکرد مثبت نانوسیلیس در شرایط ذوب - یخبندان است. بهبود عملکرد بتن غلتکی توسط نانوسیلیس در برابر سیکل‌های متناوب ذوب - یخبندان از نقطه نظر مقاومت فشاری به علت بهبود ریزساختار بتن ناشی از خاصیت پوزولانی (تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته‌ی بیشتر) و ریز پرتکندگی حفره‌ها و درز و ترک‌های ناومتری توسط نانوسیلیس بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مصالح کنترلی در ۵۰ سیکل ۳۷ و در ۱۰۰ سیکل ۶۳ و در ۳۰۰ سیکل ۱۰۰٪ مقاومت خود را از دست داده‌اند (نمونه متلاشی شده است)، در حالی که با افزودن محصولات سیلیسی به بتن غلتکی، مقاومت مصالح خصوصاً در سیکل‌های بالا افت کمتری کرده است، به طوری که در ۱۰۰ سیکل، افزودن نانوسیلیس ۱۰، نانوسیلیس ۱۵ و نانوسیلیس ۳۰ به ترتیب افت مقاومتی حدود ۸، ۱۴ و ۲۲ درصد در مصالح حاوی آن‌ها نسبت به حالت بدون قرار گرفتن در معرض ذوب - یخبندان (صفر سیکل) ایجاد کرده است که با رسیدن به زمان ۳۰۰ سیکل، افت مقاومت‌ها به ترتیب به ۶، ۸ و ۵٪ درصد رسیده است. بنابراین در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس، مقاومت فشاری پس از ۱۰۰ سیکل، افت بیشتری نسبت به ۳۰۰ سیکل را تجربه کرده است که دلیل آن را می‌توان به توسعه‌ی واکنش‌های بلندمدت پوزولانیک نانوسیلیس نسبت داد. در واقع، با مشاهده‌ی نمودارهای ذکر شده نباید به اشتباه تصور شود که پدیده‌ی یخبندان گاه‌اثر مثبت در مقاومت فشاری بتن غلتکی دارد، بلکه علت آن تولید و توسعه‌ی مقاومت درازمدت بتن غلتکی در حضور پوزولان‌هاست.

ذکر این نکته ضروری است که واکنش پوزولان‌ها در بتن غلتکی در طولانی مدت شکل می‌گیرد، به گونه‌ی که نرخ رشد مقاومت در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس بیش از نرخ رشد نمونه‌های بتنی فاقد نانوسیلیس در مدت مشابه است. این واکنش‌ها به دلیل سطح ویژه‌ی بالای نانوسیلیس است که روند واکنش آن در روزهای اولیه کم و در درازمدت بالاست؛ و با توجه به گرم‌مازایی، واکنش عواملی مانند یخبندان، روند آن را کند می‌کند، اما توان توقف را ندارد.

به عنوان نتیجه‌ی راهبردی، دو فرایند در طی سیکل‌های متناوب ذوب - یخبندان، مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی نانوسیلیس را تحت تأثیر قرار می‌دهند: فرایند اول، سیکل‌های متناوب ذوب - یخبندان و آثار آن در ساختار بتن غلتکی است که منجر به کاهش مقاومت فشاری می‌شود و فرایند دوم، واکنش پوزولانی نانوسیلیس - واکنشی دیر سخت‌شونده است که افزایش مقاومت فشاری را در پی دارد. مطلب قابل تأمل دیگر این است که مصالح حاوی نانوسیلیس ۱۰، کاهش مقاومت کمتری نسبت به دو مصالح حاوی نانوسیلیس ۱۵ و ۳۰ تجربه می‌کنند که دلیل آن را می‌توان در دو امر جست‌وجو کرد: نخست آنکه هر چقدر نانوسیلیس‌ها قطر کمتری داشته باشند، بالطبع سطح ویژه‌ی بزرگ‌تری دارند که سطح مذکور، به دلیل دوقطبی بودن مولکول‌های آب، واکنش‌های پوزولانیک را با سرعت بیشتری انجام می‌دهد و ژل سیلیکات کلسیم هیدراته‌ی بیشتری تشکیل می‌شود. ذکر این مطلب ضروری است که سطح ویژه‌های بیشتر، واکنش‌هایی سریع‌تر با گرم‌مازایی بیشتر تولید می‌کنند. نکته‌ی دوم، اینکه ذرات آن‌ها ریزتر هستند و می‌توانند حفره‌های بیشتری را پر و پل ارتباطی درز و ترک‌های موجود در مخلوط را پر کنند.

