

Experimental Study of Modulus of Elasticity of Alkali-activated Concrete Based on XRF and SEM Tests

Mohammadhossein Mansourghanaei*

Ph.D. in Civil, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

Morteza Biklaryan

Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

Alireza Mardookhpour

Department of Civil Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

Mhm.Ghanaei@iauc.ac.ir

DOI: 10.30495/CIVIL.2023.698647

Keywords:

Alkali-activated concrete, Mechanical properties of concrete, Modulus of elasticity test, Scanning electron microscopy (SEM), X-ray fluorescence (XRF)

Abstract

In this research, firstly, three mix designs of alkali-activated concrete containing 92, 96, and 100% blast furnace slag and 8, 4, and 0% nano-silica were made. After performing the compressive strength and modulus of elasticity tests and choosing one design as the optimal design in terms of superior mechanical properties, by adding 1 and 2% polyolefin fibers to the optimal design, two more designs of alkali-activated concrete were made. All concrete samples were subjected to compressive strength and modulus of elasticity, XRF and SEM tests. The results of the tests exhibited superiority in mechanical and microstructural properties of the alkali-activated concrete compared to normal concrete at all processing ages. At the processing age of 90 days (as the best age in performance due to the progress of the chemical process), following the compressive strength test, the lowest (49.94 MPa) and the highest (66.36 MPa) compressive strength values were obtained, respectively, for design 1 including Normal concrete and design 4 including alkali-activated concrete containing 8% nanosilica. At the same processing age, the lowest (32.44 GPa) and the highest (42.51 GPa) modulus of elasticity were achieved in design 1 and 6 of the alkali-activated concrete containing 8% nano-silica and 2% polyolefin fibers, respectively. At this age, addition of 8% nano-silica and 2% fibers in the alkali-activated concrete of design 6 resulted in a decrease of 22.49% in the compressive strength and an improvement of 7.05% in the modulus of elasticity.



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license:

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

بررسی آزمایشگاهی مدول الاستیسیته بتن قلیافعال براساس آزمون XRF و SEM

محمدحسین منصورقنای*
 دکترای تخصصی عمران سازه، گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

مرتضی بیکلریان
 گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

علیرضا مردوخ‌پور
 گروه مهندسی عمران، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

Mhm.Ghanaei@iauc.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۰۲ مهر ۱۴۰۱

تاریخ دریافت: ۰۳ خرداد ۱۴۰۱

چکیده

در این مقاله، ابتدا سه طرح اختلاط از بتن قلیافعال ساخته شد که به ترتیب حاوی ۹۲، ۹۶ و ۱۰۰ درصد سرباره کوره‌آهنگدازی و ۸ و ۴ و ۰ درصد نانوسیلیس بودند. پس از انجام آزمون مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته و انتخاب یک طرح به عنوان طرح بهینه به لحاظ برتری خواص مکانیکی، با افزودن ۱ و ۲ درصد الیاف پلی‌اولفین به طرح بهینه، دو طرح دیگر از بتن قلیافعال ساخته شد. تمام نمونه‌های بتنی تحت آزمون‌های مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته، XRF و SEM، قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمون‌های این پژوهش نشان از برتری در خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی را در تمام سنین عمل‌آوری داشت. در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه (به عنوان بهترین سن در عملکرد با توجه پیشرفت فرایند شیمیایی)، پیرو آزمون مقاومت فشاری کمترین (۴۹/۹۴ مگاپاسکال) و بیشترین (۶۶/۳۶ مگاپاسکال) مقدار مقاومت فشاری به ترتیب برای طرح ۱ شامل بتن معمولی و طرح ۴ شامل بتن قلیافعال حاوی ۸ درصد نانوسیلیس کسب گردید. در همین سن عمل‌آوری، کمترین (۳۲/۴۴ گیگاپاسکال) و بیشترین (۴۲/۵۱ گیگاپاسکال) مقدار مدول الاستیسیته بتن به ترتیب در طرح ۱ و ۶ شامل بتن قلیافعال حاوی ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف پلی‌اولفین، به دست آمد. در این سن، افزودن ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف قلیافعال طرح ۶ موجب افت ۲۲/۴۹ درصدی در مقاومت فشاری و بهبود ۷/۰۵ درصدی در مدول الاستیسیته گردید.

کلید واژگان: بتن قلیافعال، خواص مکانیکی بتن، آزمون مدول الاستیسیته، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF).

۱- مقدمه

بتن قلیافعال در راستای برطرف کردن مضرات ناشی از تولید و کاربرد بتن معمولی پا به عرصه صنعت سازه‌ای نهاده است. ژئوپلیمری نامی است که توسط دیویدویتز برای این نوع از بتن مطرح شد [۱]. میزان دی اکسید کربن تولید شده در فرآیند ژئوپلیمری بسیار کمتر از فرآیند تولید سیمان است [۲]. با توجه به مزایای محیط زیستی بتن قلیافعال، تولید این نوع از بتن می‌تواند دلیل مناسبی برای جایگزینی با بتن معمولی باشد [۳-۴]. تحقیقات نشان داده است که جایگزینی سیمان با پوزولان‌ها، آلودگی محیط زیستی را کاهش می‌دهد، خواص مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشد و نیاز قابل توجهی به سیمان را نیز کاهش می‌دهد [۵، ۶]. ژئوپلیمرها با مواد پلیمریزاسیون بالا با ساختار آلومینوسیلیکات شناخته می‌شوند که عمدتاً از سه بُعد واحد متقاطع شامل $SiQ_4(2Al)$ و $SiQ_4(3A)$ تشکیل شده است [۷]. سرباره کوره آهنگدازی دارای خواص هیدرولیکی پنهان است که می‌تواند در ترکیب با فعال کننده‌های مناسب فعال گردد [۵]. لذا افزودن پوزولان‌هایی نظیر سرباره کوره آهنگدازی و نانوسیلیس به ترکیب بتن قلیافعال به‌عنوان مواد پایه طی فرآیند ژئوسپارش با محلول قلیایی، منجر به تولید بتنی مستحکم می‌گردد. استفاده از سرباره کوره آهنگدازی به جای سیمان می‌تواند مقاومت بتن را بهبود ببخشد و تقاضای فزاینده برای استفاده از سیمان در بتن را کاهش دهد [۸-۹]. از طرفی افزودن نانوسیلیس به بتن قلیافعال واکنش ژئوپلیمریزاسیون را افزایش می‌دهد. در این حالت ژل‌های ژئوپلیمری آمورف بیشتری در ماتریس‌ها ایجاد می‌شود. این موضوع به نوبه خود نشان می‌دهد که ذرات نانو سیلیس از کاهش مقاومت بتن قلیافعال جلوگیری می‌کنند [۱۰]. در این راستا گزارش شده است که با افزایش نانوسیلیس به ترکیب بتن، چگالی ماتریس بتن افزایش می‌یابد [۱۱]. با افزایش چگالی در بتن خصوصیات مکانیکی نظیر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در بتن بهبود می‌یابد. در این راستا، بهبود مدول الاستیک با استفاده از نانوسیلیس در بتن قلیافعال گزارش شده است [۱۲]. با این حال تحقیقات نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد نانوسیلیس در ترکیب بتن منجر به توزیع و تجمع ناکافی نانو ذرات می‌شود، در این حالت چگالی ماتریس به میزان کم در ترکیبات بتن کاهش می‌یابد [۱۳]. در مورد اثر الیاف بر مدول-الاستیسیته بتن‌ها نتایج بسیار متناقض است، برخی از محققین معتقدند که افزودن الیاف پلی‌ولفین به ترکیب بتن، با جلوگیری از اتصال منافذ و اتصال کانال‌های جریان در بتن، اتصال بتن را تقویت کرده و از پوسته شدن آن جلوگیری می‌کند [۱۴]. این موضوع منجر به بهبود پیوند در ساختار بتن می‌گردد و بهبود مقاومت فشاری و مدول-الاستیسیته را در بتن به دنبال خواهد داشت. در این راستا مطالعات نشان داده است که، افزودن الیاف پلی‌ولفین به تیرهای بتنی به دلیل افزایش مدول الاستیسیته، به میزان قابل توجهی به مقاومت پس از ترک خوردگی کمک می‌کند [۱۵]. همچنین در بررسی تاثیر الیاف پلی-ولفین با قطر و طول‌های مختلف در بتن‌های قلیافعال مشخص شد که

