

Experimental Investigation and Predictive Modeling of Compressive Strength of Pozzolanic Geopolymer Concrete Using Gene Expression Programming

Amir Ali Shahmansouri

Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

Habib Akbarzadeh Bengar*

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran
h.akbarzadeh@umz.ac.ir

Saeed Ghanbari

Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

Abstract

With regard to the adverse environmental impacts of cement production, the use of geopolymer concrete (GPC) can be considered as an environmentally friendly approach for concreting. This study deals with an experimental investigation on the effects of partial replacement of the GGBS¹ (replaced with 5, 10, 15, 20, 25, and 30%) used in GPC with natural zeolite (NZ) and silica fume (SF) simultaneously with different concentration (4, 6 and 8 M) of sodium hydroxide (NaOH) together with sodium silicate (water glass) solution on the compressive strength. Results indicate that increasing concentration of NaOH yields decreases the compressive strength of the concrete. In contrast, adding NZ and SF into concrete results in increasing the compressive strength. In addition, gene expression programming (GEP) was employed to develop mathematical models for predicting the compressive strength of GPC based on GGBS¹. Using the experimental results, an extensive and reliable database of compressive strength of GGBS-based GPC was obtained. The database comprises the compressive strength results of 351 specimens produced from 117 different mixtures. The five most influential parameters i.e., age of specimens, NaOH solution concentration, NZ, SF and GGBS content of GPC, were considered as the input parameters for modeling. The results reflected that the proposed models are accurate and possess a high prediction capability. The findings of this study can enhance the re-use of GGBS for the development of GPC leading to environmental protection and monetary benefits.

Keywords: Geopolymer Concrete, Pozzolan, Compressive Strength, Strength Prediction, Gene Expression Programming.

¹ Ground Granulated Blast-furnace Slag

بررسی آزمایشگاهی و مدل سازی پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری پوزولانی بوسیله برنامه نویسی بیان ژن

دریافت مقاله: ۱۱-۱۰-۱۳۹۸

پذیرش مقاله: ۲۸-۱۱-۱۳۹۸

امیرعلی شاه منصوری

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

حبیب اکبرزاده بنگر*

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

h.akbarzadeh@umz.ac.ir

سعید قنبری

دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

چکیده

با توجه به اثرات مخرب زیست محیطی تولید سیمان، استفاده از بتن ژئوپلیمری می‌تواند به عنوان یک رویکرد سازگار با محیط زیست در ساخت بتن در نظر گرفته شود. هدف این تحقیق بررسی تاثیر جایگزینی بخشی از سرباره به عنوان پایه بتن ژئوپلیمری (جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰٪) با ژئولیت طبیعی و دوده سیلیس و همچنین تغییرات غلظت هیدروکسید سدیم (۴، ۶ و ۸ مولار) همراه با محلول سدیم سیلیکات به عنوان فعال کننده بتن ژئوپلیمری بر مقاومت فشاری می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش غلظت هیدروکسید سدیم باعث کاهش مقاومت فشاری بتن و در مقابل، افزودن ژئولیت طبیعی و دوده سیلیس باعث افزایش آن می‌شود. علاوه بر این، از برنامه نویسی بیان ژن برای ساخت مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره، استفاده شده است. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، یک پایگاه داده گسترده و قابل اعتماد از مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره به دست آمد. این پایگاه داده شامل نتایج مقاومت فشاری ۳۵۱ نمونه ساخته شده از ۱۱۷ طرح اختلاط است. پنج پارامتر تأثیرگذار از قبیل، سن نمونه‌ها، غلظت محلول هیدروکسید سدیم، میزان ژئولیت طبیعی، دوده سیلیس و سرباره، به عنوان پارامترهای ورودی برای مدل سازی در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که مدل‌های ارائه شده دقیق هستند و قابلیت پیش‌بینی بالایی دارند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به بهبود استفاده مجدد از سرباره برای ساخت بتن ژئوپلیمری کمک کند.

کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمری، پوزولان، مقاومت فشاری، پیش‌بینی مقاومت، برنامه نویسی بیان ژن.

صنعت ساخت و ساز به عنوان بزرگترین عامل انتشار گازهای گلخانه‌ای (در حدود ۵۰٪) در سراسر جهان شناخته شده است [۱]. سیمان پرتلند به عنوان عامل اصلی در تولید بتن سهم بسزایی در این آلودگی دارد [۲]. با وجود مزایای شناخته شده سیمان پرتلند، به عنوان مؤلفه اصلی چسبندگی بتن، تولید آن حدود ۷٪ از کل انتشار دی اکسید کربن را شامل می‌شود [۳،۴]. تقریباً نیمی از CO_2 ساطع شده از تولید سیمان به فرایند تکلیس (CaO) از طریق خارج کردن CO_2 از CaCO_3 تشکیل می‌شود، و نیم دیگر به مصرف انرژی در طی فرایند تولید نسبت داده می‌شود [۵،۶]. تولید حدود ۴۰۰۰ میلیون تن سیمان پرتلند در سال باعث شده است که سیمان جزء اصلی اتصال-دهنده مورد استفاده در صنعت ساخت و ساز باشد [۷]. تخمین زده می‌شود که مصرف جهانی سیمان پرتلند در ۴۰ سال آینده به حدود ۶۰۰۰ میلیون تن در سال برسد [۸].

این عوامل تحقیق و توسعه در باب چسب‌های جایگزین جدید با انرژی و آلاینده‌گی زیست محیطی کمتر را تقویت می‌کند. یکی از مواد معرفی شده برای غلبه بر این مشکلات، ژئوپلیمرها می‌باشند [۹]. بتن ژئوپلیمری یک ماده ساختمانی جدید و سازگار با محیط زیست است. این ماده معمولاً با فعال کردن خاصیت سیمانی مصالح آلومینوسیلیکاتی مانند خاکستر بادی، سرباره یا متاکائولین توسط فعال‌کننده‌های قلیایی مانند سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم در یک محیط قلیایی با دمای پایین تولید می‌شود [۱۰]. ژئوپلیمر، به عنوان یک ماده سبز تولید کربنی ۸۰٪ کمتر از سیمان پرتلند دارند [۱۱]. از این بتن برای ساخت عناصر سازه‌ای مانند تیرها، ستون‌ها و شمع‌ها استفاده شده است [۱۲-۱۴]، علاوه بر این، به عنوان یک روش تثبیت خاک توسط اختلاط با خاک‌های ضعیف‌تر، خاک رس قابل استفاده است [۱۵-۱۷]. رشد مقاومت بتن ژئوپلیمری عمدتاً به تشکیل ژل ژئوپلیمر (یعنی زنجیرهای پلیمری سه بعدی) در ساختار ژئوپلیمر از طریق فرایند بسپارش صورت می‌پذیرد [۱۰، ۱۸، ۱۹]. نسبت فعال‌کننده قلیایی به مواد جامد، نسبت سیلیکات به هیدروکسید، نوع فعال‌کننده و میزان مواد جامد، به عنوان عوامل مؤثر بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری، گزارش شده است [۲۰-۲۴].

از آنجا که مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری تحت تأثیر عوامل مختلف متغیر است، لذا پیش‌بینی آن مسئله‌ای پیچیده برای مهندسان به حساب می‌آید. از این رو نیاز به یک مدل عددی، مانند روش‌های محاسبات نرم [۲۵]، که بتواند به طور مؤثری عملکرد مقاومت فشاری این بتن را پیش‌بینی کند، احساس می‌شود. این تحقیق به تأثیر استفاده از ژئولیت طبیعی و دوده سیلیس به عنوان پوزولان بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره می‌پردازد. هدف از افزودن ژئولیت طبیعی و دوده سیلیس رسیدن به مشخصات مکانیکی مناسب است. از این رو، در مطالعه‌ای جامع آزمایشگاهی، تأثیر سرباره با جایگزینی ژئولیت طبیعی و دوده سیلیس در مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد وزنی بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن ژئوپلیمری بررسی شد. سپس، از آنجا که ساخت بتن در آزمایشگاه برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی آن بسیار زمان بر است، از یک روش محاسبات نرم برای پیش‌بینی مقاومت فشاری استفاده شد. برخی از این روش‌ها مانند منطق فازی [۲۶-۲۸]، شبکه‌های عصبی مصنوعی [۲۹-۳۴] و الگوریتم‌های ژنتیکی [۳۵-۳۹] قبلاً برای پیش‌بینی انواع مختلفی از خصوصیات بتن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برنامه نویسی بیان ژن [۴۰] یک روش مدل‌سازی نسبتاً جدید است، که در یافتن روابط ریاضی در مطالعات آزمایشگاهی، نسبت به روشهای رگرسیونی برتری دارد [۴۱]. با در نظر گرفتن مطالب گفته شده، هدف از این مطالعه، ارائه مدل‌های دقیق برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری پوزولانی می‌باشد که با در نظر گرفتن مصالح استفاده شده و روش ساخت این مدل‌ها، این موضوع، یک مسئله جدید در تهیه مدل‌های پیش‌بینی مقاومت بتن می‌باشد. لذا، در این تحقیق، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری سازگار با محیط زیست بر پایه سرباره حاوی ژئولیت طبیعی و دوده سیلیس برای اولین بار توسط برنامه نویسی بیان ژن مورد بررسی قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

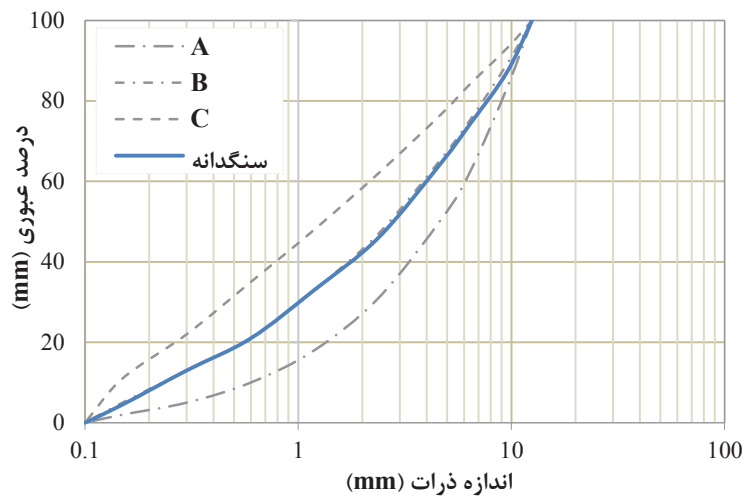
۲-۱- مشخصات مصالح

در این تحقیق از سرباره ذوب آهن یکی از کارخانه‌های داخل کشور با خصوصیات وزن مخصوص ۲/۸۵ گرم بر سانتی متر مکعب و نرمی بلین ۴۵۰۰ سانتی متر مربع برگرم با مدول هیدراسیون $HM = (CaO + MgO +)$ SiO_2 / Al_2O_3 برابر با ۱/۶۶ استفاده شد. همچنین زئولیت طبیعی (نوع کلینوپتیلولیت) استخراج شده از یکی از معادن داخل کشور و دوده سیلیس ساخته شده توسط یکی از شرکت های داخل کشور به عنوان پوزولان مورد استفاده قرار گرفت. مقدار کل SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 در زئولیت طبیعی حدود ۸۰٪ تعیین شد که بالاتر از حداقل مورد نیاز (۷۰٪) در ASTM C 618 [۴۲] برای پوزولان‌های طبیعی است. ترکیبات شیمیایی و مشخصات مواد مصرفی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی و مشخصات مواد مصرفی

