



مرکز تحقیقات  
راه، مسکن و شهرسازی

نهمین کنفرانس ملی بتن ایران  
۱۶ و ۱۵ مهرماه ۱۳۹۶  
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



انجمن علمی بتن ایران



انجمن علمی بتن ایران  
انجمن علمی بتن ایران

## بررسی خصوصیات مکانیکی و دوام نمونه‌های بتنی حاوی نانوسیلیس در شرایط باران اسیدی

محمد فلاح شیروانی<sup>۱</sup>، امید بامشاد<sup>۲</sup>، مهدی مهدی‌خانی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، موسسه غیرانتفاعی صائب، اهر

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران، تهران

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

mahdikhani@aut.ac.ir

### چکیده

در شرایط باران اسیدی واکنش‌های شیمیایی در سازه بتنی رخ می‌دهد که منجر به تغییر pH می‌شود. زمانی که این واکنش‌ها ادامه می‌یابد بتن شروع به از دست دادن مقاومت مکانیکی خود می‌کند که به ترک خوردگی، کاهش وزن و نهایتاً تخریب سازه منجر می‌گردد. از آنجایی که در مواردی کنترل بارش اسیدی و اثرات آن بر محیط اطراف اجتناب‌ناپذیر است، تا بحال محققین مطالعات زیادی بر روی این مقوله انجام داده‌اند و راه‌کارهایی برای حذف یا کنترل اثرات آن ارائه داده‌اند. یکی از راه‌کارهای نوین در این زمینه استفاده از نانوذرات می‌باشد. در سال‌های اخیر مطالعات بر روی نانوذرات سیلیس متمرکز شده، با این هدف که بتوان با استفاده از این ماده، مشخصات بتن را بیش از پیش افزایش داد. افزودن نانو سیلیس به بتن در شرایط غیر اسیدی (خنثی) موجب کاهش نفوذپذیری آب درون بتن و همچنین مقاومت بالاتر در برابر حمله‌های شیمیایی می‌شود. در این مقاله به بررسی مشخصات مکانیکی و دوام بتن حاوی نانوسیلیس از جمله میزان کاهش وزن، مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی و میزان جذب آب تحت شرایط اسیدی پرداخته می‌شود. بر اساس نتایج بدست آمده، با افزایش نانوسیلیس به بتن، مشخصات مکانیکی و دوام بتن بهبود می‌یابد، اما با افزایش درجه اسیدی آب، دوام و مشخصات مکانیکی بتن نزول می‌یابد.

کلمات کلیدی: نانو سیلیس، مقاومت الکتریکی، مقاومت فشاری، جذب آب، شبیه‌ساز باران اسیدی، سولفوریک اسید

### مقدمه

بتن نزدیک به دو قرن است که مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقرون به صرفه بودن، وجود منابع فراوان مواد متشکل، سازگاری با محیط و مقاومت مناسب از ویژگی‌هایی است که بتن را برای انواع کاربردها مطلوب می‌کند. با وجود پیشینه کاربرد، تا قبل از چند دهه گذشته دوام بتن مورد توجه طراحان و سازندگان آن نبوده است [۱-۴].  
پدیده باران اسیدی در سال‌های پایانی دهه ۱۸۰۰ در انگلستان کشف شد، اما پس از آن تا دهه ۱۹۶۰ به دست فراموشی سپرده شد. اسمیت در سال ۱۸۷۳ واژه باران اسیدی را برای اولین بار مطرح کرد. او پی برد که ترکیب شیمیایی باران تحت تأثیر عواملی چون جهت وزش باد، شدت بارندگی و توزیع آن، تجزیه ترکیبات آبی و سوخت می‌باشد. این محقق متوجه اسید سولفوریک در باران شد و عنوان نمود که این امر، برای گیاهان و اشیا واقع در سطح زمین خطرناک است [۵].



