

ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک رسی اشباع نرم توسط دو الگوریتم بهینه‌سازی

هادی فتاحی^{۱*}، فرشاد ملک‌محمودی^۲، حسین قائدی^۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۴

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۲۶

چکیده

تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها از جمله مسائل مهمی است که در اثر عواملی مانند ناهمسانی محیط خاک در برگیرنده شمع و مشخصات هندسی آن، تخمین صحیح ظرفیت باربری جانبی یک شمع را با مشکلی همراه می‌سازد. با آنکه آزمایش بارگذاری شمع می‌تواند با وجود دقت بالا، به‌عنوان یک روش قابل‌اعتماد در مراحل مختلف طراحی به کار رود، هزینه‌های زیاد و زمان انجام طولانی را برای پروژه‌های عمرانی و معدنی متحمل می‌شود. در این مقاله، به‌منظور کاربرد روش‌های جدید هوشمند برای تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک‌های رسی نرم (Q_m)، از دو الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورعسل (ABC) و علف‌های هرز (IWO) استفاده شده است. در این مدل‌سازی‌ها از قطر شمع (D)، طول مدفون شمع (L)، خروج از مرکز بار (e) و مقاومت برشی زهکشی نشده خاک (S_u) به‌عنوان پارامترهای ورودی استفاده شده است. در پایان به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌ها، از شاخص‌های ضریب همبستگی مربع (R^2)، شمول واریانس (VAF)، میانگین درصد خطای مطلق (MAPE)، جذر میانگین خطای مربع (RMSE) و میانگین خطای مربع (MSE) استفاده شده است. نتایج ارزیابی نشان داد که برای الگوریتم کلونی زنبورعسل، دقت تخمین با استفاده از شاخص‌های R^2 و VAF حدود ۰/۹۸-۰/۹۹ و با استفاده از شاخص‌های MAPE، RMSE و MSE بین ۰/۰۵۶-۰/۰۰۰۳۲ و همچنین برای الگوریتم علف‌های هرز دقت تخمین با استفاده از شاخص‌های R^2 و VAF حدود ۰/۹۷-۰/۹۸ و با استفاده از شاخص‌های MAPE، RMSE و MSE بین ۰/۰۲۳-۰/۰۰۵۳ به دست آمد. علاوه‌برآن نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان داد که مقاومت برشی زهکشی نشده خاک (S_u)، در میان سایر پارامترهای ورودی، بیشترین تأثیر را بر روی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها دارد و تغییر در آن بیشترین تأثیر را بر روی خروجی مدل‌ها خواهد گذاشت.

کلید واژه‌ها: ظرفیت باربری جانبی شمع، خاک‌های رسی اشباع نرم، الگوریتم کلونی زنبورعسل، الگوریتم علف‌های هرز، تحلیل

حساسیت

^۱ عضو هیات علمی دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک h.fattahi@arakut.ac.ir

^۲ دانشجوی دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

در هنگام طراحی سازه‌ها یکی از مهم‌ترین بخش‌ها که بایستی اهمیت ویژه‌ای برای آن قائل شد، طراحی شمع‌های مربوط به سازه است. شمع‌ها، اعضای سازه‌ای و یا ستون‌های زیرزمینی نسبتاً بلندی هستند که برای انتقال بارهای سازه از میان لایه‌های خاک با ظرفیت باربری کم به خاک‌های سخت و محکم با ظرفیت باربری زیاد در ژرفای بیشتر و یا بر روی بستر سنگی به کار می‌روند، تا بتوانند بار وارده را تحمل کرده و نشست سازه‌های سطحی را تا حد مجاز کاهش دهند. در غیر این صورت در اثر گسیختگی خاک زیر پی و یا نشست‌هایی بیش از حد و غیرهمگن، تخریب سازه حتمی است (Das, 2015).

رفتار شمع تحت اثر بارگذاری جانبی به مراتب پیچیده‌تر از شمع تحت بار قائم بوده و وابسته به نوع شمع نیز است. در این حالت ممکن است گسیختگی در اثر چرخش، خم‌شدگی (کمانش و گسیختگی خمشی) و یا جابه‌جایی شمع (گسیختگی برشی) باشد و یا فاصله‌ای چندین متری بین پشت شمع و خاک به وجود آید. در شمع‌های کوتاه خم‌شدگی رخ نداده اما امکان چرخش و جابه‌جایی وجود دارد که به این شمع‌ها صلب گفته می‌شود. در شمع‌های بلند و لاغر خم‌شدگی اتفاق می‌افتد و احتمال تخریب سازه‌ای شمع بالاست که به این گروه، شمع انعطاف‌پذیر گفته می‌شود. علاوه بر نوع شمع، یکی دیگر از عوامل مهم در ظرفیت باربری این‌گونه شمع‌ها، معیار ژئوتکنیکی آن است به طوری که اگر بار وارده از ظرفیت و ویژگی‌های مقاومتی خاک تجاوز کند ماحصل آن جابه‌جایی افقی بزرگ شمع و در نهایت منجر به شکست شالوده عمیق می‌شود؛ بنابراین باتوجه به پیچیدگی‌های رفتار ژئوتکنیکی، انتخاب نوع شمع‌ها و اندرکنش خاک و شمع، مدل‌سازی و پیش‌بینی صحیح رفتار شمع‌ها بسیار دشوار و در مواردی امکان‌ناپذیر است. به همین منظور، برآورد ظرفیت باربری جانبی شمع با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی، به دلیل زمان‌بر و هزینه‌بر بودن آزمایش، روش‌های نظری به دلیل خطای بالا و متغیر بودن

خواص آن‌ها برای هر منطقه، محققین به استفاده از روش‌های رایانه‌ای روی آوردند. اما محاسبه ظرفیت باربری شمع تحت بار جانبی به کمک برنامه‌های رایانه‌ای اجزای محدود و یا تفاضل محدود نیازمند رایانه‌هایی پیشرفته با حافظه موقت و سرعت پردازش بالاست. در سال‌های اخیر روش‌های محاسبات نرم به‌عنوان روش‌های جدید هوشمند برای مدل‌سازی روابط پیچیده در زمینه‌های مختلف ژئوتکنیکی از جمله شمع‌ها مورداستفاده قرار گرفته است که مقادیر مختلف پیش‌بینی شده توسط این روش‌ها نسبت به روش‌های نظری (تحلیلی و تجربی)، عددی و آماری - احتمالاتی به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است (Fattahi and Bazdar, 2017, Javadi et al., 1999). مطالعاتی در سال‌های اخیر در این زمینه منتشر شده است که در این مقاله به برخی از مهمترین آنها پرداخته می‌شود. ژانگ و همکاران (۲۰۰۶) از روش پیشنهادی سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) برای مدل‌سازی ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها با استفاده از ۴۲ داده از شمع‌های بتن مسلح پیش ساخته در منطقه‌ای در شانگهای چین استفاده کردند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که روش مذکور دارای سرعت بالایی در همگرایی و دقت بالایی در پیش‌بینی است (Zhang et al., 2006). پال و دسوال (۲۰۰۸) از روش پیشنهادی ماشین بردار پشتیبان برای مدل‌سازی ظرفیت باربری استاتیکی شمع‌ها با استفاده از ۱۰۵ داده دینامیکی موج-تشن استفاده کردند و نتایج را با روش شبکه عصبی رگرسیون تعمیم یافته مقایسه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که مدل پیشنهادی با دقت مناسبی قادر به تخمین ظرفیت باربری استاتیکی شمع‌هاست (Pal and Deswal, 2008). پال و همکاران (۲۰۱۱) به کمک مدل‌سازی شبکه عصبی رگرسیون تعمیم یافته (GRNN) به تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از ۹۴ مجموعه داده جمع‌آوری شده، پرداختند. سپس برای مقایسه و درستی مدل ایجاد شده از روش‌های تجربی و یک شبکه عصبی مصنوعی بازگشتی (RNN) استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل پیشنهادی از عملکرد بهتری برخوردار است (Pal, 2011). لو و همکاران (۲۰۱۱) از روش

