

# Experimental Investigation of the Effect of Nanosilica on the Mechanical Properties and Durability of Slag Geopolymer Concrete

**Mohammadhossein.Mansourghanaei**

- Ph.D Student in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad \*  
University, Chalous, Iran  
[Mhm.ghanaei@iauc.ac.ir](mailto:Mhm.ghanaei@iauc.ac.ir)

**Morteza.Biklaryan**

Assistant Professor Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran.

**Alireza.Mardookhpour**

Assistant Professor Department of Civil Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran.

## Research paper

### Abstract

Today, the use of nanomaterials in various sciences has found a wide perspective. In this regard, nanoscale additives in the concrete industry with the aim of improving the mechanical properties and durability of concrete, have been considered by researchers. In the preparation of geopolymer concrete, materials containing abundant aluminosilicate materials are combined with alkaline solution. In this laboratory study, a mix design was made of control concrete containing Portland cement. Then, slag geopolymer concrete was made in three mixing designs containing 0, 4 and 8% nanosilica (4 mixing designs in total). Also, SEM test at 90 days of curing age and tests of water permeability, compressive strength and modulus of elasticity at 7 and 28 days of curing at room temperature were performed on concrete samples. Laboratory results indicate that increasing the curing age of concrete has improved the results of compressive strength, modulus of elasticity and water permeability. In the test of water permeability, modulus of elasticity and compressive strength, the addition of 8% nanosilica to geopolymer concrete improved the results by 26, 13 and 19%, respectively, compared to the design of nanosilica-free geopolymer concrete at 28 days after curing.

**keywords:** Geopolymer Concrete, Blast Furnace Slag, Nano silica, Mechanical Properties, Durability Concrete.

---

**\*Corresponding Author:** Mohammadhossein.Mansourghanaei

Mansourghanaei, M., Biklaryan, M., Mardookhpour, A. Experimental Investigation of the Effect of Nanosilica on the Mechanical Properties and Durability of Slag Geopolymer Concrete. Journal of Concrete Structures and Materials, 2022; 7(1): 93-113. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.333669.1260>  
2538-5828/ © 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license  
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

# بررسی آزمایشگاهی اثر افزودن نانوسیلیس بر خواص مکانیکی و دوام بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای

محمدحسین منصورقناعی

دانشجوی دکتری عمران سازه، گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران.

*Mhm.ghanaei@iauc.ac.ir*

(نویسنده مسئول)

مرتضی بیکلریان

استادیار گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران.

علیرضا مردوخ‌پور

استادیار گروه مهندسی عمران، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

## نوع مقاله: پژوهشی

### چکیده

امروزه، بکارگیری از نانو مواد در علوم مختلف چشم‌انداز گسترده‌ای پیدا کرده است. در این راستا، افزودنی‌هایی در مقیاس نانو در صنعت بتن با هدف بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن، مورد توجه محققان قرار گرفته دارد. در تهیه بتن ژئوپلیمری، مصالحی حاوی مواد آلومینوسیلیکاتی فراوان با محلول قلیایی ترکیب می‌شوند. در این پژوهش آزمایشگاهی به ساخت یک طرح اختلاط از بتن شاهد حاوی سیمان پرتلند پرداخته شد. سپس بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای در سه طرح اختلاط حاوی ۰، ۴ و ۸ درصد نانوسیلیس ساخته شد (در مجموع ۴ طرح اختلاط). در ادامه، آزمون تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی (SEM) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه و آزمون‌های نفوذپذیری آب، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در سن عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه در دمای اتاق، بر روی نمونه‌های بتنی انجام شد. نتایج آزمایشگاهی حاکی از این موضوع است که افزایش سن عمل‌آوری بتن، موجب بهبود نتایج مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و نفوذپذیری آب شده است. در آزمون‌های نفوذپذیری آب، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری، افزودن ۸ درصد نانوسیلیس به ترکیب بتن ژئوپلیمری، به ترتیب موجب بهبود ۲۶، ۱۳ و ۱۹ درصدی نتایج نسبت به طرح بتن ژئوپلیمری فاقد نانوسیلیس در سن ۲۸ روزه پس از عمل‌آوری گردید. کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمری، سرباره‌کوره‌آهنگدازی، نانوسیلیس، خواص مکانیکی، دوام بتن.

در سال‌های اخیر، مصرف پوزولان‌هایی در ابعاد نانو مواد نظیر نانوسیلیس با توجه به نقش چسبندگی و پرکنندگی بالا در ترکیب با سایر مصالح بتن و کاهش مضرات محیط زیستی به واسطه کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، همچنین کاهش تولید گاز سمی دی‌اکسیدکربن در کنار پوزولان‌هایی در ابعاد معمولی، جایگزینی مناسب برای سیمان در بتن به شمار می‌رود. پوزولان‌ها حاوی مواد آلومینوسیلیکاتی فراوان هستند و در ترکیب با محلول‌های قلیایی و با ایجاد واکنش شیمیایی، می‌توانند حجم بالایی از ژل‌های هیدراته نظیر C-S-H را تولید نمایند. ترکیب این ژل‌ها با سایر مصالح، منجر به تولید بتن ژئوپلیمری می‌گردد. این نوع از بتن، ضمن کاهش چشمگیر تولید گاز سمی دی‌اکسیدکربن در جو و تولید بتنی با استحکام بالا، می‌تواند به عنوان جایگزین مناسب برای بتن معمولی، در ساخت سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. تحقیقات نشان داده است که کارخانه‌های تولیدکننده سیمان مسئول انتشار حدود ۵ درصد از کل دی‌اکسیدکربن وارد شده به جو کره زمین می‌باشند [۱]. دانشمندان خاکستر بادی، متاکاولین، سرباره کوره‌بلند و سایر پوزولان‌ها را به عنوان جایگزین‌های مناسب سیمان در ترکیب بتن معرفی کرده‌اند [۲-۴]. جایگزینی سیمان با این پوزولان‌ها منجر به تولید بتن ژئوپلیمری می‌گردد که می‌تواند آلودگی محیط زیستی را کاهش دهد و خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود ببخشد و نیاز قابل توجه به سیمان را کاهش دهد [۵،۶].

