

Investigation of Mechanical Properties of Three-Component Concrete Containing Microsilica ,Slag and Rice Husk Ash and Developing using Artificial Neural Network Method

Mohammad Mehdi Roshani¹, Seyed Hamidreza Kargar^{1*}

1- Department of Civil Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

ABSTRACT

The use of pozzolans to make concrete with suitable and durable mechanical properties has found a special place in the last decade; because the use of these materials reduces the consumption of cement and consequently reduces environmental pollution. In the meantime, knowing the optimal amount as well as the effect of pozzolans has been an important and challenging aspect that many researchers have focused on. In this study, an attempt was made to make concrete with suitable mechanical properties using three types of high-consumption pozzolans, namely microsilica, rice husk ash and furnace slag. The compressive strength of 7, 28, and 90 days, as well as the three-point flexural strength of the experiments, was performed separately and in combination to investigate the effect of the use of these pozzolans. In this study, a wide range of alternative values of pozzolan was considered so that in addition to knowing how these pozzolans are affected, the optimal percentage for each of the pozzolans used can also be determined. Experimental results have shown that the effect of using microsilica separately from furnace slag is more severe. In addition, the effect of the utilization of pozzolans in combination is positive in improving the compressive strength of concrete specimens and only reduces the compressive strength at an early age. With the exception of samples containing low levels of pozzolan, other specimens cause a decrease in compressive strength at an early age. The potential for pozzolans can be an important factor in reducing resistance to overuse. The electrical resistance of concrete samples containing pozzolan was higher than the control specimen, which indicates a denser structure of concrete at the age of 90. The proposed artificial neural network based on the experimental data was able to predict the compressive strength of concrete containing different pozzolan in various ages.

ARTICLE INFO

Receive Date: 13 December 2021

Revise Date: 09 January 2022

Accept Date: 26 January 2022

Keywords:

Microsilica
Slag
mechanical properties
pozzolans
artificial neural

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.319696.2669>

*Corresponding author: seyedhamidreza kargar.
Email address: seyedhamidrezakargar@gmail.com

ارزیابی آزمایشگاهی خواص مکانیکی بتن حاوی میکروسلیس، سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر پوسته برنج و توسعه‌ی آن با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی

محمد مهدی روشنی^۱، سیدحمیدرضا کارگر^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

چکیده

استفاده از پوزولان‌ها به منظور ساخت بتن‌هایی با خصوصیات مکانیکی مناسب و با دوام در دهه اخیر جایگاه ویژه‌ای یافته است؛ در این تحقیق با بهره‌گیری از سه نوع پوزولان پرمصرف، یعنی میکروسیلیس، خاکستر پوسته برنج و سرباره کوره آهن‌گدازی، تلاش شد بتنی با خصوصیات مکانیکی مناسب ساخته شود. آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام پذیرفت. در این تحقیق سعی شد دامنه وسیعی از مقادیر جایگزین پوزولان در نظر گرفته شود، تا علاوه بر اطلاع از نحوه تاثیرگذاری این پوزولان‌ها، درصد بهینه برای هر یک از پوزولان‌های مصرفی نیز مشخص شود. نتایج آزمایش نشان داد که تاثیر استفاده از میکروسیلیس به صورت جداگانه از سرباره کوره آهن-گدازی و خاکستر پوسته برنج بیشتر می‌باشد. بعلاوه، تاثیر استفاده از پوزولان‌ها به صورت ترکیبی در بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مثبت بوده و تنها در سنین اولیه موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شود. به استثنای نمونه‌های حاوی مقادیر کم پوزولان، سایر نمونه‌های ساخته شده موجب افت مقاومت فشاری در سنین اولیه می‌شوند. احتمال کلوخه شدن پوزولان‌ها می‌تواند عاملی مهم در افت مقاومت ناشی از استفاده زیاد از آنها باشد. شبکه عصبی مصنوعی پیشنهادی بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق به خوبی توانست مقادیر مقاومت فشاری استوانه‌ای نمونه‌های بتنی را پیش بینی کند. با استفاده از نتایج شبکه عصبی، مقادیر بهینه استفاده از پوزولان‌های مورد نظر در این تحقیق به منظور دستیابی به بیشینه مقاومت فشاری تعیین گردید.

کلمات کلیدی: میکروسیلیس، سرباره کوره آهن‌گدازی، خصوصیات مکانیکی، پوزولان، شبکه عصبی مصنوعی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.319696.2669	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.319696.2669	۱۴۰۱/۰۷/۳۱	۱۴۰۰/۱۱/۰۶	۱۴۰۰/۱۱/۰۶	۱۴۰۰/۱۰/۱۹	۱۴۰۰/۰۹/۲۲
سیدحمیدرضا کارگر seyedhamidrezakargar@gmail.com				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

از بین مصالح ساختمانی می‌توان بتن را بعنوان پر مصرف‌ترین ماده جهان در عرصه ساخت و ساز نامید. در طی سالیان متمادی تحقیقات وسیعی بر روی این ماده پر مصرف صورت گرفته تا خواص فیزیکی و مکانیکی آن بهبود یابد. تقریباً رسیدن به این مهم بدون استفاده از مواد افزودنی امکان پذیر نیست. در چند سال گذشته به منظور کاهش کاستی‌های بتن و رسیدن به دوام بالا از مواد افزودنی معدنی مانند خاکستر پسته برنج^۱، سرباره کوره آهن‌گدازی^۲ و میکروسلیس^۳ استفاده شده است. کلسیم سیلیکات، هیدراته بیشتری در خمیر سیمان به سبب واکنش‌های پوزولانی ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه سازه‌های بتنی ساخته شده با سیمان معمولی از نظر دوام و مقاومت در برخی موارد جوابگوی تقاضای موجود نمی‌باشد، نیاز به استفاده از افزودنی‌های پوزولانی به شدت احساس می‌شود. از طرفی مباحث زیست محیطی نیز سبب می‌شود تا میزان تولید سیمان کاهش یافته و از این طریق آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از این صنعت آلاینده به حداقل رسد. بنابراین تحقیق حاضر را می‌توان از دو جنبه بهینه‌سازی طرح مخلوط بتنی به منظور دستیابی به بتنی با دوام و خصوصیات مکانیکی مناسب و همچنین از منظر زیست محیطی به دلیل کاهش مصرف سیمان در طرح‌های مخلوط ارزیابی کرد. با توجه به شرایط محیطی ایران و همچنین لزوم توجه به توسعه پایدار به نظر می‌رسد موضوعاتی به این شکل می‌تواند کمک شایانی به صنعت ساخت و ساز کرده و هزینه ساخت و نگهداری طرح‌های عمرانی را به حداقل برساند [۱].

هدف اصلی این تحقیق ساخت بتن با استفاده از جایگزینی افزودنی‌های بتن با بخشی از سیمان است و همچنین بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن می‌باشد. طرح اختلاط بتن با توجه به تحقیقات گذشته در این زمینه و همچنین با توجه به مصالح مصرفی و مشاهدات آزمایشگاهی تعیین شده است. تا به امروز آزمایش‌ها و بررسی‌های مختلفی برای بررسی نحوه اثرگذاری جداگانه یا تک عامله هر یک از موارد مذکور انجام شده است اما آنچه که در این پژوهش مورد نظر قرار گرفت چگونگی تاثیرات همزمان این مواد بوده و بهینه‌سازی طرح اختلاط موجود می‌باشد. هدف از این تحقیق بهبود خواص مکانیکی بتن می‌باشد که این امر خود باعث کاهش سطح آلودگی محیط زیست، کاهش مصرف سیمان، افزایش مقاومت و جلوگیری از خوردگی بتن می‌شود. به منظور پیشبرد این امر، طرح اختلاط مورد نیاز بر اساس استاندارد ACI تدوین شده و بررسی‌های آزمایشگاهی با مصالح بومی صورت می‌گیرد. نتایج در انتها به منظور بررسی تاثیر استفاده همزمان از پوزولان‌های قوی مانند سرباره کوره آهن‌گدازی، خاکستر پسته برنج و میکروسلیس با یکدیگر مقایسه می‌شود. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بهبود خصوصیات مکانیکی بتن حاوی پوزولان‌های ترکیبی صورت گرفته است که در ادامه به بررسی تحقیقات صورت گرفته قبلی پرداخته می‌شود.

آجای^۴ و همکاران با افزودن ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد میکروسلیس، مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی را مورد بررسی قرار دادند. مشاهده شد که با افزایش سن نمونه‌ها تاثیر میکروسلیس بیشتر شده و می‌توان از آن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی، استفاده کرد. این امر نه تنها به بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام بتن کمک می‌کند بلکه می‌تواند موجب کاهش مصرف سیمان و ارتقا سطح بهداشت از طریق کاهش تولید گازهای مضر توسط صنایع تولید سیمان شود [۲].

اسماعیلی پور و همکاران به بررسی تاثیر میکروسلیس بر روی خواص مکانیکی بتن پرداختند. در این مطالعه چهار نمونه بتن با درصد های ۰/۲، ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ میکروسلیس جایگزین وزنی سیمان در بتن مورد بررسی قرار گرفت. آنها در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که تمام نمونه‌های حاوی میکروسلیس دارای نقاط قوت بیشتری نسبت به نمونه‌های دیگر هستند. با اضافه کردن هر ۲/۵ درصد میکروسلیس جایگزین سیمان حدود ۸ درصد مقاومت فشاری افزایش پیدا می‌کند. میکروسلیس تخلخل و نفوذپذیری را به میزان چشمگیری کاهش می‌دهد و دوام و مقاومت بتن را افزایش می‌دهد. استفاده از این پوزولان در بتن به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی آن به خوبی اثبات شد و راه برای تحقیقات بیشتر در این زمینه وجود دارد [۳]. احمد^۵ و همکاران به بررسی تاثیر استفاده از میکروسلیس به

1 Rice husk ash

2 Ground Granulated Blast Furnace Slag

3 silica fume

4 Ajay

5 Ahmad

عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن پرداختند. در این تحقیق ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۵۰ درصد میکروسلیس جایگزین سیمان در بتن را مورد آزمایش قرار دادند. آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته به منظور تعیین خصوصیات مکانیکی بتن حاوی این پوزولان انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از پوزولان تا ۳۰ درصد جایگزینی سیمان، تاثیر چندانی بر روی خصوصیات بتن تازه و سخت شده نداشته و همچنین باعث بهبود خواص مکانیکی بتن در سنین بالا می‌شود به همین دلیل می‌توان از آنها در تهیه بتن اقتصادی و دوستدار محیط زیست استفاده کرد [۴]. لیو^۶ و همکاران بر روی تاثیر اندازه ذرات سرباره کوره آهن‌گدازی و تاثیر آنها بر روی خصوصیات مکانیکی بتن تحقیقاتی صورت دادند. نتایج تحقیق نشان داد که اندازه ذرات سرباره کوره آهن‌گدازی در بازه وسیعی از اندازه قرار دارد. قطر ذرات سرباره کوره آهن‌گدازی با افزایش سرعت چرخش دستگاه خرد کننده ذرات، کاهش می‌یابد. مقاومت بتن ساخته شده از سرباره کوره آهن‌گدازی برای نمونه‌های ساخته شده با ذراتی که در دستگاه با سرعت کم چرخیده بود، کمتر از سایر نمونه‌ها بود. در مقابل، افزایش سرعت دستگاه خردکننده تاثیرات مثبتی بر ساختار ذرات سرباره کوره آهن‌گدازی داشته و در عوض موجب افزایش مقاومت و به صورت کلی سبب بهبود خصوصیات مکانیکی بتن ساخته شده با این مصالح شده است. در نتیجه نحوه تولید این مصالح پوزولانی نیز می‌تواند تاثیر چشمگیری بر خصوصیات مکانیکی بتن ساخته شده با این مصالح داشته باشد. بنابراین توجه به این نکته در هنگام ساخت و عمل‌آوری بتن ساخته شده با پوزولان سرباره کوره آهن‌گدازی از نکات مهم در استفاده از این مواد می‌باشد [۵].

