

# مدلسازی هوشمند مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت شده با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن

## مقاله علمی - پژوهشی

علیرضا غنی‌زاده\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران  
فرزاد صفی‌جهانشاهی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران  
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [ghanizadeh@sirjantech.ac.ir](mailto:ghanizadeh@sirjantech.ac.ir)\*

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

صفحه ۱۳۷-۱۵۶

### چکیده

از جمله راهکارهای بهسازی خاک‌های بستر ضعیف و مسئله‌دار استفاده از تثبیت‌کننده‌ها و افزودنی‌های متفاوت مانند سیمان، آهک و خاکستر بادی است. در این مقاله، یک خاک رس با استفاده از درصد‌های مختلف سیمان و آهک (۰، ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد) استفاده شده است و در درصد‌های رطوبت مختلف (میزان رطوبت بهینه، سمت مرطوب و سمت خشک) تثبیت و آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده در زمان‌های عمل‌آوری مختلف (۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸ و ۶۰ روز) انجام شد. سپس از روش برنامه‌ریزی بیان ژن برای مدلسازی مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت‌شده با سیمان و آهک استفاده شده است. در مدل‌های توسعه یافته از سه متغیر درصد افزودنی، زمان عمل‌آوری و درصد رطوبت به‌عنوان پارامترهای ورودی جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری محصورنشده استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار ضریب تعیین برای مدل توسعه داده‌شده برای پیش‌بینی مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت شده با سیمان بر اساس داده‌های آموزش و آزمون به‌ترتیب برابر با ۰/۹۳۶ و ۰/۹۳۵ است. ضریب تعیین برای پیش‌بینی مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت شده با آهک بر اساس داده‌های آموزش و آزمون به‌ترتیب برابر با ۰/۹۱۱ و ۰/۸۸۴ به دست آمد. همچنین نتایج مطالعه پارامتریک نشان داد که مقدار مقاومت فشاری محصورنشده با افزایش درصد سیمان و آهک و زمان عمل‌آوری افزایش و با افزایش درصد رطوبت کاهش می‌یابد. نتایج بدست‌آمده از تحلیل حساسیت نشان داد که در مورد خاک تثبیت‌شده پارامتر ورودی درصد سیمان دارای بیشترین تأثیر و زمان عمل‌آوری دارای کمترین تأثیر بر روی مقاومت فشاری تک محوری است. همچنین در مورد خاک تثبیت‌شده با آهک پارامتر ورودی درصد رطوبت دارای بیشترین تأثیر و درصد آهک دارای کمترین تأثیر است.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی مقاومت فشاری محصورنشده، سیمان پرتلند، آهک، خاک رس، برنامه‌نویسی بیان ژن

### ۱- مقدمه

برای پروژه‌های راه‌سازی شده است. انواع مواد افزودنی مانند آهک، سیمان، خاکستر بادی، مخلوط آهک-سیمان - خاکستر بادی، امولسیون قیر، ژئوفیبر و پلیمر برای بهبود خواص ژئوتکنیکی این‌گونه خاک‌ها استفاده می‌شوند (Ghanizadeh

افزایش هزینه مربوط به جایگزینی مصالح بی‌کیفیت، نیاز به استفاده از خاک‌های موجود در محل پروژه‌های راه‌سازی را بیشتر کرده است. با این وجود، خواص مهندسی نامناسب این خاک‌ها مانند کارایی و مقاومت کم اغلب باعث ایجاد مشکلاتی

مواد آلی بیشتر از ۲ درصد یا با pH کمتر از ۵/۳ قابل استفاده نیست (Committee, 1990). کاهش دامنه خمیری خاک رسی تثبیت شده با سیمان ناشی از افزایش حد خمیری و تابعی از میزان سیمان و زمان عمل آوری است (Bergado et al., 1996). با این وجود، گزارش کمیته ۲۳۰ ACI (۱۹۹۰) بیان می کند که عمل آوری با سیمان موجب تغییر حداکثر وزن مخصوص خشک و میزان رطوبت بهینه می شود، اما جهت این تغییر قابل پیش بینی نیست. علاوه بر این، تثبیت با سیمان سبب کاهش آبی رطوبت خاک می شود (Bergado et al., 1996).

خاک رس دارای ظرفیت باربری مناسب به عنوان بستر روسازی نیست و به علت پتانسیل تورم پذیری بالا امکان تخریب روسازی های ساخته شده بر روی این گونه خاک ها خصوصاً در مناطق مرطوب بسیار بالا است. افزودن چند درصد وزنی سیمان یا آهک، برای تثبیت بسترهای رسی باعث افزایش توان باربری این مصالح و صرفه جویی مالی قابل ملاحظه با توجه به کاهش ضخامت لایه های روسازی خواهد شد.

آهک یکی از قدیمی ترین و همچنان محبوب ترین مواد افزودنی است که به منظور بهبود خواص مهندسی خاک استفاده می شود. تثبیت خاک با آهک سبب کاهش حد مایع و دامنه خمیری خاک می شود. همچنین واکنش شیمیایی بین خاک و آهک باعث کاهش رطوبت خاک می گردد. افزودن آهک به خاک، درصد رطوبت بهینه را افزایش و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک را کاهش می دهد و در نهایت، افزایش مقاومت منجر به ایجاد بستری پایدار می شود که حرکت تجهیزات را تسهیل می کند (Mallela et al., 2004).

کرافت (۱۹۶۷) نشان داد که افزودن آهک، پتانسیل تورم، حد مایع، شاخص خمیری و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک را به میزان قابل توجهی کاهش و درصد رطوبت بهینه، حد انقباض و مقاومت را افزایش می دهد (Croft, 1967). بل نشان داد که درصد آهک بهینه برای تثبیت خاک، معمولاً بین یک تا سه درصد وزنی خاک است و همچنین افزودن آهک، تغییر در حد خمیری ایجاد نمی کند، اما مقاومت را افزایش می دهد (Bell, 1996). با این حال، مطالعات دیگر، استفاده از آهک بین ۲ تا ۸ درصد را در تثبیت خاک گزارش کردند (Basma & Tuncer, 1991). اولاً و گیلوت گزارش کردند که نوع تثبیت کننده، نوع خاک، ترکیبات، مواد معدنی، شکل

(et al., 2022). تثبیت خاک بستر روسازی با استفاده از این مواد افزودنی سبب افزایش مقاومت و ظرفیت باربری خاک بستر خواهد شد و در نتیجه ضخامت روسازی کاهش می یابد. از طرف دیگر، انتخاب و اثربخشی یک افزودنی به نوع خاک و شرایط میدانی آن بستگی دارد. با این وجود، اطلاع از رفتار مکانیکی خاک عمل آوری شده، اثر قابل توجهی بر انتخاب تثبیت کننده دارد.

بهبود خواص مهندسی خاک با افزودن مواد شیمیایی مانند سیمان، خاکستر بادی، آهک یا ترکیب این ها، اغلب خواص فیزیکی و شیمیایی خاک را تغییر می دهد. در چند سال اخیر تحقیقات بسیاری در خصوص تثبیت خاک با استفاده از انواع مواد افزودنی مانند آهک، سیمان، خاکستر بادی، محصولات پسماند صنعتی، نیترات پتاسیم، کلرید کلسیم، اسید فسفریک و غیره انجام شده است (Anagnostopoulos, 2015; Dang et al., 2016; Furlan et al., 2018; Ghorbani & Hasanzadehshooili, 2018; Y. Liu et al., 2019; Sharma et al., 2018; Söderlund, 2018; Yaghoubi et al., 2018; Yilmaz & Ozaydin, 2013; Zhao et al., 2016).

پروژه ساخت و ساز در نزدیکی شهر جانسون ویل در کارولینای جنوبی در سال ۱۹۳۵ یکی از اولین پروژه های ساخت و سازی بوده است که سیمان در آن به عنوان تثبیت کننده خاک در آمریکا استفاده شد (Das Braja, 1998). اثرات سودمند تثبیت با سیمان به تنهایی یا به همراه مواد افزودنی دیگر بر عملکرد طیف وسیعی از خاک ها، توسط محققان پیشین ارزیابی شده است (Bekhiti et al., 2019; Ghadir & Ranjbar, 2018; L. Liu et al., 2019; Mohammadinia et al., 2015; Oluwatuyi et al., 2018; Rios et al., 2016; Yilmaz & Ozaydin, 2013; Zhang et al., 2014).

