

Investigating the Role of Structural Fuses in Enhancing the Rapid Reoccupancy of Steel Structures

Esmaeil Javaheri

MSc Student, Department of Structural Civil Engineering, Tehran East Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Peyman Shademan Heydari *

Assistant Professor, Department of Structural Civil Engineering, Tehran East Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Mohammad Ghanooni Bagha

Associate Professor, Department of Structural Civil Engineering, Tehran East Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Mehdi Amri

Associate Professor, Department of Structural Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

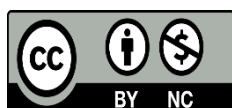
peyman.shademan@iau.ac.ir

Keywords

nano-silica;
sulfate;
wet-dry cycle;
compressive strength;
sulfate accumulation (SO_3)

Abstract

Despite the comfort and convenience brought by technological advances, in the field of concrete deterioration, economic aspects often take precedence over engineering considerations—particularly due to the high costs associated with repairing structures damaged by degradation and corrosion. Considering the importance of deterioration caused by sulfate ions, it is necessary to investigate the durability and service life of marine structures. In this study, concrete specimens containing nano-silica as an additive were produced by replacing 1% of the cement weight with nano-silica. The exposure regime involved wet-dry cycles, with the temperature of the wet phase being variable while the dry phase temperature remained constant. Compressive strength tests conducted after a 28-day curing period revealed that the highest strength values, for specimens exposed for 60 and 90 days, were obtained in sodium sulfate solution at 30 °C. Sulfate penetration and accumulation (SO_3) tests indicated that at 30 °C, the penetration depth of sulfate was lower than at 25 °C. The lowest sulfate content at a depth of 2 cm was observed in the 60-day specimen immersed in a 30 °C solution, whereas the highest sulfate content at a depth of 1 cm occurred in the 90-day specimen held at 25 °C.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

* Corresponding Author

تأثیر تهاجم یون سولفات و چرخه‌های تر و خشک‌شدن بر بتن حاوی ۱ درصد نانوسیلیس

اسماعیل جواهری

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران سازه، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران،

ایران

پیمان شادمان حیدری*

استادیار، گروه مهندسی عمران سازه، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محمد قانونی بقا

دانشیار، گروه مهندسی عمران سازه، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مهدی امری

استادیار، گروه مهندسی عمران سازه، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران

peyman.shademan@iau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۲۰ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: ۲۲ دی ۱۴۰۳

چکیده

علی‌رغم رفاه و آسایشی که دانش فنی برای بشر به وجود آورده است متأسفانه عمدتاً در بحث خرابی بتن، جنبه اقتصادی اهمیت بیشتری نسبت به جنبه‌های مهندسی آن و همچنین هزینه زیادی که صرف بازسازی سازه‌های تخریب‌شده در اثر خرابی و خوردگی می‌گردد، دارد. باتوجه به اهمیت خرابی ناشی از یون سولفات، لازم است در خصوص دوام و طول عمر سازه‌های دریایی مطالعاتی انجام شود. در این تحقیق نمونه‌های بتی حاوی مواد افزودنی نانوسیلیس با جایگزینی نانوسیلیس با ۱٪ از وزن سیمان ساخته شده‌است؛ همچنین دمای محیط سولفاتی در چرخه تر متغیر و خشک ثابت است. در مورد مقاومت فشاری نمونه‌ها بعد از دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه، مشاهده شد بهترین مقاومت نمونه‌هایی که ۶۰ و ۹۰ روز در محلول با دماهای ۲۵ و ۳۰ درجه قرار گرفته‌اند، متعلق به نمونه‌هایی است که در محلول سدیم ۳۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند. همچنین در تست نفوذ و تجمع سولفات (SO_3) نشان داده شد که در محلول با دمای ۳۰ درجه میزان نفوذ عمق سولفات کمتر از نمونه‌های قرارگرفته در محلول ۲۵ درجه است. همچنین کمترین میزان سولفات در عمق ۲ سانتی‌متر نمونه ۶۰ روزه قرارگرفته در محلول ۳۰ درجه است و بیشترین مقدار در عمق ۱ سانتی‌متری نمونه ۹۰ روزه قرارگرفته در محلول ۲۵ درجه می‌باشد.

واژگان کلیدی: نانوسیلیس، سولفات، چرخه تر و خشک‌شدن، مقاومت فشاری، تجمع سولفات SO_3