روش‌های هوشمند شبکه عصبی مصنوعی چند لایه (ANN-MLP) و برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) به منظور برآورد ظرفیت باربری پایه‌های شمعی پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که به دلیل پیچیدگی مدل‌سازی و عدم قطعیت مصالح، روش‌های هوشمند جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی و تجربی‌اند (Fatehnia and Amirinia, 2018). شیک و همکاران (۲۰۱۸) برای نشان دادن اثرات سیستم استنتاج فازی و الگوریتم رقابتی استعماری (ICA) بر روی روش توسعه یافته ANN، دو مدل ترکیبی ICA-ANN و ANFIS را در نظر گرفتند، تا ظرفیت باربری جانبی شمع را تخمین بزنند. سپس نتایج این تکنیک‌ها با نتایج مدل ANN مقایسه و بهترین آن‌ها با توجه به نتایج شاخص‌های عملکردی انتخاب شد. نتایج نشان داد که این روش‌ها قادر به پیش‌بینی ظرفیت باربری جانبی شمع با درجه دقت بالایی هستند (Shaik et al., 2018). هرنندی‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از نتایج آزمون نفوذ مخروط (CPT) با کمک دو مدل ANFIS و روش گروهی مدیریت داده‌ها (GMDH) و همچنین مدل مربوط به ادغام چندجمله‌ای فازی (FP) و مدل GMDH به بررسی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در انواع مختلف خاک‌ها پرداختند. علاوه بر این، در مدل ترکیبی ANFIS-GMDH، ضرایب ثابت مدل ANFIS با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانش (GSA) بهینه‌سازی شد. آنها به این نتیجه رسیدند که مدل پیشنهادی ANFIS-GMDH-FP در مقایسه با مدل ترکیبی ANFIS-GMDH-GSA عملکرد بهتری دارد. و همچنین استفاده از رگرسیون خطی چندگانه در مقایسه با تکنیک‌های FP-GMDH و ANFIS-GMDH-GSA از دقت کمتری برخوردار است (Harandizadeh et al., 2018). لو و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی به ارائه یک رویکرد روش‌های هوشمند جدید برای پیش‌بینی ظرفیت باربری قائم شمع‌های رانده شده در خاک‌های بدون چسبندگی با استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک (GA) پرداختند. با توجه به نتایج بدست آمده به این نتیجه رسیدند که مدل ترکیبی SVR-GA نسبت به مدل‌های SVR و

ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها استفاده کردند. آنها از ۲۸ داده آزمون بارگذاری شمع برای ساخت مدل استفاده کردند. نسبت عمق نفوذ (l/d)، تنش نرمال میانگین (σ_m) و تعداد ضربات (n) به عنوان فراسنج‌های ورودی مدل در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از تحلیل حساسیت نشان دادند که نسبت عمق به نفوذ (l/d) در بین فراسنج‌های ورودی، مهمترین عامل تأثیرگذار روی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها است (Liu et al., 2011). ژانگ و همکاران (۲۰۱۲) نیز از مدل ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی مقاومت اصطکاکی جانبی شمع‌هایی با قطر و طول بزرگ استفاده کردند (Zhang et al., 2012). آهانگرآسر و همکاران (۲۰۱۴) یک تکنیک پیشنهادی رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی (EPR) برای ایجاد یک مدل چندجمله‌ای خطی و غیرخطی برای پیش‌بینی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها ارائه دادند. سپس مدل تولید شده را با نتایج حاصل از دو مدل تجربی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل پیشنهادی در مقایسه با روش تجربی از دقت بسیار بالایی برخوردار است (Ahangar-Asr et al., 2014). الکورش و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از نتایج آزمون نفوذ مخروط (CPT) و الگوریتم کمترین مربعات بردار پشتیبان (LSSVM) به پیش‌بینی ظرفیت باربری جانبی شمع در خاک‌های ماسه‌ای پرداختند. سپس مدل ایجاد شده توسط LSSVM با روش‌های تجربی، سنتی مبتنی بر CPT و مدل برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) ارزیابی شد. و مشخص گردید روش LSSVM نسبت به روش‌های سنتی، تجربی و GEP از عملکرد بهتری برخوردار است (Alkroosh et al., 2015). پویا نژاد و جکسا (۲۰۱۷) یک مدل شبکه عصبی مصنوعی چندلایه (ANN-MLP) برای پیش‌بینی رفتار شمع براساس نتایج داده‌های آزمون نفوذ مخروطی (CPT) ساختند. آنها یافته‌های مدل را با روش‌های سنتی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که روابط بدست آمده از روش ANN-MLP به طور قابل توجهی از روش‌های سنتی بهتر است (Nejad and Jaksa, 2017). فاتح‌نیا و امیری‌نیا (۲۰۱۸) در تحقیقی به مرور کاربرد

برای پیش‌بینی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها استفاده کردند. سپس با استفاده از سه شاخص عملکرد R^2 ، $RMSE$ و VAF به این نتیجه رسیدند که مدل پیش‌بینی PSO-ANN به مدل واقعی نزدیکتر و کارایی بالاتری دارد و می‌تواند به عنوان یک روش جدید در این زمینه معرفی شود (Murlidhar et al., 2020). فام و همکاران (۲۰۲۰) از الگوریتم‌های ANN و جنگل تصادفی (RF) برای پیش‌بینی ظرفیت باربری محوری شمع‌ها استفاده کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم RF از الگوریتم ANN و سایر روش‌های تجربی بهتر عمل کرده است (Pham et al., 2020).

باتوجه به مطالعات فوق، همان‌طور که مشخص است به دلیل چندمتغیره بودن پارامترهای ورودی، پیچیدگی در پارامترهای ژئوتکنیکی، اندرکنش بین خاک و شمع و همچنین به دلیل نزدیک بودن به واقعیت مسئله، امروزه روش‌های جدید هوشمند می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند تکمیلی برای پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع‌ها استفاده شود؛ بنابراین از آنجاکه روش‌های الگوریتم‌های هوشمند نسبت به روش‌های تجربی و آماری از دقت پیش‌بینی بالاتری برخوردار هستند، در این مقاله برای تخمین دقیق ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک‌های رسی اشباع نرم از الگوریتم‌های جدید کلونی زنبورعسل و علف‌های هرز استفاده شده است.

۲. خلاصه‌ای از الگوریتم‌های هوشمند مورد استفاده در این

تحقیق

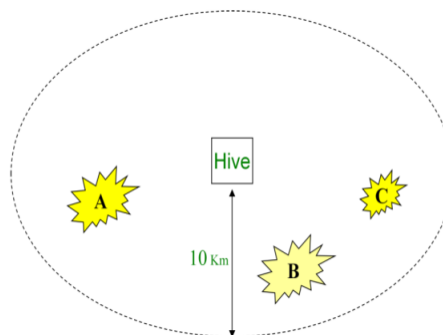
۱-۲. الگوریتم کلونی زنبورعسل (ABC)

الگوریتم کلونی زنبورعسل (ABC) یکی از انواع الگوریتم‌های فراکاوشی در حل مسائل بهینه‌سازی است که مبنای این الگوریتم‌ها رفتار طبیعی موجودات با قوانین فیزیکی موجود در طبیعت است. این الگوریتم برای اولین بار در سال ۲۰۰۵ توسط کارابوگا برای حل مسائل بهینه‌سازی ارائه شد. (Karaboga, 2005) در ادامه به اختصار به کلونی زنبورها، نحوه جست‌وجوی غذا و همچنین به شرح الگوریتم زنبور عسل پرداخته می‌شود.