#### ۳.۱.۲. تأثیر مقدار نانوسیلیس

برای یافتن تأثیر مقدار نانوذرات در پارامترهای مقاومتی بتن غلتکی، مخلوط کنترلی (بدون افزودنی) به همراه مخلوط‌های حاوی ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی نانوسیلیس در حالت‌های ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ سیکل ذوب - یخبندان تحت آزمایش‌های فشاری

محصورنشده قرار گرفتند که نمودار کسب مقاومت هر سه نمونه به همراه نمونه کنترلی در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۴، با افزایش مقدار نانوسیلیس از ۱ به ۳ درصد، افت مقاومت فشاری کاهش و با افزایش مقدار از ۳ به ۵ درصد، افت مقاومت فشاری افزایش یافته است. برای مثال، میزان افت مقاومت فشاری در نمونه کنترلی پس از ۱۰۰ سیکل ذوب - یخبندان ۶۳ درصد بوده است، در حالی که افت مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی ۱، ۳ و ۵ درصد به ترتیب ۸، ۱۳ و ۹ درصد بوده است.

همچنین در پژوهش حاضر، مقدار بهینه‌ی نانوسیلیس حدود ۳٪ است که می‌توان دلیل اینکه چرا با افزایش نانوسیلیس، مقاومت افزایش نیافته است، را به پدیده‌ی انباشتگی (آگلومراسیون) ذرات نانوسیلیس‌ها نسبت داد. مطابق پدیده‌ی انباشتگی، با توجه به اینکه ذرات نانوسیلیس بسیار ریز هستند، نسبت به همدیگر کشش سطحی دارند و در مخلوط هنگام ترکیب خوب پخش نمی‌شوند و به‌صورت کلوخه‌یی در ماتریس بتن غلتکی می‌مانند که نه فقط در ترکیب‌های تولید ژل شرکت نمی‌کنند، بلکه یک ناحیه‌ی ضعیف در برابر فشار درست می‌کنند و توانایی مقاومت ندارند. بنابراین نمی‌توان انتظار داشت که لزوماً با افزایش مقدار نانوسیلیس، مقاومت فشاری مصالح ذکر شده نیز افزایش یابد.

### ۲.۳. آزمایش کاهش قطر

طبق تعریف دستورالعمل ASTM C1201، دوام بتن حاوی سیمان پرتلند به توانایی آن برای مقابله با عوامل هوازدگی، تهاجم شیمیایی، سایش بتن و یا هر فرآیندی که به آسیب دیدگی می‌انجامد، گفته می‌شود. بتن پایداری، بتنی است که تا حدود زیادی شکل اولیه و کیفیت و قابلیت خدمت‌رسانی خود را در شرایط محیطی حاکم حفظ کند.<sup>[۱]</sup> علاوه بر هزینه، موضوع حفظ محیط‌زیست و آلودگی هوا و خاک و آب، لزوم ساخت بتن غلتکی با دوام‌تر را توجیه می‌کند.

با توجه به اینکه یخ زدن و ذوب شدن‌های مکرر، باعث ایجاد تغییراتی در سطح و ظاهر بتن غلتکی می‌شوند، لذا عملکرد بتن را کاهش می‌دهند و حتی با کم شدن قطر می‌توانند سبب کاهش مقاومت بتن شوند. با توجه به اهمیت دوام در برابر ذوب و یخبندان، برای بررسی اثر نانوسیلیس در کاهش قطر نمونه‌های ساخته شده، به قرار گرفتن نمونه‌ها قبل و بعد از شروع سیکل‌های ذوب - یخبندان در دو حالت نوع و مقدار محصول سیلیسی پرداخته شده است.

### ۱.۲.۳. تأثیر نوع نانوسیلیس

دوام بتن متراکم شده‌ی غلتکی به‌طور خاص در صورتی اهمیت دارد که مصالح به‌کار رفته در معرض هوازدگی و نیروهای هیدرولیکی باشند. از آنجایی که حباب‌زایی داخل بتن غلتکی، به دلیل روانی پایین موردنیاز معمولاً با افزودنی‌های بتن ممکن نیست و حباب‌زاهای عملاً روان‌کننده‌های مؤثری هستند، دوام در برابر دوره‌ی انجماد و ذوب شدن باید از نفوذناپذیری حاصل شود. معمولاً مقدار سیمان برای تولید یک بتن غلتکی با دوام و مناسب از مقدار موردنیاز برای مقاومت فشاری موردنیاز بیشتر است. یکی از بهترین فعالیت‌ها برای رسیدن به دوام موردنظر می‌تواند افزودن پوزولان‌هایی مانند نانوسیلیس باشد. با ذکر مقدمه‌ی اخیر و با دقت در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که با جایگزینی درصدی از سیمان با نانوسیلیس، میزان کاهش قطر نمونه‌ها به صورت قابل‌توجهی کاهش یافته است که این موضوع بیانگر اثر مثبت نانوسیلیس در دوام بتن غلتکی در برابر ذوب - یخبندان است.