اکسیدها (٪)	سرباره	زئولیت طبیعی	دوده سیلیس
SiO_2	۳۵/۸۵	۶۸/۸	۹۴-۸۸
Al_2O_3	۱۳/۳۹	۱۰/۷	۰/۶-۱/۲
Fe_2O_3	۱/۰۶	۰/۷۲	۰/۳-۱/۶
CaO	۳۷/۷۱	۲/۵۴	۰/۹۵-۱/۸
MgO	۹/۱	۰/۸۳	۰/۹۵-۱/۸
SO_3	۲/۵۲	۰/۲۲	-
K_2O	۰/۵۸	۱/۴۴	۰/۷-۱/۲
Na_2O	۰/۴۸	۱/۵۵	۰/۷-۱/۲
چگالی (gr/cm^3)	۲/۸۵	۲/۲	۲/۱۴
نرمی (cm^2/gr)	۴۵۰۰	۶۸۲۰	۶۵۰۰۰۰
افت سرخ شدن (٪)	۰/۱۲	۱۲/۷۸	۳/۵

فعال کننده قلیایی مورد استفاده به منظور فعال سازی سرباره، ترکیبی از هیدروکسید سدیم (NaOH) و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) بودند. هیدروکسید سدیم جامد مورد استفاده با خلوص ۹۸٪ به صورت محلول در آب استفاده شد. از محلول سیلیکات سدیم با نسبت $SiO_2 / Na_2O = ۲/۳۵$ استفاده شد ($Na_2O = 15.5\%$, $SiO_2 = 36.5\%$, $H_2O = 48\%$). تقریباً ۷۷٪ حجم بتن از سنگدانه‌های ریز و درشت تشکیل شده است. سنگدانه‌های آهکی از یک معدن محلی تهیه شده است. مدول نرمی ماسه ۳/۰۵، که در محدوده استاندارد ASTM C33 [۴۳] است. شن با حداکثر قطر ۱۲/۵ میلی متر، جذب آب ۰/۸۴٪ و چگالی نسبی ۲/۶۹ مطابق استاندارد ASTM C127 [۴۴] استفاده شد. دانه بندی سنگدانه‌ها مطابق منحنی B روش ملی طرح مخلوط بتن در شکل ۱ نشان داده شده است. شن و ماسه با نسبت وزنی ۱:۱ استفاده شدند.



شکل ۱- دانه‌بندی شن و ماسه

۲-۲- ساخت نمونه‌ها و آزمایش

برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا مصالح سنگی شامل شن و ماسه درون میکسر به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شد. سپس سرباره همراه با پوزولان مورد استفاده (ژئولیت طبیعی یا میکروسیلیس) ترکیب شده و به مخلوط اضافه شد تا به مدت ۱ دقیقه درون میکسر مخلوط شد. پس از آن مخلوطی از محلول فعال‌کننده قلیایی و آب که شامل آب لازم برای رساندن رطوبت سنگدانه‌ها به وضعیت اشباع با سطح خشک نیز می‌باشد، به آرامی درون میکسر ریخته شد و تا مدت ۲ دقیقه هم زده شد. پس از اختلاط بتن، برای تعیین کارایی بتن تازه، آزمایش اسلامپ مخلوط‌های بتنی مطابق با ASTM C143 [۴۵] اندازه‌گیری شد. پس از ریختن بتن تازه در قالب، به منظور تراکم و کاهش مقدار حباب‌های هوا از میز لرزش استفاده شد. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب بیرون آورده شده و مطابق با ASTM C192 [۴۶] در مخزن آب آهک، اشباع و عمل‌آوری شدند. آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد BS EN 12390-3 [۴۷] بر روی سه نمونه با ابعاد ۱۰۰ میلی متر مکعب در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. نسبت آب به مواد جامد در کلیه مخلوط‌ها ۰/۴۸ بود که آب شامل آب اختلاط به علاوه آب محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم و مواد جامد شامل سرباره، ژئولیت طبیعی، دوده‌سیلیس و بخش جامد محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم است. نسبت محلول قلیایی به سرباره ۰/۴۵، درصد حجم سنگدانه‌ها در مخلوط ۷۷٪، غلظت محلول هیدروکسید سدیم ۴، ۶ و ۸ مولار و نسبت هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم ۵ در نظر گرفته شد. ۱۱۷ طرح اختلاط برای ارزیابی تأثیر پوزولان بر خصوصیات بتن ژئوپلیمری تهیه شد، که در آن سرباره به ترتیب با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰٪ ژئولیت طبیعی و دوده‌سیلیس جایگزین شد. پارامترها و سطوح متناظر آن‌ها در طرح‌های اختلاط در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- پارامترها و سطوح متناظر مورد بررسی

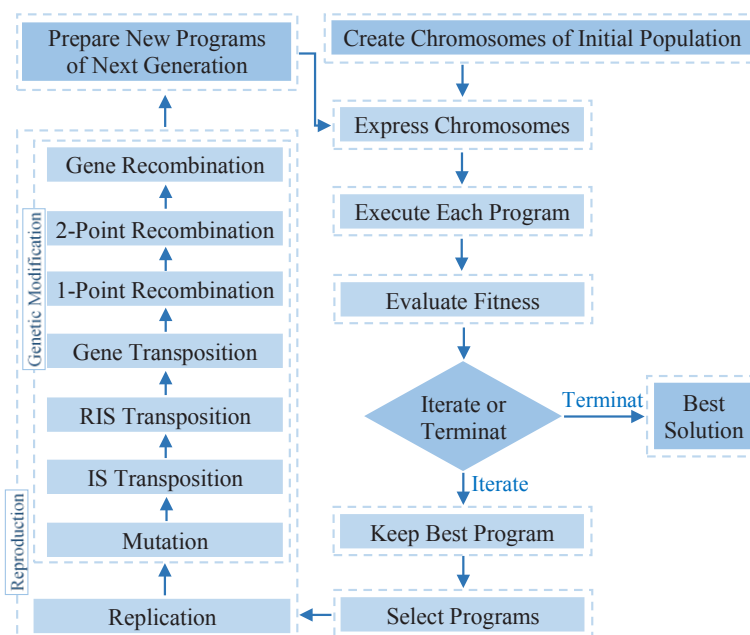
پارامتر	سطوح تغییرات
غلظت هیدروکسید سدیم	۴، ۶ و ۸ مولار
میزان جایگزینی پوزولان	۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰٪
پوزولان‌های مورد بررسی	ژئولیت طبیعی و دوده‌سیلیس

۳- مدل‌ها و پارامترهای برنامه نویسی بیان ژن

۳-۱- برنامه نویسی بیان ژن

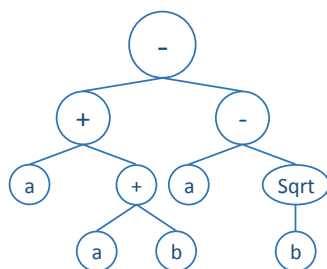
برنامه نویسی بیان ژن (GEP) مشابه برنامه نویسی ژنتیک (GP) و الگوریتم ژنتیک (GA) است زیرا جمعیت افراد را به کار می‌گیرد، بر مبنای سازگاری آن‌ها را انتخاب می‌کند و با استفاده از یک یا چند عملگر ژنتیکی تنوع ژنتیکی را

معرفی می‌کند [۴۸]. GEP نوعی الگوریتم تکاملی است که از ترکیب دو بخش، کروموزوم خطی با طول ثابت از GA و بیان درختان با اشکال و اندازه‌های مختلف از GP، متشکل می‌باشد [۴۹]. زبان برنامه نویسی GEP زبان Karva نامیده می‌شود که مشابه زبان‌های LISP است [۴۰]. مراحل اصلی GEP در شکل ۲ به عنوان نمودار جریان نمایش داده شده است. فرآیند نشان داده شده در نمودار جریان برای چندین نسل یا تا زمانی که یک راه حل مناسب حاصل شود تکرار می‌شود [۵۰].



شکل ۲- نمودار برنامه نویسی بیان ژن [۵۰]

ژن‌های GEP همه دارای طول یکسان هستند. با این حال، این ژن‌ها می‌توانند درختان بیان (ET) در اندازه‌ها و شکل‌های مختلف را رمزگذاری کنند. با استفاده از توابع پیوند، ژن‌های مختلف برای ساختن یک کروموزوم در کنار هم قرار می‌گیرند. تمام مسائل موجود در GEP توسط ET ها ارائه می‌شود، که شامل عملگرها، توابع، ثوابت و متغیرها است. شکل ۳ نمودار ET یک کروموزوم را نشان می‌دهد، که در آن فرمول ریاضی به صورت $[a + (a + b)] - [a - \sqrt{b}]$ بیان شده است.



شکل ۳- نمودار درخت بیان کروموزوم

ثابت شده است که GEP مزایای بسیاری نسبت به سایر روش‌های رگرسیونی کلاسیک دارد. در سایر روش‌های رگرسیونی، برخی توابع از قبل تعریف شده و بعد مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند، در حالی که در روش GEP، هیچ تابع از پیش تعریف شده‌ای در نظر گرفته نشده است. اعتقاد بر این است که برای مدل‌سازی و به دست آوردن فرمول‌های ریاضی برای مطالعات آزمایشگاهی با مسائل چند متغیره، GEP از سایر روش‌های رگرسیونی و شبکه‌های عصبی قوی‌تر است [۳۷].

روش دقیقی برای تعیین بهترین رفتار و ترکیب پارامترها به منظور دستیابی به بالاترین دقت وجود ندارد. در نتیجه، پروسه مدل‌سازی پیچیده و وقت‌گیر می‌شود. در این مقاله، برای حل این مشکل، از مقادیر مختلفی از پارامترهای مؤثر GEP برای به دست آوردن همبستگی با بهره‌وری بیشتر و پیچیدگی کمتر استفاده شده است. از این رو، برای بدست آوردن بیشترین دقت ممکن در بین کلیه مدل‌ها، ابتدا از پایین‌ترین سطح ممکن از پارامترهایی نظیر یک ژن استفاده شد و سپس این مدل با ترکیبی از پارامترهای ورودی مختلف آموزش داده شد. در نرم‌افزار GEP مورد استفاده، «جمع»، «تفریق»، «ضرب» و «تقسیم» به عنوان توابع پیوند معرفی شدند. برای حل یک مسئله، می‌توان یک کروموزوم تک ژن را انتخاب کرد و سپس با افزایش طول سر، مدل‌سازی ادامه یابد. با این وجود، تعداد ژن‌ها می‌تواند افزایش یافته و هنگامی که قابل ملاحظه شود، می‌توان تابعی را برای پیوند شاخه‌های درخت بیان (sub-ET) انتخاب کرد [۳۷].

سطح پیچیدگی مدل قابل اندازه‌گیری نیست. به عنوان یک قاعده کلی، پیچیدگی یک مدل با افزایش ورودی‌های آن افزایش می‌یابد. به عنوان مثال هرچه تعداد ژن‌ها بیشتر شود، مدل پیچیده‌تر می‌شود. همچنین افزایش سایر پارامترهای مورد مطالعه منجر به نتیجه مشابهی می‌شود. تعریف خاصی از پیچیدگی وجود ندارد. در این راستا، برخی از پارامترهای ورودی ممکن است به صورت جمعی به عنوان عارضه در نظر گرفته شوند. ایجاد نسل برای دستیابی به سطوح بالاتر رگرسیون و سازگاری بهتر در هنگام آموزش مجموعه داده، یکی دیگر از دلایل پیچیدگی است [۳۷]. برای استفاده از GEP، پنج مرحله مهم وجود دارد که سه مورد اول فضای جستجوی الگوریتم را مشخص می‌کنند و دو مورد آخر کیفیت و سرعت جستجو را تعیین می‌کنند. مراحل به شرح زیر است:

۱. انتخاب یک تابع سازگاری. فایده‌ای که توسط تابع سازگاری ایجاد می‌شود این است که سیستم می‌تواند به تنهایی راه حل بهینه را بدست آورد.
۲. انتخاب پایانه‌ها (ورودی‌ها) و توابع برای تولید کروموزوم. در این مطالعه، مجموعه پایانه‌ها شامل متغیرهای مستقل می‌شوند و مجموعه توابع، چهار عمل اصلی به همراه چند تابع ریاضی برای مدل‌ها استفاده شده است. وزن هر تابع ۱ است، اما با افزایش وزن آن می‌توان احتمال تابعی را که در مدل‌ها در نظر گرفته شده افزایش داد.
۳. انتخاب معماری کروموزومی، یعنی طول سر و تعداد شماره. در اینجا، تعداد ژن‌ها یا همان شاخه‌های درخت بیان ۳ و ۵ با طول سر ۱۰ و ۱۵ به طور تصادفی در نظر گرفته شد.
۴. انتخاب تابع پیوند. در این مطالعه، توابع پیوند بر اساس پژوهش شاه منصوری و همکاران [۳۷] «جمع» و «ضرب» به کار گرفته شدند.
۵. استفاده از ترکیبی از کل عملگرهای ژنتیکی (به عنوان مثال، انتقال، جهش و آمیزش) به عنوان مجموعه‌ای از عملگرهای ژنتیکی.

