

Three-objective Optimization of Mechanical and Durability Properties of Geopolymer Cement Pastes using NSGA-III Algorithm and Comparison with Portland Cement

Ali Eslamifar¹, Amir Ramezani², Faramarz Moodi^{3*}

1. Master's Student, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2. Master's Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

3. Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 31 January 2025 Revised: 02 April 2025 Accepted: 03 April 2025

Research paper

Abstract

Considering the environmental challenges associated with Portland cement production, developing and enhancing the properties of geopolymer cement as a sustainable alternative has attained significant attention. This study investigates the three-objective optimization of mechanical and durability properties of geopolymer cement paste, including 28-day compressive strength, carbonation depth, and capillary water absorption, using the NSGA-III algorithm. Experimental data from 27 different geopolymer mixtures, produced using calcined clay, slag, and three activators (sodium hydroxide (NO), sodium carbonate (NC), and sodium silicate (WG)), served as inputs. The three decision variables in this study are the type of activator, the ratio of activator solution to precursor material, and the percentage replacement of calcined clay with slag. Through multi-objective optimization, four optimal mixtures were extracted from the experimental data. In all combinations, the ratio of solid activator solution to precursor material was determined to be 0.1. The first mixture, containing sodium hydroxide with 1.5% calcined clay replacement, exhibited a compressive strength of 25.05 MPa, carbonation depth of 10.58 mm, and capillary water absorption of 938×10^{-7} (mm/s^{0.5}). The second mixture, with similar characteristics but 1% calcined clay replacement, demonstrated the lowest carbonation depth of 10.07 mm. The third mixture, containing sodium silicate, recorded the highest compressive strength of 63.35 MPa and the lowest capillary water absorption of 195×10^{-7} (mm/s^{0.5}). This composition showed superior performance due to its denser structure and optimized geopolymerization reactions. The fourth mixture, containing sodium hydroxide with 2% calcined clay replacement, exhibited a compressive strength of 25.50 MPa and capillary water absorption of 948×10^{-7} (mm/s^{0.5}). Compared to ordinary Portland cement, the optimized geopolymer mixtures provided desirable performance in certain aspects, particularly in compressive strength and carbonation resistance. However, their capillary water absorption remained higher.

Keywords: Geopolymer, Three-objective Optimization, NSGA-III, Compressive Strength, Durability, Carbonation

*Corresponding Author: Faramarz Moodi

Eslamifar A., Ramezani A., Moodi F. Three-objective optimization of mechanical and durability properties of geopolymer cement pastes using NSGA-III algorithm and comparison with Portland cement. *J. Concr. Struct. Mater.*,

2024; 9(2):7-22. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2025.503687.1383>

2538-5828/ © 2025The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



بهینه‌سازی سه‌هدفه خواص مکانیکی و دوامی خمیر سیمان‌های ژئوپلیمری با استفاده از الگوریتم NSGA-III و مقایسه با سیمان پرتلند

علی اسلامی^۱، امیر رضانی^۲، فرامرز مودی^{۳*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
 ۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
 ۳. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
- تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید سیمان پرتلند، توسعه و بهبود خواص سیمان‌های ژئوپلیمری به عنوان جایگزینی پایدار، مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، بهینه‌سازی سه‌هدفه خواص مکانیکی و دوام خمیر سیمان‌های ژئوپلیمری، شامل مقاومت فشاری ۲۸ روزه، عمق نفوذ کربناسیون و جذب آب مویینه، با استفاده از الگوریتم NSGA-III مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های آزمایشگاهی شامل ۲۷ مخلوط ژئوپلیمری که با استفاده از رس کلسینه، سرباره و سه محلول فعال ساز مختلف (سدیم هیدروکسید (NO)، سدیم کربنات (NC) و سدیم سیلیکات (WG)) تولید شده بودند، به‌عنوان ورودی استفاده شدند. سه متغیر تصمیم در این پژوهش عبارتند از نوع ماده فعال‌ساز، نسبت محلول فعال‌ساز به ماده پایه و درصد جایگزینی رس کلسینه با سرباره می‌باشند. با بهینه‌سازی چندهدفه چهار ترکیب بهینه از میان داده‌های آزمایشگاهی استخراج گردید. در همه ترکیبات نسبت جامد محلول فعال‌ساز به ماده پایه برابر با ۰٫۱ بدست آمده است. ترکیب اول حاوی سدیم هیدروکسید با ۱٫۵ درصد جایگزینی رس کلسینه بوده و مقاومت فشاری ۲۵٫۰۵ مگاپاسکال، عمق نفوذ کربناسیون ۱۰٫۵۸ میلی‌متر و جذب آب مویینه $(\text{mm/s}^{0.5}) 938 \times 10^{-7}$ را نشان داده است. ترکیب دوم، با مشخصاتی مشابه ولی با ۱ درصد جایگزینی رس کلسینه، کمترین عمق نفوذ کربناسیون معادل ۱۰٫۰۷ میلی‌متر را داشته است. ترکیب سوم، حاوی سدیم سیلیکات، بیشترین مقاومت فشاری معادل ۶۳٫۳۵ مگاپاسکال و همچنین کمترین میزان جذب آب مویینه معادل $(\text{mm/s}^{0.5}) 195 \times 10^{-7}$ را ثبت کرده است. این ترکیب به دلیل ساختار متراکم‌تر و واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون بهینه، عملکرد بهتری نسبت به سایر ترکیبات داشته است. ترکیب چهارم حاوی سدیم هیدروکسید و با ۲ درصد جایگزینی رس کلسینه، مقاومت فشاری ۲۵٫۵۰ مگاپاسکال و جذب آب مویینه $(\text{mm/s}^{0.5}) 948 \times 10^{-7}$ را نشان داده است. در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی، ترکیبات ژئوپلیمری بهینه‌شده در برخی موارد، به‌ویژه در مقاومت فشاری و عمق نفوذ کربناسیون، عملکردی مطلوب ارائه نمودند. باین‌حال، میزان جذب آب مویینه در این ترکیبات بیشتر بوده است.