رگرسیون خطی برتری چشم‌گیری دارد (Luo et al., 2019). خاری و همکاران (۲۰۱۹) براساس ۱۸۳ آزمون مدل‌سازی فیزیکی بر روی خاک‌های شنی خشک در آزمایشگاه به ارزیابی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها پرداختند. سپس براساس نتایج بدست آمده از آزمایشگاه، یک مدل ترکیبی جدید از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)-شبکه عصبی مصنوعی چند لایه (ANN-MLP) برای پیش‌بینی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها پیشنهاد کردند. آنها به منظور صحت‌سنجی مدل پیشنهادی از چندین شاخص عملکرد استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل پیشنهادی PSO-ANN دقت بالایی برای پیش‌بینی دارد (Khari et al., 2019). سان و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از روش پیشنهادی ترکیبی ANFIS و الگوریتم کرم شبتاب (FA) به بررسی ظرفیت باربری شمع‌ها پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل پیشنهادی با ضریب همبستگی بالا ($R^2=0.997$) از اثربخشی مطلوبی برخوردار است (Sun et al., 2020). هرنیدی‌زاده و همکاران (۲۰۱۹) براساس نتایج CPT به پیش‌بینی ظرفیت باربری نهایی شمع با استفاده از روش‌های هوشمند پرداختند. آنها در این تحقیق اولین مدل پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع‌ها را بر اساس ترکیبی از ANFIS و GMDH بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی PSO به نام ANFIS-GMDH-PSO ارائه دادند. سپس مدل دوم به عنوان چند گروهی از شبکه عصبی چندجمله‌ای فازی به روش گروهی مدیریت داده‌ها (FPNN-GMDH) را معرفی کردند. در آخر یک مدل ANN-GMDH به عنوان یک مدل مرجع برای مقایسه و بررسی بین مدل‌های ترکیبی توسعه یافته برای پیش‌بینی استفاده شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که مدل ANFIS-GMDH بهبود یافته نسبت به مدل ANN و FPNN- از نظر صحت و سطح اطمینان نسبت به شاخص‌های عملکرد آماری نظیر ضریب همبستگی، میانگین خطای مربع و جذر میانگین خطای مربع، عملکرد نسبتاً بالاتری دارد (Harandizadeh et al., 2019). مورلیدار و همکاران (۲۰۲۰) از دو مدل هوشمند ترکیبی (GA-ANN) و (PSO-ANN)

۱-۱-۲. کلونی زنبورعسل

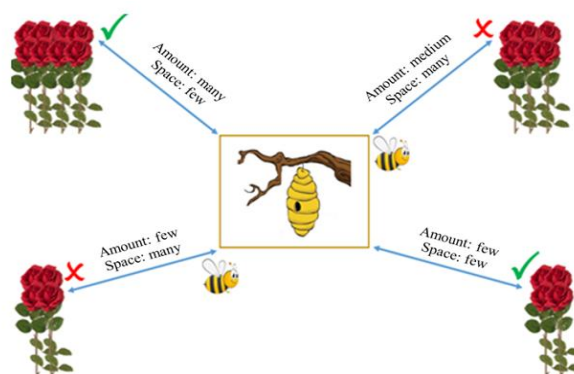
یک کلونی زنبورعسل می‌تواند در مسافت زیادی و نیز در جهت‌های گوناگون پخش شود، تا از منابع غذایی بهره‌برداری کند. قطعات گلدار با مقادیر زیادی نکتار و گرده که با تلاشی کم، قابل جمع‌آوری است، به وسیله تعداد زیادی زنبور بازدید می‌شود؛ به طوری که قطعاتی از زمین که گرده یا نکتار کمتری دارد، تعداد زنبور کمتری را به خود جلب می‌کند. شکل (۱) تلاش زنبور را برای یافتن قطعات گلدار نشان می‌دهد.



شکل ۱. تلاش برای یافتن قطعات گلدار (Pham et al., 2006).

۱-۲-۲. جستجوی غذا در طبیعت

پروسه جستجوی غذای یک کلونی به وسیله زنبورهای کارگر آغاز می‌شود که برای جستجوی گلزارهای امیدبخش (دارای امید بالا برای وجود نکتار یا گرده) فرستاده می‌شوند. زنبورهای کارگر به صورت تصادفی از گلزاری به گلزار دیگر حرکت می‌کنند. زنبورها برای پرواز به انرژی زیادی نیاز دارند؛ بنابراین آنها سعی می‌کنند کوتاه‌ترین و بهترین راه را در بین شبکه‌ای از گل‌ها پیدا کنند. شکل (۲) نحوه جست‌وجوی زنبورها را نشان می‌دهد.



شکل ۲. جستجو برای غذا در حالت بهینه.

به صورت کلی مراحل اجرای این الگوریتم به شرح زیر است (Karaboga, 2005):

۱- تعیین اولیه منابع غذایی توسط رابطه (۱)

$$X_{ij} = X_j^{\min} + \text{rand} \times (X_j^{\max} - X_j^{\min}) \quad (1)$$

به طوری که در آن i و j شماره شکر، X_j^{\min} و X_j^{\max} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار پارامتر i است.

۲- حرکت زنبورهای کارگر به سمت منابع غذایی و تعیین منابع غذایی مجاور طبق رابطه (۲):

$$V_{ij} = X_{ij} + \phi_{ij} (X_{ij} - X_{kj}) \quad (2)$$

در این رابطه z و k به ترتیب پارامترهای منتخب تصادفی و همسایگان تصادفی، ϕ_{ij} یک عدد تصادفی بین -1 و 1 است.

۳- تعیین یک منبع غذایی جدید به نام V_i و حذف X_i در صورتی که مقدار شهد منبع جدید V_i (مقدار برازندگی) بهتر از منبع قبل X_i باشد.

۴- حرکت زنبورهای جستجوگر به سمت منابع غذا و تعیین همسایه‌های جدید طبق مراحل ۲ و ۳، در این حالت زنبور ناظر، یک منبع غذایی را با توجه به مقدار احتمال P_i مربوط به آن منبع غذایی انتخاب می‌کند که این احتمال توسط رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

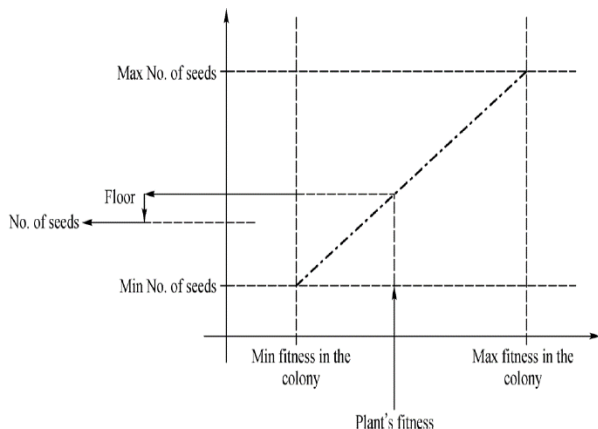
$$P_i = \frac{\text{fitness}_i}{\sum_{j=1}^{SN} \text{fitness}_j} \quad (3)$$

$$\text{fitness}_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + \text{fit}_i} & \text{fit} \geq 0 \\ \frac{1}{1 + \text{abs}(\text{fit}_i)} & \text{fit} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

به طوری که SN تعداد منابع غذا، fit_i هزینه (مقدار تابع هدف) برای منبع غذا X_i و fitness_i مقدار شهد (برازش) منبع غذا X_i است.