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

مسئله‌ای که اخیراً موردتوجه دانشمندان علم بتن قرارگرفتن است، استفاده از نانومواد در بتن است. محققان با آزمایش‌های مختلف به این نتیجه رسیده‌اند که مشخصات بتن حاوی نانومواد در مقایسه با بتن معمولی، تحت‌تأثیر واکنش‌های شیمیایی نانومواد با ذرات سیمان و بلورهای هیدروکسید موجود در سیمان، عملکرد ماده مرکب بتنی را به‌شدت تحت‌تأثیر قرار می‌دهد [۱]. فناوری نانو در سال‌های اخیر سبب تحولات وسیعی در دانش بشری شده است. نانوذرات به دلیل ویژگی‌های خاص فیزیکی و شیمیایی در بسیاری از زمینه‌ها برای ساخت مواد جدید باقابلیت‌های منحصربه‌فرد به کار می‌روند. از آنجایی‌که بتن یکی از پرمصرف‌ترین مواد در مهندسی عمران است و این ماده مصنوعی ساخت دست بشر، نواقصی مانند تخلخل، تغییرات حجمی بتن ناشی از گرمایی و ایجاد ترک دارد؛ لذا جهت رفع برخی از نواقص این ماده مصنوعی از نانوسیلیس در صنعت بتن استفاده شده است که می‌تواند نقش یک پوزولان مصنوعی بسیار فعال را در بتن ایفا نماید [۲]. یکی از مهم‌ترین عوامل شایع و تأثیرگذار در کاهش دوام بتن حمله سولفات‌ها در بتن است. خرابی سولفاتی مشکلی است که عمر سرویس‌دهی سازه‌های بتنی را کاهش می‌دهد و حال‌آنکه یکی از موضوعات پر اهمیت در طراحی و ساخت سازه‌های بتنی، عمر سرویس‌دهی آن‌ها است [۳]. محققان به بررسی تأثیر نانوسیلیس بر نفوذپذیری بتن خود متراکم در محیط سولفاته پرداختند و نتایج آزمایش آن‌ها حاکی از این است که افزودن نانوسیلیس توانسته بر خواص مکانیکی بتن خود تراکم تأثیرگذار باشد. به دلیل این‌که نانوسیلیس، تخلخل در سیمان هیدراته شده را به حداقل رسانده و نفوذپذیری را تا حد زیادی کاهش می‌دهد، دوام بتن در برابر عوامل مخرب سولفاتی که باعث کاهش روند کسب مقاومت فشاری در سنین بالاتر می‌گردد را افزایش می‌دهد [۴]. محققان دیگر با تحلیل احتمالی مونت‌کارلو به بررسی پارامترهای مؤثر بر شروع خوردگی بتن در شرایط جزرومدی پرداختند و دریافتند که با درنظرگرفتن احتمال خرابی ۱۰٪، عمر مفید سازه در شرایط جزرومدی با عمق همرفت ۱۰ میلی‌متر، نسبت به حالت بدون جذر و مدی در حدود ۱۵ سال کمتر است و عدم توجه به پوشش بتی در حین اجرا باعث کاهش عمر سازه‌های بتن مسلح می‌گردد

[۵]. عامل دیگری که باعث کاهش عمر مفید سازه‌های بتن مسلح می‌شود قرارگیری در معرض شرایط جزرومدی سواحل دریاها و چرخه‌های تر و خشک‌شدن متوالی است. زیرا این حالت باعث ورود کلراید بیشتر در سطح بتن می‌شود که تخریب بتن را در مجاورت میلگردهای مدفون را به وجود می‌آورد، زیرا کلراید واردشده به بتن باعث زنگ‌زدگی میلگردهای مدفون در بتن می‌شود. محققان به بررسی آثار افزایش چرخه‌های تر و خشک‌شدن روی نفوذ یون کلراید در بتن اشباع‌نشده (شبیه‌سازی شرایط پاششی) پرداختند و نتایج مطالعاتشان نشان داد که میزان نفوذ یون کلراید در بتن با زیادشدن تعداد چرخه‌های تر و خشک‌شدن روزانه افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که غلظت کلراید نفوذ کرده در عمق ۵۰ میلی‌متر و غلظت کلراید حداکثر در بتنی با ده سال در معرض چرخه‌تر و خشک‌شدن روزانه قرار گرفته نسبت به بتنی که در شرایط مستغرق واقع گردیده است، به طور متوسط به ترتیب ۴/۲ و ۰/۲ برابر شده است. این نسبت‌ها با افزایش تعداد چرخه‌های روزانه تا بیست و چهارچرخه، به ترتیب به ۲/۴ و ۷/۳ برابر افزایش‌یافته است [۶]. پژوهشگران در آزمایش‌ها خود به این نتیجه رسیدند که افزایش دما از ۲۳ درجه سانتی‌گراد به ۴۳ درجه سانتی‌گراد و ۲۳ درجه سانتی‌گراد به ۶۳ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش عمق ناحیه همرفتی بتن بدون مواد پوزولانی به میزان ۷۳٪ و ۹۱٪ و بتن حاوی مواد پوزولانی به میزان ۱۰۴٪ و ۱۲۴٪ شده است. همچنین افزایش دما از ۲۳ درجه سانتی‌گراد به ۴۳ درجه سانتی‌گراد و ۲۳ درجه سانتی‌گراد به ۶۳ درجه سانتی‌گراد به ترتیب باعث افزایش میزان رطوبت ورودی در هر چرخه جزرومد در بتن بدون مواد پوزولانی به میزان ۱۱۰٪ و ۱۷۵٪ و بتن حاوی مواد پوزولانی به میزان ۱۳۹٪ و ۲۰۲٪ درصد شده است. پژوهشگران دیگر به بررسی دوام مکانیسم شکست بتن اصلاح‌شده با نانوذرات و الیاف پلی‌پروپیلن تحت سیکل‌های انجماد و ذوب و حمله سولفات پرداختند. در این مطالعه نانو SiO_2 و نانو TiO_2 و الیاف پروپیلن برای بررسی دوام مکانیسم شکست بتن تحت سیکل‌های انجماد، ذوب و حمله سولفات به بتن اضافه شدند. مقاومت فشاری، تغییر جرم، ریزساختار و ویژگی‌های منفذی برای ارزیابی دوام نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که پلی‌پروپیلن به بهترین وجه می‌تواند دوام بتن را تا ۶۷٪

تخلخل را کاهش می‌دهد و تراکم سازه را در مقیاس میکروسکوپی تسهیل می‌کند. با مخلوط کردن نانوسیلیس و الیاف بازالت در آزمایش‌ها، نانوسیلیس می‌تواند چسبندگی بین فیبروماتریس را از طریق اثر جفت‌شدن افزایش دهد و به طور مؤثر اثر تقویت فیبر بازالت را بهبود بخشد. این بررسی بر روی آثار مواد اصلاح‌شده مانند نانوسیلیس و الیاف بازالت بر ساختار رابط، خواص مکانیکی، مقاومت کربنی شدن، مقاومت در برابر چرخه یخ‌زدن و ذوب‌شدن، مقاومت در برابر فرسایش نمک و مقاومت بتن بازیافتی در دمای بالا تمرکز دارد [۹].

