



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Investigation of the effect of sodium hydroxide to sodium silicate ratio on compressive strength of geopolymer concrete containing recycled concrete aggregates: Experimental and modeling studies

Akbar Jooyandeh Mirza¹, Mohammad Hadi Alizadeh Elizai² * Mohsen Adabi³

1- PhD student in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Roodehen, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor of Civil Engineering - Structure, Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Roodehen, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Roodehen, Tehran, Iran.

ABSTRACT

Geopolymer concrete has been proposed in recent years as a green alternative to conventional concrete, which can reduce the negative environmental effects of Portland cement production. In this study, the effect of three different factors such as metakaolin replacement, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio and polypropylene fiber percentage on the compressive strength of geopolymer concrete at 7 and 28 days was evaluated. The results showed that with increasing the ratio of sodium silicate solution to sodium hydroxide, the compressive strength of concrete increases significantly up to 22%. Also, in the analysis of the metakaolin replacement per fly ash, it was concluded that with increasing the percentage of metakaolin replacement up to 30%, the compressive strength of the control sample increased to about 14%. Also, as a general result, adding polypropylene fibers up to 1.5% by volume did not have much effect on the compressive strength of geopolymer concrete. Moreover, the mixed designs obtained along with the compressive strength of the specimens were modeled using the artificial neural network and multivariate regression analysis. Based on the training and testing results, the artificial neural network method in the RMSE and MAE semesters with values of 1.998 and 1.5899, respectively, has an acceptable performance compared to the multivariate regression analysis in predicting compressive strength of geopolymer concrete. In addition, the results of sensitivity analysis showed that $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ and sample age had the most effect and polypropylene fibers had the least effect in predicting the compressive strength of geopolymer concrete.

ARTICLE INFO

Receive Date: 13 January 2022

Revise Date: 15 March 2022

Accept Date: 11 April 2022

Keywords:

Geopolymer concrete
Compressive strength
Polypropylene fibers
Recycled concrete aggregate
artificial neural network

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.323545.2693>

*Corresponding author: Mohammad Hadi Alizadeh Elizai
Email address: alizadeh.mh@riau.ac.ir

بررسی تاثیر نسبت هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر حاوی سنگدانه‌های بتن بازیافتی: مطالعه آزمایشگاهی و مدلسازی

اکبر جوینده میرزا^۱، محمد هادی علیزاده الیزئی^{۲*}، محسن آدابی^۳

۱- دانشجوی دکتری عمران - سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی رودهن، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه عمران - سازه (نویسنده مسئول)، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی رودهن، تهران، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی رودهن، تهران، ایران.

چکیده

بتن ژئوپلیمری در سال‌های اخیر به عنوان یک جایگزین سبز برای بتن پرتلند مطرح شده است که می‌تواند از اثرهای منفی زیست محیطی تولید سیمان پرتلند بکاهد. ژئوپلیمرها از دو بخش اصلی منبع آلومیناسیلیکاتی و محلول فعال‌کننده قلیایی ساخته می‌شوند که رایج‌ترین منابع آلومیناسیلیکاتی متاکائولن و خاکستر بادی است. در این مطالعه، تاثیر سه عامل مختلف نظیر، درصد جایگزینی متاکائولین، نسبت $Na_2SiO_3/NaOH$ و درصد الیاف PP بر مقاومت فشاری این نمونه‌های بتنی دوستدار محیط‌زیست در سنین ۷ و ۲۸ روزه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم مقاومت فشاری بتن افزایش قابل توجهی تا ۲۲ درصد دارد. همچنین در تحلیل مقدار جایگزینی ماده متاکائولین در ازای خاکستر بادی، اینگونه استنتاج شد که با افزایش درصد جایگزینی متاکائولین تا ۳۰ درصد، مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد تا حدود ۱۴ درصد افزایش یافت. همچنین به عنوان یک نتیجه کلی، اضافه کردن الیاف PP بیشتر از ۰/۵ درصد حجمی، تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری نداشته است. در ادامه این مطالعه با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و آنالیز رگرسیون چندمتغیره مقاومت فشاری مدل‌سازی و رابطه‌ای جهت تخمین مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری ارائه گردیده است. بر اساس نتایج بدست‌آمده در مرحله و آزمایش، روش شبکه عصبی مصنوعی در ترم RMSE و MAE به ترتیب با داشتن مقادیر ۱/۹۹۸ و ۱/۵۸۹ دارای عملکرد قابل‌قبولی نسبت به روش آنالیز رگرسیون چندمتغیره در پیش‌بینی مقادیر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری از خود نشان داده‌اند. همچنین، نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که $Na_2SiO_3/NaOH$ و سن نمونه بیش‌ترین تاثیر و الیاف PP کمترین تاثیر را در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری داشته‌اند.

کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمر، مقاومت فشاری، الیاف پلی‌پروپیلن، سنگدانه بتن بازیافتی، شبکه عصبی مصنوعی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
https://doi.org/10.22065/jsce.2022.323545.2693	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2022.323545.2693	۱۴۰۱/۱۱/۳۰	۱۴۰۱/۰۱/۲۲	۱۴۰۱/۰۱/۲۲	۱۴۰۰/۱۲/۲۴	۱۴۰۰/۱۰/۲۳
محمد هادی علیزاده الیزئی alizadeh.mh@riau.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

بتن به علت داشتن ویژگی‌های خاص مانند شکل‌پذیری، در دسترس بودن مصالح اولیه و ارزان بودن پرمصرف‌ترین مصالح در صنعت ساخت و ساز، بعد از آب است. پیش‌بینی می‌شود که نیاز به مصرف بتن در آینده بیشتر شود و این افزایش تقاضا به معنی افزایش تقاضا برای تولید سیمان پرتلند، به عنوان ماده اصلی سازنده بتن است [۱]. اما تولید سیمان پرتلند معایب بزرگ زیست محیطی، از جمله: مصرف بالای انرژی، مصرف منابع اولیه و انتشار گاز دی‌اکسید کربن دارد. به طوری که تولید یک تن سیمان پرتلند سبب رهاسازی تقریباً یک تن دی‌اکسید کربن (CO₂) به محیط زیست و مصرف ۱/۵ تن مواد اولیه می‌شود [۲-۴]. از سوی دیگر، آلودگی و پدیده گرمایش جهانی به مهمترین نگرانی‌ها در کشورهای پیشرفته تبدیل شده است و علت این پدیده گرمایش کره زمین ناشی از گازهای گلخانه‌ای شمرده شده است و در میان گازهای گلخانه‌ای، دی‌اکسید کربن با میزان ۶۵ درصد، بیشترین نقش را در پدیده گرمایش زمین دارد [۵]. از این میزان انتشار گاز، فرایند تولید سیمان پرتلند حدود ۸ درصد را به خود اختصاص داده است که درصد قابل ملاحظه‌ای می‌باشد [۶]. ایران نیز به عنوان پنجمین کشور تولیدکننده سیمان پرتلند در معرض این مشکلات زیست محیطی قرار دارد و می‌بایست راه‌حل‌های مدیریتی جدیدی در خصوص این موضوع با اهمیت اتخاذ شود تا از حالا به فکر آینده بحرانی ناشی از این مسئله بود [۷].

در سال ۱۹۷۹ برای اولین بار اصطلاح ژئوپلیمر توسط دیویدوویتس^۱ به عنوان رشته جدید از مواد آلومیناسیلیکاتی با ساختار سه بعدی بیان گردید [۸]. توسعه ژئوپلیمرها بستر مناسبی برای رشد و تولید محصولات گوناگون که پایه آنها ژئوپلیمرها بودند را فراهم کرد. ملات ژئوپلیمر ملاتی است که در آن سیلیکون و آلومینیوم در کنار یک محلول قلیایی با نقش چسبنده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹ و ۱۰]. در حقیقت ژئوپلیمرها به علت اینکه مواد اولیه مورد استفاده در آنها فراوان یافت می‌شود و نسبت به سیمان‌های آلی ارزان‌تر است و محدوده دمایی تولید آنها پایین‌تر از سیمان‌های مرسوم می‌باشد، جایگزینی مناسبی برای انواع سیمان هستند. به همین دلیل میزان انتشار آلاینده‌های دی‌اکسید کربن و آلاینده‌های حاصل از سوختن پلاستیک در آنها کمتر می‌باشد. همچنین به عنوان یک راه‌حل اثر گذار و ارزشمند، استفاده از بتن‌های ژئوپلیمری می‌تواند انتشار دی‌اکسید کربن را ۴۴ تا ۶۴ درصد در مقایسه با سیمان پرتلند، کاهش دهد [۱۱]. همچنین استفاده از این نوع بتن، سبب استفاده بهینه از ضایعات موجود می‌شود که تأثیر مثبتی بر محیط زیست دارد [۱۲]. از نظر خواص مهندسی مورد نیاز در مهندسی عمران، بتن‌های ژئوپلیمری خصوصیات مکانیکی و شیمیایی بهتری نسبت به بتن‌های معمولی دارند که از جمله آنها می‌توان به مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بیشتر [۱۳-۱۵] سخت شدن سریع‌تر [۱۶، ۱۵]، دوام بیشتر [۱۷]، مقاومت در برابر آتش سوزی [۱۸-۲۰]، نفوذپذیری کمتر و مقاومت در برابر حمله نمک‌ها و اسیدها [۲۲ و ۲۱] و خزش کمتر [۲۳ و ۲۴] اشاره کرد.

کرکلو و همکاران [۱۱] در تحقیقاتی سرباره کوره آهن و خاکستر بادی درشت را جایگزین ژئوپلیمر در ابعاد مختلف کردند. در این تحقیق سدیم هیدروکسید سرباره کوره آهنی و همچنین ۱۴ مول محلول به عنوان مواد حاوی باندینگ در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد مورد بررسی و استفاده قرار گرفت. سپس روی نمونه ملات با بیشترین مقاومت فشاری و رفتار درجه حرارت بالا آن به دست آمد. به همین دلیل نمونه ملات با بالاترین مقاومت فشاری تحت دمای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد مورد آزمایش و بررسی قرار گرفتند و تغییر خواص مکانیکی و فیزیکی آن در دماهای مختلف آزمایش شده مورد بررسی قرار گرفت. که نهایتاً نتیجه این آزمایشات، حداکثر مقدار مقاومت خمشی (۳/۶ مگاپاسکال) از نمونه‌های ملات با محتوای ۲۵٪ سرباره تحت آزمایش برای ۵ ساعت بدست آمد. بیشترین مقدار مقاومت فشاری (۲۷/۳ مگا پاسکال) از نمونه‌های ملات با محتوای ۱۰۰٪ سرباره به مدت ۴۸ ساعت تحت آزمایش و بررسی قرار گرفت.