کلمات کلیدی: ژئوپلیمر، بهینه‌سازی سه‌هدفه، NSGA-III، مقاومت فشاری، دوام، سیمان پرتلند، رس کلسینه، کربناسیون

سیمان پرتلند به عنوان یک سیمان هیدرولیکی شناخته شده و مهم ترین جزء تشکیل دهنده بتن محسوب می شود. فرآیند تولید این نوع سیمان مقدار قابل توجهی کربن دی اکسید تولید می کند که منجر به آلودگی محیط زیست می شود. این چالش باعث شده است تا پژوهشگران به دنبال جایگزین های پایدار و سازگارتر با محیط زیست برای سیمان پرتلند باشند [۱]. در این میان، سیمان های ژئوپلیمری به عنوان یکی از گزینه های پیشنهادی مطرح شده اند. ژئوپلیمرها برای اولین بار در اوکراین توسط گلوخوسکی^۱ در دهه ۱۹۵۰ کشف شدند و در آن زمان به عنوان سیمان خاکی (Soil Cement) شناخته می شدند [۲]. در دهه ۱۹۷۰ میلادی دانشمند فرانسوی به نام جوزف دیویدویتز^۲ تحقیقات زیادی در مورد ساختار ژئوپلیمرها انجام داد و برای اولین بار اصطلاح ژئوپلیمر را برای این مواد استفاده و مفهوم ژئوپلیمر را ارائه کرد [۳-۵]. ژئوپلیمرها از طریق فعال سازی قلیایی مواد آلومینوسیلیکاتی تولید می شوند و از دو جزء اصلی ماده پایه و محلول فعال ساز قلیایی تشکیل شده اند. این مواد طی فرآیندی به نام ژئوپلیمریزاسیون سخت می شوند [۶]. با توجه به تحقیقات انجام شده، هیدروکسیدهای قلیایی مانند سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید و سیلیکات های قلیایی مانند سدیم سیلیکات و پتاسیم سیلیکات از متداول ترین و موثرترین فعال سازها برای ساخت ژئوپلیمرها می باشند [۷]. با توجه به پژوهش های انجام شده در این زمینه در بتن های ژئوپلیمری که در آن ها از فعال سازهای سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات استفاده شده است، بتن ژئوپلیمری ساخته شده خواص مکانیکی، دوام و ریز ساختار بهتری دارد [۸]. طبق تحقیقات امتیاز و همکاران (۲۰۲۰) ژئوپلیمرهایی که فقط از هیدروکسید به عنوان فعال ساز در ساخت آن ها استفاده شده است، دارای مشخصات مکانیکی ضعیف، تخلخل بالا و ترک های جمع شدگی می باشند [۹]. در نتیجه فرآیند ژئوپلیمریزاسیون وابسته به واکنش پذیری و غلظت فعال سازها می باشد به همین دلیل مقدار فعال سازها و نوع فعال ساز برای ساخت ژئوپلیمرها باید به دقت انتخاب شوند [۱۰، ۱۱].

مطالعات پیشین بر روی بتن های ژئوپلیمری نشان داده اند که ترکیب شیمیایی محلول فعال ساز، تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی این نوع بتن ها دارند. سرباره کوره آهنگدازی یکی از پرکاربردترین پوزولان های مصنوعی بوده که می تواند به عنوان ماده پایه با یک فعال ساز مناسب ترکیب شده و خمیر ژئوپلیمری تولید کند که خواص مکانیکی و دوامی مناسبی را برای ساخت ملات ها و بتن دارا است [۱۲]. با توجه به تحقیقات انجام شده توسط محققین، گزارش شده است که ریزساختار مواد ژئوپلیمری با پایه سرباره ترکیبی از نوعی ژل هیدرات سیلیکات کلسیم C-S-H و ژل آمورف C-(A)-S-H می باشد [۱۳]. مشاهده شده است که امکان جایگزینی بخشی از کلسیم (۲Ca+) موجود در ژل C-(A)-S-H با سدیم (Na+) وجود دارد و در ژئوپلیمر با پایه سرباره که توسط سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات فعال شده باشد ژل (N,C)-A-S-H تشکیل می شود [۱۴].

در این پژوهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه معیاری برای خواص مکانیکی خمیر سیمان ژئوپلیمری در نظر گرفته شده است و تحقیقات مختلف نشان داده اند که از ترکیبات مختلف ماده فعال ساز با سرباره کوره آهنگدازی مقاومت فشاری های متفاوتی حاصل می گردد که حتی از مقاومت سیمان پرتلند نیز بیشتر است برای مثال نتایج مقاومت فشاری ملات های ژئوپلیمری با پایه سرباره کوره آهنگدازی که با آب شیشه (سدیم سیلیکات) با نسبت های مختلف اکسید سیلیسیوم به اکسید سدیم توسط آیدین و بارادان^۳ (۲۰۱۴) فعال شده اند، مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات های ژئوپلیمری را تا ۸۰ مگاپاسکال نیز گزارش شده اند [۱۵]. همچنین علیابدو و همکاران^۴ (۲۰۱۹) نشان دادند که افزایش غلظت سدیم هیدروکسید و نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن های ژئوپلیمری با پایه سرباره می شود [۱۶].

¹ Glukhovskiy

² Joseph Davidovits

³ Aydın & Baradan

⁴ Aliabdo et al

نفوذپذیری یکی از عوامل مؤثر بر روی دوام یک ماده می‌باشد. برای تعیین نفوذپذیری از آزمایش‌های متعددی می‌توان استفاده کرد که یکی از آن‌ها، آزمایش جذب آب مویینه می‌باشد که در این پژوهش هم معیاری برای دوام خمیر سیمان‌های پلیمری در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج تحقیقات آیدین و بارادان (۲۰۱۴) مشاهده شده است که ملات ژئوپلیمری با پایه سرباره که با آب شیشه (سدیم سیلیکات) فعال شده است، نفوذپذیری بیشتری نسبت به ملات سیمان پرتلند معمولی دارد [۱۵].

پدیده کربناسیون یکی از دلایل اصلی خوردگی آرماتورها در بتن‌های متداول ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی می‌باشد. کربناسیون قلیائیت (pH) بتن را کاهش می‌دهد که این امر باعث از بین رفتن لایه محافظ و شروع خوردگی آرماتورها می‌شود [۱۷]. یکی دیگر از معیارهای دوام سیمان‌های ژئوپلیمری در نظر گرفته شده در این پژوهش عمق نفوذ کربناسیون خمیر سیمان‌های ژئوپلیمری می‌باشد. در ادامه تحقیقات انجام شده در این زمینه ارائه گشته است.

پورتاس و همکارانش^۵ (۲۰۰۶) بر روی کربناسیون ملات سیمان‌های ژئوپلیمری بر پایه سرباره تحقیق کرده‌اند. در این تحقیق ملات‌های ژئوپلیمری و ملات سیمان پرتلند معمولی با نسبت ۱:۲ سنگدانه به چسب تهیه شده‌اند و از آب شیشه و سدیم هیدروکسید به عنوان ماده فعالساز استفاده شده است. در این تحقیق مشاهده شده است که ملات سیمان پرتلند معمولی بعد از چهار ماه کربناسیون تقریباً ۲۶ درصد افزایش مقاومت داشته است ولی ملات ژئوپلیمری که با آب شیشه فعال شده است بعد از چهار ماه کربناسیون ۱۴ درصد کاهش مقاومت داشته است. ملات ژئوپلیمری فعال شده با سدیم هیدروکسید نیز رفتاری مشابه با ملات سیمان پرتلند معمولی داشته و در مدت چهار ماه کربناسیون، مقاومت فشاری آن افزایش یافته است [۱۸].