مرکز تحقیقات  
راه، مسکن و شهرسازی

نهمین کنفرانس ملی بتن ایران  
۱۶ و ۱۷ مهر ماه ۱۳۹۶

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



انجمن علمی بتن ایران



انجمن علمی بتن ایران  
انجمن علمی بتن ایران

نانو فناوری رویکردی جدید است که در زمینه‌های مختلف دانش و فن وارد شده و تغییراتی را در دیدگاه‌ها و روش‌ها ایجاد کرده است. بخشی از تغییرات ایجاد شده به صورت بهبود شرایط فناوری‌های موجود بوده و بخشی دیگر، که تا کنون کمتر نمود داشته، به ایجاد تغییرات اساسی و دگرگون‌کننده و تغییر فناوری‌های موجود منجر خواهد شد. در فناوری بتن هم در سال‌های اخیر، با ورود فناوری نانو دیدگاه‌های جدیدی ایجاد شده است [۶-۸]. نانو سیلیس یکی از جدیدترین فناوری‌ها در فناوری نانو می‌باشد که به عنوان جایگزین پودر سیلیس به صورت گسترده در بتن استفاده می‌شود [۹]. با توسعه‌ی کاربرد نانو سیلیس در بتن، بسیاری از نانو ذرات دیگر مانند نانو آلومینیم [۱۰]، نانو تیتانیوم اکسید [۱۱]، نانو تیوب کربن [۱۲] و پلی-کربکسیلات [۱۳] در بتن به کار برده شدند. کینگ و همکاران بررسی‌هایی بر روی تاثیر نانوسیلیس و پودر سیلیس بر مشخصات بتن و سیمان سخت‌شده انجام دادند [۱۴]. سعید و همکاران تاثیر نانوسیلیس بر روی دو نوع بتن یکی با سیمان معمولی و دیگری با سیمان معمولی و پودر خاکستر بررسی کردند [۱۵]. جو و همکاران خواص خمیر سیمان حاوی نانوسیلیس را بررسی نمودند [۱۶]. در همه‌ی بررسی‌های انجام گرفته، نتایج نشان داده است که نانوسیلیس می‌تواند مشخصات مکانیکی خمیر سیمان سخت شده و بتن را بهبود بخشد. جلال و همکاران تاثیر نانوسیلیس، پودر سیلیس و پودر خاکستر تیپ F را بر روی مشخصات بتن خود تراکم با کارایی بالا بررسی نمودند. آنها ۱۴ طرح مخلوط با نسبت آب به ریزدانه برابر با ۰/۳۸ و مقدار کل ریزدانه برابر با  $400 \text{ kg/m}^3$  و  $500 \text{ kg/m}^3$  آماده کرده و مقدار ۱۰٪ پودر سیلیس، ۲٪ نانوسیلیس و ۱۰٪/۲۰٪ پودر سیلیس و نانو سیلیس را با سیمان جایگزین کردند. نتایج نشان داد که مشخصات مکانیکی بتن در نمونه‌هایی که محتوی نانوسیلیس و پودر سیلیس بودند بهبود یافته است [۹].

