

Investigating the mechanical properties and durability of concrete samples containing Nano-silica under acid rain conditions

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

Alireza Hashemian*

MSc student, Department of Civil Engineering, Saeb Nonprofit Institute, Abhar, Iran.

Omid Bamshad

MSc student, Faculty of Technical and Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Mahdi Mahdikhani*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran.

محمد فلاح شیروانی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، موسسه غیرانتفاعی صائب، ابهر، ایران.

امید بامشاد

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

مهدی مهدی‌خانی*

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

*Corresponding author's email address: mahdikhani@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۰۱

Abstract

In the conditions of acid rain, chemical reactions occur in the concrete structure, which leads to a change in pH. When these reactions continue, concrete begins to lose its mechanical strength, which leads to cracking, weight loss, and finally the destruction of the structure. Since the control of acid rain and its effects on the surrounding environment is unavoidable in some cases, so far researchers have conducted many studies on this category and have provided solutions to eliminate or control its effects. One of the new solutions in this field is the use of nanoparticles. In recent years, studies have been focused on silica nanoparticles, with the aim of increasing the properties of concrete by using this material. Adding nano-silica to concrete in non-acidic (neutral) conditions reduces water permeability in concrete and also increases resistance against chemical attacks. In this article, the mechanical characteristics and durability of concrete containing nano-silica, including weight loss, compressive strength, electrical resistance, and water absorption rate under acidic conditions are investigated. According to the obtained results, with the increase of nano-silica in concrete, the mechanical properties and durability of concrete improve, but with the increase of water acidity, the durability and mechanical properties of concrete decrease.

Keywords

Nano silica, electrical resistance, compressive strength, water absorption, acid rain simulator, sulfuric acid

چکیده

در شرایط باران اسیدی واکنش‌های شیمیایی در سازه بتنی رخ می‌دهد که منجر به تغییر pH می‌شود. زمانی که این واکنش‌ها ادامه می‌یابند 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، شبیه ساز باران اسیدی، سولفوریک اسید

پدیده باران اسیدی در سال‌های پایانی دهه ۱۸۰۰ در انگلستان کشف شد، اما پس از آن تا دهه ۱۹۶۰ به دست فراموشی سپرده شد. اهمیت 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

۱- 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].



4 (3), 2019

دوره ۴، شماره ۳

پاییز ۱۳۹۸

فصلنامه پژوهشی



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

نمود که این امر، برای گیاهان و اشیا واقع در سطح زمین خطرناک است [۵].

نانو فناوری رویکردی جدید است که در زمینه های مختلف دانش و فن وارد شده و تغییراتی را در دیدگاه ها و روش ها ایجاد کرده است. بخشی از تغییرات ایجاد شده به صورت بهبود شرایط فناوری های موجود بوده و بخشی دیگر، که تا کنون کمتر نمود داشته، به ایجاد تغییرات اساسی و دگرگون کننده و تغییر فناوری های موجود منجر خواهد شد. در فناوری بتن هم در سال های اخیر، با ورود فناوری نانو دیدگاه های جدیدی ایجاد شده است [۶-۸]. نانو سیلیس یکی از جدیدترین فناوری ها در فناوری نانو می باشد که به عنوان جایگزین پودر سیلیس به صورت گسترده در بتن استفاده می شود [۹]. با توسعه ی کاربرد نانو سیلیس در بتن، بسیاری از نانو ذرات دیگر مانند نانو آلومینیم [۱۰]، نانو تیتانیوم اکسید [۱۱]، نانو تیوب کربن [۱۲] و پلی کربوسیلات [۱۳] در بتن به کار برده شدند. کینگ و همکاران بررسی هایی بر روی تاثیر نانوسیلیس و پودر سیلیس بر مشخصات بتن و سیمان سخت شده 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 همه ی بررسی های انجام گرفته، نتایج نشان داده است که نانوسیلیس می تواند مشخصات مکانیکی خمیر سیمان سخت شده و بتن را بهبود بخشد. جلال و همکاران تاثیر نانوسیلیس، پودر سیلیس و پودر خاکستر تپ 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 ۳۴۰۰ kg/m³ و ۵۰۰ kg/m³ آماده کرده و مقدار ۱۰٪ پودر سیلیس، ۲٪ نانوسیلیس و ۱۰٪+۲٪ پودر سیلیس و نانو سیلیس را با سیمان جایگزین کردند. نتایج نشان داد که مشخصات مکانیکی بتن در نمونه هایی که محتوی نانوسیلیس و پودر سیلیس بودند بهبود یافته است [۹].