۳-۲- مدل‌ها و پارامترهای پیشنهادی

در این مقاله، برای اولین بار، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره حاوی ژئولیت طبیعی و دوده سیلیس از طریق مدل‌سازی بوسیله برنامه نویسی بیان ژن پیش‌بینی شده است. پایگاه داده در این مطالعه شامل نتایج مقاومت فشاری ۳۵۱ نمونه آزمایشگاهی ساخته شده از ۱۱۷ طرح اختلاط است. برای مدل‌سازی داده‌ها از نرم افزار GeneXproTools 5.0 استفاده شده است. بنابراین، با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف، مقاومت فشاری پیش‌بینی شد و در نهایت، نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی راستی‌آزمایی شد.

پارامترهای ورودی و خروجی شامل سن نمونه‌ها (AS)، غلظت محلول هیدروکسید سدیم (NH)، میزان ژئولیت طبیعی (NZ)، دوده سیلیس (SF)، سرباره (GS) و مقاومت فشاری (f_c) است. محدوده متغیرهای ورودی و خروجی

در جدول ۳ ارائه شده است. از کل مجموعه داده ها، ۸۰٪ نمونه‌ها به طور تصادفی انتخاب و به عنوان مجموعه آموزش مدل‌ها در نظر گرفته شدند و ۲۰٪ باقی مانده به عنوان مجموعه اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۳- محدوده پارامترهای ورودی و خروجی

متغیرهای ورودی	حداقل	حدمیان	حداکثر
سن نمونه‌ها (روز)	۷	۲۸	۹۰
غلظت NaOH (مولار)	۴	۶	۸
زئولیت طبیعی (کیلوگرم)	۰	۳۰/۶۴	۱۱۳/۷۹
دوده سیلیس (کیلوگرم)	۰	۳۰/۶۴	۱۱۳/۷۹
سرباره (کیلوگرم)	۲۶۵/۵۲	۳۱۸/۰۴	۳۷۹/۳۱
متغیر خروجی			
مقاومت فشاری (MPa)	۳۷/۷۰	۶۲/۹۳	۹۰/۱۱

در این مطالعه از بیست مدل GEP (که بصورت GEP1 تا GEP20 نامگذاری شده است) استفاده شد. پس از آن، مدل‌های با ضرایب بهتر تعیین و انتخاب شدند و برای انتخاب بهترین فرمول تجربی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری پوزولانی سازگار با محیط زیست با یکدیگر مقایسه شدند. تابع سختی با بهترین سازگاری برای دستیابی به کمترین خطا در نظر گرفته شد. توابع سختی، با ارزیابی آماری خطاهای اجتناب ناپذیر به کار رفته در مراحل آموزش و اعتبارسنجی از قبیل، ضریب تعیین^۱ (R^2)، جذر میانگین مربعات خطاها^۲ (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطاها^۳ (MAE)، قدرمطلق نسبی خطاها^۴ (RAE)، خطای مربع نسبی ریشه^۵ (RRSE) را مطابق معادلات (۵-۱) ارزیابی می‌کند.

$$R^2 = \frac{(n\sum t_i o_i - \sum t_i \sum o_i)^2}{(n\sum t_i^2 - (\sum t_i)^2)(n\sum o_i^2 - (\sum o_i)^2)} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |t_i - o_i| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - o_i)^2} \quad (3)$$

$$RAE = \frac{\sum_i |t_i - o_i|}{\sum_i |t_i - (1/n) \sum_i t_i|} \quad (4)$$

$$RRSE = \sqrt{\frac{\sum_i (t_i - o_i)^2}{\sum_i (t_i - (1/n) \sum_i t_i)^2}} \quad (5)$$

¹ coefficient of determination

² root mean square error

³ mean absolute error

⁴ relative absolute error

⁵ root relative squared error

در روابط بالا، t مقدار هدف، o مقدار خروجی و n تعداد کل داده‌های جمع‌آوری شده است. تمام این خطاها برای انتخاب بهترین مدل در نظر گرفته شده است. مدل‌ها مطابق پارامترها و توابع با و یا بدون در نظر گرفتن وزن توابع مندرج در جدول ۴ ارائه شدند. با استفاده از مدل‌های معرفی شده، فرمول‌هایی براساس معادله (۶) برای محاسبه مقاومت فشاری تهیه شد.

$$f_c = f(AS, NH, NZ, SF, GS) \quad (۶)$$

جدول ۴- پارامترهای تنظیمی GEP برای هر مدل برنامه نویسی بیان ژن

مدل	تعداد کروموزوم	اندازه سر	تعداد ژن	تابع پیوند	تابع سازگاری	نرخ انتقال	نرخ جهش	نرخ آمیزش	ثابت در هر ژن	تعداد توابع
GEP1	۳۰	۱۰	۳	جمع	Absolute error with SR	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۶ (۱.آ)
GEP2	۲۶	۱۲	۳	ضرب	Absolute error with SR	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۶ (۱.آ)
GEP3	۴۰	۱۴	۴	جمع	Absolute error with SR	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۶ (۱.آ)
GEP4	۳۵	۱۲	۳	ضرب	Absolute error with SR	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۷ (۱.ب)
GEP5	۳۵	۸	۳	جمع	Absolute error with SR	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۸ (۲.س)
GEP6	۳۰	۱۲	۳	جمع	Absolute error with SR	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۴ (۱.د)
GEP7	۳۰	۸	۲	جمع	Absolute error with SR	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۶ (۱.آ)
GEP8	۳۰	۱۰	۳	جمع	Absolute error with SR	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۶ (۱.آ)
GEP9	۴۰	۱۲	۴	جمع	Absolute error with SR	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۱	۱۰ (۴.ع)
GEP10	۳۰	۹	۳	جمع	Absolute error with SR	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۷ (۱.ب)
GEP11	۶۰	۸	۳	جمع	Absolute error with SR	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۷ (۱.ف)
GEP12	۳۰	۱۰	۳	جمع	Absolute error with SR	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۱۳ (۱.گ)
GEP13	۳۰	۸	۳	جمع	RRSE	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۸ (۱.س)
GEP14	۳۰	۸	۳	جمع	RRSE	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۱	۴ (۱.ه)
GEP15	۳۰	۸	۳	جمع	RRSE	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۷ (۱.ب)
GEP16	۳۰	۱۲	۳	ضرب	RRSE	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۹ (۲.ی)
GEP17	۳۰	۱۰	۳	جمع	RRSE	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۶ (۳.ج)
GEP18	۴۰	۱۲	۴	جمع	RRSE	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۱	۸ (۴.ک)
GEP19	۳۰	۱۲	۳	جمع	RRSE	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۱۳ (۱.گ)
GEP20	۳۰	۱۲	۳	جمع	RRSE	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۱	۲	۱۲ (۴.ل)

- ^۱ وزن توابع "+، -، ×" برابر دیگر توابع است.
- ^۲ وزن توابع "+، -، ×" برابر دیگر توابع است.
- ^۳ وزن توابع "+، -، ×" برابر دیگر توابع است.
- ^۴ وزن توابع "+، -، ×" برابر دیگر توابع است.
- ^۱ توابع استفاده شده "+، -، ×، /، sqrt، x³" می‌باشد.
- ^۲ توابع استفاده شده "+، -، ×، /، sqrt، x³، x²" می‌باشد.
- ^۳ توابع استفاده شده "+، -، ×، /، sqrt، x³، x²، 3Rt" می‌باشد.
- ^۴ توابع استفاده شده "+، -، ×، /، sqrt، x³، x²، 3Rt، 4Rt، 5Rt، ln" می‌باشد.
- ^۵ توابع استفاده شده "+، -، ×، /، sqrt، x³، x²، 3Rt، 4Rt، 5Rt، ln" می‌باشد.
- ^۶ توابع استفاده شده "+، -، ×، /، sqrt، x³، x²، 3Rt، 4Rt، 5Rt، ln" می‌باشد.
- ^۷ توابع استفاده شده "+، -، ×، /، sqrt، x³، x²، 3Rt، 4Rt، 5Rt، ln" می‌باشد.
- ^۸ توابع استفاده شده "+، -، ×، /، sqrt، x³، x²، 3Rt، 4Rt، 5Rt، ln" می‌باشد.
- ^۹ توابع استفاده شده "+، -، ×، /، sqrt، x³، x²، 3Rt، 4Rt، 5Rt، ln" می‌باشد.
- ^{۱۰} توابع استفاده شده "+، -، ×، /، sqrt، x³، x²، 3Rt، 4Rt، 5Rt، ln" می‌باشد.
- ^{۱۱} توابع استفاده شده "+، -، ×، /، sqrt، x³، x²، 3Rt، 4Rt، 5Rt، ln" می‌باشد.
- ^{۱۲} توابع استفاده شده "+، -، ×، /، sqrt، x³، x²، 3Rt، 4Rt، 5Rt، ln" می‌باشد.
- ^{۱۳} توابع استفاده شده "+، -، ×، /، sqrt، x³، x²، 3Rt، 4Rt، 5Rt، ln" می‌باشد.
- ^{۱۴} توابع استفاده شده "+، -، ×، /، sqrt، x³، x²، 3Rt، 4Rt، 5Rt، ln" می‌باشد.