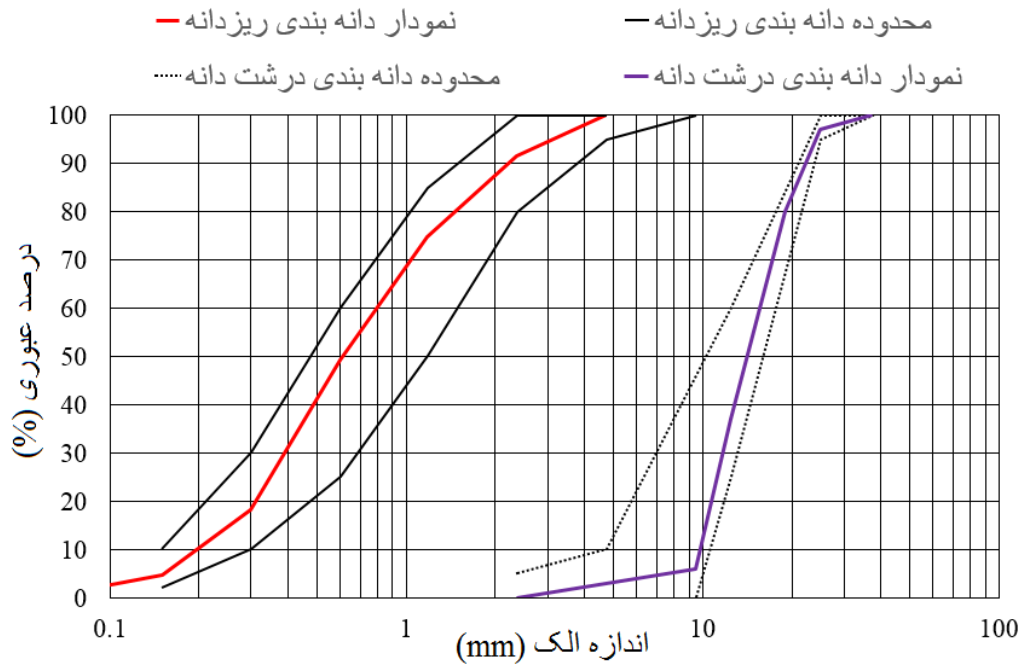
## برنامه‌ی آزمایشگاهی

### مصالح مصرفی

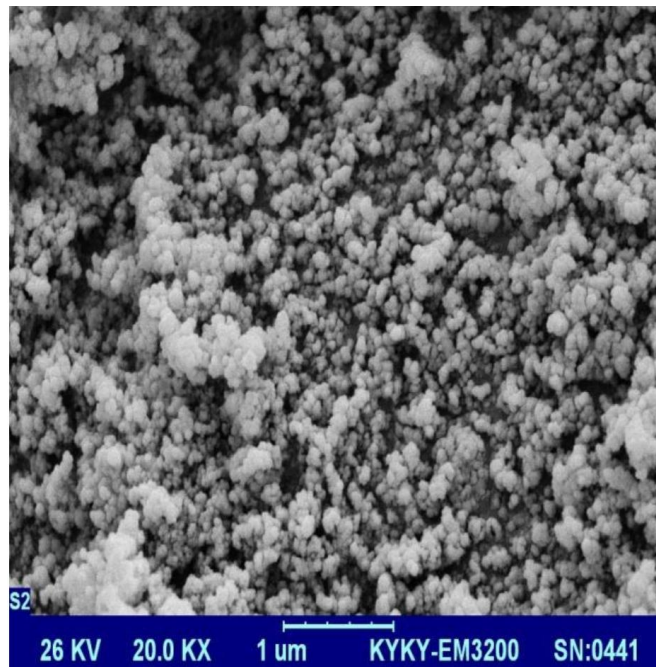
برای تمام نمونه‌های بتنی از ماسه گردگوشه شسته شده و شن شکسته استفاده شده است. بر اساس استاندارد ASTM C128-01 [۱۷] و استاندارد ASTM C127-01 [۱۸] در حالت SSD (اشباع با سطح خشک)، وزن مخصوص شن و ماسه‌ی استفاده شده به ترتیب به ترتیب برابر با ۲/۵۸۴ و ۲/۵۵۱ کیلوگرم بر متر مکعب و درصد جذب آب به ترتیب برابر با ۱/۸۳٪ و ۲/۵۶٪ محاسبه شد. دانه‌بندی مصالح ریزدانه و درشت‌دانه بر اساس استاندارد ASTM C136-01 [۱۹] در شکل (۱) نشان داده شده است. سیمان پرتلند نوع II مطابق با استاندارد ASTM C150-07 [۲۰] برای طرح مخلوط‌های نمونه‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات فیزیکی بتن مصرفی در جدول (۱) نشان داده شده است. آب مورد استفاده برای نمونه‌ها، آب آشامیدنی می‌باشد. محلول کلونیدی نانوسیلیس مصرفی با دانسیته ۳۰٪ و خلوص ۹۹/۹٪ می‌باشد. تصویر SEM نانوسیلیس در شکل (۲) نشان داده شده است. همچنین، فوق روان‌کننده بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات با وزن مخصوص ۱/۲ کیلوگرم بر لیتر برای دستیابی به کارایی مورد نظر استفاده گردید.

جدول (۱)، مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

آزمایش	سیمان تیپ II
زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۱۸۶
زمان گیرش نهایی (دقیقه)	۲۷۶
بلین ( $\text{cm}^2/\text{gr}$ )	۳۲۰۰



شکل (۱)، منحنی دانه بندی ریزدانه و درشت دانه



شکل (۲)، تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) ذرات نانوسیلیس

### طرح مخلوط و ساختن نمونه‌ها

در این آزمایش، چهار طرح مخلوط شامل ۰٪، ۰.۲٪، ۰.۴٪ و ۰.۶٪ نانوسیلیس و نسبت آب به سیمان ثابت برابر با ۰.۵/۱ آماده شد. تمام درصدهای جایگزینی ذکر شده بر اساس جرم می‌باشند. آزمایش اسلامپ بر اساس استاندارد ASTM C 143/C 143M – 03 [۲۱] انجام شد و عدد اسلامپ همواره ثابت و برابر با  $9 \pm 1$  سانتی‌متر نگه‌داشته شد. جدول (۲) طرح مخلوط - های بتن را نشان می‌دهد.

جدول (۲) طرح مخلوط‌های مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های بتنی

شماره ردیف	کد طرح مخلوط	نسبت آب به سیمان	نانو سیلیس (%)	افزودنی (kg/m <sup>3</sup> )	سیمان (Kg/m <sup>3</sup> )	نانو سیلیس (kg/m <sup>3</sup> )	آب (L/m <sup>3</sup> )	سنگدانه (Kg/m <sup>3</sup> )
1	A-0	۰/۵	۰	۲/۳۹۱	۳۵۰	۰	۱۷۵	۱۸۸۵/۷۱
2	A-2	۰/۵	۲	۳/۴۱۴	۳۵۳	۷/۰۰	۱۷۵/۵	۱۸۸۵/۷۱
3	A-4	۰/۵	۴	۸/۴۸۵	۳۳۶	۱۴/۰۰	۱۶۸	۱۸۸۵/۷۱
4	A-6	۰/۵	۶	۱۳/۴۲۸	۳۲۹	۲۱/۰۰	۱۶۴/۵	۱۸۸۵/۷۱

### ساخت دستگاه شبیه ساز پاشش باران اسیدی

ساخت دستگاه شبیه‌ساز باران اسیدی به مدت دو هفته به طول انجامید. برای شبیه‌سازی باران از نازل‌ها و دوش‌ها و مه پاش‌های مختلفی استفاده شد و از بین همه ی این نازل‌ها و دوش‌ها، یک نازل سمپاش انتخاب شد که تمام شرایط از نظر زاویه پاشش و اندازه قطرات را دارا بود. برای این وسیله پمپ و اتصالات از قبیل مخازن جای‌دهی نمونه‌ها، مخازن ذخیره اسید، لوله‌ها، زانویی‌ها، شلنگ‌ها، شیرها، بست‌ها و فشارسنج و غیره انتخاب شدند. باید فاصله نازل از سطح نمونه مد نظر قرار می‌گرفت. به همین دلیل قابلیت تنظیم ارتفاع نیز برای دستگاه قرار داده شد. از ویژگی‌های لازم برای دستگاه قرار دادن سیستم اتوماتیک برای پمپ برای خاموش شدن در تایم مورد نظر می‌باشد که برای این کار تایمری از ۵ تا ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد. به این ترتیب که زمان مدت سیکل پاشش باران اسیدی ۳۰ دقیقه در طول ۲۴ ساعت تعیین گردید. مراحل ساخت دستگاه شبیه‌ساز باران اسیدی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳) مراحل ساخت دستگاه شبیه‌ساز باران اسیدی (الف) به هم بستن پمپ و شیرها (ب) ساخت فریم دستگاه (ج) بستن نازل‌ها و شلنگ‌ها به فریم (د) سوار کردن فریم بر مخزن نمونه‌ها (ه) کالیبره کردن دستگاه ساخته شده توسط ارزیابی سطح تحت پوشش نازل‌ها (و) دستگاه کامل به همراه مخزن نمونه‌ها و مخزن جمع‌آوری اسید

### آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمایش‌های انجام گرفته

نمونه‌های بتنی پس از قرارگیری در قالب ویبره شدند و به مدت ۲۴ ساعت با استفاده از حوله‌ی مرطوب عمل‌آوری شده و طبق استاندارد مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش بر روی نمونه‌های بتنی پس از ۲۸، ۵۶، ۹۰ روز قرارگیری در معرض باران اسیدی با pH برابر با ۲/۵، ۴، ۵/۵ و ۷ انجام شد.