سیمان به کمک پیوند سیمانی بین سیلیکات کلسیم و محصولات هیدراتاسیون آلومینات و ذرات خاک تولید می شود (Croft, 1967). مطالعات قبلی نشان می دهد که افزودن سیمان به خاک رس، حد مایع، دامنه خمیری و پتانسیل تورم را کاهش و حد انقباض و مقاومت برشی را افزایش می دهد (Nelson & Miller, 1997). افزودن سیمان به خاک رس سبب ایجاد واکنش شیمیایی مشابه با آهک می شود و می تواند برای اصلاح و تثبیت این نوع خاک ها بکار برده شود. سیمان برای تثبیت طیف وسیعی از خاک ها می تواند مورد استفاده قرار گیرد. با این وجود، سیمان برای تثبیت خاک های دارای میزان

است (Alavi et al., 2012). گولا به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری محصورنشده و مدول یانگ خاک رس تثبیت‌شده با خاکستر بادی از روش برنامه‌نویسی ژنتیک استفاده نمود. پارامترهای ورودی در این تحقیق به صورت درصد خاکستر بادی، وزن واحد خشک، تراکم نسبی و ظرفیت جذب انرژی در نظر گرفته شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که روابط توسعه داده‌شده بر اساس روش برنامه‌نویسی ژنتیک با دقت بالایی مقادیر مقاومت فشاری محصورنشده و مدول یانگ را پیش‌بینی می‌کنند و دقت بالاتری نسبت به روش رگرسیون غیرخطی دارند (Güllü, 2014). معتمدی و همکاران به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری محصورنشده خاک ماسه‌ای تثبیت‌شده با پودر خاکستر سوخت و سیمان از روش سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی استفاده نمودند (Motamedi, Shamshirband, Petković, et al., 2015). در تحقیق دیگری معتمدی و همکاران به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری محصورنشده خاک ماسه‌ای تثبیت‌شده با سیمان و صدف حلزون از دو روش ماشین بردار پشتیبان و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی استفاده کردند. نتایج این تحقیق دقت بالای روش سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی را در مقایسه با روش ماشین بردار پشتیبان نشان می‌داد (Motamedi, Shamshirband, Hashim, et al., 2015). سومان و همکاران از دو روش شبکه‌های عملکردی و روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین برای پیش‌بینی مقاومت فشاری محصورنشده و حداکثر چگالی خشک خاک تثبیت‌شده با سیمان استفاده کردند. نتایج کار آنها مناسب بودن این دو روش را برای پیش‌بینی مقاومت فشاری محصورنشده و حداکثر چگالی خشک خاک نشان می‌داد (Suman et al., 2016). موزومدر و همکاران کارایی روش رگرسیون ماشین بردار پشتیبان را برای تخمین مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت‌شده با ژئوپولیمر ارزیابی نمودند. نتایج تحقیق نشان‌دهنده مناسب بودن روش رگرسیون ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت‌شده با ژئوپولیمر بود (Mozumder et al., 2017). سدیاپریا و همکاران به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت‌شده با زباله صنعتی از روش شبکه عصبی مصنوعی و تحلیل رگرسیون استفاده نمودند. در این تحقیق مشخص شد که هر دو روش مقدار مقاومت فشاری

ذرات و توزیع اندازه ذرات، بر نتایج تثبیت خاک اثر می‌گذارد (Gillott, 2012; Ola, 1978).

سیمان و آهک هر دو حاوی کلسیم موردنیاز برای وقوع واکنش پوزولانی هستند. با این حال سیلیس موردنیاز برای واکنش پوزولانی در این دو تثبیت‌کننده متفاوت است. در تثبیت با آهک، سیلیس در زمانی که ذرات رس تجزیه می‌شوند به وجود می‌آید، در حالی که در تثبیت با سیمان، سیمان از قبل حاوی سیلیس است و نیازی به تجزیه مواد معدنی رسی ندارد. پس برخلاف تثبیت با آهک، تثبیت با سیمان نسبتاً مستقل از خواص خاک است و تنها شرط لازم این است که خاک حاوی مقداری آب برای شروع واکنش هیدراتاسیون باشد. هنگامی که سیمان در معرض هوا قرار می‌گیرد، سیمان با دی‌اکسید کربن اتمسفر واکنش داده و یک کربنات کلسیم نسبتاً نامحلول ایجاد می‌کند. پس مشابه آهک، روش‌های مناسب استعمال و تسریع در روند ساخت‌وساز بایستی برای جلوگیری از کربناسیون زودهنگام سیمان در تماس با هوا بکار برده شود.

محققین مختلفی در گذشته میزان مقاومت فشاری محصورنشده و پارامترهای تراکمی (حداکثر چگالی خشک و رطوبت بهینه) خاک تثبیت‌شده را به کمک روش‌های مختلف هوش مصنوعی بررسی نموده‌اند (Ghanizadeh & Rahrovan, 2019; Ghorbani & Hasanizadehshooili, 2018; Manouchehrian et al., 2012; Motamedi, Shamshirband, Hashim, et al., 2015; Mozumder & Laskar, 2015; Torabi-Kaveh et al., 2015).

داس و همکاران از دو روش شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان به منظور پیش‌بینی حداکثر وزن مخصوص خشک و مقاومت فشاری محصورنشده خاک تثبیت‌شده با سیمان بهره‌گیری نمودند. ورودی‌های مورد استفاده در مدل‌سازی شامل حد مایع، حد روانی، درصد رس، درصد ماسه، درصد شن، درصد رطوبت و درصد سیمان بود. نتایج تحقیق بر اساس معیارهای مختلف آماری نشان داد که دقت روش ماشین بردار پشتیبان نسبت به روش شبکه عصبی مصنوعی بیشتر است (Das et al., 2011). علوی و همکاران با روش برنامه‌نویسی ژنتیک خطی بهینه‌سازی شده با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (LGP/SA) به پیش‌بینی رطوبت بهینه، حداکثر چگالی خشک و مقاومت فشاری محصورنشده خاک‌های تثبیت‌شده پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش LGP نسبت به روش LGP/SA دارای دقت پایین‌تری

## ۲- روش برنامه‌نویسی بیان ژن

برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP)، مانند برنامه‌نویسی ژنتیک و الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جمعیت است و این جمعیت از طریق معیارهای برازندگی و از طریق یک یا چند عملگر ژنتیکی انتخاب می‌شوند (Ferreira, 2001). GEP به‌عنوان یک الگوریتم تکاملی از دو بخش شامل کروموزوم‌های خطی با طول ثابت برگرفته از الگوریتم ژنتیک و درخت‌های بیان با شکل و اندازه‌های متفاوت برگرفته از برنامه‌نویسی ژنتیک تشکیل شده است (Ferreira, 2002). در شکل (۱) مراحل اصلی برنامه‌نویسی بیان ژن نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل مشخص است، این روند تا یافتن پاسخ مناسب تکرار می‌شود (Ferreira, 2006). تمامی ژن‌های GEP دارای طول یکسان هستند ولی می‌توانند درخت‌های بیان (ET) را با شکل‌ها و اندازه‌های مختلف کد نویسی کنند. با قرارگیری ژن‌های مختلف در کنار یکدیگر و همچنین با استفاده از توابع پیوند، یک کروموزوم شکل می‌گیرد. درخت‌های بیان (ET) موارد مختلفی از جمله توابع، ثابت‌ها، عملگرها و متغیرها را در GEP ارائه می‌دهند. تصویر درخت بیان (ET) یک کروموزوم برای رابطه زیر در شکل (۲) نشان داده شده است:

$$[a + (a + b)] - [a - \sqrt{b}] \quad (1)$$

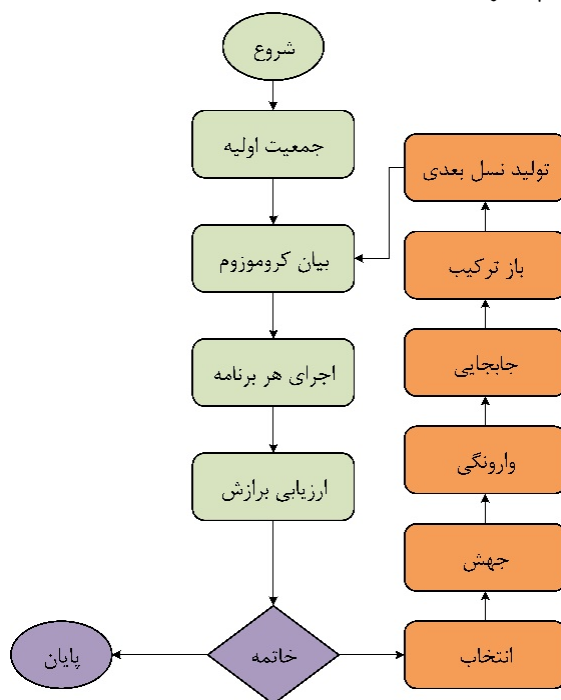
شکل شماره (۳ الف)، زمانی یک مرحله تقاطع را نشان می‌دهد که به‌منظور گسترش تناسب بهتر، یک شاخه تصادفی از درخت مادر با یک شاخه یا عنصر تصادفی دیگر جایگزین شود. در واقع، این عملیات تقاطع، دو فرزند تولید می‌کند که هرکدام شامل داده‌های ژنتیکی هر دو والدینشان هستند. همان‌طور که در شکل (۳ ب) مشاهده می‌شود، جهش در گره‌ای شکل می‌گیرد که در آن یک شاخه تصادفی از درخت مادر با یک شاخه یا عنصر تازه ایجاد شده از درخت مادر جایگزین می‌شود (Mahdinia et al., 2019). در تحقیقات گذشته مزایای روش GEP نسبت به روش‌های رگرسیون کلاسیک نشان داده شده است. در روش‌های رگرسیون کلاسیک، شکل تابع قبل از تحلیل تعریف و مشخص می‌شود، در حالی که در روش GEP، هیچ شکل از پیش تعریف شده‌ای برای تابع در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین، اعتقاد بر این است که روش GEP از روش‌های رگرسیون برای اهداف مدل‌سازی و استخراج روابط ریاضی برای مطالعات تجربی با مسائل چند

محصورنشده را به کمک خواص خاک به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند، اما روش شبکه عصبی مصنوعی نسبت به تحلیل رگرسیون پیش‌بینی دقیق‌تری را ارائه می‌دهد (Sathyapriya et al., 2017). قربانی و حسن‌زاده شوئیلی دو مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی را جهت پیش‌بینی CBR و UCS نمونه‌های تثبیت شده با آهک و میکروسیلیکا بکار بردند. نتایج نشان می‌دهد که روش ANN ابزار مناسبی برای پیش‌بینی مقادیر CBR و UCS در تمامی شرایط است. علاوه بر این، روش رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی نیز با موفقیت برای ارائه روابط جدید برای پیش‌بینی مقادیر UCS و CBR مورد استفاده قرار گرفت (Ghorbani & Hasanzadehshooiili, 2018). سلیمانی و همکاران برای پیش‌بینی مقاومت فشاری محصور نشده خاک‌های تثبیت شده با ژئوپولیمر از یک روش اصلاح شده ژنتیکی بنام برنامه‌ریزی ژنتیکی چند ژن (MGGP) استفاده کردند. مدل ارائه شده در این تحقیق شامل چندین پارامتر مؤثر بر مقدار UCS بود و مقدار UCS تابعی از عواملی همچون درصد خاکستر، درصد سرباره کوره آهن‌گدازی، حد روانی، حد خمیری، شاخص خمیری و غلظت مولار در نظر گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان دادند که روابط پیشنهادی بر اساس روش MGGP قادر به پیش‌بینی مقادیر UCS با دقت بالایی هستند (Soleimani et al., 2018).