علی‌رغم اهمیت خرابی ناشی از یون سولفات و مرور بر ادبیات فنی لازم است در خصوص دوام و طول عمر سازه‌های دریایی به‌خصوص در مورد خرابی ناشی از اثر یون سولفات و نفوذ این یون‌های مهاجم در بتن، مطالعات بیشتری انجام شود. به همین دلیل در این تحقیق سعی شده در ابتدا به بررسی چگونگی حمله سولفات، واکنش‌های شیمیایی که در داخل بتن، افزایش حجم داده و مدل‌های ارائه شده توسط محققین گذشته پرداخته شود. همچنین باتوجه به مرور بر ادبیات انجام شده در خصوص تأثیر چرخه‌های تر و خشک‌شدن که در این خصوص تحقیقات بسیار کم‌تری انجام‌شده بود و کاربرد مواد نانو و تأثیر دما در این شرایط موردتوجه قرار گیرد؛ بنابراین در این تحقیق نرخ نفوذ یون سولفات و مقاومت فشاری نمونه بتنی با ساخت نمونه‌های بتن حاوی نانوسیلیس در آزمایشگاه و در نظر گرفتن تأثیر دمای محلول بر روی تحت شرایط محیطی مهاجم سولفاتی و تحت اثر چرخه‌های تر و خشک‌شدن بررسی می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های بتنی از مصالح (شن، ماسه، سیمان و آب)، پوزولان (نانوسیلیس) و برای ایجاد محیط سولفاتی از ماده شیمیایی سولفات سدیم استفاده شده است. درشت‌دانه مصرفی در این تحقیق به‌صورت مخلوطی از شن شکسته و طبیعی است که طبق آیین‌نامه ASTM C33 با حداکثر اندازه اسمی ۲۵ میلی‌متر انتخاب شده است و ریزدانه مصرفی به‌صورت مخلوطی از ماسه شکسته و طبیعی

بهبود بخشد. نانوذرات تنها می‌توانند مقاومت بتن را در ۱۲۰ چرخه بهبود ببخشند و مقاومت طولانی‌مدت در برابر سرما را نمی‌تواند افزایش دهد. یک تئوری شکست کامپوزیت (یخ‌زدگی - بالارفتن نمک - خوردگی) برای توضیح مکانیسم شکست بتن تحت حمله یخ‌بندان و سولفات پیشنهاد شد. این تئوری نشان داد که انجماد آب آسیب بیشتری نسبت به سولفات سدیم وارد می‌کند و مشخصه منافذ مهم‌ترین عامل مؤثر بر دوام بتن است [۷]. محققان به بررسی تأثیر نسبت خشک به ترشدن در مکانیسم انتقال واکنش سولفات در بتن پرداختند. در این مطالعه اثر نسبت‌های خشک به تر (۱:۱، ۱:۳، ۱:۵، ۱:۱۰) بر رفتار انتقال و مکانیسم واکنش سولفات در بتن بررسی شد. غلظت سولفات‌های محلول در آب و محلول در اسید از طریق کروماتوگرافی یونی اندازه‌گیری شد و تغییرات کانی‌شناسی و خصوصیات ریزساختاری برای آنالیز کمکی برای تعیین نامطلوب‌ترین نسبت خشک به مرطوب موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌داد که انتقال یونی سولفات شامل واکنش شیمیایی و تبلور فیزیکی است که در آن حملات سولفات شیمیایی بر فرایند غالب است و نسبت حملات فیزیکی سولفات به تدریج افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌داد که غلظت یون‌های سولفات با افزایش نسبت به خشک به تر افزایش می‌یابد. نسبت خشک به تر (۱:۷) برای ارتقای انتقال یون‌های سولفات به داخل کارآمدتر است [۸]. در مطالعه محققان دیگر از سیمان پرتلند معمولی (P.O.42.5R)، خاکستر بادی (۲۰ درصد جایگزینی) و ماسه رودخانه محلی به‌عنوان سنگ‌دانه ریز با مدول ظرافت حدود ۲/۸۶ و دو سنگ‌دانه درشت بازالت با قطر ۵ تا ۲۰ میلی‌متر استفاده شد و تمامی نمونه‌ها در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد با ۲ درجه تدرانس سانتیگراد عمل‌آوری شدند.

محققان به مطالعه دوام بتن بازیافتی اصلاح‌شده با نانوسیلیس و الیاف بازالتی پرداختند. در این مطالعه برای مقابله با ضعف مکانیکی و دوام بتن سنگ‌دانه بازیافتی، آثار افزودن نانوسیلیس، الیاف بازالتی و افزودن ترکیبی نانوسیلیس مطرح‌شده است. نتایج نشان می‌داد که افزودن الیاف بازالتی باعث کاهش تولید و توسعه ریزترک‌های اولیه در بتن سنگ‌دانه بازیافتی می‌شود و از ایجاد و انتشار ریزترک‌ها در ملات جلوگیری می‌کند. افزودن نانوسیلیس باعث پر شدن ریزترک‌های بتن می‌شود که

مخصوص (به روش بلین) ۰/۲۸۵ مترمربع بر گرم بوده است. گیرش اولیه سیمان ۱۵۰ دقیقه و گیرش ثانویه آن ۱۸۵ دقیقه است. مقاومت ۳، ۷ و ۲۸ روزه آن به ترتیب ۱۸/۵، ۳۰/۴، ۴۲ مگاپاسکال بوده و تجزیه شیمیایی سیمان بر اساس کاتالوگ شرکت در جدول ۱ آمده است. این سیمان طبق استاندارد ملی به شماره ISIR389 تولید شده است.