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری بتنی بر اساس استاندارد ASTM C 109/C 109M – 02 [۲۲] انجام شده است.

آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری بتنی بر اساس استاندارد ASTM C 1202 – 97 [۲۳] انجام شده است. به دلیل حرکت یون‌ها در بتن، بتن دارای قابلیت هدایت الکتریکی می‌باشد. یقیناً هر چه نفوذپذیری بتن بیشتر باشد، عبور یون‌ها از بتن راحت‌تر انجام شده و مقاومت الکتریکی بتن کاهش می‌یابد. در این آزمایش با استفاده از ولتاژ DC، مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی در دو جهت عمود بر هم اندازه‌گیری شده و مقدار میانگین آنها بدست آمده است.

آزمایش کاهش وزن بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری بتنی انجام شده است. این نمونه‌ها پس از ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز قرارگیری در معرض باران اسیدی، به مدت ۲۴ ساعت در معرض دمای آزمایشگاه قرار گرفته و سپس وزن آنها اندازه‌گیری شده است و با توجه به وزن اولیه آنها، درصد کاهش وزن محاسبه شده است.





آزمایش نفوذ آب موئینه بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری بتنی بر اساس استاندارد BS 1881 [۲۴] انجام شده است. نمونه‌های بتنی پس از عمل‌آوری توسط حوله مرطوب به مدت ۲۴ ساعت، در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و وزن اولیه آنها اندازه‌گیری شد ( $W_1$ ). پس از قرارگیری به مدت ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز در معرض باران اسیدی، به مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه قرار گرفتند و بعد از آن، وزن آنها با سطح خشک پس از ۳، ۶، ۲۴ و ۷۲ ساعت تماس با آب اندازه‌گیری شد ( $W_2$ ). سطوح جانبی نمونه‌ها به وسیله اپوکسی پوشانده شد تا نفوذ آب به صورت یک جهت رخ دهد. همچنین با قرار دادن نمونه‌ها بر روی میله‌های یک سانتی‌متری، آب به صورت آزادانه در زیر نمونه‌ها حرکت می‌کرد. جذب آب موئینه ( $S$ ) با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = \frac{W_2 - W_1}{A} \quad (1)$$

$$Q = C + S\sqrt{t} \quad (2)$$

که در آنها،  $A$ ، سطح مقطع نمونه‌ها که با آب در تماس است ( $m^2$ )،  $C$ ، ضریب ثابت و  $S$ ، جذب آب موئینه ( $kg/t^{0.5}.m^2$ ) می‌باشد

## نتایج

مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در جدول (۳) و شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس نتایج، با کاهش درجه اسیدی آب، تخریب نمونه‌های بتنی کاهش یافته است و در نتیجه مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته است. همچنین با افزایش درصد نانوسیلیس مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته است. این نتیجه به این دلیل است که نانوسیلیس به عنوان پرکننده سبب کاهش تخلخل نمونه‌های بتنی شده است. همچنین اصلاح مرز بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان سبب افزایش مقاومت فشاری شده است. علاوه بر آن، با افزایش سن نمونه‌ها، مقاومت فشاری افزایش یافته است. به عنوان مثال، در نمونه‌های حاوی ۴٪ نانوسیلیس، با تغییر pH آب از ۲/۵ به ۷، مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه به ترتیب به اندازه ۲/۳٪، ۸/۴٪ و ۴٪/۱۲٪ افزایش می‌یابد. همچنین در نمونه‌های ۹۰ روزه، با تغییر درصد نانوسیلیس از ۰٪ تا ۶٪، مقاومت فشاری نمونه‌های تحت باران اسیدی با pH برابر با ۲/۵، ۴، ۵/۵ و ۷ به ترتیب به میزان ۱۲/۱۲٪، ۱۵/۷۹٪، ۱۱/۴۹٪ و ۱۲/۴۵٪ افزایش یافته است.