خوان هی و همکارانش^۶ (۲۰۲۰) در تحقیقاتشان مشاهده کرده‌اند که مقاومت فشاری ژئوپلیمرها با پایه سرباره با مقاومت آن‌ها در مقابل کربناسیون رابطه دارد. بتن ژئوپلیمری با پایه سرباره که مقاومت فشاری آن کمتر از ۳۰ مگاپاسکال باشد تحت کربناسیون شدید قرار می‌گیرند که این کربناسیون با کاهش مقاومت فشاری بتن همراه است در حالی که بتن‌های ژئوپلیمری با پایه سرباره که مقاومت فشاری آن‌ها بین ۳۰ مگاپاسکال تا ۵۰ مگاپاسکال باشد مقاومت بهتری در مقابل کربناسیون داشته، نرخ کربناسیون در آن‌ها ضعیف‌تر بوده و کاهش مقاومت قابل توجه در اثر کربناسیون در آن‌ها ایجاد نمی‌شود. بتن ژئوپلیمری با پایه سرباره که مقاومت فشاری آن بیشتر از ۵۰ مگاپاسکال باشد مقاومت بالایی در برابر فرآیند کربناسیون داشته و تحت اثر آن قرار نمی‌گیرد [۱۹].

شی و همکارانش^۷ (۲۰۱۸) بر روی تاثیر غلظت قلیا و مدول سیلیکات ماده فعالساز بر روی کربناسیون ملات‌های ژئوپلیمری با پایه سرباره تحقیق کردند. در این تحقیق بعد از هفت روز قرارگیری ملات ژئوپلیمری در معرض گاز کربن دی اکسید، عمق کربناسیون مشخص شده است. در این تحقیق گزارش شده است که غلظت قلیا بالا و مدول سیلیکات بالا در ماده فعالساز باعث افزایش قلیائیت مایع منفذی ملات‌های مورد مطالعه شده که می‌تواند مقاومت در برابر کربناسیون را افزایش دهد [۲۰].

با وجود دستاوردهای قابل توجه در توسعه ژئوپلیمرها و ارزیابی آزمایشگاهی دوام و مقاومت آن‌ها، چالش‌های مهمی همچنان پابرجا هستند. از جمله این چالش‌ها می‌توان به وجود اهداف غیرهمسو در طراحی ترکیبات ژئوپلیمری اشاره کرد. بهینه‌سازی دوام و خواص مکانیکی ژئوپلیمرها به‌طور هم‌زمان، نیازمند روش‌های دقیق و پیشرفته است که بتوانند تعادل میان اهداف مختلف را برقرار کنند. کاهش نفوذ کربناسیون و جذب آب مویینه، که نشان‌دهنده دوام بیشتر است، می‌تواند تأثیر منفی بر مقاومت فشاری داشته باشد. از این رو، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه ضروری به نظر می‌رسد [۲۱].

⁵ Portas et al

⁶ Juan He et al

⁷ Shi et al

در پژوهشی که توسط بین چن و همکارانش^۸ انجام شده است یک چارچوب هوشمند ترکیبی مبتنی بر جنگل تصادفی (RF^۹) که یک الگوریتم یادگیری ماشین مبتنی بر روش درخت می‌باشد با الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نسخه دوم (NSGA-II^{۱۰}) توسعه دادند تا دوام بتن را پیش‌بینی کرده و نسبت اختلاط بتن را بهینه‌سازی کنند. نتایج نشان داد که این چارچوب می‌تواند به‌طور مؤثر دوام بتن را پیش‌بینی کرده و نسبت اختلاط را بهینه کند. پس از بهینه‌سازی، دوام بتن به استاندارد بالایی رسید؛ مقاومت در برابر یخ‌زدگی بیش از ۹۵٪ و ضریب نفوذ یون کلرید کمتر از $3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ بود [۲۲].

در این پژوهش، از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده توسط رضانی و همکاران (۲۰۲۴) بر روی ۲۷ ترکیب ژئوپلیمری، که با استفاده از سرباره و رس کلسینه به‌عنوان ماده پایه و محلول‌های قلیایی مختلف فعال شده‌اند، بهره‌گرفته شده است [۲۳]. با این حال، تحلیل و استفاده بهینه از این داده‌ها، به‌گونه‌ای که بتوان به ترکیباتی با ویژگی‌های بهینه دست یافت، نیازمند بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته بهینه‌سازی است. یکی از ابزارها در این زمینه، الگوریتم NSGA-III^{۱۱} است که به‌عنوان یک روش بهینه‌سازی چندهدفه پیشرفته، امکان یافتن جنبه پارتو را فراهم می‌کند [۲۴]. این الگوریتم با حفظ تنوع در فضای جستجو و ایجاد تعادل میان اهداف متضاد، انتخاب ترکیباتی را امکان‌پذیر می‌سازد که هم‌زمان از مقاومت فشاری بالا و دوام مطلوب در برابر نفوذ کربناسیون و جذب آب موئینه برخوردار باشند. لزوم بهینه‌سازی در این پژوهش، ناشی از پیچیدگی تأثیر متغیرهایی همچون نوع ماده فعال‌ساز، درصد فعال‌ساز و میزان جایگزینی رس کلسینه بر ویژگی‌های مکانیکی و دوامی ژئوپلیمرها است.

۲. روش پژوهش

در این پژوهش، با هدف دستیابی به ترکیب بهینه خمیر سیمان ژئوپلیمری، تمرکز بر بهینه‌سازی مقاومت فشاری ۲۸ روزه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های مکانیکی و کمینه‌سازی میزان جذب آب موئینه و عمق نفوذ کربناسیون به‌عنوان شاخص‌های دوامی صورت گرفته است. با توجه به امکان تأثیر منفی این اهداف بر روی هم نیازمند استفاده از رویکردهای پیشرفته بهینه‌سازی چندهدفه است که امکان ایجاد تعادل میان اهداف مختلف را فراهم کند. افزایش مقاومت فشاری معمولاً با کاهش تخلخل همراه است، اما این کاهش تخلخل می‌تواند بر فرآیندهای انتقالی مانند نفوذ آب و گازها تأثیر بگذارد. از سوی دیگر، کاهش عمق نفوذ کربناسیون نیازمند حفظ قلیائیت بالای خمیر است که می‌تواند بر برخی ویژگی‌های مکانیکی و ریزساختاری اثر بگذارد. به همین دلیل، بهینه‌سازی این خواص به‌طور هم‌زمان چالش‌برانگیز است و نیاز به استفاده از روش‌های پیشرفته‌ای دارد که بتوانند تعادل مناسبی میان این ویژگی‌ها برقرار کنند.