ساختار بتن ژئوپلیمری در ابتدا توسط محقق فرانسوی به نام ژوزف داویدوویتس<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۲ میلادی مطرح شد [۷]. میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده در فرآیند ژئوپلیمری بسیار کمتر از فرآیند تولید سیمان است [۸]. لذا این نوع از بتن به عنوان بتنی سبز و دوستدار طبیعت شناخته می‌شود و تولید آن به عنوان گامی مؤثر در جهت توسعه پایدار در صنعت سازه‌ای مطرح است. با افزودن سرباره کوره‌آهنگدازی در ترکیب بتن ژئوپلیمری، ساختار منافذ در بتن بهینه‌سازی شده و توزیع اندازه منافذ بطور مناسب‌تر خواهد بود، از طرفی ناحیه انتقال بین سطحی (ITZ) ۲ متراکم‌تر و مقاومت فشاری و جنبه‌های دوام بتن به تدریج افزایش می‌یابد، به عبارتی توسعه مقاومت فشاری و دوام بتن رابطه نزدیکی با تکامل ساختار حفره و ناحیه انتقال بین سطحی در بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای دارد [۹]. تحقیقات نشان داده است که محصولات حاصل از فرایند ژئوپلیمریزاسیون مزایای ویژه‌ای از قبیل خواص مکانیکی عالی، مقاومت مناسب در برابر دمای بالا و حملات شیمیایی، جمع‌شدگی کم و دیگر موارد دارند [۱۰]. از طرفی بررسی‌ها نشان داده است که حضور نانوسیلیس در بتن ژئوپلیمری به دلیل ریزی ذرات آن، حجم بالاتری از محصولات ژئوپلیمریزاسیون را تولید می‌کند [۱۱]. در سال‌های اخیر کاربرد نانو ذرات سیلیس برای بهبود خواص بتن، چشم‌انداز گسترده‌ای در برابر علم تکنولوژی بتن ایجاد کرده است [۱۲]. نانوذرات به علت اندازه ذرات بسیار کوچک و سطح ویژه بالای خود، خصوصیات ویژه‌ای را در طرح اختلاط بتن از خود نشان داده‌اند [۱۳]. با استفاده از نانوسیلیس در بتن ژئوپلیمری بهبود مقاومت فشاری گزارش شده است [۱۴]. نانوسیلیس به دلیل اندازه کوچک ذرات خود می‌تواند با پرکردن خلل و فرج‌های باقی مانده در بتن، باعث بهبود مقاومت آن شود و به عنوان یک مکمل در ساخت بتن بکار رود [۱۵]. مقدار مصرف نانوسیلیس در ترکیب بتن باید بصورت بهینه باشد زیرا تحقیقات نشان داده است که با ریزتر شدن اندازه نانو ذرات در مخلوط بتن، بجای اینکه آنها با آب و سایر مصالح واکنش دهند، به همدیگر می‌چسبند و تشکیل کلوخه‌های نانومتری می‌دهند، در نتیجه در مخلوط نمی‌توانند پراکنده شوند و در مرحله واکنش‌پذیری مشارکت نمایند [۱۶]. تحقیقات نشان داده است که افزودن بهینه نانوسیلیس به ترکیب بتن باعث افزایش واکنش ژئوپلیمریزاسیون می‌شود، بنابراین مقدار بیشتری از ژل ژئوپلیمری آمورف در ماتریس‌ها ایجاد می‌شود. این امر به نوبه خود نشان می‌دهد که نانو ذرات باعث جلوگیری از کاهش مقاومت ژئوپلیمری می‌شوند [۱۱]. با این حال، افزودن بیش از مقدار بهینه ذرات نانوسیلیس در ترکیب بتن، می‌تواند مقاومت فشاری بتن

<sup>1</sup> Joseph Davidovits<sup>2</sup> Interfacial transition zone

را کاهش دهد [۱۷]. بهبود ۴۸ درصدی در مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی نسبت به نمونه بتن معمولی، متعلق به نمونه بتنی حاوی ۵ درصد افزودنی نانوسیلیس، گزارش شده است [۱۸]. همچنین نتایج سایر تحقیقات نشان دهنده نقش مصرف نانوسیلیس در بهبود چگالی و استحکام در بخش ریزساختار بتن می‌باشد [۱۴-۱۹]. ملکاوری و همکاران در تحقیق انجام شده خود بر روی بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی و محلول قلیایی ترکیبی حاصل از سیلیکات سدیم به هیدروکسیدسدیم، حداکثر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری را به میزان ۸۴/۳ مگاپاسکال گزارش کرده‌اند [۲۰]. بهبود مقاومت فشاری با مصرف نانوسیلیس در ترکیب بتن ژئوپلیمری در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است [۲۱، ۱۴].

تجزیه و تحلیل آزمون SEM ۱ نشان می‌دهد که ذرات نانو، فضاهای خالی را پر می‌کند و منجر به ایجاد یکنواختی، حفرات کمتر و ماتریس ژئوپلیمری فشرده‌تر می‌شود [۱۱]. در نمونه‌های بتنی حاوی نانوسیلیس، ریزترک‌های بسیار کمتری مشاهده می‌گردد که نانوسیلیس در این حالت به عنوان ماده‌ای پرکننده عمل می‌کند تا فضاهای داخل اسکلت ریزساختار سخت شده خمیر ژئوپلیمری را پر کند و باعث افزایش فشردگی آن شود [۲۳، ۲۴]. نفوذپذیری، مقدار خسارت تحت عوامل خارجی را در بتن تعیین می‌کند [۲۵]. نفوذپذیری وابسته به تخلخل و اتصال منافذ موجود در خمیر سیمان و ریزترک‌های موجود در بتن، به خصوص در سطح مشترک بین خمیر سیمان و سنگدانه (ITZ) می‌باشد [۲۶]. مقدار مناسب سیمان در مخلوط بتن سبب تراکم بهتر و عدم جداسازی دانه‌ها شده و تحت این شرایط نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد [۲۷].

در مقاله حاضر، رفع دغدغه‌های محیط زیستی به دلیل کاهش انتشار گاز سمی دی‌اکسیدکربن و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی به واسطه تولید بتن ژئوپلیمری، همچنین برتری‌های خواص مکانیکی و دوام (در مقایسه با بتن شاهد حاوی بتن معمولی) با توجه به بکارگیری از نانو ذرات سیلیس در این نوع از بتن، به عنوان طرحی نوآورانه معرفی شده است.

## ۲- ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱ مصالح مصرفی

در این تحقیق آزمایشگاهی، سرباره کوره آهنگدازی محصول شرکت ذوب آهن اصفهان با وزن مخصوص ۲۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، تحت استاندارد ASTM C989/C989M مورد مصرف قرار گرفت. از نانوسیلیس تولید شرکت ایونیک اینداستریز ۳ آلمان با خلوص ۹۹/۸ درصد، وزن مخصوص ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و قطر ذرات ۷ الی ۱۴ نانو متر استفاده گردید. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ II با وزن مخصوص ۳۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، محصول شرکت صنایع سیمان گیلان سبز (دیلمان)، تولید شده تحت استاندارد ISIRI 389 استفاده شد. سنگدانه‌های مصرفی محصول کارخانه‌های شن و ماسه شهرستان لاهیجان بودند و به لحاظ کمی و کیفی در محدوده استاندارد ASTM C33 قرار داشتند، در این راستا وزن مخصوص شن ۲۷۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و وزن مخصوص ماسه ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بود و حداقل و حداکثر قطر شن به ترتیب ۴/۷۵ و ۱۹ میلی متر و حداقل قطر ماسه ۷۵ میکرو متر و حداکثر قطر ماسه ۴/۷۵ میلی متر تعیین گردید. محلول قلیایی مصرفی در ساخت بتن ژئوپلیمری، ترکیبی از هیدروکسیدسدیم ۴ و سیلیکات سدیم ۵ با نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسیدسدیم ۲/۵ و غلظت مولاریته ۱۲، وزن مخصوص ترکیبی ۱۴۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب، است. ابرروان کننده مصرفی از نوع پلی کربوکسیلات نرمال، محصول شرکت دوروچم خاورمیانه با نام تجاری Flowcem R700 و وزن مخصوص ۱۱۰۰

<sup>1</sup> Scanning electron microscope

<sup>2</sup> Interfacial transition zone

<sup>3</sup> Evonik Industries

<sup>4</sup> NaOH

<sup>5</sup> Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

کیلوگرم بر متر مکعب، تحت استاندارد ASTM C494 مورد استفاده قرار گرفت. آب مصرف شده بمنظور تهیه آب آهک و ساخت طرح‌های اختلاط تحقیق پیش رو (در بتن شاهد و ساخت محلول قلیایی)، از آب شرب شهر لاهیجان بود، این آب دارای pH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و وزن مخصوص ۱۰۰۰ kg/m<sup>3</sup> است.