در سال ۲۰۱۸ روبیو^۷ و همکاران به بررسی تاثیر استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن پرداختند. در این تحقیق آنها از ۲۵ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی به جای سیمان استفاده کردند. رفتار بتن وابسته به خصوصیات شیمیایی سرباره کوره آهن‌گدازی می‌باشد. نمونه‌ای که بالاترین مقدار SiO_2 را داشت باعث افزایش مقاومت ۸ درصدی نمونه‌های بتنی شد که از مابقی نمونه‌ها بیشتر بود. نمونه‌ای که کمترین مقدار SiO_3 را داشت؛ بیشترین کاهش مقاومت یعنی نزدیک به ۳۲ درصد کاهش را در پی داشت. به عنوان نتیجه نهایی می‌توان گفت که جایگزینی سیمان با سرباره کوره آهن‌گدازی می‌تواند برای کاهش مصرف سیمان در نظر گرفته شود که خود عاملی در کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، افزایش عملکرد بتن و بهبود خصوصیات مکانیکی بتن ساخته شده با پوزولان‌های طبیعی می‌باشد [۶]. هان^۸ در پژوهشی به بررسی مقاومت فشاری، تخلخل، نفوذپذیری یون کلراید و جذب آب بتنی با سن ۵ سال حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی پرداخت. نتایج نشان داد زمانی که از سرباره کوره آهن‌گدازی استفاده شده است در مقایسه با سیمان پرتلند و با یک نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری کاهش، تخلخل بیشتر و همچنین مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید کاهش یافت. در بتنی با سن ۵ سال، اگر نسبت آب به سیمان کاهش یابد و پودر سرباره کوره آهن‌گدازی نیز افزایش یابد باعث می‌شود مقاومت فشاری افزایش، تخلخل کاهش یابد و همچنین نمونه‌های بتنی نفوذپذیری کمتری در مقابل یون کلراید از خود نشان دهد. بسیاری از سرباره‌های کوره آهن‌گدازی هنوز هم بعد از ۵ سال به طور کامل از خود واکنش نشان نداده‌اند [۷].

رضانیانپور و همکاران به ارزیابی دوام و خصوصیات مکانیکی بتن حاوی خاکستر پوسته برنج پرداختند. آنها نسبت درصدهای خاکستر پوسته برنج را ۱۰، ۷ و ۱۵ درصد وزن سیمان در نظر گرفتند. مشاهده شد که در تمام موارد مقاومت فشاری بتن با سن آن افزایش می‌یابد [۸]. هان و همکاران تاثیر جایگزینی مقادیر مختلف سیمان با خاکستر پوسته برنج معمولی تا ۴۰٪، بر روی مقاومت فشاری ملات و خمیر سیمان در سنین مختلف را بررسی کردند. با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، مناسب‌ترین درصد جایگزینی خاکستر پوسته برنج با سیمان ۱۰ و ۲۰٪ می‌باشد [۹]. زارعی و همکاران تاثیر جایگزینی مقادیر مختلف سیمان با خاکستر پوسته برنج معمولی تا ۲۵٪، بر روی خصوصیات مکانیکی نمونه‌های بتنی در سنین مختلف بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که زمانیکه از ۱۵٪ خاکستر پوسته برنج به جای سیمان استفاده شد، افزایش مقاومت فشاری تا حدود ۲۰٪ در نمونه‌های حاوی پوزولان مشاهده گردید [۱۰]. کالینز^۹ تاثیر خاکستر بادی، میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی بر روی خصوصیات مکانیکی بتن سه جزئی بررسی کرد. خاکستر بادی ریز،

6 Liu
7 Rubio
8 Han
9 Collins

میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی ریز هر سه در مخلوط‌هایی با جایگزینی ۱۰ درصد همراه با سرباره معمولی بکار رفتند. افزایش کارایی نسبت به مخلوط‌های دیگر حاوی مواد مکمل سیمانی، افزایش مقاومت یک روزه بتن نسبت به مخلوط شاهد از جمله نتایج بدست آمده از کاربرد خاکستر بادی ریز همراه با سرباره کوره آهن‌گدازی می‌باشد [۱۱]. در تحقیق انجام شده توسط آهسان^{۱۰} و همکاران به تاثیر جایگزینی مقادیر مختلف سیمان با خاکستر پوسته برنج و خاکستر بادی بر روی سه اندازه مختلف (۶۰۰ میکرومتر RHA1، 150 میکرومتر RHA2، ۴۴ میکرومتر RHA3)، با دو درصد مختلف (۱۰٪ و ۲۰٪) برای بهبود خواص مکانیکی بتن به عنوان جایگزین سیمان پرتلند معمولی و براساس ASTM پرداخته شد. نتایج نشان داد، زمانی از خاکستر بادی و خاکستر پوسته برنج به صورت همزمان استفاده شد؛ موثرتر از زمانی بود که فقط پوسته برنج استفاده شد. مقدار ۱۰٪ جایگزینی این پوزولان‌ها نسبت به سیمان در بتن به درصد های دیگر عملکرد بهتری داشت. خاکستر پوسته برنج با اندازه های درشت‌تر RHA2، RHA1، سبب کاهش مقاومت بیشتری در بتن شدند؛ این امر به دلیل کاهش سطح مخصوص ذرات پوزولان و کاهش واکنش پذیری آنها در فرآیند هیدراتاسیون بود [۱۲]. در تحقیق انجام شده توسط پدهی و همکاران در سال ۲۰۱۸، تاثیر ترکیب خاکستر پوسته برنج و بتن بازیافت شده بر خواص بتن ارزیابی شد. در این مطالعه اثر ترکیب خاکستر پوسته برنج با درصدهای ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪، ۲۵٪، ۳۰٪ و ۱۰۰٪ ذرات بازیافت شده بر خواص بتن ارزیابی شد. در این مطالعه اثر برای آزمایش‌هایی نظیر کارایی، مقاومت کششی و خمشی و مدول الاستیسته برای مدت عمل آوری ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه مورد بررسی قرار گرفت. زمانی از این پوزولان استفاده کردیم، باعث کاهش مقاومت کششی و مقاومت خمشی شد. به طوری که زمانی مقدار RHA از ۲۰ درصد گذشت، مقاومت کششی به شدت کاهش یافت. همچنین زمانی که از بتن بازیافتی استفاده شد، مدول الاستیسته ۳۰ درصد کاهش یافت، با این حال طرح اختلاطی حاوی ۱۰٪ ذرات بازیافت بتنی و ۱۰ تا ۱۵ درصد خاکستر پوسته برنج برای کاربرد در صنعت ساخت به عنوان طرح اختلاط بهینه مشخص شد [۱۳]. رضانیانپور و همکاران با به کارگیری شبکه‌های عصبی به بررسی پارامترهای موثر بر مقاومت و طرح اختلاط بتن غلطکی پرداختند. آنها شبکه عصبی چند لایه، که توانایی فوق‌العاده‌ای در انواع مدل سازی های غیرخطی و خطی از خود نشان داده است، استفاده کردند. پارامترهای ورودی اصلی شامل وزن کل مواد موجود در مخلوط (wt)، وزن سیمان (C)، وزن آب (W)، وزن ماسه (S)، وزن شن (G)، وزن پوزولان‌ها (PT) و میزان روان کننده (WRA) می‌باشد. آنها در پایان به این نتیجه رسیدند که استفاده از شبکه های عصبی، مدلسازی بتن غلطکی را دچار تحول کرده و نتایج مناسب و دقیقی در برداشته است. این مدل تنها یک بار ساخته شده است و دستیابی به پیش بینی مقاومت را به صورت آنی و با دقت مناسب انجام می‌دهد و می‌تواند بسیاری از هزینه های نمونه سازی طرح اختلاط بتن غلطکی را کاهش دهد [۱۴]. کارگر و همکاران، تحقیقی جامع و کامل بر روی تاثیر خاکستر بادی بر خصوصیات مکانیکی بتن انجام دادند. در مجموع ۴۰۰ نمونه‌ی بتنی حاوی خاکستر بادی مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از شبکه عصبی به منظور تخمین خصوصیات مکانیکی بتن حاوی خاکستر بادی بهره برد. ضریب رگرسیون (R) برای تخمین مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر ۰/۹۷، برای مقاومت کششی ۰/۹۶ و برای پیش‌بینی مدول الاستیسته بتن حاوی خاکستر بادی به میزان ۰/۹۹ می‌باشد. پس از اطمینان از صحت نتایج به دست آمده از شبکه، می‌توان مهمترین و یا تاثیرگذارترین پارامتر ورودی را از میان داده های بررسی شده تعیین کرد. مهمترین پارامتر در تعیین مقاومت فشاری و تاثیرگذارترین آنها بر روی این خصوصیت مکانیکی، میزان شن و آب موجود در طرح اختلاط می‌باشد. کمترین میزان اهمیت را سیلیس موجود در خاکستر بادی بر روی مقاومت فشاری نمونه های بتنی خواهد داشت. بهره گیری از داده های موجود و قابلیت های شبکه عصبی مصنوعی، می‌توان رابطه‌ای تجربی نیز برای تعیین خصوصیات مکانیکی بتن حاوی خاکستر بادی پیشنهاد داد [۱۵]. فنگ^{۱۱} و همکاران به بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی سرباره‌ی کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی و توسعه‌ی آن با شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. در مجموع ۱۰۳۰ نمونه بتنی مورد بررسی قرار گرفت. سنگدانه های درشت، سنگدانه‌های ریز، روان کننده، خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی و مدت عمل آوری به عنوان ورودی شبکه و مقاومت فشاری نیز به عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شدند. در این تحقیق از ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش شبکه استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد ضریب همبستگی نزدیک به یک به دست آمده است؛ و این دقت شبکه‌ی تعریف شده را نشان می‌دهد که بسیار خوب آموزش دیده شده است [۱۶].

10 Ahsan,

11 Feng

در این تحقیق با بهره‌گیری از سه نوع پوزولان پر مصرف، یعنی میکروسلیس، خاکستر پوسته برنج و سرباره کوره آهن‌گدازی، تلاش شد بتنی با خصوصیات مکانیکی مناسب و در عین حال دوستدار طبیعت، از طریق کاهش مصرف سیمان و تبعات زیست محیطی ناشی از تولید آن، ساخته شود. از آزمایش‌هایی که به منظور بررسی تاثیر استفاده از این پوزولان‌ها به صورت جداگانه و ترکیبی طراحی شده بود مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مستحصل شد. در این تحقیق سعی شد دامنه وسیعی از مقادیر جایگزین پوزولان در نظر گرفته شود تا علاوه بر اطلاع از نحوه تاثیرگذاری این پوزولان‌ها، درصد بهینه برای هر یک از پوزولان‌های مصرفی نیز مشخص شود. علاوه بر این با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، نتایج توسعه داده‌شد و برای مخلوط‌هایی که در برنامه آزمایشگاهی نبودند نتایج خصوصیات مکانیکی تخمین زده شد. این امر می‌تواند راه را برای استفاده هر چه بیشتر از پوزولان‌ها فراهم کند. همچنین، رابطه‌ای ساده و دقیق برای تخمین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی حاوی این سه نوع پوزولان با درصد‌های مختلف جایگزینی ارائه شد.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی در این تحقیق

مصالح مصرفی در تهیه بتن‌ها عبارتند از سیمان، سنگدانه (شن و ماسه)، میکروسلیس، سرباره کوره آهن‌گدازه، خاکستر پوسته برنج، آب و فوق روان کننده که در ادامه به معرفی مشخصات آنها پرداخته شده است.