برای این منظور، الگوریتم NSGA-III به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه انتخاب شده است. این الگوریتم، که نسخه‌ای توسعه‌یافته از NSGA-II محسوب می‌شود، به دلیل قابلیت‌های ویژه در جستجوی راه‌حل‌های متنوع و ارائه مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو بهینه در مسائل با تعداد اهداف بالا، ابزار مناسبی برای این پژوهش است. NSGA-III با استفاده از نقاط مرجع فضای جستجو را به‌گونه‌ای کاوش می‌کند که توزیع یکنواختی از پاسخ‌های پارتو^{۱۲} حاصل شود. این ویژگی به‌ویژه در مسائل مهندسی، که اغلب شامل قیود و اهداف متناقض است، اهمیت زیادی دارد [۲۵].

⁸ Bin Chen et al

⁹ Random Forest

¹⁰ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

¹¹ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III

¹² Pareto Front

پاسخ‌های پارتو یا مجموعه پارتو (Pareto Front) در بهینه‌سازی چندهدفه، مجموعه‌ای از نقاط در فضای تصمیم‌گیری هستند که هیچ‌کدام از آن‌ها نسبت به دیگری به‌طور کامل برتری ندارند. این نقاط نمایانگر تعادلی میان توابع هدف متناقض هستند، جایی که بهبود در یکی از اهداف منجر به کاهش کیفیت در هدف دیگر می‌شود.

برای اجرای این الگوریتم و مدیریت داده‌ها و قیود پیچیده‌ی مسئله، از کتابخانه قدرتمند پایمو^{۱۳} استفاده شده است. این کتابخانه که به زبان پایتون توسعه داده شده، مجموعه‌ای از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه و تک‌هدفه را با ساختار ماژولار و کاربرپسند فراهم می‌کند. پایمو قابلیت پیاده‌سازی الگوریتم‌های تکاملی، ترکیب داده‌ها، و بهینه‌سازی تحت قیود را به کاربران ارائه می‌دهد [۲۶].

۲-۱ جمع‌آوری داده‌های اولیه و برازش نتایج آزمایش‌ها

نتایج آزمایش‌های منتشرشده توسط رضانی و همکاران [۲۳] به عنوان داده‌های اولیه مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها شامل نتایج آزمایشگاهی درباره خواص مکانیکی و دوامی خمیر سیمان‌های ژئوپلیمری با ۲۷ ترکیبات مختلف در زمینه نوع ماده فعالساز، نسبت ماده جامد محلول فعالساز به ماده پایه و درصد جایگزینی رس کلسینه با سرباره بود. بر اساس این داده‌ها، روابطی برای تخمین پارامترهای مورد نظر از جمله مقاومت فشاری ۲۸ روزه، جذب آب مویینه و عمق نفوذ کربناسیون ۲۸ روزه توسعه داده شد.

¹³ pymoo

جدول ۱- مشخصات ۲۷ طرح اختلاط خمیر سیمان‌های ژئوپلیمری [۲۳].

نام طرح	نسبت ماده جامد محلول فعال‌ساز به ماده پایه	درصد جایگزینی رس کلسینه با سرباره	نوع ماده فعال‌ساز
NO-0.05-0	۰,۰۵	۰	سدیم هیدروکسید
NO-0.05-10	۰,۰۵	۱۰	سدیم هیدروکسید
NO-0.05-20	۰,۰۵	۲۰	سدیم هیدروکسید
NO-0.075-0	۰,۰۷۵	۰	سدیم هیدروکسید
NO-0.075-10	۰,۰۷۵	۱۰	سدیم هیدروکسید
NO-0.075-20	۰,۰۷۵	۲۰	سدیم هیدروکسید
NO-0.1-0	۰,۱	۰	سدیم هیدروکسید
NO-0.1-10	۰,۱	۱۰	سدیم هیدروکسید
NO-0.1-20	۰,۱	۲۰	سدیم هیدروکسید
NC-0.05-0	۰,۰۵	۰	سدیم کربنات
NC-0.05-10	۰,۰۵	۱۰	سدیم کربنات
NC-0.05-20	۰,۰۵	۲۰	سدیم کربنات
NC-0.075-0	۰,۰۷۵	۰	سدیم کربنات
NC-0.075-10	۰,۰۷۵	۱۰	سدیم کربنات
NC-0.075-20	۰,۰۷۵	۲۰	سدیم کربنات
NC-0.1-0	۰,۱	۰	سدیم کربنات
NC-0.1-10	۰,۱	۱۰	سدیم کربنات
NC-0.1-20	۰,۱	۲۰	سدیم کربنات
WG-0.05-0	۰,۰۵	۰	سدیم سیلیکات
WG-0.05-10	۰,۰۵	۱۰	سدیم سیلیکات
WG-0.05-20	۰,۰۵	۲۰	سدیم سیلیکات
WG-0.075-0	۰,۰۷۵	۰	سدیم سیلیکات
WG-0.075-10	۰,۰۷۵	۱۰	سدیم سیلیکات
WG-0.075-20	۰,۰۷۵	۲۰	سدیم سیلیکات
WG-0.1-0	۰,۱	۰	سدیم سیلیکات
WG-0.1-10	۰,۱	۱۰	سدیم سیلیکات
WG-0.1-10	۰,۱	۲۰	سدیم سیلیکات

جدول ۲- نتایج آزمایش‌ها ۲۷ طرح خمیر سیمان‌های ژئوپلیمری [۲۳].

نام طرح	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	عمق نفوذ کربناسیون ۲۸ روزه (میلی متر)	جذب مویینگی آب $\times 10^{-7} (mm/s^{0.5})$
NO-0.05-0	23.800	14.955	344
NO-0.05-10	24.900	20.933	333
NO-0.05-20	33.600	25.691	304
NO-0.075-0	35.709	11.785	1060
NO-0.075-10	40.662	15.303	987
NO-0.075-20	27.075	21.121	876
NO-0.1-0	24.214	10.070	919
NO-0.1-10	31.801	15.145	1069
NO-0.1-20	34.368	18.480	1050
NC-0.05-0	39.236	16.550	620
NC-0.05-10	30.973	23.190	759
NC-0.05-20	1.491	35.849	1247
NC-0.075-0	49.492	15.750	660
NC-0.075-10	48.162	17.826	843
NC-0.075-20	25.552	22.184	1202
NC-0.1-0	60.103	15.62	550
NC-0.1-10	56.747	17.515	623
NC-0.1-20	27.131	21.030	1182
WG-0.05-0	56.225	13.060	277
WG-0.05-10	44.183	14.805	268
WG-0.05-20	31.921	20.470	599
WG-0.1-0	60.403	12.760	202
WG-0.1-10	47.474	15.857	420
WG-0.1-20	34.086	16.214	452
WG-0.1-0	63.354	10.930	195
WG-0.1-10	48.591	12.733	242
WG-0.1-20	25.507	13.116	408

۲-۲ تعریف توابع هدف و متغیرهای تصمیم

در بهینه‌سازی چندهدفه، مقصود یافتن بهترین ترکیب متغیرها برای دستیابی به مقادیر مطلوب در چندین تابع هدف است [۲۷]. در این فرآیند، توابع هدف و متغیرهای تصمیم به شرح زیر تعریف گشته‌اند.