جلال و همکاران نشان دادند که جایگزینی ۲٪ نانوسیلیس در بتن باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود [۹]. خانزادی و همکاران نیز نشان دادند که مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با افزودن نانوسیلیس خصوصاً در سنین اولیه افزایش می‌یابد [۲۵]. مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی در جدول (۳) و شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس نتایج، با کاهش درجه اسیدی آب، تخریب نمونه‌های بتنی کاهش یافته است و در نتیجه مقاومت الکتریکی نمونه‌ها کاهش یافته است. همچنین با افزایش درصد نانوسیلیس، به دلیل کاهش تخلخل، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها افزایش یافته است. علاوه بر آن، با افزایش سن نمونه‌ها، مقاومت الکتریکی افزایش یافته است. به عنوان مثال، در نمونه‌های حاوی ۶٪ نانوسیلیس، با تغییر pH آب از ۲/۵ به ۷، مقاومت الکتریکی نمونه‌های ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه به ترتیب به اندازه ۱۵/۱۱٪، ۱۲/۳۹٪ و ۱۴/۸۳٪ کاهش می‌یابد. همچنین در نمونه‌های ۵۶ روزه، با تغییر درصد نانوسیلیس از ۰٪ تا ۶٪، مقاومت الکتریکی نمونه‌های تحت باران اسیدی با pH برابر با ۲/۵، ۴، ۵/۵ و ۷ به ترتیب به میزان ۳۱/۵۲٪، ۳۸/۶۳٪، ۳۸/۱۵٪ و ۴۱/۳۳٪ افزایش یافته است.

زاهدی و همکاران نشان دادند که نمونه‌های حاوی نانوسیلیس، مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به نمونه‌های دیگر در سنین ۲۸ و ۹۰ روز دارند [۲۶].



مرکز تحقیقات  
راه، مسکن و شهرسازی

## نهمین کنفرانس ملی بتن ایران ۱۶ و ۱۵ مهر ماه ۱۳۹۶

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



انجمن علمی بتن ایران



انجمن بتن ایران  
انجمن علمی بتن ایران

درصد کاهش وزن نمونه‌های بتنی در جدول (۳) و شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس نتایج، با کاهش درجه اسیدی آب، تخریب و خوردگی نمونه‌های بتنی کاهش یافته و در نتیجه درصد کاهش وزن نمونه‌ها کاهش یافته است. همچنین با افزایش درصد نانوسیلیس، به دلیل کاهش تخلخل، درصد کاهش وزن نمونه‌ها کاهش یافته است. علاوه بر آن، با افزایش سن نمونه‌ها، درصد کاهش وزن افزایش یافته است. به عنوان مثال، در نمونه‌های حاوی ۲٪ نانوسیلیس، با تغییر pH آب از ۲/۵ به ۷، درصد کاهش وزن نمونه‌های ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه به ترتیب به اندازه ۰/۲۵، ۰/۲۷، ۰/۲۲٪ کاهش می‌یابد. همچنین در نمونه‌های ۲۸ روزه، با تغییر درصد نانوسیلیس از ۰٪ تا ۶٪، درصد کاهش وزن نمونه‌های تحت باران اسیدی با pH برابر با ۲/۵، ۴، ۵/۵ و ۷ به ترتیب به میزان ۰/۳۴/۳۴٪، ۰/۲۴/۶۷٪، ۰/۲۵/۶۷٪ و ۰/۲۶/۰۲٪ کاهش یافته است.

فلاح و نعمت‌زاده خواص مکانیکی و دوام بتن پرمقاومت حاوی نانو سیلیس را بررسی کردند و نشان دادند که نمونه‌های حاوی نانو سیلیس در مقایسه با بتن ساده دارای تخلخل کمتری هستند. همچنین آنها نشان دادند که تخلخل بتن ساده برابر با ۷/۹۶٪ بوده، در حالی که در مورد بتن حاوی ۵/۲، ۱۰/۴ و ۱۵/۶ کیلوگرم بر متر مکعب نانوسیلیس، این مقدار به ترتیب برابر با ۷/۹۶٪، ۷/۱۸٪ و ۶/۹۳٪ می‌باشد [۲۷].

جذب آب موئینه نمونه‌های بتنی که در این آزمایش با ضریب جذب آب بیان شده است، در جدول (۳) و شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس نتایج، با کاهش درجه اسیدی آب و افزایش درصد نانوسیلیس، تخریب و خوردگی نمونه‌های بتنی کاهش یافته و در نتیجه جذب آب موئینه و ضریب جذب آب نمونه‌ها کاهش یافته است. علاوه بر آن، با افزایش سن نمونه‌ها، ضریب جذب آب نمونه‌ها افزایش یافته است. به عنوان مثال، در نمونه‌های حاوی ۴٪ نانوسیلیس، با تغییر pH آب از ۲/۵ به ۷، درصد کاهش وزن نمونه‌های ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه به ترتیب به اندازه ۰/۷۳/۹۱٪، ۰/۶۰/۰۰٪ و ۰/۴۶/۶۶٪ کاهش می‌یابد. همچنین در نمونه‌های ۹۰ روزه، با تغییر درصد نانوسیلیس از ۰٪ تا ۶٪، درصد کاهش وزن نمونه‌های تحت باران اسیدی با pH برابر با ۲/۵، ۴، ۵/۵ و ۷ به ترتیب به میزان ۰/۲۰/۰۰٪، ۰/۲۸/۱۲٪، ۰/۴۰/۷۴٪ و ۰/۱۶/۶۶٪ کاهش یافته است.

فلاح و نعمت‌زاده نشان دادند که جذب آب نمونه‌های حاوی نانو سیلیس کمتر از بتن ساده است [۲۷]. خانزادی و همکاران نیز نشان دادند که بتن حاوی نانوسیلیس نسبت به بتن معمولی در برابر نفوذپذیری مقاومت بهتری دارد [۲۵].