۵- در صورتی که پس از مقداری تلاش یک منبع غذایی بهتر در مجاورت این منبع غذایی یافت نشود، یک منبع غذایی اولیه به طور تصادفی توسط یک زنبور پیشاهنگ تعیین می‌شود.

تا بیشترین تعداد تغییر می‌کند و علف‌های هرز با سازگاری بهتر دانه بیشتری تولید می‌کنند. شکل (۴) رابطه خطی بین سازگاری هر عضو از جمعیت و تولید دانه را نشان می‌دهد.



شکل ۴. روند تولید دانه (بذر) در یک کلونی علف‌های هرز.

مطابق شکل (۴)، علف‌های هرز با سازگاری بهتر دانه بیشتری تولید می‌کند. رابطه تولید دانه به صورت رابطه (۵) است:

$$Seed_n = \frac{f - f_{min}}{f_{max} - f_{min}} (S_{max} - S_{min}) + S_{min} \quad (5)$$

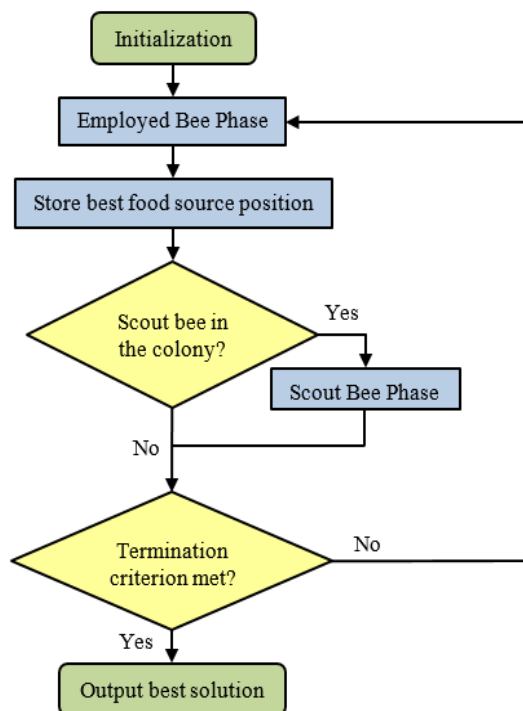
که در آن $Seed_n$ تعداد دانه‌های تولید شده، f سازگاری علف‌های هرز فعلی، f_{min} و f_{max} به ترتیب بیشترین و کمترین سازگاری از جمعیت فعلی و S_{min} و S_{max} به ترتیب بیشینه و کمینه مقدار ممکن تولید دانه هستند.

۲-۲-۲. پراکنندگی فضایی

در این مرحله دانه‌های تولید شده به طور تصادفی در فضای چندبعدی مسئله پراکنده می‌شوند. تابع توزیع تصادفی، تابع نرمال بوده بدین معنی که مقدار متوسط آن برابر صفر و انحراف معیار آن در مراحل مختلف متغیر است و تضمین می‌کند که دانه‌هایی که به صورت تصادفی تقسیم شده‌اند بسیار نزدیک به گیاه والدینشان هستند. مقدار انحراف معیار (σ) تابع توزیع نرمال در هر مرحله از مقدار اولیه تعریف شده ($\sigma_{initial}$) تا مقدار نهایی (σ_{final}) کاهش می‌یابد. ارتباط بین پارامترهای بالا و انحراف معیار را می‌توان به صورت رابطه (۶) بیان نمود:

$$\sigma_{iter} = \frac{(iter_{max} - iter)^n}{(iter_{max})^n} (\sigma_{initial} - \sigma_{final}) + \sigma_{final} \quad (6)$$

۶- مراحل ۲ تا ۵، تا وقتی یک جواب بهینه به دست آید، تکرار می‌شود. به‌طور کلی فلوجارت الگوریتم کلونی زنبور عسل به صورت شکل (۳) است.



شکل ۳. فلوجارت پیاده‌سازی الگوریتم کلونی زنبور عسل.

۲-۲-۲. الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز (IWO)

الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز، یک الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند و تعاملی است که با الهام از روند تکثیر، بقا و تطبیق‌پذیری علف‌های هرز، ایجاد و ابداع شده است. این الگوریتم اولین بار توسط محرابیان و لوکاس در سال ۲۰۰۶ معرفی شد (Mehrabian and Lucas, 2006). علف‌های هرز پدیده‌ای است که در جستجوی بهینگی و یافتن بهترین محیط برای زندگی بوده و به سرعت خود را با شرایط محیطی وفق داده و در مقابل تغییرات مقاوم هستند. مراحل این الگوریتم به صورت تفصیلی به صورت زیر می‌باشد:

۲-۲-۱. تولید مثل

در این روش بهینه‌سازی هر عضو از جمعیت با توجه به میزان توانایی‌هایش دانه تولید می‌نماید. تعداد دانه‌هایی که هر گیاه می‌تواند تولید کند به طور خطی از کمترین تعداد دانه ممکن

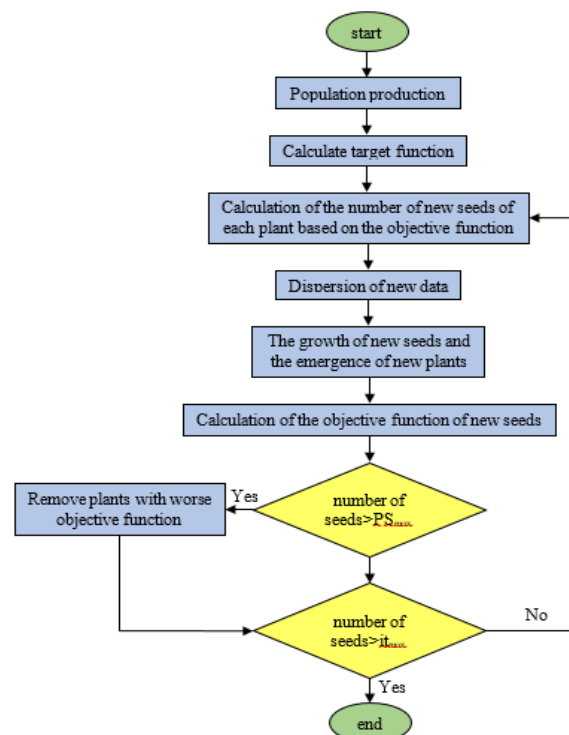
۳. پیش‌بینی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک رسی اشباع نرم توسط الگوریتم‌های کلونی زنبورعسل و علف‌های هرز

