



# Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



## Mechanical and Economical Optimization of High-Strength Concrete Containing Zeolite and Nanosilica

Amin Lotfi Eghlim<sup>1</sup>, Mohammad Saeed Karimi<sup>2\*</sup>, Mohammad Kazem Sharbatdar<sup>3</sup>

1- PhD Student in engineering and construction management, Semnan University, Semnan, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- Associate Professor of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

### ABSTRACT

Between various sectors of civil engineering, concrete is one of the most widely used materials in the building industry. The use of pozzolanic materials is one of the solutions for high strength concrete production. High-strength concretes have high compressive strength, high adhesion, very low w/c ratio and permeability and therefore high durability. In this study, zeolite and nanosilica were used as natural and synthetic pozzolans. At first, concrete samples with 20 mixing designs (included water, cement, fine and coarse aggregates, zeolite, nanosilica and super-plasticizer) were designed to achieve the optimal design, and then tests of compressive strength and permeability of high-strength concrete were carried out. In the final step, the values of the mixing plan with the compressive strength results are used as inputs of the neural network. Then, the proposed relationship is optimized using the optimization algorithm from an economic perspective (optimal component value). The addition of zeolite and nanosilica to concrete not only increases resistance, but also decreases the permeability of samples, especially in the long term respect to pilot samples. According to the optimization results, it is observed that cement and nanosilica content has been reduced due to the high cost of production, but increased on zeolite values.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 14 June 2019

**Revise Date:** 01 August 2019

**Accept Date:** 27 August 2019

### Keywords:

High-strength concrete;  
Artificial neural network;  
Genetic algorithm;  
Zeolite;  
Nanosilica

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.190063.1881

\*Corresponding author: Mohammad Saeed Karimi  
Email address: mskarimi@semnan.ac.ir

## بهینه سازی مکانیکی و اقتصادی بتن های پر مقاومت حاوی زئولیت و نانوسیلیس

امین لطفی اقلیم<sup>۱</sup>، محمد سعید کریمی<sup>۲\*</sup>، محمد کاظم شربت دار<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

در بین بخش های مختلف صنعت عمران، بتن یکی از پرمصرف ترین مصالح صنعت به شمار می رود. استفاده از مواد پوزولانی یکی از راهکارهای ساخت بتن با مقاومت بالا می باشد. بتن پر مقاومت دارای مقاومت فشاری، چسبندگی بالا و نسبت آب به سیمان و نفوذپذیری بسیار کم و در نتیجه دوام بسیار زیاد می باشد. در این مطالعه از زئولیت و نانوسیلیس به عنوان پوزولان های طبیعی و مصنوعی بهره گرفته شده است. در ابتدا نمونه های بتنی با ۲۰ طرح اختلاط مدنظر برای دستیابی به طرح بهینه ساخته شده و سپس آزمایش های مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن با مقاومت بالا صورت پذیرفته است. در مرحله نهایی مقادیر طرح اختلاط بتن های ساخته شده با نتایج مقاومت فشاری به عنوان ورودی های شبکه عصبی مورد استفاده گرفته است. سپس رابطه ارائه شده با بهره گیری از الگوریتم بهینه ساز از منظر اقتصادی (مقدار بهینه اجزای تشکیل دهنده) بهینه سازی شده است. افزودن زئولیت و نانوسیلیس به بتن موجب افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری نمونه ها به ویژه در بلندمدت نسبت به نمونه های مرجع شده است. با توجه به نتایج ارائه شده مشاهده می گردد که مقادیر سیمان و نانوسیلیس به دلیل هزینه بالای تهیه کاهش یافته اما بر مقادیر زئولیت افزوده شده است.

کلمات کلیدی: بتن پر مقاومت، هوش مصنوعی، الگوریتم ژنتیک، زئولیت، نانوسیلیس

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.190063.1881	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.190063.1881	۱۴۰۰/۰۱/۳۰	۱۳۹۸/۰۶/۰۵	۱۳۹۸/۰۶/۰۵	۱۳۹۸/۰۵/۱۰	۱۳۹۸/۰۳/۲۴
محمد سعید کریمی mskarimi@semnan.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

دستیابی به خواص ایده آل بتن و ارتقاء پارامترهای فیزیکی و مکانیکی آن، سبب شده است تا امروزه پوزولان‌ها جایگاه ثابتی در میان اجزا تشکیل‌دهنده بتن پیدا کنند. ضرورت استفاده بهینه از سیمان در بتن و افزایش دوام آن از اهمیت خاصی در خصوص کاهش آلودگی محیط‌زیست و مصرف بهینه انرژی برخوردار می‌باشد چرا که در فرآیند تولید هر تن سیمان، حدود یک تن گاز کربن‌دار وارد محیط‌زیست شده و بیش از ۱۲۵ لیتر سوخت فسیلی (مازوت و یا گاز طبیعی) در کنار ۱۱۰ کیلووات ساعت برق مصرف می‌شود. بنابراین استفاده از پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی در سیمان، علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، به داشتن محیط‌زیست سالم نیز کمک می‌نماید. از این رو ضرورت استفاده از سیمان‌های پوزولانی کاملاً آشکار می‌گردد. با پیشرفت فناوری و اقتصادی بودن ساختمان‌های بتنی و استفاده از بتن در کارهای جانبی، روز به روز استفاده از بتن افزایش می‌یابد، که با توجه به خواص مطلوب افزودنی‌ها در زمینه مقاومت، سختی، روانی، ریبولوژی، نفوذپذیری، پدیده آب انداختگی و... دارند. در واقع می‌توان گفت بتن یکی از پراستفاده‌ترین مصالح ساختمانی در پروژه‌های عمرانی می‌باشد [۱].

در بتن موادی چون سیمان، آب، شن و ماسه وجود دارد. باین وجود، پیش‌بینی خواص بتن با استفاده از روش‌های تحلیلی و دقیق قابل بررسی نمی‌باشد. اما نکته قابل توجه در این‌گونه طراحی‌ها این است که هر یک از مواد تشکیل‌دهنده بتن به صورت یک پارامتر در نظر گرفته می‌شود. حال آنکه هر یک از این مواد دارای ابعاد گوناگونی می‌باشند به طور مثال، سیمان‌ها دارای مقاومت، نرمی و ترکیبات شیمیایی متفاوتی هستند و ریزدانه‌ها دارای اندازه‌های مختلف و جنس‌های متفاوتی هستند. درشت‌دانه‌های مصرفی در بتن ممکن است از معادن متفاوتی به دست آمده باشند، همچنین ممکن است شکسته یا طبیعی باشند [۲].

از این رو در سال‌های اخیر، مواد جدید و فن‌آوری‌های ساخت نوینی در بتن به وجود آمده که تعداد پارامترهای مؤثر در طرح اختلاط بتن را تا دو برابر افزایش می‌دهند. لذا تحقیقات زیادی که در طی سالیان انجام شده است نشان می‌دهد، پوزولان‌ها یک گزینه مناسب برای جایگزینی سیمان پرتلند هستند و حتی بسیاری از خواص دوامی بتن را افزایش می‌دهند. به علاوه سبک‌سازی یکی از مباحث نوین در مهندسی عمران و ساختمان می‌باشد به گونه‌ای که موضوع کاهش وزن تمام‌شده سازه با استفاده از فن‌های نوین ساخت، مصالح جدید و بهینه‌سازی روش‌های اجرا انجام می‌پذیرد. با توجه به استفاده گسترده از بتن و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف سیمان، محققان درصدد پژوهش‌های بیشتر در زمینه امکان جایگزینی بخشی از سیمان به وسیله پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی، نانوذرات و غیره و بررسی تأثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی و دوام بتن می‌پردازند [۳].

از آنجاکه علاوه بر پوزولان، ویژگی‌های سایر اجزا تشکیل‌دهنده بتن نیز بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی آن اثرگذار است، مطالعه و بررسی تأثیر متقابل پوزولان‌ها و ویژگی‌های سایر اجزا تشکیل‌دهنده بتن بر خواص آن ضروری است [۴-۱۰]. استفاده وسیع از پوزولان‌های مصنوعی به عنوان جایگزین سیمان در کاربردهای مختلف، به دلیل صرفه اقتصادی، کاهش حرارت‌زایی بتن، کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت شیمیایی می‌باشد. هرچند ممکن است کاهش مقاومت در سنین اولیه را در پی داشته باشد [۱۱]. در این راستا مطالعاتی در زمینه تأثیر افزودنی‌های شیمیایی بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن صورت گرفته است. با مقایسه مقاومت فشاری بتن حاوی نانوسیلیس و خمیر سیمان حاوی نانوسیلیس دریافتند که استفاده از نانوسیلیس باعث بهبود مقاومت پیوستگی بین سنگ‌دانه و خمیر سیمان شده و علاوه بر افزایش مقاومت خمیر، از طریق بهبود کیفیت اتصال بین خمیر و سنگ‌دانه باعث افزایش مقاومت بتن می‌شود [۱۲]. برخی محققان دریافته‌اند که نانوسیلیس، مقاومت بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روز را بهبود می‌بخشد. اثر عمده این ماده در مقاومت فشاری، بین ۳ تا ۲۸ روز اتفاق می‌افتد [۱۳-۱۵]. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیلیس در بتن، سبب کاهش ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی و کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود [۱۶]. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، با افزایش ۵ درصد وزنی نانوسیلیس تا ۲۰ درصد وزنی سیمان به صورت جایگزین در نمونه‌های ساخته‌شده از بتن خودمترکم و بررسی مقاومت آن‌ها دریافتند که با افزایش درصد نانوسیلیس، پارامترهای مقاومتی و مدول ارتجاعی بتن مذکور به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد [۱۷].