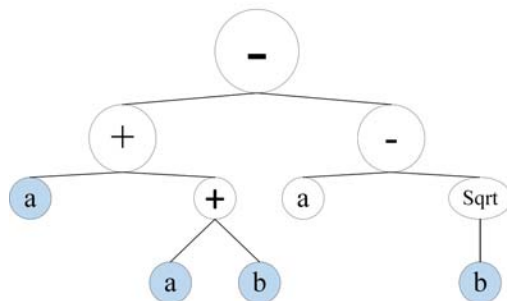
به منظور تعیین طرح اختلاط تثبیت خاک و همچنین کنترل کیفیت مصالح تثبیت شده معمولاً از نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده استفاده می‌شود. هدف از انجام این تحقیق، توسعه مدلی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس با خمیری کم تثبیت شده با سیمان و آهک است. پس از توسعه مدل‌ها، تحلیل حساسیت به منظور ارزیابی درجه اهمیت متغیرهای ورودی و همچنین مطالعه پارامتریک به منظور ارزیابی تأثیر هر یک از متغیرها بر روی مقاومت فشاری انجام شد. مدل‌های توسعه داده شده امکان پیش‌بینی مقاومت فشاری محصور نشده خاک رس با خمیری کم تثبیت شده با سیمان و آهک را با توجه به متغیرهای درصد افزودنی، درصد رطوبت تراکم و همچنین زمان عمل‌آوری را فراهم می‌سازد که در کاهش هزینه‌های طرح اختلاط و زمان دستیابی به مقاومت فشاری بسیار مفید است.

شد و سپس برای توسعه مدل از ترکیب پارامترهای مختلف ورودی استفاده شد. توابع پیوندی معرفی شده مورد استفاده در GEP شامل جمع، تفریق، ضرب و تقسیم می‌باشند. با انتخاب یک کروموزوم تک ژنی و افزودن به طول سر آن می‌توان یک مسئله را حل نمود. با این وجود، تعداد ژن‌ها می‌تواند افزایش یابد و اگر تعداد آن‌ها قابل توجه باشد، می‌توان تابعی را برای پیوند دادن شاخه‌های درخت‌های بیان انتخاب کرد (sub-expression trees (sub-ETs) (Shahmansouri et al., 2019).

متغیره توانمندتر است (Bhargava et al., 2011; Ganguly et al., 2009). برای رسیدن به دقت حداکثر، هیچ روش دقیقی برای دستیابی به مدل بهینه با ترکیبی از پارامترها در دسترس نیست و به دلیل پیچیدگی این امر، مدت‌زمان فرآیند مدل‌سازی افزایش می‌یابد. در این تحقیق از مقادیر مختلف پارامترهای مؤثر در GEP به منظور دستیابی به همبستگی‌های کارآمدتر و پیچیده‌تر استفاده شده است. به همین منظور برای به حداکثر رساندن دقت در تمامی مدل‌ها، در ابتدا از پایین‌ترین سطح ممکن مربوط به پارامترهای یک ژن استفاده



شکل ۱. فلوچارت روش برنامه‌نویسی بیان ژن



شکل ۲. تصویر درخت بیان یک کروموزوم (Shahmansouri et al., 2020)

در هنگام استفاده از GEP، پنج مرحله اصلی وجود دارد که سه مرحله اول فضای جست‌وجوی الگوریتم را مشخص می‌کنند و دو مرحله آخر کیفیت و سرعت جست‌وجو را تعیین می‌کنند. این مراحل عبارت‌اند از:

افزایش ورودی‌های مدل، افزایش تعداد ژن‌ها و همچنین افزایش اندازه سر سبب افزایش پیچیدگی مدل می‌شود. همچنین پیچیدگی می‌تواند به دلیل ایجاد نسل جدید به منظور برازش بهتر نیز افزایش یابد (Naderpour et al., 2019).

همچنین برخی از توابع ریاضی پایه مانند جذر و  $X^3$  هستند. وزن کلیه توابع برابر با ۱ در نظر گرفته شده است.

انتخاب معماری کروموزوم شامل انتخاب تعداد ژن و طول سر. در این تحقیق، از تعداد ژن بین ۳ تا ۷ با طول سر بین ۴ تا ۷ استفاده شد و در نهایت تعداد بهینه ژن و طول سر بر اساس نتایج مجموعه آموزش و آزمون انتخاب شد.

انتخاب تابع پیوند برای اتصال ETهای فرعی. در این تحقیق پس از بررسی توابع مختلف و ارزیابی دقت آنها، از تابع "جمع" استفاده شده است.

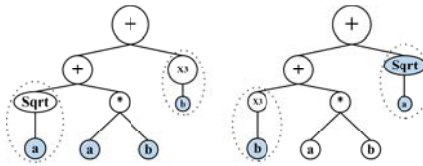
استفاده ترکیبی از کلیه عملگرهای ژنتیکی، یعنی از جابه‌جایی، جهش و تقاطع به‌عنوان مجموعه‌ای از عملگرهای ژنتیکی.

انتخاب تابع برازندگی. تابع برازندگی  $F_i$  در این تحقیق به‌صورت میانگین مربعات خطای (MSE) در نظر گرفته شده است.

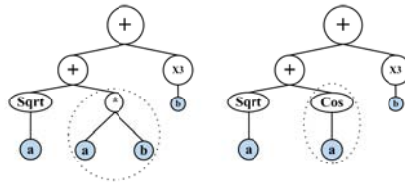
$$f_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\hat{y}_{ij} - y_j)^2 \quad (2)$$

در این رابطه،  $\hat{y}_{ij}$  مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل  $i$ ام برای نقطه داده  $j$ ام (تعداد کل نقاط داده برابر با  $n$ ) و  $y_j$  مقدار اندازه‌گیری شده برای نقطه داده  $j$ ام است.

انتخاب پایانه‌های  $T$  و توابع  $F$  برای ایجاد کروموزوم. در اینجا، مجموعه پایانه‌ها شامل متغیرهای مستقل هستند. همچنین توابع شامل چهار عملگر حسابی (+, -, \*, /) و



(الف)



(ب)

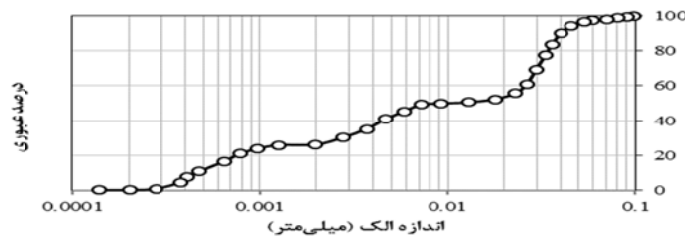
شکل ۳. تصویر درخت کروموزوم با زبان LISP در برنامه‌نویسی بیان ژن (الف) مرحله تقاطع (ب) جهش (Shahmansouri et al., 2020)

### ۳- مواد و روش‌ها

#### ۳-۱- مواد

خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان و آهک هیدراته مورد استفاده نیز در جدول ۲ داده شده است.

نمودار دانه‌بندی خاک رس موردنظر در شکل ۴ و مشخصات خاک مورد بررسی در جدول ۱ داده شده است.



شکل ۴. نمودار دانه‌بندی خاک مورد استفاده

جدول ۱. مشخصات خاک مورداستفاده در این تحقیق

پارامتر	مقدار
حد روانی (%)	۲۹
حد خمیری (%)	۲۰
شاخص خمیری (%)	۹
حداکثر چگالی خشک (گرم بر سانتی متر مکعب)	۱/۷
رطوبت بهینه (%)	۱۸/۵
وزن مخصوص (G <sub>s</sub> )	۲/۶
عبوری از الک ۲۰۰ (%)	۹۸
طبقه‌بندی خاک (ASTM D 2487, 1996)	رس با خمیری کم (CL)
طبقه‌بندی خاک بر اساس اشتنو	A4

جدول ۲. خواص ژئوتکنیکی خاک

خواص/ترکیب	آهک هیدراته	سیمان پرتلند
چگالی بالک (گرم بر متر مکعب)	۴۹۰	۱۳۸۰
وزن مخصوص	۲/۳۵	۲/۱۵
مساحت سطح مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	-	۲۹۰۰
CaO(%)	-	۶۱/۳
Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	۹۶	-
SiO <sub>2</sub> (%)	-	۱۵/۳
MgO(%)	-	۰/۹
Mg(OH) <sub>2</sub> (%)	۰/۵	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	-	۹/۳
CaCO <sub>3</sub> (%)	۱/۵	-
CaSO <sub>4</sub> (%)	۰/۰۳	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	-	۴/۲
K <sub>2</sub> O(%)	-	۰/۸
TiO <sub>2</sub> (%)	-	۰/۱
SO <sub>3</sub> (%)	-	۶/۴