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع به دلیل پیچیدگی رفتار خاک امری دشوار، هزینه‌بر و زمان‌بر است؛ لذا نداشتن یک رابطه ریاضی با در نظر گرفتن تمامی پارامترها به صورت دقیق، به طوری که بتوان در موارد دیگر نیز ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها را پیش‌بینی کرد، مشکل و حتی غیرممکن به نظر می‌رسد. به همین دلیل به منظور در نظر گرفتن تمامی پارامترهای تأثیرگذار بر روی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها و نزدیک بودن مقدار پیش‌بینی به مقدار واقعی، استفاده از روش‌های هوشمند جایگزین بسیار مناسبی برای روش‌هایی از قبیل روش‌های تجربی و رگرسیونی است و قابلیت بسط دادن برای تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها با خصوصیات مختلف و فراسنج‌های متنوع را نیز دارد. به همین منظور، در این مقاله، از روش‌های الگوریتم کلونی زنبورعسل و علف‌های هرز برای پیش‌بینی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک‌های رسی اشباع نرم استفاده شده است. مطابق با جدول (۱)، داده‌ها شامل ۳۸ آزمایش بارگذاری شمع تحت بار جانبی واقع بر خاک‌های رسی اشباع نرم در مقیاس کوچک است که پارامترهای قطر شمع (D)، طول مدفون شمع (L)، خروج از مرکزی بار (e) و مقاومت برشی زهکشی نشده خاک (S_{u0}) به عنوان ورودی مدل و از مقاومت جانبی شمع (Q_m) به عنوان خروجی مدل استفاده شده است. در این مدل‌سازی به منظور تخمین دقیق ظرفیت باربری جانبی شمع در خاک‌های رسی اشباع نرم، داده‌ها به صورت تصادفی به دو بخش داده‌های آموزش (Train data) و آزمون (Test data) تقسیم شدند. به همین منظور از بین ۳۸ داده ۸۰ درصد از آن (۳۰ داده) به عنوان داده‌های آموزش (ساخت مدل) و ۲۰ درصد باقیمانده به عنوان داده‌های آزمون (ارزیابی مدل ساخته شده) استفاده شده است.

که در این رابطه $iter_{max}$ بیشترین تعداد دفعات تکرار، σ_{iter} مقدار انحراف معیار در مرحله انجام عملیات و n شاخص غیرخطی بودن مودلاسیون یا شاخص نوسان غیرخطی است.

۲-۳. حذف رقابتی

الگوریتم‌های علف‌های هرز بعد از چند مرحله از تکرار، تعداد دانه‌ها در کلونی در اثر تولیدمثل به بیشترین حد خود می‌رسند. با رسیدن به تعداد بیشینه دانه‌های مجاز (P_{max}) باید سازوکاری برای حذف دانه‌های ضعیف به کار گرفته شود. هنگامی که بیشترین تعداد دانه‌های مجاز تولید شدند، هر دانه می‌تواند با توجه به روش گفته شده در مراحل قبل، دانه‌های جدیدی تولید نماید که می‌تواند در فضای مورد بحث پراکنده شوند. به هر دانه امتیازی داده می‌شود و در مرحله آخر دانه‌ها با امتیاز کمتر حذف می‌شوند. به نحوی که جمعیت دانه‌ها همان آستانه بیشینه بماند. این مراحل تکرار می‌شوند، تا کم‌کم دانه‌ها به دانه بهینه همگرا شوند؛ بنابراین فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز را می‌توان مطابق شکل (۵) ارائه داد.



شکل ۵. فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز.

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق.

| Test data | | | | | Training data | | | | |
|--------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|
| Q _m (N) | S _u (kN/m ²) | e(mm) | L(mm) | D(mm) | Q _m (N) | S _u (kN/m ²) | e(mm) | L(mm) | D(mm) |
| 50 | 5.5 | 50 | 300 | 13.5 | 225 | 24 | 0 | 260 | 13 |
| 49 | 4 | 50 | 300 | 18 | 65.5 | 38.8 | 25.4 | 139.7 | 6.35 |
| 58 | 4 | 50 | 300 | 25.4 | 128 | 24 | 0 | 190 | 13.5 |
| 151.61 | 10 | 50 | 300 | 25.4 | 38 | 3.4 | 50 | 300 | 20.4 |
| 87 | 7.2 | 50 | 300 | 18 | 29.5 | 3.4 | 50 | 300 | 12.3 |
| 69.5 | 38.8 | 19.1 | 146.1 | 6.35 | 64 | 7.2 | 50 | 300 | 13.5 |
| 50 | 3.4 | 50 | 300 | 25.4 | 114 | 10 | 50 | 300 | 18.4 |
| 81 | 10 | 50 | 300 | 12.3 | 65 | 5.5 | 50 | 300 | 18 |
| | | | | | 53 | 38.8 | 33.8 | 132.1 | 13 |
| | | | | | 76.5 | 7.2 | 50 | 300 | 20.4 |
| | | | | | 42.5 | 3.4 | 50 | 300 | 18.4 |
| | | | | | 116.5 | 10 | 50 | 300 | 18 |
| | | | | | 65.5 | 5.5 | 50 | 300 | 18.4 |
| | | | | | 35 | 4 | 50 | 300 | 12.3 |
| | | | | | 30 | 3.4 | 50 | 300 | 13.5 |
| | | | | | 106 | 25 | 0 | 130 | 12.5 |
| | | | | | 39 | 3.4 | 50 | 300 | 18 |
| | | | | | 89 | 10 | 50 | 300 | 18 |
| | | | | | 58 | 7.2 | 50 | 300 | 12.3 |
| | | | | | 87 | 10 | 50 | 300 | 20.4 |
| | | | | | 75 | 5.5 | 50 | 300 | 25.4 |
| | | | | | 86.5 | 7.2 | 50 | 300 | 18.4 |
| | | | | | 46 | 4 | 50 | 300 | 20.4 |
| | | | | | 110.5 | 5.5 | 50 | 300 | 33.3 |
| | | | | | 78.5 | 3.4 | 50 | 300 | 33.3 |
| | | | | | 90 | 7.2 | 50 | 300 | 25.4 |
| | | | | | 44 | 5.5 | 50 | 300 | 12.3 |
| | | | | | 59.5 | 5.5 | 50 | 300 | 20.4 |
| | | | | | 51 | 4 | 50 | 300 | 18.4 |
| | | | | | 36 | 4 | 50 | 300 | 13.5 |

همچنین مشخصات آماری داده‌های ورودی و خروجی (آموزش و آزمون) مدل شامل کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف از معیار به صورت جداگانه مطابق جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات آماری مجموعه داده‌های ورودی و خروجی مدل.

| Test data set | | | | | Training data set | | | |
|-------------------------------------|--------------------|----------|---------|---------|-------------------|----------|---------|---------|
| Parameter | Standard Deviation | Mean | Maximum | Minimum | tandard Deviation | Mean | Maximum | Minimum |
| D(mm) | 7.098563 | 18.04375 | 25.4 | 6.35 | 5.964827 | 17.715 | 33.3 | 6.35 |
| L(mm) | 54.41187 | 280.7625 | 300 | 146.1 | 53.33080 | 278.3933 | 300 | 130 |
| e(mm) | 10.92479 | 46.1375 | 50 | 19.1 | 15.70648 | 43.64 | 50 | 0 |
| S _u (KN/m ²) | 11.784 | 10.3625 | 38.8 | 3.4 | 9.847294 | 9.8333 | 38.8 | 3.4 |
| Q _m (N) | 34.41854 | 74.51375 | 151.61 | 49 | 39.88992 | 43.46667 | 225 | 29.5 |

شده، X_{mea} مقدار واقعی، X_{max} و X_{min} بیشینه و کمینه مقادیر هستند:

$$X_n = [(X_{mea} - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})] \quad (7)$$

پس از نرمال‌سازی داده‌ها، به منظور پیش‌بینی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک رس با استفاده از الگوریتم‌های کلونی

به منظور دستیابی نتایج دقیق و قابل قبول، ابتدا باید داده‌های جدول (۱) نرمال‌سازی شوند تا برای مدل‌سازی آماده شوند و داده‌ها در یک بازه خاص قرار گیرند. به همین منظور، با استفاده از رابطه (۷) مقادیر داده‌های ورودی و خروجی در بازه [۰ و ۱] نرمال می‌شوند. در این رابطه، X_n مقادیر نرمال

$$Q_m = (1.7127D^{0.1962}) \times (1.6106L^{1.8083}) - (0.3586e^{1.9856}) + (2.6140e^{0.6140}) - 2.4151 \quad (10)$$