توف‌های ژئولیتی از زمان روم باستان، در ترکیب با آهک مورد استفاده قرار می‌گرفتند. ژئولیت‌ها کانی‌های آلومینوسیلیکاتی هستند که با داشتن ساختار قفسه مانند، دارای سطح مخصوص (داخلی و خارجی) بزرگی هستند. سطح مخصوص زیاد، اساس واکنش‌پذیری قابل

توجه می‌باشد. فرمول شیمیایی زئولیت در حالت کلی به صورت  $M_{x/n}^n Si_{1-x} Al_x O_2 \cdot yH_2O$  می‌باشد که در آن M نوع کانی‌های قلیایی و قلیایی خاکی با ظرفیت n است و x و y ضرایبی متغیر با مقادیری به ترتیب 2 تا 10 و 2 تا 7 می‌باشند [۱۸]. در پژوهشی چگونگی و امکان‌سنجی استفاده از زئولیت بر بتن‌های ساخته شده و تأثیر این ماده بر مشخصات مکانیکی و فیزیکی بحث شده است. تحقیقات روی خواص زئولیت بر بتن نشان می‌دهد که این ماده می‌تواند از آب انداختگی و جداشدگی بتن تازه جلوگیری کند و واکنش قلیایی سنگ‌دانه‌ها را افزایش داده و سبب افزایش مقاومت بتن شود. فرآیند پمپاژ را آسان‌تر کند، نفوذپذیری بتن سخت شده را کاهش دهد، پایداری بتن را خصوصاً مقاومت در برابر واکنش قلیایی سنگ‌دانه‌ها را افزایش دهد و سبب افزایش مقاومت بتن شود [۱۹].

در طی دو دهه گذشته، روش مدل‌سازی متفاوت بر اساس هوش مصنوعی مورد توجه واقع شده است و توسط بسیاری از محققین برای انواع برنامه‌های کاربردی مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. هوش‌های مصنوعی دسته‌ای از راه‌حل‌های موزی هستند که از طریق همکاری عناصر محاسباتی بسیار متصل، اما ساده (یا نوروون‌های مصنوعی)، مسائل پیچیده را حل می‌کنند. اساساً پردازش عناصر یک شبکه عصبی شبیه نوروون مغز است که شامل بسیاری از عناصر محاسباتی ساده مرتب‌شده در لایه‌ها می‌شوند [۲۰]. استراتژی پایه برای ایجاد یک مدل مبتنی بر شبکه عصبی برای رفتار مواد، آموزش دادن یک شبکه عصبی به نتایج یک سری آزمایش با استفاده از این مواد است. اگر نتایج تجربی حاوی اطلاعات مربوط به رفتار مواد باشد، پس شبکه عصبی آموزش‌دیده، اطلاعات کافی در مورد رفتار مواد را به‌عنوان یک مدل مبنی بر مواد تعریف می‌کند. چنین شبکه عصبی آموزش‌دیده نه تنها توانایی تولید نتایج تجربی را دارد، بلکه قادر خواهد بود نتایج را در آزمایش‌های دیگر نیز از طریق توان عمومی آن تقریب کند [۲۱].

تخمین رفتار بتن و تعیین بهینه مقدار مصرف افزودنی‌ها در بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بدین منظور از روش‌هایی بر پایه هوش مصنوعی به‌منظور یادگیری و پیش‌بینی و از الگوریتم‌های فراابتکاری به جهت بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر استفاده می‌شود [۲۲-۲۴]. عموماً این مدل‌ها مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی هستند و می‌توان گفت مهم‌ترین دلیل کارایی آن‌ها قابلیت آموزش‌پذیری آن‌ها از روی الگوهای آموزشی (ورودی‌ها و خروجی‌های متناسب) با استفاده از الگوریتم‌های مختلف آموزش است که بر این اساس رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی را شناسایی می‌کند. برای مدل‌سازی اسلامپ و مقاومت فشاری بتن توانمند از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه [۲۵]، برای تخمین مقاومت فشاری بتن از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) [۲۶] و به‌منظور بررسی تأثیر سایز و شکل نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر بادی بر روی مقاومت فشاری از الگوریتم ژنتیک [۲۷] استفاده شده است.

این مطالعه با هدف بهینه‌سازی بتن‌های حاوی افزودنی‌های نانوسیلیس و زئولیت مبتنی بر تحلیل‌های هوش مصنوعی و روش‌های فراابتکاری بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی می‌باشد. بدین صورت که در ابتدا نمونه‌های بتنی با ۲۰ طرح اختلاط مدنظر (دو مخلوط یک جزئی شاهد (حاوی سیمان پرتلند) ۴ مخلوط دوجزئی (سیمان پرتلند و نانوسیلیس)، ۶ مخلوط دو جزئی (سیمان پرتلند و زئولیت) و ۸ مخلوط سه جزئی (شامل سیمان پرتلند، نانوسیلیس و زئولیت)) برای دستیابی به طرح بهینه ساخته شده است. سپس آزمایش‌های مقاومت فشاری و نفوذپذیری در جهت بهبود پارامترهای شرکت‌کننده در طرح اختلاط بتن با مقاومت بالا - بر اساس تعریف موسسه بتن آمریکا ACI-363R-92، بتن با مقاومت بالا بتنی است که دارای مقاومت فشاری بالاتر از ۴۲ مگاپاسکال برای بتن ساخته شده باشد [۲۸]- صورت پذیرفته است. در محله نهایی مقادیر نسبت آب به سیمان، نانوسیلیس، زئولیت، ریزدانه و مقدار سیمان به‌عنوان ورودی‌های شبکه عصبی مورد استفاده گرفته و با نتایج حاصل از طرح‌های اختلاط به شبکه وارد می‌گردد تا یک طرح بهینه استخراج گردد. سپس رابطه ارائه شده با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌ساز از منظر اقتصادی (مقدار بهینه اجزای تشکیل‌دهنده) بهینه‌سازی شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

تحقیق و بررسی پیرامون کاربرد بتن به‌عنوان مصالح عمرانی و نحوه تهیه آن در شرایط آب‌وهوایی مختلف و همچنین چگونگی استفاده از این ماده در بخش‌های مختلف عمرانی و مصرف روزافزون آن از اهمیت بالایی برخوردار است. فناوری مربوط به آزمایش‌های گوناگون برای پی بردن به مشخصات مختلف بتن در هنگام تهیه و پس از کاربری و زیر بار قرار گرفتن، همچنان در حال پیشرفت است.

مقاومت فشاری بتن به عنوان یکی از مهم ترین خواص بتن در نظر گرفته می شود و معمولاً شمای کلی از کیفیت بتن را به دست می دهد. علت این امر آن است که مقاومت، مستقیماً به ساختمان خمیر سیمان بستگی دارد. به دلیل سهولت در انجام آزمایش مقاومت فشاری و با توجه به اینکه بسیاری از خواص مطلوب بتن نظیر مدول ارتجاعی، مقاومت در برابر سایش و سایر مشخصات بتن، مرتبط به مقاومت آن می باشد، لذا رایج ترین آزمایش برای بتن سخت شده به حساب می آید. در این پژوهش به منظور انجام آزمایش مقاومت فشاری، نمونه ها در قالب های پلاستیکی به ابعاد ۱۵۰ میلی متر ریخته شدند. قالب ها باید با شکل و ابعاد تعیین شده و مسطح بودن با رواداری های کمی منطبق باشند. بهتر است قالب ها از نظر نشت و جلوگیری از نشست متعاقب کنترل گردند.