## ۲-۲- طرح اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

استاندارد مجزا برای تهیه طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری موجود نمی‌باشد، لذا به پیروی از سایر تحقیقات در حوزه ساخت بتن ژئوپلیمری [۱۸]، از استاندارد طرح اختلاط بتن شاهد حاوی بتن معمولی تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89، برای ساخت بتن ژئوپلیمری در این پژوهش آزمایشگاهی استفاده گردید. در این راستا طرح اختلاط نمونه‌های بتنی براساس جدول ۱ تهیه و تنظیم شد. درصد جایگزینی سرباره کوره‌آهنگدازی به مقادیر ۱۰۰، ۹۶ و ۹۲ درصد و نانوسیلیس به مقادیر ۰، ۴ و ۸ درصد در ترکیب بتن ژئوپلیمری می‌باشد. بمنظور ساخت ۷۶ نمونه بتنی (برای آزمون نفوذپذیری آب ۲۴ نمونه، برای آزمون مقاومت فشاری ۲۴ نمونه، برای آزمون مدول الاستیسیته ۲۴ نمونه و برای آزمون SEM ۴ نمونه)، در ابتدا مصالح خشک به داخل دستگاه مخلوط‌کن در حال گردش ریخته شد و فرایند ترکیب به مدت ۲ دقیقه به طول انجامید، نکته حائز اهمیت در این مرحله، افزودن ذرات سیلیس به ترکیب مخلوط‌های ژئوپلیمری است که می‌بایست پس از افزودن مصالح خشک به داخل مخلوط‌کن در حال چرخش، به آرامی و در چند مرحله به ترکیب مصالح خشک افزوده شود تا ضمن توزیع یکنواخت ذرات نانو، از تجمع و کلوخه شدن آنها در مراحل بعدی جلوگیری گردد. در پایان ترکیب مصالح خشک، آب و محلول قلیایی به فراخور نیاز هر طرح به مخلوط اضافه گردید و ترکیب مصالح به مدت ۳ دقیقه دیگر ادامه پیدا کرد. در پایان، مخلوط بتن تهیه شده در قالب‌های از پیش روغن‌کاری شده در سه مرحله ریخته شد و در هر مرحله با ۲۵ ضربه میله متراکم گردید. پس از سپری شدن ۲۴ ساعت اولیه از زمان بتن‌ریزی و نگهداری در محیط خشک در دمای اتاق (۲۰ الی ۲۵ درجه سلسیوس) و رطوبت نسبی ۷۰ درصد، نمونه‌ها از قالب جداسازی شده و نمونه‌های بتن شاهد (حاوی سیمان پرتلند)، تا زمان انجام آزمون در داخل آب آهک (حاصل ترکیب آب آهک و آب شرب) در دمای اتاق نگهداری گردید، نمونه‌های بتن ژئوپلیمری پس از جداسازی از قالب، بمنظور بهبود خواص مکانیکی به مدت ۴۸ ساعت درون کوره الکتریکی تحت دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. در این راستا گزارش شده است که مقاومت بتن ژئوپلیمری با افزایش دمای عمل‌آوری افزایش می‌یابد [۲۸]. همچنین بررسی‌ها نشان داده است که مخلوط‌های بتن ژئوپلیمری تحت عمل‌آوری حرارتی ۶۰ درجه سلسیوس در ۲۴ ساعت اولیه، توانسته پس از ۳ روز بیش از ۷۵ درصد از مقاومت ۲۸ روزه بین ۶۰ الی ۸۵ مگاپاسکال را کسب نمایند [۲۹]. سپس در پایان فرایند عمل‌آوری حرارتی، نمونه‌های بتن ژئوپلیمری تا هنگام انجام آزمون در دمای اتاق در محیط خشک نگهداری شدند.

جدول ۱- مشخصات طرح اختلاط بتن

| طرح | نوع بتن   | kg/m <sup>3</sup> |       |              |        |           |      |
|-----|-----------|-------------------|-------|--------------|--------|-----------|------|
|     |           | سیمان             | آب    | محلول قلیایی | سرباره | نانوسیلیس | شن   |
| ۱   | پرتلند    | ۴۵۰               | ۲۰۲/۵ | ۰            | ۰      | ۰         | ۱۰۰۰ |
| ۲   | ژئوپلیمری | ۰                 | ۰     | ۲۰۲/۵        | ۴۵۰    | ۰         | ۱۰۰۰ |
| ۳   | ژئوپلیمری | ۰                 | ۰     | ۲۰۲/۵        | ۴۳۲    | ۱۸        | ۱۰۰۰ |
| ۴   | ژئوپلیمری | ۰                 | ۰     | ۲۰۲/۵        | ۴۱۴    | ۳۶        | ۱۰۰۰ |