استفاده صحیح از الیاف باعث افزایش مدول الاستیسیته بتن می‌شود [۱۶]. از طرفی برخی از تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده صرف از الیاف (بدون افزودن نانوسیلیس) در ترکیب بتن می‌تواند بین ۶ الی ۱۲ درصد میزان مدول الاستیسیته بتن را کاهش دهد [۱۷]. نوس [۱۸] در تحقیقی که بر روی رفتار مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف انجام داد مشاهده کرد که حضور الیاف، مدول الاستیسیته بتن را به مقدار اندکی کاهش می‌دهد. یوست^۲ و همکارانش [۱۹] مقدار مدول الاستیسیته بتن قلیافعال را ۱۱ تا ۱۶ درصد کمتر از مقدار تئوری که با استفاده از ACI 318 پیش‌بینی شده است کسب کردند. برخی از محققان معتقدند که بتن‌های حاوی الیاف دارای سختی الاستیک بیشتری نسبت به بتن فاقد الیاف می‌باشد [۲۰]. همچنین تحقیقات نشان داده است که الیاف موجب بهبود خواص مکانیکی در بتن می‌گردد [۲۱].

مدول الاستیسیته بتن به میزان تنش وارد شده به ازای تغییر شکل واحد در بتن اطلاق می‌گردد. نوع سنگدانه مصرفی در بتن، نسبت آب به سیمان، شرایط عمل‌آوری و نرخ بارگذاری در آزمون مدول الاستیسیته از عوامل موثر بر مقدار مدول الاستیسیته کسب شده در بتن می‌باشند. بر خلاف فولاد، مدول الاستیسیته بتن متغیر است، شکل (۱) نمودار تنش - کرنش ($\sigma-\epsilon$) بتن را براساس اعمال نیروی تک محوری در بتن به نمایش در آورده است. در این نمودار، مدول الاستیسیته اولیه شامل شیب اولیه نمودار تنش - کرنش بتن است و شیب خطی که از مبدا به نقطه تنش دلخواه می‌رسد مدول الاستیسیته سکانتی نامیده می‌شود، همچنین شیب خط مماس بر هر نقطه از نمودار را مدول الاستیسیته مماسی می‌گویند. استانداردهای مختلفی برای محاسبه میزان مدول الاستیسیته بتن بر اساس میزان مقاومت فشاری بتن موجود می‌باشد. در این پژوهش آزمایشگاهی، مقدار مدول الاستیسیته بتن بر اساس آیین-نامه ASTM C469 محاسبه شده است، استاندارد ملی ایران شماره ۵۲۵، جهت تعیین مدول الاستیسیته بتن طرح شده است که بر اساس استاندارد ASTM C469 تدوین گردیده است. در این آیین‌نامه میزان تنش اعمالی در بتن حداکثر تا ۴۰ درصد مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های بتنی تعیین شده است. براساس آیین‌نامه بتن آمریکا توصیه شده کمیته ACI 318 که آیین‌نامه بتن ایران (آبا) و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران نیز از آن پیروی می‌کند، برای بتن با چگالی بین ۱۴۴۰ تا ۲۵۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته بتن از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد. در این رابطه E_c مدول الاستیسیته بتن، W_c چگالی بتن و f'_c مقاومت فشاری بتن ۲۸ روزه بر روی میانگین حداقل دو نمونه بتنی استوانه‌ای با ابعاد 15×30 سانتی‌متر است. در این آیین‌نامه میزان مدول الاستیسیته برای بتن‌های معمولی از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد. آیین‌نامه کشور کانادا CSI A23.3، آیین‌نامه اروپا EC، آیین‌نامه بریتانیا BS 8110 و آیین‌نامه کشور هلند IS 456 روابطی را برای محاسبه مدول الاستیسیته بتن مطرح کرده‌اند.

¹ Neves

² Joseph Robert Yost

۲- ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

در این پژوهش آزمایشگاهی، سرباره کوره آهنگدازی محصولی از شرکت ذوب آهن اصفهان با چگالی ۲۷۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب تحت استاندارد C989/C989MASTM مورد مصرف قرار گرفت. از نانوسیلیس تولید شرکت ایونیک اینداستریز^۳ آلمان با خلوص ۹۹/۸ درصد، چگالی ۲۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و قطر ذرات ۷ الی ۱۴ نانومتر استفاده گردید. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ II با چگالی ۳۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب محصول شرکت صنایع سیمان گیلان سبز (دیلمان)، تولید شده تحت استاندارد ISIRI 389 استفاده گردید.

سنگدانه‌های مصرفی در این پژوهش محصول کارخانه‌های شن و ماسه شهرستان لاهیجان بوده که به لحاظ کمی و کیفی در محدوده استاندارد ASTM C33 قرار داشتند، در این راستا شن با چگالی ۲۷۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و حداقل و حداکثر اندازه ۴/۷۵ و ۱۹ میلی‌متر استفاده گردید و ماسه با چگالی ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و حداقل اندازه ۷۵ میکرومتر و حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر مصرف گردید. محلول قلیایی مصرفی در ساخت بتن قلیا فعال، ترکیبی از هیدروکسید سدیم (NaOH) و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) با نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۲/۵ و غلظت مولاریته ۱۲، چگالی ترکیبی ۱۴۸۳ کیلوگرم بر مترمکعب، است. در این راستا، جهت تهیه محلول هیدروکسید سدیم: عدد ۳۹/۹ (که وزن ۱ مول هیدروکسید سدیم یا وزن مولی است) را ضربدر عدد مولاریته مورد نظر (در این پژوهش ۱۲ است) می‌کنیم تا وزن هیدروکسید جامد مصرفی بدست آید، سپس این وزن از هیدروکسید جامد را در یک لیتر آب مخلوط می‌کنیم تا محلول هیدروکسید سدیم ساخته شود. این محلول باید ۲۴ ساعت قبل از مصرف ساخته شود و در طول این ۲۴ ساعت در دمای محیط و جای خشک نگهداری گردد و در زمان ساخت بتن با محلول سیلیکات سدیم به نسبت تعیین شده (در این پژوهش ترکیب سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم با نسبت ۲/۵ است) ترکیب شده و در مخلوط بتن مورد استفاده قرار گیرد. جهت تهیه محلول قلیا فعال: پس از تهیه هیدروکسید سدیم و سبزی شدن زمان ۲۴ ساعت از آن، ترکیب سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم با نسبت ۲/۵ ساخته می‌شود.