غلامپور و همکاران [۲۵] تحقیقاتی در جهت استفاده از مواد سازگار با محیط زیست برای استفاده در بتن ژئوپلیمر انجام دادند. در این تحقیق که مصالح ساختمانی با هدف کاهش تأثیر صنعت ساخت و ساز بر محیط زیست مد نظر قرار گرفته شد و مصالحی مانند خاکستر بادی و سرباره کوره انفجار آهن، شن و ماسه طبیعی با ماسه‌های مبتنی بر زباله کوره مانند سرباره کاربرد و شن و ماسه شیشه جایگزین می‌شود. کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، کاهش استخراج منابع طبیعی غیر قابل احیا از نتایج استفاده از مواد به ظاهر زاید در تولید بتن می‌باشد. در تمام جزئیات و پژوهش‌هایی که در این مقاله بر روی اثرات این نوع ملات روی ساختار محیط زیست و طبیعت مطالعه کرده

¹ Davidovits

و تاثیر محیط زیستی محصولات را در بر داشته است. پاتل و شاه [۲۶] مطالعه ای در ارتباط با بهبود خواص بتن سازگار با محیط زیست حاوی سرباره کوره آهنی با استفاده از ترکیب این طرح اختلاط با خاکستر پوسته برنج انجام دادند. ایشان با افزودن درصدهای ترکیبی ۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزینی خاکستر پوسته برنج در طرح اختلاط این بتن عملکرد این بتن را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق مقاومت فشاری، کششی، خمشی و همچنین خواص تازه بتن مورد ارزیابی قرار گرفته است. ساینی و واتپالی [۲۷] در تحقیقی اثر نانو سیلیس در بتن های پایدار حاوی سرباره کوره آهنی را بررسی نمودند. در این مطالعه ۶ طرح اختلاط با مولاریته ۱۰، ۱۲ و ۱۶ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد مخلوط ۱۶ مولار با ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب چسباننده و ۲ درصد نانو سیلیس بیشترین میزان مقاومت فشاری، کششی و خمشی را به ترتیب با ۸/۳۳، ۷/۸۷۵ و ۶/۳۹۸ در سنین ۹۰ روز داشته است. شارما و همکاران [۲۸] نیز در پژوهشی در مورد فاکتورهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی، نتیجه گیری کردند که با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم تا ۱۶ مول، مقاومت فشاری بتن افزایش می یابد اما با افزایش بیشتر غلظت تا ۱۸ مول، تغییر قابل ملاحظه ای در مقاومت فشاری دیده نمی شود. صلیح و یونس [۲۹] بتن ژئوپلیمر حاوی پوزولان و مواد بازیافتی را مورد بررسی قرار دادند. ایشان در این مطالعه با تغییر مقادیر سدیم هیدروکسید، مولاریته (۸، ۱۰ و ۱۲ مولار) و همچنین سدیم سیلیکات به ارزیابی خواص تازه و مکانیکی در این بتن توسعه یافته استفاده شده است. همچنین اثر سنگدانه بازیافتی نیز در این تحقیق بررسی شده است.

در این مطالعه، بتن ژئوپلیمر حاوی مواد آلومینوسیلیکاتی، متاکائولین و خاکستر بادی، به همراه دو نوع الیاف فولاد و پلی پروپیلن (PP²) با نسبت های مختلف هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم به عنوان مواد قلیایی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، تاثیر درصد-های حجمی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ الیاف PP بر روی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج مربوط به هر یک از طرح های اختلاط این نوع از بتن های سازگار با محیط زیست در شاخص مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. پس از به پایان رسیدن مطالعات آزمایشگاهی، طرح های اختلاط به همراه نتایج مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر در سنین مختلف، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و آنالیز رگرسیون چندمتغیره مدل سازی و رابطه ریاضی جهت تخمین مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری ارائه شد و نتایج مربوط به این مطالعه تحلیلی مورد بحث قرار گرفت.

۲- مواد و روش ها

۱-۲- مصالح آزمایشگاهی

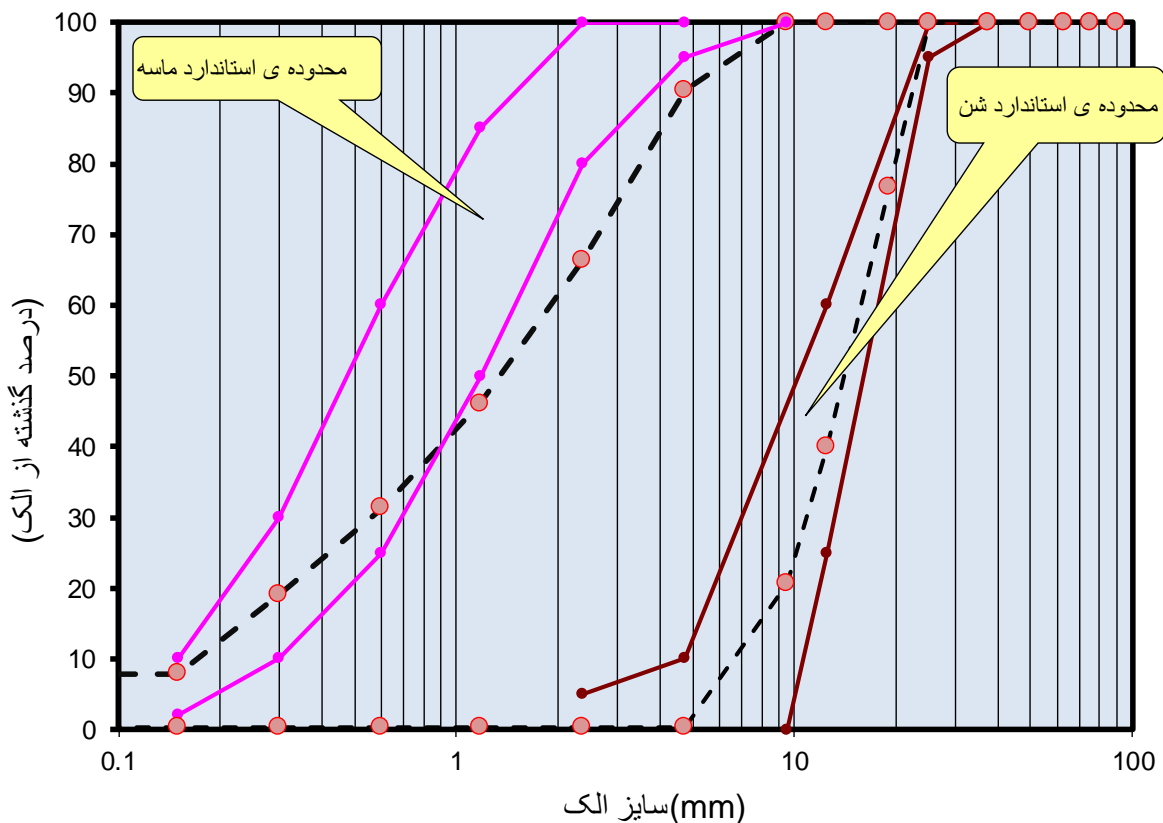
مصالح استفاده شده در این تحقیق جهت تهیه بتن ژئوپلیمری عبارت است از آلومینوسیلیکاتی، محلول های قلیایی هیدروکسید سدیم، سیلیکات سدیم، شن، ماسه و الیاف هستند. مواد آلومینوسیلیکاتی استفاده شده جهت تولید بتن ژئوپلیمر، مواد معدنی متاکائولین و خاکستر بادی می باشند. تجزیه شیمیایی این مصالح در جدول شماره ۱ آمده است. در این تحقیق متاکائولین از معدن دلیجان و خاکستر بادی نیز از اصفهان تهیه شده است. محلول های قلیایی استفاده شده، محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم هستند. محلول سیلیکات سدیم به شکل ژل با ترکیب ۵۴/۱ درصد آب، ۳۲/۵ درصد SiO₂ و ۱۳/۴ درصد Na₂O تهیه شده است. محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۴ مولار تهیه شدند. لازم به ذکر است که NaOH به صورت پرک با خلوص ۹۵ درصد در آب تهیه شده است. لازم به ذکر است که برای تهیه محلول NaOH، ۲۴ ساعت قبل از انجام آزمایش می بایست آب مقطر و NaOH جامد ترکیب شوند تا پس از فرآیند گرمایی به دمای محیط بازگردند. در این پژوهش، برای بررسی تاثیر نسبت SiO₂ به Na₂O از دو نسبت ۲ و ۲/۵ برای ساخت محلول های فعال کننده قلیایی استفاده شد. شن و ماسه استفاده شده در این پژوهش، از نوع بازیافتی می باشند.

² Polypropylene

جدول ۱: مشخصات شیمیایی مواد پوزولانی

مشخصات شیمیایی	خاکستر بادی	متاکاولین
SiO ₂	۵۷/۰۱	۵۴/۵
CaO	۵/۷۹	۱/۱
Al ₂ O ₃	۲۴/۹۶	۳۱/۱
Fe ₂ O ₃	۵/۱۵	۴/۴
MgO	۲/۷۵	۲/۳
Na ₂ O	۳/۲۳	۲/۱
K ₂ O	۱/۵۳	۴/۵۷
L.O.I	۱/۲۵	۱/۴

در این تحقیق برای ساخت تنونه‌های بتن ژئوپلیمر بازیافتی، از نمونه‌های بتنی ضایعاتی آزمایشگاه‌های کارگاهی استفاده شده است و این نمونه‌های بتنی ضایعاتی در محل دپو شد. سپس تمامی نمونه‌های بتنی به محل سنگ‌شکن انتقال داده شد و تبدیل به سنگدانه‌های بازیافتی شده و در محل آزمایشگاه دانه‌بندی صورت گرفت. نمودار دانه‌بندی شن و ماسه در شکل ۱ قابل مشاهده است. درصد جذب آب برای مصالح بازیافتی ریزدانه و درشت‌دانه به ترتیب ۲/۸ و ۲/۱ بدست آمد و وزن مخصوص برای هر یک از این سنگدانه‌ها نیز به ترتیب ۲۵۶۵ و ۲۵۸۰ گزارش شده است.