## ۲-۳- روش‌های آزمایش و استانداردها

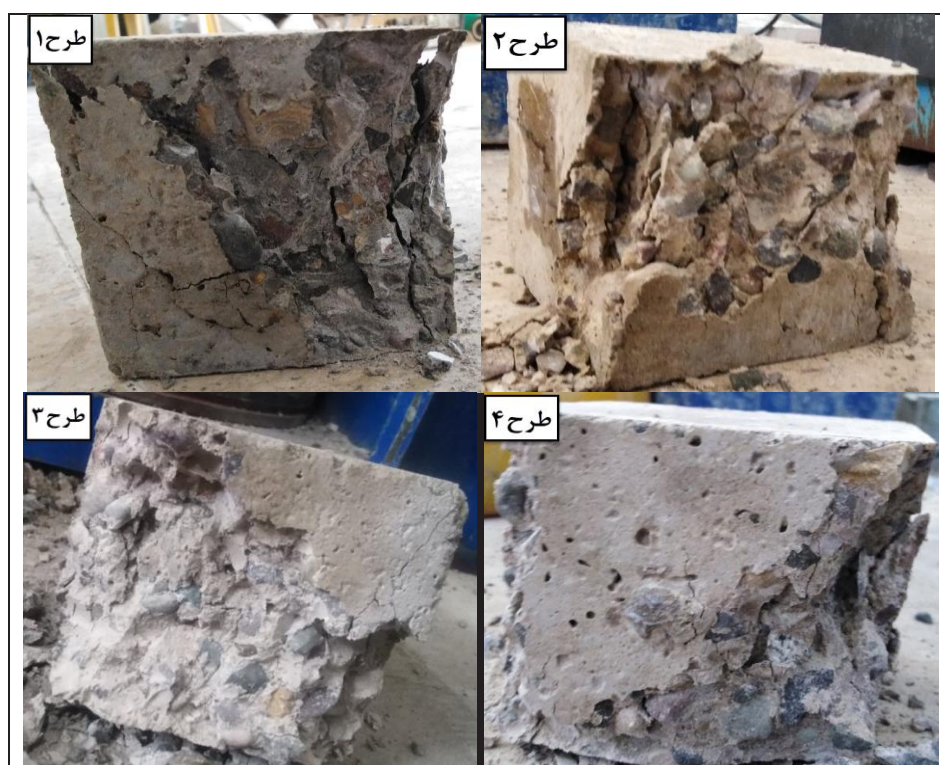
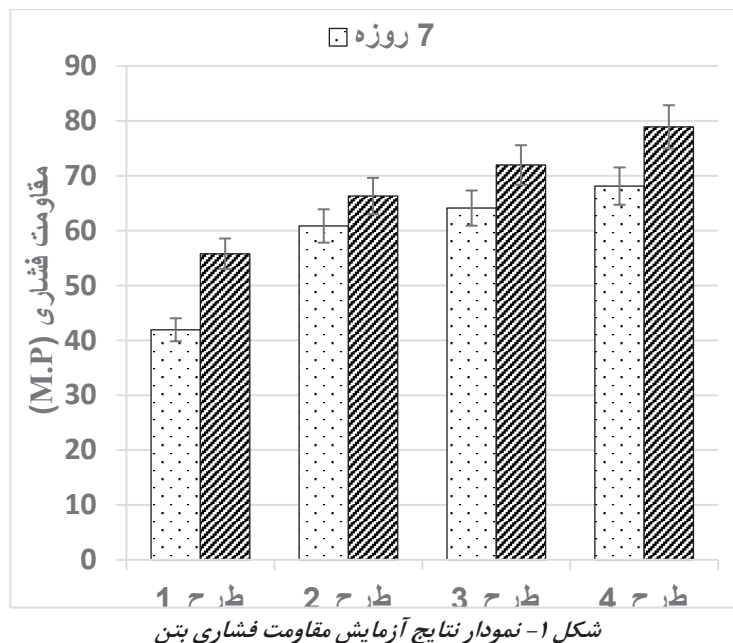
آزمون مقاومت فشاری بتن تحت استاندارد BS 12390-3 بر روی ۲۴ عدد از نمونه‌های مکعبی با ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  سانتی متری در سن عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه در دمای اتاق، توسط دستگاه جک بتن شکن انجام گرفت، در این راستا نمونه‌ها به نحوی در دستگاه جک بتن شکن قرار داده شدند که دو سطح مقابلی که در موقع بتن‌ریزی مجاور قالب بودند، در تماس با رکاب‌های فوقانی و تحتانی دستگاه باشند و پس از محکم شدن نمونه‌ها، بارگذاری نیرو توسط جک بتن‌شکن در محدوده استاندارد با سرعت  $0.9$  نیوتن بر مجذور میلی متر در ثانیه بصورت ثابت، یکنواخت، بدون تغییرات ناگهانی و عمود بر جهت بتن‌ریزی تا لحظه شکست انجام گرفت، میزان حداکثر بار وارده، تعیین کننده مقدار مقاومت نمونه بتنی در برابر فشار وارده می‌باشد. آزمون مدول الاستیسیته بتن تحت استاندارد ASTM C469 بر روی ۲۴ عدد از نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد  $15 \times 30$  سانتی متری در سن عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه در دمای اتاق، توسط دستگاه جک بتن شکن انجام پذیرفت. در این راستا نمونه مورد نظر داخل قاب آزمایش مدول الاستیسیته بتن جانمایی گردید، سپس نمونه بتنی از مقطع  $15$  سانتی متر بطور عمود بین دو صفحه دستگاه جک بتن‌شکن قرار گرفت، در ادامه بار اعمالی توسط دستگاه جک بتن‌شکن با سرعت بین  $0.5$  الی  $0.9$  کیلونیوتن بر ثانیه تا زمان تغییر شکل نمونه بر محور عمود آن وارد شد، سپس تغییر شکل طولی نمونه با استفاده از گیج یا کرنش سنج متصل به قاب اندازه‌گیری گردید. آزمون نفوذپذیری آب در بتن در سن عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه مطابق با استاندارد BS EN 12390-8 بر روی ۲۴ عدد از نمونه‌های مکعبی با ابعاد  $20 \times 20 \times 12$  سانتی متر انجام گرفت. براساس این استاندارد در سن عمل‌آوری تعیین شده، نمونه‌ها از چهار وجه با چسب آکواریوم ضد آب گردید و تنها از دو وجه پایین و بالا بمنظور انجام آزمایش آزاد باقی ماند، پس از جانمایی نمونه‌ها در قالب دستگاه تعیین عمق نفوذ آب، مطابق استاندارد ذکر شده نمونه‌ها به مدت  $72 \pm 2$  ساعت تحت فشار آب  $50 \pm 50$  کیلوپاسکال قرار گرفت. در طول دوره آزمایش، فشار آب بر نمونه‌ها کنترل گردید، پس از سپری شدن مدت زمان تعیین شده، نمونه‌ها شکسته شدند و عمق نفوذ آب در ارتفاع نمونه بتنی اندازه‌گیری گردید. آزمون تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی (SEM) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق بر روی ۴ عدد نمونه بتنی، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی با مدل FEI Quanta200 انجام پذیرفت، در این راستا قطعات بتنی نمونه‌برداری شده از مرکز آزمون بتنی در دستگاه SEM قرار گرفت و تصاویر با بزرگ نمایی ۷۰۰۰ برابر و مقیاس ۱۰ میکرو متر ضبط و مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفتند.

## ۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

### ۳-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در این پژوهش آزمایشگاهی بر اساس سن ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری در نمودار شکل ۱ نشان داده شده است. پیرو این نتایج، افزایش سن عمل‌آوری در بتن موجب بهبود در میزان مقاومت فشاری شده است، در این راستا کمترین و بیشترین میزان بهبود مقاومت فشاری متعلق به طرح ۲ شامل بتن ژئوپلیمری (فاقد نانوسیلیس) و طرح ۱ شامل بتن شاهد (حاوی سیمان پرتلند) به ترتیب به مقدار ۹ و ۳۳ درصد است. افزودن ۴ درصد نانوسیلیس به بتن ژئوپلیمری در طرح ۳ موجب بهبود مقاومت فشاری به میزان ۸ درصد نسبت به بتن طرح ۲ (بتن ژئوپلیمری فاقد نانوسیلیس) در سن عمل‌آوری ۲۸ روزه (به عنوان سن با عملکرد بهتر) گردید و افزودن ۸ درصد نانوسیلیس به بتن ژئوپلیمری طرح ۴ موجب بهبود مقاومت فشاری به میزان ۱۹ درصد نسبت به بتن طرح ۲ (بتن ژئوپلیمر فاقد نانوسیلیس) در سن عمل‌آوری ۲۸ روزه (به عنوان سن با عملکرد بهتر) گردید، این برتری نسبت به بتن شاهد به میزان ۴۱ درصد بدست آمد. افزودن نانوسیلیس به ترکیب بتن ژئوپلیمری منجر به تولید ژل‌های هیدراته با قدرت چسبندگی و پرکنندگی بیشتر شده است، این ژل‌ها علاوه بر پر کردن حفرات و منافذ، پیوندهای قوی در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) حد فاصل سنگدانه‌ها در ساختار بتن ایجاد می‌نمایند. از طرفی حضور نانو ذرات سیلیس با پر کردن منافذ موینه بین لایه‌ای در ساختار ژل‌های هیدراته،