آزمایش فشار در واقع سیستم پیچیده ای از توزیع تنش در نمونه را ایجاد می کند. در سطوح انتهایی نمونه بتنی و صفحات فولادی دستگاه آزمایش، نیروهای جانبی در اثر تمایل بتن به انبساط جانبی (اثر پواسون) و مقید بودن آن توسط صفحات فولادی که دارای سختی به مراتب بیشتر و انبساط حجمی خیلی کمتری است، به وجود می آیند.

بتن بهترین نمونه برای توصیف یک ماده نفوذپذیر و متخلخل است. نفوذپذیری بتن نیز بیانی از چگونگی ارتباط میان منافذ می باشد. تخلخل و نفوذپذیری بتن به کمک یکدیگر اجازه تشکیل مسیری برای انتقال آب به درون ماده را همراه با ایجاد شکافی که هنگام انقباض به وجود می آید، می دهد. نفوذپذیری آب در یک ترکیب بتنی، شاخص خوبی برای سنجش پایایی بتن است. به این ترتیب در بسیاری از منابع معتبر نفوذپذیری بتن به عنوان کلید پایائی بتن قلمداد شده است [۲۹]. به منظور بررسی و پایایی بتن در مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان، ۳ آزمایش و محدوده مجاز نتایج هر کدام ارائه شده است که در مطالعه حاضر نیز از نمونه ای از این آزمایش ها بهره گرفته شده است.

## ۲-۱- مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده در این مطالعه، شامل سیمان پرتلند تپ ۲ صوفیان، نانوسیلیس، زئولیت، مصالح سنگی و آب می باشد که خصوصیات آن ها به شرح در ادامه آورده شده است.

### ۲-۱-۱- سیمان

سیمان هایی که در کلیه آزمایش ها مورد استفاده قرار گرفته است، سیمان های پرتلند تپ ۲ صوفیان و از نوع کیسه ای می باشند. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ و ۲ آورده شده است.

### ۲-۱-۲- مصالح سنگی

مصالح سنگی اگرچه به عنوان مواد بی اثر در بتن در نظر گرفته می شوند ولی بین ۶۰ تا ۸۵ درصد از حجم بتن را تشکیل می دهند. خصوصیات مصالح سنگی اثرات مهمی در تعیین نسبت اختلاط اجزا و قیمت تمام شده بتن دارد. مصالح سنگی مصرف شده در این مطالعه به طور مشروح ذکر شده است.

### ۲-۱-۲-۱- شن

مصالح سنگی که در این مطالعه به عنوان شن مورد استفاده قرار گرفته است، شامل شن های ریز و درشت کارخانه شن آویز نمین می باشد که بعد از دانه بندی و مورد قبول بودن آن (عدم وجود ناخالصی های آلی، پوشش رسی، ذرات گرد و خاک و ...) در محل آزمایشگاه دپو گردیده و در تمامی آزمایش ها از آن ها استفاده شده است. نمودار دانه بندی شن بادامی و نخودی به ترتیب در شکل های ۱ و ۲ نمایش داده شده است.

### ۲-۱-۲-۲- ماسه

مصالحی که به عنوان ریزدانه مورد استفاده قرار گرفته است، ماسه کارخانه شن آویز نمین بوده که مشخصات دانه بندی آن قابل قبول می باشد. منحنی دانه بندی ماسه مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۳ نمایش داده شده است.

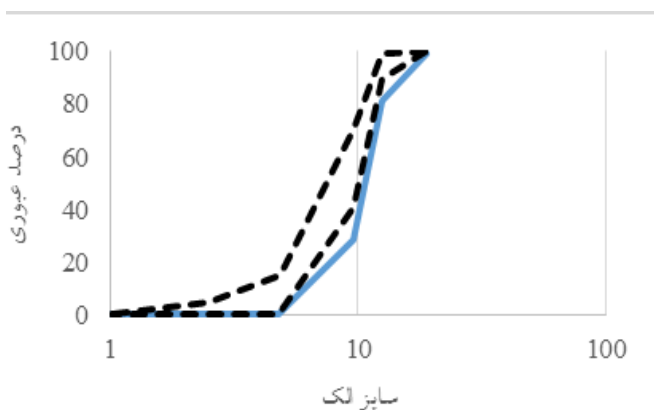
زئولیت مصرفی در ساخت نمونه‌های بتنی در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM C618 [۳۰] می‌باشد که از معدن افتر سمنان و محصول شرکت افرنند توسکا است. خواص فیزیکی و شیمیایی این ماده در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی سیمان تیپ ۲ صوفیان

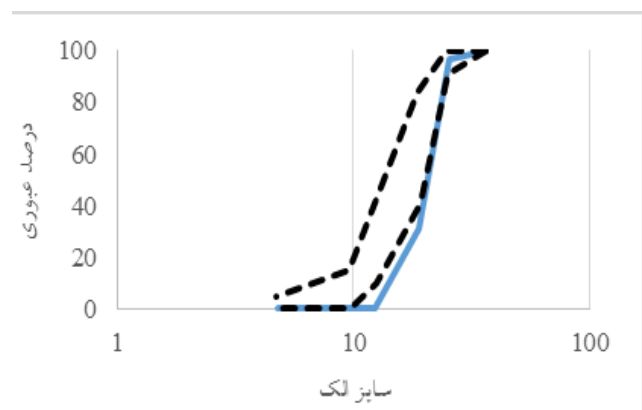
مشخصات	تیپ ۲ صوفیان	حد استاندارد
سطح مخصوص (بلین) $\text{cm}^2/\text{gr}$	۳۰۴۹	حداقل ۲۸۰۰
باقیمانده نامحلول در اسید	۰/۷۱	حداکثر ۰/۷۵
گیرش ابتدایی (دقیقه)	۱۷۸	حداقل ۴۵
گیرش انتهایی (دقیقه)	۲۶۵	حداکثر ۳۶۰
آب مصرفی برای غلظت نرمال	۲۲/۷	-

جدول ۲: مشخصات شیمیایی سیمان صوفیان

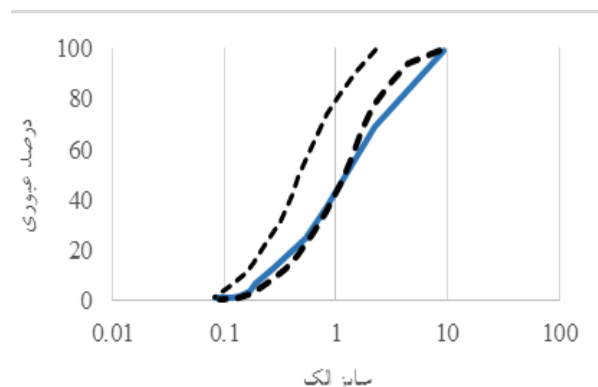
حد استاندارد (%)	درصد اکسیدها		اکسیدهای تشکیل دهنده سیمان
	سیمان تیپ ۲ صوفیان		
حداقل ۲۰	۲۲/۰۵		$\text{SiO}_2$
حداقل ۵۰	۶۴/۵۹		$\text{CaO}$
حداکثر ۶	۵/۰		$\text{Al}_2\text{O}_3$
حداکثر ۶	۳/۷		$\text{Fe}_2\text{O}_3$
حداکثر ۳	۱/۷۳		$\text{SO}_3$



شکل ۲: منحنی دانه‌بندی شن نخودی مورد استفاده همراه با محدوده استاندارد.



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی شن بادامی مورد استفاده همراه با محدوده استاندارد.



شکل ۳: منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده همراه با محدوده استاندارد.

جدول ۳: ترکیبات شیمیایی زئولیت.

Compounds	Results (%)	Compounds	Results (%)	Compounds	Results (%)	Compounds	Results (%)
SiO <sub>2</sub>	70/2	Na <sub>2</sub> O	2/11	BaO	0/09	SO <sub>3</sub>	0/08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11/54	K <sub>2</sub> O	2/09	ZrO <sub>2</sub>	0/02	Cl	0/06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1/15	MgO	1/18	SrO	0/17	L.O.I	9/28
TiO <sub>2</sub>	0/2	MnO	-	Y <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	0/01		
CaO	2/01	ZnO	-	Rb <sub>2</sub> O	0/01		

۲-۱-۴- نانوسیلیس

نانوسیلیس با سطح بالای ریزدانه و به‌ویژه سطح کروی ذرات آن منجر به چسبندگی خوب و بهبود مقاومت در برابر جداسازی می‌شود. این ماده به‌عنوان یکی از متداول‌ترین پوزولان‌های استفاده‌شده در صنعت بتن مطرح می‌باشد. مشخصات نانوسیلیس (شامل نسبت وزنی، خواص فیزیکی و شیمیایی و ...) توأمان با ویژگی‌های سایر اجزای تشکیل‌دهنده بتن (شامل جنس سنگ‌دانه، دانه‌بندی مصالح سنگی، مدول نرمی مصالح سنگی، نسبت آب به سیمان، خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان و ...) بر روند تغییرات پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن، تأثیرگذار است [۳۱].