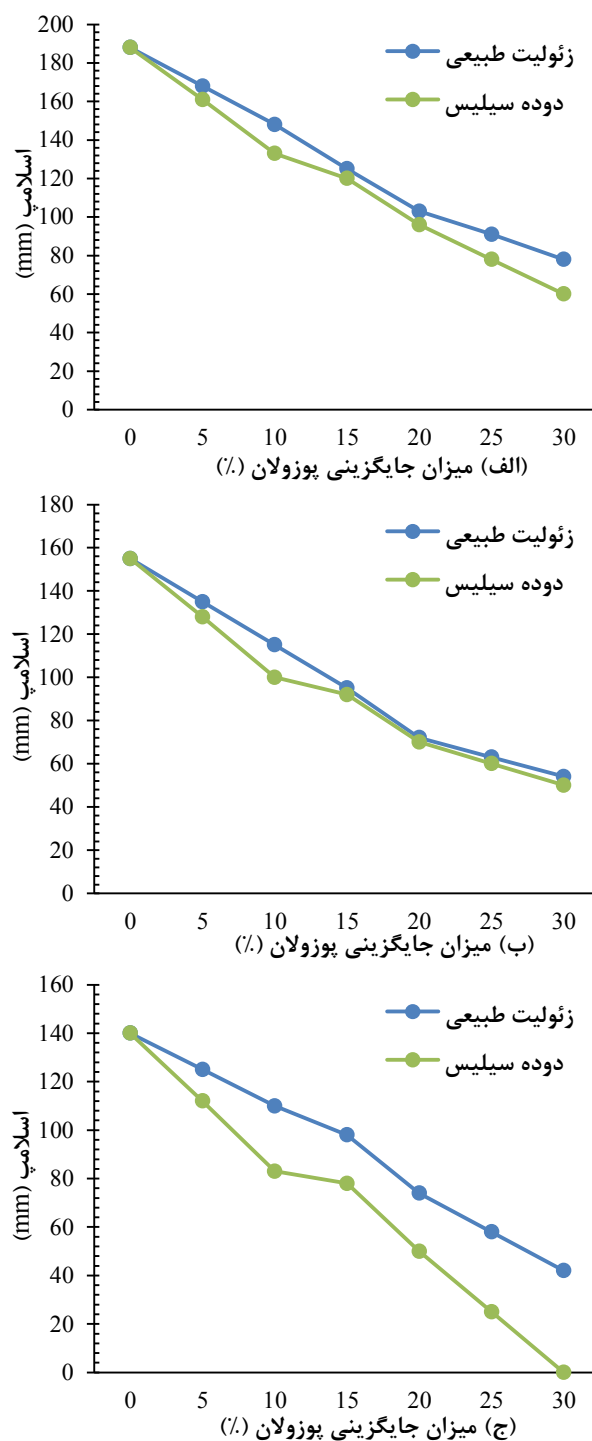
۴- نتایج و تفسیر

۴-۱- نتایج آزمایشگاهی

۴-۱-۱- اسلامپ

آزمایش اسلامپ بر اساس استاندارد ASTM C143 [۴۵] انجام شد. در شکل ۴ نتایج مربوط به آزمایش اسلامپ تمامی طرح‌های اختلاط آورده شده است. بر اساس شکل ۴، (الف) اسلامپ نمونه‌ها با اضافه کردن ژئولیت و دوده-سیلیس کاهش می‌یابد. در طرح‌های ۴ مولار حاوی ژئولیت بیشترین کاهش اسلامپ مربوط به نمونه حاوی ۳۰٪ ژئولیت با ۵۷٪ کاهش نسبت به نمونه شاهد است و در طرح‌های حاوی دوده-سیلیس بیشترین کاهش اسلامپ مربوط به نمونه با ۳۰٪ دوده-سیلیس با ۶۷٪ کاهش نسبت به نمونه شاهد است. همچنین مشاهده شد که در طرح‌های با غلظت ۴ مولار می‌توان تا ۱۵٪ دوده-سیلیس و ۲۰٪ ژئولیت، بدون استفاده از فوق‌روان‌کننده، جایگزین سرباره نمود؛ اما افزودن میزان بیشتر پوزولان‌های مذکور باعث کاهش کارایی بتن شده و نیاز به فوق‌روان‌کننده در این طرح‌ها بیشتر احساس می‌شود.

می‌توان اینطور بیان کرد که به دلیل ریزتر بودن دانه‌های دوده-سیلیس نسبت به ژئولیت، ذرات دوده-سیلیس آب بیشتری را به دلیل سطح مخصوص بالاتر جذب می‌کنند بنابراین برای اختلاط بهتر، در هنگام افزودن دوده-سیلیس نسبت به ژئولیت نیاز به آب بیشتری است. علت کاهش اسلامپ در اثر افزودن ژئولیت را می‌توان اینطور بیان نمود که ژئولیت علاوه بر سطح مخصوص خارجی دارای سطح مخصوص داخلی نیز است؛ بنابراین حفرات درون شبکه‌ای بلوری ژئولیت می‌توانند مولکول‌های آب را در درون خود جذب کنند که منجر به مصرف آب و کاهش کارایی بتن می‌شود [۵۱].



شکل ۴- تاثیر میزان جایگزینی پوزولان روی اسلامپ برای طرح‌های (الف) ۴، (ب) ۶ و (ج) ۸ مولار

شکل ۴، (ب) مقادیر اسلامپ بتن ۶ مولار با درصد‌های مختلف زئولیت و دوده‌سیلیس را نشان می‌دهد. با دقت در این شکل می‌توان ملاحظه کرد مقدار اسلامپ با اضافه کردن زئولیت و دوده‌سیلیس کاهش می‌یابد. در طرح‌های با زئولیت، بیشترین کاهش اسلامپ مربوط به نمونه حاوی ۳۰٪ زئولیت با ۶۵٪ کاهش نسبت به نمونه شاهد است و در طرح‌های حاوی دوده‌سیلیس بیشترین کاهش اسلامپ مربوط به نمونه با ۳۰٪ دوده‌سیلیس با ۶۷٪ کاهش

نسبت به نمونه شاهد است. همچنین مشاهده شد که استفاده بیشتر از ۱۰٪ دوده سیلیس و بیشتر از ۱۵٪ ژئولیت بدون فوق‌روان‌کننده باعث کاهش کارایی شده و نیاز به فوق‌روان‌کننده بیشتر محسوس می‌باشد. در شکل ۴، (ج) که مقادیر اسلامپ نمونه‌های ۸ مولار نشان داده شده است، با اضافه کردن ژئولیت و دوده سیلیس مقدار اسلامپ کاهش می‌یابد. در این غلظت استفاده بیشتر از ۱۰٪ دوده سیلیس و بیشتر از ۱۵٪ ژئولیت بدون فوق‌روان‌کننده باعث کاهش شدید کارایی شد. به طوریکه استفاده از ژئولیت و دوده سیلیس هرکدام به میزان ۱۰٪ باعث کاهش اسلامپ بتن به ترتیب ۱۰٪ و ۱۰۰٪ نسبت به نمونه شاهد شد. مطابق شکل ۵ استفاده از ۳۰٪ دوده سیلیس در بتن ۸ مولار بدون فوق‌روان‌کننده اسلامپ بتن را به صفر کاهش داده و سپس این بتن در کمتر از ۱۰ دقیقه سخت شده است. به طوری که حتی با دو برابر کردن آب کارایی آن افزایش نیافت و هنگامی که بتن در قالب ریخته و تراکم داده شد به دلیل سخت شدن سریع این بتن در لایه اول، لایه دوم بتن فرصت اتصال به لایه اول را نداشته است.



شکل ۵- نمونه ۸ مولار با ۳۰٪ دوده سیلیس بدون فوق‌روان‌کننده

بنابراین افزودن ژئولیت و دوده سیلیس به طرح‌های با غلظت ۴، ۶ و ۸ مولار باعث کاهش شدید اسلامپ می‌شود که این کاهش در دوده سیلیس بسیار محسوس‌تر است. همچنین کارایی بتن ۴ مولار نسبت به غلظت‌های ۶ و ۸ مولار بهتر بوده و بتن دیرتر به مرحله سخت‌شدگی می‌رسد؛ به عبارت دیگر هرچه قدر غلظت افزایش می‌یابد، اسلامپ به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند و نیاز به فوق‌روان‌کننده در این نمونه‌ها بیشتر احساس می‌شود.

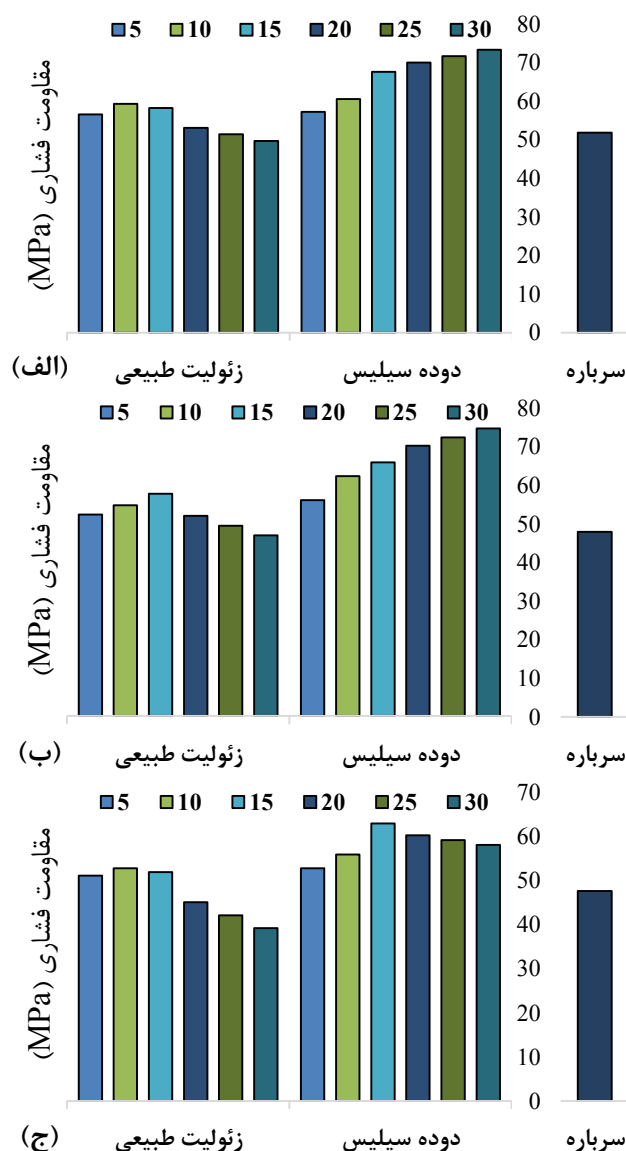
۴-۱-۲- مقاومت فشاری

این آزمایش طبق استاندارد BS EN 12390-3 [۴۷] بر روی نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. ممکن است به دلیل آنکه در بتن‌های ژئوپلیمری بر پایه سرباره حاوی مواد پوزولانی زمان بیشتری طول می‌کشد تا این مواد بطور کامل وارد واکنش هیدراسیون شوند، لذا مقاومت فشاری این نوع بتن در سن ۹۰ روز نیز اندازه‌گیری شد. برای تعیین مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه برای هر نمونه ۳ آزمونه که در مجموع ۳۵۱ آزمونه بتنی ساخته شد.

الف) مقاومت فشاری ۷ روزه

در شکل ۶ نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه طرح‌های با غلظت و درصد پوزولان‌های مختلف نشان داده شده است. در شکل ۶، (الف) مقاومت فشاری بتن ۴ مولار با درصدهای مختلف ژئولیت و دوده سیلیس نشان داده شده است. براساس نتایج ارائه شده در شکل مذکور به خوبی مشخص است که با اضافه کردن ۱۰٪ ژئولیت به این بتن مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونه شاهد ۱۱٪ افزایش می‌یابد. با استفاده بیش از ۱۰٪ ژئولیت مقاومت فشاری روند

کاهشی به خود می‌گیرد به صورتی که طرح‌های با ۲۰ و ۳۰٪ ژئولیت مقاومتی کمتر از بتن شاهد از خود نشان داده‌اند. بنابراین بیشترین مقاومت فشاری را نمونه بتنی حاوی ۱۰٪ ژئولیت کسب کرده است. همچنین مشخص است که با افزایش دوده سیلیس مقاومت فشاری بتن نسبت به بتن شاهد یک روند افزایشی را تجربه می‌کند. بدین معنی که با اضافه کردن ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ دوده سیلیس به بتن ۴ مولار مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی به ترتیب ۱۳، ۳۰ و ۳۷٪ افزایش داشته است.



شکل ۶- تاثیر جایگزینی پوزولان روی مقاومت فشاری ۷ روزه برای طرح‌های (الف) ۴، (ب) ۶ و (ج) ۸ مولار

در شکل ۶، (ب) مقاومت فشاری ۷ روزه طرح‌های ۶ مولار با افزودن ژئولیت و دوده سیلیس ارائه شده است. براساس این شکل با افزودن ۱۰ و ۱۵٪ ژئولیت به بتن ۶ مولار، مقاومت فشاری ۷ روزه به ترتیب ۱۰ و ۲۵٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. در مقادیر بیشتر از ۱۵٪ ژئولیت، مقاومت فشاری با کاهش همراه است. بنابراین بیشترین مقاومت در بتن حاوی ۱۵٪ ژئولیت کسب شده است. به خوبی مشخص است که جایگزین کردن ۱۰، ۲۰

و ۳۰٪ دوده‌سیلیس به جای سربراره، مقاومت فشاری نمونه بتن به ترتیب ۳۵، ۵۵ و ۶۲٪ نسبت به بتن شاهد افزایش می‌یابد.