۴. نتایج ارزیابی مدل‌ها

پس از انجام کدنویسی و پارامترهای تنظیم برای دو الگوریتم گفته شده، به منظور اعتبارسنجی و دقت روابط پیش‌بینی غیرخطی (روابط ۹ و ۱۰) از چندین شاخص آماری شامل ضریب همبستگی مربع (R^2)، شمول واریانس (VAF)، میانگین درصد خطای مطلق (MAPE)، جذر میانگین خطای مربع (RMSE) و میانگین خطای مربع (MSE) استفاده شده است. در حالی که مقادیر R^2 و VAF به عدد یک و مقادیر MAPE، RMSE و MSE به عدد صفر نزدیک شوند نشان‌دهنده دقت بالای مدل تولید شده است و در این حالت مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر واقعی آن نزدیک‌تر و میزان خطا کمتر است. روابط مربوط به شاخص‌های R^2 ، VAF، MAPE، RMSE و MSE به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (Y_{mea} - Y_{pre})^2}{\sum_{k=1}^n Y_{mea}^2 - \frac{\sum_{i=1}^n Y_{pre}^2}{n}} \quad (11)$$

$$VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(Y_{mea} - Y_{pre})}{\text{var}(Y_{mea})} \right] \quad (12)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_{mea} - Y_{pre}| \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{mea} - Y_{pre})^2} \quad (14)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{mea} - Y_{pre})^2 \quad (15)$$

که در آن، Y_{mea} مقادیر اندازه‌گیری شده، Y_{pre} مقادیر پیش‌بینی و n تعداد نمونه‌ها است. مقادیر شاخص‌های ذکر شده برای مدل‌های پیش‌بینی به دست آمده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل و علف‌های هرز در دو حالت آموزش و آزمون به صورت جدول (۵) به دست آمده است.

زنبور عسل و علف‌های هرز، یک معادله غیرخطی به صورت زیر ارائه شد:

$$Q_m = (w_1 D^{w_2}) \times (w_3 L^{w_4}) - (w_5 e^{w_6}) + (w_7 e^{w_8}) - w_9 \quad (8)$$

که در آن w_i عوامل وزندهی برای فرانسج‌های ورودی است. به منظور ایجاد مدل دقیق برای تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک‌های رسی اشباع نرم توسط الگوریتم‌های کلونی زنبور عسل و علف‌های هرز به رابطه ایجاد شده (رابطه ۸) و یکسری فرانسج‌های تنظیم که بصورت سعی و خطا و توسط کاربر داده می‌شود، نیاز است. به همین منظور بهترین فرانسج‌ها برای ساخت مدل دقیق توسط دو الگوریتم کلونی زنبور عسل و علف‌های هرز در جدول (۳) و (۴) ارائه شده است.

جدول ۳. پارامترهای تنظیم برای الگوریتم کلونی زنبور عسل.

| Parameter | Amount |
|-------------------------------------|--------|
| Maximum number of repetitions | 3900 |
| Population size | 50 |
| High limit acceleration coefficient | 0.1 |

جدول ۴. پارامترهای تنظیم برای الگوریتم علف‌های هرز.

| Parameter | Amount |
|-------------------------------|--------|
| Maximum number of repetitions | 3900 |
| Number of initial population | 10 |
| Maximum number of population | 100 |
| Minimum number of seeds | 0 |
| Maximum number of seeds | 10 |
| Initial standard deviation | 1 |
| Final standard deviation | 0.009 |

پس از ایجاد رابطه و پارامترهای تنظیم، باتوجه به کدنویسی‌های انجام شده برای دو الگوریتم توسط نرم‌افزار MATLAB ضرایب پیش‌بینی برای رابطه ۸ به منظور تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع در خاک‌های رسی اشباع نرم، به ترتیب برای دو الگوریتم کلونی زنبور عسل و علف‌های هرز به صورت زیر به دست آمد:

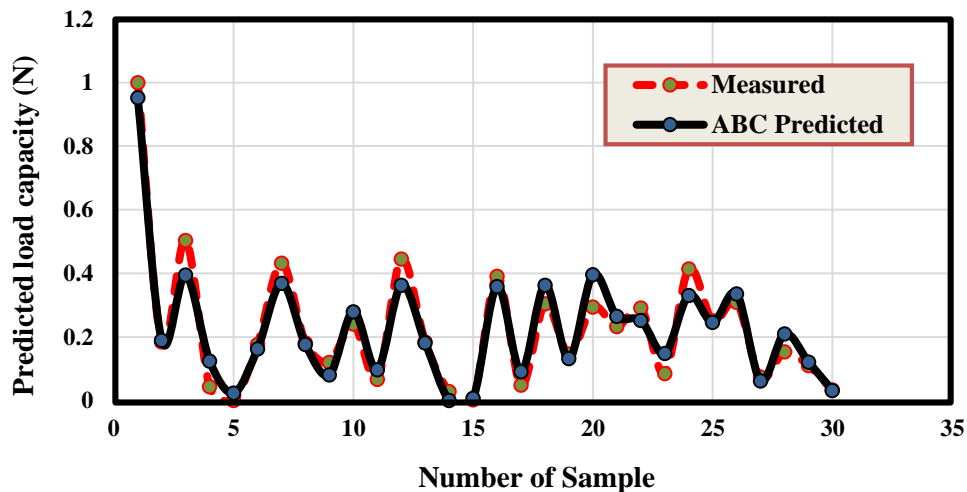
$$Q_m = (-1.3819D^{0.1316}) \times (-1.0145L^{1.3306}) - (1.0261e^{7.7998}) + (0.4580e^{0.3823}) - 0.1776 \quad (9)$$

جدول ۵. اعتبارسنجی روابط پیش‌بینی غیرخطی (روابط ۹ و ۱۰) در دو حالت آموزش و آزمون.

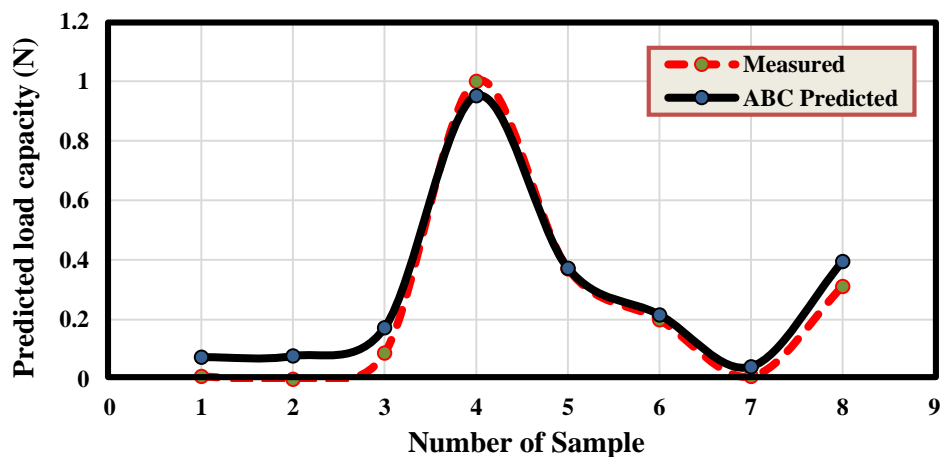
| Type of algorithm | MSE | RMSE | MAPE | VAF | R ² | Description |
|-----------------------------------|----------|--------|--------|--------|----------------|-------------|
| Bee colony optimization algorithm | 0.004703 | 0.0685 | 0.0125 | 0.9378 | 0.9461 | Train |
| | 0.000032 | 0.0056 | 0.0020 | 0.9819 | 0.9922 | Test |
| Weed optimization algorithm | 0.007551 | 0.0868 | 0.0158 | 0.8925 | 0.9206 | Train |
| | 0.000538 | 0.0232 | 0.0082 | 0.9716 | 0.9833 | Test |

شکل‌های (۶) و (۷) نیز مقایسه بین ظرفیت باربری جانبی شمع پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای خاک‌های رسی اشباع نرم در دو حالت داده‌های آموزش و آزمون، برای ۳۸ داده را نشان می‌دهد که باتوجه به توضیحات فوق و شکل‌های به‌دست‌آمده از این مدل می‌توان فهمید که مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری با یکدیگر انطباق بالایی دارند.