نقش برجسته‌ای در تقویت تراکم در ژل‌های هیدراته شده ایجاد کرده است. این علل، باعث بهبود مقاومت فشاری در بتن شده است. همچنین در تمام طرح‌های بتن‌های ژئوپلیمری مشاهده می‌گردد که بیش از ۸۰ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه، در سنین اولیه (۷ روزه) کسب شده است. در این راستا سایر تحقیقات نیز نشان می‌دهد که روند رشد کسب مقاومت بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهنگدازی در روزهای نخستین بسیار سریع است، بطوریکه این نوع از بتن مقاومتی در حدود ۷۰ درصد مقاومت فشاری نهایی خود را در سن ۷ روز ابتدا کسب می‌نماید [۳۰]. در شکل ۲ تصاویر نمونه‌های بتنی پس از انجام آزمون مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز عمل‌آوری به نمایش در آمده است.



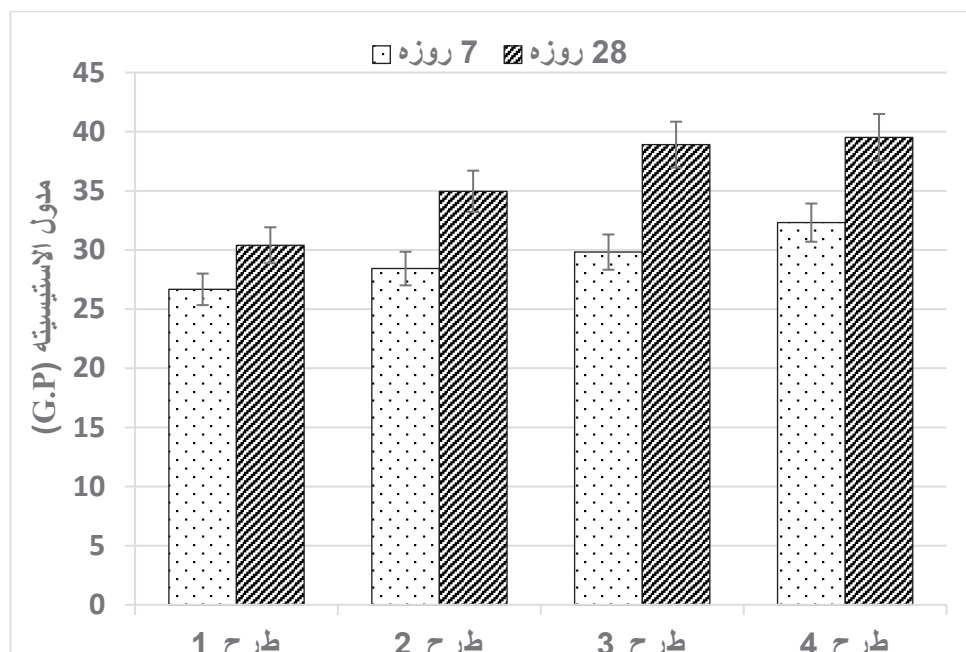
شکل ۲- نمونه بتنی پس از انجام آزمون مقاومت فشاری

### ۳-۲- نتایج آزمایش مدول الاستیسیته

در شکل ۳ تصویر نمونه بتنی در حال انجام آزمون مدول الاستیسیته به نمایش در آمده است. نتایج حاصل از آزمون مدول الاستیسیته نمونه‌های بتنی در این پژوهش آزمایشگاهی بر اساس سن ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری در نمودار شکل ۴ نشان داده شده است. پیرو این نتایج، افزایش سن عمل‌آوری در بتن موجب بهبود در میزان مدول الاستیسیته شده است. در این راستا کمترین و بیشترین میزان بهبود مدول الاستیسیته متعلق به طرح ۱ شامل بتن شاهد (حاوی سیمان پرتلند) و طرح ۳ شامل بتن ژئوپلیمری (حاوی ۴ درصد نانوسیلیس) به ترتیب به مقدار ۱۳ و ۳۰ درصد است. کمترین (۳۰ گیگاپاسکال) و بیشترین (۳۹ گیگاپاسکال) میزان کسب مدول الاستیسیته در سن ۲۸ روز عمل‌آوری، به ترتیب متعلق به طرح ۱ شامل بتن شاهد و طرح ۴ شامل بتن ژئوپلیمری (حاوی ۸ درصد نانوسیلیس) است که اختلاف حدود ۳۰ درصدی را دارا می‌باشد. در سن ۲۸ روز عمل‌آوری (به عنوان سن با عملکرد برتر)، افزودن ۴ درصد نانوسیلیس به ترکیب بتن ژئوپلیمری در طرح ۳ موجب بهبود مدول الاستیسیته بتن به میزان ۱۱ درصد نسبت به بتن طرح ۲ (بتن ژئوپلیمری فاقد نانوسیلیس) شد و افزودن ۸ درصد نانوسیلیس به بتن ژئوپلیمری در طرح ۴، موجب بهبود مدول الاستیسیته بتن به میزان ۱۳ درصد نسبت به طرح ۲ (بتن ژئوپلیمری فاقد نانوسیلیس) شده است. در این آزمون نیز همانند آزمون مقاومت فشاری، برتری نتایج حاصله در نمونه‌های بتن ژئوپلیمری حاوی نانوسیلیس بیشتر، مشهود می‌باشد. دباغ و همکاران معتقدند که افزایش تراکم در بتن منجر به افزایش مدول الاستیسیته بتن می‌گردد [۲۲]. تحقیقات نشان داده است که افزودن نانوسیلیس باعث افزایش شدت واکنش ژئوپلیمریزاسیون می‌شود، بنابر این مقدار بیشتری از ژل ژئوپلیمری آمورف در ماتریس بتن ایجاد می‌شود. این امر به نوبه خود نشان می‌دهد که نانو ذرات باعث جلوگیری از کاهش مقاومت بتن ژئوپلیمری می‌شوند [۱۱]. در این راستا بهبود مدول الاستیسیته با استفاده از نانوسیلیس در بتن ژئوپلیمری دیده شده است [۱۹]. همچنین با توجه به نمودار نتایج مدول الاستیسیته در بتن مشاهده می‌گردد که سرعت کسب مدول الاستیسیته بتن در سنین اولیه بسیار بالا است. این موضوع در بررسی‌های سایر محققین نیز اشاره شده است [۳۴-۳۱]. از طرفی با مقایسه نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن در پژوهش این مقاله، با افزایش مدول الاستیسیته میزان مقاومت فشاری نمونه متناظر نیز افزایش پیدا کرده است، در این راستا مطالعات انجام شده بر سایر تحقیقات تصدیق بر این موضوع است [۳۵].