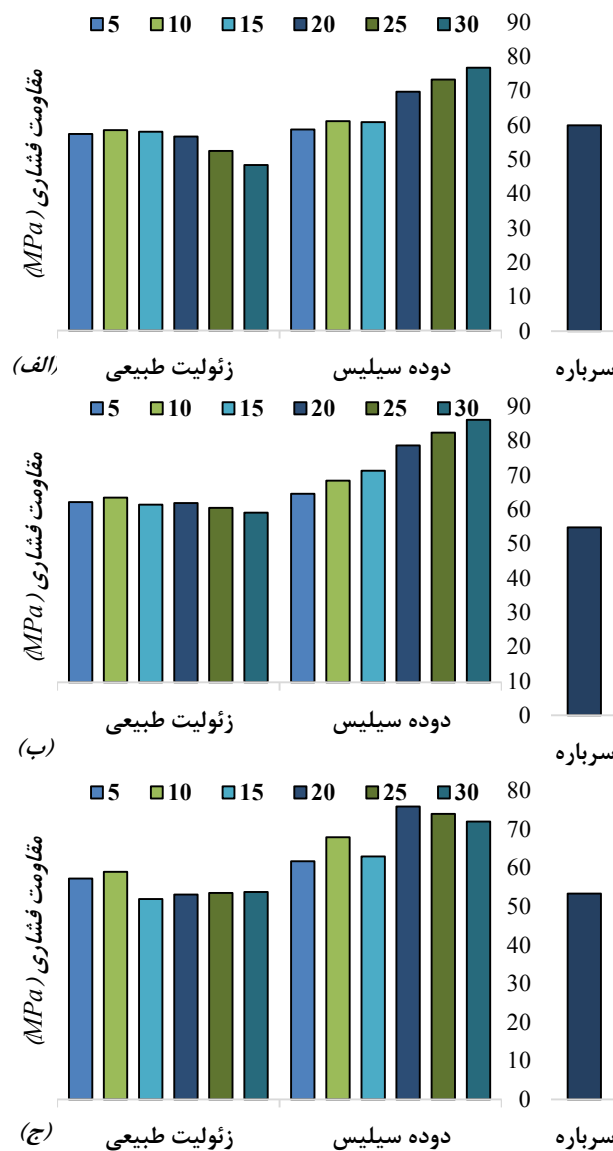
بر اساس شکل ۶، (ج) که نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه بتن ۸ مولار را نشان می‌دهد، با اضافه کردن ۱۰ و ۱۵٪ ژئولیت مقاومت فشاری به ترتیب ۶/۵ و ۵٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. اما استفاده از ۲۰ و ۳۰٪ ژئولیت منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی نسبت به نمونه شاهد شد. لذا بیشترین مقاومت در بتن حاوی ۱۰٪ ژئولیت به دست آمده است. مطابق با بتن‌های با غلظت‌های ۴ و ۶ در بتن ۸ مولار هم، این افزایش مقاومت بتن با افزودن دوده‌سیلیس ادامه دارد؛ اما بتن با ۲۰٪ دوده‌سیلیس نسبت به ۱۵٪ با کاهش همراه بوده که می‌توان علت آن را کارایی کم بتن و عدم تراکم مناسب دانست.

در غلظت‌های ۴ و ۸ مولار بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه حاوی ۱۰٪ ژئولیت است و در بتن با غلظت ۶ مولار بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه حاوی ۱۵٪ ژئولیت است. با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم، مقاومت فشاری کاهش یافته است و این کاهش مقاومت در بتن ۸ مولار به وضوح قابل مشاهده است. همچنین مشاهده می‌شود که در مقادیر بیش از ۱۵٪ ژئولیت، مقاومت فشاری ۷ روزه بتن در غلظت‌های ۴ و ۶ مولار به هم نزدیک می‌شود. بر اساس این شکل بیشترین مقاومت در بتن‌های ۴ و ۶ مولار، در بتن حاوی ۳۰٪ دوده‌سیلیس حاصل شده است. در مقایسه مقاومت فشاری با غلظت‌های ۴ و ۶ مولار مقدار افزایش مقاومت در بتن‌های حاوی ژئولیت به میزان ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ به تناب از یکدیگر پیشی می‌گیرند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت فشاری بتن‌های ۴ و ۶ مولار با افزودن ژئولیت نزدیک به هم است.

با توجه به نتایج، بهترین طرح مقاومت فشاری ۷ روزه در بین طرح‌های ۴، ۶ و ۸ مولار با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰٪ ژئولیت، طرح ۴ مولار با ۱۰٪ ژئولیت است و بهترین طرح مقاومت فشاری ۷ روزه در بین طرح‌های ۴، ۶ و ۸ مولار با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰٪ دوده‌سیلیس، طرح ۶ مولار با ۳۰٪ دوده‌سیلیس است.

ب) مقاومت فشاری ۲۸ روزه

در شکل ۷ نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح‌های با غلظت و درصد پوزولان‌های مختلف گزارش شده است. در شکل ۷، (الف) مقادیر مقاومت فشاری بتن ۴ مولار با درصدهای مختلف ژئولیت و دوده‌سیلیس نشان داده شده است. براساس نتایج ارائه شده در این شکل نمونه‌های ۴ مولار حاوی ۱۰ و ۱۵٪ ژئولیت دارای مقاومت فشاری تقریباً یکسان هستند و هردو منجر به افزایش ۱۰٪ مقاومت نسبت به نمونه شاهد شده اند؛ اما در نمونه‌های بیشتر از ۱۵٪ ژئولیت، مقاومت فشاری بتن کاهش یافته است. مشخص است که با اضافه کردن ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ دوده‌سیلیس مقاومت فشاری بتن ۴ مولار نسبت به بتن شاهد به ترتیب ۱۴/۶۱، ۳۰ و ۴۴٪ افزایش می‌یابد. لذا بیشترین مقاومت در بتن حاوی ۳۰٪ دوده‌سیلیس به دست آمده است.



شکل ۷- تاثیر جابگزینی پوزولان روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای طرح‌های (الف) ۴، (ب) ۶ و (ج) ۸ مولار

در شکل ۷، (ب) مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح‌های ۶ مولار با درصد‌های مختلف زئولیت و دوده‌سیلیس ارائه شده است. براساس این شکل با اضافه کردن ۱۰٪ زئولیت مقاومت فشاری تقریباً ۶٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد؛ اما پس از آن مقاومت فشاری با کاهش همراه می‌شود. بنابراین بیشترین مقاومت در بتن حاوی ۱۰٪ زئولیت کسب شده است. به خوبی مشخص است که با اضافه کردن ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ دوده‌سیلیس به این بتن، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن به ترتیب ۱۵، ۳۵ و ۵۰٪ نسبت به بتن شاهد افزایش می‌یابد. بیشترین مقاومت در بتن ۶ مولار حاوی ۳۰٪ دوده‌سیلیس کسب شده است.

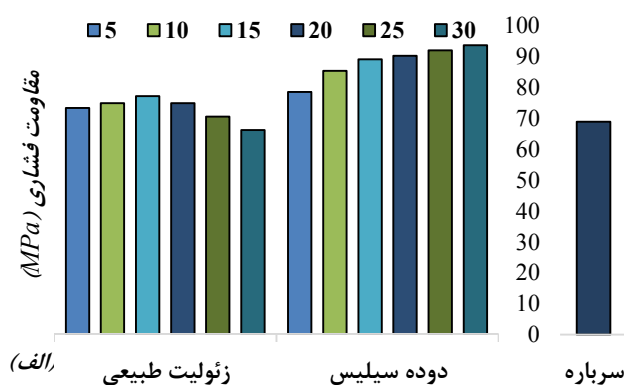
بر اساس شکل ۷، (ج) که نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ۸ مولار با زئولیت و دوده‌سیلیس را نشان می‌دهد. با اضافه کردن ۱۰٪ زئولیت به بتن مقاومت فشاری ۶/۵٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. اما همانند بتن ۶ مولار در نمونه‌های با بیش از ۱۰٪ زئولیت مقاومت فشاری به طور قابل توجهی نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. با دقت در این شکل با افزودن دوده‌سیلیس به بتن مقاومت فشاری روند افزایشی به خود می‌گیرد. بیشترین مقاومت فشاری نیز در بتن حاوی ۲۰٪ دوده‌سیلیس کسب شده است.

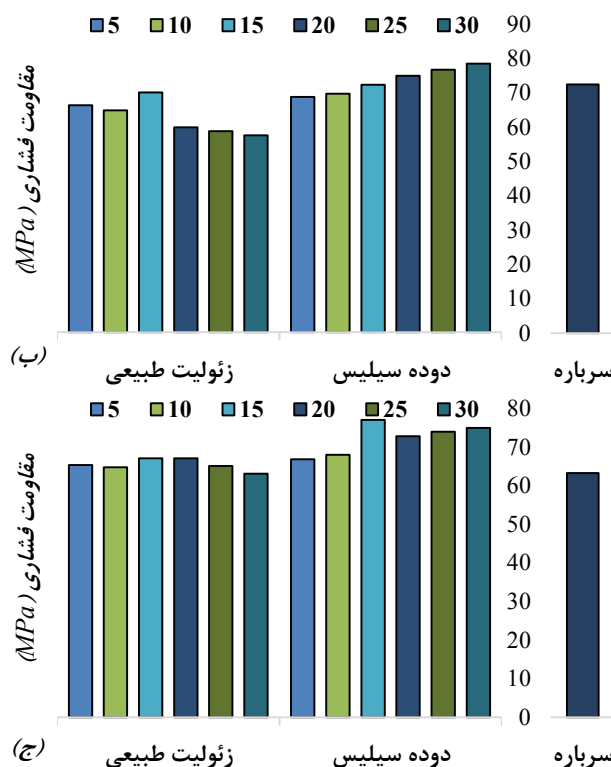
در شکل مذکور روند تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن با غلظت و درصد‌های مختلف ژئولیت و دوده‌سیلیس قابل مشاهده می‌باشد. با افزایش غلظت مقاومت فشاری در اکثر طرح‌های اختلاط کاهش یافته است و با مقایسه آن با شکل ۶، (الف) می‌توان مشاهده کرد که تأثیر ژئولیت در مقادیر بالا و غلظت بالا با افزایش سن نمونه بتن بیشتر است. به عنوان مثال در بتن ۸ مولار مقاومت فشاری ۷ روزه از ۱۵٪ به بعد کاهش یافته است؛ اما مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن با افزایش همراه است. همانطوری که نشان داده شده است افزودن دوده‌سیلیس می‌تواند باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های با غلظت کمتر شود؛ اما در اکثر طرح‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت بتن مقاومت فشاری نسبت به طرح‌های با غلظت کمتر با کاهش همراه است. همچنین در تمامی غلظت‌ها از ۱۵٪ دوده‌سیلیس به بعد مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها به هم نزدیک می‌گردد.

بهترین طرح مقاومت فشاری ۲۸ روزه در بین طرح‌های ۴، ۶ و ۸ مولار با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰٪ ژئولیت ملاحظه می‌شود. مشخص است که طرح بهینه، طرح ۴ مولار با ۱۰٪ ژئولیت است و طرح‌های بتن ۴ مولار حاوی ۳۰٪ دوده‌سیلیس و بتن ۶ مولار با ۳۰٪ دوده‌سیلیس به عنوان طرح‌های بهینه انتخاب می‌گردند.