شکل ۱: نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی بازیافتی

الیاف استفاده شده نیز شامل دو نوع الیاف که نوع اول، پلی پروپیلن و نوع دوم الیاف فولاد بوده است که مقدار الیاف فولاد بکار گرفته شده در این پژوهش ثابت و برابر ۱ درصد حجمی طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری می‌باشد. هر دو نوع الیاف از شرکت کیمیاکس تهران تهیه شد (شکل ۲) و مشخصات آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات الیاف‌های بکار رفته در طرح اختلاط

پلی پروپیلن	فولاد	پارامترها
۶	۵	طول (میلیمتر)
۰/۹۳	۷/۸	دانسیته (گرم بر سانتی متر مکعب)
۴۰۰	۲۵۰۰	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
خیر	خیر	قابلیت جذب آب
عالی	عالی	مقاومت در برابر قلیایی و اسیدی
-	۰/۱۲	قطر (میلیمتر)



شکل ۲: الیاف‌های فولاد و پلی پروپیلن به کار گرفته شده در این تولید بتن ژئوپلیمر

۲-۲- طرح اختلاط

در این پژوهش، ۲۴ طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری با هدف ارزیابی تاثیر نسبت هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم و همچنین درصد الیاف پلی پروپیلن با مقادیر ثابت سنگدانه و الیاف فولاد ساخته شده اند. در این پژوهش برای بررسی میزان بهبود مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر از دو نسبت ۲ و ۲/۵ برای $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ و سه درصد حجمی مختلف ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد از الیاف پلی پروپیلن استفاده شده است. جزئیات طرح‌های اختلاط پیشنهادی برای بتن ژئوپلیمر حاوی سنگدانه بازیافتی در جدول ۳ قابل مشاهده است. نکته قابل توجه در تهیه محلول قلیایی بحث شدت گرمازا بودن واکنش میان آب و ماده NaOH و تولید حرارت بالای آن می‌باشد. به این دلیل، این محلول می‌بایستی در روز قبل از استفاده آماده شده و به دمای محیط برسد.

جدول ۳: طرح‌های اختلاط مربوط به نمونه‌های بتن ژئوپلیمری

مولاریته	NaOH/Na ₂ SiO ₃	NaOH (Kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (Kg/m ³)	درشتدانه (Kg/m ³)	ریزدانه (Kg/m ³)	الیاف PP (%)	متاکائولین (Kg/m ³)	خاکستر بادی (Kg/m ³)	نام نمونه
۱۴	۲	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۰	۰	۶۰۰	RGC
۱۴	۲	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۰	۶۰	۵۴۰	GC2-MK10
۱۴	۲	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۰	۱۲۰	۴۸۰	GC2-MK20
۱۴	۲	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۰	۱۸۰	۴۲۰	GC2-MK30
۱۴	۲	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۰/۵	۶۰	۵۴۰	GC2-MK10-PP0.5
۱۴	۲	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۰/۵	۱۲۰	۴۸۰	GC2-MK20-PP0.5
۱۴	۲	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۰/۵	۱۸۰	۴۲۰	GC2-MK30-PP0.5
۱۴	۲	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۱	۶۰	۵۴۰	GC2-MK10-PP1
۱۴	۲	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۱	۱۲۰	۴۸۰	GC2-MK20-PP1
۱۴	۲	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۱	۱۸۰	۴۲۰	GC2-MK30-PP1
۱۴	۲	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۱/۵	۶۰	۵۴۰	GC2-MK10-PP1.5
۱۴	۲	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۱/۵	۱۲۰	۴۸۰	GC2-MK20-PP1.5
۱۴	۲	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۱/۵	۱۸۰	۴۲۰	GC2-MK30-PP1.5
۱۴	۲/۵	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۰	۶۰	۵۴۰	GC2.5-MK10
۱۴	۲/۵	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۰	۱۲۰	۴۸۰	GC2.5-MK20
۱۴	۲/۵	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۰	۱۸۰	۴۲۰	GC2.5-MK30
۱۴	۲/۵	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۰	۶۰	۵۴۰	GC2.5-MK10-PP0.5
۱۴	۲/۵	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۰/۵	۱۲۰	۴۸۰	GC2.5-MK20-PP0.5
۱۴	۲/۵	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۰/۵	۱۸۰	۴۲۰	GC2.5-MK30-PP0.5
۱۴	۲/۵	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۰/۵	۶۰	۵۴۰	GC2.5-MK10-PP1
۱۴	۲/۵	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۱	۱۲۰	۴۸۰	GC2.5-MK20-PP1
۱۴	۲/۵	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۱	۱۸۰	۴۲۰	GC2.5-MK30-PP1
۱۴	۲/۵	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۱	۶۰	۵۴۰	GC2.5-MK10-PP1.5
۱۴	۲/۵	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۱/۵	۱۲۰	۴۸۰	GC2.5-MK20-PP1.5
۱۴	۲/۵	۹۵	۱۹۰	۹۸۰	۵۲۵	۱/۵	۱۸۰	۴۲۰	GC2.5-MK30-PP1.5

۳-۲- روش ساخت و عمل آوری

ساخت مخلوط‌های بتن ژئوپلیمری در داخل پن میکسر با ظرفیت ۵۰ لیتر موجود در آزمایشگاه یکی از موسسات تحقیقاتی صورت پذیرفته است. ابتدا مصالح سنگی را در میکسر قرار داد تا مواد درشت‌دانه و سنگدانه با یکدیگر مخلوط شوند. سپس، مواد پوزولانی شامل خاکستر بادی و متاکائولین را وارد میکسر کرده تا با سنگدانه‌ها به خوبی مخلوط شوند. الیاف‌های مورد استفاده در این پژوهش را پس از آن، یک به یک و پراکندگی مشخص داخل میکسر کرده تا خوب مخلوط شوند. در این مرحله، محلول قلیایی ترکیب شده از هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم به مخلوط خشک درون میکسر اضافه شده و اختلاط به مدت ۲ دقیقه ادامه می‌یابد. پس از اختلاط و انجام آزمایش بتن تازه، قالب‌گیری در داخل قالب‌های از پیش روغن زده، صورت می‌پذیرد و عمل‌آوری نمونه‌های ژئوپلیمری آغاز می‌شود. در این مرحله، نمونه‌های داخل قالب به مدت ۲۴ ساعت در اوون با ۶۰ درجه سانتی‌گراد دما نگهداری می‌شوند و پس از این مدت از قالب‌ها خارج می‌شوند. پس از خروج نمونه‌های از قالب‌ها، نمونه‌های بتن ژئوپلیمری در محیط آزمایشگاه تا سن مربوط به آزمایش‌ها نگهداری شد. بر

اساس شواهد، اینگونه برداشت شد که عمل آوری نمونه‌ها در داخل آب و محیط، تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر نداشته و عملاً نگهداری نمونه‌ها در آب باعث کاهش عملیات آزمایشگاهی در این پژوهش می‌شده است.

۲-۴- آزمایش مقاومت فشاری

از آنجایی که یکی از مهمترین ویژگی‌های بتن مقاومت فشاری قابل توجه آن است و از طرف دیگر، مدت زمان انجام شدن آزمایش آن هم کوتاه می‌باشد، بنابراین در اکثر گزارش‌های ارائه شده در این باره، به این موضوع پرداخته شده است. نمونه مکعبی بتنی 10×10 را در دو فک دستگاه گذاشته و دریچه ضامن را محکم می‌بندیم و ابعاد نمونه را برای آن تعریف می‌کنیم و عمل بارگذاری را انجام می‌دهیم. باری که نمونه مکعبی بتن تا مرز ترک خوردگی تحمل می‌کند را یادداشت می‌کنیم. در پایان برای پایین آمدن فک متحرک پایین باید دریچه ضامن را باز کنیم تا فک به سمت پایین حرکت کند و این عملیات را برای تمام نمونه‌ها انجام می‌دهیم. مقاومت فشاری نمونه از حاصل تقسیم نیرویی که سبب شکسته نموده شده به سطح مقطع نمونه بدست می‌آید. آزمایش مقاومت فشاری کلیه طرح‌های اختلاط در این تحقیق در سنین ۷ و ۲۸ روزه، بر اساس استاندارد ASTM C39-11 [۳۰] مورد آزمایش قرار گرفت.

۲-۵- شبکه عصبی مصنوعی

المان پردازشگر پایه شبکه‌های عصبی، نرون‌های مصنوعی یا گره نامیده می‌شوند. در مدل ریاضی ساده‌شده عصب، تأثیرات سیناپس‌ها با وزن‌های اتصال که اثر سیگنال‌های ورودی را بیان می‌کنند ارائه می‌شوند. همچنین خاصیت غیرخطی یا خطی عصب‌ها به وسیله تابع انتقال (فعال‌سازی یا تحریک) نمایندگی می‌شود [۳۱]. عصب با دریافت سیگنال از لایه قبل خود تحریک شده و جمع وزن‌های سیگنال‌های ورودی را محاسبه کرده و توسط تابع تحریک به لایه بعدی منتقل می‌کند. قابلیت آموزش شبکه عصبی با تنظیم وزن‌ها با توجه به الگوریتم آموزش به دست می‌آید. ورودی یک عصب از ضرب خروجی عصب‌های متصل به آن در وزن‌ها حاصل می‌شود [۳۲]. حاصل جمع وزن‌های ورودی با معادله ۱ محاسبه می‌شود.

$$(net)_j = \sum_{i=1}^n w_i o_i + b \quad (1)$$

که $(net)_j$ حاصل جمع وزن عصب i ام برای ورودی‌های لایه قبل که دارای n عصب است، است. w_i وزن بین عصب i ام در لایه قبل و عصب j و O_i خروجی عصب i ام در لایه قبل است. کمیت b بایاس نام دارد و ثابتی برای تنظیمات داخلی عصب j ام می‌باشد [۳۱]. تابع محرک، خروجی یک لایه از شبکه را محاسبه می‌کند و انواع متفاوتی دارد و می‌تواند حالتی خطی یا غیرخطی داشته باشد. توابع محرکی که بیشترین استفاده را در مطالعات گوناگون دارند شامل تانژانت توابع محرکی که بیشترین استفاده را در مطالعات گوناگون دارند شامل تانژانت سیگموئید^۳ و لوگاریتمیک سیگموئید^۴ برای حالات غیرخطی و تابع تحریک پیورلین^۵ برای حالت خطی است که به ترتیب با معادلات ۲ تا ۴ تعیین می‌گردند [۳۳].