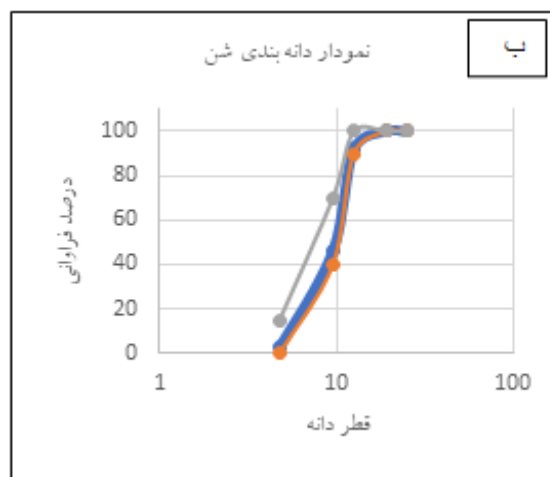
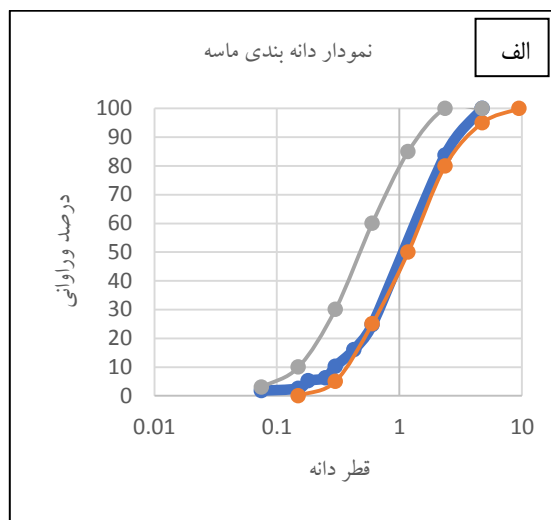
جدول ۱- ترکیب‌های شیمیایی تشکیل دهنده سیمان (استاندارد کارخانه)

ترکیب شیمیایی	MgO	LOI	I.R
سیمان	۷۷/۲	۵/۱	۱۱/۰

آبی که برای ساخت بتن استفاده می‌شود باید تمیز و عاری از مواد زیان‌آور نظیر روغن‌ها، اسیدها، بازها، نمک‌ها و مواد آلی و قندی باشد و دارای PH بین ۵ تا ۸/۵ باشد. به‌طورکلی مصرف آب آشامیدنی برای ساخت و عمل‌آوری بتن مناسب است. آب اختلاط مورد استفاده در این پژوهش آب شرب منطقه قیام دشت در استان تهران است که نیازی به آزمودن نداشت.

نانوسیلیس ماده‌ای با اندازه ذرات ریز بوده که باعث پر نمودن حفرات نمونه‌ها و کاهش نفوذپذیری در نمونه‌ها می‌گردد. نانوسیلیس مورد استفاده در این تحقیق به‌صورت پودر SIPERNAT 820A ساخت کشور آلمان است. جهت پراکندگی یکنواخت پودر نانوسیلیس در بتن، قبل از اضافه کردن آب، طرح اختلاط با آب طرح مخلوط گردید و به‌خوبی هم زده شد سپس محلول ترکیبی آب و نانوسیلیس به ترکیب مواد خشک (مواد سیمانی به همراه سنگ‌دانه‌ها) اضافه گردید. در این برنامه آزمایشگاهی به‌منظور بررسی اثر نانوسیلیس بر روی خواص بتن در این طرح اختلاط از نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ در نظر گرفته شده است و از نانوسیلیس با ۱ درصد وزنی سیمان استفاده شده است. در طرح اختلاط مورد استفاده جهت رسیدن به اهداف تحقیق نمونه‌ها استفاده از مواد افزودنی نانوسیلیس ساخته شد که در همه طرح‌های ساخته شده نسبت آب به سیمان، عیار سیمان و نوع دانه‌بندی ثابت در نظر گرفته شده است. نمونه‌ها مطابق جدول ۲ است. برای ایجاد محیط سولفات‌ها از سولفات به‌صورت پودری استفاده شده است. این ماده محصول کشور آلمان است. درصد اختلاط آن با آب ۱۰٪ نسبت وزنی کل محلول است.

طبق آیین‌نامه C33 ASTM با حداکثر اندازه اسمی ۴/۷۵ میلی‌متر انتخاب شد. حدود دانه‌بندی در منحنی دانه‌بندی در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی الف) ریزدانه مصرفی، ماسه ب) درشت‌دانه مصرفی، شن

سیمان مورد استفاده از نوع سیمان پرتلند تیپ II محصول کارخانه سیمان تهران دارای وزن مخصوص ۳۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و سطح



شکل ۲- تنظیم دمای هر مخزن به وسیله هیتر و ترموستات

در این تحقیق از وسایل و ابزار مختلفی از جمله هیتر به منظور گرم کردن و کنترل دمای محلول هر مخزن و ترموستات صفر تا ۴۰ درجه سانتیگراد برای روشن و خاموش کردن هیتر برای کنترل و رسیدن به دمای موردنظر هر محلول استفاده شد. همچنین از آون آزمایشگاهی به منظور قرارگیری نمونه‌ها در چرخه خشک با دمای ۶۰ درجه استفاده گردید.