جدول (۳)، مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی، درصد کاهش وزن و ضریب جذب آب نمونه‌های بتنی

pH	نانوسیلیس	مقاومت فشاری (MPa)			مقاومت الکتریکی (Ohm)			کاهش وزن (%)			جذب آب موئینه (kg/t <sup>0.5</sup> .m <sup>2</sup> )		
		۲۸ روزه	۵۶ روزه	۹۰ روزه	۲۸ روزه	۵۶ روزه	۹۰ روزه	۲۸ روزه	۵۶ روزه	۹۰ روزه	۲۸ روزه	۵۶ روزه	۹۰ روزه
2.5	0%	46.08	50.77	54.45	0.58	0.92	1.64	0.99	1.41	1.63	0.23	0.28	0.35
	2%	46.35	50.00	55.03	0.68	0.96	1.60	0.87	1.32	1.49	0.24	0.28	0.34
	4%	51.07	54.62	58.61	0.73	1.00	1.67	0.83	1.19	1.36	0.23	0.25	0.30
	6%	51.87	56.96	61.05	0.86	1.21	1.82	0.65	1.12	1.33	0.22	0.23	0.28
4	0%	46.71	52.33	56.03	0.60	0.88	1.25	0.77	1.25	1.45	0.23	0.26	0.32
	2%	46.91	56.10	57.36	0.57	0.85	1.35	0.74	1.22	1.44	0.18	0.19	0.30
	4%	51.66	57.49	63.96	0.66	0.94	1.48	0.72	1.19	1.35	0.17	0.18	0.28
	6%	52.01	58.72	64.88	0.85	1.22	1.80	0.58	0.95	1.31	0.13	0.14	0.23
5.5	0%	46.32	53.62	58.28	0.49	0.76	1.17	0.74	1.21	1.32	0.18	0.23	0.27
	2%	51.22	55.90	60.82	0.58	0.79	1.31	0.73	0.94	1.29	0.15	0.15	0.22
	4%	51.76	59.20	64.47	0.65	0.86	1.51	0.67	0.93	1.25	0.15	0.13	0.19
	6%	53.27	58.79	64.98	0.75	1.05	1.63	0.55	0.55	0.94	0.09	0.11	0.16
7	0%	48.27	53.67	59.09	0.50	0.75	1.15	0.73	0.86	1.21	0.11	0.16	0.18
	2%	51.44	56.17	63.46	0.47	0.67	1.12	0.65	0.63	1.16	0.09	0.11	0.18
	4%	52.28	59.24	65.88	0.69	0.98	1.51	0.61	0.53	1.16	0.06	0.10	0.16
	6%	53.36	59.95	66.45	0.73	1.06	1.55	0.54	0.43	0.88	0.06	0.10	0.15



مرکز تحقیقات  
راه، مسکن و شهرسازی

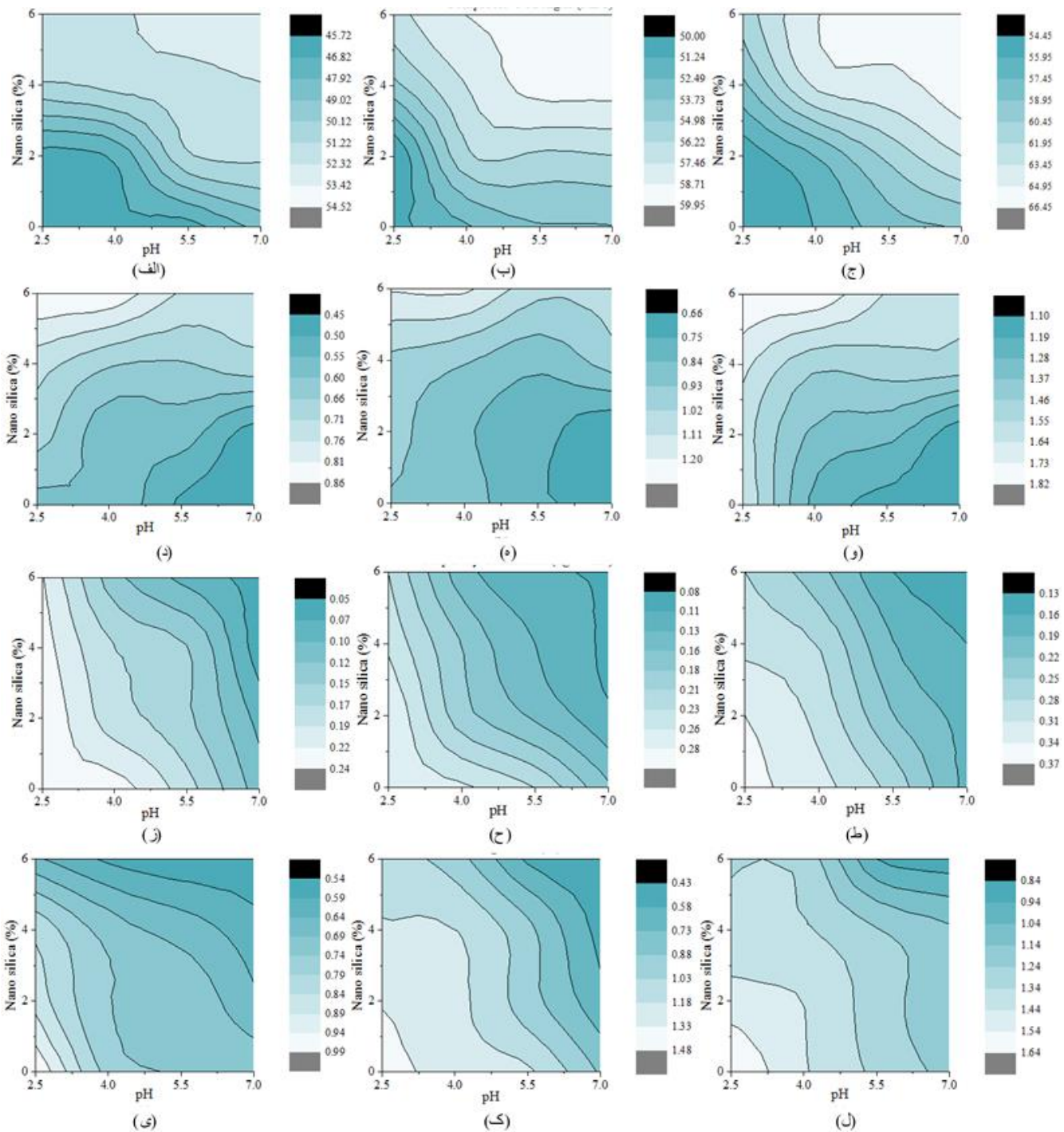
نهمین کنفرانس ملی بتن ایران  
۱۶ و ۱۵ مهر ماه ۱۳۹۶  
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