۲-۲-۱ توابع هدف

توابع هدف روابط ریاضی هستند که بهینه‌سازی برای بیشینه یا کمینه آن‌ها صورت می‌گیرد. هر تابع هدف نماینده‌ی جنبه خاصی از مسئله است. در مسائل چندهدفه، بهینه‌سازی باید تعادل بین این توابع برقرار کند [۲۷].

- مقاومت فشاری ۲۸ روزه: این تابع هدف برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی باید بیشینه شود.
- عمق نفوذ کربناسیون ۲۸ روزه: این پارامتر نمایانگر دوام خمیر سیمان بوده و باید به حداقل برسد.
- جذب آب مویینه: به عنوان معیاری از دوام، این پارامتر نیز باید به حداقل برسد.

۲-۲-۲ متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم، پارامترهایی هستند که بهینه‌سازی روی آن‌ها کار می‌کند. مقدار این متغیرها تغییر می‌کند تا توابع هدف به مقادیر مطلوب برسند [۲۷].

در پژوهش حاضر متغیرهای تصمیم به شرح زیر است:

- نوع ماده فعال‌ساز: متغیر گسسته با سه مقدار سدیم هیدروکسید (NO)، سدیم کربنات (NC)، سدیم سیلیکات (WG)
- نسبت جامد محلول فعال‌ساز به ماده پایه: متغیر گسسته با سه مقدار مختلف (۰,۵، ۰,۷۵، ۱,۰).
- درصد جایگزینی رس کلسینه با سرباره: متغیر پیوسته در بازه ۰ تا ۲۰ درصد.

۲-۲-۳ پیاده‌سازی الگوریتم NSGA-III

الگوریتم ژنتیک NSGA-III، شامل چندین بخش کلیدی هست که هر کدام نقش مهمی در عملکرد نهایی ایفا می‌کنند. در این پژوهش، مقادیر به کار برده شده در کد برنامه نویسی و مقادیر مختلف برای بخش‌های کلیدی الگوریتم ژنتیک شرح داده شده است: در الگوریتم‌های ژنتیک، اعضای جمعیت که به آن‌ها کروموزوم‌ها نیز گفته می‌شود، نمایانگر راه‌حل‌های بالقوه برای مسئله بهینه‌سازی هستند [۲۸]. در این پژوهش، کروموزوم‌ها ساختارهایی هستند که ترکیب‌های مختلف خمیر سیمان ژئوپلیمری را با مشخصات زیر نمایش می‌دهند:

● ساختار کروموزوم‌ها:

کروموزوم‌ها شامل سه بخش هستند که هر کدام نشان‌دهنده یکی از متغیرهای طراحی در مسئله بهینه‌سازی است:

بخش ۱: نوع ماده فعال‌ساز

بخش ۲: نسبت فعال‌ساز به ماده پایه

بخش ۳: میزان جایگزینی رس کلسینه

● نمایش کروموزوم‌ها:

یک کروموزوم نمونه در این مسئله می‌تواند به صورت زیر باشد:

$$[p, g, r] = [NC, 0.075, 10.5]$$

P: نوع ماده فعال‌ساز = سدیم کربنات (NC)

g: درصد فعال‌ساز = ۷,۵٪

r: درصد جایگزینی رس کلسینه = ۱۰,۵٪

● پراکندگی نقاط مرجع^{۱۴}

نقاط مرجع به‌عنوان هدف‌هایی در فضای چندهدفه عمل می‌کنند و به الگوریتم کمک می‌کنند تا نمونه‌های پارتو را به‌صورت یکنواخت در فضای اهداف توزیع کند [۲۸]. روش "Das-Dennis" به‌طور گسترده برای تولید نقاط مرجع یکنواخت استفاده شده است. در این پژوهش، سه هدف با ۱۲ بخش انتخاب شده است که تعداد کافی از نقاط مرجع را ایجاد می‌کند. این تنظیمات توزیع یکنواخت جبهه پارتو را تضمین کرده و تنوع بیشتری در پاسخ‌ها ایجاد می‌کند.

● اندازه جمعیت^{۱۵}

اندازه جمعیت نشان‌دهنده تعداد افراد (راه‌حل‌ها) در هر نسل الگوریتم است که فضای جستجو را کاوش می‌کند [۲۸]. مقدار ۲۰۰۰ برای اندازه جمعیت در نظر گرفته شده است. افزایش اندازه جمعیت منجر به تنوع بیشتر در فضای جستجو می‌شود و احتمال یافتن جبهه پارتو بهینه را افزایش می‌دهد. این مقدار با توجه به پیچیدگی مسئله و تعداد متغیرها انتخاب شده است.

● تعداد فرزندان^{۱۶}

فرزندان به نمونه‌هایی اطلاق می‌شوند که در هر نسل از طریق عملیات ترکیب^{۱۷} و جهش^{۱۸} تولید می‌شوند [۲۸]. در این پژوهش مقدار انتخاب شده برابر تعداد ۲۰۰۰ می‌باشد.

۳. یافته‌ها و تفسیر نتایج

در این پژوهش، به منظور دستیابی به ترکیبات بهینه خمیر سیمان ژئوپلیمری با بیشترین مقاومت فشاری و کمترین میزان جذب آب مویینه و عمق نفوذ کربناسیون، بهینه‌سازی سه‌هدفه با استفاده از الگوریتم NSGA-III انجام شد. براساس بهینه‌سازی انجام‌شده، چهار ترکیب بهینه از نتایج آزمایشگاهی استخراج شد که در جدول شماره ۳ قابل مشاهده است، در ادامه به تحلیل و بررسی این ترکیبات می‌پردازیم. در ادامه به نتایج مدلسازی و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم NSGA-III و مقایسه با خمیر شاهد که با سیمان پرتلند معمولی می‌باشد پرداخته شده است. همچنین لازم به ذکر است که مقادیر مقاومت فشاری و عمق نفوذ کربناسیون و جذب مویینه‌گی آب مربوط به خمیر شاهد در جدول شماره ۴ نشان داده شده است.