ابروان‌کننده مصرفی در این تحقیق از نوع پلی‌کربوکسیلات‌نرمال، محصول شرکت دوروچم خاورمیانه با نام تجاری Flowcem R700 و چگالی ۱۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، تحت استاندارد ASTM C494 مورد مصرف قرار گرفت. آب مصرف شده به منظور ساخت تهیه آب‌آهک طرح‌های مخلوط تحقیق پیش‌رو (در بتن کنترل و ساخت محلول قلیایی)، از آب شرب شهر لاهیجان استفاده گردید، این آب دارای pH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و چگالی 1000 kg/m^3 است.

۲-۲- طرح مخلوط، ساخت و عمل‌آوری نمونه

$$Ec = 0/043W_c^{1.5}\sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

$$Ec = 4700\sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

اهداف و نوآوری در این پژوهش آزمایشگاهی به واسطه تولید بتن (قلیا فعال)، به چند مورد زیر خلاصه می‌گردد:

۱- خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن قلیا فعال در مقایسه با بتن معمولی بهبود می‌یابد.

۲- کمک به کاهش حجم انتشار گاز سمی CO_2 در مقایسه با تولید بتن معمولی، با توجه به گزارش ارایه شده توسط سایر محققین در این راستا.

۳- کمک به حفظ سلامت محیط زیست به واسطه مصرف (در ترکیب بتن قلیا فعال) سرباره‌های انباشته شده در کارخانه‌های ذوب آهن، شناخته شده به عنوان مواد مضر محیط زیست.

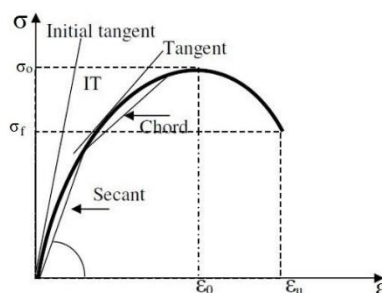
۴- حفظ و کاهش مصرف منابع معدنی مصرفی که به عنوان مصالح اصلی در طی فرایند ساخت سیمان معمولی استفاده می‌گردد.

۵- حفظ و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی که به عنوان سوخت مصرفی در کارخانه‌های تولید سیمان معمولی استفاده می‌گردد.

۶- هدف از انجام تحقیق بر روی مدول الاستیسیته نمونه‌های بتنی، بررسی تغییرات میزان مدول الاستیسیته کسب شده براساس افزودن مقادیر مختلف از نانوسیلیس و الیاف در بتن قلیا فعال و مقایسه آن با بتن معمولی است.

۷- هدف از انجام آزمون XRD در این پژوهش، شناسایی مواد معدنی در ترکیب بتن و تعیین مشخصات ساختار مواد از قبیل ترکیب فازها و مقایسه آنها در ترکیب بتن قلیا فعال و بتن معمولی است، این کار به منظور صحت سنجی در نتایج سایر آزمون‌ها به خصوص آزمون مدول-الاستیسیته بتن انجام پذیرفته است.

۸- هدف از انجام SEM در این پژوهش، بررسی تغییرات ریزساختاری بتن قلیا فعال با افزودن ذرات نانوسیلیس و الیاف پلی‌اولفین به بتن است، از طرفی مقایسه ریزساختار بتن معمولی با بتن قلیا فعال و راستی آزمایشی نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن از اهداف دیگر انجام SEM است.



شکل ۱- منحنی تنش - کرنش بتن

³ Evonik Industries

استاندارد مجزا برای طرح مخلوط بتن قلیافعال موجود نمی باشد، لذا به پیروی از سایر تحقیقات در حوزه بتن قلیافعال [۲۲]، از استاندارد طرح مخلوط بتن معمولی تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89، برای ساخت بتن قلیافعال در این پژوهش آزمایشگاهی استفاده گردید. در این راستا، طرح مخلوط نمونه‌های بتنی در این پژوهش براساس جدول (۱) تهیه و تنظیم شد. به منظور ساخت نمونه‌های بتنی، ابتدا مصالح خشک (سنگدانه، سرباره یا سیمان، نانوسیلیس)، به داخل دستگاه مخلوط کن در حال گردش ریخته شد و فرایند ترکیب به مدت ۲ دقیقه به طول انجامید، سپس آب و محلول قلیایی به فراخور نیاز هر طرح به مخلوط اضافه گردید و ترکیب مصالح ۲ دقیقه دیگر ادامه پیدا کرد. سپس برای مخلوط‌های حاوی الیاف، الیاف در مرحله نهایی به آهستگی به مخلوط اضافه گردید و فرایند ترکیب ۲ دقیقه دیگر به طول انجامید. نکته اینکه در طرح‌های حاوی نانوسیلیس، به جهت ایجاد ترکیبی یکسان و اثربخشی بالای این ذرات، با انتخاب مقادیر مناسب از نانوسیلیس در ترکیب طرح مخلوط بتن قلیافعال، این ماده به آرامی و در چندین مرحله به مخلوط مصالح خشک در حال گردش داخل بتن گیر اضافه شد به نحوی که پراکندگی یکنواخت این محصول در تمام مخلوط قابل مشاهده گردید. لازم به ذکر می‌باشد 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 نانو متری را می‌دهند در نتیجه در مخلوط نمی‌توانند پراکنده شوند و در مرحله واکنش پذیری مشارکت نمی‌کنند [۲۳]. اما تحقیقات منصورقنای و همکاران نشان داده است که استفاده نانوسیلیس تا ۸ درصد در ترکیب بتن قلیافعال مشابه با طرح مخلوط در این پژوهش، موجب کلوخه شدن ذرات نانوسیلیس نمی‌گردد [۲۴-۲۵]. از طرفی افزایش نانوسیلیس تا حدی که موجب کلوخه‌شده ذرات نگردد، موجب افزایش مدول الاستیسیته بتن خواهد شد [۲۶].

در پایان، مخلوط بتن تهیه شده در قالب‌های از پیش روغن کاری شده در سه مرحله (لایه) 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 و دمای اتاق (۲۰ الی ۲۵ درجه سلسیوس)، نمونه‌ها از قالب جداسازی شدند. نمونه‌های بتن کنترل (حاوی سیمان پرتلند) تا زمان انجام آزمون در داخل آب‌آهک در دمای اتاق نگهداری گردید، اما نمونه‌های بتن قلیافعال پس از جداسازی از قالب، به‌منظور بهبود خواص استحکامی به مدت ۴۸ ساعت درون کوره الکتریکی تحت دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. در این راستا گزارش شده است که مقاومت بتن قلیافعال با افزایش دمای عمل‌آوری افزایش می‌یابد [۲۷]. در پایان زمان عمل‌آوری حرارتی بتن قلیافعال، نمونه‌های بتن تا هنگام انجام آزمون، تحت دمای اتاق در محیط خشک نگهداری و عمل‌آوری شدند.