انجمن علمی بتن ایران



انجمن بتن ایران  
انجمن علمی بتن ایران



شکل (۴)، مقاومت فشاری نمونه‌های (الف) ۲۸ روزه، (ب) ۵۶ روزه و (ج) ۹۰ روزه حاوی درصد‌های مختلف نانوسیلیس تحت باران اسیدی با pHهای

مختلف بر حسب (MPa)، مقاومت الکتریکی نمونه‌های (د) ۲۸ روزه، (ه) ۵۶ روزه، (و) ۹۰ روزه بر حسب (Ohm)، ضریب جذب آب نمونه‌های (ز) ۲۸

روزه، (ح) ۵۶ روزه، (ط) ۹۰ روزه بر حسب  $(kg/t^{0.5}.m^2)$ ، درصد کاهش وزن نمونه‌های (ی) ۲۸ روزه، (ک) ۵۶ روزه، (ل) ۹۰ روزه





## نتیجه گیری

- در این مقاله و بر اساس نتایج آزمایش موارد زیر به عنوان نتیجه قابل استخراج می باشد:
- در شرایط باران اسیدی واکنش هایی در سازه بتنی رخ می دهد که منجر به تغییر pH می شود. زمانی که این واکنش ها ادامه می یابند بتن شروع به از دست دادن مقاومت مکانیکی خود می کند که به ترک خوردگی، کاهش وزن و نهایتاً تخریب سازه منجر می گردد.
  - در تمام سنین، مقاومت فشاری نمونه های بتنی حاوی نانوسیلیس به دلیل اصلاح مرز بین سنگدانه و خمیر سیمان و نقش پرکنندگی نانوسیلیس، از نمونه ی مرجع بیشتر بود. همچنین با افزایش pH آب، مقاومت فشاری نمونه های بتنی کاهش یافت، به طوری که با تغییر pH از ۲/۵ به ۷ در نمونه های ۹۰ روزه حاوی ۰/۶ نانوسیلیس، مقاومت فشاری به مقدار ۸/۸۰٪ افزایش داشته است.
  - به دلیل افزایش خوردگی و در نتیجه افزایش نفوذپذیری نمونه ها در اثر افزایش اسیدیته آب، جذب آب موئینه نمونه ها افزایش یافت. همچنین رفتار پرکنندگی نانوسیلیس سبب کاهش تخلخل و نفوذپذیری نمونه ها شده است. به عنوان مثال، در نمونه های حاوی ۰/۶ نانوسیلیس، با تغییر pH از ۲/۵ به ۷ جذب آب موئینه نمونه های ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه به ترتیب به مقدار ۱۶/۹۲٪، ۶۱/۶۰٪ و ۳۳/۸۳٪ کاهش یافته است.
  - با افزایش درصد نانوسیلیس به دلیل کاهش تخلخل، مقاومت الکتریکی نمونه های بتنی افزایش یافته است. همچنین با افزایش اسیدیته آب و خوردگی بیشتر نمونه ها، مقاومت الکتریکی نمونه ها بیشتر شده است. به عنوان مثال، با افزایش نانوسیلیس از ۰/۲ تا ۰/۶ در نمونه های ۹۰ روزه، مقاومت الکتریکی نمونه های بتنی تحت باران اسیدی با مقدار pH برابر با ۲/۵، ۴، ۵/۵ و ۷ به ترتیب به میزان ۹/۸۹٪، ۳۰/۵۵٪، ۲۸/۲۲٪ و ۲۵/۸۰٪ افزایش یافته است.
  - نفوذپذیری و تخلخل بالا در نمونه های بتنی باعث تخریب ساده تر آنها می گردد. بنابراین با افزایش نانوسیلیس و کاهش نفوذپذیری و تخلخل، درصد کاهش وزن نمونه ها کمتر شده است. همچنین خوردگی بیشتر به دلیل افزایش اسیدیته آب باعث افزایش درصد کاهش وزن نمونه های بتنی گشته است.