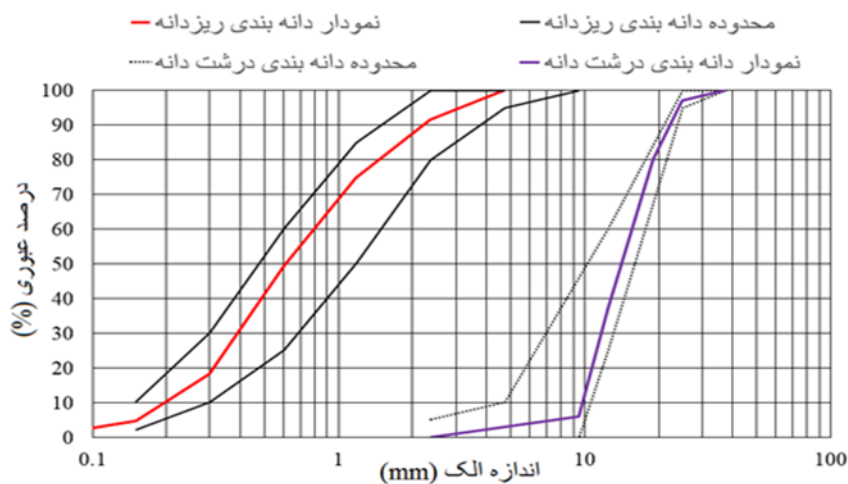
۲- برنامه ی آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

برای تمام نمونه های 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 ماسه ی 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. دانه بندی مصالح ریزدانه و درشت دانه 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 مخلوط های نمونه های بتنی مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات فیزیکی بتن مصرفی در جدول (۱) نشان داده شده است. آب مورد استفاده برای نمونه ها، آب آشامیدنی می باشد. محلول کلونیدی نانوسیلیس مصرفی با دانسیته ۳۰٪ و خلوص ۹۹/۹٪ می باشد. تصویر SEM نانوسیلیس در شکل (۲) نشان داده شده است. همچنین، فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات با وزن مخصوص ۱/۲ کیلوگرم بر لیتر برای دستیابی به کارایی مورد نظر استفاده گردید.

جدول ۱ مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

آزمایش	سیمان تپ II
زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۱۸۶
زمان گیرش نهایی (دقیقه)	۲۷۶
بلین (cm ² /gr)	۳۲۰۰



شکل ۱ منحنی دانه بندی ریزدانه و درشت دانه

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 ۴، ۵/۵، ۷ و ۸ 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.

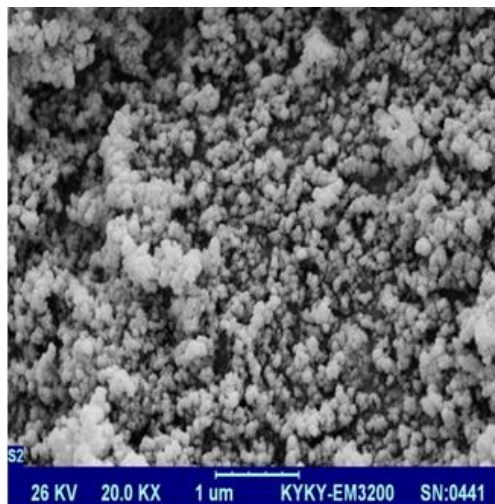
آزمایش کاهش وزن بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری بتنی انجام شده است. این نمونه‌ها پس از ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز قرارگیری در معرض باران اسیدی، به مدت ۲۴ ساعت در معرض دمای آزمایشگاه قرار گرفته و سپس وزن آنها اندازه‌گیری شده است و با توجه به وزن اولیه آنها، درصد کاهش وزن محاسبه شده است.

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 جهته 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



شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) ذرات نانوسیلیس

۲-۲- طرح مخلوط و ساختن نمونه‌ها

در این آزمایش، چهار طرح مخلوط شامل ۰٪، ۲٪، ۴٪ و ۶٪ نانوسیلیس و نسبت آب به سیمان ثابت برابر با ۰/۵ 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 ± 1 سانتی‌متر نگه‌داشته شد. جدول (۲) طرح مخلوط‌های بتن را نشان می‌دهد.