آزمون مقاومت فشاری بتن تحت استاندارد ASTM C39 بر روی نمونه‌های استوانه با ابعاد 15×30 سانتی متری در سن عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در دمای اتاق، توسط دستگاه جک بتن‌شکن انجام گرفت. در این راستا، نمونه‌ها به‌طور عمودی از مقطع کوچکتر، بین فک بالا و پایین دستگاه جک بتن‌شکن قرار داده شدند و پس از محکم شدن نمونه‌ها، بارگذاری نیرو در محدوده استاندارد به‌صورت ثابت، یکنواخت، بدون تغییرات ناگهانی و عمود بر جهت بتن ریزی تا لحظه شکست نمونه انجام گرفت. در این راستا، میزان حداکثر بار وارده، تعیین کننده مقدار مقاومت نمونه بتنی در برابر فشار وارده است. در این پژوهش نتیجه آزمون مقاومت فشاری در هر سن عمل‌آوری، حاصل میانگین نتایج کسب شده بر روی سه نمونه بتنی است.

آزمون مدول الاستیسیته بتن تحت استاندارد ASTM C469 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای از بتن سخت‌شده با ابعاد 15×30 سانتی متر در سن عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در دمای اتاق، توسط دستگاه جک بتن‌شکن به همراه قاب مدول‌الاستیسیته متصل به کرنش‌سنج، انجام گرفت. براساس این استاندارد، مقدار مدول‌الاستیسیته بتن با توجه به اندازه‌گیری میزان تغییر شکل طولی بتن در محدوده‌های معمول اعمال تنش (از ۰ تا ۴۰ درصد استحکام نهایی بتن) محاسبه گردید. در این راستا، نمونه بتنی مورد نظر در حالت تراز داخل قاب آزمایش مدول‌الاستیسیته بتن جانمایی گردید، این قاب شامل دو بست حلقوی است که بست پایینی به‌طور کامل به نمونه بتنی محکم می‌گردد و بست بالایی تنها در دو نقطه قرینه محوری بر روی پیرامون محیط نمونه بتنی متصل می‌گردد، بدین ترتیب بست می‌تواند حول محوری که از این دو نقطه می‌گذرد بچرخد، روی بست حلقوی آزاد در بین دو نقطه اتکاء، میله‌ای محوری جهت ثابت نگهداشتن فاصله دو بست وجود دارد. فاصله نقاط تماس در دو بست حلقوی با نمونه بتنی نباید از سه برابر بزرگترین دانه شن موجود در بتن کمتر باشد یا اینکه از دوسوم ارتفاع نمونه بتنی تجاوز نماید. در ادامه فرایند آزمون، نمونه بتنی از مقطع 15 سانتی متر به‌طور عمود بین دو صفحه دستگاه جک بتن‌شکن قرار گرفت و بار اعمالی با سرعت 34 ± 241 کیلوپاسکال بر ثانیه (0.34 ± 0.241) مگاپاسکال بر ثانیه) به‌طور پیوسته و بدون ایجاد شک بر محور عمود نمونه بتنی وارد شد. در ادامه بار وارده و تغییر طول نسبی در زمانیکه تغییر کرنش طولی 50 میکروثانیه است و بار وارده 40 درصد بارنهایی است، خوانش گردید. در پایان بر اساس رابطه (۳) مقدار مدول‌الاستیسیته هر نمونه بتنی محاسبه گردید. در این رابطه، E مدول‌الاستیسیته بر حسب مگاپاسکال، σ_2 تنش وارده برای 40 درصد بارنهایی، σ_1 تنش وارده برای کرنش طولی و ϵ_2 کرنش طولی ایجاد شده توسط تنش σ_2 است. در هنگام انجام این آزمون باید دقت کرد که درجه حرارت محیط نمونه بتنی نباید بیش از 2 درجه سلسیوس تغییر کند.

۴-۲- روش‌های آزمون و استانداردها

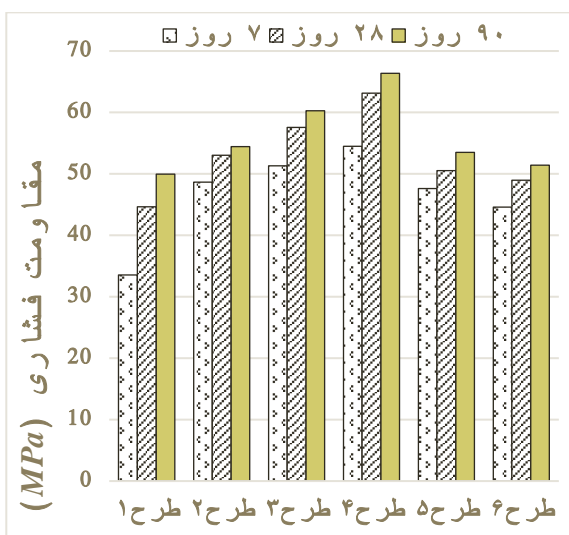
جدول ۱- مشخصات طرح مخلوط بتن

شماره طرح	نوع بتن	سیمان	آب	مخلول قلیایی	سرباره	نانوسیلیس	الیاف	شن	ماسه	ابر روان کننده
۱	OC-NS0PO0	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰	۰	۰	۰	۱۰۰۰	۷۶۱	۶/۷۵
۲	GC-NS0PO0	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۵۰	۰	۰	۱۰۰۰	۸۱۶	۶/۷۵
۳	GC-NS4PO0	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۳۲	۱۸	۰	۱۰۰۰	۷۶۷	۷/۸
۴	GC-NS8PO0	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۱۴	۳۶	۰	۱۰۰۰	۷۱۸	۸/۳
۵	GC-NS8PO1	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۳۲	۳۶	۹/۲	۱۰۰۰	۶۷۲	۸/۶
۶	GC-NS8PO2	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۳۲	۳۶	۱۸/۴	۱۰۰۰	۶۴۶	۹

موجب افت مقاومت فشاری به میزان ۲۲/۴۹ درصد در این نوع از بتن گردید.

آنالیز و اندازه گیری کمی و کیفی عناصر شیمیایی تشکیل دهنده نمونه های بتن کنترل و بتن قلیا فعال در سن عمل آوری ۷ روزه برای تمام طرح های مخلوط، با استفاده از طیف سنجی فلئورسانس اشعه ایکس (XRF) انجام گرفت، در این آزمون اشعه با شدت تابش ($K\alpha$) (=1.54060 A-Cu) بر روی پودر حاصل از آسیاب بتن سخت شده که از مرکز نمونه بتنی تهیه شده است تابانده شد تا نوع فاز و ساختار بلورین مواد تشکیل دهنده و میزان فعالیت پوزولانی نانوسیلیس و سرباره در طرح های مخلوط بتن تعیین گردد. در این راستا نمونه ها داخل دستگاه XRF با مدل Philips PW1730 قرار داده شدند، در ادامه ترکیب شیمیایی بتن به همراه درصد مصرف آن برای هر نمونه تعیین گردید.