### ۳-۲- روش‌های آزمایشگاهی

#### ۳-۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

با استفاده از مقادیر متوسط وزن مخصوص و درصد رطوبت، مصالح خشک به‌اندازه کافی برای تهیه نمونه‌های استوانه‌ای متراکم شده به قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر، کاملاً در همزن به مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند و سپس به آرامی رطوبت موردنظر افزوده گردید. مصالح بلافاصله پس از اختلاط، در قالب استوانه‌ای متراکم شدند. برای این منظور، خاک در پنج لایه مساوی در قالب ریخته شد و هر لایه با استفاده از چکش فولادی متراکم گردید تا حداکثر

دانسیته خشک موردنظر قبل از ریختن لایه بعدی به دست آید. سپس نمونه‌های استوانه‌ای از قالب خارج و پس از توزین برای عمل‌آوری در سلفون نایلونی قرار داده شدند. برای هر دوره عمل‌آوری، سه نمونه آماده شد که هر یک از آنها در داخل سلفون نایلونی قرار داده شدند. کلیه نمونه‌ها در دمای اتاق (تقریباً ۲۴°C) عمل‌آوری شدند. علاوه بر این، نمونه‌ها پس از آب‌بندی در حمام آب غوطه‌ور شدند تا محیط عمل‌آوری با رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد تأمین گردد. در این تحقیق زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸ و ۶۰ روز در نظر گرفته شد. در این تحقیق، نمونه‌ها در بازه ۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸ و ۶۰ روزه با میزان رطوبت اولیه مختلف (میزان رطوبت بهینه، ۲ درصد بیشتر از

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - t_i)^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}_i)^2} \quad (7)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{t}_i} \quad (8)$$

در معادلات فوق  $t$  مقدار اندازه‌گیری شده (واقعی)،  $o$  مقدار خروجی مدل و  $n$  تعداد کل نقاط داده می‌باشند. عملکرد بهتر مدل با مقدار زیاد  $R^2$ ،  $NSE$ ، و مقدار کم  $RMSE$ ،  $MAE$ ،  $MAPE$  و  $SI$  نشان داده می‌شود. لازم به ذکر است که، عملکرد بهتر مدل با مقدار زیاد  $R^2$  و مقدار کم  $RMSE$ ،  $MAE$ ،  $MAPE$  نشان داده می‌شود (Kumar et al., 2023). همچنین اگر پارامتر  $SI$  مقداری کمتر از ۰/۱ و  $NSE$  مقداری بیشتر از ۰/۷۵ داشته باشد، مدل مورد نظر دارای دقت قابل قبولی است (Alidoust et al., 2022).

#### ۵- پایگاه داده

در تحقیق حاضر از دو مجموعه داده (هرکدام ۷۵ نقطه داده) حاصل از مطالعات آزمایشگاهی تشریح شده در قسمت‌های قبل جهت مدلسازی مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت‌شده با سیمان و آهک استفاده شده است. این داده‌ها شامل درصد سیمان یا آهک (%، درصد رطوبت (% و زمان عمل‌آوری (روز) به‌عنوان متغیرهای مستقل و مقاومت فشاری محصورنشده به‌عنوان متغیر وابسته بودند. مشخصات آماری داده‌ها در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است. در مجموع ۵۲ داده (۷۰ درصد) به‌صورت تصادفی به‌عنوان مجموعه داده آموزش و ۲۳ داده (۳۰ درصد) به‌عنوان مجموعه داده آزمون انتخاب گردید. به‌منظور مشاهده بهتر نحوه توزیع داده‌ها، نمودارهای فراوانی متغیرهای هر دو مجموعه در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است.

رطوبت بهینه (سمت مرطوب) و ۲ درصد کمتر از رطوبت بهینه (سمت خشک)) ساخته شدند. همچنین از سه درصد مختلف ۰، ۳، ۵ و ۹ درصد سیمان و آهک برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد.

#### ۳-۲-۲- آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده

در مطالعه حاضر، آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده با نرخ کرنش ثابت (۲ درصد در دقیقه) انجام شد و هر نمونه تا رسیدن به تنش حداکثر بارگذاری گردید و مقاومت فشاری محصورنشده در هر مورد تعیین گردید.

#### ۴- ارزیابی دقت مدل

در این تحقیق برای سنجش برازش مدل برنامه‌نویسی بیان ژن بر اساس داده‌های آموزش و آزمون از شاخص‌های ضریب تعیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ )، میانگین خطای مطلق ( $MAE$ ) و میانگین درصد مطلق خطا ( $MAPE$ )، Nash-Sutcliffe model efficiency ( $NSE$ ) و شاخص پراکندگی ( $SI$ ) که استفاده شد. این شاخص‌ها با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - o_i)^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |t_i - o_i| \quad (5)$$

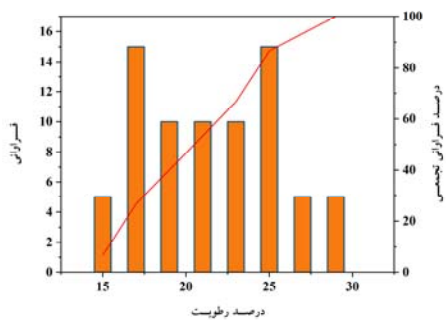
$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n |o_i - t_i|}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (6)$$

جدول ۳. مشخصات آماری داده‌های آزمایشگاهی خاک رس تثبیت‌شده با سیمان

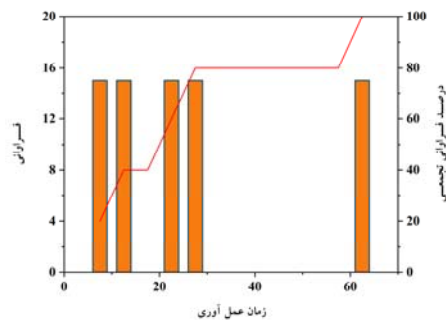
متغیر	حداکثر	حداقل	میانگین	انحراف معیار	معیار
درصد سیمان (%)	۹	۰	۴/۸	۳/۱۴۵	۵
درصد رطوبت (%)	۲۲/۶۵	۱۶/۴	۱۹/۳۷	۱/۸۶	۱۹/۳
زمان عمل‌آوری (روز)	۶۰	۷	۲۶	۱۸/۵۰۹	۲۱
UCS (kPa)	۵۳۶۰	۲۹۵	۲۱۱۳/۴۹۳	۱۲۵۳/۱۹۹	۲۰۳۸

جدول ۴: مشخصات آماری داده‌های آزمایشگاهی خاک رس تثبیت شده با آهک هیدراته.

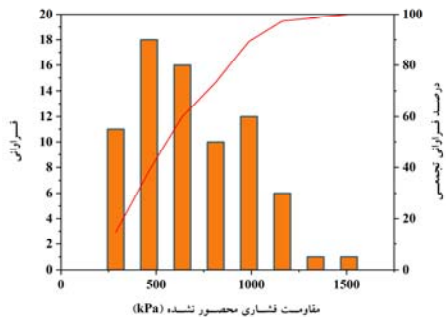
متغیر	حداکثر	حداقل	میانگین	انحراف معیار	میان
درصد آهک (%)	۹	۰	۴/۸	۳/۱۴۵	۵
درصد رطوبت (%)	۲۲/۶۰	۱۶/۵	۲۱/۳۰	۲/۶۴۷	۲۱/۲
زمان عمل‌آوری (روز)	۶۰	۷	۲۶	۱۸/۵۰۹	۲۱
UCS (kPa)	۱۴۵۰	۲۲۰	۶۸۵/۵۸۷	۲۹۲/۵۴۶	۶۱۰



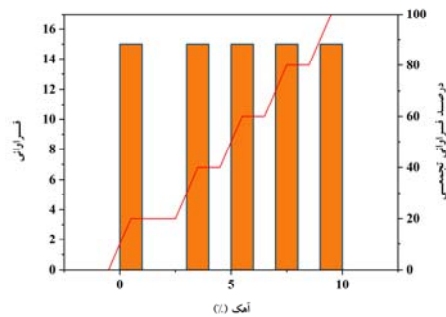
(ب)



(الف)

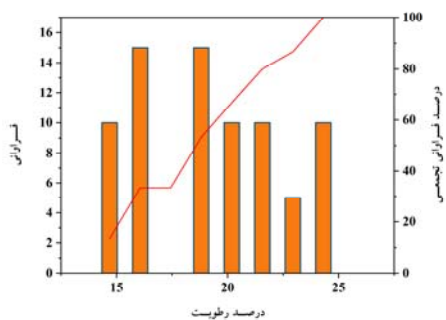


(د)

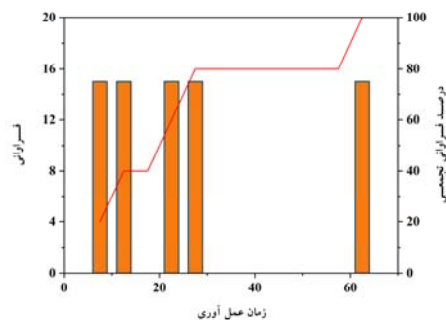


(ج)

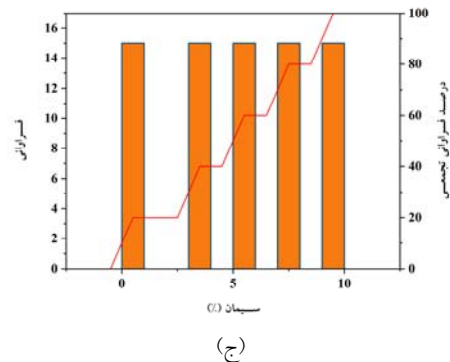
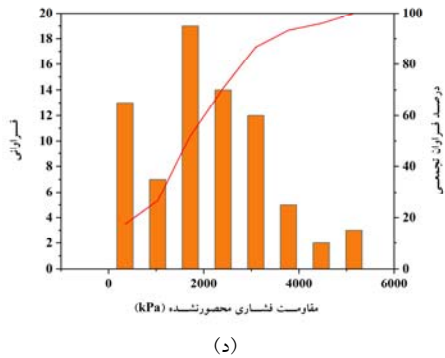
شکل ۵: هیستوگرام فراوانی مربوط به هر یک از متغیرهای مدل توسعه داده شده برای خاک تثبیت شده با آهک



(ب)



(الف)



شکل ۶. هیستوگرام فراوانی مربوط به هر یک از متغیرهای مدل توسعه داده شده برای خاک تثبیت شده با سیمان

### ۶- توسعه مدل پیش بینی مقاومت فشاری محصورنشده

در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که مقادیر بهینه این پارامترها با ساخت مدل های متفاوت و به صورت سعی و خطا تعیین گردید، به گونه ای که مدل توسعه داده شده دچار کم برازشی یا بیش برازشی نگردد.