## قدردانی

نویسندگان مقاله از اعضای آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) به علت راهکارهای ارزشمند کمال تشکر را دارند.

## مراجع

- [۱] S. Zhao, W. Sun, Nano-mechanical behavior of a green ultra-high performance concrete, Constr. Build. Mater. 63 (2014) 150–160. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.029.
- [۲] C. Wang, C. Yang, F. Liu, C. Wan, X. Pu, Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials, Cem. Concr. Compos. 34 (2012) 538–544. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.11.005.
- [۳] E.E. Hekal, E. Kishar, H. Mostafa, Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances, Cem. Concr. Res. 32 (2002) 1421–1427. doi:10.1016/S0008-8846(02)00801-3.
- [۴] K. Tosun-Felekoğlu, The effect of C 3A content on sulfate durability of Portland limestone cement mortars, Constr. Build. Mater. 36 (2012) 437–447. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.091.



- [۵] M.L. Quinn, Early smelter sites: A neglected chapter in the history and geography of acid rain in the United States, *Atmos. Environ.* 23 (1989) 1281–1292. doi:10.1016/0004-6981(89)90152-2.
- [۶] M.C. Roco, National Nanotechnology Initiative - Past, Present, Future, (2007) 1–42.
- [۷] K. Sobolev, How Nanotechnology Can Change the, (2005) 14–18.
- [۸] K. Sobolev, S.P. Shah, “ Nanotechnology of Concrete : Recent Developments and Future Perspectives ” NANOTECHNOLOGY IN CONSTRUCTION : IN NEAT AND HYBRID CEMENT HYDRATES, (2014) 2–4.
- [۹] M. Jalal, A. Pouladkhan, O.F. Harandi, D. Jafari, Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 90–104. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.001.
- [۱۰] D. Adak, M. Sarkar, S. Mandal, Structural performance of nano-silica modified fly-ash based geopolymer concrete, *Constr. Build. Mater.* 135 (2017) 430–439. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.111.
- [۱۱] M.A. Massa, C. Covarrubias, M. Bittner, I.A. Fuentesvilla, P. Capetillo, A. Von Martens, J.C. Carvajal, Synthesis of new antibacterial composite coating for titanium based on highly ordered nanoporous silica and silver nanoparticles, *Mater. Sci. Eng. C.* 45 (2014) 146–153. doi:10.1016/j.msec.2014.08.057.
- [۱۲] M.S. Morsy, S.H. Alsayed, M. Aqel, Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 145–149. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.046.
- [۱۳] I. Navarro-Blasco, M. Pérez-Nicolás, J.M. Fernández, A. Duran, R. Sirera, J.I. Alvarez, Assessment of the interaction of polycarboxylate superplasticizers in hydrated lime pastes modified with nanosilica or metakaolin as pozzolanic reactives, *Constr. Build. Mater.* 73 (2014) 1–12. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.052.
- [۱۴] Y. Qing, Z. Zenan, K. Deyu, C. Rongshen, Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 539–545. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.09.001.
- [۱۵] A.M. Said, M.S. Zeidan, M.T. Bassuoni, Y. Tian, Properties of concrete incorporating nano-silica, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 838–844. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.044.
- [۱۶] G. Li, Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 1043–1049. doi:10.1016/j.cemconres.2003.11.013.
- [۱۷] ASTM C 128-01. Standard Test Method for Density , Relative Density ( Specific Gravity ), and Absorption of Fine Aggregate. American Society for Testing and Materials, in: 2003.
- [۱۸] ASTM C 127-01. Standard Test Method for Density , Relative Density ( Specific Gravity ), and Absorption of Coarse Aggregate. American Society for Testing and Materials, (2001).
- [۱۹] ASTM C 136-01. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. American Society for Testing and Materials, (2001).
- [۲۰] ASTM C 150-07. Standard Specification for Portland Cement. American Society for Testing and Materials, (2008).
- [۲۱] ASTM C143/C 143M-03. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. American Society for Testing and Materials, (2003).
- [۲۲] ASTM C 109/C 109M-02. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). American Society for Testing and Materials, (2000).
- [۲۳] ASTM C 1202-05. Standard Test Method for Electrical Indicati on of Concrete ’ s Ability to Resist Chloride Ion Penetration. American Society for Testing and Materials, (2017).
- [۲۴] BS 1881, Method for determination of water absorption. British Standards Institution; 2011.
- [۲۵] M. Khanzadi, M. Tadayon, H. Sepehri, M. Sepehri, Influence of nano-silica particles on mechanical properties and permeability of concrete, *Second Int. Conf. Sustain. Constr. Mater. Technol.* Ancona, Italy, June. (2010) 28–30.
- [۲۶] M. Zahedi, A. Akbar, A. Mohammad, Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration, *Constr. Build. Mater.* 78



مرکز تحقیقات  
راه، مسکن و شهرسازی

نهمین کنفرانس ملی بتن ایران  
۱۶ و ۱۵ مهرماه ۱۳۹۶  
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



انجمن علمی بتن ایران



انجمن علمی بتن ایران  
انجمن تخصصی بتن ایران

(2015) 354–361. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.045.

- [۲۷] S. Fallah, M. Nematzadeh, Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume, *Constr. Build. Mater.* 132 (2017) 170–187. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100.