SEM در سن عمل آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی با مدل FEI Quanta200 انجام گرفت.



شکل ۲- نتایج مقاومت فشاری بتن

۳-۲- نتایج آزمون مدول الاستیسیته بتن

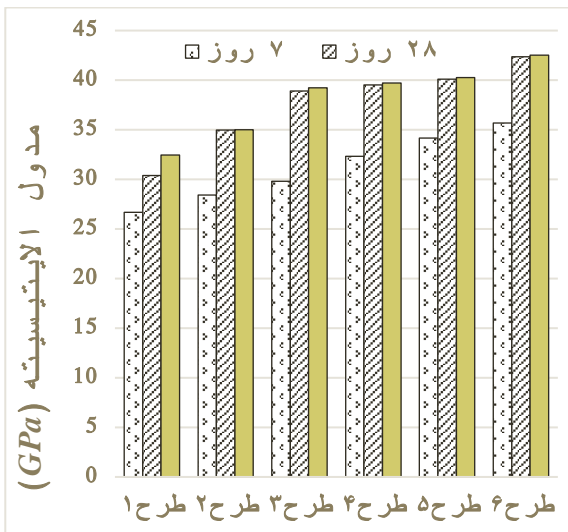
نتایج حاصل از آزمون مدول الاستیسیته بتن، در سن عمل آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در دمای اتاق، براساس نمودار شکل (۳) به نمایش در آمده است. شکل (۴) نمونه بتنی در حال انجام آزمون مدول الاستیسیته را نشان می دهد. بر اساس نتایج بدست آمده در این بخش، افزایش سن عمل آوری بتن موجب بهبود مدول الاستیسیته به میزان ۲۱/۶۳ درصد در بتن معمولی و تا ۳۱/۵۸ درصدی در بتن قلیا فعال گردید. در سن عمل آوری ۹۰ روزه (به عنوان بهترین سن به لحاظ عملکرد)، کمترین (۳۲/۴۴ گیگاپاسکال) و بیشترین (۴۲/۵۱ گیگاپاسکال) مقدار مدول الاستیسیته به ترتیب متعلق به طرح ۱ (شامل بتن معمولی) و طرح ۶ (شامل بتن قلیا فعال حاوی ۲ درصد الیاف پلی اولفین) بدست آمد. در همین سن، افزودن تا ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف در بتن قلیا فعال موجب بهبود مدول الاستیسیته تا میزان ۱۳/۴۲ و ۷/۰۵

۳-۱- نتایج آزمون مقاومت فشاری بتن

در این پژوهش، نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری در نمودار شکل (۲) به نمایش در آمده است.

بر اساس نتایج مشاهده می گردد که افزایش سن عمل آوری موجب بهبود مقاومت فشاری به میزان ۴۸/۸۹ درصد در بتن معمولی و تا میزان ۲۱/۷۸ درصد در بتن قلیا فعال گردیده است. در سن عمل آوری ۹۰ روزه (به عنوان بهترین عملکرد)، کمترین (۴۹/۹۴ مگاپاسکال) و بیشترین (۶۶/۳۶ مگاپاسکال) مقدار مقاومت فشاری به ترتیب متعلق به طرح ۱ (شامل بتن کنترل) و ۴ (شامل بتن قلیا فعال حاوی ۸ درصد نانوسیلیس) بدست آمد. در همین سن، افزودن تا ۸ درصد نانوسیلیس در بتن قلیا فعال موجب بهبود مقاومت فشاری تا میزان ۲۱/۹۴ درصد گردید و افزودن تا ۲ درصد الیاف پلی اولفین به طرح بتن قلیا فعال،

$$E = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\epsilon_2 - 0.000050) \quad (3)$$



شکل ۳- نمودار نتایج آزمون مدول الاستیسیته بتن

۳-۲- نتایج طیف‌سنجی فلئورسانس اشعه ایکس از بتن

در این مقاله، نتایج حاصل از طیف‌سنجی فلئورسانس اشعه ایکس (XRF) بر روی نمونه‌های بتنی حاصل از طرح مخلوط پژوهش پیش رو در سن عمل‌آوری ۷ روزه در دمای اتاق (۲۰ الی ۲۵ درجه سلسیوس)، بر اساس جدول (۲) به نمایش در آمده است. پیرو نتایج این جدول مشاهده می‌گردد که نمونه بتنی طرح ۱ شامل بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند، دارای بیشترین میزان اکسید کلسیم (۳۷/۱۶۹ درصد) نسبت به سایر طرح‌ها است. درصد پایین میزان سیلیس (۱۹/۵۷۴ درصد) در نمونه بتنی طرح ۲ به علت عدم استفاده از نانوسیلیس در طرح مخلوط بتن قلیافعال است در حالیکه این مقدار در طرح‌های ۳ الی ۶ با توجه به وجود نانوسیلیس در طرح مخلوط این نمونه‌ها، با روند افزایش نانوسیلیس از ۴ درصد به ۸ درصد، افزایش یافته است. روند تغییرات در میزان SiO_2 و Al_2O_3 به‌عنوان اجزاء اصلی ترکیب مصالح سیمانی بتن کنترل و بتن قلیافعال در طرح‌ها مشهود است، با افزایش میزان نانوسیلیس در طرح‌های بتن قلیافعال، بر میزان این دو ماده در ترکیب بتن افزوده شده، اما در طرح ۶ به دلیل افزایش میزان الیاف پلی‌اولفین (۲ درصد) به ترکیب بتن، از میزان حضور SiO_2 و Al_2O_3 به ترتیب به مقدار ۰/۶۵ و ۳/۰۷۱ درصد نسبت به طرح ۵ کاسته شده است. میزان خروج عناصری از قبیل آب و مواد کربنی که در اثر گرمای احتراق (LOI) از ترکیب بتن خارج می‌شود، در نمونه طرح ۶ به میزان ۲/۸۹ درصد کمتر از طرح ۱ است. سیلیکات (SiO_2)، آلومینات (Al_2O_3)، آهک (CaO) و اکسید سدیم (Na_2O) به‌عنوان چهار عنصر اصلی با بیشترین میزان مشارکت در ترکیبات بتن قلیافعال حضور دارند، سیلیس و آلومینیم به‌عنوان عناصر اصلی حاضر در ترکیب پیش ماده در ساختار نانوسیلیس و سرباره کوره آهنگدازی شناخته می‌شوند، کلسیم و سدیم نیز از عناصر اصلی تشکیل دهنده محلول قلیایی مصرفی در بتن قلیافعال سرباره‌ای شناخته می‌