نانوسیلیس استفاده‌شده در این پژوهش استاندارد ASTM C1240 [۳۲]، تولید کارخانه‌های ازنا با وزن مخصوص Kg/m<sup>3</sup> ۲۱۰۰ و سطح ویژه (بلین) ۲۰/۲ m<sup>2</sup>/gr می‌باشد که به‌صورت درصد‌های مختلفی از وزن سیمان خشک به مخلوط اضافه شده است. خواص شیمیایی نانوسیلیس در جدول ۴ آمده است.

۲-۱-۵- آب مصرفی در بتن

طبق آیین‌نامه بتن ایران، آب مصرفی در ساخت بتن باید تمیز و صاف باشد. به‌طورکلی آب آشامیدنی برای ساختن بتن رضایت‌بخش تلقی می‌شود [۳۳].

جدول ۴: مشخصات شیمیایی نانوسیلیس مورد استفاده.

K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	ترکیب (%)
۰/۵	۱/۵	۰/۹	۱	۹۴	نانوسیلیس

در این تحقیق فاکتورهای زئولیت و نانوسیلیس جایگزین سیمان در نظر گرفته شده است. موارد مورد نظر گرفته‌شده در طرح‌های اختلاط مطابق روش ACI 211.1-91 [۳۴] شامل نسبت آب به سیمان، درصد نانوسیلیس، درصد زئولیت، مقدار سنگ‌دانه درشت و مقدار سنگ‌دانه ریز می‌باشد، که درصد سطوح آن‌ها در جدول ۵ ارائه گردیده است. در این حالت با استفاده از ترکیب فاکتور و سطوح ۲۰ طرح اختلاط مختلف نسبت به یکدیگر در جدول ۶ ارائه می‌گردد که شامل دو طرح بدون وجود نانوسیلیس و زئولیت، چهار طرح تنها با استفاده از نانوسیلیس، شش طرح با استفاده از زئولیت و هشت طرح باوجود زئولیت و نانوسیلیس معرفی شده است که برای هر یک از طرح‌های معرفی شده ۳ نمونه آزمایشگاهی ساخته شده است. نحوه انجام اختلاط بدین‌صورت بوده که ابتدا نیمی از آب با سیمان و یا نانوسیلیس و یا زئولیت (بسته به طرح اختلاط) و سنگ‌دانه‌ها مخلوط شده، سپس باقیمانده آب و فوق روان کننده به آن اضافه، نمونه‌ها در قالب به نحو مناسب ریخته شده و بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا ۲۸ روز به‌صورت استاندارد عمل‌آوری گردیده است.

جدول ۵: مقادیر مورد نظر برای ایجاد طرح‌های اختلاط.

مصالح	۱	۲	۳	۴
سیمان Kg/m <sup>3</sup>	500	500	500	500
نسبت آب به سیمان	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷
نانوسیلیس	۰	۵	۱۰	۱۵
زئولیت	۰	۵	۱۰	۱۵
سنگ‌دانه ریز Kg/m <sup>3</sup>	۷۱۸	۷۱۲	۷۰۵	۶۹۸

جدول ۶: بیست طرح اختلاط ایجادشده.

طرح اختلاط	سیمان Kg/m <sup>3</sup>	نسبت آب به سیمان	نانوسیلیس	زئولیت	سنگدانه ریز Kg/m <sup>3</sup>
۱	۵۰۰	۰/۲۷	۰	۰	۷۱۸
۲	۴۵۰	۰/۲۶	۰	۰	۷۳۰
۳	۵۰۰	۰/۲۷	۵	۰	۷۱۲
۴	۴۸۰	۰/۲۷	۱۰	۰	۷۱۵
۵	۴۷۰	۰/۲۶	۱۵	۰	۷۲۰
۶	۴۶۰	۰/۲۶	۱۵	۰	۷۲۵
۷	۵۰۰	۰/۲۶	۰	۵	۷۲۰
۸	۵۰۰	۰/۲۷	۰	۵	۷۱۵
۹	۴۸۰	۰/۲۶	۰	۱۰	۷۱۵
۱۰	۴۸۰	۰/۲۷	۰	۱۰	۷۱۰
۱۱	۴۷۰	۰/۲۶	۰	۱۵	۷۰۵
۱۲	۴۷۰	۰/۲۷	۰	۱۵	۷۰۰
۱۳	۴۸۰	۰/۲۷	۵	۵	۷۲۰
۱۴	۴۸۰	۰/۲۶	۱۰	۵	۷۰۰
۱۵	۴۷۰	۰/۲۷	۵	۱۰	۷۳۰
۱۶	۴۷۰	۰/۲۶	۱۰	۱۰	۷۲۵
۱۷	۴۶۰	۰/۲۷	۱۵	۵	۷۱۵
۱۸	۴۶۰	۰/۲۶	۵	۱۵	۷۰۵
۱۹	۴۵۰	۰/۲۵	۱۰	۱۵	۷۰۰
۲۰	۴۵۰	۰/۲۶	۱۵	۱۰	۷۰۰

## ۲-۲- شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک

این روش به عنوان یکی از شیوه‌های محاسباتی نوین یادگیری ماشینی، با شبیه‌سازی ساختار بیولوژیکی مغز و سیستم عصبی موجود در بدن انسان، قابلیت تخمین و تقریب را دارا می‌باشد. معمولاً یک شبکه عصبی پرسپترون، از لایه‌های موازی و واحدهای مصنوعی به هم پیوسته توسط پیوندهای وزن دار، تشکیل می‌شود. این مجموعه شامل نورون‌های ورودی، یک یا چند لایه پنهان و لایه خروجی می‌باشد [۳۵]. هر نرون دارای حالتی درونی به نام فعال‌سازی یا سطح فعالیت بوده که تابعی از ورودی‌های دریافتی آن نرون می‌باشد. وزن‌ها، نمایشگر اطلاعات به کاررفته توسط شبکه، جهت حل مسئله می‌باشند. با استفاده از شبکه‌های عصبی پرسپترون می‌توان با انجام فرآیند آموزش شبکه، به ازای ورودی داده شده، خروجی متناظر را اعمال نمود. طی روند آموزش، وزن‌های داخلی شبکه عصبی، روی مقادیر ورودی اعمال شده و تا زمانی که به وضعیت مناسب برسد، تغییر می‌نماید. یکی از متداول‌ترین شیوه‌های آموزش شبکه‌های چندلایه استفاده از شیوه "پس انتشار خطا" می‌باشد. این روش به منظور به حداقل رساندن مجموع مربعات خطای خروجی محاسبه شده توسط شبکه، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۶].

روش برنامه‌ریزی ژنتیک که یکی از جمله روش‌های الگوریتم گردشی محسوب می‌شود، برای اولین بار توسط کوزا [۳۷] ارائه شده است. در الگوریتم یادشده، یک تابع هدف در قالب معیارهای کیفی تعریف شده، سپس تابع مذکور را برای اندازه‌گیری و مقایسه روش‌های مختلف، حل نموده و پس از طی یک فرآیند گام‌به‌گام، پس از تصحیح ساختار داده‌ها در هر مرحله، راه‌حل مناسب ارائه می‌گردد. روش GP توانایی ارائه رابطه‌ای به فرم یک ساختار درختی، به عنوان جواب مسئله را دارا می‌باشد.

فرآیند گام‌به‌گام برنامه‌ریزی ژنتیک در ادامه به‌طور خلاصه بیان گردیده است. در مرحله اول، یک جمعیت اولیه از توابع مرکب نشان‌دهنده مدل‌های پیش‌بینی، به صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شود. به منظور تولید یک جمعیت تصادفی، بایستی به نحوی اقدام به گزینش نمود تا تمامی شاخه‌ها به پایانه‌ها منتهی شود. پس از آن در مرحله دوم، معرفی جمعیت اولیه به رایانه و ارزیابی هر یک از افراد در جمعیت مذکور، با استفاده از توابع برازش انجام می‌گیرد. در مرحله سوم، انتخاب ژن‌های مؤثر به منظور تکثیر، جهش، جفت‌گیری و



تولید مثل افراد جدید یا صفات اصلاح شده صورت می‌پذیرد. در گام چهارم، تولید نسل با اعمال فرآیند توسعه‌ای تکراری به تعداد معین یا تا حصول بهترین پاسخ، روی فرزندان در هر تولید تکرار خواهد شد [۳۸].