پس از ساخت نمونه‌ها طبق درصد اختلاط‌های جدول ۲ و ریختن و متراکم کردن آن‌ها در قالب‌های مکعبی مانند شکل ۳، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در این قالب‌ها می‌مانند و بعد از ۲۴ ساعت نمونه‌ها را از قالب‌ها بیرون آورده و تمامی نمونه‌ها را در حوضچه آب معمولی ۲۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۸ روز جهت عمل‌آوری قرار می‌دهیم.



شکل ۳- ریختن و متراکم کردن بتن ساخته شده در قالب مکعبی

این مقدار در کارهای تحقیقاتی مختلف برحسب میزان سولفات موجود در آب یا خاک هر منطقه می‌تواند متفاوت انتخاب شود [۸]. برای ترکیب آن، آب را داخل ظرف موردنظر ریخته و در حال هم‌زدن سولفات اندک‌اندک اضافه می‌شود تا به طور کامل در آب حل شود. مانند شکل ۲ برای تنظیم نگه‌داشتن دمای محلول هر مخزن از هیتر ۱۰۰۰ وات و ترموستات صفر تا ۴۰ درجه مکانیکی استفاده شده است که به ترتیب دمای محلول در ۲۵ و ۳۰ درجه سانتیگراد کنترل شد. قابل ذکر است که محلول ساخته شده با سولفات سدیم درون ظرفی از جنس PVC آنتی‌باکتریال است. برای انجام تست آنالیز مواد از آزمون XRF استفاده شده است [۱۰].

جدول ۲- طرح اختلاط نمونه‌های بتی طبق آیین‌نامه آبا

نمونه	حاوی نانوسیلیس (۱N)
درصد نانوسیلیس جایگزین سیمان	۱٪ (۴/۵ kg)
نوع رده بتن	۳۵C
وزن مخصوص هر مترمکعب بتن (kg)	۲۳۰۰
درصد آب نسبت به وزن سیمان در	۰/۴۵ (۲۰۲/۵ kg)
درصد درشت‌دانه (شن)	۴۵٪ (۷۴۱/۶ kg)
درصد ریزدانه (ماسه)	۵۵٪ (۹۰۰ kg)
وزن سیمان در هر مترمکعب به (kg)	۴۴۵/۵ (kg)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش نمونه مکعبی بتن در واقع یک ایده کلی از تمامی مشخصات بتن به ما ارائه می‌دهد. با همین آزمایش می‌توان تشخیص داد که مقاومت بتن در برابر فشار به حد کافی مناسب کار ما است یا خیر. مقاومت فشاری بتن به عوامل مختلفی همچون نسبت آب به سیمان، مقاومت سیمان، کیفیت مواد بتن، کنترل کیفیت در طول تولید بتن و غیره بستگی دارد. نمونه‌های بتن را پس از عمل‌آوری در دوره ۲۸ روزه عمل‌آوری، پس از دوره ۶۰ روزه و ۹۰ روزه (بعد از عمل‌آوری و قرارگرفتن به تعداد روزهای گفته شده در چرخه تر و خشک) در دستگاه آزمایش مقاومت فشاری؛ مانند شکل ۵-الف قرار گرفت. در این دستگاه، بارگذاری به صورت دقیقه‌ای ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش می‌یابد [۱۱]. تا نمونه شکسته شود (شکل ۵-ب). مقدار بارگذاری در لحظه‌ی شکست بتن، میزان مقاومت فشاری بتن را نمایش می‌دهد.



شکل ۵-الف) دستگاه مقاومت فشاری (ب) شکسته شدن بتن پس از اعمال فشار

سپس نمونه‌ها برای سنین ۶۰ و ۹۰ تحت شرایط تر (قرارگرفتن در محلول سولفات و یا آب معمولی) و خشک (قرارگرفتن در آون با دمای ۶۰ درجه) قرار گرفتند تا برای آزمایش‌های مختلف مورد استفاده و بررسی قرار گیرند. بدین صورت که ۲ عدد از نمونه‌ها در محیط آب معمولی، ۴ عدد از نمونه‌ها در آبی که به میزان ۱۰ درصد وزنی آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد سولفات سدیم در آن حل شده، ۴ عدد از نمونه‌ها در آبی که به میزان ۱۰ درصد وزنی آب با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد سولفات سدیم در آن حل شده مورد عمل‌آوری برای چرخه تر مانند شکل ۴-الف و مانند شکل ۴-ب برای چرخه خشک شدن نمونه‌ها به داخل آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد؛ و این دو عمل به صورت چرخه سه روز در محیط آب سولفات و سه روز در داخل آون برای خشک شدن قرار گرفت.