ج) مقاومت فشاری ۹۰ روزه

در شکل ۸ نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح‌های با غلظت و درصد پوزولان‌های مختلف گزارش شده است. در شکل ۸، (الف) مقادیر مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن ۴ مولار با مقادیر مختلف ژئولیت و دوده‌سیلیس نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن ۴ مولار با اضافه کردن ۱۵٪ ژئولیت به آن با افزایش ۸٪ نسبت به بتن شاهد همراه است و در مقادیر بیشتر از ۱۵٪ ژئولیت مقاومت فشاری روند کاهشی پیدا می‌کند. با مقایسه این شکل با شکل‌های ۶، (ب) و ۷، (ج) مشاهده می‌شود که در بتن حاوی ۱۵٪ ژئولیت مقاومت فشاری بهبود یافته است و در باقی حالات روند کسب مقاومت یکسان است. بنابراین بیشترین مقاومت فشاری ۹۰ روزه در بتن حاوی ۱۵٪ ژئولیت کسب شده است. بر اساس این شکل با افزودن دوده‌سیلیس به میزان ۱۰، ۲۰، ۳۰٪ به بتن، مقاومت فشاری ۹۰ روزه به ترتیب ۱۹، ۲۵ و ۳۱٪ افزایش یافته است. در شکل ۹ یکی از نمونه‌های شکسته شده طرح بتن ۴ مولار ۲۰٪ دوده‌سیلیس نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است بتن از سنگدانه شکسته شده است و نشان دهنده عملکرد مناسب این بتن‌ها در فشار است.





شکل ۸- تاثیر جایگزینی پوزولان روی مقاومت فشاری ۹۰ روزه برای طرح‌های (الف) ۴، (ب) ۶ و (ج) ۸ مولار

در شکل ۸، (ب) مقاومت فشاری ۹۰ روزه طرح‌های ۶ مولار با مقادیر مختلف ژئولیت و دوده سیلیس ارائه شده است. بر اساس این شکل مشاهده می‌گردد به غیر از نمونه حاوی ۱۵٪ ژئولیت در بقیه حالات مقاومت فشاری با کاهش همراه است. بر اساس شکل فوق با افزودن دوده سیلیس به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ به بتن، مقاومت فشاری ۹۰ روزه به ترتیب ۳، ۱۰ و ۱۶٪ افزایش یافته است. بر اساس شکل ۸، (ج) که نتایج مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن ۸ مولار با ژئولیت و دوده سیلیس را نشان می‌دهد. با اضافه کردن ۱۰٪ ژئولیت به بتن ۸ مولار مقاومت فشاری آن نسبت به نمونه شاهد با ۱٪ کاهش همراه بوده اما در بتن‌های حاوی ۱۵ و ۲۰٪ ژئولیت مقاومت بتن افزایش یافته است. همچنین بیشترین کاهش مقاومت در بتن حاوی ۳۰٪ ژئولیت به دست آمده است. مطابق با طرح‌های با غلظت ۴ و ۶ مولار در بتن با غلظت ۸ مولار نیز افزایش مقاومت با اضافه کردن دوده سیلیس ادامه دارد.



شکل ۹- نمونه ۹۰ روزه شکسته شده ۴ مولار با ۲۰٪ دوده سیلیس

در شکل ۸ روند تغییرات مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن با غلظت و مقادیر مختلف ژئولیت و دوده سیلیس قابل مشاهده است. در این شکل تأثیر افزایش مقاومت فشاری در اثر افزایش میزان ژئولیت در بتن در دراز مدت قابل مشاهده است. حتی در بتن با غلظت ۸ مولار با اضافه کردن ۲۰٪ ژئولیت مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. بنابراین می توان گفت که استفاده از مقادیر بالای ژئولیت موجب افزایش مقاومت دراز مدت در بیشتر طرح ها شده است؛ اما افزایش غلظت بتن از ۶ به ۸ مولار موجب کاهش بیشتر مقاومت فشاری ۹۰ روزه گردید. همان طوری که نشان داده شده است افزودن دوده سیلیس به نمونه بتنی باعث افزایش مقاومت فشاری بتن در دراز مدت می شود به طوری که در طرح های با غلظت ۴ و ۶ مولار این افزایش مقاومت بسیار بیشتر مشاهده شد. همچنین بیشترین مقاومت فشاری در بتن ۴ مولار حاوی ۱۰٪ دوده سیلیس کسب شده است که نسبت به بتن شاهد ۳۱٪ افزایش یافته است. با مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه و ۹۰ روزه بتن ۴ مولار حاوی ۳۰٪ دوده سیلیس به خوبی مشخص است که مقاومت فشاری در این بازه زمانی ۲۸٪ افزایش یافته است.

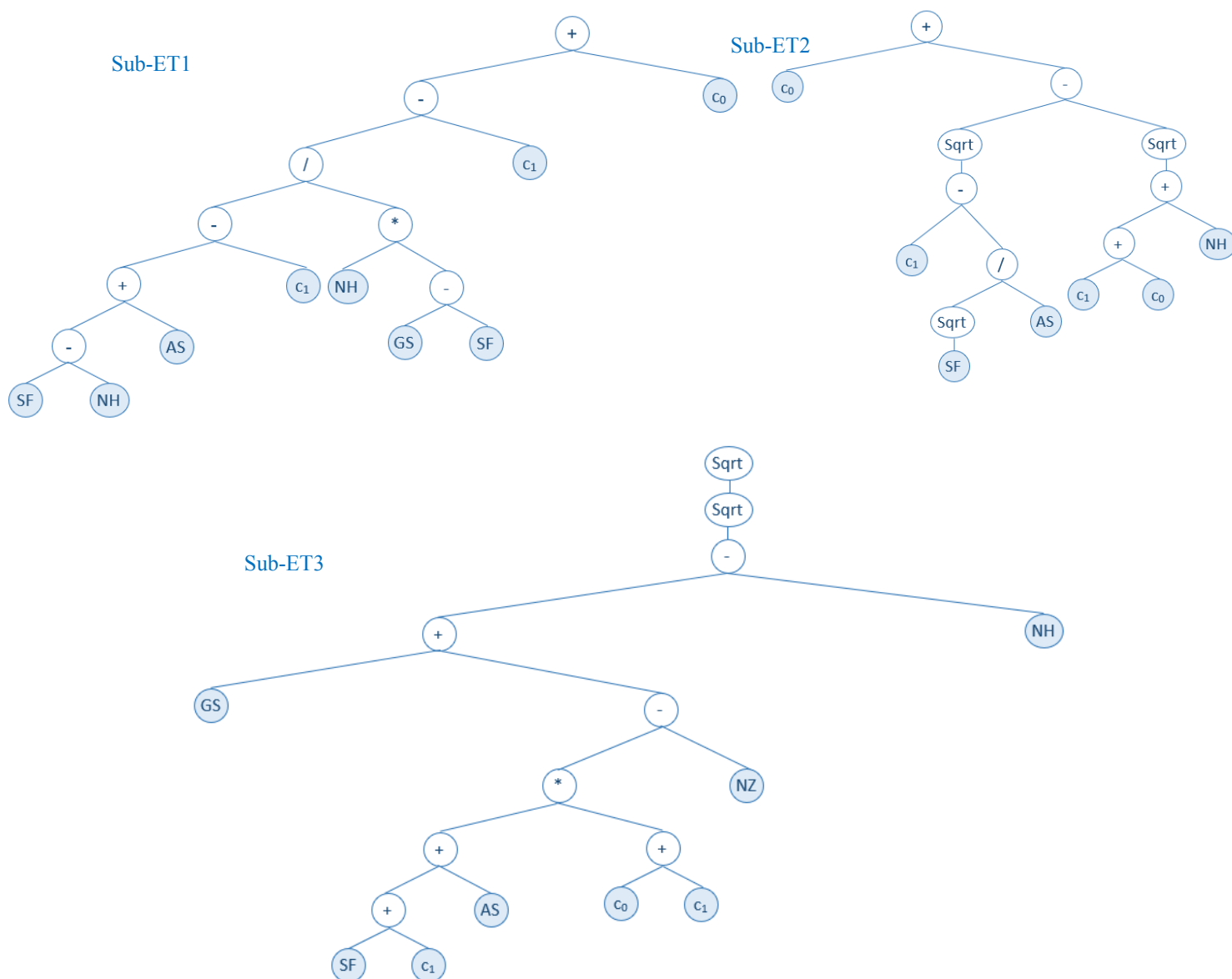
باخارف و همکاران [۵۲] با بررسی بتن در غلظت های ۴، ۶ و ۸ مولار و نسبت وزنی محلول قلیایی فعال کننده به سرباره در سطوح ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۴۵ و نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم در سطوح ۱، ۳ و ۵ به این نتیجه رسیدند که با زیاد شدن غلظت محلول از ۴ به ۶ مولار، مقاومت فشاری در تمامی سنین افزایش و از ۶ به ۸ مولار با کاهش همراه می یابد؛ اما در این تحقیق در اکثر طرح ها مقاومت فشاری بتن ۴ مولار از بتن با غلظت ۶ مولار بیشتر شده و مقاومت فشاری بتن ۶ مولار از مقاومت فشاری بتن ۸ مولار بیشتر شده است. می توان علت این اختلاف را در نرمی بلین سرباره دانست. نرمی بلین سرباره مورد استفاده در آن پژوهش ۳۸۰۰ سانتی متر مربع بر گرم بوده در حالی که نرمی بلین سرباره مورد استفاده در این تحقیق ۴۵۰۰ سانتی متر مربع بر گرم بود. به عبارتی می توان این طور بیان کرد که در غلظت های بالاتر، هرچه نرمی بلین سرباره افزایش یابد، مقاومت فشاری کمتری حاصل می شود.

با توجه به نتایج، بهترین طرح مقاومت فشاری ۹۰ روزه در بین طرح های ۴، ۶ و ۸ مولار با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد ژئولیت و دوده سیلیس مشاهده می شود. براساس نتایج حاصله، طرح ۶ مولار حاوی ۱۵٪ ژئولیت طرح بهینه است که البته طرح ۴ مولار با ۱۵٪ ژئولیت نیز به دلیل اختلاف کمتر از ۱٪ می تواند به عنوان طرح بهینه محسوب گردد و بتن ۴ مولار با ۳۰٪ دوده سیلیس طرح بهینه است؛ بنابراین در مقاومت فشاری ۹۰ روزه می توان نتیجه گرفت که در بین طرح های حاوی ژئولیت و دوده سیلیس، دوده سیلیس می تواند عملکرد بهتری را در مقاومت فشاری داشته باشد و اختلاف بین طرح بهینه بتن حاوی ژئولیت و دوده سیلیس ۲۰٪ است. بر این اساس مشخص است که تأثیر افزودن دوده سیلیس در افزایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره نسبت به ژئولیت بیشتر است.