علت بهبود دوام بتن غلتکی از نقطه‌نظر تغییرات قطر را می‌توان به بهبود ریزساختار، ایجاد ساختاری متراکم‌تر و افزایش مقاومت آن در برابر تنش‌های ناشی از انبساط آب یخ‌زده نسبت داد. بهبود ریزساختار بتن غلتکی به معنی کاهش میزان کل حفره‌ها و اندازه‌ی متوسط آن‌هاست؛ به‌طوری‌که بتن غلتکی حاوی نانوسیلیس، آب کمتری نسبت به نمونه‌ی کنترلی جذب می‌کند و نتیجتاً نفوذپذیری کمتری دارد (به دلیل عیار بالای مواد سیمانی) و در برخی از حفره‌ها به دلیل کوچکی حفره و بالا بودن میزان کشش سطحی، نقطه‌ی انجماد آب عملاً بسیار کمتر از دمای محیط در سیکل یخبندان است و آب قادر به یخ زدن نیست. علاوه بر آن، به دلیل استفاده از نانوسیلیس در بتن غلتکی، مقاومت بتن افزایش می‌یابد و توانایی بیشتری در تحمل نیروهای ناشی از انبساط آب در هنگام یخ زدن دارد. بدیهی است هر چه



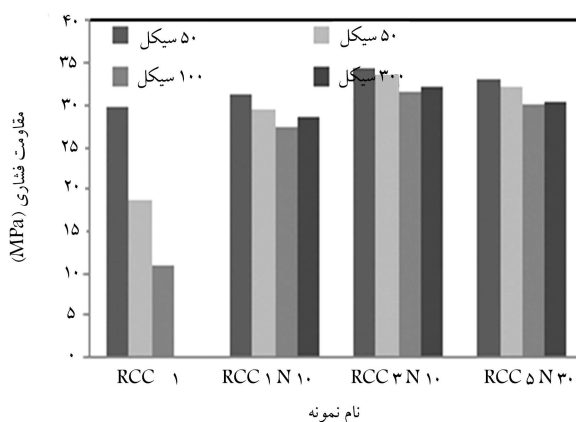
الف) نمونه کنترلی در ابتدای آزمایش؛ ب) نمونه کنترلی پس از اعمال ۳۰۰ سیکل ذوب - یخبندان.

شکل ۵. تغییرات قطر نمونه‌ی کنترلی پس از ذوب - یخبندان.

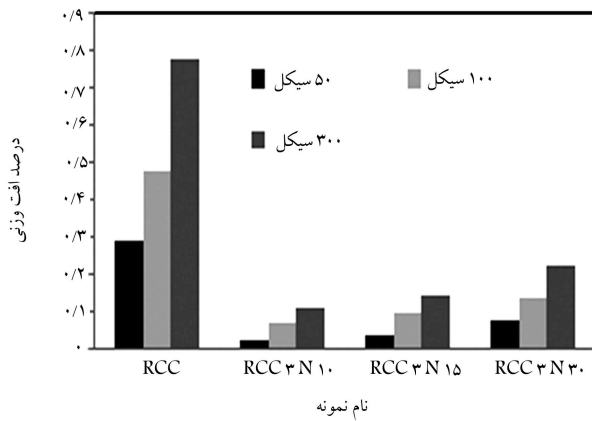


الف) نمونه حاوی نانو سیلیس در ابتدای آزمایش؛ ب) نمونه حاوی نانوسیلیس پس از اعمال ۳۰۰ سیکل ذوب - یخبندان.

شکل ۶. تغییرات قطر نمونه‌ی سیلیسی پس از ذوب - یخبندان.



شکل ۴. نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های کنترلی و سیلیسی برای مقادیر نانوسیلیس.



شکل ۹. نمودار تغییر وزن نمونه‌های کنترلی و سیلیسی برای انواع نانوسیلیس.