شکل ۳- نمونه بتنی در حال انجام آزمون مدول الاستیسیته

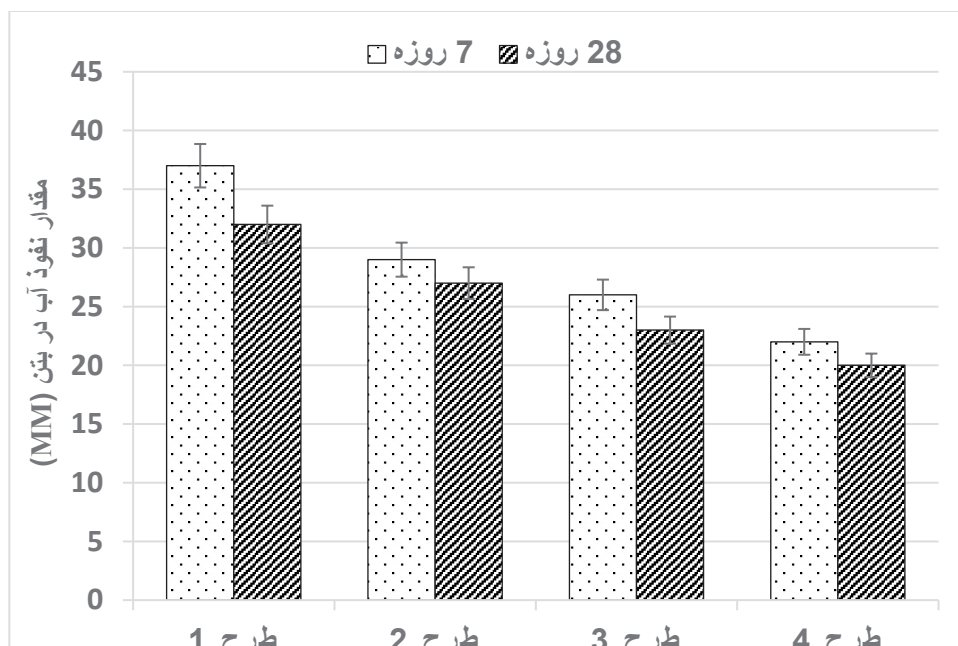


شکل ۴- نمودار نتایج آزمایش مدول الاستیسیته بتن

### ۳-۳- نتایج آزمون نفوذپذیری آب در بتن

نتایج حاصل از آزمون نفوذپذیری آب در بتن در نمودار شکل ۵ به نمایش در آمده است. بر اساس این نتایج مشاهده می‌گردد که طرح ۱ شامل بتن شاهد در هر دو سن ۷ و ۲۸ روزه دارای بیشترین ارتفاع نفوذ آب در نمونه‌های بتنی نسبت به طرح‌های بتن ژئوپلیمری است، بطوریکه طرح حاوی بتن شاهد نسبت به بتن ژئوپلیمری شامل ۸ درصد نانوسیلیس (طرح ۴)، دارای ۴۰ و ۳۷ درصد برتری در ارتفاع نفوذ آب پس از سن عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه را از خود نشان می‌دهد، این موضوع ناشی از ضعف ساختار بتن شاهد نسبت به بتن ژئوپلیمری می‌باشد و می‌تواند حاکی از وجود منافذ، حفرات و ریزترک‌های بیشتر در ساختار بتن شاهد نسبت به بتن ژئوپلیمری باشد که توانسته است آب بیشتری را در خود نفوذ دهد.

افزودن نانو ذرات سیلیس به ترکیب بتن ژئوپلیمری موجب افزایش تولید حجم ژل‌های هیدراته شده گردیده است، این موضوع سبب بهبود بخش ریزساختار بتن و کاهش ارتفاع نفوذ آب در نمونه‌های بتنی پس از هر دو سن عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه شده است، در این راستا نمونه بتنی حاوی ۴ درصد نانوسیلیس (طرح ۳) کاهش ارتفاع نفوذ آب به مقدار ۱۰ و ۱۵ درصد به ترتیب پس از سن عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه نسبت به بتن ژئوپلیمری فاقد نانوسیلیس کسب نموده است. این مقادیر برای بتن ژئوپلیمری حاوی ۸ درصد نانوسیلیس، به ترتیب به میزان ۲۴ و ۲۶ درصد کاهش در ارتفاع نفوذ آب در بتن، کسب گردید. تحقیقات کماسی و همکاران نشان می‌دهد که افزایش تولید ژل‌های هیدراته در ترکیب بتن در بهبود نتایج حاصل از آزمون نفوذپذیری تاثیر مطلوبی دارد [۳۶]. شکل ۶ نمونه‌های بتنی در حال انجام آزمون نفوذپذیری آب در بتن را به نمایش در آورده است.