۲-۱-۱- سیمان

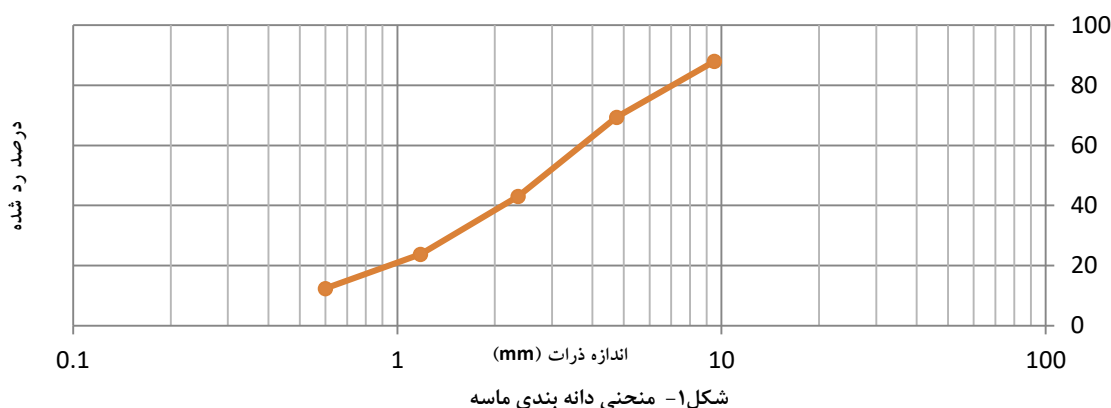
در این پژوهش از سیمان تیپ ۲ ساخت کارخانه سیمان نهاوند مطابق با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ استفاده شد.

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی سیمان نهاوند تیپ ۲

الزامات استاندارد ۲۸۹ ایران	نتیجه آزمایش	خصوصیات شیمیایی
Min: ۲۰	20.7 ± 0.3	SiO ₂
Max: ۶	5.2 ± 0.2	Al ₂ O ₃
Max: ۶	4.6 ± 0.2	Fe ₂ O ₃
	65 ± 0.5	CaO
Max: ۵	1.8 ± 0.2	MgO
Max: ۳	2.2 ± 0.4	SO ₃
	0.5 ± 0.05	K ₂ O
	0.15 ± 0.05	Na ₂ O
Max: ۳	1 ± 0.5	L.O.I (Loss Of Ignition)
Max: ۰.۷۵	0.4 ± 0.1	I.R (Insoluble Residue)
	1.3 ± 0.2	Free CaO
	۵۹/۴۷	C ₃ S
	۱۴/۴۸	C ₂ S
Max: ۸	۶	C ₃ A
	۱۴	C ₄ AF

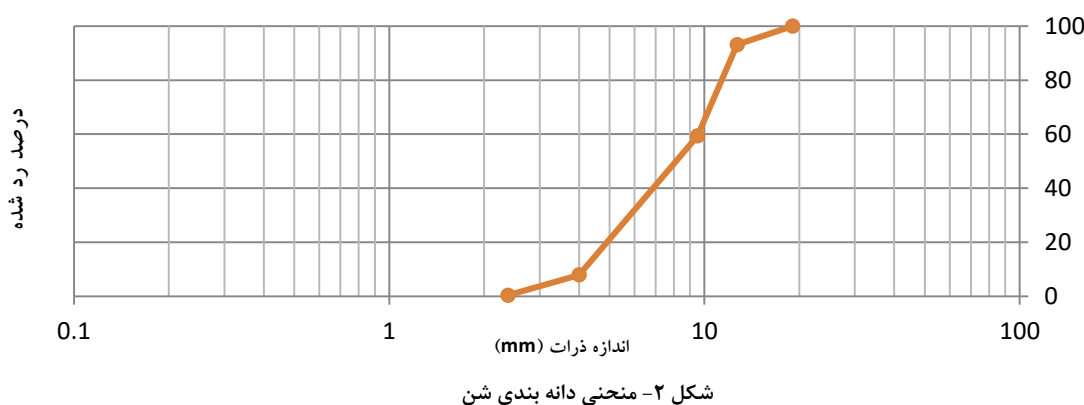
۲-۱-۲- ماسه

در این تحقیق، ماسه رودخانه‌ای شسته که از معادن طبیعی کرمانشاه استحصال شده بود، استفاده شد. ضریب نرمی ماسه برابر ۲/۹ بدست آمد. مقدار وزن مخصوص ظاهری ۲/۶۵ و وزن مخصوص حقیقی ۲/۵۴ تن بر متر مکعب بود. دانه بندی ماسه در محدوده مجاز استاندارد ASTM قرار داشته و نمودار آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



۲-۱-۳- شن

شن بکار برده شده در این تحقیق از معادن کرمانشاه تامین گردیده است که از نوع کوهی شکسته می‌باشد. درشت دانه مورد استفاده در ساخت بتن، از ترکیب بادامی و نخودی می‌باشد. بزرگترین اندازه اسمی سنگدانه مصرفی برابر ۲۵ میلیمتر و وزن مخصوص این شن برابر ۲/۶۸ گرم بر سانتی متر مکعب است. نمودار دانه بندی در شکل ۲ نشان داده شده است.



۲-۱-۴- آب

آب مصرفی جهت استفاده در طرح اختلاط نمونه‌های بتنی، آب تصفیه شده‌ی شهری کرمانشاه می‌باشد. همچنین جهت عمل آوری نمونه‌ها از این آب استفاده شده است. نمونه‌ها در مخزنی با دمای کنترل شده با استفاده از آب شرب نگهداری شدند.

۲-۱-۵- افزودنی فوق روان کننده

در این تحقیق جهت افزایش کارایی و ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان در تمامی طرح‌ها از فوق روان کننده Carboxal HF5000 با پایه شیمیایی پلی کربوکسیلات محصول شرکت البرز شیمی استفاده شده است.

۲-۱-۶- میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره ی آهن گدازه

میکروسیلیس مصرفی با نام تجاری میکروسیلیکا تولید شرکت بتن شیمی است که با استاندارد ASTM C1240 و EN 13263 مطابقت داشته و از بازار داخلی تهیه گردید. این میکروسیلیس دارای رنگ خاکستری، وزن مخصوص $300 \frac{kg}{m^3}$ و دارای ساختار غیر کریستاله می‌باشد. خاکستر پوسته برنج مورد استفاده در این پروژه از کارگاه گیلان کشت تهیه شده و پس از خشک شدن بوسیله آسیاب پودر شده است. آنالیز شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاکستر طبق استاندارد ASTM C989 می‌باشد. سرباره کوره آهن-گدازی مورد استفاده در این پروژه از کارخانه ذوب آهن اصفهان بصورت گرانول تهیه شده و پس از خشک شدن بوسیله آسیاب گلوله‌ای

پودر شده است. آنالیز شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سرباره طبق استاندارد ASTM C989 می‌باشد [۱۷]. آنالیز شیمیایی میکروسلیس، خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی استفاده شده در این تحقیق در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: آنالیز شیمیایی میکروسلیس، خاکستر پوسته برنج و سرباره آهن‌گدازی

سرباره آهن‌گدازی	خاکستر پوسته برنج	میکروسلیس	ترکیب %
۳۶	۹۲/۳	۹۴/۵۵	SiO ₂
۱۳	۰/۸۵	۱/۳۲	Al ₂ O ₃
۰/۶	۰/۶	۰/۸۹	Fe ₂ O ₃
۳۷	۱/۲	۰/۲۶	CaO
۱۰	۱/۲	۰/۱۸	MgO
۰/۶	۰/۴	۰/۰۶	SO ₃
۰/۵	۰/۲۵	۰/۱۵	Na ₂ O
۱/۱	۰/۳	۰/۲۱	K ₂ O
۱/۲	۳/۵	۲/۱۷	L.O.I

۲-۲- طرح اختلاط

طرح اختلاطها مطابق با ACI-211 بوده است. برای اینکه نتایج آزمایش‌ها قابل مقایسه باشند، در تمامی طرح‌ها از نسبت آب به سیمان (۰/۵) استفاده گردید، با این تفاوت که در هر طرح به میزان مورد نیاز که میکروسلیس، سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر پوسته برنج به بتن اضافه شد، به همان میزان از وزن سیمان کسر گردید. ملاک تعیین میزان روانی به دست آمده در ساخت بتن مرجع، مبنای تعیین روانی دیگر طرح اختلاط‌های تحقیق قرار گرفت و در ساخت بتن‌های تحقیق فوق روان‌کننده به میزانی اضافه شد که بتن‌ها حدوداً به روانی مورد نظر برسند. جزییات طرح اختلاط در جدول ۳ ارائه شد.

۲-۳- ساخت نمونه‌ها

در این تحقیق، قالب‌های استوانه‌ای ۳۰×۱۵۰ میلیمتری برای تعیین مقاومت فشاری به کار گرفته شد. پس از تعیین طرح اختلاط، تمامی اجزای تشکیل دهنده طرح توزین شده و هر یک آماده اختلاط در ظروف مشخص قرار داده شدند. در ابتدا با استفاده از مقداری از آب اختلاط بدنه میکسر مرطوب شده و سپس سنگدانه‌های بتن (اعم از ریزدانه و درشت‌دانه) به همراه مقداری از آب طرح داخل مخلوط کن ریخته شده تا کاملاً مرطوب و مخلوط شوند. در مرحله بعد مواد سیمانی و شبه سیمانی، یعنی سیمان، میکروسلیس، سرباره کوره آهن‌گدازی و یا خاکستر پوسته‌ی برنج به مخلوط کن اضافه می‌شود. این مواد بصورت خشک با هم کاملاً مخلوط شده تا بصورت پودری یک دست در آیند و سپس به مخلوط کن حاوی سنگدانه اضافه می‌شود و پس از اختلاط مناسب اجزا در طی زمان حداقل ۲ دقیقه، آب به تدریج به بتن اضافه می‌شود. بعد از قالب گیری، نمونه‌ها به وسیله پارچه خیس جهت جلوگیری از تبخیر آب آنها پوشانده شده و پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج گردیده و در آب آهک اشباع عمل آوری شدند. برخی نمونه‌ها تا سن ۷ روزه و برخی دیگر تا سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بر اساس نوع آزمایش لازم و بر طبق استاندارد عمل آوری شدند و سپس نمونه‌ها طبق برنامه زمانی جهت انجام آزمایش‌ها از آب خارج گردیدند. آزمایش‌های بتن در آزمایشگاه جاهد کرمانشاه صورت گرفت. در نام‌گذاری نمونه‌های ساخته شده، از ترکیب یک حرف و یک عدد استفاده شده به این ترتیب که حرف اول نشان دهنده نوع پوزولان مصرفی و عدد بعد از آن نشان دهنده میزان جایگزینی این پوزولان بر حسب درصد با سیمان می‌باشد. برای مثال S5 به معنی نمونه حاوی ۵ درصد وزنی میکروسلیس جایگزین سیمان می‌باشد. سرباره کوره آهن‌گدازی نیز با حرف G معرفی می‌شود. خاکستر پوسته برنج نیز با حرف R معرفی می‌شود.