جهت توسعه مدل های GEP از برنامه GenXpro tool 5.0 استفاده شد. تنظیمات کلی جهت توسعه مدل پیش بینی مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت شده مطابق جدول ۵

جدول ۵. تنظیمات مورداستفاده جهت توسعه مدل های GEP

پارامتر	مقدار (مدل توسعه داده شده برای خاک تثبیت شده با سیمان)	مقدار (مدل توسعه داده شده خاک برای تثبیت شده با آهک)
کروموزوم	۱۰۰	۱۰۰
ژن	۵	۳
اندازه سر	۵	۸
<b>ثابت های عددی</b>		
ثابت در هر ژن	۱۰	۱۰
نوع داده ها	Floting point	Floting point
حد پایین	-۵۰	-۵۰۰
حد بالا	+۵۰	+۵۰۰

همچنین معادله توسعه داده شده برای پیش بینی مقاومت فشاری خاک رس تثبیت شده با آهک بر اساس روش GEP به ترتیب بر اساس سه پارامتر درصد آهک (LP)، درصد رطوبت (MC) و زمان عمل آوری (CT) در رابطه (۱۰) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned}
 UCS_{Lime} = & \left( \frac{\exp(LP)}{-37.3054 + LP} \right) + \\
 & \left( \left( \frac{512.0732}{CT} \right) - (2 \times CT) \right) + \\
 & \left( (LP - 56.0403) + (MC + LP) \right)^3 \times \\
 & \left( \frac{1}{(LP \times (-151.7296))} + \right. \\
 & \left. 134.6934 \right) + \left( (LP + 103.6870) \times \right. \\
 & \left. (CT + 154.7820) \right) / MC - \\
 & \left( 1 - (-324512.1650) \right)^{\frac{1}{3}}
 \end{aligned} \quad (10)$$

معادله توسعه داده شده برای پیش بینی مقاومت فشاری خاک رس تثبیت شده با سیمان بر اساس روش GEP به ترتیب بر اساس سه پارامتر درصد سیمان (CP)، درصد رطوبت (MC) و زمان عمل آوری (CT) در رابطه (۹) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned}
 UCS_{Cement} = & \sqrt{CP^2} \times (MC - 37.4075) \\
 & + (837.4483) - (MC + 0.1906)^2 \\
 & + (2 \times CP) \times (CT - (-38.8481)) + \\
 & (MC - (CP)^2) \times (2 \times CP) + (\tanh(MC \times CP)) \times \\
 & \left( \frac{-46.8260}{CT} \right) \times 53.7572
 \end{aligned} \quad (9)$$

برای پیش بینی مقاومت فشاری خاک رس تثبیت شده با آهک به ترتیب برابر با ۰/۹۱۱ و ۸۷/۸۰ و برای داده‌های آزمون آن به ترتیب برابر با ۰/۸۸۴ و ۱۰۲/۸۸ است. همچنین مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای تمامی داده‌های مدل توسعه داده شده برای پیش بینی مقاومت فشاری خاک رس تثبیت شده با سیمان به ترتیب برابر با ۰/۹۳۳ و ۳۳۷/۹۷ و برای مدل توسعه داده شده برای پیش بینی مقاومت فشاری خاک رس تثبیت شده با آهک برابر با ۰/۹۰۲ و ۹۲/۶۸ می‌باشد.

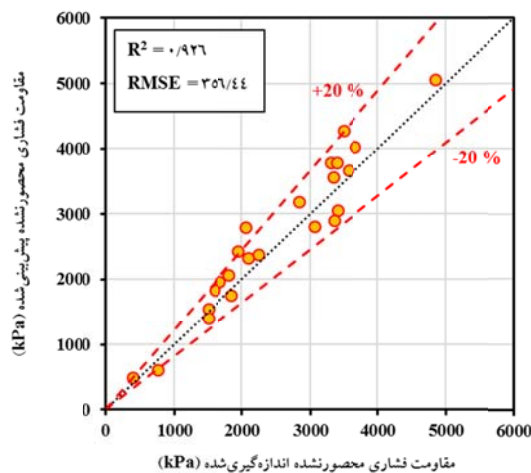
شاخص‌های عملکردی مدل‌های توسعه داده شده به تفکیک برای داده‌های آموزش و آزمون در جدول ۶ داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای داده‌های آموزش مدل توسعه داده شده برای پیش بینی مقاومت فشاری خاک رس تثبیت شده با سیمان به ترتیب برابر با ۰/۹۳۵ و ۳۲۹/۴۷ و برای داده‌های آزمون آن به ترتیب برابر با ۰/۹۲۶ و ۳۵۶/۴۴ است. علاوه بر این، مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای داده‌های آموزش مدل توسعه داده شده

جدول ۶. شاخص‌های آماری مربوط به دقت مدل

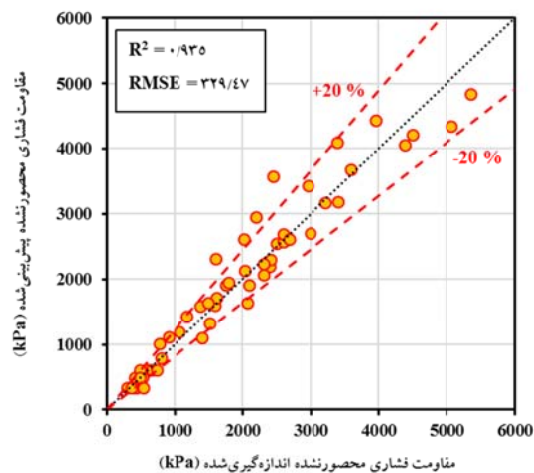
کل داده‌ها	داده‌های آزمون	داده‌های آموزش	پارامتر ورودی
درصد سیمان (CP)، درصد رطوبت (MC) و زمان عمل‌آوری (CT)			
۳۳۷/۹۷	۳۵۶/۴۴	۳۲۹/۴۷	ریشه میانگین خطای مربعات (RMSE)
۰/۹۳۳	۰/۹۲۶	۰/۹۳۵	ضریب تعیین ( $R^2$ )
۲۴۹/۰۱	۲۹۸/۴۳	۲۲۷/۱۶	میانگین خطای مطلق (MAE)
۱۲/۹۹	۱۳/۰۲	۱۲/۹۸	میانگین درصد مطلق خطا (MAPE)
درصد آهک (LP)، درصد رطوبت (MC) و زمان عمل‌آوری (CT)			
۹۲/۶۸	۱۰۲/۸۸	۸۷/۸۰	ریشه میانگین خطای مربعات (RMSE)
۰/۹۰۲	۰/۸۸۴	۰/۹۱۱	ضریب تعیین ( $R^2$ )
۷۰/۷۲	۸۰/۳۵	۶۶/۴۷	میانگین خطای مطلق (MAE)
۱۱/۲۵	۱۲/۲۵	۱۰/۸۰	میانگین درصد مطلق خطا (MAPE)

نشان می‌دهد که مدل‌های توسعه داده شده دقت مناسبی در پیش‌بینی مقاومت فشاری محصور نشده دارند. در مدل توسعه داده شده اکثر داده‌ها دارای خطای کمتر از ۲۰ درصد هستند. بنابراین، مدل‌های پیشنهادی دارای دقت مورد قبول جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری محصور نشده می‌باشند.