شکل ۵- نمودار نتایج آزمایش نفوذپذیری آب در بتن

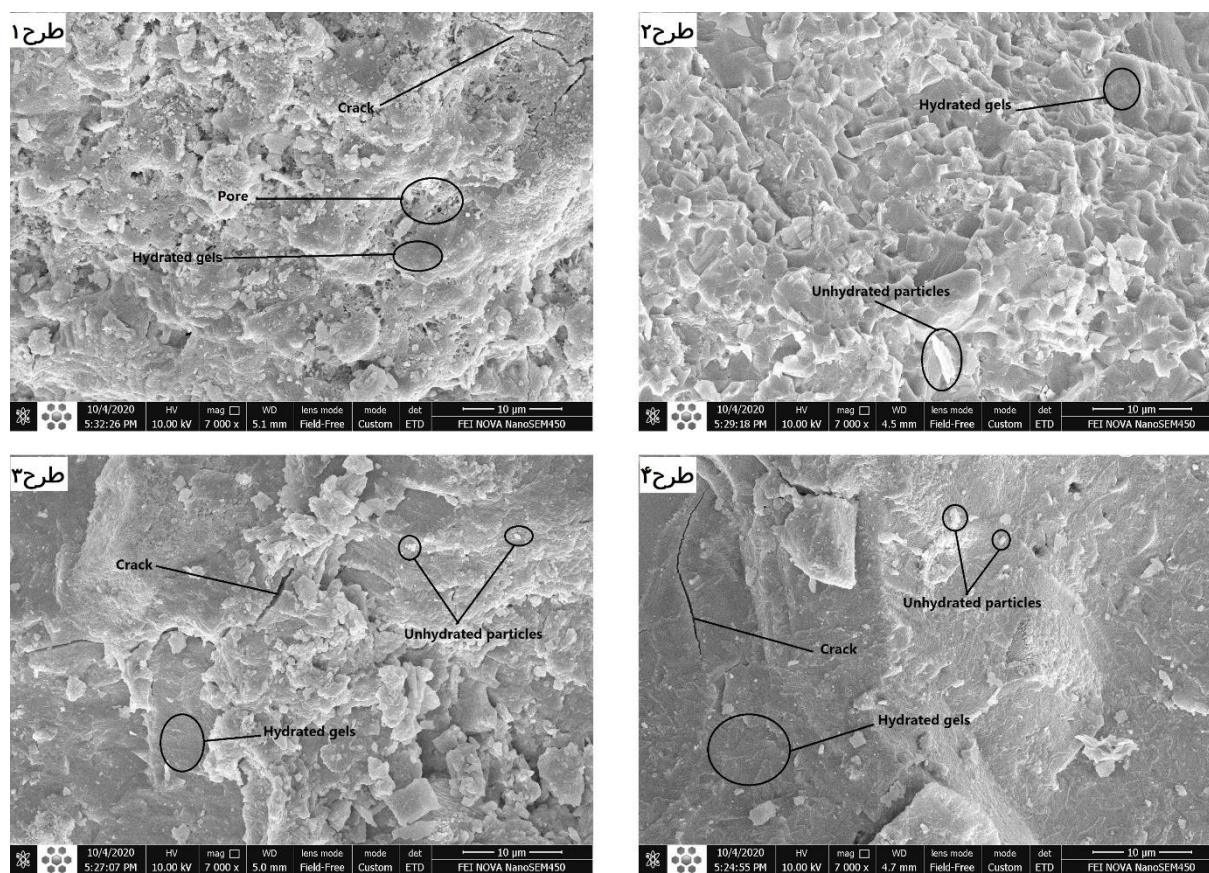


شکل ۶- آزمون نفوذپذیری آب در بتن

### ۳-۴- نتایج آزمایش SEM

تصاویر حاصل از آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی بر روی نمونه‌های بتنی در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه با مقیاس ۱۰ میکرومتر و بزرگ‌نمایی ۷۰۰۰ برابر در شکل ۷ به نمایش درآمده است. پیرو این تصاویر مشاهده می‌گردد که در نمونه بتن شاهد (حاوی سیمان پرتلند)، مقادیر مطلوبی (اما بسیار کمتر از بتن ژئوپلیمری) از تولید ژل‌های هیدراته شده در ترکیب بتن مشاهده می‌گردد، از طرفی میزان منافذ و ذرات هیدراته نشده (نسبت به نمونه‌های بتن ژئوپلیمری) در این نوع از بتن، در سطح بالایی قرار دارد. در تصاویر نمونه‌های بتن ژئوپلیمری، برخی از ریزترک‌های موجود در ریزساختار بتن، حاصل فرایند عمل‌آوری حرارتی (تحت دمای ۶۰ درجه سلسیوس) نمونه‌های بتن ژئوپلیمری ساخته شده پس از قالب برداری بتن است، البته این ریزترک‌ها نتوانسته در نتایج حاصل از آزمون‌های مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن خلل وارد کند. زیرا تحقیقات نشان داده است که این ریزترک‌ها، تنها بر

سرعت امواج اولتراسونیک تاثیر می‌گذارد و تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها نخواهد گذاشت [۳۷]. از طرفی با توجه به نتایج حاصل از آزمون نفوذپذیری آب در بتن، ریزترک‌های حاصل از فرایند عمل‌آوری حرارتی موجود در بتن ژئوپلیمری نتوانسته است تاثیر بسزایی در روند نتایج و افزایش نفوذ آب در بتن داشته باشد. با افزودن نانوسیلیس در ترکیب بتن ژئوپلیمری، در تصاویر میکروسکوپی شاهد افزایش حجم تولید ژل‌های هیدراته و کاهش ذرات هیدراته نشده می‌باشیم. این موضوع نشان می‌دهد که ذرات نانوسیلیس به خوبی توانسته‌اند نقش خود (چسبانندگی، پرکنندگی و هسته‌زایی) را در فرایند ژئوپلیمریزاسیون و تولید ژل‌های هیدراته، ایفا نمایند. تحقیقات نشان داده است که با توجه به ریزساختار خمیر سیمان هیدراته شده و وجود حفراتی در ابعاد نانو در آن، بکارگیری از نانو ذرات در ترکیب بتن، می‌تواند در پر نمودن تخلخل‌های بسیار ریز خمیر سیمان و افزایش مقاومت بتن مؤثر باشد [۳۸]. تصاویر SEM اخذ شده در این مقاله نشان می‌دهد که ذرات نانوسیلیس مصرفی، با درصد خلوص سیلیس آمورف بالای ۹۹ درصد و سطح ویژه زیاد خود، پس از فرایند ژئوپلیمریزاسیون حجم بالایی از ژل-های هیدراته شده را تولید می‌کند، این ژل‌ها با پر کردن فضاهای خالی، موجب افزایش چگالی ناحیه انتقال بین سطحی (ITZ) می‌شود، در نتیجه موجب افزایش مقاومت و دوام بتن شده است.



شکل ۷- تصاویر آزمون SEM

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله به ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر افزودن نانوسیلیس بر بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی با توجه به انجام آزمون‌های مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و نفوذپذیری آب در سن عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه و آزمون ریزساختاری SEM در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه تحت دمای اتاق پرداخته شده است. اهم نتایج حاصل از این مطالعه آزمایشگاهی به شرح ذیل می‌باشد.

۱- افزایش سن عمل‌آوری در نمونه‌های بتنی موجب بهبود نتایج در تمام آزمون‌ها گردید. بطوریکه در آزمون مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و نفوذپذیری آب، بهبود نتایج در سن ۲۸ روز نسبت به سن ۷ روزه در بتن ژئوپلیمری طرح ۴ (به عنوان بهترین عملکرد در نتایج آزمون مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و نفوذپذیری آب) به ترتیب به میزان ۱۵، ۲۲ و ۱۰ درصد بدست آمد.

۲- افزودن نانوسیلیس به طرح‌های بتن ژئوپلیمری موجب بهبود در نتایج حاصله گردید. در این راستا افزودن ۸ درصد نانوسیلیس به بتن ژئوپلیمری (در طرح ۴) موجب بهبود نتایج مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و نفوذپذیری آب در بتن ژئوپلیمری نسبت به طرح بتن ژئوپلیمری فاقد نانوسیلیس (طرح ۲)، به ترتیب تا میزان ۱۹، ۱۳ و ۲۶ درصد گردید.

۳- تصاویر حاصل از آزمون SEM نشان داد که افزودن نانوسیلیس به ترکیب بتن ژئوپلیمری، با تسریع در فرایند ژئوپلیمریزاسیون، حجم بالایی از ژل‌های هیدراته شده را تولید کرده است. این موضوع باعث ایجاد تراکم و تقویت در ریزساختار ماتریس ژئوپلیمری شده است.

۴- نتایج بدست آمده در تمام آزمون‌های مقاله پیش رو حاکی از برتری عملکرد در بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن شاهد است، این نتایج در هماهنگی و همپوشانی با هم قرار داشتند.

### تشکر و قدردانی

ساخت نمونه‌های بتنی در این پژوهش، در آزمایشگاه بتن موسسه آموزش عالی دیلمان در شهر لاهیجان انجام پذیرفته است. انجام آزمون مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و نفوذپذیری آب در همین موسسه و انجام آزمون SEM در آزمایشگاه بتن دانشگاه تهران صورت پذیرفت. این مقاله تحت حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس انجام گرفته است.