¹⁴ Reference Directions

¹⁵ Population Size

¹⁶ Offsprings

¹⁷ Crossover

¹⁸ Mutation

جدول ۳- نتایج حاصل از بهینه سازی با الگوریتم

جواب بهینه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	عمق نفوذ کربناسیون ۲۸ روزه (میلی متر)	جذب مویبگی آب $\times 10^{-7}$ (mm/s ^{0.5})	ماده فعال ساز	نسبت جامد محلول فعال ساز به ماده پایه	درصد جایگزینی رس کلسینه با سرپاره
1	25.050	10.58	938	NO	0.1	1.5
2	24.214	10.07	919	NO	0.1	1
3	63.350	10.93	195	WG	0.1	0.5
4	25.500	10.83	948	NO	0.1	2

جدول ۴- نتایج پارامترهای خمیرشاهد (خمیر با سیمان پرتلند) [۲۳].

خمیرشاهد	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	عمق نفوذ کربناسیون ۲۸ روزه (میلی متر)	جذب مویبگی آب $\times 10^{-7}$ (mm/s ^{0.5})
1	57.420	10.58	.

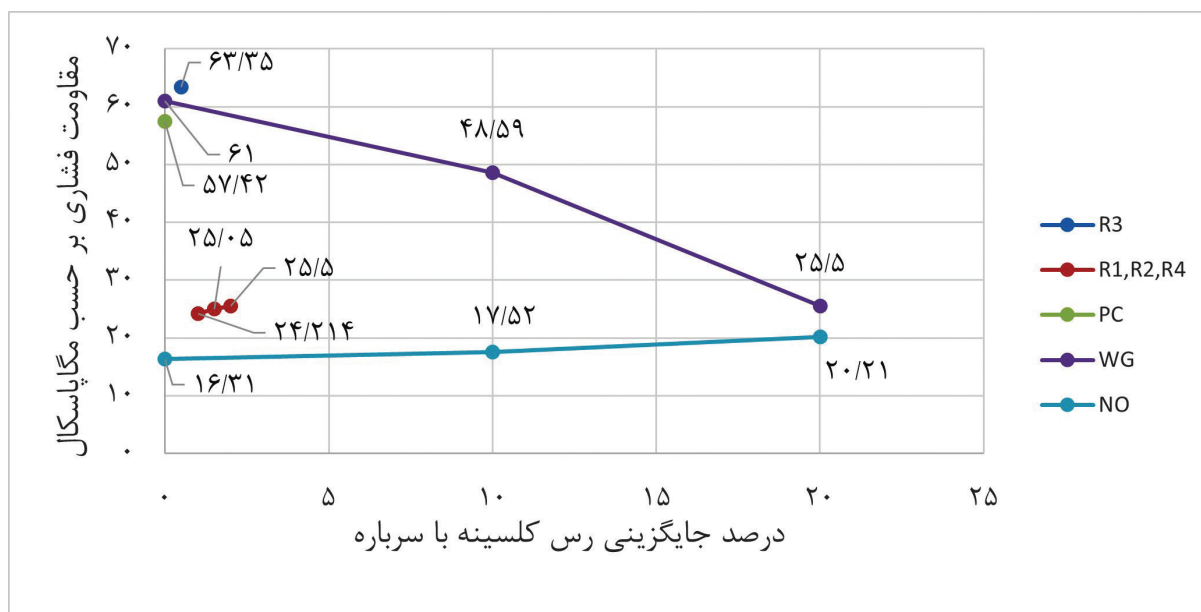
نتایج مدل سازی و بهینه سازی

مقاومت فشاری ۲۸ روزه:

در جواب های بهینه محاسبه شده با الگوریتم NSGA-III، ترکیب هایی که ماده فعال ساز آن سدیم سیلیکات است، بیشترین مقاومت فشاری (۶۳،۳۵ مگاپاسکال) را نشان می دهند. این مقدار به طور قابل توجهی بیشتر از مقاومت فشاری سیمان پرتلند معمولی (۵۷،۴۲ مگاپاسکال) است. این نشان دهنده بهبود ساختار خمیر ژئوپلیمری در مقایسه با سیمان پرتلند است [۳۲].

دلیل آن می تواند حضور یون های سیلیسیم باشد که موجب تشکیل مقدار بیشتری ژل می شود و ساختار خمیر سیمان را تقویت می کند [۲۹] و همچنین خمیرهایی که ماده فعال ساز آن سدیم هیدروکسید است نسبتاً مقاومت کمتری دارا هستند که دلیل آن می تواند سرعت بالای واکنش ژئوپلیمریزاسیون بوده که باعث ایجاد تخلخل بیشتر در خمیرسیمان می شود و مقاومت کمتری را به دنبال دارد [۳۰، ۲۳]. با توجه به اهداف تعریف شده برای الگوریتم، بهینه کردن هر تابع هدف ممکن است تاثیرات منفی بر روی سایر توابع بگذارد و با بررسی پاسخ های محاسبه شده برای ماده فعال ساز سدیم هیدروکسید به این نتیجه میرسیم که برای دستیابی به دوام بهینه علی رغم کاهش مقاومت که با نظر به نتایج آزمایشگاهی انتظار آن را داریم، نسبت جامد محلول فعال ساز به ماده پایه ۰،۱ بدست آماده است. مقدار ماده فعال ساز در پاسخ سدیم سیلیکات عدد ۰،۱ را نشان می دهد که این مقدار برای دستیابی به مقاومت فشاری حداکثر طبق نتایج آزمایشگاهی قابل پیش بینی می باشد. در ترکیبات با ماده فعال ساز سدیم سیلیکات افزایش مقدار ماده فعال ساز، با افزایش pH همراه بوده که منجر به افزایش سرعت واکنش ژئوپلیمریزاسیون و در نتیجه باعث افزایش مقاومت فشاری می شود [۳۱]. مقدار جایگزینی رس کلسینه با سرپاره در تمامی جواب ها عددی بین ۰،۵ تا ۲ درصد است که با توجه به مقدار کم به نظر می رسد اثر فیلری رس کلسینه را حفظ می کند و تاثیر منفی بر روی مقاومت ندارد. در شکل ۱ مقاومت فشاری حاصل از جواب های بهینه و داده های آزمایشگاهی نشان داده شده است. در این شکل نسبت جامد ماده فعال ساز به ماده پایه در تمامی داده ها برابر ۰،۱ می باشد همچنین نمودارها بر حسب نوع فعال ساز با رنگ بندی های مختلف نمایش داده شده است که در قسمت اطلاعات نمودار قابل