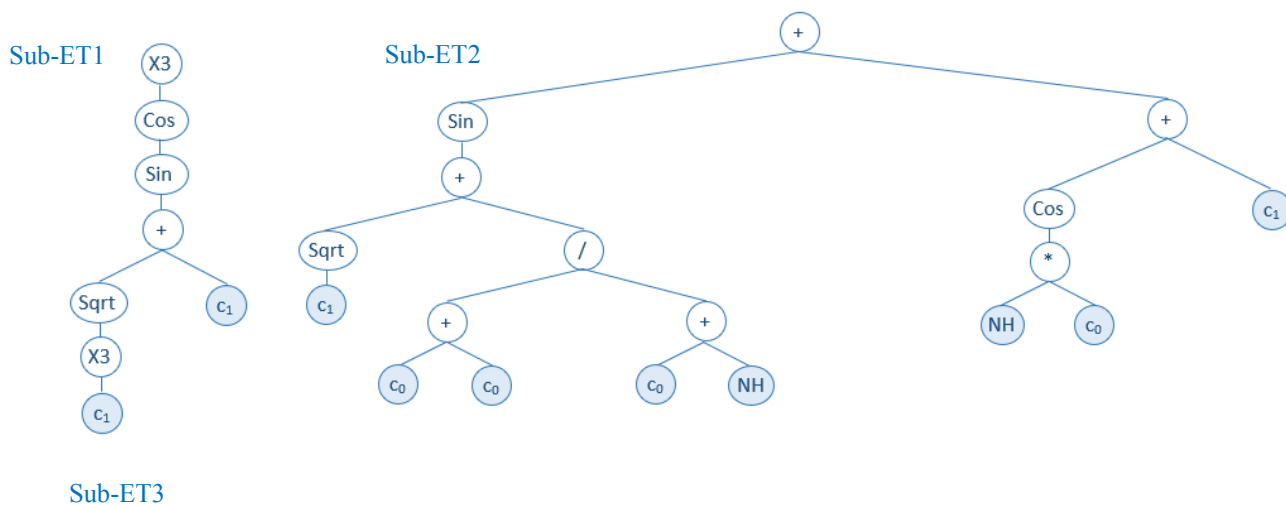
۴-۲- نتایج مدل سازی

۴-۲-۱- فرمول پیش بینی

معادلات بدست آمده از GEP2 و GEP16 برای پیش بینی مقاومت فشاری، به عنوان بهترین مدل های GEP در عملکرد محاسباتی، در شکل ۱۰ و ۱۱ در فرم درختان بیان (ET) ارائه شده است. این دو مدل بر اساس عملکردشان از بین ۲۰ مدل انتخاب شدند که عملکرد آنها بر اساس بیشترین ضریب تعیین و کمترین میزان خطاها مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر ضریب تعیین و خطاها برای تمامی مدل ها در جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- درختان بیان مدل GEP2



۴-۲-۲- ارزیابی عملکرد مدل‌ها

مقادیر خطای آماری مراحل آموزش و اعتبارسنجی مدل‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. اگر مقادیر R^2 بالای ۰/۷ باشد، نتایج پیش‌بینی شده به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌شوند و هرچه مقدار R^2 به ۱ نزدیک‌تر باشد، دقت پیش‌بینی بالاتر می‌رود. همچنین، R^2 میزان سازگاری تابع تعریف شده حاکم بر داده‌ها را نشان می‌دهد، به این ترتیب که R^2 بالاتر در مرحله آموزش نشانه سازگاری عالی در عملکرد نهایی است. با این حال، عدم در نظر گرفتن داده‌های مرحله اعتبارسنجی ممکن است به انحراف مدل منجر شود. در نتیجه، یک اختلاف قابل توجه بین خطاهای آموزش و اعتبارسنجی رخ می‌دهد، در نهایت منجر به مقادیر رگرسیون بالاتر در هر دو مجموعه آموزشی و اعتبارسنجی مورد بررسی می‌شود.

مدل‌های پیچیده معمولاً به دلیل داشتن تعداد بیشتری آزمایش و نسل به مقادیر بالاتر منجر می‌شوند بنابراین، پیچیدگی پایین‌تر به عنوان یک هدف در نظر گرفته شد. در مدل‌های ارائه شده، مقدار R^2 در بیشتر موارد در آموزش نسبت به مرحله اعتبارسنجی بیشتر بود. مقادیر R^2 برای پیش‌بینی مقاومت فشاری در مجموعه آموزش ۰/۸۸۰ تا ۰/۹۲۹ و در مجموعه اعتبارسنجی از ۰/۷۷۰ تا ۰/۹۴۰ متغیر است. اختلاف آماری جزئی بین نتایج آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده وجود دارد. بنابراین، همه مدل‌ها می‌توانند برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری پوزولانی استفاده شوند.

علاوه بر این، با افزایش خطاهای MAE، RMSE، RAE و RRSE عملکرد مدل‌ها کاهش می‌یابد. در چندین مدل، مقادیر RMSE، RAE، MAE و RRSE در مرحله آموزش نسبت به اعتبارسنجی بیشتر است. با افزایش خطا، عملکرد مدل کاهش می‌یابد. از این رو، مقادیر خطای بالاتر GEP7 حاکی از کاهش عملکرد آن است. از طرف دیگر، GEP16 کمترین خطای بررسی شده در هر دو مجموعه آموزش و اعتبارسنجی را داشت. می‌توان نتیجه گرفت که مدل دوم نسبت به مدل‌های قبلی دقت پیش‌بینی بیشتری را نشان می‌دهد.

حداقل و حداکثر مقادیر RMSE در مدل‌ها به ترتیب ۲/۸۵۵ و ۴/۶۲۹ برای GEP18 و GEP7 در مرحله اعتبارسنجی بود. اگرچه، اختلاف کمی بین حداقل و حداکثر مشاهده شد. کمترین مقدار MAE برای مرحله آموزش GEP3 ۲/۰۴۶ بود، در حالی که حداکثر مقدار آن ۳/۷۴۹ و در مرحله اعتبارسنجی GEP7 بود. علاوه بر این، جزئیات سایر خطاهای آماری به طور مناسب در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- پارامترهای آماری مدل‌های پیش‌بینی مقاومت فشاری

Models	Phase	MAE	RMSE	RAE	RRSE	R^2	Models	Phase	MAE	RMSE	RAE	RRSE	R^2
GEP1	Training	2.645	3.428	0.295	0.312	0.903	GEP11	Training	2.291	3.157	0.253	0.286	0.921
	Validation	3.151	4.027	0.373	0.382	0.860		Validation	3.206	4.029	0.401	0.398	0.849
GEP2	Training	2.399	3.033	0.279	0.287	0.918	GEP12	Training	2.267	3.013	0.251	0.272	0.926
	Validation	2.766	3.297	0.281	0.272	0.940		Validation	2.841	3.905	0.349	0.389	0.855
GEP3	Training	2.628	3.527	0.288	0.313	0.904	GEP13	Training	2.650	3.271	0.308	0.309	0.906
	Validation	2.046	2.926	0.267	0.316	0.929		Validation	2.988	4.076	0.296	0.338	0.886
GEP4	Training	2.484	3.503	0.267	0.312	0.907	GEP14	Training	2.353	3.060	0.268	0.278	0.925
	Validation	2.744	3.166	0.389	0.334	0.896		Validation	2.805	3.771	0.322	0.373	0.863
GEP5	Training	2.604	3.664	0.279	0.325	0.899	GEP15	Training	2.751	3.306	0.311	0.306	0.909
	Validation	3.122	3.802	0.455	0.424	0.842		Validation	2.945	3.943	0.331	0.350	0.883
GEP6	Training	2.538	3.359	0.281	0.305	0.908	GEP16	Training	2.342	2.969	0.267	0.278	0.924
	Validation	3.043	3.939	0.375	0.382	0.861		Validation	2.834	3.167	0.306	0.270	0.934
GEP7	Training	2.877	3.800	0.320	0.347	0.880	GEP17	Training	2.673	3.301	0.305	0.303	0.909
	Validation	3.749	4.629	0.439	0.433	0.856		Validation	2.543	3.230	0.309	0.329	0.893
GEP8	Training	2.604	3.306	0.289	0.303	0.908	GEP18	Training	2.491	3.341	0.274	0.297	0.913
	Validation	2.610	3.246	0.312	0.301	0.925		Validation	2.454	2.855	0.314	0.318	0.904
GEP9	Training	2.546	3.362	0.297	0.323	0.896	GEP19	Training	2.415	3.076	0.257	0.268	0.929
	Validation	3.011	3.655	0.304	0.300	0.924		Validation	3.152	3.918	0.466	0.485	0.770
GEP10	Training	2.748	3.726	0.313	0.346	0.881	GEP20	Training	2.506	3.222	0.281	0.297	0.913
	Validation	2.934	3.614	0.344	0.328	0.895		Validation	3.232	3.984	0.364	0.363	0.940

همچنین مقادیر ورودی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط توسط بهترین مدل‌ها و نتایج آزمایشگاهی مربوطه در جدول ۶ آورده شده و مقایسه می‌شوند. همانطور که مشاهده می‌شود، GEP2 و GEP16 نتایج نزدیک‌تر به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند.

جدول ۶- مقایسه بین نتایج مدل‌سازی و نتایج آزمایشگاهی مجموعه اعتبار سنجی

AS (day)	NaOH (M)	NZ (%)	SF (%)	GGBS (kg)	Exp.	GEP2	GEP16
7	4	0	0	379.31	51.75	55.30	54.46
7	4	94.83	0	284.48	49.38	49.04	48.96
7	4	0	113.79	265.52	70.5	73.22	71.56
7	6	56.9	0	322.41	55.5	49.05	50.50
7	6	0	37.93	341.38	59.93	57.80	59.24
7	8	56.9	0	322.41	49.9	46.46	46.99
7	8	0	18.97	360.34	50.67	51.97	52.12
28	4	37.93	0	341.38	62.5	59.50	59.44
28	4	75.86	0	303.45	60.5	57.72	57.21
28	4	0	94.83	284.48	78.25	78.05	76.16
28	6	0	0	379.31	54.83	57.79	59.86
28	6	0	56.9	322.41	66.11	66.81	68.32
28	8	113.79	0	265.52	51.7	49.82	49.81
28	8	0	37.93	341.38	65.33	60.41	60.12
90	4	18.97	0	360.34	70.46	72.83	71.73
90	4	94.83	0	284.48	67.82	71.14	67.27
90	4	0	56.9	322.41	85.69	81.82	82.05
90	4	0	113.79	265.52	90.11	93.52	89.87
90	6	0	37.93	341.38	74.47	73.72	75.90
90	8	56.9	0	322.41	64.51	63.82	61.41
90	8	0	18.97	360.34	64.33	67.24	66.54
90	8	0	75.86	303.45	70.03	73.79	73.39
90	8	0	113.79	265.52	72.08	78.97	77.40

بر اساس نتایج، می‌توان گفت که برنامه نویسی بیان ژن یک رویکرد مناسب برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری سازگار با محیط زیست است.

۵- نتیجه گیری

هدف از انجام این مطالعه، ارائه مدل‌های دقیق برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری پوزولانی می‌باشد که با در نظر گرفتن مصالح استفاده شده و روش ساخت این مدل‌ها، این موضوع، یک مسئله جدید در تهیه مدل‌های پیش‌بینی مقاومت بتن می‌باشد. لذا، در این تحقیق، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری سازگار با محیط زیست بر پایه سرباره حاوی زئولیت طبیعی و دوده سیلیس برای اولین بار توسط برنامه نویسی بیان ژن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اصلی به شرح زیر می‌باشد:

- استفاده از زئولیت و دوده سیلیس در بتن ژئوپلیمری باعث کاهش شدید اسلامپ می‌شود که اثر کاهشی دوده-سیلیس بسیار محسوس‌تر است. همچنین مشاهده شد که کارایی بتن با غلظت ۴ مولار نسبت به طرح‌های با غلظت ۶ و ۸ مولار بهتر بوده و بتن دیرتر به مرحله سخت‌شدن می‌رسد. به عبارت دیگر هرچه غلظت هیدروکسید سدیم افزایش یابد، مقدار اسلامپ به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند و نیاز به فوق‌روان‌کننده در این بتن‌ها بیشتر احساس می‌شود. مشاهده شد که در بتن با غلظت ۴ مولار می‌توان تا ۱۵٪ دوده سیلیس یا ۲۰٪ زئولیت بدون استفاده از فوق‌روان‌کننده جایگزین سرباره نمود. همچنین در طرح‌های با غلظت ۶ و ۸ مولار می‌توان از زئولیت به میزان ۱۰٪ و از دوده سیلیس به میزان ۱۵٪ بدون نیاز به فوق‌روان‌کننده استفاده نمود.

- در اکثر طرح‌های اختلاط با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از ۴ تا ۸ مولار مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی کاهش یافت. به عنوان مثال در بتن شاهد ۴ مولار مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۵۴ مگاپاسکال بوده و در بتن با غلظت ۸ این مقدار به ۵۳,۳۳ مگاپاسکال کاهش یافت.