باتوجه به جدول (۵)، روابط پیش‌بینی غیرخطی به‌دست‌آمده (روابط ۹ و ۱۰) توسط الگوریتم‌های کلونی زنبورعسل و علف‌های هرز به دلیل نزدیک بودن با مقدار واقعی از دقت بالایی برخوردار است و می‌توان از این روابط به‌عنوان مدل‌هایی برای تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع در خاک‌های رسی اشباع نرم استفاده کرد. به همین منظور،

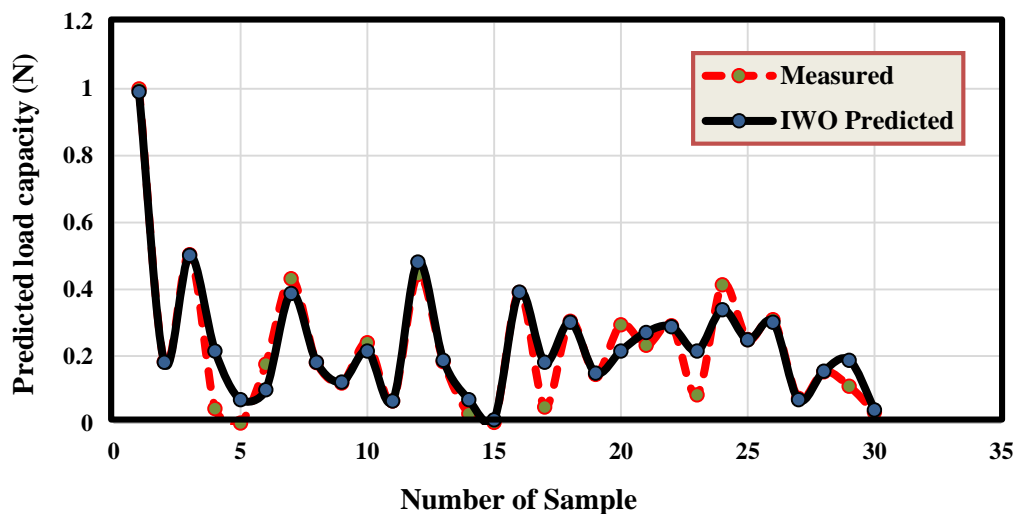


(الف)

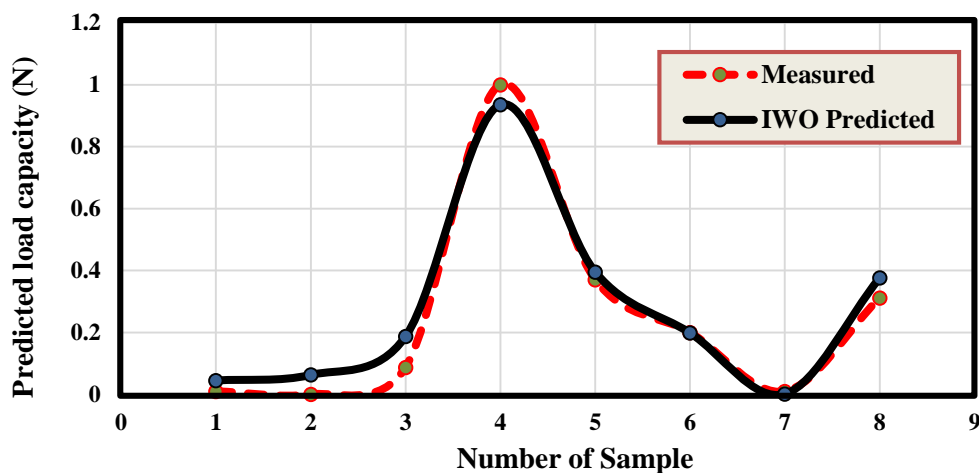


(ب)

شکل ۶. مقایسه بین ظرفیت باربری جانبی شمع اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در خاک رسی اشباع نرم توسط الگوریتم کلونی زنبورعسل برای: (الف) داده‌های آموزش، (ب) داده‌های آزمون.



(الف)



(ب)

شکل ۷. مقایسه بین ظرفیت باربری جانبی شمع اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در خاک رسی اشباع نرم توسط الگوریتم علف‌های هرز برای: الف) داده‌های آموزش، ب) داده‌های آزمون.

رابطه دیگر برای ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک‌های رسی اشباع نرم با استفاده از مطالعات بزرگ - مقیاس مورد بحث و بررسی قرار گیرد و کارایی روش‌های هوشمند در دو حالت بهتر بیان شود. به همین دلیل محققان می‌توانند با مطالعه این مقاله، از این الگوریتم‌ها برای آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا استفاده کنند و یک مدلی را ایجاد کنند تا در کارهای آینده دیگر نیازی به مطالعات کوچک و بزرگ

مطابق با صحت‌سنجی رابطه و همچنین نزدیک بودن مقادیر واقعی با پیش‌بینی توسط الگوریتم‌های هوشمند، می‌توان به این نتیجه رسید که پیش‌بینی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک‌های رسی اشباع نرم در مطالعات کوچک - مقیاس از دقت قابل قبولی برخوردار است و از رابطه ایجاد شده می‌توان در مطالعات موردی دیگر برای آزمایش‌های کوچک - مقیاس استفاده نمود. پیشنهاد می‌شود به‌منظور در نظر گرفتن اثر مقیاس (Size Effect) و همچنین نزدیک بودن به طبیعت مسئله به‌جای مطالعات کوچک - مقیاس از مطالعات بزرگ - مقیاس برای آموزش الگوریتم‌های هوشمند استفاده کرد تا بتوان یک

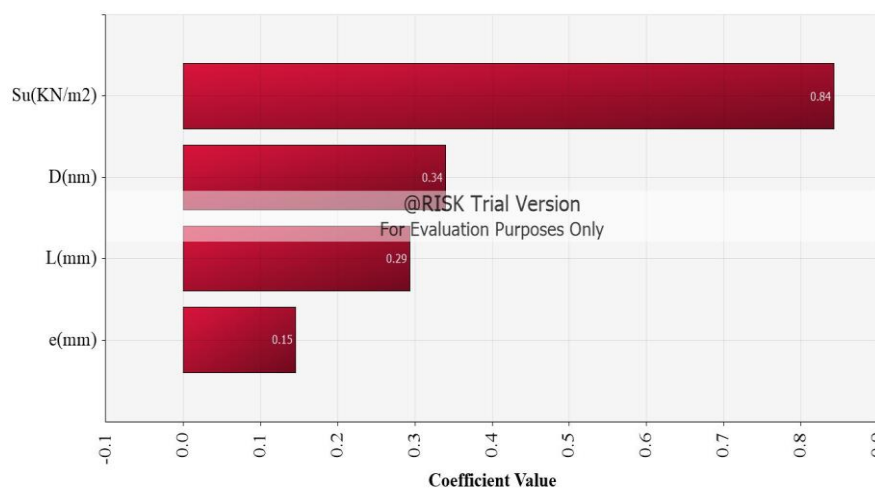
مقیاس نباشد و با داشتن روابط فوق بتوانند با کمترین هزینه و

زمان پیش‌بینی درستی از ظرفیت باربری شمع‌ها داشته باشند.