$$a = \text{tansig}(n) = \frac{2}{(1 + \exp(-2*n)) - 1} \quad (2)$$

$$a = \text{logsig}(n) = \frac{1}{(1 + \exp(-n))} \quad (3)$$

³ Tangent Sigmoid

⁴ Log Sigmoid

⁵ Purelin

$$a = \text{purelin}(n) = n \quad (4)$$

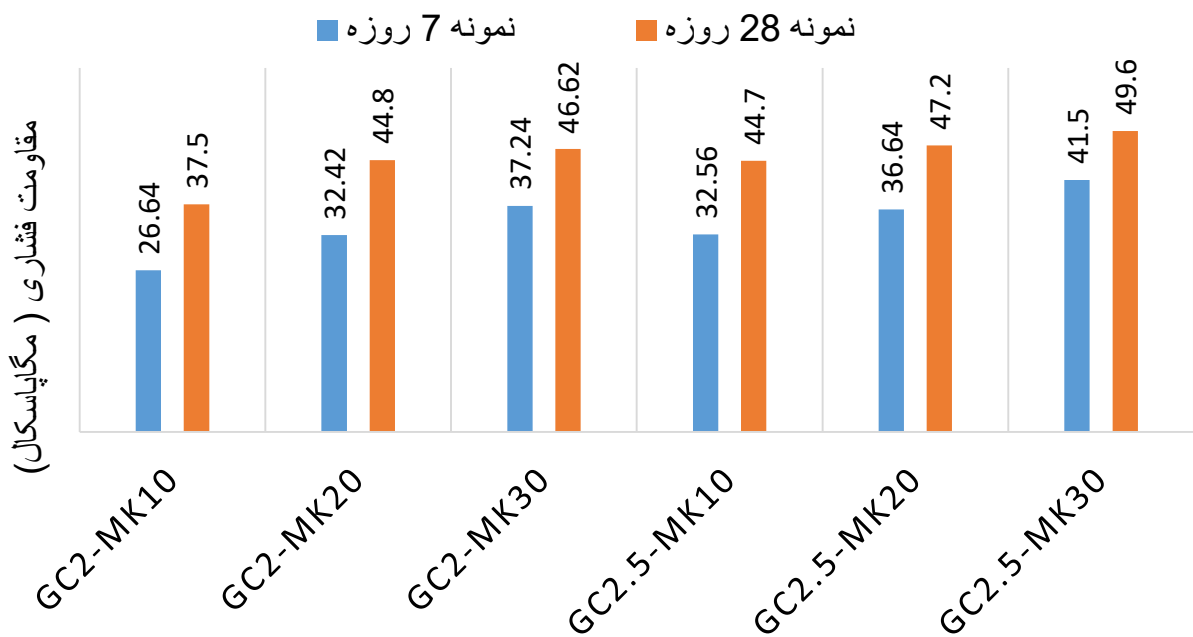
شبکه‌های عصبی پیش‌خور مشهورترین و پرکاربردترین شبکه عصبی مصنوعی است که با نام‌های متفاوتی از جمله شبکه عصبی چندلایه پرسپترون شناخته شده‌اند. شبکه عصبی پرسپترون توسط فرانک روزن‌بالت در سال ۱۹۵۸ میلادی ابداع شد [۳۲]. این شبکه‌ها دارای سه لایه ورودی، پنهان و خروجی می‌شوند. در شبکه‌های عصبی پیش‌خور سیگنال‌های ورودی از واحدهای ورودی به سمت واحدهای خروجی در جریان هستند [۳۴].

۳- تحلیل آزمایش‌ها و بررسی نتایج

۳-۱- نتایج تاثیر نسبت $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ بر مقاومت فشاری

نتایج مربوط به بررسی اثر نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم ($\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$)، بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن و خاکستر بادی، در شکل ۳ ارائه شده است. در نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر با ۲، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه برای بتن ۱۰٪ متاکائولین جایگزین خاکستر بادی، ۲۶/۶۴ و ۳۷/۵ و برای بتن ۲۰٪ متاکائولین جایگزین خاکستر بادی، ۳۲/۴۲ و ۴۴/۸ بدست آمده است. این مقادیر برای نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر با ۲/۵ به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت به طوری که مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه برای بتن ۱۰٪ متاکائولین جایگزین خاکستر بادی، ۳۲/۵۶ و ۴۴/۷ و برای بتن ۲۰٪ متاکائولین جایگزین خاکستر بادی، ۳۶/۶۴ و ۴۷/۲ اندازه‌گیری شد. به عبارتی برای بتن ۱۰٪ متاکائولین جایگزین خاکستر بادی مقاومت فشاری به میزان ۲۲ درصد افزایش یافت.

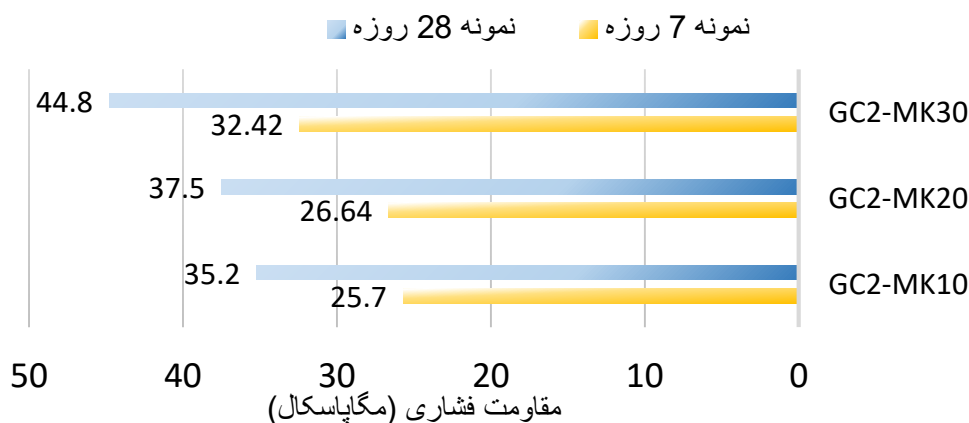
نقش محلول فعال‌کننده قلیایی به ویژه هیدروکسید سدیم، حل کردن Si و Al موجود در منبع آلومیناسیلیکاتی و تولید SiO_4 و AlO_4 برای تولید ژل ژئوپلیمری است. اضافه کردن یک محلول سیلیکاتی مانند سیلیکات سدیم به محلول فعال‌کننده قلیایی، به دلیل داشتن Si محلول، سبب افزایش میزان SiO_4 و نرخ واکنش ژئوپلیمریزاسیون و به تبع آن افزایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری تا یک میزان بخصوصی می‌شود. در این میان، اضافه کردن میزان کم، کمتر از مقدار بهینه، محلول سیلیکات سدیم به دلیل کمتر شدن میزان Si محلول و در نتیجه آن کمتر شدن میزان SiO_4 ، سبب کاهش مقاومت فشاری می‌شود.



شکل ۳: تاثیر نسبت $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ بر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن

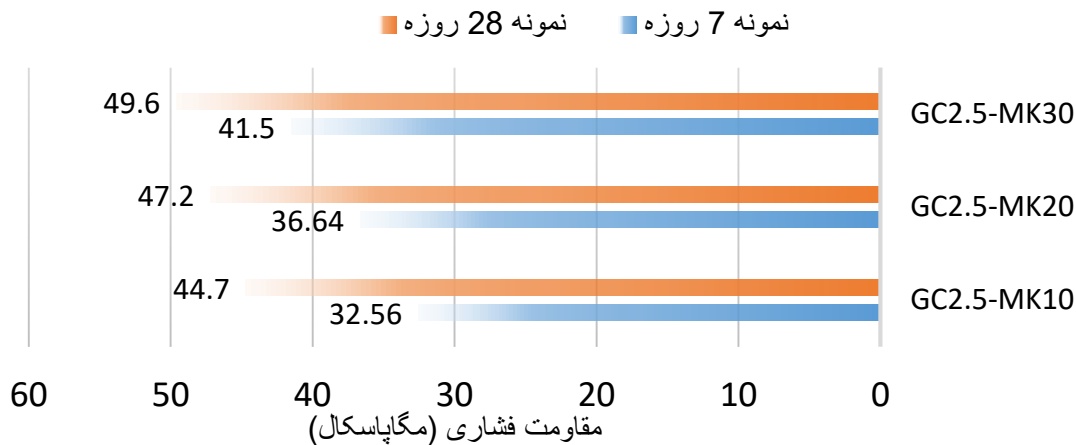
۲-۳- نتایج تاثیر نسبت وزنی متاکائولین بر مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری با نسبت جایگزینی متاکائولین ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در شکل‌های ۴ و ۵ قابل مشاهده است. بر اساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده، روند تاثیر ماده پایه متاکائولین با درصد‌های جایگزینی متفاوت نشان داده است که با افزایش درصد جایگزینی متاکائولین در ازای خاکستر بادی، مقاومت فشاری در سنین مختلف افزایش می‌یابد. مطابق آنچه که نشان داده شده است، دو طرح GC2-MK10، GC2-MK20 تفاوت چندانی در افزایش مقاومت در سن ۷ روزه ندارند. اما طرح GC2-MK30 با افزایش درصد جایگزینی متاکائولین تا ۳۰ درصد، مقاومت فشاری به مراتب بالاتری در سن ۷ روزه نمونه‌ها بدست آمد. به‌عنوان مثال، نسبت تغییر مقاومت فشاری نمونه GC2-MK20 نسبت به GC2-MK10 به ترتیب در سنین ۷ و ۲۸ روزه برابر ۳/۶ و ۶/۵ ولی این افزایش مقاومت برای نمونه GC2-MK30 نسبت به GC2-MK20 برای سن ۷ روزه برابر ۲۱/۷ و برای سن ۲۸ روزه برابر ۱۹/۴ محاسبه شده است.