عملکرد مدل توسعه داده شده برای پیش بینی مقاومت فشاری خاک رس تثبیت شده با سیمان در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین عملکرد مدل توسعه داده شده برای پیش بینی مقاومت فشاری خاک رس تثبیت شده با آهک در شکل ۸ نشان داده شده است. نزدیکی نقاط داده به خط برابری

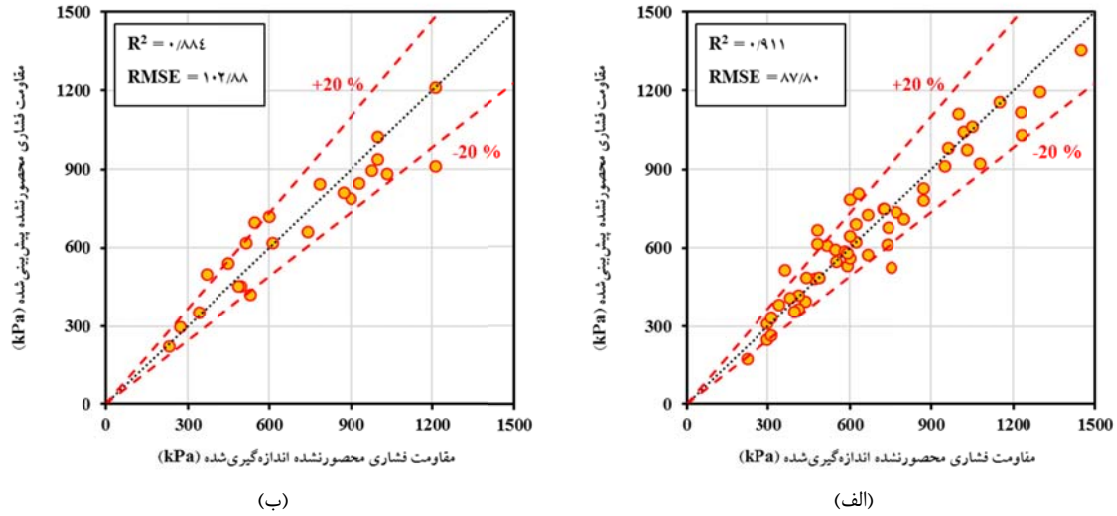


(ب)



(الف)

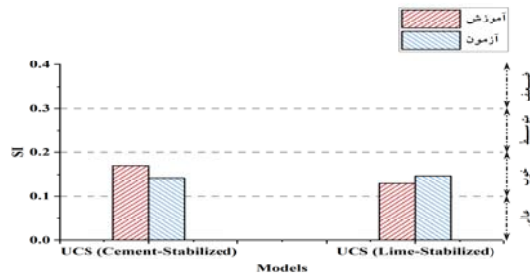
شکل ۷. عملکرد مدل، (الف) داده‌های آموزش و (ب) داده‌های آزمون.



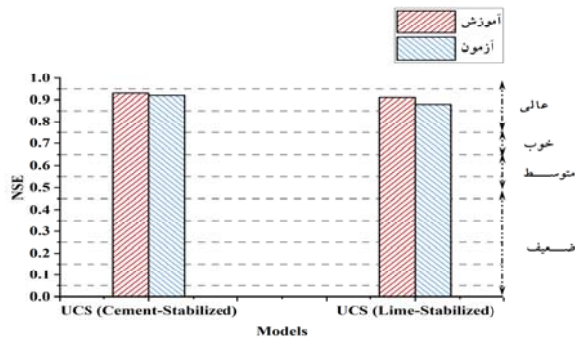
شکل ۸ عملکرد مدل، الف) داده‌های آموزش و ب) داده‌های آزمون

داده‌های آموزش و آزمون هر دو مدل در محدوده خوب قرار دارند. همچنین شکل ۱۰ نشان می‌دهد که پارامتر NSE تمامی داده‌های آموزش و آزمون مدل‌ها بیشتر از ۰/۷۵ است.

در شکل‌های ۹ و ۱۰ مقدار پارامترهای آماری SI و NSE برای بررسی بیشتر دقت مدل‌های توسعه یافته، نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، SI



شکل ۹. مقدار پارامتر SI برای داده‌های آموزش و آزمون مدل‌های توسعه داده شده.



شکل ۱۰. مقدار پارامتر NSE برای داده‌های آموزش و آزمون مدل‌های توسعه داده شده

## ۷- تحلیل حساسیت

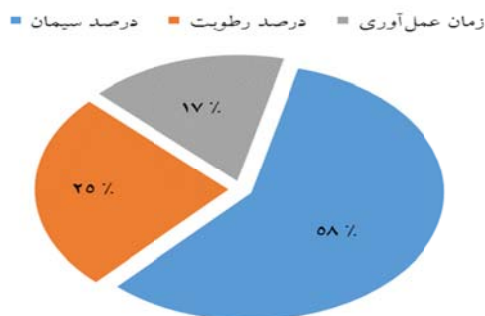
در این تحقیق برای تعیین درجه اهمیت پارامترهای ورودی تأثیرگذار بر مقدار مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت‌شده با سیمان و آهک از تحلیل حساسیت استفاده شده است. برای ارزیابی سهم هر ورودی بر روی خروجی از معادلات زیر استفاده می‌شود.

$$T_i = f_{max}(S_i) - f_{min}(S_i) \quad (11)$$

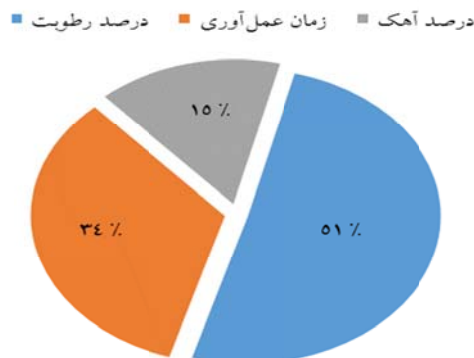
$$SA (\%) = \frac{T_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \times 100 \quad (12)$$

که  $f_{min}(S_i)$  و  $f_{max}(S_i)$  به ترتیب نشان‌دهنده حداکثر و حداقل مقاومت فشاری محصورنشده بر اساس دامنه‌ی ورودی نام می‌باشند درحالی‌که مقدار سایر پارامترهای ورودی ثابت و برابر با میانگین آن‌ها در نظر گرفته شده است. SA دارای مقداری بین ۰ تا ۱۰۰ است که درجه اهمیت هر پارامتر را برای پیش‌بینی مقاومت فشاری محصورنشده نشان

می‌دهد ( $SA = 100$ ) نشان‌دهنده بیشترین تأثیر و  $SA = 0$  نشان‌دهنده کمترین تأثیر است (Alavi et al., 2013; Emamgolizadeh et al., 2015). تحلیل حساسیت مدل‌های توسعه داده‌شده برای مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت‌شده با سیمان و آهک به ترتیب در شکل ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است در مدل توسعه داده شده برای مقاومت فشاری محصور نشده خاک رس تثبیت‌شده با سیمان زمان عمل‌آوری (CT) دارای کمترین تأثیر در بین سایر پارامترها می‌باشد، در حالی‌که، درصد سیمان (PC) و درصد رطوبت (MC) به ترتیب دارای بیشترین تأثیر بر روی مقاومت فشاری محصور نشده می‌باشند. همچنین، در مدل توسعه داده شده برای مقاومت فشاری محصور نشده خاک رس تثبیت‌شده با آهک زمان درصد سیمان (LP) دارای کمترین تأثیر در بین سایر پارامترها می‌باشد، در حالی‌که، درصد رطوبت (MC) و عمل‌آوری (CT) به ترتیب دارای بیشترین تأثیر بر روی مقاومت فشاری محصور نشده می‌باشند.



شکل ۱۱. تحلیل حساسیت مدل توسعه داده شده برای مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت‌شده با سیمان

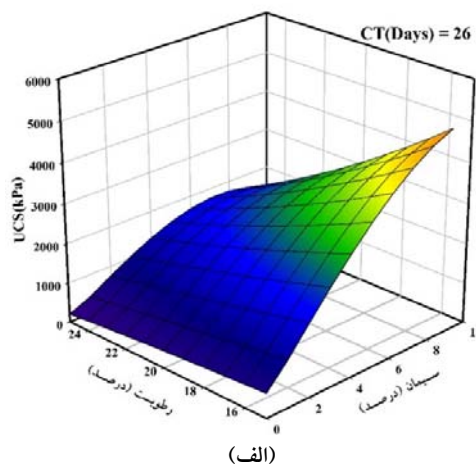
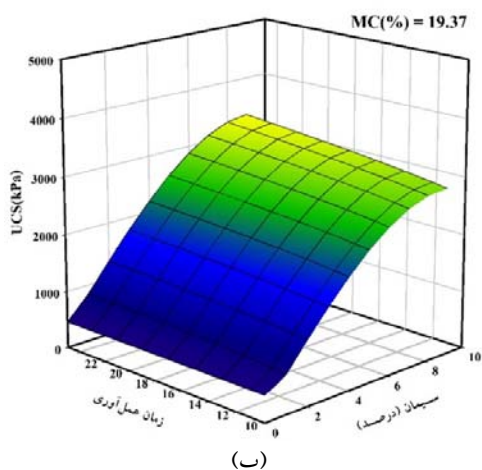


شکل ۱۲. تحلیل حساسیت مدل توسعه داده شده برای مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت‌شده با آهک

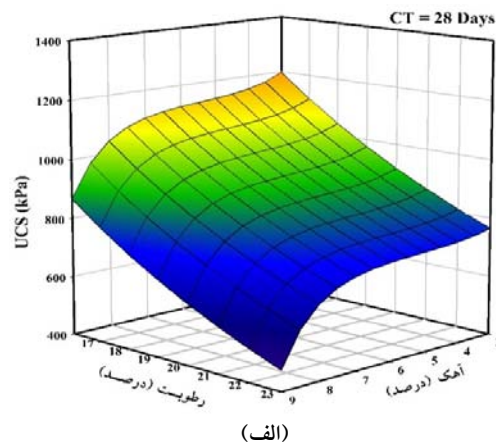
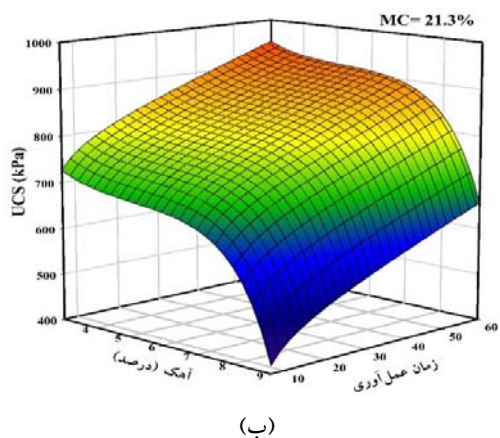
## ۸- تحلیل پارامتریک