جدول ۳- جزئیات طرح اختلاط‌های تحقیق

F.A.	C.A.	w	RHA	GGBFS	microsilica	cement	نام طرح	ردیف
993	816.8	224	0	0	10	440	S2.5	1
993	816.8	224	0	0	20	430	S5	2
993	816.8	224	0	0	40	410	S10	3
993	816.8	224	0	0	60	390	S15	4
993	816.8	224	0	0	80	370	S20	5
993	816.8	224	0	40	0	410	G10	6
993	816.8	224	0	80	0	370	G20	7
993	816.8	224	0	120	0	330	G30	8
993	816.8	224	0	160	0	290	G40	9
993	816.8	224	0	10	10	440	S2.5G2.5	10
993	816.8	224	0	20	20	430	S5G5	11
993	816.8	224	0	40	40	410	S10G10	12
993	816.8	224	0	60	60	390	S15G15	13
993	816.8	224	0	80	80	370	S20G20	14
993	816.8	224	20	0	0	430	R5	15
993	816.8	224	40	0	0	410	R10	16
993	816.8	224	60	0	0	390	R15	17
993	816.8	224	80	0	0	370	R20	18
993	816.8	224	160	0	0	290	R40	19
993	816.8	224	10	10	10	420	S2.5R2.5	20
993	816.8	224	20	20	20	390	S5R5	21
993	816.8	224	40	40	40	370	S10R10	22
993	816.8	224	60	60	60	270	S15R15	23
993	816.8	224	80	80	80	210	S20R20	24
993	816.8	224	20	20	0	410	R5G5	25
993	816.8	224	40	40	0	370	R10G10	26
993	816.8	224	60	60	0	330	R15G15	27
993	816.8	224	80	80	0	290	R20G20	28
993	816.8	224	14	14	14	408	R3.5S3.5G3.5	29
993	816.8	224	28	28	28	366	R7S7G7	30
993	816.8	224	40	40	40	330	R10S10G10	31
993	816.8	224	60	60	60	270	R15S15G15	32
993	816.8	224	0	0	0	450	Control	33

۳ - تجزیه و تحلیل داده ها

در این بخش نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در جدول مربوطه داده شده و با استفاده از نمودارهای میله‌ای به بررسی خواص مکانیکی و روانی طرح‌های مرجع، دوجزئی و سه‌جزئی به صورت جداگانه پرداخته می‌شود.

۳-۱- بررسی و تحلیل اسلامپ بتن‌های مرجع، دوجزئی و سه‌جزئی

آزمایش اسلامپ که برای تمامی طرح‌های مذکور انجام گرفت تنها به منظور بررسی میزان کارایی بتن ساخته شده از انواع مختلف پوزولان‌ها بود. پس از تعیین اسلامپ نمونه بتنی موجود در مخلوط‌کن، در صورت عدم انطباق کارایی مخلوط با مقادیر آئین نامه ای، مجدداً مقداری روان کننده به مخلوط اضافه می‌شد. در این تحقیق تنها سه طرح فاقد اسلامپ مورد نظر بود که با افزودن مقداری روان کننده، در حد ۰/۲ درصد وزنی سیمان، اضافه بر مقدار اولیه روان کننده، اسلامپ آنها به محدوده مجاز برگشت و مخلوطی کارا و روان حاصل شد که به خوبی در قالب‌های فشاری و خمشی قرار می‌گرفت. این سه نمونه، G40، S10G10 و S20G20 بودند که به دلیل میزان بالای پوزولان مصرفی و همچنین نرمی بیشتر این مصالح، جذب آب بیشتری داشته و سبب شدند کارایی مخلوط کاسته شود. همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود اسلامپ نمونه‌ها همگی در محدوده مجاز می‌باشند.

جدول ۴- مقادیر اسلامپ نمونه‌های بتنی ساخته شده

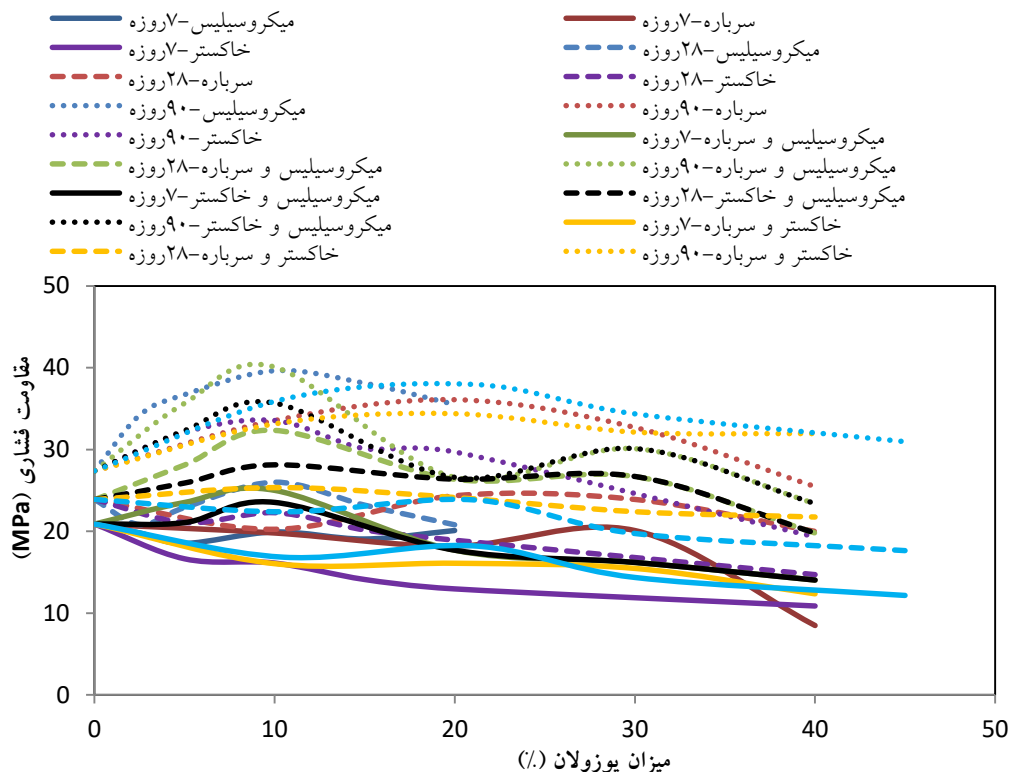
Mixture	Slump (cm)	Mixture	Slump (cm)
Control	11	S5G5	9
S2.5	11	S10G10	12
S5	10	S15G15	10
S10	10	S20G20	8
S15	9	S2.5R2.5	11
S20	11	S5R5	10
G10	8	S10R10	12
G20	12	S15R15	10
G30	10	S20R20	8
G40	9	R5G5	9
R5	9	R10G10	10
R10	8	R15G15	8
R15	7	R20G20	10
R20	7	S3.5R3.5G3.5	9
R40	8	S7R7G7	8
S2.5G2.5	10	S10R10G10	7
S15R15G15	8		

۲-۳- تحلیل نتایج مقاومت فشاری

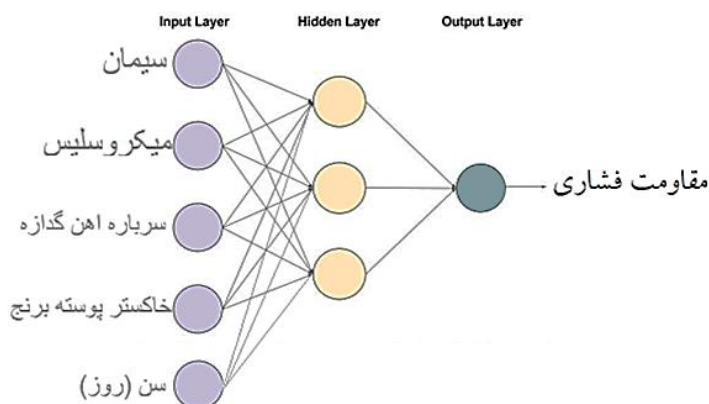
مهم ترین خاصیت مکانیکی بتن‌ها، مقاومت فشاری است که نتایج آن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بر روی نمونه مرجع و نمونه‌های حاوی درصد های مختلف میکروسلیس و سرباره به صورت‌های جداگانه و همزمان در شکل ۳ داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در تمامی سنین تاثیر استفاده ترکیبی از پوزولان‌ها موثرتر بوده به شرطی که میزان پوزولان مصرفی از ۲۰ درصد جایگزینی سیمان بیشتر نشود. در این صورت استفاده از پوزولان‌های ترکیبی با درصد‌های بیشتر اثری سوء بر مقاومت فشاری خواهد داشت. میکروسلیس نیز تاثیری چشمگیرتر از سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر پوسته برنج از خود نشان داد که موجب می‌شود استفاده از آن در بهبود خصوصیات مکانیکی بتن‌های پوزولانی افزایش یابد.

۴- ساختار شبکه عصبی مصنوعی

ساختار شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه‌ی بهینه‌ی مورد استفاده بدین منظور در شکل ۴ آورده شده است. ساختارهای مختلف با تعداد نرون‌های مختلف، تعداد لایه‌های مختلف، تعداد تکرارهای گوناگون، توابع فعالسازی دیگر و روش‌های مختلف نرمال‌سازی داده‌ها آزموده شد تا بهترین جواب به دست رسید. مشخصات بهترین شبکه‌ی عصبی به دست آمده به منظور دستیابی به انرژی جذب شده و بار حداکثر با کمترین خطا در جدول ۵ آورده شده است. به منظور یافتن ساختار بهینه شبکه عصبی که در آن بهترین پاسخ-ها، یعنی پاسخ‌های با حداقل خطا نسبت به نمونه واقعی، به دست آید، تحلیل‌های متعددی بر اساس ورودی‌های شبکه که خلاصه‌ای از مطالعات آماری آنها در جدول ۶ لیست شده است، صورت گرفت. در این جدول اطلاعات ورودی‌های شبکه که بعنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند، آورده شده است. پس از تحلیل‌های متعدد به منظور یافتن بهترین ساختار برای شبکه عصبی مصنوعی پیشنهادی، شکل ۵ نشان دهنده بهینه‌ترین شبکه به منظور تخمین پاسخ‌ها می‌باشد. این شبکه با یک لایه ورودی شامل ۵ نرون و یک لایه پنهان متشکل از ۱۶ نرون با خطای MSE ۰/۰۰۲۳، ۰/۰۰۹۵ و ۰/۰۰۲۴ به ترتیب برای داده‌های Train، Validation و Test عملکرد خوبی از خود نشان داد. عملکرد این شبکه در شکل ۶ نشان داده شده است. رگرسیون پاسخ‌های بدست آمده از شبکه نشان از دقت بالای این روش در تخمین مقاومت‌های فشاری دارد به نحویکه ضریب همبستگی داده‌ها برابر $R2=0/95$ می‌باشد.