### منابع و مآخذ

- [1] Nosrati, A., Zandi, Y., Shariati, M., Khademi, K., Aliabad, M. D., Marto, A., ... & Khorami, M. (2018). Portland cement structure and its major oxides and fineness. *Smart structures and systems*, 22(4), 425-432.
- [2] Nuaklong, P., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2300-2307.
- [3] Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 85, 78-90.
- [4] Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., ... & Wang, H. (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267.
- [5] Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., & Chung, Y. S. (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and building materials*, 47, 409-418.
- [6] Mehdipour, S., Nikbin, I. M., Dezhampanah, S., Mohebbi, R., Moghadam, H., Charkhtab, S., & Moradi, A. (2020). Mechanical properties, durability and environmental evaluation of rubberized concrete incorporating steel fiber and metakaolin at elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120126.
- [7] Davidovits, J. (2008). *Geopolymer chemistry and applications*. Institut Géopolymère, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France. ISBN 2-951-14820-1-9.
- [8] Neupane, K., Chalmers, D., & Kidd, P. (2018). High-strength geopolymer concrete-properties, advantages and challenges. *Advances in Materials*, 7(2), 15-25.

- [9] Duan, P., Shui, Z., Chen, W., & Shen, C. (2013). Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(1), 52-59.
- [10] Yunsheng, Z., Wei, S., & Zongjin, L. (2010). Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement. *Applied Clay Science*, 47(3-4), 271-275.
- [11] Assaedi, H., Alomayri, T., Shaikh, F., & Low, I. M. (2019). Influence of nano silica particles on durability of flax fabric reinforced geopolymer composites. *Materials*, 12(9), 1459.
- [12] Scrivener, K., & R. James, K. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and concrete research*, 38(2), 128-136.
- [13] Li, H., Xiao, H., Yuan, J., & OU, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, 35(2), 185-189.
- [14] Adak, D., Sarkar, M., & Mandal, S. (2017). Structural performance of nano-silica modified fly-ash based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 135, 430-439.
- [15] Delavari, S., Jahanger, H., & Daneshvar, M. (2018). Comparison the Effect of Particle Tires and Powder of Worn Tires on Compressive Strength of Concrete (In Persian). 4th International Conference on Structural Engineering. Iran, Tehran.
- [16] Tajodeni, M. (2016). , In vitro evaluation of the effect of adding nanosilica with different specific surfaces on physical and mechanical parameters of soil-cement aggregates. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 24-2(1/1), 13-22.
- [17] Shirgir, B., Alizadeh Goudarzi, H., & Shirgir, V. (2016). An Experimental Study on the Abrasion Resistance of Pervious Concrete Containing Nano SiO<sub>2</sub> in avement. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 8(2), 291-302.
- [18] Deb, P. S., Sarker, P. K., & Barbhuiya, S. (2015). Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature. *Construction and building materials*, 101, 675-683.
- [19] Ekinci, E., Türkmen, İ., Kantarci, F., & Burhan Karakoç, M. (2019). The improvement of mechanical, physical and durability characteristics of volcanic tuff based geopolymer concrete by using nano silica, micro silica and Styrene-Butadiene Latex additives at different ratios. *Construction and Building Materials*, 201, 257-267.
- [20] Malkawi, A. B., Nuruddin, M. F., Fauzi, A., Almattarneh, H., & Mohammed, B. S. (2016). Effects of alkaline solution on properties of the HCFA geopolymer mortars. *Procedia engineering*, 148, 710-717.
- [21] Ekinci, E., Türkmen, İ., Kantarci, F., & Karakoç, M. B. (2019). The improvement of mechanical, physical and durability characteristics of volcanic tuff based geopolymer concrete by using nano silica, micro silica and Styrene-Butadiene Latex additives at different ratios. *Construction and Building Materials*, 201, 257-267.
- [22] Dabbagh, H., & Akbarpour, S. (2017). Behavior of Structural Lightweight Concrete Containing Nano Silica and Steel Fibers under Compressive Monotonic Loading. *Concrete Research*, 10(1), 35-46.
- [23] Deb, P. S., Sarker, P. K., & Barbhuiya, S. (2015). Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature. *Construction and building materials*, 101, 675-683.

- [24] Shih, J. Y., Chang, T. P., & Hsiao, T. C. (2006). Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite. *Materials Science and Engineering: A*, 424(1-2), 266-274.
- [25] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
- [26] Banthia, N. Biparva, A. and Mindess, S. (2005). Permeability of concrete under stress. *Cement and Concrete Research*, No. 35, pp. 1651 – 1655.
- [27] Building and Housing Research Center, N. Issue: 428, National durability of concrete code in Persian Gulf and Oman Sea, P.P. 34-35, 2014.
- [28] Moghaddam, S. C., Madandoust, R., Jamshidi, M., & Nikbin, I. M. (2021). Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions. *Construction and Building Materials*, 281, 122571.
- [29] Prasanna Venkatesan, R., & Pazhani, K. (2016). Strength and durability properties of geopolymer concrete made with Ground Granulated Blast Furnace Slag and Black Rice Husk Ash. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(6), 2384-2391.
- [30] Nofallah, M. H. (2018). Effect of sodium Hydroxide solution concentration and sodium silicate to sodium hydroxide ratio on the compressive strength and water absorption of slag based alkali-activated concrete. *Concrete Research*, 11(2), 95-103.
- [31] Abd elaty, M.a.a. (2014). Compressive strength prediction of Portland cement concrete with age using a new model. *HBRC J.* 10 (2), pp 145–155.
- [32] Kim, J.K., Moon, Y.H., Eo, S.H. (1998). Compressive strength development of concrete with different curing time and temperature. *Cem. Concr. Res.* 28 (12), pp 1761–1773.
- [33] Madandoust, R., Bungey, J.H., Ghayidel, R. (2012). Prediction of the concrete compressive strength by means of core testing using GMDH-type neural network and ANFIS models. *Comput. Mater. Sci.* 51 (1), pp 261–272
- [34] Pirmohammadi Alishah, F., & Mahmoudzadeh, N. (2020). Investigation of the effect of bentonite paste index on modulus of elasticity, compressive strength and performance of plastic concrete. *Civil and Project Journal*, 2(5), 87-109.
- [35] Madandoust, R., & Deilami Poshtjouei, S. (2021). A study on compressive strength, static and dynamic elastic modulus of self-compacted concrete contained nanomaterials. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(1), 256-270.
- [36] Komasi, M., Khosravi, S., & Chobkar, H. (2021). Laboratory study for optimal mixing scheme of pervious concrete containing additive of microsilica fume based on maximum compressive strength and permeability. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(4), 42-61.
- [37] Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., & Sulieman, M. Z. (2012). Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*, 26(1), 565-573.
- [38] Ramezaniyanpor, A. (2012). Comparative Study on Microstructure and Durability of Concretes Containing Nano Silica and Silica Fume. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 44(1), 65-75. doi: 10.22060/ceej.2012.98