به منظور بررسی تأثیر هر یک از پارامترها بر روی مقاومت فشاری محصورنشده از تحلیل پارامتریک استفاده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۳ نشان داده شده است تأثیر سه پارامتر درصد سیمان (CP)، درصد رطوبت (MC) و زمان عمل‌آوری (CT) مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشخص است با افزایش درصد سیمان و زمان عمل‌آوری، مقدار مقاومت فشاری محصورنشده افزایش و با افزایش مقدار درصد رطوبت کاهش می‌یابد. همچنین درصد سیمان و درصد رطوبت دارای بیشترین تأثیر بر پیش‌بینی مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت‌شده با سیمان می‌باشد. شکل ۱۴ نشان‌دهنده تأثیر سه پارامتر درصد آهک (LP)، درصد رطوبت (MC) و زمان عمل‌آوری (CT) بر روی مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت‌شده با آهک می‌باشد. همانطور که مشخص است، با افزایش درصد آهک و زمان عمل‌آوری مقدار مقاومت فشاری محصور نشده به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. در صورتی‌که، مقدار افزایش درصد رطوبت منجر به کاهش مقدار مقاومت فشاری می‌شود. روند تغییرات

پارامترها با آنچه از رفتار خاک رس تثبیت‌شده با سیمان و آهک انتظار می‌رود تطابق دارد و این روند تغییرات توسط سایر محققین نیز به اثبات رسیده است (Ayorloo et al., 2012; Bang et al., 2011; Batioja, 2011; Ganne, 2009; Guthrie et al., 2007; Harichane et al., 2011; Miller et al., 2006; Miura et al., 2001; Sariosseiri & Muhunthan, 2009). علاوه بر این درصد سیمان و آهک دارای تأثیر غیرخطی در پیش‌بینی مقدار مقاومت فشاری محصورنشده می‌باشد. به‌طور کلی محققان در تحقیقات خود، دلیل تأثیر افزایش زمان عمل‌آوری بر روی افزایش مقاومت فشاری محصورنشده را کامل شدن واکنش هیدراتاسیون در حضور افزودنی و تثبیت‌کننده بیان کرده‌اند (Hu et al., 2014; Taslimi Paein Afrakoti et al., 2020). علاوه بر این، محققین گذشته دلیل کاهش مقاومت فشاری با افزایش درصد رطوبت تراکم را وجود آب بیش از نیاز برای فرآیند هیدراتاسیون بیان کرده‌اند (Boutouil & Levacher, 2005).



شکل ۱۳. نتایج تحلیل پارامتریک برای مدل توسعه‌داده شده



شکل ۱۴. نتایج تحلیل پارامتریک برای مدل توسعه‌داده شده

## ۹- نتیجه گیری

مقاومت فشاری محصورنشده افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد رطوبت یا کاهش زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و آهک، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. در محدوده داده‌های مورد ارزیابی در این مقاله و در مورد خاک تثبیت‌شده با سیمان پارامتر ورودی درصد سیمان بیش‌ترین تأثیر و پارامتر زمان عمل‌آوری کمترین تأثیر را بر مقاومت فشاری محصورنشده دارند؛ اما در مورد خاک تثبیت‌شده با آهک پارامتر ورودی درصد رطوبت و درصد آهک به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر را بر مقاومت فشاری محصورنشده خواهند گذاشت.

از مدل توسعه داده شده در این تحقیق می‌توان به منظور پیش‌بینی سریع مقاومت فشاری محصور نشده و طرح تثبیت خاک‌های رسی با خمیری کم تثبیت شده با سیمان و آهک استفاده نمود.

در تحقیق حاضر از روش برنامه‌نویسی بیان ژن برای پیش‌بینی مقاومت فشاری محصورنشده خاک رس تثبیت‌شده با سیمان و همچنین آهک استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که سه پارامتر درصد سیمان (CP)، درصد رطوبت (MC) و زمان عمل‌آوری (CT) دارای تأثیر قابل توجهی بر روی مقاومت فشاری محصورنشده می‌باشند. به طوری که در حالت تثبیت با سیمان مقادیر  $R^2$  جهت پیش‌بینی UCS برای دو مجموعه داده آموزش و آزمون به ترتیب برابر با ۰/۹۳۵ و ۰/۹۲۶ و در حالت تثبیت با آهک به ترتیب برابر با ۰/۹۱۱ و ۰/۸۸۴ می‌باشند. همچنین در حالت تثبیت با سیمان مقادیر RMSE جهت پیش‌بینی UCS برای دو مجموعه داده آموزش و آزمون به ترتیب برابر با ۳۲۹/۴۷ و ۳۵۶/۴۴ و در حالت تثبیت با آهک به ترتیب برابر با ۸۷/۸۰ و ۱۰۲/۸۸ به دست آمد.

نتایج مطالعات پارامتریک نشان داد که در نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و آهک با افزایش درصد سیمان و آهک

## ۱۰- مراجع

- Bang, S., Lein, W., Comes, B., Nehl, L., Anderson, J., Kraft, P., deStigter, M., Leibrock, C., Roberts, L., & Sebaaly, P. E. (2011). *Quality Base Material Produced Using Full Depth Reclamation on Existing Asphalt Pavement Structure-Task 4: Development of FDR Mix Design Guide*. United States. Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology.
- Basma, A. A., & Tuncer, E. R. (1991). Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays. *Transportation Research Record*, 1295.
- Batioja, D. D. (2011). Evaluation of cement stabilization of a road base material in conjunction with full-depth reclamation in Huaquillas, Ecuador. *Brigham Young University*.
- Bekhiti, M., Trouzine, H., & Rabehi, M. (2019). Influence of waste tire rubber fibers on swelling behavior, unconfined compressive strength and ductility of cement stabilized bentonite clay soil. *Construction and Building Materials*, 208, 304-313.
- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4), 223-237.
- Bergado, D. T., Anderson, L. R., Miura, N., & Balasubramaniam, A. S. (1996). *Soft ground improvement in lowland and other environments*.
- Ayorloo, A. M., Mroueh, H., & Lancelot, L. (2012). Experimental investigation of cement treated sand behavior under triaxial test. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 129-143.
- Alavi, A. H., Gandomi, A. H., & Mollahasani, A. (2012). A genetic programming-based approach for the performance characteristics assessment of stabilized soil. *Variants of Evolutionary Algorithms for Real-World Applications*, 343-376.
- Alavi, A. H., Gandomi, A. H., Nejad, H. C., Mollahasani, A., & Rashed, A. (2013). Design equations for prediction of pressuremeter soil deformation moduli utilizing expression programming systems. *Neural Computing and Applications*, 23(6), 1771-1786. doi.org/10.1007/s00521-012-1144-6
- Alidoust, P., Goodarzi, S., Tavana Amlashi, A., & Sadowski, L. (2022). Comparative analysis of soft computing techniques in predicting the compressive and tensile strength of seashell containing concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-23. doi.org/10.1080/19648189.2022.2102081
- Anagnostopoulos, C. A. (2015). Strength properties of an epoxy resin and cement-stabilized silty clay soil. *Applied Clay Science*, 114, 517-529.

- Furlan, A. P., Razakamanantsoa, A., Ranaivomanana, H., Levacher, D., & Katsumi, T. (2018). Shear strength performance of marine sediments stabilized using cement, lime and fly ash. *Construction and Building Materials*, 184, 454–463.
- Ganguly, S., Datta, S., & Chakraborti, N. (2009). Genetic algorithm-based search on the role of variables in the work hardening process of multiphase steels. *Computational Materials Science*, 45(1), 158–166.
- Ganne, V. K. (2009). *Long-Term Durability Studies on Chemically Treated Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Materials*.
- Ghadir, P., & Ranjbar, N. (2018). Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. *Construction and Building Materials*, 188, 361–371.
- Ghanizadeh, A. R., Heidarabadizadeh, N., Bayat, M., & Khalifeh, V. (2022). Modeling of unconfined compressive strength and Young's modulus of lime and cement stabilized clayey subgrade soil using Evolutionary Polynomial Regression (EPR). *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 56(3), 257–269.  
**doi.org/10.22059/ijmge.2022.306688.594858**
- Ghanizadeh, A. R., & Rahrovan, M. (2019). Modeling of unconfined compressive strength of soil-RAP blend stabilized with Portland cement using multivariate adaptive regression spline. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13, 787–799.
- Ghorbani, A., & Hasanzadehshooiili, H. (2018). Prediction of UCS and CBR of microsilica-lime stabilized sulfate silty sand using ANN and EPR models; application to the deep soil mixing. *Soils and Foundations*, 58(1), 34–49.
- Gillott, J. E. (2012). *Clay in engineering geology*. Elsevier.
- Güllü, H. (2014). Function finding via genetic expression programming for strength and elastic properties of clay treated with bottom ash. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 35, 143–157.
- Guthrie, W. S., Brown, A. V., & Eggett, D. L. (2007). Cement stabilization of aggregate base material blended with reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Record*, 2026(1), 47–53.
- Harichane, K., Ghrici, M., & Kenai, S. (2011). Effect of curing time on shear strength of cohesive soils stabilized with combination of lime and natural pozzolana.
- Bhargava, S., Dulikravich, G. S., Murty, G. S., Agarwal, A., & Colaço, M. J. (2011). Stress corrosion cracking resistant aluminum alloys: Optimizing concentrations of alloying elements and tempering. *Materials and Manufacturing Processes*, 26(3), 363–374.
- Boutouil, M., & Levacher, D. (2005). Effect of high initial water content on cement-based sludge solidification. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 9(4), 169–174.
- Croft, J. B. (1967). The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization. *Geotechnique*, 17(2), 119–135.
- Committee, A. C. I. (1990). State-of-the-art report on soil cement. *ACI Materials Journal*, 87(4), 8–12.
- Dang, L. C., Fatahi, B., & Khabbaz, H. (2016). Behaviour of expansive soils stabilized with hydrated lime and bagasse fibres. *Procedia Engineering*, 143, 658–665.
- Das Braja, M. (1998). Principles of foundation engineering. 2nd ed PWS Publishing Company, 20, 360–380.
- Das, S. K., Samui, P., & Sabat, A. K. (2011). Application of artificial intelligence to maximum dry density and unconfined compressive strength of cement stabilized soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29, 329–342.
- Emamgolizadeh, S., Bateni, S. M., Shahsavani, D., Ashrafi, T., & Ghorbani, H. (2015). Estimation of soil cation exchange capacity using Genetic Expression Programming (GEP) and Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS). *Journal of Hydrology*, 529, 1590–1600.  
**doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.025**
- Ferreira, C. (2001). Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *ArXiv Preprint Cs/0102027*.
- Ferreira, C. (2002). Gene expression programming in problem solving. In *Soft computing and industry*, Springer, 635–653.
- Ferreira, C. (2006). Automatically defined functions in gene expression programming. In *Genetic systems programming*, Springer, 21–56.