نمونه‌ها پرداخت. برای مثال، نمونه‌ی کنترلی پس از ۳۰۰ سیکل، ۳۸٪ کاهش قطر داشته است، در حالی که درصد کاهش قطر در نمونه‌های حاوی ۱، ۳ و ۵ درصد به ترتیب ۱۴، ۹ و ۱۱ درصد بوده است.

### ۳.۳. آزمایش افت وزنی

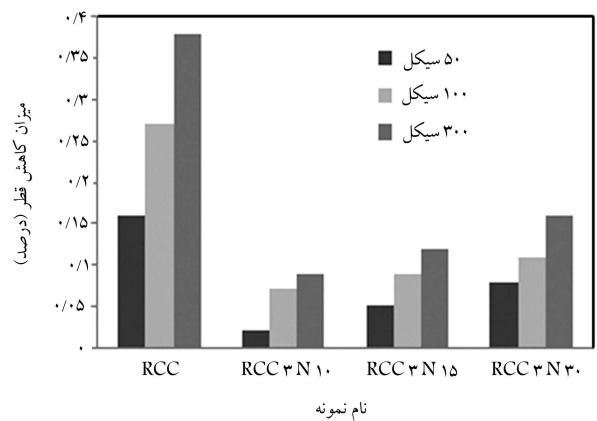
همان‌طور که مشاهده شد، یکی از خصوصیات مهم بتن غلتکی، پایداری و دوام آن است؛ به طوری که اگر مشخصه‌ی ذکر شده‌ی ماده کمتر از حد مطلوب باشد، در مدت زمان کوتاهی در اثر عوامل مختلف فیزیکی، شیمیایی، و مکانیکی داخلی، خارجی و یا محیطی، بتن دچار ترک خوردگی و در نهایت تخریب می‌شود.

معمولاً کنترل کیفیت در مخلوط‌های بتن غلتکی، اهمیت فراوانی دارد. آهنگ سریع ساخت بتن غلتکی نیاز به اعمال روش‌های کنترل ساخت روی تمام پارامترهایی دارد که در کیفیت دوره‌ی اختلاط آن مؤثرند. یکی از پارامترهای تأثیرگذار کنترل کیفی در طول مدت سرویس دهی، بحث آزمایش افت وزنی است. آزمایش افت وزنی برای مخلوط‌های کنترلی و حاوی نانوسیلیس در دو زیربخش: تأثیر نوع و اندازه‌ی نانوسیلیس ارائه شده است.

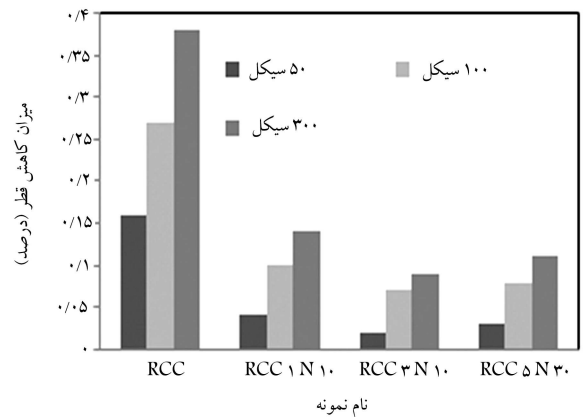
### ۱.۳.۳. تأثیر نوع نانوسیلیس

در بخش حاضر، نتایج مربوط به درصد تغییرات وزن نمونه‌های حاوی نانوسیلیس در ۱۰، ۱۵ و ۳۰ در مقابل نمونه‌ی کنترلی در شرایط ذوب - یخبندان، پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ سیکل متناوب یخ و ذوب نسبت به قبل از قرار گرفتن در محیط مذکور پرداخته شده است. برای بررسی اثر نسبت نانوسیلیس به مواد سیمانی در تغییر وزن نمونه‌های بتن غلتکی قرار گرفته در شرایط یخبندان، نمودار درصد کاهش وزن نمونه‌ها نسبت به قبل از قرارگیری آن‌ها در محیط یخبندان ترسیم شده است (شکل ۹).

با دقت در شکل ۹ مشاهده می‌شود که در کلیه نمونه‌ها، با جایگزینی درصدی از سیمان با نانوسیلیس، نرخ کاهش وزن نمونه‌ها به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. مطابق شکل مذکور، نمونه‌های کنترلی، حاوی نانوسیلیس ۱۰، ۱۵ و ۳۰، در شدیدترین شرایط که شامل ۳۰۰ دوره می‌شود، به ترتیب مقدار افت وزنی ۷۸، ۳۶/۱۱، ۳۲/۱۴ و ۵۴/۲۲ درصد از خود نشان می‌دهند. نمونه‌ی حاوی نانوسیلیس ۱۰ تحمل بهتری در برابر از دست دادن وزن خود در مقابل سیکل‌های ذوب - یخبندان دارد که می‌توان به همان دلایل موجود در ۱.۱.۳ نسبت داد.