شکل ۴: تاثیر نسبت جایگزینی متاکائولین بر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن با $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ برابر ۲

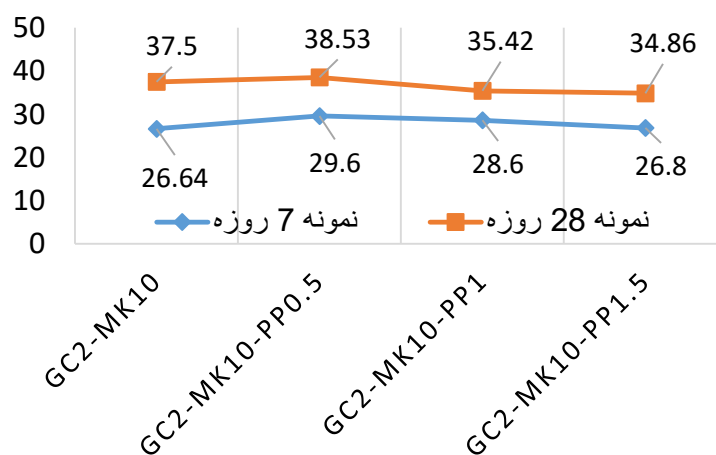
همچنین نتایج بدست آمده از درصدهای متفاوت جایگزینی متاکائولین در ازای خاکستر بادی با نسبت $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ برابر $2/5$ روندی مشابه با نسبت $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ برابر 2 داشته است. بر این اساس، نسبت تغییر مقاومت فشاری نمونه GC2.5-MK20 نسبت به GC2.5-MK10 به ترتیب در سنین ۷ و ۲۸ روزه برابر $12/5$ و $5/5$ ولی این افزایش مقاومت برای نمونه GC2.5-MK30 نسبت به GC2.5-MK20 برای سن ۷ روزه برابر $13/2$ و برای سن ۲۸ روزه برابر $5/1$ محاسبه شده است. این یافته‌ها به مطالعه داوون و همکاران [۳۵] مطابقت داشته است که آنها نیز با افزایش درصد متاکائولین جایگزین خاکستر بادی، مقاومت فشاری بیشتری را بدست آورده‌اند که این امر به علت فرایند ژئوپلیمریزاسیون و تراکم ریزساختار این نوع بتن می‌شود. علت این رخداد به خاطر این می‌باشد که سطوح بسیار واکنش پذیر ذرات MK تمایل به ایجاد درجه بالایی از ژئوپلیمریزاسیون دارند.

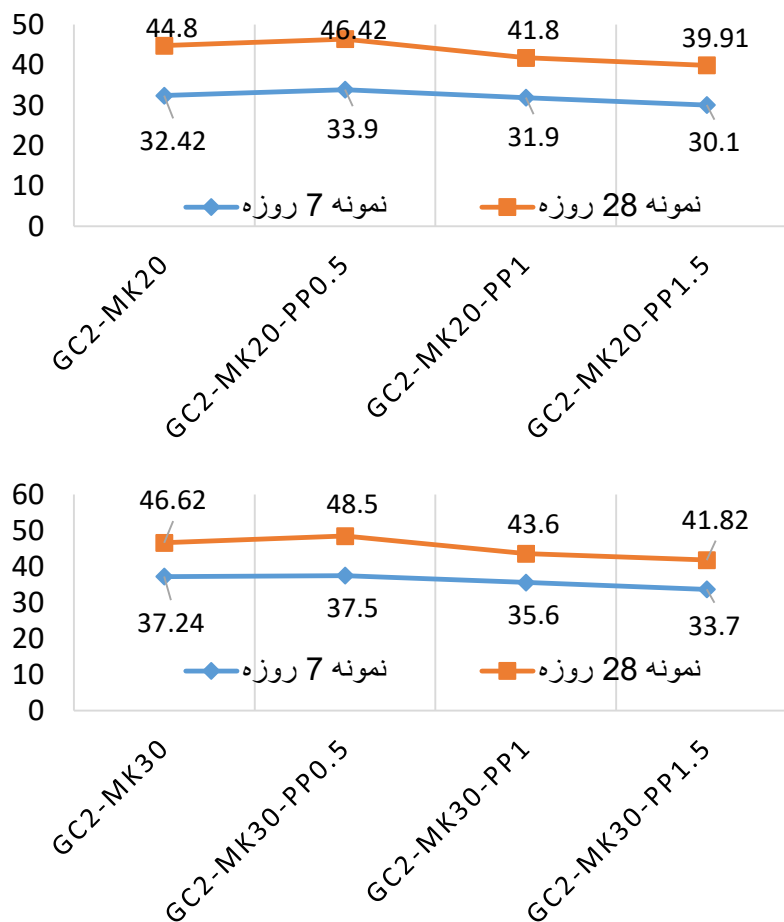


شکل ۵: تاثیر نسبت جایگزینی متاکائولین بر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن با $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ برابر $2/5$

۳-۳- نتایج تاثیر نسبت حجمی الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت فشاری

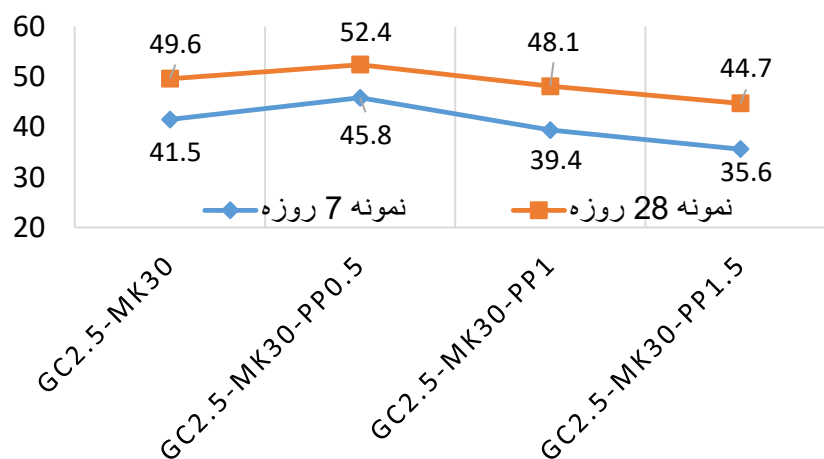
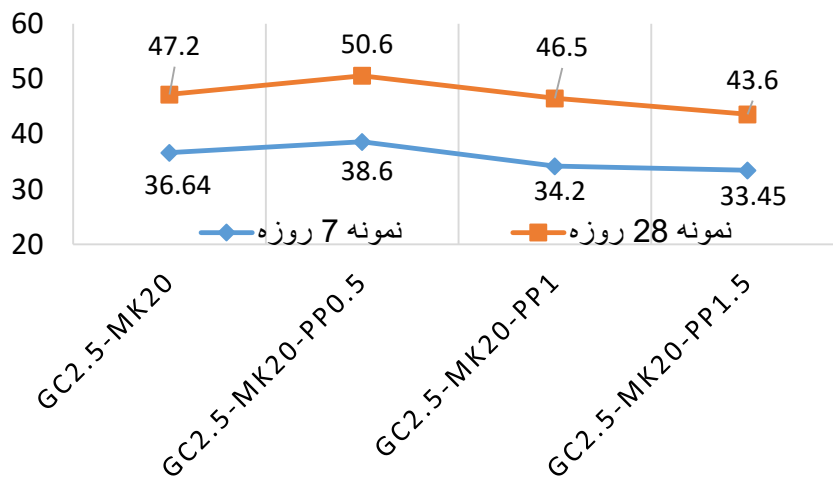
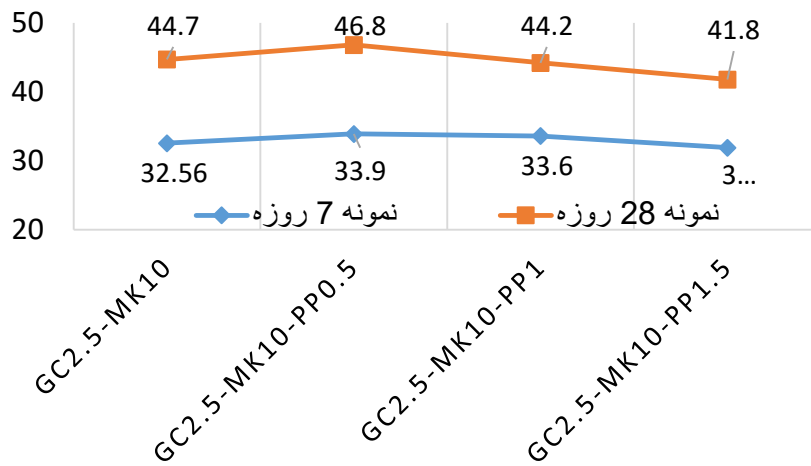
نتایج آزمون مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های بتن ژئوپلیمری حاوی الیاف پلی پروپیلن در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه بدون الیاف حاوی ۱۰ درصد متاکائولین جایگزین برابر $26/64$ و $37/5$ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. اضافه کردن $0/5$ درصد الیاف پلی پروپیلن سبب باعث افزایش تا ۱۱ و ۳ درصد به ترتیب برای سنین ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی شد.





شکل ۶: تاثیر نسبت نسبت حجمی الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن با $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ برابر ۲

با افزایش مقدار الیاف تا ۱ درصد، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری برای سنین ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب تا ۳۵/۶ و ۴۳/۶ کاهش یافت و افزایش مقدار الیاف در ادامه نیز باعث کاهش بیشتر مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه شده است. این روند برای ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزینی ماده پایه متاکائولین تکرار شده به طوریکه مقاومت فشاری بتن با اضافه کردن ۰/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن افزایش یافته و سپس با اضافه کردن الیاف با درصد حجمی ۱ و ۱/۵ درصد کاهش یافته است. همچنین، Asrani و همکاران [۳۶] با استفاده از ۰/۳ درصد الیاف پلی پروپیلن، شاهد افزایش ۶ درصدی مقاومت فشاری بودند. آنها مشاهده کردند که با افزایش مقدار الیاف، مقاومت فشاری روند کاهشی داشته که این موضوع می تواند مرتبط با ناحیه تماس باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، اینگونه استنتاج می شود که الیاف PP اثر منفی بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری دارد و فقط در درصد بهینه، سبب افزایش تا حدود ۵ درصدی مقاومت فشاری می شود. افزایش مقاومت فشاری با اضافه کردن الیاف PP تا ۰/۵ درصد ممکن است به دلیل افزایش نیروی اتصال بین اجزای اختلاط بتن ژئوپلیمر و وجود الیاف باشد.