شکل ۳- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی پوزولان‌های مختلف در سنین مختلف



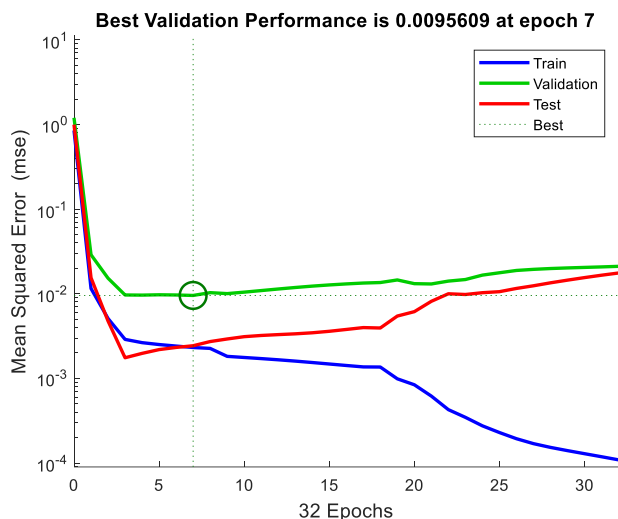
شکل ۴- ساختار شبکه‌ی عصبی مصنوعی مورد استفاده به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری

جدول ۵: متغیرهای در نظر گرفته شده در شبکه عصبی مصنوعی

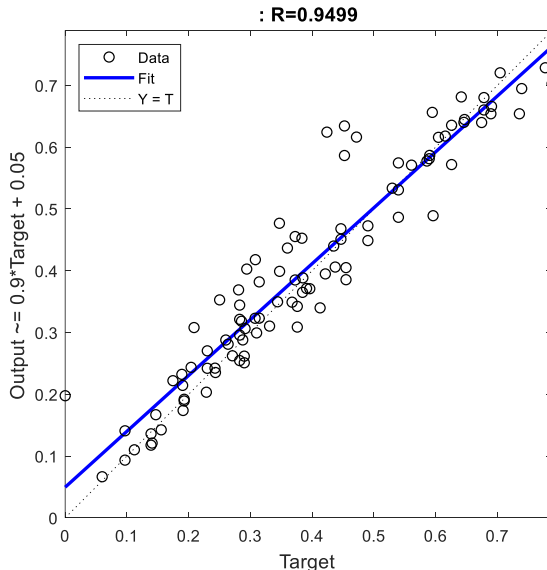
SD	Average	Max	min	متغیر (kg/m3)	
۵۷/۹۵	۳۶۰/۱	۴۵۰	۲۴۷/۵	سیمان	ورودی
۳۰/۶۰	۲۶/۳	۹۰	۰	میکروسیلیس	
۴۴/۱۴	۳۲/۴۵	۱۸۰	۰	سرباره کوره آهن‌گدازه	
۴۰/۴۵	۳۱/۱	۱۸۰	۰	خاکستر پوسته برنج	
۳۵/۲۳	۴۱/۶۶	۹۰	۷	سن (روز)	
۷/۳۴	۲۴/۱	۴۰/۰۷	۸/۴۸	مقاومت فشاری (MPa)	خروجی

جدول ۶: مشخصات مدل شبکه‌ی عصبی بهینه‌ی ارائه شده

Neural network	MLP
Number of neurons in the input layer	5
Number of neurons in the first hidden layer	14
Number of neurons in the output layer	1
Number of epochs	156
Activation function of neurons in hidden layers	Tansig
Activation function of neurons in input and output layers	Purelin
Method of training	Levenberg-Marquardt



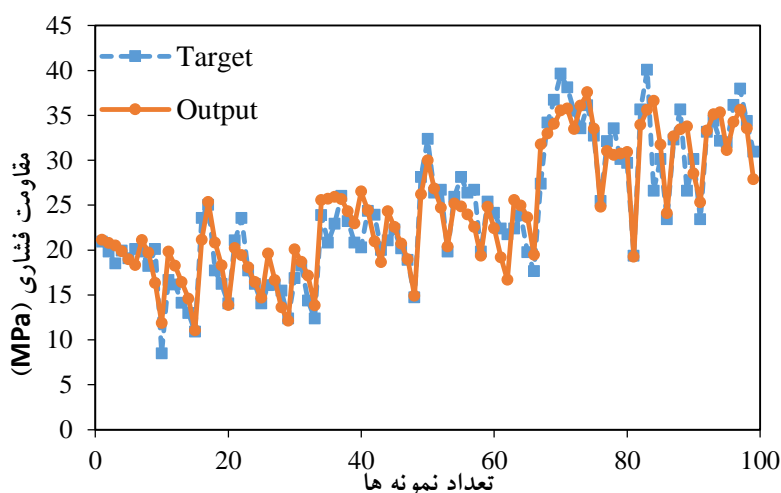
شکل ۵- عملکرد شبکه عصبی مصنوعی پیشنهادی برای تخمین مقاومت فشاری



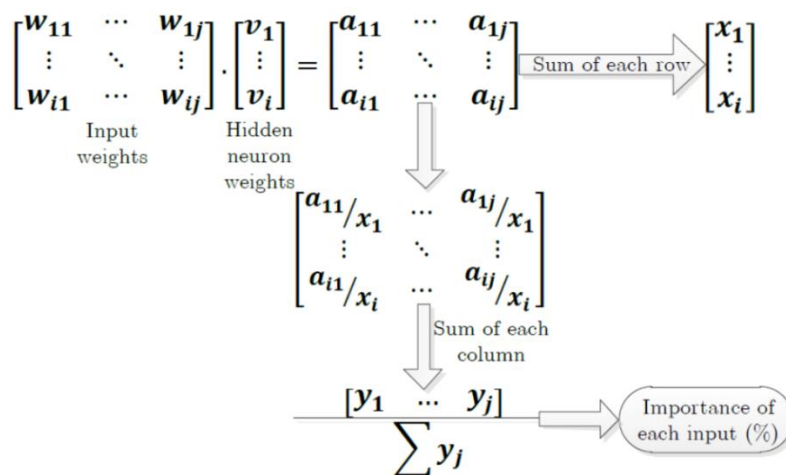
شکل ۶- رگرسیون نتایج به دست آمده از شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین مقاومت فشاری

در شکل ۷ مقایسه‌ای بین پاسخ‌های دریافتی از شبکه یعنی Output و نتایج واقعی یعنی Target آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق مناسبی بین پاسخ‌های دریافتی وجود دارد که نشان از عملکرد مناسب شبکه در پیش بینی مقاومت فشاری بتن حاوی پوزولان می‌باشد. یکی دیگر از روش‌های ارزیابی عملکرد شبکه، تحلیل حساسیت می‌باشد. در این تحلیل، میزان اثرگذاری هر یک از پارامترهای ورودی بر پاسخ‌های بدست آمده از شبکه، یعنی خروجی‌ها، بررسی شده و همچنین می‌توان میزان تاثیرگذاری هر یک از

ورودی‌ها را نیز به تفکیک دید. برای این کار باید از الگوریتم نشان داده شده در شکل ۸ که به الگوریتم گارسون مشهور است، استفاده کرد [۱۸].

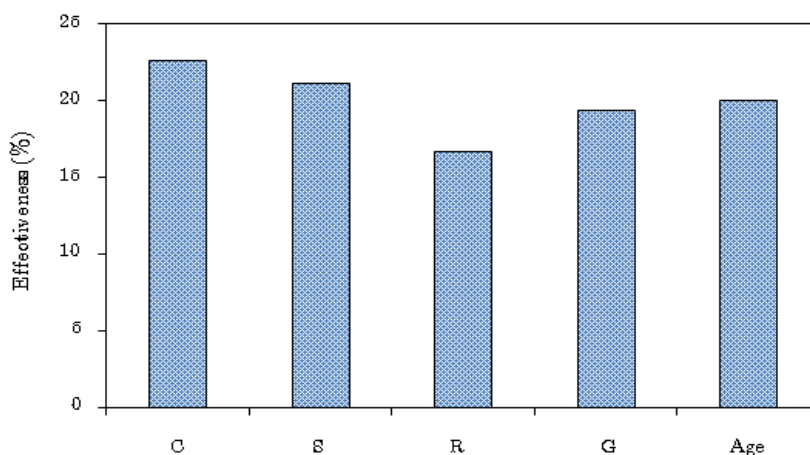


شکل ۷- مقایسه نتایج به دست آمده از شبکه عصبی مصنوعی با نتایج آزمایشگاهی



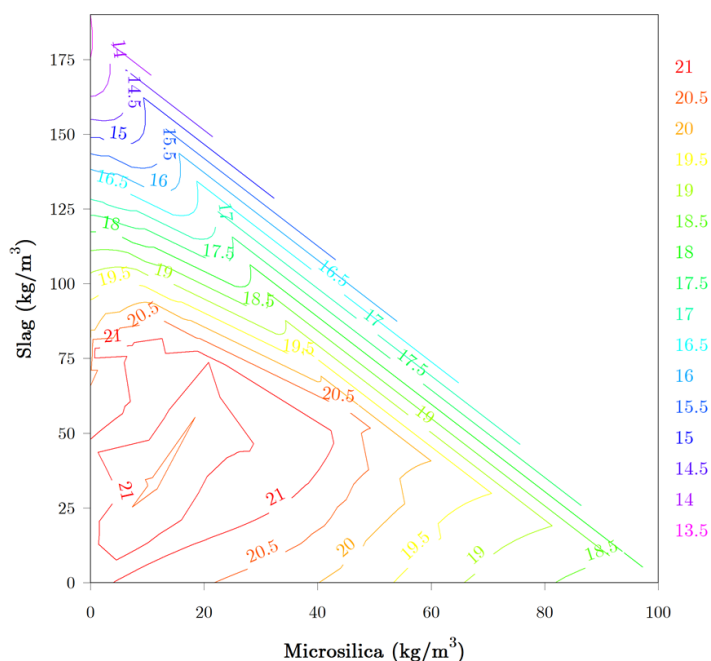
شکل ۸- الگوریتم گارسون برای تعیین میزان اثرگذاری هر یک از پارامترهای ورودی

همانطور که از شکل ۹ مشاهده می‌شود، تمامی پارامترهای ورودی تقریباً تأثیری مشابه و یکسان بر روی نتایج دارند که نشان دهنده این مطلب می‌باشد که پارامتری اضافی و یا بی مورد برای شبکه انتخاب نشده‌است. از طرف دیگر، می‌توان گفت سیمان با ضریب تأثیر ۲۲/۶۳٪ و پس از آن میکروسیلیس با میزان تأثیرگذاری ۲۱/۱۲ درصدی جزء پر اهمیت‌ترین پارامترهای ورودی بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی این سه نوع پوزولان می‌باشند. کم اهمیت‌ترین پارامتر به صورت نسبی را می‌توان خاکستر بادی با میزان تأثیرگذاری ۱۶/۷ درصدی نامید. این امر با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده نیز منطبق بوده و نشانی دیگر از صحت عملکرد شبکه پیشنهادی می‌باشد. پس از اطمینان از کارایی و عملکرد مناسب شبکه پیشنهادی، نوبت به بررسی داده‌ها و مقادیری می‌شود که در آزمایشگاهی مورد بررسی قرار نگرفت. شبکه عصبی پس از آموزش به خوبی قادر است این نتایج را به دست آورده و در قالب اشکال و نمودارهایی به تصویر بکشد. برای این منظور فرض می‌شود طرح اختلاط مورد بررسی ثابت بوده و مطابق با همان طرح اختلاطی است که در برنامه آزمایشگاهی مورد بررسی قرارگرفت. میزان سیمان نیز تابعی از میزان پوزولان‌های مصرفی در نظر گرفته می‌شود.