شکل ۷. نمودار تغییر ابعاد نمونه‌های کنترلی و سیلیسی برای انواع نانوسیلیس.



شکل ۸. نمودار تغییر ابعاد نمونه‌های کنترلی و سیلیسی برای مقادیر نانوسیلیس.

نفوذپذیری مصالح بیشتر باشد، عوامل زیان‌آور، حملات شدیدتری به داخل مخلوط می‌کنند و از دوام آن می‌کاهند.

در نتایج شکل ۷ مشاهده می‌شود وقتی از نانوسیلیس‌های با قطر کم (نانوسیلیس ۱۰) در مخلوط استفاده می‌شود، نسبت به نمونه‌های دیگر، افت ابعاد کمتری مشاهده می‌شود. برای مثال، نمونه‌ی کنترلی پس از ۳۰۰ سیکل، ۳۸٪ کاهش قطر داشته است؛ در حالی که درصد کاهش قطر در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس ۱۰، ۱۵ و ۳۰ به ترتیب ۹، ۱۲ و ۱۶ درصد بوده است؛ که دلیل آن را می‌توان به همان مطالب بخش ۱.۱.۳ نسبت داد، با ذکر این نکته که مکانیزم مذکور سبب کاهش نفوذپذیری و بالطبع آن، افزایش مقاومت را در پی دارد.

### ۲.۲.۳. تأثیر مقدار نانوسیلیس

در شکل ۸، نمودار درصد کاهش قطر نمونه‌های بتن غلتکی که در طرح اختلاط آن‌ها مقدار ۱، ۳ و ۵ درصد نانوسیلیس به صورت وزنی جایگزین سیمان شده است، مشاهده می‌شود. برای مثال، نمونه‌ی کنترلی پس از ۱۰۰ سیکل ذوب - یخبندان، ۲۷٪ کاهش قطر داشته است، در حالی که کاهش قطر متناظر نمونه‌ی حاوی ۳٪ نانوسیلیس، حدود ۷٪ بوده است. همچنین با افزایش مقدار نانوسیلیس از ۳ به ۵ درصد، مقدار کاهش قطر نمونه بیشتر شده است، که دلیل آن را می‌توان به آلودگی شدن نانو ذرات نسبت داد که سبب ایجاد نواحی ضعیف، تضعیف ریزساختار بتن غلتکی، کاهش یکنواختی و مقاومت بتن غلتکی می‌شود. برای درک بهتر روند افزایش دوام بتن غلتکی توسط نانوسیلیس می‌توان به مقایسه‌ی میزان کاهش قطر



نانوسیلیس ۱۰، ۱۵ و ۳۰ در شدیدترین شرایط (زمان ۳۰۰ سیکل)، به ترتیب به ۸، ۶ و ۵ درصد رسیده است؛ در حالی که نمونه‌ی کنترلی کاملاً متلاشی شده و عملاً توان باربری نداشته است. همچنین افت مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی ۱، ۳ و ۵ درصد به ترتیب ۱۳، ۸ و ۹ درصد است. همچنین نتایج این بخش حاکی از آن است که پوزولان‌هایی نظیر نانوسیلیس، دیر سخت‌شونده هستند و با گذشت زمان، عملکرد بهتری از خود به نمایش می‌گذارند.

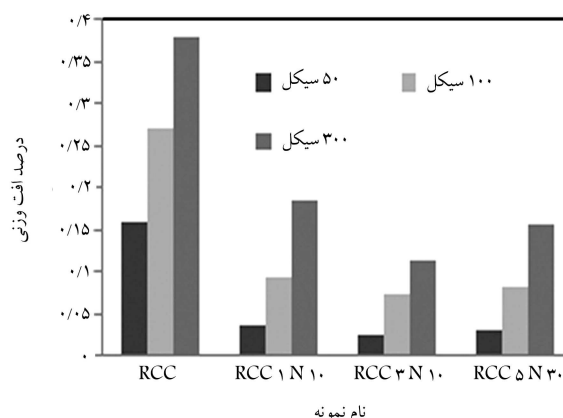
افزودن نانوسیلیس‌ها سبب بهبود قابل توجه پارامترهای مقاومتی بتن غلتکی شده است، که دلیل آن می‌تواند ناشی از بهبود ریزساختاری ناشی از خاصیت پوزولانی (تولید ژل سیلیکات‌کلسیم هیدراته‌ی بیشتر) و ریزپرکنندگی حفره‌ها و درز و ترک‌های نانومتری توسط نانوسیلیس باشد.