شکل ۷: تاثیر نسبت نسبت حجمی الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن با $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ برابر ۲/۵

ناحیه تماس که به اسامی مختلفی مانند لایه مرزی یا منطقه انتقالی نامیده میشود، ناحیه مرزی است که بین خمیر سیمان یل ماده پایه و سطح سنگدانه، الیاف و یا میلگرد پدید می آید و نقش مهمی در نفوذپذیری، دوام و مقاومت بتن دارد. ناحیه تماس دارای میکرو

ساختاری متفاوت باخمیر سیمان بوده و دارای تخلخل و ریزترک‌های بیشتری است. ضخامت ناحیه تماس تابع پارامترهایی مانند: نوع الیاف، نوع سیمان، نوع پوزولان مصرفی و غیره می‌باشد. از سوی دیگر، الیاف استفاده شده در این مقاله، از جنس پلیمری هستند و در حالت کلی الیاف پلیمری به دلیل داشتن انعطاف بالا در صورت استفاده در درصد حجمی زیاد، باعث ایجاد پدیده گلوله‌شدگی الیاف و ایجاد حفره در ماتریس ماده پایه و در نتیجه آن ایجاد عیوب داخلی در ناحیه تماس و نهایتاً کاهش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می‌شود. همچنین، به عنوان یک نتیجه‌گیری در این بخش، باید چنین عنوان کرد که اضافه کردن الیاف تاثیر قابل ملاحظه‌ای در بهبود مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری نداشتند. شکل ۸ نحوه شکست نمونه بتن ژئوپلیمری بدون حضور الیاف PP در سن ۷ روزه را به همراه شکست این نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۸: تصویر شکست نمونه بتن ژئوپلیمری در سن ۷ روزه بعد از آزمایش مقاومت فشاری

۳-۴- مدل سازی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

پس از ساخت نمونه‌های بتن ژئوپلیمری و انجام آزمایش‌های مکانیکی، نتایج در فایل اکسل جمع‌آوری شد. معمولاً در پیش‌بینی‌ها، متغیرهای مستقل طوری انتخاب می‌شوند که اندازه‌گیری آنها آسان و هزینه کمی در برداشته باشد. از طرف دیگر نتیجه پیش‌بینی نیز بستگی به انتخاب پارامترها داشته و مطلوب بودن پیش‌بینی از دقت به دست آمده ارزیابی می‌شود. در این تحقیق در مرحله اول سعی شد که متغیرهای انتخاب شده (ورودی مدل) به راحتی با آزمایش‌های آزمایشگاهی قابل تعیین باشد و دوم این که نتایج آن با کمترین هزینه در دسترس واقع شود. پس از ثبت نتایج از تست‌های آزمایشگاهی، تعداد ۵۰ نمونه جمع‌آوری شده و برای ساخت شبکه آماده شد. برای مدل‌سازی از مصالح تشکیل دهنده بتن ژئوپلیمری که ماهیت ثابتی در طرح‌های اختلاط نداشته‌اند مانند خاکستر بادی (FA)، متاکائولین (MK)، الیاف پلی‌پروپیلن (PP)، نسبت $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ و سن نمونه (Age) به عنوان ورودی و مقاومت فشاری بتن (CS) به عنوان پارامتر خروجی به مدل یا پارامتر هدف استفاده شده است. برای جلوگیری از بیش‌برازش شبکه عصبی مصنوعی (ANN^6)، مجموعه داده‌ها به تو گروه آموزش و آزمایش تقسیم شدند که در این تکنیک، ۷۵ درصد از داده‌ها برای آموزش و ۲۵ درصد از داده‌ها برای ارزیابی شبکه ساخته شده در مرحله آموزش در نظر گرفته می‌شود. جدول ۴ نشان‌دهنده محدوده، میانگین و انحراف معیار هر یک از پارامترهای ورودی و خروجی به مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و آنالیز رگرسیون چندمتغیره (NLR^7) می‌باشد.

جدول ۴: مقادیر آماره‌های توصیفی برای پارامترهای ورودی و خروجی به مدل‌های ANN و NLR

⁶ Artificial neural network

⁷ Nonlinear regression

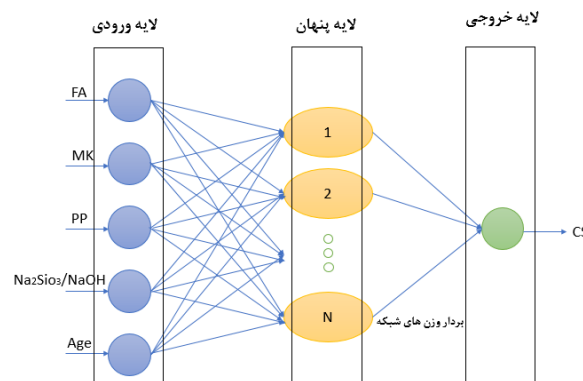
سن نمونه	Na ₂ SiO ₃ /NaOH	الیاف PP	متاکائولین	خاکستر بادی	مقاومت فشاری	
۲۸ و ۷	۲-۲/۵	۰- ۱/۵	۱۸۰-۰	۶۰۰-۴۲۰	۵۲/۴-۲۵/۷	محدوده
۱۷/۰۶	۲/۲۵	۰/۷۲۹	۱۱۵	۴۸۵	۳۸/۷۶	میانگین
۱۰/۵	۰/۳۴۹	۰/۵۶۷	۵۳/۴۵	۵۳/۴۵	۶/۸۱	انحراف معیار

پس از پردازش اولیه داده‌ها، ساختار شبکه مورد نظر برای آموزش تعیین شد. پارامترهایی متغییر در ارتباط مدل‌سازی شبکه شامل تعداد لایه‌های شبکه، تعداد نرون‌ها در هر لایه به جز لایه خروجی، تابع فعالیت هر لایه و الگوریتم آموزش شبکه است. در این تحقیق تعداد لایه‌ها بین ۲ تا ۴ عدد و تعداد نرون‌های لایه‌های قبل از خروجی بین ۱ تا ۱۰ عدد انتخاب شده است. سپس تابع فعالیت هر کدام از لایه‌ها یکی از توابع خطی، سیگموئید و لگستیک-سیگموئید انتخاب و نتایج تابع بهینه برای مدل استفاده شده است. پس از ساختن و آموزش، هر یک از مدل‌های رگرسیونی با استفاده از شاخص‌های آماری خطا نظیر ضریب تعیین (R²)، RMSE⁸ و MAE⁹ نتایج بدست آمده در این مرحله مورد ارزیابی قرار گرفته است و بهترین شبکه انتخاب شده است (شکل ۹).

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^M (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (O_i - \bar{O}) \sum_{i=1}^M (P_i - \bar{P})}} \right)^2 \quad (5)$$

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^M (P_i - O_i)}{M} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^M |P_i - O_i|}{M} \quad (7)$$



شکل ۹: معماری شبکه روش ANN برای مدل‌سازی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر

پس از طراحی مدل، داده‌های تجربی حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی به دو سری آموزش و سری آزمایش (پیش‌بینی شونده) تقسیم بندی می‌شود. سپس با استفاده از سری آموزش، شبکه طراحی شده آزموده می‌شود. برای اطمینان از این که شبکه آموزش دیده قادر است سایر مقادیر را مدل‌سازی کند، از سری آزمایش استفاده می‌شود. پس از اتمام آموزش، فقط داده‌های ورودی مربوط به سری آزمایش به شبکه داده شده و داده‌های خروجی برای این سری محاسبه می‌شود. در نهایت میزان خطا برای سری آزمایش به عنوان معیاری

⁸ Root mean square error

⁹ Mean square error

برای عمومیت پذیری شبکه تعیین می‌شود. در ادامه برای شروع مدل سازی، شبکه مقدار دهی و ورودی ها به شبکه وارد و فرآیند آموزش با داده های آزمایشگاهی شروع شد. فرآیند آموزش و یادگیری بعد از این که حلقه تکرار (Epoch) به ۱۰۰۰ دور و خطای آن به زیر ۰/۰۵ رسید متوقف خواهد شد. در این فرآیند، معیار توقف خطای شبکه (MSE^{10}) بر اساس زیر محاسبه خواهد شد:

$$MSE = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (P_i - O_i)^2 \quad (8)$$

همچنین، در این مطالعه به عنوان ارائه یک رابطه ریاضی میان پارمترهای مستقل به مدل و مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری (پارامتر هدف) از آنالیز رگرسیون چندمتغیره استفاده شده است که دسترسی کاربران در حوزه تکنولوژی بتن را بسیار آسان می‌نماید. هدف کلی از رگرسیون غیرخطی پیدا کردن یک معادله ریاضی غیرخطی مناسب برای تعیین متغیر هدف مسئله می‌باشد که فرم کلی آن به صورت زیر می‌باشد:

$$y = f(a_i \times x_i) \quad (9)$$

که y متغیر وابسته، x_i متغیر مستقل و a_i ضریب متغیر مستقل است.

در شبکه‌های عصبی مصنوعی، عملکرد مدل تاثیر بسیار زیادی بر مقدار وزن‌ها و بایاس‌ها می‌باشد و این مقادیر درون شبکه در این مدل توسط کاربر قابل تنظیم می‌باشد. همچنین، کاربرد نتایج بدست آمده از شبکه عصبی مصنوعی زمانی کاربردی خواهد بود که وزن‌ها و بایاس‌ها در هر نرون قابل دسترس باشند. در بسیاری از تحقیقات پیشین، ضعف مطالعات در ارائه مدلی کاربردی برای مطالعات آتی می‌باشد که در این مطالعه با ارائه وزن‌ها و بایاس‌ها مدلی در اختیار کاربر قرار خواهد گرفت تا بتواند این مدل را در محیط متلب بازآفرینی کرده و مقادیر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری را با استفاده از طرح‌های اختلاط تخمین بزند. پس از مدل سازی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری به عنوان متغیر هدف، وزن‌ها و بایاس‌های استخراج شده جهت کاربرد توسط محققین در جدول ۵ آورده شده است. مقادیر پیش‌بینی شده مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر نیز می‌تواند به صورت مستقیم توسط جدول ۵ مورد استفاده قرار گیرد. رابطه ریاضی میان پارامترهای ورودی به مدل و خروجی مدل طبق رابطه زیر ارائه می‌شود:

$$F_c = f\{b_0 + \sum_{k=1}^h [w_k f(b_{hk} + \sum_{i=1}^m w_{ik} X_i)]\} \quad (10)$$

در این رابطه f تابع انتقال، h تعداد لایه های نرون، X_i مقادیر ورودی به شبکه، m تعداد پارامترهای ورودی به مدل، w_{ik} وزن میان نرون ها، w_{ik} نیز وزن میان نرون‌های لایه اول و دوم می‌باشد.