درصدی در این نوع از بتن گردید. در این راستا، دباغ و همکاران معتقدند که مدول الاستیسیته بتن تحت تأثیر مدول الاستیسیته اجزای تشکیل دهنده آن از جمله خمیر سیمان قرار دارد، بنابراین افزایش مدول الاستیسیته با افزایش نانوسیلیس که با کاهش تخلخل خمیر سیمان و افزایش مقاومت فشاری همراه است، بدیهی است و به علت ایجاد بتن متراکم تر، سختی بتن و در نتیجه مدول الاستیسیته افزایش یافته است [۲۸]. بر اساس نتایج در این بخش، میزان مدول الاستیسیته بتن در سن ۹۰ روز عمل‌آوری نسبت به ۷ روز عمل‌آوری برای طرح‌های ۱ الی ۶ به ترتیب حدود ۲۲، ۲۳، ۲۳، ۲۳، ۱۸ و ۱۹ درصد افزایش را نشان می‌دهد. از طرفی میزان افزایش مدول الاستیسیته بتن در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در طرح ۶ نسبت به سن عمل‌آوری ۹۰ روزه طرح بتن کنترل و طرح ۲ بتن قلیافعال به ترتیب حدود ۳۱ درصد و ۱۵ درصد افزایش را تجربه کرده است. نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری انجام XRF و SEM ضمن همپوشانی با یکدیگر، در هماهنگی با نتایج حاصل از آزمون مدول الاستیسیته در این مقاله قرار گرفتند.



شکل ۴- نمونه بتنی در حال انجام آزمون مدول الاستیسیته بتن

از طرح‌ها را می‌توان ناشی مشارکت نکردن برخی از ذرات آلومینوسیلیکاتی در فرایند بسپارش و ژئوسپارش دانست که به ایجاد پدیده هسته‌زایی و کلوخه شدن ذرات (ناشی از سرعت بالای فرایند هیدراسیون و ژئوپلیمریزاسیون) منجر می‌گردد. وجود برخی از حفرات و منافذ مویینه^۹ را می‌توان اغلب نتیجه تبخیر آب از فضاهای مویینه بین لایه‌ای در ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) موسوم به ژل توپرموریت دانست که به ایجاد ترک^{۱۰} و پدیده جمع شدگی^{۱۱} ناشی از خشک شدن کمک می‌کند. در طرح‌های بتن قلیافعال، افزودن نانوسیلیس به این طرح‌ها موجب بهبود تراکم و انسجام در بخش ریزساختار بتن گردیده است. از طرفی، حجم ژل‌های هیدراته شده زیاد گردیده و حفرات و منافذ در بتن کاهش یافته است. این مزایا به دلیل عملکرد مطلوب نانوسیلیس در ترکیب با سایر اجزا تشکیل دهنده بتن می‌باشد که به خوبی توانسته نقش خود را که چسبندگی و پرکنندگی در ماتریس بتن قلیافعال است ایفا نماید. در این راستا گزارش شده است که ابتدا، نانو ذرات منافذ ماتریس‌ها را پر می‌کنند، این عمل تخلخل نانو کامپوزیت‌های ژئوپلیمری را کاهش می‌دهد و در نتیجه، یکنواختی منافذ کمتر و ماتریس ژئوپلیمری فشرده‌تری ایجاد می‌کند [۱۰]. به‌طور کلی تحقیقات نشان داده است که، حضور ژل‌های هیدراته شده در بخش ریز ساختار بتن با پر کردن فضاها و حفرات موجب افزایش تراکم و بهبود ریزساختار بتن می‌گردد [۲۹]. از طرفی در طی فرایند واکنش پوزولانی، با تبدیل CH به C-S-H [۷] ریزساختار بتن متراکم و همگن می‌گردد، بنابر این ژل ژئوپلیمری بیشتر و ماتریس متراکم تر ایجاد می‌کند [۳۰].

شوند. روند افزایش مصرف نانو ذرات سیلیس در طرح‌های بتن قلیافعال در نتایج جدول مشهود است، بر این اساس حداکثر میزان نانو ذرات سیلیس در طرح‌های ۴، ۵ و ۶ دیده می‌شود و حداقل آن در ترکیب بتن طرح ۲ مشاهده می‌گردد، حداکثر و حداقل میزان اکسید آلومینیوم موجود در ترکیب متعلق به طرح ۲ و ۱ است.

۳-۳- نتایج تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی از بتن

نتایج حاصل از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با بزرگ‌نمایی ۷۰۰۰ برابر و در مقیاس ۱۰ میکرومتر در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه، بر روی نمونه‌های بتنی حاصل از طرح مخلوط تحقیق پیش-رو، بر اساس شکل (۵) به نمایش در آمده است.

نتایج به‌دست‌آمده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌تواند کمک شایانی در تشخیص ساختار و رفتار بتن نماید و خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ماتریس بتن به شدت به ریز ساختار آن بستگی دارد. با توجه به تصاویر اخذ شده از SEM مشاهده می‌گردد که ریزساختار بتن در تمامی طرح‌های مخلوط از سه فاز اساسی مجزا و متفاوت به شرح ذیل تشکیل شده است:

۱- فاز اول شامل محصولات هیدراسیون^۴ و ژئوپلیمریزاسیون^۵ شامل ژل‌های هیدراته که در تصاویر SEM عمدتاً به رنگ تیره هستند است.
۲- فاز دوم شامل بلورهای واکنش نکرده که در نتیجه ناخالصی‌های موجود در مواد اولیه و یا ذرات واکنش نکرده در فرایند هیدراسیون و ژئوپلیمریزاسیون هستند و در تصاویر SEM عمدتاً به رنگ سفید هستند.

۳- فاز سوم شامل نحوه پیوندهای خمیر سیمان با سنگدانه و الیاف در ناحیه انتقال بین سطحی^۶ تشکیل شده است.

تجزیه و تحلیل SEM نشان می‌دهد که ذرات نانو فضاهای خالی را پر می‌کند، که این امر منجر به ایجاد یکنواختی، حفرات کمتر و ماتریس ژئوپلیمری فشرده در ترکیب بتن می‌شود [۱۰]. در نمونه‌های حاوی الیاف، پل زندگی بین ترک‌ها و جلوگیری از انتشار آن و یکپارچه نگه‌داشتن بتن به واسطه اضافه نمودن الیاف و تاثیر آن در افزایش مقاومت بتن قلیافعال نقش موثری دارد. در تمامی طرح‌های بتن قلیافعال، آثاری از بلورهای شش وجهی و سوزنی شکل که شامل ژل‌های اترینگایت^۷ (C-A-S-H) حاصل از واکنش کلسیم آلومینات و کلسیم سولفات هستند، دیده نمی‌شود. با توجه به ساختار متخلخل اترینگایت، این محصول به تنهایی و در صورت عدم مشارکت در فرایند هیدراتاسیون تاثیر منفی بر خواص مکانیکی^۸ بتن دارد. وجود برخی از کریستال‌های کوچک، سطوح شکست و ذرات گرونی سفید رنگ ناشی از کریستال‌های هیدروکسید کلسیم هیدراته نشده در ساختار بتن برخی

⁴ Hydrolysis

⁵ Polymerization

⁶ Interfacial transition zone (ITZ)

⁷ Ettringite Gel (C-A-S-H)