- fuzzy technique to predict the unconfined compressive strength of PFA-sand-cement mixture. *Powder Technology*, 278, 278–285.
- Mozumder, R. A., & Laskar, A. I. (2015). Prediction of unconfined compressive strength of geopolymer stabilized clayey soil using artificial neural network. *Computers and Geotechnics*, 69, 291–300.
- Mozumder, R. A., Laskar, A. I., & Hussain, M. (2017). Empirical approach for strength prediction of geopolymer stabilized clayey soil using support vector machines. *Construction and Building Materials*, 132, 412–424.
- 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.
- Nelson, J., & Miller, D. J. (1997). *Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering*. John Wiley & Sons.
- Ola, S. A. (1978). Geotechnical properties and behaviour of some stabilized Nigerian lateritic soils. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 11(2), 145–160.
- Oluwatuyi, O. E., Adeola, B. O., Alhassan, E. A., Nnochiri, E. S., Modupe, A. E., Elemile, O. O., Obayanju, T., & Akerele, G. (2018). Ameliorating effect of milled eggshell on cement stabilized lateritic soil for highway construction. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00191.
- Rios, S., Cristelo, N., Viana da Fonseca, A., & Ferreira, C. (2016). Structural performance of alkali-activated soil ash versus soil cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 04015125.
- Sariosseiri, F., & Muhunthan, B. (2009). Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils. *Engineering Geology*, 104(1–2), 119–125.
- Sathyapriya, S., Arumairaj, P. D., & Ranjini, D. (2017). Prediction of unconfined compressive strength of a stabilised expansive clay soil using ANN and regression analysis (SPSS). *Asian Journal of Research in Social Sciences and Humanities*, 7(2), 109–123.
- Shahmansouri, A. A., Bengar, H. A., & Ghanbari, S. (2020). Compressive strength prediction of eco-efficient GGBS-based geopolymer concrete using GEP method. *Journal of Building Engineering*, 31, 101326.
- Shahmansouri, A. A., Bengar, H. A., & Jahani, E. (2019). Predicting compressive strength and electrical resistivity of eco-friendly concrete containing natural zeolite via GEP algorithm. *Construction and Building Materials*, 229, 1–18.
- Sharma, L. K., Sirdesai, N. N., Sharma, K. M., & Singh, T. N. (2018). Experimental study to examine
- Hu, L. M., Lv, X. L., Gao, D. Y., Yan, K. B., & Song, S. Q. (2014). Analysis of the influence of clay dosage and curing age on the strength of plastic concrete. *Advanced Materials Research*, 936, 1433–1437.
- Kumar, A., Arora, H. C., Kumar, K., & Garg, H. (2023). Performance prognosis of FRCM-to-concrete bond strength using ANFIS-based fuzzy algorithm. *Expert Systems with Applications*, 216, 119497.
- Liu, L., Zhou, A., Deng, Y., Cui, Y., Yu, Z., & Yu, C. (2019). Strength performance of cement/slag-based stabilized soft clays. *Construction and Building Materials*, 211, 909–918.
- Liu, Y., Wang, Q., Liu, S., ShangGuan, Y., Fu, H., Ma, B., Chen, H., & Yuan, X. (2019). Experimental investigation of the geotechnical properties and microstructure of lime-stabilized saline soils under freeze-thaw cycling. *Cold Regions Science and Technology*, 161, 32–42.
- 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.
- Mallela, J., Quintus, H. Von, & Smith, K. (2004). Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design. *The National Lime Association*, 200(1), 1–40.
- Manouchehrian, A., Sharifzadeh, M., & Moghadam, R. H. (2012). Application of artificial neural networks and multivariate statistics to estimate UCS using textural characteristics. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22(2), 229–236.
- Miller, H. J., Guthrie, W. S., Crane, R. A., & Smith, B. (2006). *Evaluation of cement-stabilized full-depth-recycled base materials for frost and early traffic conditions*.
- Miura, N., Horpibulsuk, S., & Nagaraj, T. S. (2001). Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content. *Soils and Foundations*, 41(5), 33–45.
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J., Disfani, M. M., Bo, M. W., & Darmawan, S. (2015). Laboratory evaluation of the use of cement-treated construction and demolition materials in pavement base and subbase applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(6), 04014186.
- Motamedi, S., Shamshirband, S., Hashim, R., Petković, D., & Roy, C. (2015). *RETRACTED: Estimating unconfined compressive strength of cockle shell-cement-sand mixtures using soft computing methodologies*. Elsevier.
- Motamedi, S., Shamshirband, S., Petković, D., & Hashim, R. (2015). Application of adaptive neuro-

- networks and multivariate statistics to predict UCS and E using physical properties of Asmari limestones. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 2889–2897.
- Yaghoubi, M., Shukla, S. K., & Mohyeddin, A. (2018). Effects of addition of waste tyre fibres and cement on the engineering behaviour of Perth sand. *Geomechanics and Geoengineering*, 13(1), 42–53.
- Yilmaz, Y., & Ozaydin, V. (2013). Compaction and shear strength characteristics of colemanite ore waste modified active belite cement stabilized high plasticity soils. *Engineering Geology*, 155, 45–53.
- Zhang, T., Yue, X., Deng, Y., Zhang, D., & Liu, S. (2014). Mechanical behaviour and micro-structure of cement-stabilised marine clay with a metakaolin agent. *Construction and Building Materials*, 73, 51–57.
- Zhao, Z., Hamdan, N., Shen, L., Nan, H., Almajed, A., Kavazanjian, E., & He, X. (2016). Biomimetic hydrogel composites for soil stabilization and contaminant mitigation. *Environmental Science & Technology*, 50(22), 12401–12410.
- the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study. *Applied Clay Science*, 152, 183–195.
- Söderlund, O. (2018). *Stabilization of soft soil with lime and petritt-an experimental study*.
- Soleimani, S., Rajaei, S., Jiao, P., Sabz, A., & Soheilinia, S. (2018). New prediction models for unconfined compressive strength of geopolymer stabilized soil using multi-gen genetic programming. *Measurement*, 113, 99–107.
- Suman, S., Mahamaya, M., & Das, S. K. (2016). Prediction of maximum dry density and unconfined compressive strength of cement stabilised soil using artificial intelligence techniques. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2, 1–11.
- Taslimi Paein Afrakoti, M., Janalizadeh Choobbasti, A., Ghadakpour, M., & Soleimani Kutanaei, S. (2020). Investigation of the effect of the coal wastes on the mechanical properties of the cement-treated sandy soil. *Construction and Building Materials*, 239, 117848. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117848](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117848)
- Torabi-Kaveh, M., Naseri, F., Saneie, S., & Sarshari, B. (2015). Application of artificial neural

# Intelligent Modeling of Unconfined Compressive Strength of Stabilized Clay Soil using Gene Expression Programming

*Ali Reza Ghanizadeh, Associate Professor, Department of Civil Engineering,  
Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.*

*Farzad Safi Jahanshahi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Sirjan University  
of Technology, Sirjan. Iran.*

*E-mail: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir*

Received: February 2024- Accepted: June 2024

## ABSTRACT

Application of different stabilizers and additives such as cement, lime, and fly ash is one of the solutions for improving weak and problematic subgrade soils. In this study, a clay soil was stabilized using different percentages of cement and lime (0, 3, 5, 7 and 9%) and with different moisture content (optimum humidity level, wet side and dry side) and unconfined compressive strength (UCS) test was conducted at different curing times (7, 14, 21, 28 and 60 days). Then, the gene expression programming (GEP) method was employed to model the UCS of cement-stabilized and lime-stabilized clay soil. In the developed models, three variables of additive percentage, curing time and moisture content are used as the input variables to predict the UCS. The results of this study showed that the coefficient of determination ( $R^2$ ) for the model developed to predict the UCS of cement-stabilized clay soil is 0.935 and 0.926 for training and testing data, respectively. The  $R^2$  value for the model developed to predict the UCS of lime-stabilized clay soil is 0.911 and 0.884 for training and testing data, respectively. The results of the parametric study showed that the UCS increases with the increase in the percentage of cement and lime and the curing time and decreases with the increase in the moisture content. In addition, results of the sensitivity analysis showed that, in the case of stabilized soil, the input parameter of percentage of cement has the most effect and curing time has the least effect. Also, in the case of soil stabilized with lime, the moisture percentage has the most influence and lime percentage has the least influence on the UCS.

**Keywords:** Prediction of Unconfined Compressive Strength, Portland Cement, Lime, Clay, Gene Expression Programming