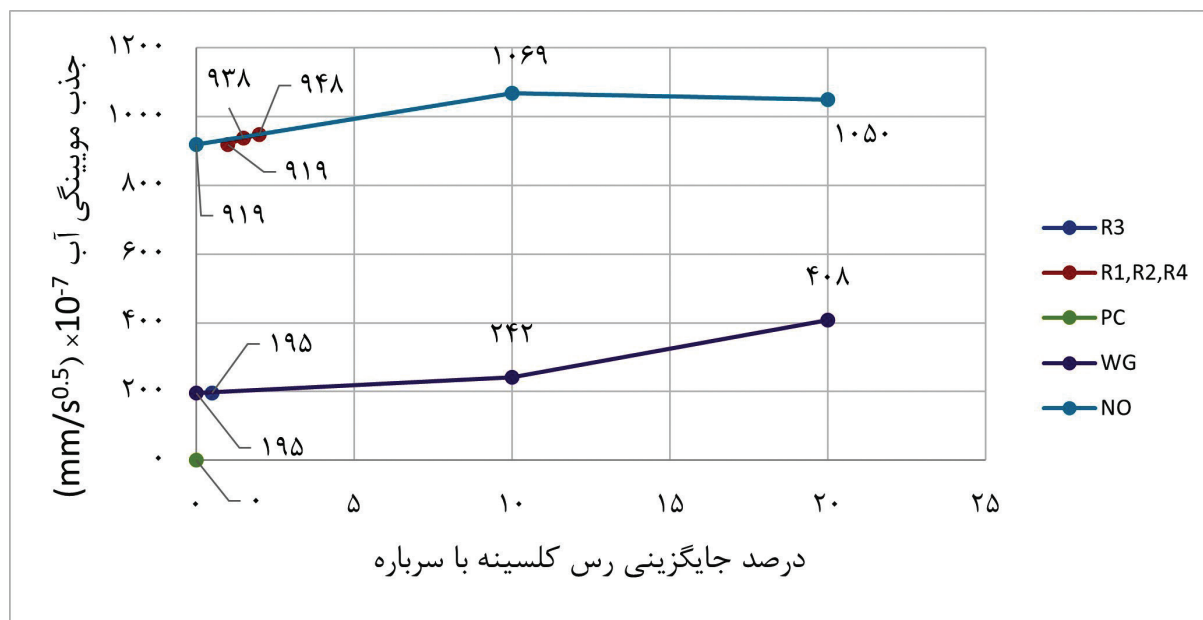
مشاهده می‌باشد. R3 مربوط به جواب بهینه شماره ۳ با ماده فعال ساز سدیم سیلیکات، R1,R2,R4 به ترتیب مربوط به جواب‌های بهینه شماره ۱ و ۲ و ۴ با ماده فعال ساز سدیم هیدروکسید، PC مربوط داده‌های آزمایشگاهی خمیرشاهد، WG مربوط به داده‌های آزمایشگاهی با فعال ساز سدیم سیلیکات و NO مربوط به داده‌های آزمایشگاهی با ماده فعال ساز سدیم هیدروکسید می‌باشد.



شکل ۱- نمودار مقاومت فشاری بر حسب درصد جایگزینی رس کلسینه با سرباره برای جواب‌های بهینه و داده‌های آزمایشگاهی.

جذب مویینگی آب:

ترکیب‌های حاوی سدیم سیلیکات در جواب‌های بهینه کمترین میزان جذب مویینگی آب ($195 \times 10^{-7} \text{ mm/s}^{0.5}$) را نشان می‌دهند. این کاهش جذب آب به دلیل ساختار متراکم‌تر و بهبود نفوذپذیری است که در اثر تشکیل ژل‌های بیشتر به وجود آمده است. در مقابل، ترکیب‌های حاوی سدیم هیدروکسید جذب مویینگی آب بالاتری دارند (تا ۴ برابر بیشتر از نمونه‌های سدیم سیلیکات) که نشان‌دهنده اثر جمع‌شدگی است. جذب مویینگی آب در خمیر سیمان پرتلند معمولی تقریباً برابر صفر است و از نظر این ویژگی دوامی نسبت به ترکیبات خمیر ژئوپلیمری بهتر است. نسبت جامد محلول فعال‌ساز به ماده پایه در جواب بهینه با فعال ساز سدیم سیلیکات از بین سه مقدار ۰,۰۵ و ۰,۰۷۵ و ۰,۱ بیشترین مقدار یعنی ۰,۱ می‌باشد که مطابق با نتایج آزمایشگاهی در راستای دستیابی به جواب مناسب برای تابع هدف کاهش جذب مویینگی آب می‌باشد و جواب‌های بهینه با فعال ساز سدیم هیدروکسید، نسبت جامد محلول فعال‌ساز به ماده پایه را برابر ۰,۱ در نظر گرفته که به نظر برای دستیابی به جواب بهینه برای همه توابع هدف با تأثیرات متفاوت این مقدار بدست آمده است. در شکل ۲ نمودار جذب مویینگی آب حاصل از جواب‌های بهینه و داده‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است. در این شکل نسبت جامد ماده فعال‌ساز به ماده پایه در تمامی داده‌ها برابر ۰,۱ می‌باشد همچنین نمودارها بر حسب نوع فعال‌ساز با رنگ بندی‌های مختلف نمایش داده شده است که در قسمت اطلاعات نمودار قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲- نمودار جذب مویبگی آب بر حسب درصد جایگزینی رس کلسینه با سرباره برای جواب‌های بهینه و داده‌های آزمایشگاهی.

عمق نفوذ کربناسیون

در هر چهار جواب بهینه عمق نفوذ کربناسیون در محدوده ۱۰ تا ۱۱ میلی متر بوده و الگوریتم ژنتیک با کنترل کردن متغیرها مقدار عمق نفوذ در هر چهار ترکیب را به حداقل رسانده که این مقادیر بسیار بهم نزدیک می‌باشند. در جواب‌های بهینه با سدیم هیدروکسید، عمق نفوذ کربناسیون به مقدار ۱۰,۰۷ میلی‌متر کاهش یافته است که عملکرد بهتری نسبت به سیمان پرتلند معمولی (۱۰,۵۸ میلی‌متر) دارد و و سایر جواب‌های بهینه عملکردی مشابه با سیمان پرتلند دارند. این امر نشان می‌دهد که ترکیبات ژئوپلیمری می‌توانند دوام مناسبی در برابر کربناسیون داشته باشند. با توجه به تاثیرات منفی جایگزینی سرباره با رس کلسینه بر روی عمق نفوذ کربناسیون در تمامی جواب‌های بهینه درصد جایگزینی سرباره با رس کلسینه محدود به مقادیر ۰,۵ تا ۲ درصد گشته است و صرفاً در این مقادیر اثر فیلری رس کلسینه باعث بهبود مقادیر توابع هدف می‌گردد. در شکل ۳ نمودار عمق نفوذ کربناسیون حاصل از جواب‌های بهینه و داده‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است. در این شکل نسبت جامد ماده فعاساز به ماده پایه در تمامی داده‌ها برابر ۰,۱ می‌باشد همچنین نمودارها بر حسب نوع فعالساز با رنگ بندی‌های مختلف نمایش داده شده است که در قسمت اطلاعات نمودار قابل مشاهده می‌باشد.