جدول ۵: مقادیر وزن‌ها و بایاس‌ها برای مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر

نرون	لایه اول				لایه دوم		بایاس در لایه دوم
	FA	MK	PP	Na2SiO3/NaOH	Age	وزن نرون	
۱	-۰/۶۹۵	۰/۷۱۷	-۰/۹۲۳	۰/۸۰۷	۲/۳۴۶	۰/۹۴۵	-۰/۷۴۸
۲	۰/۴۵۳	-۰/۵۲۸	-۱/۲۹۷	-۰/۲۴۴	-۰/۲۸۸	-۱/۵۷۸	-۱/۱۲۶
۳	۰/۱۹۱	-۰/۲۲۴	۲/۷۲۳	-۰/۳۵	۰/۰۹	-۰/۹۰۸	-۰/۴۹۹

¹⁰ Mean square error

با توجه به جدول ۵ که در آن وزن‌های هر نرون در هر لایه ارائه شده است، فرمول ریاضی قابل ارائه به صورت رابطه شماره ۱۱ آورده شده است که در این رابطه $A1, A2, A3$ نشان‌دهنده پاسخ نرون‌های پنهان می‌باشد که مقادیر خروجی شبکه را تغذیه می‌کند و می‌تواند از رابطه ۱۲ بدست آید.

$$F_c = 0.945A1 - 1.578A2 - 0.908A3 + 0.365 \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} A1 \\ A2 \\ A3 \end{bmatrix} = \text{Sigmoid} \left(\left(\begin{bmatrix} -0.695 & 0.717 & -0.923 & 0.807 & 2.346 \\ 0.453 & -0.528 & -1.297 & -0.244 & -0.288 \\ 0.191 & -0.224 & 2.723 & -0.35 & 0.09 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} FA \\ MK \\ PP \\ Na_2SiO_3/NaOH \\ Age \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 0.945 \\ -1.578 \\ -0.908 \end{bmatrix} \right) \quad (12)$$

با انجام مدل‌سازی با استفاده از آنالیز رگرسیون چندمتغییر، رابطه ریاضی زیر برای تخمین مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر استخراج شده است:

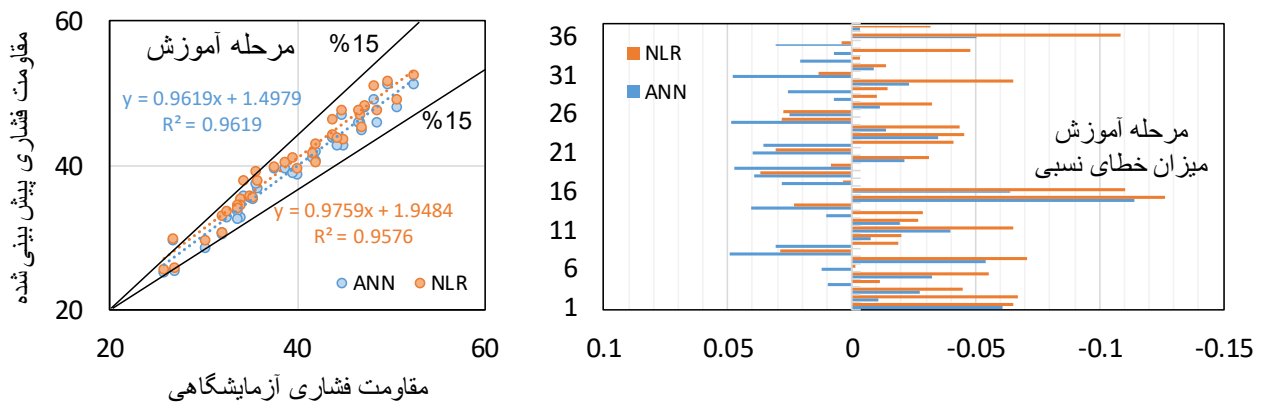
$$CS = 25.012 + 0.0001FA + 0.001MK + 3.47PP + 9.39Na_2SiO_3/NaOH + 0.473Age - 0.000061FA^2 - 4.085PP^2 \quad (13)$$

جدول ۶ نیز مقادیر شاخص‌های آماری خطا را برای بررسی نحوه عملکرد و دقت هر یک از روش‌های پیشنهادی برای تخمین مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر را ارائه می‌دهد. در مرحله آموزش، هر دو مدل ANN، NLR، عملکردی مشابه و قابل قبولی را داشته و دقت آنها به ترتیب در شاخص R^2 برابر ۰/۹۵ و ۰/۹۶ بوده است. برای مرحله آزمایش، روش هوشمند ANN با توجه به شاخص‌های ریشه میانگین کمترین مربعات خطا (RMSE=1.589 MPa) و (MAE=1.998 MPa) در مقایسه با روش NLR (RMSE=2.361 MPa) و (MAE=1.795 MPa) عملکرد بهتری در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر داشته است.

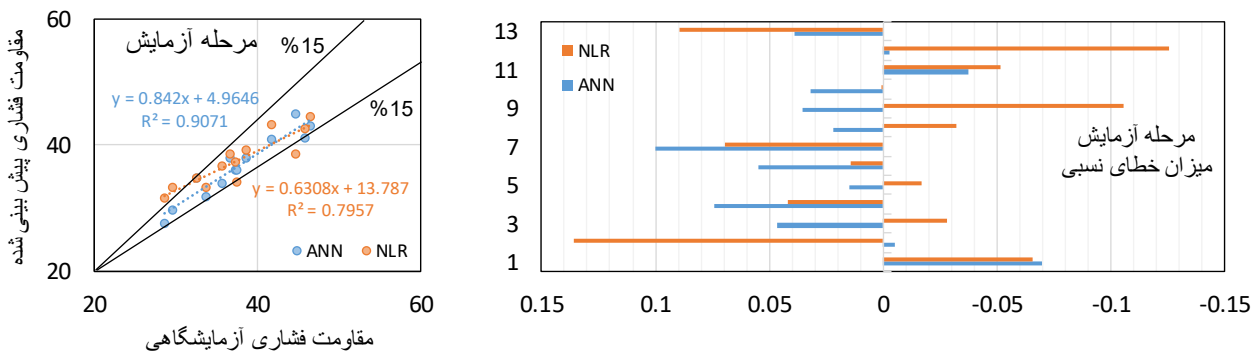
جدول ۶: نتایج عملکرد روابط تجربی و مدل‌های هوشمند در مرحله آموزش و آزمایش

مدل‌ها	R ²	RMSE (MPa)	MAE (MPa)
مرحله آموزش			
NLR	0.95	1.787	1.446
ANN	0.96	1.396	1.186
مرحله آزمایش			
NLR	0.89	2.361	1.795
ANN	0.91	1.998	1.589

بر اساس شکل‌های ۱۰ و ۱۱، پیش‌بینی‌های صورت گرفته مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و آنالیز رگرسیون چندمتغییر در مرحله آموزش و آزمایش را نشان می‌دهد. همچنین، این شکل، مقادیر خطای نسبی را برای پیش‌بینی‌های انجام شده توسط روش ANN و NLR را نشان می‌دهد. روش شبکه عصبی مصنوعی با توجه به مقدار ضریب تعیین برابر ۰/۹۶ دارای عملکرد قابل قبولی نسبت به روش آنالیز رگرسیون چندمتغییر در پیش‌بینی مقادیر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر از خود نشان داده اند. در این مرحله، بیشترین مقدار خطای نسبی ثبت شده برای ۰/۱۲۵- بوده است که از نظر تحلیلی، مقدار بسیار کوچک و قابل چشم‌پوشی می‌باشد. شکل ۱۱ نشانگر مقادیر پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر به ازای مقادیر مقاومت فشاری آزمایشگاهی در مرحله آموزش می‌باشد. در این مرحله عملکرد مدل ANN با درصدی افت از منظر دقت مدل‌سازی، عملکردی قابل قبول بوده است. مقدار محاسبه شده ضریب تعیین در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری برای این مرحله تقریباً برابر ۰/۹۱ بوده است.



شکل ۱۰: نمودار پراکندگی برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر در مرحله آموزش



شکل ۱۱: نمودار پراکندگی برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر در مرحله آزمایش

تاثیرپذیری متغیر وابسته بر متغیرهای مستقل و اثرگذاری هر یک از این پارامترها بر یکدیگر را آنالیز حساسیت می‌نامند [۲۸]. از این رو، در این پژوهش به منظور تعیین میزان اثرگذاری هر پارامتر ورودی بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری حاوی الیاف پلی‌پروپیلن، مدل شبکه عصبی مصنوعی برای انجام آنالیز حساسیت برگزیده شده است. برای این منظور، هر بار یکی از پارامترهای ورودی حذف و اثر آن بر خروجی مدل تحلیل و بررسی شده است. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد، حذف متغیرهای ورودی $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ($R=0 / 75$) و سن نمونه ($R=0 / 69$) بیشترین تاثیر را در مدل توسعه یافته در پیش بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری داشته‌اند. همچنین الیاف PP ($89 / R=0$) کمترین میزان تاثیر را در خروجی مدل از خود نشان داده است. شرح کامل تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترها در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷: نتایج تحلیل حساسیت برای تعیین موثرترین پارامترها در پیش بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

پارامترهای ورودی	R^2
$CS = f(\text{MK, PP, Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH, Age})$	۰ / ۸۸
$CS = f(\text{FA, PP, Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH, Age})$	۰ / ۷۵
$CS = f(\text{FA, MK, Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH, Age})$	۰ / ۸۹
$CS = f(\text{FA, MK, PP, Age})$	۰ / ۵۳
$CS = f(\text{FA, MK, PP, Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH})$	۰ / ۶۹

۴- نتیجه گیری

صنعت پرمصرف سیمان با انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر کربن دی‌اکسید، به عنوان یکی از منابع اصلی آلوده‌کننده محیط زیست و عامل تغییر اقلیم به شمار می‌رود. یکی از راه‌های کاهش انتشار چنین گازهایی در صنعت بتن، استفاده از مواد جایگزین سیمان و تولید بتن‌های غیر سیمانی و در نتیجه تولید کمتر سیمان می‌باشد. در این مطالعه، بتن ژئوپلیمری که با استفاده از مواد معدنی عملاً استفاده از سیمان را به صفر می‌رساند، جهت بررسی خواص مکانیکی آن در سنین ۷ و ۲۸ روزه مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، تاثیر سه عامل مختلف نظیر، درصد جایگزینی متاکائولین، نسبت $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ و درصد الیاف PP بر مقاومت فشاری این نمونه‌های بتنی محیط-زیست‌دوست مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده در این تحقیق در ذیل آورده شده است:

۱. با توجه به نتایج بدست آمده، در نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر با ۲، مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای بتن ۱۰٪ متاکائولین جایگزین خاکستر بادی، ۳۷/۵ و برای بتن ۲۰٪ متاکائولین جایگزین خاکستر بادی، ۴۴/۸ بدست آمده است. این مقادیر برای نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر با ۲/۵ به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت به طوری که برای بتن ۱۰٪ متاکائولین جایگزین خاکستر بادی مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه به میزان ۲۲ درصد افزایش یافت.