- دوده‌سیلیس در افزایش مقاومت فشاری نسبت به ژئولیت تأثیر بیشتری دارد. افزودن دوده‌سیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن در دراز مدت نیز می‌شود. در بتن با غلظت ۴ مولار این افزایش مقاومت فشاری مشهودتر بوده است. به عنوان مثال اختلاف بین طرح بهینه مقاومت فشاری ۹۰ روزه حاوی ژئولیت و دوده‌سیلیس ۲۰٪ است.

- در اکثر طرح‌ها مقاومت فشاری بتن با افزایش درصد ژئولیت تا ۱۵٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش و سپس کاهش یافته است. اما با این حال در نمونه‌های حاوی ۱۰٪ ژئولیت بیشترین مقاومت فشاری حاصل شده است.

- طرح‌های بهینه حاوی ژئولیت برای مقاومت فشاری ۷ روزه طرح اختلاط بتن با غلظت ۴ مولار حاوی ۱۰٪ ژئولیت و برای طرح بهینه حاوی دوده‌سیلیس در طرح اختلاط بتن با غلظت ۶ مولار حاوی ۳۰٪ دوده‌سیلیس حاصل شده است.

- طرح‌های بهینه حاوی ژئولیت برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح اختلاط بتن با غلظت ۴ مولار حاوی ۱۰٪ ژئولیت و برای طرح بهینه حاوی دوده‌سیلیس در طرح اختلاط بتن با غلظت ۴ مولار حاوی ۳۰٪ دوده‌سیلیس حاصل شده است.

- طرح‌های بهینه حاوی ژئولیت برای مقاومت فشاری ۹۰ روزه طرح اختلاط بتن با غلظت ۶ مولار حاوی ۱۵٪ ژئولیت و برای طرح بهینه حاوی دوده‌سیلیس در طرح اختلاط بتن با غلظت ۴ مولار حاوی ۳۰٪ دوده‌سیلیس حاصل شده است.

- استفاده از ژئولیت به میزان ۱۰ الی ۱۵٪ باعث افزایش مقاومت در همه سنین می‌گردد. معمولاً تأثیر افزایش مقاومت در اثر افزایش میزان ژئولیت در دراز مدت قابل مشاهده است. به عبارت دیگر ژئولیت در روزهای اول مقاومت را به شدت کاهش می‌دهد. اما با گذشت زمان مقاومت خوبی در نمونه ایجاد می‌کند. به عنوان مثال در بتن با غلظت ۸ مولار با اضافه کردن ۲۰٪ ژئولیت مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونه شاهد ۹٪ کاهش یافته است. ولی مقاومت فشاری همین بتن در ۲۸ روز ۵٪ افزایش دارد.

- *GEP2* و *GEP16* به عنوان بهترین مدل‌های پیش‌بینی مقاومت فشاری معرفی شدند و شاخص‌های آماری آنها نشان دهنده برتری آن‌ها نسبت به مدل‌های دیگر است.

- تقریباً همه مدل‌ها نتایج خوبی نزدیک به نتایج آزمایشگاهی کسب کردند. همچنین، پارامترهای آماری (R^2 , $RMSE$, RAE و $RRSE$) توانایی برنامه نویسی بیان ژن را برای پیش‌بینی مقاومت فشاری نشان می‌دهند.

- سرانجام، برای اعتبارسنجی مدل‌های پیشنهادی، مقادیر پیش‌بینی شده از طرح‌های مختلف اختلاط (به صورت تصادفی) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند که اختلاف اندک بین مقادیر پیش‌بینی شده و نتایج آزمایشگاهی، دقت بالای مدل‌ها را نشان می‌دهد.

۶- تقدیر و تشکر

کلیه آزمایش‌های این تحقیق با همکاری آزمایشگاه بتن دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه مازندران انجام شده است. نویسندگان این مقاله بدین وسیله از همکاری عوامل یاد شده تقدیر و تشکر می‌نمایند.

- [1] Hassan HS, Abdel-Gawwad H, Vásquez-García S, Israde-Alcántara I, Flores-Ramirez N, Rico J, Mohammed MS (2019). Cleaner production of one-part white geopolymers using pre-treated wood biomass ash and diatomite. *Journal of Cleaner Production* 209:1420-1428.
- [2] Kocak Y, Tasci E, Kaya U (2013). The effect of using natural zeolite on the properties and hydration characteristics of blended cements. *Construction and Building Materials* 47:720-727.
- [3] Metz B, Davidson O, De Coninck H (2005) Carbon dioxide capture and storage: special report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.
- [4] Taylor M, Tam C, Gielen D (2006). Energy efficiency and CO₂ emissions from the global cement industry. *Korea* 50 (2.2):61.67.
- [5] Yang K-H, Song J-K, Song K-I (2013). Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete. *Journal of Cleaner Production* 39:265-272.
- [6] Ávalos-Rendón TL, Chelala EAP, Escobedo CJM, Figueroa IA, Lara VH, Palacios-Romero LM (2018). Synthesis of belite cements at low temperature from silica fume and natural commercial zeolite. *Materials Science and Engineering: B* 229:79-85.
- [7] Pacheco-Torgal F, Abdollahnejad Z, Camões A, Jamshidi M, Ding Y (2012). Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over Portland cement or an unproven issue? *Construction and Building Materials* 30:400-405.
- [8] Samimi K, Kamali-Bernard S, Maghsoudi AA, Maghsoudi M, Siad H (2017). Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes. *Construction and Building Materials* 151:292-311.
- [9] Khale D, Chaudhary R (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Materials Science* 42 (3):729-746.
- [10] Davidovits J (2008) Geopolymer chemistry and applications. Geopolymer Institute.
- [11] Duxson P, Provis JL, Lukey GC, Van Deventer JS (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cement and Concrete Research* 37 (12):1590-1597.
- [12] Sarker PK (2009). Analysis of geopolymer concrete columns. *Materials and Structures* 42 (6):715-724.
- [13] Pile P (2013). What is expanding PowerPile geopolymer pillar? PowerPile Pillars, Accessed November 26:2016.
- [14] Shrestha P (2014). Development of geopolymer concrete for precast structures.
- [15] Cristelo N, Glendinning S, Miranda T, Oliveira D, Silva R (2012). Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed earth construction. *Construction and Building Materials* 36:727-735.
- [16] Cristelo N, Glendinning S, Fernandes L, Pinto AT (2013). Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation. *Acta Geotechnica* 8 (4):395-405.
- [17] Zhang M, Guo H, El-Korchi T, Zhang G, Tao M (2013). Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Construction and Building Materials* 47:1468-1478.
- [18] Komljenović M, Bašćarević Z, Bradić V (2010). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. *Journal of Hazardous Materials* 181 (1-3):35-42.
- [19] Tennakoon C, Nazari A, Sanjayan JG, Sagoe-Crentsil K (2014). Distribution of oxides in fly ash controls strength evolution of geopolymers. *Construction and Building Materials* 71:72-82.

- [20] Xu H, Van Deventer J (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing* 59 (3):247-266.
- [21] Hardjito D, Rangan BV (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete.
- [22] Kong DL, Sanjayan JG (2008). Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites* 30 (10):986-991.
- [23] Al Bakri AMM, Kareem OAA, Myint S (2009). Study on the effect of alkaline activators ratio in preparation of fly ash-based geopolymer.
- [24] Leong HY, Ong DEL, Sanjayan JG, Nazari A (2016). The effect of different Na₂O and K₂O ratios of alkali activator on compressive strength of fly ash based-geopolymer. *Construction and Building Materials* 106:500-511.
- [25] Naderpour H, Nagai K, Fakharian P, Haji M (2019). Innovative models for prediction of compressive strength of FRP-confined circular reinforced concrete columns using soft computing methods. *Composite Structures* 215:69-84.
- [26] Naderpour H, Nagai K, Haji M, Mirrashid M (2019). Adaptive neuro-fuzzy inference modelling and sensitivity analysis for capacity estimation of fiber reinforced polymer-strengthened circular reinforced concrete columns. *Expert Systems*:e12410.
- [27] Naderpour H, Alavi S (2017). A proposed model to estimate shear contribution of FRP in strengthened RC beams in terms of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Composite Structures* 170:215-227.
- [28] Naderpour H, Mirrashid M, Nagai K (2019). An innovative approach for bond strength modeling in FRP strip-to-concrete joints using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Engineering with Computers*:1-18.
- [29] Naderpour H, Rafiean AH, Fakharian P (2018). Compressive strength prediction of environmentally friendly concrete using artificial neural networks. *Journal of Building Engineering* 16:213-219.
- [30] Prasad BR, Eskandari H, Reddy BV (2009). Prediction of compressive strength of SCC and HPC with high volume fly ash using ANN. *Construction and Building Materials* 23 (1):117-128.
- [31] Kooshkaki A, Eskandari-Naddaf H (2019). Effect of porosity on predicting compressive and flexural strength of cement mortar containing micro and nano-silica by multi-objective ANN modeling. *Construction and Building Materials* 212:176-191.
- [32] Ahmadi M, Naderpour H, Kheyroddin A (2014). Utilization of artificial neural networks to prediction of the capacity of CCFT short columns subject to short term axial load. *Archives of civil and mechanical engineering* 14 (3):510-517.
- [33] Naderpour H, Kheyroddin A, Amiri GG (2010). Prediction of FRP-confined compressive strength of concrete using artificial neural networks. *Composite Structures* 92 (12):2817-2829.
- [34] Hosseini G (2017). Capacity Prediction of RC Beams Strengthened with FRP by Artificial Neural Networks Based on Genetic Algorithm. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering* 1 (1):93-98.
- [35] Mahdinia S, Eskandari-Naddaf H, Shadnia R (2019). Effect of cement strength class on the prediction of compressive strength of cement mortar using GEP method. *Construction and Building Materials* 198:27-41.
- [36] Emamian SA, Eskandari-Naddaf H (2019). Effect of porosity on predicting compressive and flexural strength of cement mortar containing micro and nano-silica by ANN and GEP. *Construction and Building Materials* 218:8-27.

- [37] Shahmansouri AA, Bengar HA, Jahani E (2019). Predicting compressive strength and electrical resistivity of eco-friendly concrete containing natural zeolite via GEP algorithm. *Construction and Building Materials* 229:116883.
- [38] Ebtehaj I, Bonakdari H (2017). No-deposition sediment transport in sewers using gene expression programming. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering* 1 (1):29-53.
- [39] Fakharian P, Naderpour H, Haddad A, Rafiean A, Eidgahee D (2018). A proposed model for compressive strength prediction of FRP-confined rectangular column in terms of Genetic expression Programming (GEP). *Concrete Research*.
- [40] Ferreira C (2006) *Gene expression programming: mathematical modeling by an artificial intelligence*, vol 21. Springer.
- [41] Elhakam AA, Mohamed AE, Awad E (2012). Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials* 35:421-427.
- [42] ASTM (2019) C618-19: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [43] ASTM (2013) C33-13: Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International, Philadelphia, PA.
- [44] ASTM (2015) C127-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [45] ASTM (2015) C143-15a: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International, Philadelphia, PA.
- [46] ASTM C192 / C192M - 18 (2018). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM International.
- [47] BSI (2009) BS EN 12390-3: Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens. British Standard Institution, London.
- [48] Ferreira C (2001). Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *arXiv preprint cs/0102027*.
- [49] Ferreira C (2002) Gene expression programming in problem solving. In: *Soft Computing and Industry*. Springer, pp 635-653.
- [50] Ferreira C (2006) Automatically defined functions in gene expression programming. In: *Genetic Systems Programming*. Springer, pp 21-56.
- [51] Yang K-H, Cho A-R, Song J-K, Nam S-H (2012). Hydration products and strength development of calcium hydroxide-based alkali-activated slag mortars. *Construction and Building Materials* 29:410-419.
- [52] Bakharev T, Sanjayan JG, Cheng Y-B (1999). Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research* 29 (1):113-120.