از جمله عملیات مورد استفاده در مرحله سوم فرآیند حل مسئله در روش GP، عملیات تلافی و جهش می‌باشد. با در نظر گرفتن حداقل مقادیر پیشنهاد شده برای پارامترهای  $n$  و  $g$ ، فرآیند سعی و خطا در هر مرحله انجام می‌گیرد. به‌طور کلی الگوریتم‌های تکامل‌پذیر، تعداد زیادی از پاسخ‌های قابل قبول را ارائه می‌کنند، اما انتخاب نهایی پاسخ مورد نظر بر عهده کاربر می‌باشد [۳۶].

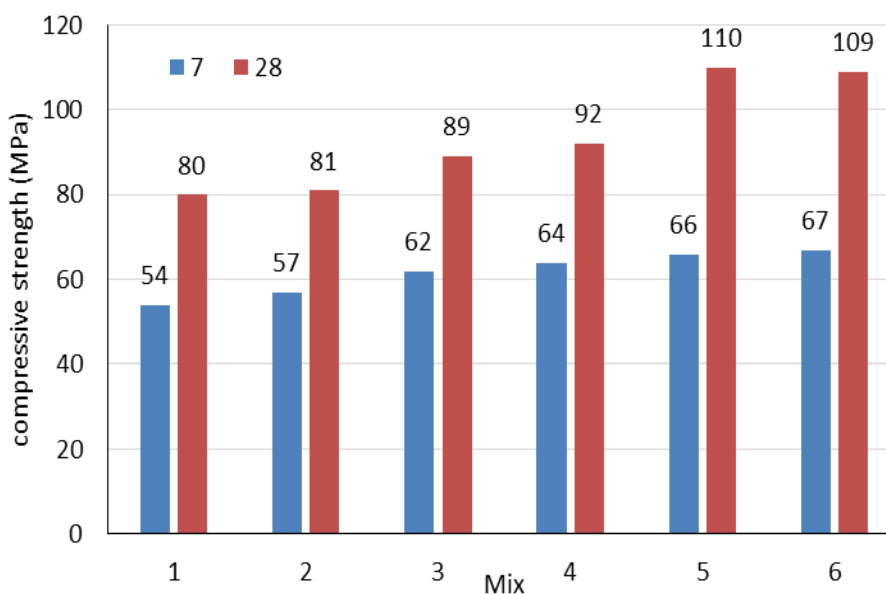
### ۳- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده زئولیت با داشتن مقادیر زیادی  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$  در ترکیب شیمیایی، واکنش‌پذیری پوزولانی بسیار زیادی دارد. این در حالی است که این ماده برخلاف اکثر مواد پوزولانی فازهای شیشه‌ای یا آمورف ندارد بلکه از کریستال‌های بسیار ریزی تشکیل شده است که تنها با میکروسکوپ‌های الکترونیکی قابل شناسایی است. در زئولیت علاوه بر سطح خارجی به واسطه شبکه حفرات داخلی، سطوح داخلی آن نیز برای انجام واکنش در دسترس است. این موضوع نیز یکی از دلایل واکنش‌پذیری زیاد زئولیت است.

### ۳-۱- نتایج مقاومت فشاری

۳-۱-۱- مقاومت فشاری نمونه با نانوسیلیس

در شکل ۴ نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری دو مخلوط بتن شاهد و چهار طرح اختلاط ارائه شده برای بتن با نانوسیلیس آورده شده است. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌گردد که با افزایش مقادیر نانوسیلیس موجود در نمونه بتنی مقدار مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که با جایگزینی ۱۵ درصدی نانوسیلیس، افزایش ۲۰ و ۳۵ درصدی مقاومت فشاری قابل مشاهده است که این اتفاق به دلیل آکندن و پر کردن فضای خالی و تهی و افزایش یکپارچگی مصالح تشکیل دهنده بتن می‌باشد. همچنین از این نمودار مشاهده می‌شود که برای نمونه‌هایی با درصد جایگزینی ۱۵ درصد (نمونه ۵ و ۶) با کاهش سیمان و افزایش ریزدانه، مقاومت فشاری تنها به مقدار ۱ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در جدول ۷ می‌توان درصد تغییر مقاومت فشاری را با توجه به افزایش مقدار نانوسیلیس مشاهده نمود.



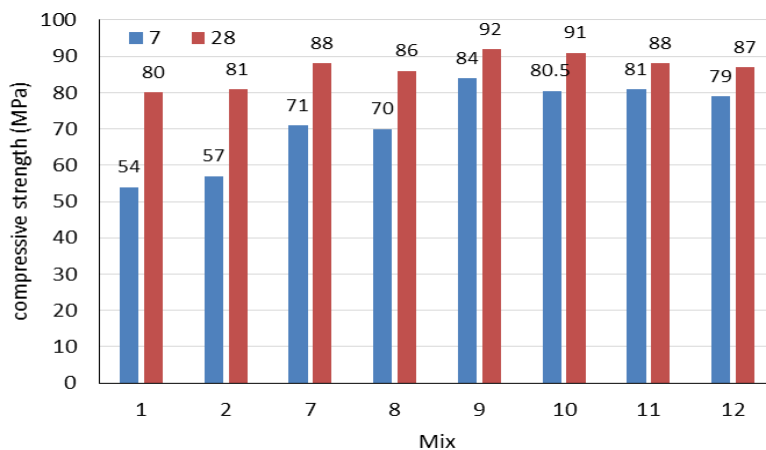
شکل ۴: مقایسه نتایج نمونه بتن با نانوسیلیس.

جدول ۷: درصد تغییرات مقاومت فشاری در نمونه با نانوسیلیس و نمونه عادی.

تعداد روز عمل آوری	طرح ۳	طرح ۴	طرح ۵	طرح ۶
۷ روز	۱۱٪	۱۵٪	۱۹٪	۲۰٪
۲۸ روز	۱۰٪	۱۴٪	۳۶٪	۳۵٪

۳-۱-۲- مقاومت فشاری نمونه با ژئولیت

در شکل ۵ نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری دو مخلوط بتن شاهد و شش طرح اختلاط ارائه شده برای بتن با ژئولیت آورده شده است. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌گردد که با افزایش مقادیر ژئولیت موجود در نمونه در حد ۱۰٪ مقاومت نمونه‌های بتنی با کاهش مواجه می‌گردد. همچنین در بازه ۵٪ الی ۱۰٪، درصد تغییر افزایش مقاومت در روزهای اولیه بیشتر بوده است. دلیل این امر می‌تواند واکنش ژئولیت با هیدروکسید کلسیم باشد چرا که در زمان‌های ابتدایی، این واکنش حجم بالایی داشته و سرعت افزایش مقاومت بیشتر است، ولی در بلندمدت حجم واکنش‌ها کاهش یافته و نرخ افزایش مقاومت کاهش می‌یابد. همچنین جهت بررسی تأثیر مقدار ژئولیت موجود در بتن، درصد تغییر مقاومت فشاری بتن در جدول ۸ آورده شده است. مشاهده می‌گردد که به ازای درصدهای ثابت جایگزینی ژئولیت، با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری نمونه‌ها به دلیل افزایش تخلخل و افزایش حجم حفره‌های بتن ناشی از افزایش آب کاهش می‌یابد.



شکل ۵: مقایسه نتایج نمونه بتن با ژئولیت.

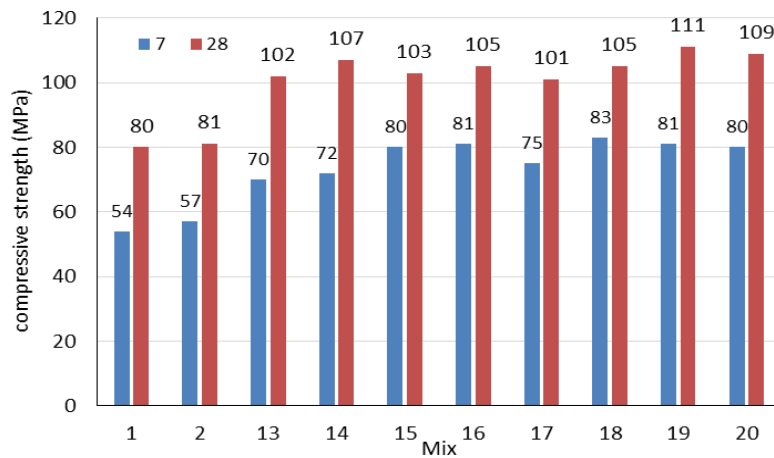
جدول ۸: درصد تغییرات مقاومت فشاری در نمونه با ژئولیت و نمونه عادی.