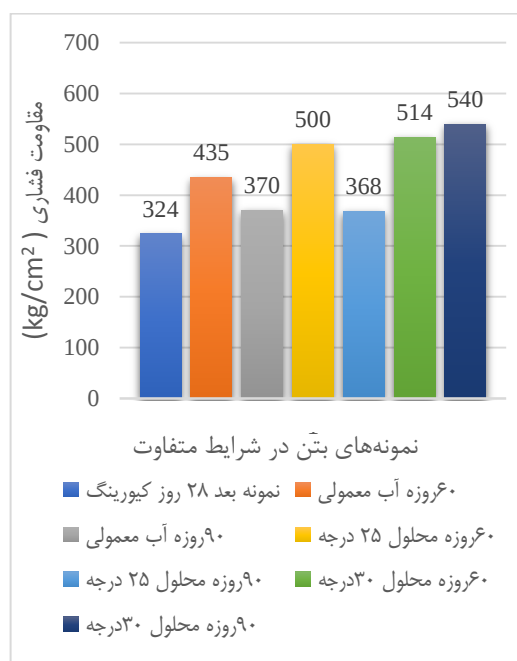
شکل ۴-الف چرخه تر (ب) چرخه خشک

تشکیل اترینگایت در مقدار کم که منجر به پر کردن فضاهای خالی هم می شود باعث افزایش مقاومت می شود. ولی در ادامه فرایند تشکیل اترینگایت، بعد از پر کردن حفرات ترک خوردگی و کاهش ظرفیت آغاز می شود. مقاومت فشاری در زمان های ۶۰ و ۹۰ روزه در محلول سولفات با دمای ۳۰ درجه همواره افزایش می یابد.

۳-۲- آزمایش نفوذ سولفات

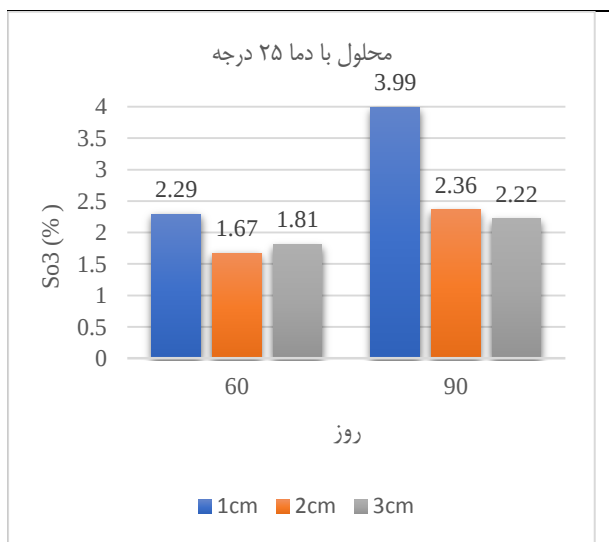
به منظور تعیین مقدار نفوذ سولفات در عمق های ۱، ۲ و ۳ سانتی متری نمونه از روش آنالیز شیمیایی به روش XRF استفاده شد (با استاندارد LSCW01-1). آنالیز XRF انجام گرفته در پژوهشکده دانشگاه علم و صنعت ایران انجام گرفته است. این آنالیز یک روش تحلیلی است که می تواند برای تعیین ترکیب شیمیایی طیف گسترده ای از انواع نمونه از جمله مواد جامد، مایعات، مواد آبی و پودرهای سست استفاده شود [۱۰]. اساس کار انجام این آنالیز تعامل بین پرتوهای الکترونی و اشعه X با نمونه ها می باشد. نحوه کار با دستگاه XRF و آماده سازی نمونه مطابق شکل ۷ به روش پودرهای سست انجام گرفت؛ بدین صورت که در حدود ۱۵ گرم از نمونه را درون یک محفظه پلاستیکی دارای یک فیلم پلاستیکی محافظ ریخت و سپس به وسیله دستگاه آزمایش را انجام داد.

طبق شکل ۶ با جایگزین کردن نانوسیلیس به جای مقداری از سیمان به نسبت یک درصد وزنی مقاومت فشاری نسبت به نمونه ۲۸ روزه دوره عمل آوری در زمان های ۶۰ و ۹۰ روزه و در آب معمولی با دمای محیط تا ۳۴ درصد در نمونه های ۶۰ روزه، ۱۴ درصد در نمونه های ۹۰ روزه افزایش می یابد. لازم به ذکر است نمونه های موجود در آب معمولی نیز تحت شرایط چرخه قرار داشتند؛ ولی دما و محیط تر مانند شرایط عمل آوری است که نشان از تأثیر بیشتر شرایط محیطی و چرخه تر و خشک شدن نسبت به زمان عمل آوری دارد.



شکل ۶- تغییرات مقاومت فشاری نمونه های مختلف

با جایگزین کردن نانوسیلیس با نسبت ذکر شده، در زمان های ۶۰ و ۹۰ روزه در محلول سولفات با دمای ۲۵ درجه تا ۵۴ درصد در نمونه های ۶۰ روزه افزایش می یابد، ۱۴ درصد در نمونه های ۹۰ روزه افزایش می یابد. در نمونه های قرار گرفته در محلول سولفات با افزایش زمان ابتدا به دلیل



شکل ۸- مقدار تجمع سولفات در اعماق مختلف در نمونه بتنی قرار گرفته در محلول ۲۵ درجه