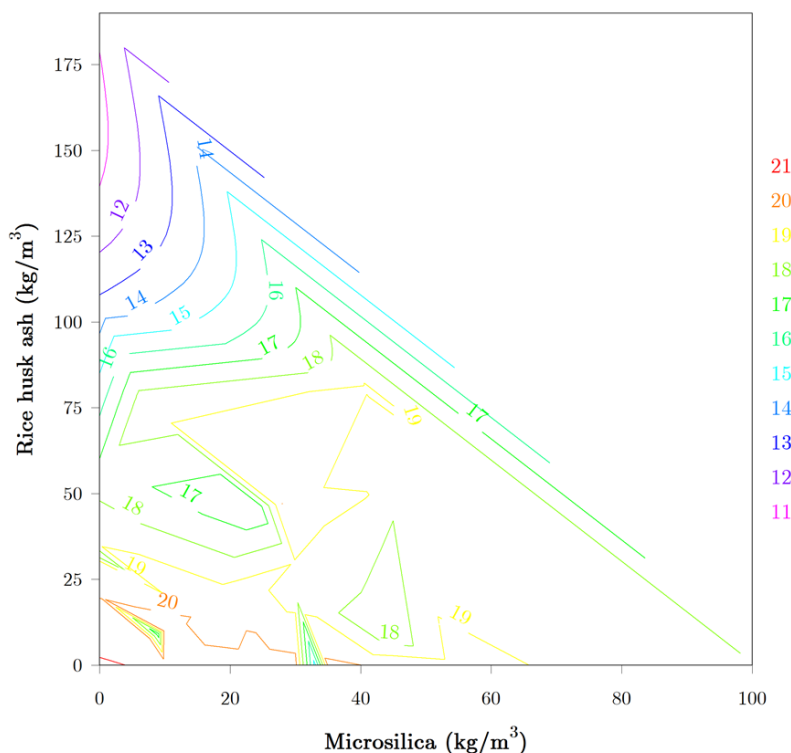
شکل ۹- میزان تاثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر روی نتایج خروجی

در شکل ۱۰ تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه در برابر مقادیر مختلفی از میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان پوزولان‌های مصرفی، از مقاومت فشاری ۷ روزه کاسته می‌شود که این کاهش تقریباً برای هر دو پوزولان به یک میزان می‌باشد. علاوه، می‌توان دید که مقداری بهینه برای میزان مصرف ترکیبی از این دو پوزولان وجود دارد. محدوده مصرف میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی را برای بتن با عیار ۴۵۰، می‌توان به ترتیب بین ۰ تا ۴۰ و ۰ تا ۷۵ $\frac{kg}{m^3}$ متناظر با ۰ تا ۹٪ برای میکروسیلیس و ۰ تا ۱۶٪ برای سرباره در نظر گرفت. استفاده از مقادیر بالای میکروسیلیس و کم سرباره منجر به کاهش مقاومت شده ولی در صورت استفاده از میکروسیلیس تا ۵٪، با هر مقدار استفاده از سرباره تا ۱۶٪ جایگزین سیمان، مقاومت فشاری ۷ روزه افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰- تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه در برابر تغییرات میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی

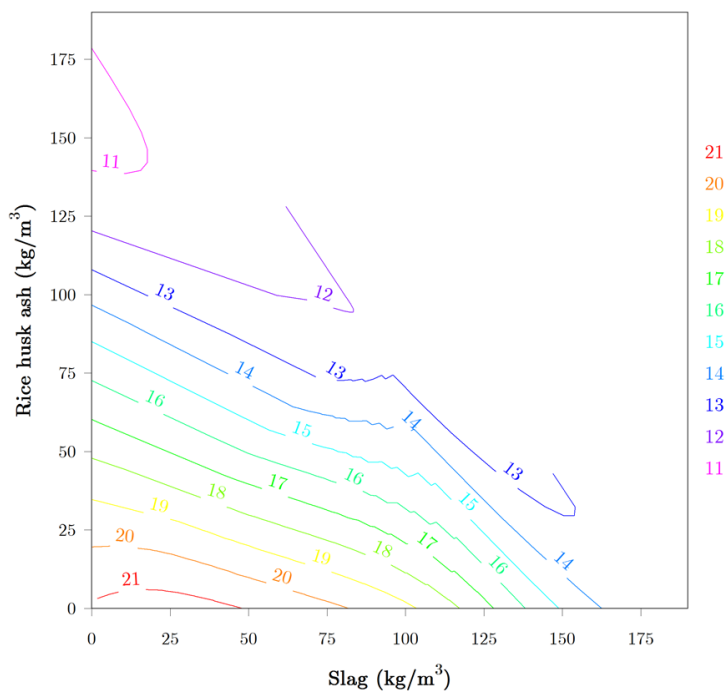
در شکل ۱۲ تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه برای دو پوزولان میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج آورده شده است. تقریباً روندی مشابه با حالت قبل مشاهده می‌شود با این تفاوت که با افزایش میزان خاکستر پوسته برنج به تنهایی، میزان کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه بیشتر می‌باشد. مقاومت فشاری ۷ روزه برای نمونه‌های حاوی ۱۰۰ کیلوگرم میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج به تنهایی به ترتیب برابر با ۱۸ و ۱۴ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین، میزان بهینه استفاده از هر دو پوزولان به صورت ترکیبی برای دستیابی به بیشترین مقاومت، محدوده‌ای بین ۲۰ تا ۲۰ کیلوگرم، متناظر با ۰ تا ۵ درصد جایگزینی سیمان می‌باشد. در شکل ۱۲ تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه برای نمونه‌های بتنی حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر پوسته برنج آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان کاهش مقاومت فشاری به دلیل استفاده از مقادیر بالای خاکستر پوسته برنج از پوزولان دیگر بیشتر بوده و تاثیر منفی این پوزولان در سنن کم برای مقادیر بالا، چشمگیر تر می‌باشد. بعلاوه، محدوده بهینه برای استفاده از ترکیب سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر پوسته برنج به ترتیب ۰ تا ۱۲ درصد جایگزینی سیمان برای سرباره کوره آهن‌گدازی و ۰ تا ۲ درصد برای خاکستر پوسته برنج می‌باشد. نمودارهایی مشابه برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه از خروجی شبکه عصبی نتیجه شد که در اشکال ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. در شکل ۱۳ تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده همزمان از ۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب از هر یک از دو پوزولان میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی موجب دستیابی به بیشترین مقاومت خواهد شد. این میزان به منزله جایگزینی ۶/۶ درصد از سیمان با این دو ماده افزودنی می‌باشد.



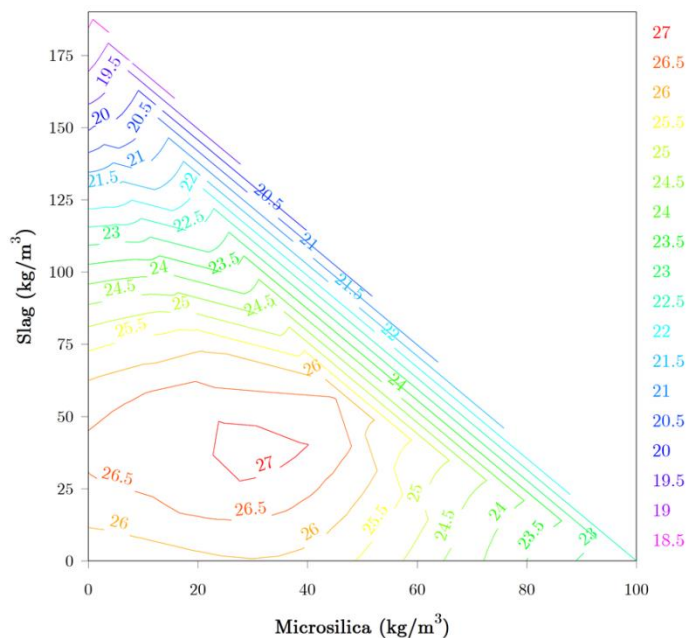
شکل ۱۱- تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه در برابر تغییرات میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج

در شکل ۱۴ تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی حاوی میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقاومت به دست آمده در این ترکیب از حالت قبل، یعنی ترکیب میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی، کمتر می‌باشد که نشان از تاثیرگذاری بیشتر سرباره کوره آهن‌گدازی نسبت به خاکستر پوسته برنج دارد. بعلاوه، با افزایش هر یک از دو پوزولان به تنهایی، مقاومت فشاری افت می‌کند. میزان بهینه استفاده همزمان از میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج به ترتیب ۴۵ و ۱۰ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن با عیار ۴۵۰ می‌باشد که به بیان دیگر عبارتست از ۱۰ و ۲ درصد جایگزینی سیمان. در شکل ۱۵ تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر پوسته برنج نشان داده شده است. می‌توان دید تاثیر

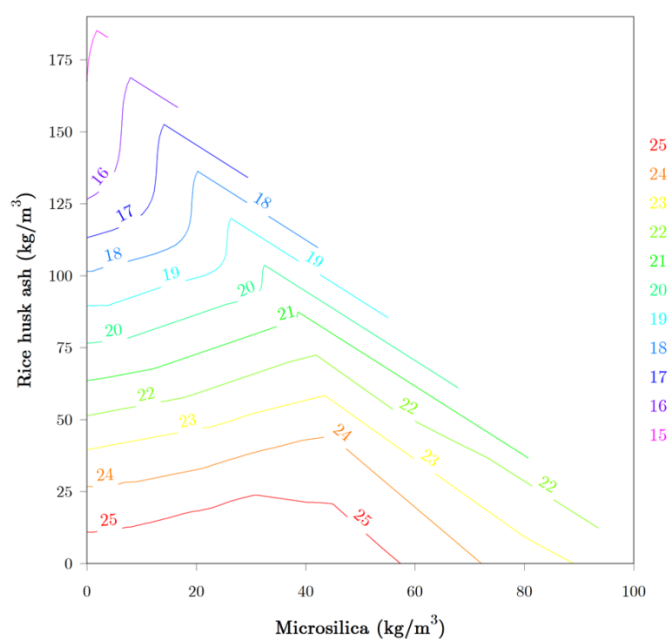
افزایش خاکستر پوسته برنج در مخلوط بتنی در کاهش مقاومت فشاری مشهودتر از افزایش دیگر پوزولان می‌باشد. بعلاوه، میزان بهینه استفاده همزمان از این دو پوزولان برای دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری، $35 \frac{kg}{m^3}$ برای سرباره کوره آهن‌گدازی و $8 \frac{kg}{m^3}$ برای خاکستر پوسته برنج می‌باشد. این دو میزان به ترتیب برابر با $7/5$ و $2/1$ جایگزینی سیمان می‌باشند. نتایجی مشابه برای مقاومت فشاری ۹۰ روزه قابل حصول است. در سن ۹۰ روزه تقریباً پوزولان‌ها به مرحله‌ای رسیده‌اند که می‌توانند در افزایش مقاومت مشارکت داشته باشند.