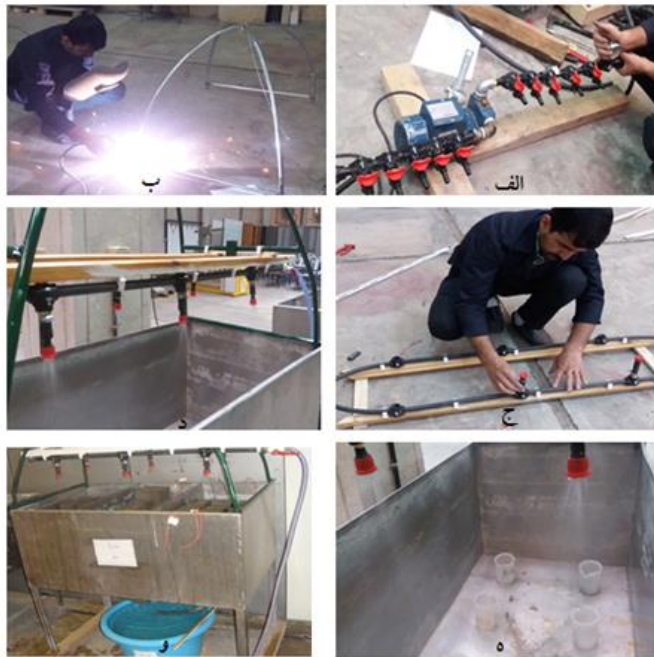
۲-۳- ساخت دستگاه شبیه‌ساز پاشش باران اسیدی

ساخت دستگاه شبیه‌ساز باران اسیدی به مدت دو هفته به طول انجامید. برای شبیه‌سازی باران از نازل‌ها و دوش‌ها و مه‌پاش‌های مختلفی استفاده شد و از بین همه‌ی 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.

۲-۴- آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمایش‌های انجام گرفته

جدول ۲ طرح مخلوط‌های مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های بتنی

شماره ردیف	کد طرح مخلوط	نسبت آب به سیمان	نانو سیلیس (%)	افزودنی (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	نانو سیلیس (kg/m^3)	آب (L/m^3)	سنگدانه (kg/m^3)
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



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

۲-۴- 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 دلایلی حرکت یون‌ها در بتن، بتن دارای قابلیت هدایت الکتریکی می‌باشد. بقینا 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 جهته 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

۲-۵- 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 ۰/۲۳، ۰/۸/۴ و ۰/۱۲/۴ 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 ۰/۱۲/۱۲، ۰/۱۵/۷۹، ۰/۱۱/۴۹ و ۰/۱۲/۴۵ 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 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 ۰/۱۵/۱۱، ۰/۱۲/۳۹ و ۰/۱۴/۸۳ 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 ۰/۳۱/۵۲، ۰/۳۸/۶۳، ۰/۳۸/۱۵ و ۰/۴۱/۳۳ 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]. درصد کاهش وزن نمونه‌های بتنی در جدول (۳)

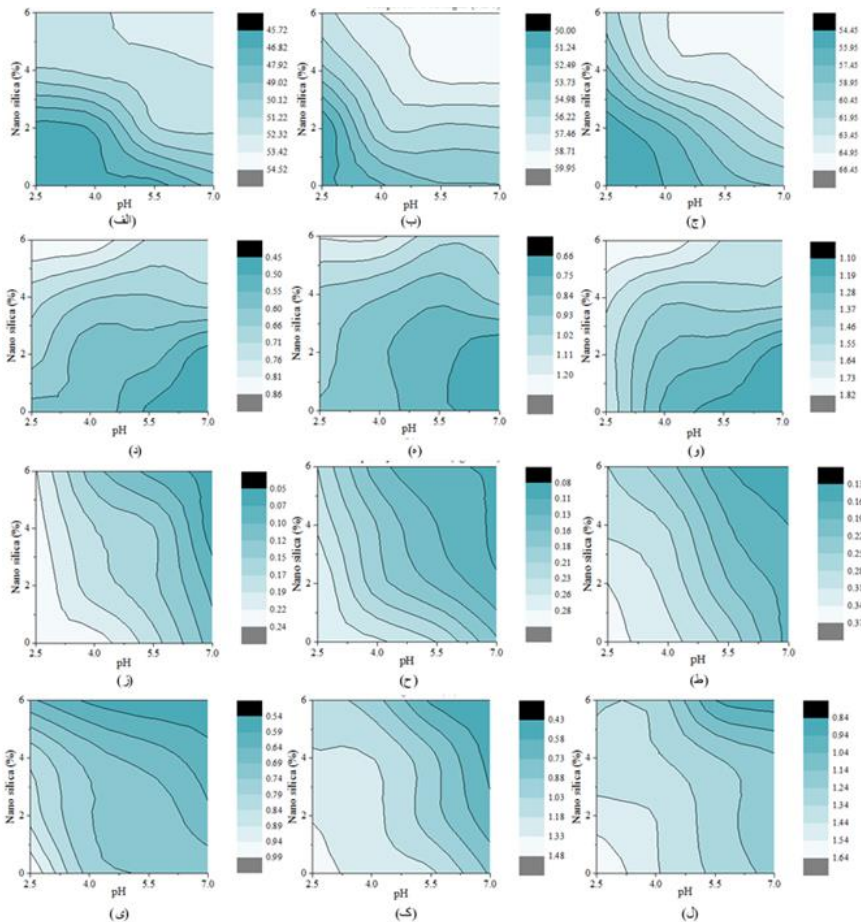
و شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس نتایج، با کاهش درجه اسیدی آب، تخریب و خوردگی نمونه‌های بتنی کاهش یافته و در نتیجه درصد کاهش وزن نمونه‌ها کاهش یافته است. همچنین با افزایش درصد نانوسیلیس، به دلیل کاهش تخلخل، درصد کاهش وزن نمونه‌ها کاهش یافته است. علاوه بر آن، با افزایش سن نمونه‌ها، درصد کاهش وزن افزایش 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 ۰/۲۵/۲۸، ۰/۵۲/۲۷ و ۰/۱۴/۲۲ 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 ۰/۳۴/۰۳۴، ۰/۲۴/۰۶۷، ۰/۲۵/۰۶۷ 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 ۶/۱۹۳٪ 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.