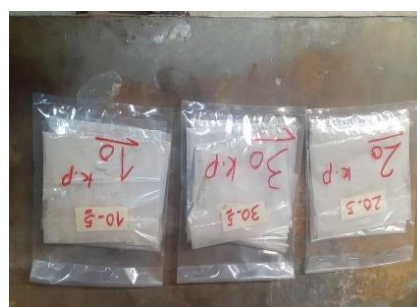
باتوجه به شکل ۸ دیده می‌شود در نمونه حاوی ۱٪ نانوسیلیس در محلول سولفات در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، در عمق ۱ سانتی‌متر میزان تجمع سولفات در ۹۰ روز بیشتر از ۶۰ روز است. همچنین دیده می‌شود که کمترین میزان تجمع سولفات با اختلاف ناچیز در عمق ۲ سانتی‌متر در ۶۰ روز است که البته بیشتر شدن یون‌های اندازه‌گیری شده در عمق ۳ سانتی‌متر می‌تواند ناشی از سولفات کم اولیه موجود در سیمان یا حباب‌های بیشتر غیر عمد در این ناحیه و تجمع سولفات در خلل و فرج این بخش و در نهایت کمتر شدن نفوذ به عمق بیشتر است که این به دلیل عمل رفت و برگشت در زمان چرخه تر و خشک است. بعلاوه در زمان‌های ۹۰ روز دیده می‌شود که میزان تجمع سولفات در عمق ۱ سانتی‌متر بیشتر از ۲ سانتی‌متر و بیشتر از ۳ سانتی‌متر است. به طور کلی مشاهده می‌شود که روند منحنی یون‌های نفوذی به عمق بتن کاهشی می‌باشد.



الف



ب



ج

شکل ۷ - قطعه قطعه کردن نمونه‌ها (ب) پودر کردن هر قطعه (ج) بسته‌بندی قطعه‌های پودر شده

با انجام آزمایش XFR نتایج و نمودارهای زیر حاصل شده است. با جایگزین کردن نانوسیلیس به نسبت ۱ درصد وزنی به جای سیمان مقاومت فشاری نسبت به نمونه ۲۸ روزه با درصد‌های مشابه در زمان‌های ۶۰ و ۹۰ روزه در محلول سولفات با دمای ۳۰ درجه تا ۵۹ درصد در نمونه‌های ۶۰ روزه افزایش می‌یابد، ۶۷ درصد در نمونه‌های ۹۰ روزه افزایش می‌یابد که دلیل این اختلاف‌های مقاومتی اترینگایت خلل و فرج نمونه‌ها است.

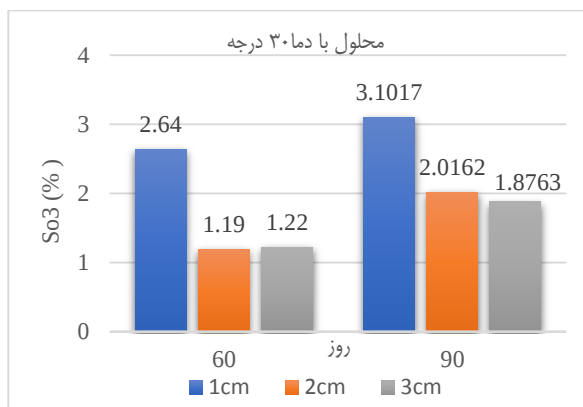
۴ - نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیر یون سولفات و چرخه‌های تر و خشک شدن بر روی بتن حاوی نانوسیلیس، با استفاده از جایگزین کردن ۱٪ وزنی نانوسیلیس به جای سیمان و انجام آزمایش مقاومت فشاری و بررسی نفوذ عمق سولفات به روش اندازه‌گیری انباشتگی سولفات (SO_3) در عمق‌های ۱، ۲ و ۳ سانتی‌متری نمونه‌ها به وسیله XRF مورد ارزیابی قرار گرفت. با تغییر دمای محلول، میزان نفوذ و میزان انباشتگی یون سولفات در عمق‌های مختلف نمونه‌های بتنی در زمان‌های ۶۰ و ۹۰ روز و در نتیجه میزان اثرگذاری یون سولفات بر روی بتن حاوی نانو سیلیس تحت چرخه‌های تر و خشک شدن بررسی گردید. نتایج حاصل به شرح زیر می باشد:

- تأثیر کاهش شرایط محیطی و چرخه تر و خشک شدن بر کاهش مقاومت فشاری نسبت به تأثیر افزایشی زمان عمل‌آوری بیشتر است.
- مقاومت نمونه‌هایی که در محلول با دمای ۲۵ درجه قرار گرفته‌اند اگر چه به دلیل تأثیر دمای بیشتر در عمل‌آوری در زمان‌های ابتدایی (تا ۶۰ روز) و پر کردن حفرات خالی ناشی از هوای غیر عمدی بتن، به علت تشکیل کم اترینگایت، مقاومت بیشتری از نمونه‌های مشابه عمل‌آوری معمولی داشتند، اما بعد از گذشت زمان بیشتر (۹۰ روز) میزان افت مقاومت نمونه از نمونه مشابه شاهد (عمل‌آوری معمولی) بیشتر شده است.

- در نمونه‌هایی که در محلول با دمای ۳۰ درجه قرار گرفته‌اند، به دلیل تأثیر دمای بیشتر در عمل‌آوری و همچنین اختلاف کمتر دمای چرخه تر و خشک، روند تغییرات مقاومت همواره افزایشی بوده است.
- در تست نفوذ و تجمع سولفات (SO_3) نشان داده شد که روند تغییرات نفوذ سولفات (SO_3) در عمق نمونه با تغییرات مقاومت فشاری رابطه مستقیم دارد.