تعداد روز عمل آوری	طرح ۷	طرح ۸	طرح ۹	طرح ۱۰	طرح ۱۱	طرح ۱۲
۷ روز	۲۸٪	۲۶٪	۵۱٪	۴۵٪	۴۶٪	۴۲٪
۲۸ روز	۹٪	۷٪	۱۴٪	۱۳٪	۹٪	۸٪

۳-۱-۳- مقاومت فشاری نمونه با ترکیب ژئولیت و نانوسیلیس

پس از بررسی نمونه‌های بتنی دارای نانوسیلیس و ژئولیت به صورت مجزا، در این قسمت به بررسی نمونه‌های بتنی که با استفاده از طرح‌های ۱۳ الی ۲۰ ساخته شده‌اند پرداخته می‌شود. در این حالت با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌گردد که در صورت ترکیب هر دو این مواد نه تنها نرخ افزایش مقاومت مخلوط بتن افزایش یافته است بلکه مقاومت نهایی بتن نیز به میزان قابل توجهی افزایش یافته است و به مقدار مقاومت فشاری بالای ۱۰۰ مگاپاسکال رسیده‌اند. دستیابی به این مقدار را می‌توان در مناسب بودن پوزولان‌ها (به دلیل کاهش تخلخل و نفوذپذیری)، نسبت آب به سیمان پایین، درصد هوای یک درصد و وجود فوق روان کننده جستجو کرد. با توجه به شکل ۶ می‌توان این نتیجه را مشاهده نمود که نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط ۱۹ (۱۰ درصد نانوسیلیس - ۱۵ درصد ژئولیت) بهترین نتایج را ارائه نموده‌اند. در این ترکیب مقادیر مقاومت فشاری بتن در سن ۲۸ روزه از افزایش بیشتری نسبت به سایر طرح‌ها برخوردار بوده است. جهت

بررسی دقیق تر نتایج ارائه شده از جدول ۹ جهت بررسی درصد افزایش مقادیر مقاومت فشاری بتن به نسبت نمونه های شاهد مورد بررسی استفاده می گردد.



شکل ۶: مقایسه نتایج نمونه های ترکیبی.

جدول ۹: درصد تغییرات مقاومت فشاری در نمونه های ترکیبی.

تعداد روز عمل آوری	طرح ۱۳	طرح ۱۴	طرح ۱۵	طرح ۱۶	طرح ۱۷	طرح ۱۸	طرح ۱۹	طرح ۲۰
۷ روز	۲۶٪	۲۹٪	۴۴٪	۴۶٪	۳۵٪	۴۹٪	۴۷٪	۴۴٪
۲۸ روز	۲۷٪	۳۳٪	۲۸٪	۳۰٪	۲۵٪	۳۰٪	۳۷٪	۳۵٪

### ۳-۲- آزمایش نفوذپذیری در مقابل آب

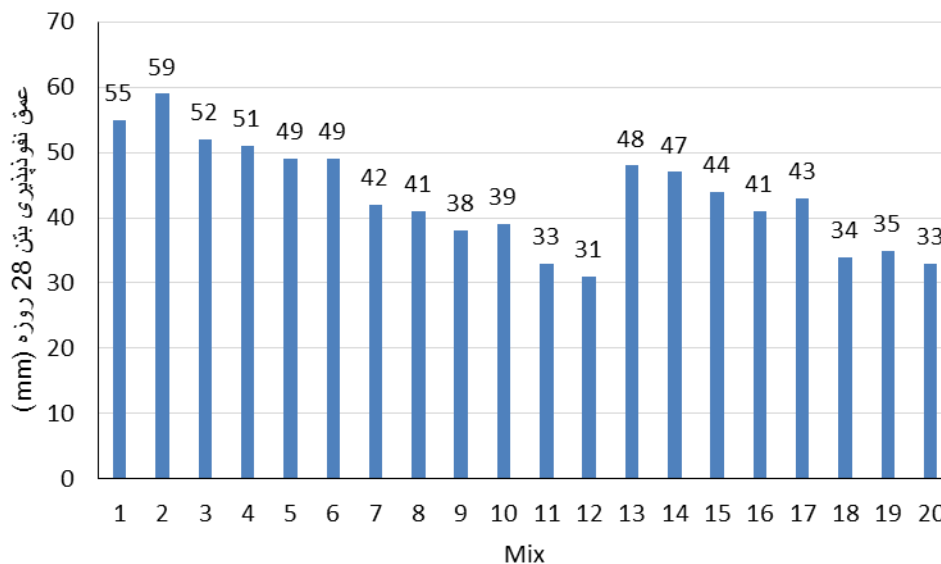
ضریب نفوذپذیری بتن به ماده نفوذی، خصوصیات بتن و سایر شرایط محیطی بستگی دارد. این ضریب می تواند نسبت به موقعیت و زمان، تغییرات ساختار تخلخل (به علت هیدراتاسیون خمیر سیمان) با تغییرات رطوبت خارجی (در نتیجه اشباع بودن تخلخل ها) یا دما، تغییر کند. میزان رطوبت بتن در معرض اتمسفر و تحت شرایط تعادلی و در غیاب رطوبت، مربوط به رطوبت نسبی محیط است. با در نظر گرفتن تخلخل های مویین، آب در ابتدا در سطوح آن ها جذب و سپس با افزایش رطوبت نسبی محیط، آب متراکم می شود و تخلخل ها را پر می کند که از کوچک ترین تخلخل شروع شده و با ابعاد بزرگ تر ادامه می یابد. در طرفی از بتن که در معرض اتمسفر با رطوبت نسبی مشخص قرار دارد، تخلخل هایی که قطر آن ها از یک مقدار مشخص کوچک تر است، با آب پر می شوند، در حالی که تخلخل های بزرگ تر از این مقدار مشخص، با هوا پر می شوند. وجود تخلخل های پر از آب که به هم متصل هستند، تأثیر قابل توجهی روی سینتیک فرآیندهای انتقال دارد. این تخلخل ها، از وقوع فرآیندهایی مثل نفوذ دی اکسید کربن و اکسیژن که در فاز گازی به آسانی اتفاق می افتد، جلوگیری می کنند و از طرف دیگر، فرآیندهایی مثل نفوذ کلریدها یا یون ها را که در محلول اتفاق می افتد آسان تر می کنند.

این آزمایش به این گونه بوده است که مقدار عمق نفوذ آب در بتن ۲۸ روز عمل آوری شده، تحت فشار ۵ بار و مدت ۴ روز محاسبه شده است. نمونه های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتیمتر به صورت شکل ۷ مورد استفاده قرار گرفته است. پس از مدت ۴ روز قرارگیری نمونه ها تحت فشار آب، نمونه ها به صورت قطری توسط جک فشاری شکسته شدند تا عمق نفوذ به دست آید. عمق نفوذ برای هر نمونه به صورت میانگین محاسبه شده است. به ازای هر طرح از ۳ نمونه جهت بررسی دقیق تر نتایج استفاده گردید و نتایج مربوطه بر اساس متوسط نتایج این نمونه ها به دست آمده است. نتایج مربوط به عمق نفوذ طرح ها در نمودار شکل ۸ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که ژئولیت در کاهش عمق نفوذ آب در بتن تأثیر مثبت دارد. این تأثیر مثبت با افزایش مقدار ژئولیت افزایش یافته است. با مقایسه نتایج طرح های حاوی نانوسیلیس و ژئولیت مشخص می گردد که در مقدار جایگزینی برابر با ۵ درصد ژئولیت از نانوسیلیسی بهتر عمل کرده است. همچنین طرح های (۱۹) و (۱۸) تقریباً عملکردی مشابه با طرح (۱۱) داشته اند. نتایج نشان می دهد که ژئولیت با انجام واکنش پوزولانی سبب بهبود

ریز ساختار بتن و در نتیجه کاهش نفوذپذیری می‌گردد. نفوذپذیری بتن نقش بسیار مهمی در پایداری آن دارد زیرا سرعت ورود آب که ممکن است حاوی مواد شیمیایی مخرب باشد را کنترل می‌کند.



شکل ۷: آزمایش نفوذپذیری آب در بتن.



شکل ۸: نتایج آزمایش آزمون نفوذ آب.