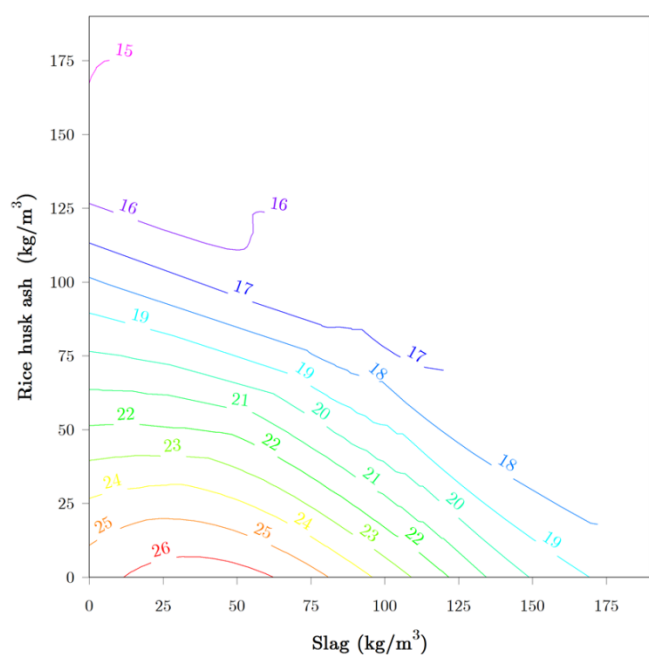
شکل ۱۲- تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه در برابر تغییرات سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر پوسته برنج



شکل ۱۳- تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه در برابر تغییرات میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی



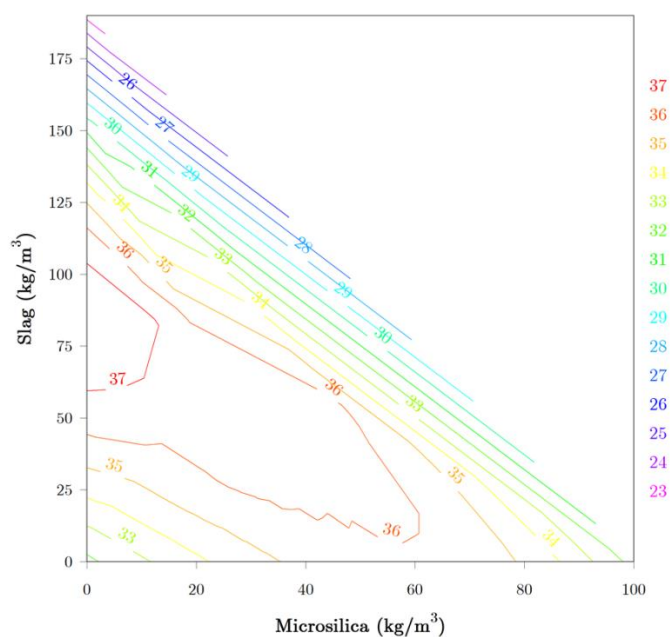
شکل ۱۴- تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه در برابر تغییرات میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج



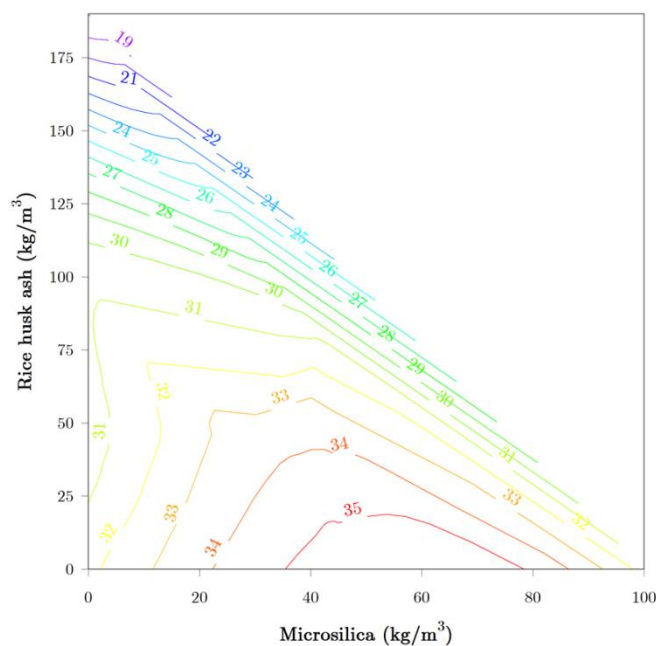
شکل ۱۵- تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه در برابر تغییرات سرباره کوره آهن گدازی و خاکستر پوسته برنج

در شکل ۱۶ تغییرات مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه بتنی حاوی میکروسیلیس و سرباره کوره آهن گدازی آورده شده است. با توجه به شکل می توان گفت با افزایش میکروسیلیس در حضور سرباره کوره آهن گدازی، از مقاومت فشاری نمونه ها کاسته می شود. بیشترین مقاومت متعلق به نمونه هایی است که میزان میکروسیلیس آنها کمتر از ۵٪ جایگزینی سیمان و میزان سرباره کوره آهن گدازی بین ۱۰ تا ۲۰٪ می باشد. تغییرات مقاومت فشاری ۹۰ روزه با تغییر در میزان استفاده از میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج در شکل ۱۷ نشان داده شده است. می توان دید با افزایش میزان پوزولان های مصرفی به تنهایی، از مقاومت فشاری نمونه های بتنی کاسته می شود. با این حال، در صورت استفاده

از هر دو نوع پوزولان، می توان گفت حالت بهینه و بیشترین مقاومت فشاری در ناحیه ای دست می آید که میزان میکروسیلیس مصرفی بین ۷/۵ تا ۱۵٪ و میزان خاکستر نیز بین ۰ تا ۴/۵٪ جایگزینی سیمان باشد.

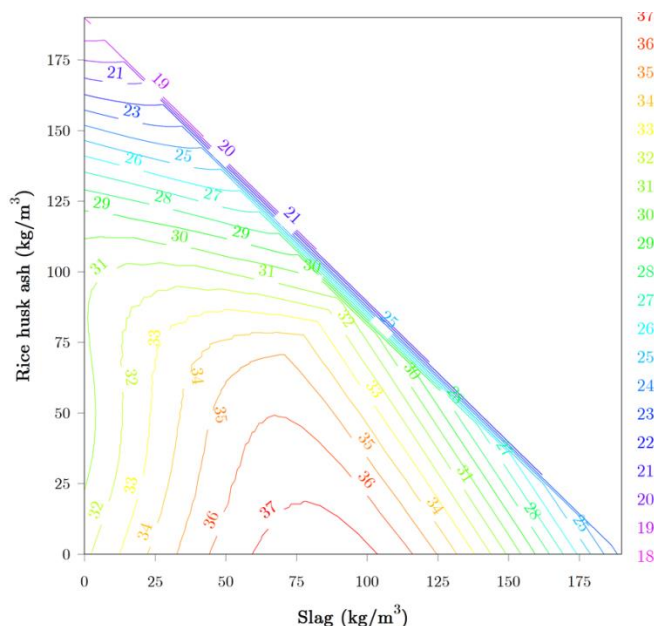


شکل ۱۶- تغییرات مقاومت فشاری ۹۰ روزه در برابر تغییرات میکروسیلیس و سربراه کوره آهن گدازی



شکل ۱۷- تغییرات مقاومت فشاری ۹۰ روزه در برابر تغییرات میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج

در شکل ۱۸ می توان تاثیر استفاده همزمان از دو پوزولان سربراه کوره آهن گدازی و خاکستر پوسته برنج بر مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه های بتنی را دید. همانطور که مشخص است، میزان بهینه استفاده از این پوزولان ها، بین ۱۳ تا ۲۴٪ وزنی سیمان برای سربراه کوره آهن گدازی و ۰ تا ۴/۵٪ برای خاکستر پوسته برنج می باشد.



شکل ۱۸- تغییرات مقاومت فشاری ۹۰ روزه در برابر تغییرات سرباره کوره آهن گدازی و خاکستر پوسته برنج

۵- تعیین رابطه تجربی و ساده

به دلیل اینکه استفاده از شبکه عصبی علی‌رغم دقت و سرعت قابل قبولش، نیاز به دسترسی به کامپیوتر و امکانات مرتبط دارد، برای بسیاری از مهندسين و تکنسین‌ها قابل استفاده نمی‌باشد. راهکاری که برای حل این معضل ارائه می‌گردد، استفاده از روابط ساده به دست آمده از شبکه عصبی می‌باشد. برای این منظور، نیاز است شبکه با استفاده از تعداد زیادی از داده‌های دیده نشده، تحلیل شده و نتایج آن تعیین گردد. در هر مرحله از تعیین نتایج، یکی از نرون‌های ورودی به عنوان متغیر در نظر گرفته شده و سایر نرون‌ها در محدوده میانه خود قرار می‌گیرند. از میان ۵ ورودی موجود برای شبکه عصبی، یکی از ورودی‌ها که مربوط به سن بود، به صورت ثابت در نظر گرفته شد تا بتوان تنها رابطه‌ای برای تعیین مقاومت نمونه‌های با سن ۲۸ روزه تعیین گردد. از طرف دیگر، به دلیل آنکه میزان سیمان به عنوان موثرترین عامل در تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی پوزولان تعیین گردید (شکل ۹)، سیمان به صورت عامل موثر تعیین شده و رابطه‌ای برای تعیین تغییرات مقاومت فشاری با تغییر در میزان سیمان به دست آمد. از طرف دیگر، سه نرون ورودی دیگر که شامل میکروسیلیس، سرباره کوره آهن‌گدازه و خاکستر پوسته برنج بود به صورت ضرایبی تصحیحی مقاومت فشاری بتن را اصلاح می‌کردند. بعبارت دیگر، مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه حاوی هر نوع ترکیبی از پوزولان‌های میکروسیلیس، سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر پوسته برنج از دسته رابطه ۱ تعیین می‌گردد.

$$f_c = C \times S \times G \times R$$

$$C = -90.85 \left(\frac{c}{360}\right)^3 + 249.4 \left(\frac{c}{360}\right)^2 - 212 \left(\frac{c}{360}\right) + 77.41$$

$$S = -0.001761 \left(\frac{s}{11.25}\right)^2 + 0.01308 \left(\frac{s}{11.25}\right) + 0.9887 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$G = -0.0238 \left(\frac{g}{11.25}\right) + 1.024$$

$$R = -0.1139 \left(\frac{r}{15.75}\right) + 1.114$$

مقادیر c، s، g و r به ترتیب میزان سیمان، میکروسیلیس، سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر پوسته برنج بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. در شکل ۱۹ نحوه پیش‌بینی مقادیر مقاومت فشاری ۲۸ روزه توسط شبکه عصبی و فرمول پیشنهادی آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود شبکه عصبی به خوبی قادر به پیش‌بینی نتایج بوده و رابطه پیشنهادی نیز می‌تواند با دقت مناسبی بدون نیاز به وجود شبکه عصبی و با محاسبات ساده ریاضی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی حاوی سه نوع پوزولان میکروسیلیس، سرباره کوره

آهنگدازی و خاکستر پوسته برنج را تخمین بزند. میزان RMSE شبکه عصبی و رابطه پیشنهادی به ترتیب ۲/۵ و ۴/۵ مگاپاسکال بود. در شکل ۲۰ مقاومت‌های فشاری ۲۸ روزه به دست آمده از شبکه عصبی و رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق مناسبی بین نتایج وجود داشته و می‌توان از رابطه پیشنهادی برای دستیابی به مقاومت ۲۸ روزه بتن با عیار ۴۵۰ و حاوی پوزولان‌های میکروسیلیس، سرباره کوره آهنگدازی و خاکستر پوسته برنج استفاده کرد.