⁸ Mechanical properties

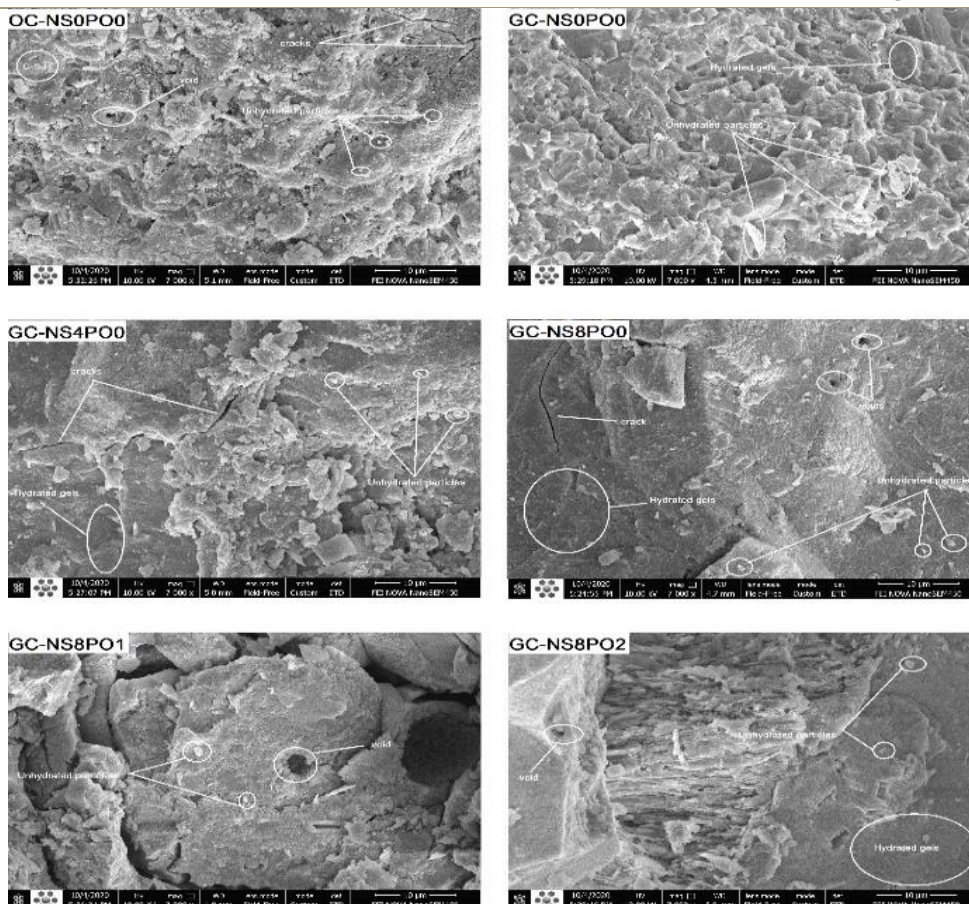
⁹ Capillary Voids

¹⁰ Crack

¹¹ Shrinkage

جدول ۲- نتایج XRF

مقادیر ماده در هر طرح						ترکیب	نام ماده
طرح ۶	طرح ۵	طرح ۴	طرح ۳	طرح ۲	طرح ۱	شیمیایی	
۳۶/۸۳۴	۳۷/۰۷۶	۳۶/۳۳۱	۳۲/۰۲۶	۱۹/۵۷۴	۲۷/۱۲۲	SiO ₂	سیلیس
۶/۹۱	۷/۱۲۹	۷/۰۱۳۱	۶/۷۲	۸/۰۷۳	۵/۶۳۹۵	Al ₂ O ₃	اکسید آلومینیوم
۱۵/۱۸۶	۱۵/۳۱۲	۱۵/۲۵۷	۲۳/۶۰۹	۲۶/۸۱۵	۳۷/۱۶۹	CaO	اکسید کلسیم
۳/۰۱۹	۱۲/۶۴۹	۱۲/۸۷۲	۹/۰۱۶	۱۵/۱	۱/۱	Na ₂ O	اکسید سدیم
۴/۰۱۲	۳/۷۹	۳/۹۴	۳/۹۴	۵/۶۴	۷/۲۰۹۸	Fe ₂ O ₃	اکسید آهن
۲/۸۹۳	۳/۱۵۲	۳/۰۱۳۳	۴/۰۱۴	۵/۰۵۱	۲/۱۱۴	MgO	اکسید منیزیم
۱/۱۴۷	۱/۱۲۹	۱/۰۵۲۶	۱/۰۱۵	۱/۰۱۳	۰/۹۱۴۴	K ₂ O	اکسید پتاسیم
۱/۹۸۷	۱/۹۰۲	۲/۸۲۲	۱/۸۷۵	۱/۱۶۴	۱/۵۹۱۳	SO ₃	اکسید گوگرد
۱/۲۰۱	۰/۰۳۹	۱/۱۷۳	۱/۰۸۶	۰/۹۶۱	۰/۴۷۲	TiO ₂	اکسید تیتانیم
۰/۱۵۳	۰/۱۳۹	۰/۱۳۱	۰/۱۴۴	۰/۱۷۴	۰/۱۶۳	P ₂ O ₅	اکسید فسفر
۰/۷۱۹	۰/۶۴۹	۰/۶۸۴	۰/۶۵۵	۰/۳۹۵	۰/۰۹۱	MnO	اکسید منگنز
۱۵/۹۳۹	۱۶/۰۳۴	۱۵/۷۱۱	۱۵/۹	۱۶/۰۴	۱۶/۴۱۴	LOI	افت حرارتی



شکل ۵- تصاویر SEM

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق آزمایشگاهی، به بررسی مدول الاستیسیته بتن قلیافعال سرباره‌ای بر اساس انجام آزمون مقاومت فشاری و طیف‌سنجی فلئورسانس اشعه ایکس (XRF) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) پرداخته شد. اهم نتایج حاصل از آزمون‌های این پژوهش به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

۱- در آزمون مقاومت فشاری در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه (به‌عنوان بهترین عملکرد)، افزودن تا ۸ درصد نانوسیلیس به ترکیب بتن قلیافعال، موجب بهبود مقاومت فشاری تا میزان ۲۱/۹۴ درصد گردید.

۲- در آزمون مقاومت فشاری در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه (به‌عنوان بهترین عملکرد)، کمترین (۴۹/۹۴ مگاپاسکال) و بیشترین (۶۶/۳۶ مگاپاسکال) مقدار مقاومت فشاری به‌ترتیب متعلق به طرح ۱ (شامل بتن کنترل) و ۴ (شامل بتن قلیافعال حاوی ۸ درصد نانوسیلیس) بدست آمد.

۳- افزایش سن عمل‌آوری در بتن، موجب بهبود مدول الاستیسیته به میزان ۲۱/۶۳ درصد در بتن معمولی و تا ۳۱/۵۸ درصدی در بتن قلیافعال گردید.

۴- در آزمون مدول الاستیسیته در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه (به‌عنوان بهترین سن به لحاظ عملکرد)، کمترین (۳۲/۴۴ گیگاپاسکال) و بیشترین (۴۲/۵۱ گیگاپاسکال) مقدار مدول الاستیسیته به‌ترتیب متعلق به طرح ۱ (شامل بتن معمولی) و طرح ۶ (شامل بتن قلیافعال حاوی ۲ درصد الیاف پلی‌اولفین) بدست آمد.