- [1] A. Hasanbeigi, L. Price, H. Lu, and W. Lan, "Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants," *Energy*, vol. 35, no. 8, pp. .2010 ,3473-3461
- [2] A. Glukhovskiy, "Stability of nonlinear chain-type systems used to model cascaded energy transfer processes," *Atmos. Ocean. Phys.*, vol. 11, p. .1975 ,491
- [3] J. Davidovits, "Geopolymers: inorganic polymeric new materials," *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, vol. 37, no. ,8pp. .1991 ,1656-1633
- [4] J. Davidovits, "Geopolymers: man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement," *Journal of Materials education*, vol. 16, pp. .1994 ,91-91
- [5] D. Jia, P. He, M. Wang, and S. Yan, *Geopolymer and geopolymer matrix composites*. Springer, .2020
- [6] J. L. Provis, "Alkali-activated materials," *Cement and concrete research*, vol. 114, pp. -40 .2018 ,48
- [7] G. S. Ryu, Y. B. Lee, K. T. Koh, and Y. S. Chung, "The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators," *Construction and building materials*, vol. 47, pp. .2013 ,418-409
- [8] K. Pimraksa, P. Chindaprasirt, A. Rungchet, K. Sagoe-Crentsil, and T. Sato, "Lightweight geopolymer made of highly porous siliceous materials with various Na₂O/Al₂O₃ and SiO₂/Al₂O₃ ratios," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 21, pp. .2011 ,6623-6616
- [9] L. Imtiaz, S. K. U. Rehman, S. Ali Memon, M. Khizar Khan, and M. Faisal Javed, "A review of recent developments and advances in eco-friendly geopolymer concrete," *Applied sciences*, vol. 10, no. 21, p. .2020 ,7838
- [10] G. Sant, A. Kumar, C. Patapy, G. Le Saout, and K. Scrivener, "The influence of sodium and potassium hydroxide on volume changes in cementitious materials," *Cement and concrete research*, vol. 42, no. 11, pp. .2012 ,1455-1447
- [11] M. C. G. Juenger and H. M. Jennings, "Effects of high alkalinity on cement pastes," *Materials Journal*, vol. 98, no. 3, pp. .2001 ,255-251
- [12] S.-D. Wang, X.-C. Pu, K. Scrivener, and P. Pratt, "Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems," *Advances in cement research*, vol. 7, no. 27, pp. -93 .1995 ,102
- [13] J. I. Escalante-García, A. F. Fuentes, A. Gorokhovskiy, P. E. Fraire-Luna, and G. Mendoza-Suarez, "Hydration products and reactivity of blast-furnace slag activated by various alkalis," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 86, no. 12, pp. .2003 ,2153-2148
- [14] M. B. Haha, G. Le Saout, F. Winnefeld, and B. Lothenbach, "Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 3, pp. .2011 ,310-301
- [15] S. Aydın and B. Baradan, "Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars," *Composites Part B: Engineering*, vol. 57, pp. .2014 ,172-166
- [16] A. A. Aliabdo, M. Abd Elmoaty, and M. A. Emam, "Factors affecting the mechanical properties of alkali activated ground granulated blast furnace slag concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 197, pp. .2019 ,355-339

- [17] P. K. Mehta and P. Monteiro, "Concrete: microstructure, properties, and materials," (No Title), .2006
- [18] F. Puertas, M. Palacios, and T. Vázquez, "Carbonation process of alkali-activated slag mortars," *Journal of materials science*, vol. 41, no. 10, pp. .2006 ,3082-3071
- [19] P. Awoyera and A. Adesina, "Durability properties of alkali activated slag composites: short overview," ed: Springer, .2020
- [20] Z. Shi, C. Shi, S. Wan, N. Li, and Z. Zhang, "Effect of alkali dosage and silicate modulus on carbonation of alkali-activated slag mortars," *Cement and Concrete Research*, vol. 113, pp. .2018 ,64-55
- [21] B. A. Tayeh, H. M. Hamada, I. Almeshal, and B. A. Bakar, "Durability and mechanical properties of cement concrete comprising pozzolanic materials with alkali-activated binder: A comprehensive review," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, p. e.2022 ,01429
- [22] B. Chen et al., "Optimization of high-performance concrete mix ratio design using machine learning," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 122, p. .2023 ,106047
- [23] A. Ramezani, F. Moodi, M. Mirabrishami, A. Zolfagharnasab, and F. Bahman-Zadeh, "Experimental and thermodynamic investigating of carbonation behavior in Alkali-activated slag-calcined clay materials with different binder constituent," *Construction and Building Materials*, vol. 446, p. .2024 ,137987
- [24] L. Han, X. Shi, and Y. Zhai, "Test optimization selection method based on NSGA 3-and improved Bayesian network model," *Xibei Gongye Daxue Xuebao/Journal of Northwestern Polytechnical University*, vol. 39, no. 2, pp. .2021 ,422-414
- [25] Y. Yuan, H. Xu, and B. Wang, "An improved NSGA-III procedure for evolutionary many-objective optimization," in *Proceedings of the 2014 annual conference on genetic and evolutionary computation*, 2014, pp. .668-661
- [26] J. Blank and K. Deb, "Pymoo: Multi-objective optimization in python," *Ieee access*, vol. 8, pp. .2020 ,89509-89497
- [27] N. Gunantara, "A review of multi-objective optimization: Methods and its applications," *Cogent Engineering*, vol. 5, no. 1, p. .2018 ,1502242
- [28] K. Deb and H. Jain, "An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints," *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 18, no. 4, pp. .2013 ,601-577
- [29] A. Fernández-Jiménez and A. Palomo, "Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder :Effect of the activator," *Cement and concrete research*, vol. 35, no. 10, pp. -1984 .2005 ,1992
- [30] A. N. Hashim, H. Kamarudin, N. Begum, M. M. Al Bakri Abdullah, K. A. Razak, and J. J. Ekaputri, "Effect of sodium hydroxide (NaOH) concentration on compressive strength of alkali-activated slag (AAS) mortars," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 754, pp. .2015 ,304-300
- [31] A. M. Rashad and S. R. Zeedan, "The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 7, pp. .2011 ,3107-3098
- [32] F. Matakah, R. Aqel, and A. Ababneh, "Enhancement of the mechanical properties of kaolin geopolymer using sodium hydroxide and calcium oxide," *Procedia Manufacturing*, vol. 44, pp. .2020 ,171-164