نتایج آزمایش کاهش ابعاد (قطر) نمونه‌ها حاکی از این است که دوام ابعادی نمونه‌های حاوی نانوسیلیس در شرایط ذوب - یخبندان به مراتب بهتر از دوام محصولات کنترلی بوده است. برای مثال، نمونه‌ی کنترلی پس از ۳۰۰ سیکل، ۳۸٪ کاهش قطر داشته است، در حالی که درصد کاهش قطر در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس ۱۰، ۱۵ و ۳۰ به ترتیب ۹، ۱۲ و ۱۶ درصد بوده است. همچنین درصد کاهش قطر در نمونه‌های حاوی ۱، ۳، ۵ و ۱۴ درصد به ترتیب ۹، ۱۱ و ۱۶ درصد بوده است.

نتایج آزمایش افت وزنی نمونه‌ها حاکی از آن است که دوام وزنی نمونه‌های حاوی نانوسیلیس در شرایط ذوب-یخبندان به مراتب بهتر از دوام محصولات کنترلی است. نمونه‌های کنترلی و نمونه‌های حاوی نانوسیلیس ۱۰، ۱۵، ۳۰ و ۳۰۰ در شدیدترین شرایط که شامل ۳۰۰ دوره می‌شود، به ترتیب مقدار افت وزنی ۷۸، ۳۶/۱۱، ۳۲/۱۴ و ۵۴/۲۲ درصد از خود نشان داده‌اند. همچنین نمونه‌های بتن غلتکی حاوی ۱، ۳ و ۵ درصد نانوسیلیس پس از ۳۰۰ سیکل متناوب ذوب - یخبندان به ترتیب ۳۵/۱۸، ۳۶/۱۱ و ۵۴/۱۵ درصد کاهش وزن از خود نشان داده‌اند.

افزودن نانوسیلیس‌ها سبب بهبود قابل توجه پارامترهای دوامی بتن غلتکی می‌شود، بهبود ریزساختار بتن غلتکی به معنی کاهش میزان کل حفره‌ها و اندازه‌ی متوسط آن‌هاست، به طوری که بتن غلتکی حاوی نانوسیلیس، آب کمتری نسبت به نمونه‌ی کنترلی جذب کرده و نتیجتاً نفوذپذیری کمتری داشته است که در دوام محصول نهایی بسیار مؤثر است.

می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در نوع نانوسیلیس، آثار شگرف‌تری نسبت به تغییر محتوای آن دارد که دلیل آن را می‌توان به خواص فیزیکی - شیمیایی نانوسیلیس‌ها نسبت داد، لذا می‌توان کوچک‌تر شدن قطر و در نتیجه افزایش سطح ویژه آن‌ها را توجیه کرد.



شکل ۱۰. نمودار تغییر وزن نمونه‌های کنترلی و سیلیسی برای مقادیر نانوسیلیس.

### ۲.۳.۳. تأثیر مقدار نانوسیلیس

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش میزان نانوسیلیس در نمونه‌ها از ۰ تا ۳۰ درصد مقدار افت وزنی کاهش، و از ۳ به ۵ درصد، افت وزنی، افزایش یافته است. برای مثال، میزان کاهش وزن نمونه‌ی کنترلی پس از ۳۰۰ سیکل متناوب یخ و ذوب، ۷۸٪ بوده است، در حالی که نمونه‌های بتن غلتکی حاوی ۱، ۳ و ۵ درصد نانوسیلیس پس از ۳۰۰ سیکل متناوب ذوب - یخبندان به ترتیب ۳۵/۱۸، ۳۶/۱۱ و ۵۴/۱۵ درصد کاهش وزن از خود نشان داده‌اند. بنابراین استفاده از ۳٪ در پژوهش حاضر، بهترین عملکرد دوامی در مقابل افت وزنی را از خود نشان داده است. بهبود دوام بتن غلتکی توسط نانوسیلیس در برابر پدیده‌ی یخبندان از نقطه نظر تغییر وزن می‌تواند نشان دهنده‌ی تقویت ریزساختار بتن غلتکی توسط نانوسیلیس باشد که ناشی از دو فرایند پوزولانیک و ریز پرکنندگی آن به عنوان فیلر است.

### ۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، آزمایش‌های مقاومت فشاری، کاهش ابعاد و افت وزنی بر روی مصالح بتن غلتکی، که در طرح اختلاط آن‌ها از سه نوع نانوسیلیس با ابعاد مختلف (۱۰، ۱۵ و ۳۰ نانومتر) و مقادیر متفاوت (۱، ۳، ۵ و درصد) استفاده شده است، انجام شد تا تأثیر نوع و مقدار نانوسیلیس در طرح اختلاط، در خواص مکانیکی، و دوامی مخلوط در سیکل‌های متناوب ذوب - یخبندان (۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ سیکل) ارزیابی شود. برخی از نتایج حاصل از آزمایش‌ها به این شرح هستند:

نتایج آزمایش مقاومت فشاری حاکی از آن است که نمونه‌های حاوی نانوسیلیس در سیکل‌های ذوب و یخبندان عملکرد به مراتب بهتری نسبت به نمونه‌های کنترلی (فاقد نانوسیلیس) داشته‌اند. به طوری که افت مقاومت‌ها در مصالح حاوی

### پانوشتها

1. Tarbela
2. Li
3. Ji

4. Sariosseiri & Muhunthan
5. Ajourloo
6. Taheri & Tatsuka
7. Sasanian & Newson
8. Ashwini & Rao



9. Ren & Lai
10. Zhang

### منابع (References)

1. ACI, "State of the art report on soil cement", IR *ACI Material Journals*, **1**, pp. 230 IR(2006).
2. ICOLD, "Soil cement for embankment dams", **54**, pp. 23-27 (1996).
3. 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 silicafume", *Construction and Building Materials*, **21**(3), pp. 539-545 (2007).
4. Li, G. "Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-sio<sub>2</sub>", *Cement and Concrete Research*, **34**(6), pp. 1043-1049 (2004).
5. Li, H., Xiao, H., Yuan, J. and et al. "Microstructure of cement mortar with nano-particles", *Composites*, **35**(2), pp. 185-189 (2004).
6. Ji, T. "Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-sio<sub>2</sub>", *Cement and Concrete Research*, **35**(10), pp. 1943-1947 (2004).
7. Bahmani, S.H., Huat, B., Asadi, A. and et al. "Stabilization of residual soil using SiO<sub>2</sub> nanoparticles and cement", *Construction and Building Materials*, **64**, pp. 350-359 (2014).
8. Sariosseiri, F. and Muhunthan, B. "Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils", *Engineering Geology*, **104**(1-2), pp. 119-125 (2009).
9. Ajorloo, A., Mroueh, H. and Lancelot, L. "Experimental investigation of cement treated sand behavior under triaxial test", *Geotech. Geol. Eng.*, **30**, pp. 129-143 (2012).
10. Fakharran, K., Heydari, S. and Eghbali, A. "Effect of portland cement addition On anisotropic strength of sand under compression and extension triaxial tests", *Sharif Civil Engineering Journal*, **29**, pp. 107-115, (In Persian) (2012).
11. Sedighi, P., Eslami, A. and Aflaki, E. "Effect of cement treatment on shear strength parameters of difficult soil from southern coastlines of the Caspian sea", *Sharif Civil Engineering Journal*, **29-2**(4), pp. 97-128 (In Persian) (2013).
12. Taheri, A. and Tatsuka, F. "Stress-strain relations of cement-mixed gravelly soil from multiple-step triaxial compression test results", *Soils and Foundations*, **52**(4), pp. 748-766 (2012).
13. Sasanian, S. and Newson, T. "Basic parameters governing the behavior of cement treated clays", *Soils and Foundations*, **54**(2), pp. 209-224 (2014).
14. Ashwini, K. and Rao, P.S. "Freeze and thaw resistance of concrete using alccofine and nano-silica", *Materials Today*, **47**(14), pp. 4336-4340 (2021).
15. Ren, J. and Lai, Y. "Study on the durability and failure mechanism of concrete modified with nanoparticles and polypropylene fiber under freeze-thaw cycles and sulfate attack", *Cold Regions Science and Technology*, **188**, pp. 103301 (2021).
16. Changizi, F., Ghasemzadeh, H. and Ahmadi, S. "Evaluation of strength properties of clay treated by nano-SiO<sub>2</sub> subjected to freeze-thaw cycles", *Road materials and Pavement Design*, **23**, pp. 1-18 (2021).
17. Zhang, P., Sha, D., Li, Q. and et al. "Effect of nano silica particles on impact resistance and durability of concrete containing coal fly ash", *Nanomaterials*, **11**(5), pp. 1296. (2021).
18. Ferekel, H. and Hellmig, R. "Effect of nanopowder deagglomeration on the densities of nanocrystalline ceramic green bodies and their sintering behaviour", *Nanoconstruction Materials*, **11**(5), pp. 617-622 (1999).
19. ASTM, "Test method for unconfined compressive strength of cohesive soils", *American Society of Testing and Materials*, *ASTM D 2166*, Philadelphia (1989).
20. ASTM., *Test Method for Unconsolidated Undrained Compressive Strength of Cohesive Soils in Triaxial Compression*, Annual Book of ASTM Standards, American Society of Testing and Materials, ASTM D 2850, Philadelphia (1989).
21. Hamidi, A. and Haeri, S.M. "Stiffness and deformation characteristics of cemented gravelly sands", *International Journal of Civil Engineering*, **6**(3), pp. 159-173 (2008).
22. Wang, Y.H. and Leung, S.C. "Characterization of cemented sand by experimental and numerical investigations", *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (2008).
23. Wang, Y.H. and Leung, S.C. "A particulate scale investigation of cemented sand behavior", *Canadian Geotechnical Engineering*, **45**(1), pp. 29-44 (2008).
24. Mahboubi, A. and Ajorloo, A. "Experimental study of the mechanical behavior of plastic concrete in triaxial compression", *Cement and Concrete Research*, **35**(2), pp. 412-419 (2005).
25. Charles, J.A. and Watts, K.S. "The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rockfill", *Geotechnique*, **30**(4), pp. 353-367 (1980).
26. Sanchez, F. and Sobolev, K. "Nanotechnology in concrete-A review", *Construction and Building Materials*, **24**(11), pp. 2060-2071 (2010).
27. Bishop, A.W. "The influence of progressive failure on the choice of stability analysis", *Geotechnique*, **21**(2), pp. 168-172 (1971).
28. Vaunat, J. and Gens, A. "Aspects of modelling geotechnical problems in hard soil and soft argillaceous rocks", Pande and pietruszczack, Rotterdam, Balkema, pp. 37-43 (2004).
29. Manzal, D., Fernandez, J.A. and Pastor, M. "Generalized plasticity state parameter-based model for saturated and unsaturated soils", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **35**(12), pp. 1347-1362 (2011).
30. Haeri, S.M. and Hamidi, A. "Constitutive modelling of cemented gravelly sands", *Geomechanics and Geoengeineering*, pp. 123-139 (2009).
31. Bahmani, S.H., Farzadnia, N. and Asadi, B.K.H. "The effect of size and replacement content of nanosilica on