۲. طبق نتایج آزمایشگاهی بدست آمده، نسبت تغییر مقاومت فشاری نمونه GC2-MK20 نسبت به GC2-MK10 به ترتیب در سنین ۷ و ۲۸ روزه برابر ۳/۶ و ۶/۵ محاسبه شده است. همچنین نسبت تغییر مقاومت فشاری نمونه GC2.5-MK20 نسبت به GC2.5-MK10 در سن ۷ روزه برابر ۱۲/۵ محاسبه شده است. در خصوص اضافه کردن الیاف PP، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه بدون الیاف حاوی ۱۰ درصد متاکائولین جایگزین برابر ۲۶/۶۴ و ۳۷/۵ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد.

۳. اضافه کردن ۰/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن سبب باعث افزایش تا ۶ و ۳ درصد به ترتیب برای سنین ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی شد. با افزایش مقدار الیاف تا ۱ درصد، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری برای سنین ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب تا ۳۵/۶ و ۴۳/۶ کاهش یافت و افزایش مقدار الیاف در ادامه نیز باعث کاهش بیشتر مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه شده است.

۴. در این تحقیق، پس از دستیابی به نتایج آزمایشگاهی و تحلیل و بررسی نتایج، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و آنالیز رگرسیون چندمتغیره جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر توسعه داده شد. بر اساس نتایج مدل سازی شده، روش شبکه عصبی مصنوعی با توجه به مقدار ضریب تعیین برابر ۰/۹۶ در مرحله آموزش دارای عملکرد قابل قبولی در پیش‌بینی مقادیر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری از خود نشان داده اند. در مرحله آزمایش نیز عملکرد مدل ANN با درصدی افت از نظر دقت مدل سازی، عملکردی قابل قبول داشته است و مقدار محاسبه شده ضریب تعیین در مدل سازی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری برای این مرحله تقریباً برابر ۰/۹۱ بوده است.

۵. جهت تعیین اولویت‌های مصالح تشکیل دهنده در طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری برای دستیابی به مقاومت فشاری حداکثر، آنالیز حساسیت به کار گرفته شد. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد، حذف متغیرهای ورودی $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ و سن نمونه به ترتیب با ضریب تعیین ۰/۷۵ و ۰/۶۹ بیش‌ترین تاثیر را در مدل توسعه یافته در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری داشته‌اند.

به توجه به محدودیت‌های این تحقیق، ذکر مواردی برای مطالعاتی آتی می‌تواند باعث یافتن دیدگاه مناسب‌تر در زمینه استفاده و کاربرد بتن‌های ژئوپلیمری و یا بتن‌های دوست‌دار محیط‌زیست باشد. با توجه به تحقیقات پیشین، پیشنهاد می‌شود، اثر نوع و غلظت ماده فعال‌ساز روی خواص مکانیکی بتن‌های ژئوپلیمری مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، می‌توان جهت بررسی دقیق‌تر ریزساختار ژئوپلیمرها از تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی برای نمونه‌های بتن ژئوپلیمری استفاده نمود و عوامل ضعف و قوت هر یک از نمونه‌ها را در هر یک از خواص مکانیکی سخت شده بررسی نمود. همچنین، در آخر پیشنهاد می‌گردد تا خواص مکانیکی بتن‌های ژئوپلیمری حاوی

سنگدانه های بازیافتی را در سنین بالاتر یعنی ۵۶ و ۹۰ روزه نیز مورد بررسی و نتایج آن ها با نتایج سنین مرجع در این پژوهش یعنی ۷ و ۲۸ روزه مقایسه گردد.

۵- مراجع

- [1] Ramachandran, V. S., & Feldman, R. F. (1996). Concrete science. In *Concrete Admixtures Handbook* (pp. 1-66). William Andrew Publishing.
- [2] Assi, L. N., Deaver, E. E., & Ziehl, P. (2018). Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 167, 372-380.
- [3] Malhotra, V. M. (2006). Reducing CO2 emissions. *Concrete international*, 28(9), 42-45.
- [4] Yang, K. H., Jung, Y. B., Cho, M. S., & Tae, S. H. (2015). Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO2 emissions from concrete. *Journal of Cleaner Production*, 103, 774-783.
- [5] Gartner, E., & Hirao, H. (2015). A review of alternative approaches to the reduction of CO2 emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. *Cement and Concrete research*, 78, 126-142.
- [6] Andrejkovičová, S., Sudagar, A., Rocha, J., Patinha, C., Hajjaji, W., da Silva, E. F., ... & Rocha, F. (2016). The effect of natural zeolite on microstructure, mechanical and heavy metals adsorption properties of metakaolin based geopolymers. *Applied Clay Science*, 126, 141-152.
- [7] Mirzaei, M., & Bekri, M. (2017). Energy consumption and CO2 emissions in Iran, 2025. *Environmental research*, 154, 345-351.
- [8] Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- [9] Shahmansouri, A. A., Nematzadeh, M., & Behnood, A. (2021). Mechanical properties of GGBFS-based geopolymer concrete incorporating natural zeolite and silica fume with an optimum design using response surface method. *Journal of Building Engineering*, 36, 102138.
- [10] 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.
- [11] Karakoç, M. B., Türkmen, I., Maraş, M. M., Kantarci, F., Demirboğa, R., & Toprak, M. U. (2014). Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar. *Construction and Building Materials*, 72, 283-292.
- [12] Yaseri, S., Hajiaghahi, G., Mohammadi, F., Mahdikhani, M., & Farokhzad, R. (2017). The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste. *Construction and Building Materials*, 157, 534-545.
- [13] Karthik, A., Sudalaimani, K., & Kumar, C. V. (2017). Investigation on mechanical properties of fly ash-ground granulated blast furnace slag based self curing bio-geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 149, 338-349.
- [14] Bagheri, A., & Nazari, A. (2014). Compressive strength of high strength class C fly ash-based geopolymers with reactive granulated blast furnace slag aggregates designed by Taguchi method. *Materials & Design (1980-2015)*, 54, 483-490.
- [15] Zawrah, M. F., Gado, R. A., Feltn, N., Ducourtieux, S., & Devoille, L. (2016). Recycling and utilization assessment of waste fired clay bricks (Grog) with granulated blast-furnace slag for geopolymer production. *Process Safety and Environmental Protection*, 103, 237-251.
- [16] Sakkas, K., Panias, D., Nomikos, P. P., & Sofianos, A. I. (2014). Potassium based geopolymer for passive fire protection of concrete tunnels linings. *Tunnelling and underground space technology*, 43, 148-156.
- [17] Phummiphon, I., Horpibulsuk, S., Sukmak, P., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A., & Shen, S. L. (2016). Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer. *Road Materials and Pavement Design*, 17(4), 877-891.
- [18] Cheng, T. W., & Chiu, J. P. (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals engineering*, 16(3), 205-210.
- [19] Temuujin, J., Rickard, W., Lee, M., & van Riessen, A. (2011). Preparation and thermal properties of fire resistant metakaolin-based geopolymer-type coatings. *Journal of non-crystalline solids*, 357(5), 1399-1404.
- [20] Wongsu, A., Wongkvanklom, A., Tanangteerapong, D., & Chindaprasirt, P. (2020). Comparative study of fire-resistant behaviors of high-calcium fly ash geopolymer mortar containing zeolite and mullite. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 9(5), 307-321.
- [21] Guo, X., & Xiong, G. (2021). Resistance of fiber-reinforced fly ash-steel slag based geopolymer mortar to sulfate attack and drying-wetting cycles. *Construction and Building Materials*, 269, 121326.

- [22] Qu, F., Li, W., Wang, K., Zhang, S., & Sheng, D. (2021). Performance deterioration of fly ash/slag-based geopolymer composites subjected to coupled cyclic preloading and sulfuric acid attack. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128942.
- [23] Cheng, Z., Zhao, R., Yuan, Y., Li, F., Castel, A., & Xu, T. (2020). Ageing coefficient for early age tensile creep of blended slag and low calcium fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 262, 119855.
- [24] Si, R., Dai, Q., Guo, S., & Wang, J. (2020). Mechanical property, nanopore structure and drying shrinkage of metakaolin-based geopolymer with waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118502.
- [25] Gholampour, A., Ozbakkaloglu, T., & Ng, C. T. (2019). Ambient-and oven-cured geopolymer concretes under active confinement. *Construction and Building Materials*, 228, 116722.
- [26] Patel, Y. J., & Shah, N. (2018). Study on Workability and Hardened Properties of Self Compacted Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(1), 1-12.
- [27] Saini, G., & Vattipalli, U. (2020). Assessing properties of alkali activated GGBS based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00352.
- [28] Sharma, A. K., & Anand, K. B. (2019). Comparative study on synthesis and properties of geopolymer fine aggregate from fly ashes. *Construction and Building Materials*, 198, 359-367.
- [29] Salih, M. A., Ali, A. A. A., & Farzadnia, N. (2014). Characterization of mechanical and microstructural properties of palm oil fuel ash geopolymer cement paste. *Construction and Building Materials*, 65, 592-603.
- [30] ASTM C39, Standard Test Method for Compressive strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [31] Wang, S. C. (2003). Artificial neural network. In *Interdisciplinary computing in java programming* (pp. 81-100). Springer, Boston, MA.
- [32] Abiodun, O. I., Jantan, A., Omolara, A. E., Dada, K. V., Mohamed, N. A., & Arshad, H. (2018). State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. *Heliyon*, 4(11), e00938.
- [33] Mishra, M., & Srivastava, M. (2014, August). A view of artificial neural network. In *2014 International Conference on Advances in Engineering & Technology Research (ICAETR-2014)* (pp. 1-3). IEEE.
- [34] Agatonovic-Kustrin, S., & Beresford, R. (2000). Basic concepts of artificial neural network (ANN) modeling and its application in pharmaceutical research. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, 22(5), 717-727.
- [35] Duan, P., Yan, C., & Zhou, W. (2016). Influence of partial replacement of fly ash by metakaolin on mechanical properties and microstructure of fly ash geopolymer paste exposed to sulfate attack. *Ceramics International*, 42(2), 3504-3517.
- [36] Asrani, N. P., Murali, G., Parthiban, K., Surya, K., Prakash, A., Rathika, K., & Chandru, U. (2019). A feasibility of enhancing the impact resistance of hybrid fibrous geopolymer composites: Experiments and modelling. *Construction and Building Materials*, 203, 56-68.