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/t0.5.m2)		
		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



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

می‌کند که به ترک خوردگی، کاهش وزن و نهایتاً تخریب سازه منجر می‌گردد.

در تمام سنین، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی نانوسیلیس به دلیلی اصلاح مرز بین سنگدانه و خمیر سیمان و نقش پرکنندگی نانوسیلیس، از نمونه‌ی مرجع بیشتر بود. همچنین با افزایش pH آب، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی کاهش یافت، به طوری که با تغییر pH از ۲/۵ به ۷ در نمونه‌های ۹۰ روزه حاوی ۶٪ نانوسیلیس، مقاومت فشاری به مقدار ۸۰٪ افزایش داشته است.

به دلیل افزایش خوردگی و در نتیجه افزایش نفوذپذیری نمونه‌ها در اثر افزایش اسیدیته آب، جذب آب موئینه نمونه‌ها افزایش یافت. همچنین رفتار پرکنندگی نانوسیلیس سبب کاهش تخلخل و نفوذپذیری نمونه‌ها شده است. به عنوان مثال، در نمونه‌های حاوی ۶٪ نانوسیلیس، با تغییر pH از ۲/۵ به ۷ جذب آب موئینه نمونه‌های 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 نمونه‌های بتنی افزایش یافته است. همچنین با افزایش اسیدیته آب و خوردگی بیشتر نمونه‌ها، مقاومت

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 ۷۳/۹۱٪، ۶۰/۰۰٪ و 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 ۲۰/۰۰٪، ۲۸/۱۲٪، ۷۴/۴۰٪ و 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].

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله و بر اساس نتایج آزمایش موارد زیر به عنوان نتیجه قابل استخراج می‌باشد:

- در شرایط باران اسیدی واکنش‌هایی در سازه بتنی رخ می‌دهد که منجر به تغییر pH می‌شود. زمانی که این واکنش‌ها ادامه می‌یابند بتن شروع به از دست دادن مقاومت مکانیکی خود

- [۱۱] M.A. Massa, C. Covarrubias, M. Bittner, I.A. Fuentevilla, P. Capetillo, A. Von Marttens, 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-SiO₂ 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-SiO₂, *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 Indication 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 (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.
- الکتریکی نمونه‌ها بیشتر شده است. به عنوان مثال، با افزایش نانوسیلیس از ۲٪ تا ۶٪ در نمونه‌های ۹۰ روزه، مقاومت الکتریکی نمونه‌های 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 نمونه‌های بتنی باعث تخریب ساده‌تر آنها می‌گردد. بنابراین با افزایش نانوسیلیس و کاهش نفوذپذیری و تخلخل، درصد کاهش وزن نمونه‌ها کمتر شده است. همچنین خوردگی بیشتر به دلیل افزایش اسیدیته آب باعث افزایش درصد کاهش وزن نمونه‌های بتنی گشته است.
- #### ۴- قدردانی
- نویسندگان مقاله از اعضای آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه بین-المللی امام خمینی (ره) به علت راهکارهای ارزشمند کمال تشکر را دارند.
- #### ۵- 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.