- strength development of cement treated residual soil”, *Construction and Building Materials*, **118**, pp. 294-306 (2016).
32. Kim, H. and Samantha, P. “Compressive strength and chloride resistance of grout containing ground palm oil fuel ash”, *Journal of Cleaner Production*, **112**(part 1), pp. 712-722 (2016).
  33. Khaloo, A., Mobini, MH. and Hosseini, P. “Influence of different types of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of high-performance concrete”, *Construction and Building Materials*, **112**, pp. 712-722 (2016).
  34. Khaloo, A., Mobini, M.H. and Hosseini, P. “Mechanical properties of fiber-reinforced high-performance concrete incorporating pyrogenic nanosilica with different surface areas”, *Construction and Building Materials*, **103**, pp. 526-538 (2015).
  35. Suzuki, M., Fujimoto, T. and Taguchi, T. “Peak and residual strength characteristics of cement-treated soil cured under different consolidation conditions”, *Soils and Foundations*, **54**(4), pp. 687-698 (2014).
  36. Amini, Y. and Hamidi, A. “Triaxial shear behavior of a cement-treated sand-gravel mixture”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **6**(5), pp. 455-465 (2014).
  37. Al-Rawas, A., Hago, A. and Al-Sarmi, H. “Effect of lime, cement and sarooj on the swelling potential of an expansive soil from Oman”, *Building and Environment*, **40**(5), pp. 681-687 (2005).
  38. Sarrioseir, A., Razavi, M. and Carlson, B. “Stabilization of soils with portland cement and CKD and application of CKD on slope erosion control”, *Advances in Geotechnical Engineering, ASCE*, pp. 778-787 (2011).