۶- نتیجه گیری

- ۱- استفاده از میکروسیلیس تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری ۷ روزه بتن ندارد. بیشترین تغییر مشاهده شده مربوط به نمونه S5 با ۱۱٪ اختلاف می‌باشد. دلیل عدم تاثیر پوزولان‌ها در سنین اولیه را می‌توان به زمانبر بودن فرآیند هیدراتاسیون نسبت داد. با این حال و به طور کلی در تمامی نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، مقاومت فشاری ۷ روزه به مقدار ناچیزی از مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه شاهد کمتر است.
- ۲- با افزایش سن، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. بعلاوه، تاثیر میکروسیلیس استفاده شده نیز در این زمان بیشتر بوده و می‌توان گفت با افزایش زمان، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی میکروسیلیس بیشتر نیز خواهد شد. بیشترین میزان افزایش متعلق به نمونه S10 با ۴۴/۷٪ افزایش نسبت به نمونه مرجع می‌باشد. از طرفی تمامی نمونه‌های ساخته شده دارای مقاومت فشاری بیشتری در قیاس با نمونه شاهد هستند. میانگین افزایش مقاومت فشاری ۹۰ روزه نسبت به نمونه شاهد برابر ۳۴٪ می‌باشد که نشان از عملکرد مطلوب میکروسیلیس در بهبود مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های ساخته شده با این پوزولان دارد.
- ۳- سرباره کوره آهنگدازی در سنین اولیه تاثیری اندکی بر مقاومت فشاری استوانه‌ای نمونه‌های بتنی می‌گذارد؛ در برخی نمونه‌ها نیز مانند G40 نه تنها تاثیر مثبت نداشته بلکه موجب کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه بتنی نیز شده است. دلیل این امر را می‌توان به کلوخه شدن ذرات سرباره کوره آهنگدازی در مخلوط کن و عدم کارایی فوق روان کننده به دلیل حجم زیاد مصالح مصرفی نسبت داد. همین امر موجب کاهش چشمگیر مقاومت فشاری در نسبت‌های بالای سرباره می‌شود.
- ۴- با افزایش سن، تاثیر سرباره کوره آهنگدازی در پر کردن منافذ موئینه و همچنین افزایش مقاومت و بهبود ریزساختار ناحیه انتقال چشمگیر شده و موجب می‌شود مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای در سنین بالاتر، افزایش یابد. این افزایش مقاومت فشاری در سن ۹۰ روزه به طور میانگین ۱۶/۷٪ می‌باشد. بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه متعلق به نمونه G20 با افزایش مقاومتی به ترتیب برابر با ۲ و ۳۱/۸٪ نسبت به نمونه شاهد می‌باشد.
- ۵- تاثیر استفاده از پوزولان‌ها به صورت ترکیبی در بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مثبت بوده و تنها در سنین اولیه موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شود. به استثنای نمونه‌های حاوی مقادیر کم پوزولان، سایر نمونه‌های ساخته شده موجب افت مقاومت فشاری در سنین اولیه می‌شوند. احتمال کلوخه شدن پوزولان‌ها می‌تواند عاملی مهم در افت مقاومت ناشی از استفاده زیاد از آنها باشد. نمونه‌های S2.5G2.5 و S5G5 به ترتیب با ۱۲/۶ و ۱۹٪ افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونه کنترلی تاثیری مثبت از خود به جای گذاشتند.
- ۶- تاثیر استفاده از پوزولان‌های ترکیبی در بهبود خصوصیات مکانیکی بتن در سنین بالاتر مشهودتر بود. می‌توان گفت موثرترین ترکیب در افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها، نمونه S5G5 با افزایش ۳۵٪ مقاومت فشاری می‌باشد. این میزان از ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱۰٪ سرباره به تنهایی به ترتیب به میزان ۳۶ و ۷۴٪ بیشتر است. دلیل این امر را می‌توان به استفاده همزمان از قابلیت پوزولانی و همچنین پراکنندگی منافذ، در صورت استفاده ترکیبی از پوزولان‌ها نسبت داد.
- ۷- بر خلاف نمونه‌های ۹۰ روزه بتنی حاوی پوزولان‌های تکی، در نمونه‌های حاوی پوزولان‌های ترکیبی افزایش سن تاثیری در بهبود نتایج نداشت. به طور کلی تغییرات مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های حاوی پوزولان ترکیبی نسبت به نمونه شاهد به طور میانگین، ۱۳/۸ درصد افزایش می‌باشد. این مقدار برای مقاومت‌های ۲۸ روزه و ۷ روزه به ترتیب ۱۱/۶ درصد افزایش و ۷/۷ درصد کاهش می‌باشد.
- ۸- در تمامی سنین تاثیر استفاده ترکیبی از پوزولان‌ها موثرتر بوده به شرطی که میزان پوزولان از ۲۰٪ جایگزینی سیمان بیشتر نشود. در این صورت استفاده از پوزولان‌های ترکیبی با درصدهای بیشتر اثری سوء بر مقاومت فشاری خواهد داشت. میکروسیلیس نیز تاثیری

چشمگیرتر از سرباره کوره آهن‌گدازی از خود نشان داد که موجب می‌شود استفاده از آن در بهبود خصوصیات مکانیکی بتن های پوزولانی افزایش یابد.

۹- خاکستر پوسته برنج در سنین اولیه تاثیری مثبت بر مقاومت فشاری استوانه‌های نمونه‌های بتنی نمی‌گذارد؛ با این حال، با افزایش سن، تاثیر خاکستر پوسته برنج در پر کردن منافذ موئینه و همچنین افزایش مقاومت و بهبود ریزساختار ناحیه انتقال چشمگیر شده و موجب می‌شود مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای در سنین بالاتر، افزایش یابد. این افزایش مقاومت فشاری در سن ۹۰ روزه به طور میانگین ۵/۷٪ می‌باشد. بیشترین مقاومت ۹۰ روزه متعلق به نمونه R10 با افزایش مقاومتی برابر با ۲۲/۵٪ نسبت به نمونه شاهد می‌باشد.

۱۰- تاثیر استفاده از پوزولان‌ها به صورت ترکیبی در بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مثبت بوده و تنها در سنین اولیه موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شود. به استثنای نمونه‌های حاوی مقادیر کم پوزولان، سایر نمونه‌های ساخته شده موجب افت مقاومت فشاری در سنین اولیه می‌شوند. احتمال کلوخه شدن پوزولان‌ها می‌تواند عاملی مهم در افت مقاومت ناشی از استفاده زیاد از آنها باشد. نمونه‌های S2.5R2.5 و S5R5 به ترتیب با ۰/۸ و ۱۲/۶٪ افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونه کنترلی تاثیری مثبت از خود به جای گذاشتند.

۱۱- تاثیر استفاده از پوزولان‌های ترکیبی در بهبود خصوصیات مکانیکی بتن در سنین بالاتر مشهودتر بود. می‌توان گفت موثرترین ترکیب استفاده شده در افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها، نمونه S5R5 با افزایش ۱۷/۷٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان به استفاده همزمان از قابلیت پوزولانی و همچنین پرکنندگی منافذ، در صورت استفاده ترکیبی از پوزولان‌ها نسبت داد.

۱۲- بر خلاف نمونه‌های ۹۰ روزه بتنی حاوی پوزولان‌های تکی، در نمونه‌های حاوی پوزولان‌های ترکیبی افزایش سن تاثیری در بهبود نتایج نداشت. به طور کلی تغییرات مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های حاوی پوزولان ترکیبی نسبت به نمونه شاهد به طور میانگین، ۸/۱ درصد افزایش می‌باشد. این مقدار برای مقاومت های ۲۸ روزه و ۷ روزه به ترتیب ۶/۲٪ افزایش و ۱۱/۵٪ کاهش می‌باشد.

۱۳- شبکه عصبی مصنوعی پیشنهادی در این تحقیق با دقت قابل قبولی ($R^2=0.95$) توانست مقاومت های فشاری بتن حاوی ترکیبات مختلف پوزولان را تخمین بزند. در این شبکه، میزان سیمان، پوزولان‌ها و سن نمونه های بتنی به عنوان متغیر و مقاومت فشاری استوانه‌ای به عنوان خروجی در نظر گرفته شد. از نتایج حاصل از شبکه می‌توان به منظور دستیابی به طرح بهینه استفاده کرد.

مراجع

- [1] Youm, K. S., Moon, J., Cho, J. Y., & Kim, J. J. (2016). Experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume. *Construction and Building Materials*, 114, 517-527.
- [2] Ajay, V., Rajeev, C., & Yadav, R. K. (2012). Effect of micro silica on the strength of concrete with ordinary Portland cement. *Res J Eng Sci ISSN*, 2278, 9472.
- [3] Esmailpour, M., Rahmani, K., & Piroti, S. (2018). Experimental Evaluation of the Effect of Silica Fume on Compressive, Tensile Strength, Abrasion Resistance, Slump and Impact Test and Water Permeability Coefficient of Concrete. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 8(1), 27-36.
- [4] Ahmad, S., Mohaisen, K. O., Adekunle, S. K., Al-Dulaijan, S. U., & Maslehuddin, M. (2019). Influence of admixing natural pozzolan as partial replacement of cement and microsilica in UHPC mixtures. *Construction and Building Materials*, 198, 437-444.
- [5] Liu, J., Qin, Q., & Yu, Q. (2020). The effect of size distribution of slag particles obtained in dry granulation on blast furnace slag cement strength. *Powder Technology*, 362, 32-36.
- [6] Parron-Rubio, M. E., Perez-García, F., Gonzalez-Herrera, A., & Rubio-Cintas, M. D. (2018). Concrete properties comparison when substituting a 25% cement with slag from different provenances. *Materials*, 11(6), 1029.
- [7] Han, F., & Zhang, Z. (2018). Properties of 5-year-old concrete containing steel slag powder. *Powder Technology*, 334, 27-35.
- [8] Ramezani pour, A. A., Mahdikhani, M., & Ahmadibeni, G. H. (2009). The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes.
- [9] Kondraivendhan, B. (2013). Strength and flow behavior of rice husk ash blended cement paste and mortar. *ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BHRC)*, 14(3), 405-416.
- [10] Zareei, S. A., Ameri, F., Dorostkar, F., & Ahmadi, M. (2017). Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties. *Case studies in construction materials*, 7, 73-81.
- [11] Collins, F., & Sanjayan, J. G. (1999). Effects of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder. *Cement and concrete research*, 29(3), 459-462.

- [12] Ahsan, M. B., & Hossain, Z. (2018). Supplemental use of rice husk ash (RHA) as a cementitious material in concrete industry. *Construction and Building Materials*, 178, 1-9.
- [13] Padhi, R. S., Patra, R. K., Mukharjee, B. B., & Dey, T. (2018). Influence of incorporation of rice husk ash and coarse recycled concrete aggregates on properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 173, 289-297.
- [14] Ramezani-pour, A. (2020). Effect of micro silica and slag on the durability properties of mortars against accelerated carbonation and chloride ions attack. *Civil engineering*, 4(4), 2-2.
- [15] Roshani, M. M., Kargar, S. H., Farhangi, V., & Karakouzian, M. (2021). Predicting the effect of fly ash on concrete's mechanical properties by ann. *Sustainability*, 13(3), 1469.
- [16] Feng, D. C., Liu, Z. T., Wang, X. D., Chen, Y., Chang, J. Q., Wei, D. F., & Jiang, Z. M. (2020). Machine learning-based compressive strength prediction for concrete: An adaptive boosting approach. *Construction and Building Materials*, 230, 117000.
- [17] ASTM C989, "Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars", ASTM, 2004.
- [18] Saha, A. K. (2018). Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable environment research*, 28(1), 25-31.