۵- در آزمون مدول الاستیسیته در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه (به‌عنوان بهترین سن به لحاظ عملکرد)، افزودن تا ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف در بتن قلیافعال موجب بهبود مدول الاستیسیته تا میزان ۱۳/۴۲ و ۷/۰۵ درصدی در این نوع از بتن گردیده است.

۶- در تمام آزمون‌ها و سنین عمل‌آوری، نتایج حاصل از مخلوط‌های بتن قلیافعال دارای برتری نسبت به نتایج بدست آمده از بتن معمولی است. به‌طوریکه در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه (به‌عنوان سن بهینه) نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری در طرح ۴ (بتن قلیافعال دارای ۸ درصد نانوسیلیس) و طرح ۶ (بتن قلیافعال دارای ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف پلی‌اولفین) به‌ترتیب دارای ۳۲/۸۸ و ۳ درصد برتری نتایج نسبت به بتن معمولی است. برای آزمون مدول الاستیسیته در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه، طرح‌های ۴ و ۶ به‌ترتیب شامل ۲۲/۴۱ و ۳۱/۰۴ درصد برتری نتایج نسبت به بتن معمولی را کسب کردند.

۷- نتایج حاصل از XRF و SEM ضمن همپوشانی با یکدیگر، در هماهنگی با نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته قرار داشتند.

منابع و مراجع

- [1] Davidovits J. Soft mineralurgy and geopolymers. Proc. 1st Int.Conf. on geopolymers. 1988; 19-21.
- [2] Neupane N, Chalmers D, Kidd P. High-strength geopolymer concrete properties, advantages and challenges. *Advances in Materials*. 2018; 7(2): 15-25.
- [3] Davidovits J. Geopolymeric reactions in the economic future of cements and concretes. world-wide mitigation of carbon dioxide emission. In: G'99 Geopolymer International conference, Saint Quentin, France. 1999; 111-122.
- [4] Duxson P, Provis JL, Lukey GC, van Deventer JSJ. The role of inorganic polymer technology in the development of "green concrete". *Cem Concr Res*. 2007; 37: 1590-7.
- [5] Ryu G.S, Lee YB, Koh KT, Chung YS. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*. 2013; 47: 409-418.
- [6] Mehdipour S, Nikbin IM. Mechanical properties, durability and environmental evaluation of rubberized concrete incorporating steel fiber and metakaolin at elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 254: 120-126.
- [7] Du H, Du S, Liu X. Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and building materials*. 2014; 73: 705-712.
- [8] Siddique R, Kaur D. Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures. *Journal of Advanced Research*. 2012; 3(1): 45-51.
- [9] Yüksel İ, Siddique R, Özkan Ö. Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement. *Construction and building materials*. 2011; 25(2): 967-972.
- [10] Assaedi H, Alomayri T, Shaikh F, Low IM. Influence of nano silica particles on

- [19] Yost J.R, Radlińska A, Ernst S, Salera M. (2013). Structural behavior of alkali activated fly ash concrete. Part 1: Mixture design, material properties and sample fabrication. *Materials and structures*, 46(3), 435-447.. *Structural behavior of alkali activated fly ash concrete. Part 1: mixture design, material properties and sample fabrication*. Materials and structures. 2013; 46(3): 435-447.
- [20] Madandoust R, Ranjbar M.M, Ghavidel R, Shahabi S.F. *Assessment of factors influencing mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete*. Materials and Design. 2015; 83: 284-294.
- [21] Dadmand B, Pourbaba M, Sadaghian H, Mirmiran A. Experimental & numerical investigation of mechanical properties in steel fiber-reinforced UHPC. *Computers and Concrete, An International Journal*. 2020; 26(5): 451-465.
- [22] Deb P, Nath P, Sarker P. Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Procedia Engineering*. 2015; 125: 594-600.
- [23] Tajodeni M. 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*. 2016; 24(1/1): 13-22.
- [24] Mansourghanaei M, Biklaryan M, Mardokhpour A. Evaluate of Structural and hydraulic properties of Geopolymer Concretes blast furnace slag by using nanosilica and polyolefin fiber in Concrete Dams. *Dam and Hydroelectric Powerplant*. 2021; 8(29) :52-63.
- [25] Mansourghanaei M, Biklaryan M, Mardookhpour A. Experimental Study of Compressive Strength of Geopolymer Concrete Based on XRF and SEM Analysis. *Analysis of Structure and Earthquake*. 2022; 18(4): 55-64.
- [26] Mohammadi Y, Seifollahi F. The Effect of nano-silica and polypropylene fibers on mechanical properties and durability of normal and light weight concretes. durability of flax fabric reinforced geopolymer composites. *Materials*. 2019; 12(9): 1459.
- [11] Law DW, Adam AA, Molyneaux T.K, Patnaikuni I, Wardhono A. Long term durability properties of class F fly ash geopolymer concrete. *Materials and Structures*. 2015; 48(3): 721-731.
- [12] Ekinçi E, Türkmen İ, Kantarci F, Karakoç M.B. 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* 2019; 201: 257-267.
- [13] Supit SWM, Shaikh FUA. Durability properties of high volume fly ash concrete containing nano-silica. *Materials and structures*. 2015; 48(8): 2431-2445.
- [14] Yousefvand M, Sharifi Y, Yousefvand S. An Analysis of the Shear Strength and Rupture Modulus of Polyolefin-Fiber Reinforced Concrete at Different Temperatures. *Journal of civil Engineering and Materials Application*. 2019; 3(4): 238-254.
- [15] Chellapandian M, Mani A, Prakash SS. Effect of macro-synthetic structural fibers on the flexural behavior of concrete beams reinforced with different ratios of GFRP bars. *Composite Structures*. 2020; 254: 112790.
- [16] Rashad AM. The effect of polypropylene, polyvinyl-alcohol, carbon and glass fibres on geopolymers properties. *Materials Science and Technology*. 2019; 35(2): 127-146.
- [17] Esfahani M, Rajabzade M, Ramezani A. Evaluation of hybrid fiber reinforced concrete subjected to freezing and thawing cycles using relative dynamic modulus of elasticity. *Concrete Research*. 2019; 12(2), 33-48.
- [18] Neves RD, Fernandes de Almeida J. *Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete*. *Structural Concrete*. 2005; 6(1): 1-8.

Modares Civil Engineering journal. 2017; 17(4): 187-198.

- [27] Ehsani A, Nili M, Shaabani K. Effect of nanosilica on the compressive strength development and water absorption properties of cement paste and concrete containing Fly Ash. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2017; 21(5): 1854-1865.
- [28] Dabbagh H, Akbarpour S. Behavior of Structural Lightweight Concrete Containing Nano Silica and Steel Fibers under Compressive Monotonic Loading. *Concrete Research*. 2017; 10(1): 35-46.
- [29] Mehta P. K, Monteiro P. J. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education. 2014.
- [30] Phoo-ngernkham T, Chindapasirt P, Sata V, Hanjitsuwan S, Hatanaka S. The effect of adding nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Materials and Design*. 2014; 55: 58-65.