### ۳-۳-۳- ارائه رابطه‌ای بهینه بر اساس نتایج آزمایشگاهی

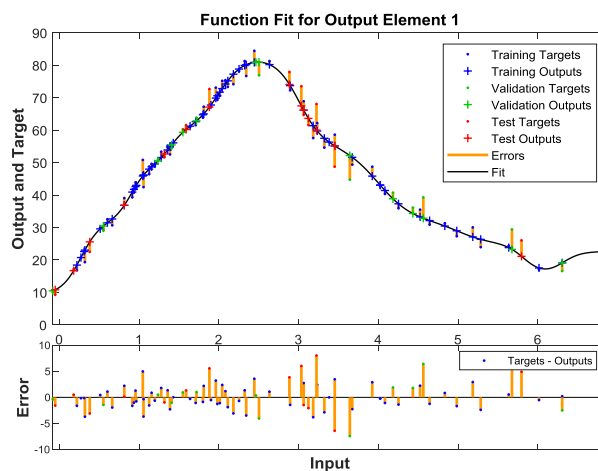
پس از انجام آزمایش‌های مورد نظر و تعیین مقادیر مقاومت فشاری و میزان نفوذپذیری آب در نمونه‌های مورد استفاده مشاهده می‌گردد که حجم داده‌های خروجی جهت بررسی بهینه‌ترین طرح اختلاط به نسبت مقاومت فشاری و اقتصادی بودن طرح نیاز به استفاده از شبکه عصبی جهت تعیین بهینه‌ترین طرح اختلاط استفاده می‌گردد. در این حالت مقادیر نسبت آب به سیمان، نانوسیلیس، زئولیت، ریزدانه و مقدار سیمان به‌عنوان ورودی‌های شبکه عصبی مورد استفاده قرار می‌گیرند و همچنین نتایج حاصل از طرح‌های اختلاط نیز به شبکه وارد می‌گردد تا یک طرح بهینه استخراج گردد. الگوریتم شبکه عصبی مورد نظر به‌صورت زیر در برنامه MATLAB ایجاد گردیده است. به‌منظور ارزیابی دقت شبکه عصبی مصنوعی در مدل‌سازی مربوطه از سه معیار آماری ضریب همبستگی (R)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و معیار ناش-سانتکلیف (NSE) استفاده شده است. نحوه محاسبه آماره‌های فوق در روابط ۱ تا ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است در روابط زیر X بیانگر مقادیر مشاهداتی و Y شامل مقادیر پیش‌بینی‌شده می‌باشند.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (3)$$

مطابق با نتایج به دست آمده، شبکه عصبی مصنوعی با دارا بودن مقادیر  $R=0.98$ ،  $NSE=0.93$  و  $RMSE=0.11$  دارای قابلیت مناسبی برای مدل سازی پدیده مورد می باشد. شکل ۹ نشان دهنده رابطه برازش داده شده بر نتایج کل مقاومت فشاری نمونه های ۲۸ روزه می باشد.



شکل ۹: برازش بر روی نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روز.

با استفاده از شبکه عصبی مورد نظر معادله ای به نسبت مقادیر مورد بررسی برای هریک از متغیرهای مورد استفاده به صورت رابطه ۴ ارائه می گردد. در این رابطه پارامترهای  $X_1$  تا  $X_5$  به ترتیب بیانگر سیمان، آب، نانو سیلیس، ژئولیت و سنگ دانه ریز می باشند.

$$\bar{f}_c = 2.0958X_1 + 0.1914X_2 + 0.2369X_3 + 1.1542X_4 + 0.2017X_5 - 13.987 \quad (4)$$

در این حالت با استفاده از مقادیر متغیرهای ارائه شده در طرح اختلاط ۱۹ که بهینه ترین نتیجه ممکن را به ما داده است رابطه محاسبه شده مقدار  $112/5$  مگا پاسکال را محاسبه می کند که با نتایج محاسبه شده در آزمون های آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد.

در ادامه رابطه ۴ بر اساس الگوریتم ژنتیک بهینه سازی می گردد. در این حالت مقادیر محاسبه شده برای طرح اختلاط ۱۹ که دارای مقادیر مقاومت فشاری به مراتب بهتر از سایر طرح ها است. در این رابطه همراه با میزان هزینه تهیه هر یک از مصالح  $W_1$ ،  $W_2$ ،  $W_3$ ،  $W_4$  و  $W_5$  قرار داده می شود که به ترتیب برابر هزینه تهیه یک کیلوگرم سیمان، یک لیتر آب، یک کیلوگرم نانو سیلیس، یک کیلوگرم ژئولیت و یک کیلوگرم ریزدانه می باشد [۳۹]. که در این حالت هزینه تهیه هریک از اجزائی تشکیل دهنده طرح اختلاط ارائه شده به صورت ضریبی وزنی به رابطه ۴ اضافه شده است. به دلیل متغیر بودن هزینه تهیه مواد، این هزینه ها به نسبت هزینه تهیه یک کیلوگرم سیمان سنجیده می شوند از این رو داریم.

$$W_1 = 1, W_2 = 0.05, W_3 = 100, W_4 = 55, W_5 = 0.1$$

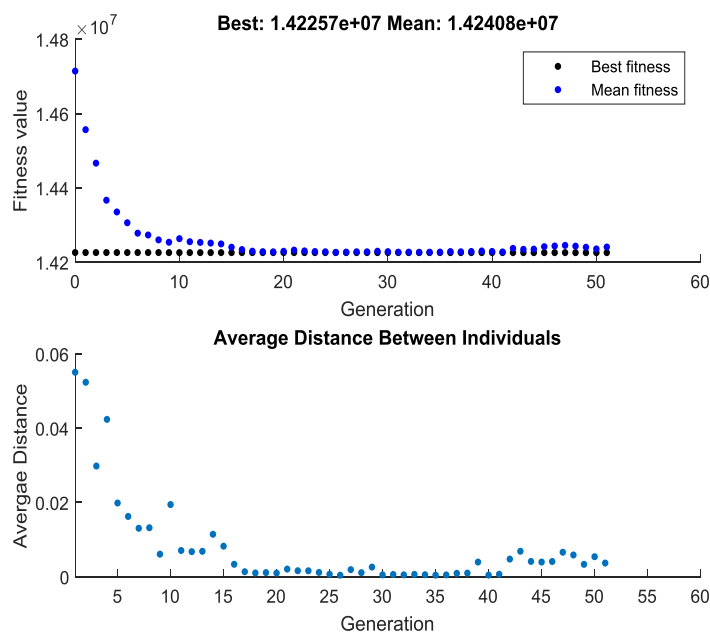
پس از اعمال این ضرایب به رابطه ۴، رابطه حاصله در الگوریتم ژنتیک قرار گرفته و مقادیر تابع بهینه شده مطابق شکل ۱۰ به صورت رابطه ۵ تعیین می گردد.

$$\bar{f}_c = 1.9526X_1 + 0.1897X_2 + 0.2024X_3 + 1.1023X_4 + 0.2013X_5 - 7.921 \quad (5)$$

با توجه به رابطه ارائه شده مشاهده می‌گردد که در رابطه ارائه شده مقادیر سیمان و نانوسیلیس به دلیل هزینه بالای تهیه کاهش یافته اما بر مقادیر ژئولیت افزوده شده است. به این ترتیب که برای طرح اختلاط ۱۹، مقاومت فشاری با اختلاف کمتری به مقدار ۱۰۹ مگاپاسکال کاهش (کاهش حدود دو درصدی) یافته است، در حالی که هزینه ساخت و تولید به مراتب دچار کاهش بیشتری (کاهش حدود ۱۳ درصدی) شده است. بدین ترتیب الگوریتم بهینه‌سازی با کاهش سیمان و نانوسیلیس و در طرف مقابل با افزایش ژئولیت به طور هم‌زمان، تابع هدف را کمینه کرده و قیود مورد نظر مقاومت فشاری را نیز تأمین می‌کند. پس از محاسبه طرح بهینه، مقادیر متغیرها برای طرح اختلاط شماره ۱۹ به شرح زیر در جدول (۱۰) خلاصه شده و با مقادیر متناظر در طرح اختلاط به روش کلاسیک نیز مقایسه شده است.

جدول ۱۰: نتایج نهایی طرح اختلاط برای طرح اختلاط شماره ۱۹

پارامتر	مقدار قبل بهینه‌سازی	مقدار بهینه‌شده
سیمان (کیلوگرم)	۴۵۰	۳۷۰
نانوسیلیس (کیلوگرم)	۴۵	۳۸
ژئولیت (کیلوگرم)	۶۷/۵	۷۶
سنگ‌دانه ریز (کیلوگرم)	۷۰۰	۷۱۵
آب	۱۱۲/۵	۱۰۳
مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	۱۱۱	۱۰۹



شکل ۱۰: نتیجه الگوریتم ژنتیک.

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج نهایی مطالعه حاضر به شکل زیر ارائه می‌گردد:

۱. با جایگزینی ۱۵ درصدی نانوسیلیس در نمونه‌های بتنی، افزایش ۲۰ و ۳۵ درصدی مقاومت فشاری مشاهده شده است. همچنین برای نمونه‌هایی با درصد جایگزینی ۱۵ درصد نانوسیلیس (نمونه ۵ و ۶)، با کاهش سیمان و افزایش ریزدانه، مقاومت فشاری تنها به مقدار ۱ درصد کاهش یافته است.