- در تست نفوذ و تجمع سولفات (SO_3) نشان داده شد که روند افزایش نفوذ در هر دو دمای محلول در طول زمان افزایشی است. اما روند این افزایش در نمونه‌هایی که در محلول با دمای ۳۰ درجه به دلیل اختلاف کمتر دمای چرخه تر و خشک و همچنین تأثیر دمای بیشتر محلول که به عمل‌آوری نمونه کمک می‌نماید، کمتر می‌باشند.
به طور کلی با مقایسه اعداد عمق نفوذ سولفات در محلول ۱٪ نانو سیلیس در دمای ۲۵ و ۳۰ درجه، مقدار تجمع سولفات در حالت‌های مشابه در دمای ۳۰ درجه کاهش پیدا کرده است که این خود می‌تواند



شکل ۹- مقدار تجمع سولفات در اعماق مختلف در نمونه بتنی قرار گرفته در محلول ۳۰ درجه

باتوجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود در نمونه قرار گرفته در محلول سولفات در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، در عمق ۱ سانتی‌متر تجمع سولفات در ۹۰ روز بیشتر از ۶۰ روز می‌باشد که مشابه همین حالت در دمای ۲۵ درجه است. همچنین از شکل ۹ مشاهده می‌شود روند کاهش نفوذ سولفات در عمق نمونه‌ها، در محلول‌هایی با درصد یکسان مطابق دلایل ذکر شده در هر دو حالت یکسان می باشد. به طور کلی دیده می‌شود که با اضافه شدن عمق میزان تجمع SO_3 کاهش یافته است. به علاوه در عمق ۱، ۲ و ۳ سانتی‌متر مشاهده شده که میزان تجمع سولفات با افزایش زمان اضافه شده است. با مقایسه نتایج XRF می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دما باعث افزایش عمق ناحیه همرفتی بتن و باعث افزایش میزان رطوبت ورودی در هر چرخه جزر و مد در بتن حاوی مواد پوزولانی می‌شود که منطبق بر نتایج نعمتی چاری و همکاران است [۶].

باتوجه به دو نمودار شکل ۸ و ۹ افزایش تجمع سولفات از ۶۰ تا ۹۰ روز در نمونه‌های قرار گرفته در محلول ۲۵ درجه در عمق ۱ سانتی‌متر ۷۴٪ بیشتر، در ۲ سانتی‌متر ۴۱ درصد بیشتر و در ۳ سانتی‌متر ۲۳٪ بیشتر می‌شود؛ و در نمونه‌های قرار گرفته در محلول ۳۰ درجه از ۶۰ تا ۹۰ روز در عمق ۱ سانتی‌متر ۱۸ درصد افزایش یافته، در ۲ سانتی‌متر ۶۲ درصد افزایش یافته و در ۳ سانتی‌متر ۵۴ درصد افزایش یافته؛ که این خود نشان می‌دهد میزان نفوذ و تجمع سولفات در نمونه بتن‌های حاوی ۱٪ وزنی سیمان نانو سیلیس در ۲۵ درجه طی زمان نفوذ و تجمع کمتر است.

sulfate attack. Cold Regions Science and Technology. 2021;188:103301.

<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103301>

[8] Wang K, Guo J, Yang L. Effect of dry-wet ratio on sulfate transport-reaction mechanism in concrete. Construction and Building Materials. 2021;302:124418.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124418>

[9] Zheng Y, Zhuo J, Zhang P. A review on durability of nano-SiO₂ and basalt fiber modified recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials. 2021;304:124659.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124659>

[10] Brouwer P. Theory of XRF. Almelo, Netherlands: PANalytical BV. 2006.

<https://www.iotcco.com/uploads/VirtualTeaching/Articles/PANalytical/PANalytical%20XRF%20theory.pdf>

[11] Institute of Standards and Industrial Research of IRAN ... ASTM C39/C39M-05, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical. Concrete Specimens.

نشان دهنده بالاتر بودن مقاومت فشاری در نمونه‌های قرارگرفته در محلول ۳۰ درجه باشد. این موضوع همچنین به کم شدن اختلاف دمای چرخه تر و خشک شدن نیز مرتبط باشد.

مراجع

[1] Tadayon MKM, Sepehri H, Sepehri M, editors. Influence of nano-silica particles on mechanical properties and permeability of concrete. The 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies; 2010.

<http://dx.doi.org/10.1515/ntrev-2025-0151>

[۲] رمضانیان پور عا، مروج جهرمی س، مهدی خانی م، مودی ف. مقایسه اثرات نانو سیلیس و دوده سیلیس بر روی ریزساختار و دوام نمونه های بتنی. مهندسی عمران امیرکبیر (امیرکبیر). ۴۴؛ ۱۳۹۱

<https://doi.org/10.22060/ceej.2012.98>

[3] Marchand J, Odler I, Skalny JP. Sulfate attack on concrete: CRC Press; 2001.

<https://doi.org/10.4324/9780203301623>

[4] Mohammadi Y, Ezzati S. Effect of Nanosilica on The permeability of Self Compacting Concrete in Sulfate Environment. Concrete Research. 2016;8(2):47-60.

<https://doi.org/10.22034/jcema.2020.119979>

[۵] قانونی بقا م، شایانفر م، عسگرانی س، ذبیحی سامانی م. تخمین عمر مفید سازه های بتن آرمه در شرایط دریایی جزر و مدی. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی دریا. ۲۰۱۷؛ ۱۲(۲۴): ۱۳-۲۲.

<http://marine-eng.ir/article-1-542-fa.html>

[۶] نعمتی چاری م، صفری آ، احمدی ب، سبحانی ج. بررسی اثرات افزایش چرخه‌های تر و خشک شدن روی نفوذ یون کلراید در بتن اشباع نشده:

شبیه‌سازی شرایط پاششی. مصالح و سازه های بتنی. ۳، ۲۰۱۸، ۶۵-۷۶

<https://doi.org/10.30478/jcsm.2019.82170>

[7] Ren J, Lai Y. Study on the durability and failure mechanism of concrete modified with nanoparticles and polypropylene fiber under freeze-thaw cycles and