۲. با افزایش مقادیر زئولیت موجود در نمونه از حد ۱۰٪ مقاومت نمونه‌های بتنی با کاهش مواجه گردیده است. همچنین در بازه ۵٪ الی ۱۰٪، درصد تغییر افزایش مقاومت در روزهای اولیه بیشتر بوده است. همچنین به ازای درصدهای ثابت جایگزینی زئولیت، با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری نمونه‌ها به دلیل افزایش تخلخل و افزایش حجم حفره‌های بتن ناشی از افزایش آب است.
۳. در صورت ترکیب هر دو این مواد نه تنها نرخ افزایش مقاومت مخلوط بتن افزایش یافته است بلکه مقاومت نهایی بتن نیز به میزان قابل توجهی افزایش یافته است و به مقدار مقاومت فشاری بالای ۱۰۰ مگاپاسکال رسیده‌اند. همچنین نمونه‌های بتنی ۱۰ درصد نانوسیلیس - ۱۵ درصد زئولیت بهترین نتایج را ارائه نموده‌اند.
۴. تأثیر مثبت کاهش عمق نفوذ آب با افزایش مقدار زئولیت افزایش یافته است. در مقدار جایگزینی برابر با ۵ درصد زئولیت نتایج بهتری از جایگزینی ۵ درصد نانوسیلیس حاصل شده است. همچنین زئولیت با انجام واکنش پوزولانی سبب بهبود ریز ساختار بتن و در نتیجه کاهش نفوذپذیری می‌گردد.
۵. الگوریتم بهینه‌سازی با کاهش سیمان و نانوسیلیس و در طرف مقابل با افزایش زئولیت به‌طور هم‌زمان، تابع هدف را کمینه کرده و قیود مورد نظر مقاومت فشاری را نیز تأمین می‌کند.

## مراجع

- [1] Rasoli, M., abbasi, B. (1396). Investigation of the Effect of Silica Soot on the Properties of Concrete Generated, Second International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Design.
- [2] Davraz, M., Ceylan, H., Topçu, İ. B., & Uygunoğlu, T. (2018). Pozzolanic effect of andesite waste powder on mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 165, 494-503.
- [3] Sadr momtazi, A., tahmoresi, B. (1396). Investigating the boundary of aggregate-cement paste in concrete containing silica and fly ash. *Structural and construction engineering publication*.
- [4] Yazdandoust and yazdani. (2014). Investigating the interaction the weight ratio of micro silica, the softness modulus of aggregate and the ratio of water to cement on the physical and mechanical parameters of concrete. *Modares civil engineering*, 14(20), 183-195.
- [5] Perry, C., & Gillott, J. E. (1995). The influence of silica fume on the strength of the cement-aggregate bond. *Special Publication*, 156, 191-212.
- [6] Soriano, L., Monzó, J., Bonilla, M., Tashima, M. M., Payá, J., & Borrachero, M. V. (2013). Effect of pozzolans on the hydration process of Portland cement cured at low temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 42, 41-48.
- [7] Moon, J., Bae, S., Celik, K., Yoon, S., Kim, K. H., Kim, K. S., & Monteiro, P. J. (2014). Characterization of natural pozzolan-based geopolymeric binders. *Cement and Concrete Composites*, 53, 97-104.
- [8] Grist, E. (2014). The implementation of innovative and sustainable construction materials.
- [9] Robayo-Salazar, R. A., de Gutiérrez, R. M., & Puertas, F. (2016). Effect of metakaolin on natural volcanic pozzolan-based geopolymer cement. *Applied Clay Science*, 132, 491-497.
- [10] Hossain, M. M., Karim, M. R., Hasan, M., Hossain, M. K., & Zain, M. F. M. (2016). Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review. *Construction and Building Materials*, 116, 128-140.
- [11] Ghrici, M., Kenai, S., & Said-Mansour, M. (2007). Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 29(7), 542-549.
- [12] Baldino, N., Gabriele, D., Lupi, F. R., Seta, L., & Zinno, R. (2014). Rheological behaviour of fresh cement pastes: Influence of synthetic zeolites, limestone and silica fume. *Cement and Concrete Research*, 63, 38-45.
- [13] Detwiler, R. J., Bhatta, J. I., & Battacharja, S. (1996). Supplementary cementing materials for use in blended cements (No. R&D Bulletin RD112T).
- [14] Kjellsen, K. O., Wallevik, O. H., & Hallgren, M. (1999). On the compressive strength development of high-performance concrete and paste—effect of silica fume. *Materials and Structures*, 32(1), 63.

- [15] Zheng, D. D., Ji, T., Wang, C. Q., Sun, C. J., Lin, X. J., & Hossain, K. M. A. (2016). Effect of the combination of fly ash and silica fume on water resistance of Magnesium–Potassium Phosphate Cement. *Construction and Building Materials*, 106, 415-421.
- [16] Cabrera, J. G., & Claisse, P. A. (1990). Measurement of chloride penetration into silica fume concrete. *Cement and Concrete Composites*, 12(3), 157-161.
- [17] Turk, K., Turgut, P., Karatas, M., & Benli, A. (2010, September). Mechanical Properties of Selfcompacting Concrete with Silica Fume/Fly Ash. In 9th International Congress on Advances in Civil Engineering (pp. 27-30).
- [18] Perraki, T., Kontori, E., Tsvilis, S., & Kakali, G. (2010). The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 128-133.
- [19] Esmailnia, M., Faridi, M. (1392). The effect of zeolite replacement on the efficiency of self-compacting concrete containing recycled aggregate, the fifth annual national conference of concrete in Iran.
- [20] Yeh IC. Modeling of strength of HPC using ANN. *Cement Concrete Res* 1998; 28(12):1797–808.
- [21] Jung HC, Jamshid G. Genetic algorithm in structural damage detection. *Computers Struct* 2001; 30(6):1335.
- [22] Selvamony, C., Ravikumar, M. S., Kannan, S. U., & Gnanappa, S. B. (2010). Investigations on self-compacted self-curing concrete using limestone powder and clinkers. *ARPN J. Eng. Appl. Sci*, 5(3), 1-6.
- [23] Turk, K., Turgut, P., Karatas, M., & Benli, A. (2010, September). Mechanical Properties of Selfcompacting Concrete with Silica Fume/Fly Ash. In 9th International Congress on Advances in Civil Engineering (pp. 27-30).
- [24] Atan, M. N., & Awang, H. (2011). The compressive and flexural strengths of self-compacting concrete using raw rice husk ash. *J. Eng. Sci. Technol*, 6(6), 720-732.
- [25] Mahmodi, K., Ketabdari, M. J. (1396). Slump and Compressive Strength Modeling of high-strength Concrete Using Artificial Neural Networks and Multiple Linear Regressions. *Civil engineering*. 2.33 (2.3), 105-115. (In Persian)
- [26] Lee, S. C. (2003). Prediction of concrete strength using artificial neural networks. *Engineering Structures*, 25(7), 849-857.
- [27] Saridemir, M. (2014). Effect of specimen size and shape on compressive strength of concrete containing fly ash: Application of genetic programming for design. *Materials & Design* (1980-2015), 56, 297-304.
- [28] Henry G. Russell. Chairman. Arthur R. Anderson. Jack O. Banning. Irwin G. State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete. Reported by ACI Committee 363.
- [29] Aitcin, P. C. (1994). Durable Concrete-Current Practice and Future Trends. Special Publication, 144, 85-104.
- [30] ASTM C618-19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org
- [31] Self-Compacting Concrete European Project Group. (2005). The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use. International Bureau for Precast Concrete (BIBM).
- [32] ASTM C1240-15, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org
- [33] Design and implementation of reinforced concrete buildings, 9th edition, 1392, Publications Office of National Building Regulations. Part 9-10-4-2, p 123. (in persian)
- [34] Hover, K. (1995). Graphical Approach to Mixture Proportioning by ACI 211.1-91. *Concrete International*, 17(9), 49-53.
- [35] Esmaeili-Falak, M., Katebi, H., Vadiati, M., & Adamowski, J. (2019). Predicting Triaxial Compressive Strength and Young's Modulus of Frozen Sand Using Artificial Intelligence Methods. *Journal of Cold Regions Engineering*, 33(3), 04019007.
- [36] Nassr, A., Esmaeili-Falak, M., Katebi, H., & Javadi, A. (2018). A new approach to modeling the behavior of frozen soils. *Engineering geology*, 246, 82-90.
- [37] Koza, J. R., & Koza, J. R. (1992). Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection (Vol. 1). MIT press.
- [38] Naghadehi, M. Z., Samaei, M., Ranjbaria, M., & Nourani, V. (2018). State-of-the-art predictive modeling of TBM performance in changing geological conditions through gene expression programming. *Measurement*, 126, 46-57.
- [39] Habibi A. (2019). Optimization of heavy concrete mix design based on experimental results. *IQBQ*, 18 (6): 63-72