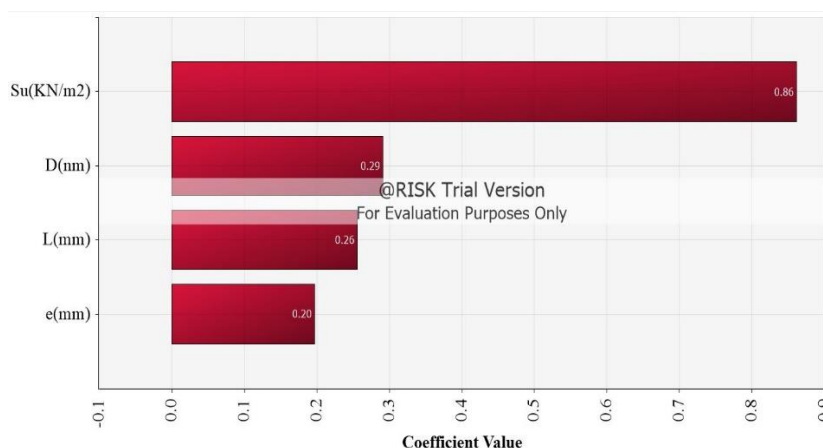
۵. تحلیل حساسیت

باتوجه به ورودی‌های تابع حالت حدی، از آنجاکه ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک به ۴ فرا سنج $D(mm)$ ، $L(mm)$ ، $e(mm)$ و $S_u(KN/m^2)$ وابسته است، یافتن اینکه کدام فرا سنج تأثیر بیشتری روی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک‌ها دارد، حائز اهمیت فراوانی است، به همین دلیل با استفاده از تحلیل حساسیت می‌توان به این نتیجه رسید که از بین این ۴ تا فراسنج کدام یک تأثیرگذاری بیشتری بر روی خروجی مدل دارند. در این تجزیه و تحلیل از نرم‌افزار @RISK برای مشخص کردن همبستگی و همچنین رتبه‌بندی فراسنج‌ها استفاده شده است (Ringelberg et al., 2016).

صورتی که پارامترها هر چقدر به عدد ۱ نزدیک‌تر شوند نشان‌دهنده همبستگی مثبت بیشتر و هرچقدر به عدد ۰-۱ نزدیک‌تر شوند نشان‌دهنده همبستگی منفی بیشتر پارامترها می‌باشد و هرگونه تغییر در آنها، بیشترین تأثیر را بر روی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها خواهند گذاشت. بنابراین شکل ۸ و ۹ به ترتیب نتایج تحلیل حساسیت مربوط به معادله ایجاد شده توسط کلونی زنبور عسل و علف‌های هرز را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است S_u بیشترین تأثیر را بر روی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک را در مقایسه با سایر پارامترهای ورودی داشته است.



شکل ۸: نتایج مقایسه‌ای تحلیل حساسیت رابطه ایجاد شده توسط الگوریتم کلونی زنبور عسل.



شکل ۹: نتایج مقایسه‌ای تحلیل حساسیت رابطه ایجاد شده توسط الگوریتم علف‌های هرز.

۶. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، از ۳۸ آزمون بارگذاری جانبی کوچک - مقیاس شمع، با فراسنج‌های ورودی قطر شمع (D)، طول مدفون شمع (L)، خروج از مرکز بار (e) و مقاومت برشی زهکشی نشده خاک (S_u) جهت تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک رس اشباع نرم توسط دو الگوریتم هوشمند کلونی زنبورعسل و علف‌های هرز بهره گرفته شد. در مرحله مدل‌سازی، به طور تصادفی ۸۰ درصد از داده‌ها در مرحله آموزش، جهت ساخت مدل و ۲۰ درصد باقیمانده در مرحله آزمون برای صحت‌سنجی و ارزیابی مدل‌ها مورداستفاده قرار گرفت. پس از ساخت مدل توسط الگوریتم‌ها و کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی درستی مدل ایجاد شده از شاخص‌های آماری همبستگی مربع (R^2)، شمول واریانس (VAF)، میانگین درصد خطای مطلق (MAPE)، جذر میانگین خطای مربع (RMSE) و میانگین خطای مربع (MSE) برای هر یک از الگوریتم‌ها و داده‌های آموزش و آزمون استفاده شده است. مطابق نتایج به دست آمده در این مقاله، دقت روش‌های هوشمند با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورعسل ۰/۹۸-۰/۹۹ و میزان خطای آن ۰/۰۰۰۰۳۲-۰/۰۰۵۶ به دست آمد همچنین میزان دقت الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز ۰/۹۷-۰/۹۸ و خطای آن

منابع

- Alonso E.E., 1976, "Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays", *Geotechnique*, 26: 453-472.
- Bhattacharya G., Jana D., Ojha S., Chakraborty S., 2003, "Direct search for minimum reliability index of earth slopes", *Computers and Geotechnics*, 30: 455-462.
- Cao Z., Wang Y., Li D. (2017) "Practical reliability analysis of slope stability by advanced Monte Carlo simulations in a spreadsheet". In: *Probabilistic Approaches for Geotechnical Site Characterization and Slope Stability Analysis*. Springer, pp 147-167.
- Cho S.E., 2013, "First-order reliability analysis of slope considering multiple failure modes", *Engineering Geology*, 154: 98-105.
- Christian J.T., Ladd C.C., Baecher G.B., 1994, "Reliability applied to slope stability analysis", *Journal of Geotechnical Engineering*, 120: 2180-2207.

۰/۰۰۰۵۳۸-۰/۰۲۳۲ محاسبه شده است؛ بنابراین باتوجه به اعتبارسنجی و نتایج به دست آمده مشخص شد که مدل ایجاد شده توسط الگوریتم‌های هوشمند کلونی زنبورعسل و علف‌های هرز از دقت بالایی برخوردار بوده و مقدار واقعی به مقدار پیش‌بینی شده بسیار نزدیک است. باتوجه به عدم قطعیت در مقادیر پارامترهای زمین‌شناسی، تابع حالت حدی ایجاد شده قابل تعمیم برای مناطق مشابه (از لحاظ زمین‌شناسی و شرایط ژئوتکنیکی) است و با داشتن مقادیر هر یک از ورودی‌های مدل می‌توان در هر نقطه ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک‌ها را به دست آورد؛ بنابراین، می‌توان به این نتیجه رسید که از این مدل پیشنهادی می‌توان برای ظرفیت باربری شمع در انواع خاک‌های رسی نرم استفاده کرد. در نهایت پس از اعتبارسنجی مدل ساخته شده به منظور بررسی تحلیل حساسیت از نرم‌افزار @RISK استفاده شد و نتایج نشان داده که پارامتر S_u در مقایسه با سایر پارامترهای ورودی مدل بیشترین تأثیر را بر روی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک‌ها دارند. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که دو الگوریتم هوشمند کلونی زنبورعسل و علف‌های هرز جهت تخمین غیرمستقیم ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها کار آبی بالایی دارند و در حل مسائل پیچیده مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک سنگ مورداستفاده قرار می‌گیرند.

- Dodagoudar G., Venkatachalam G., 2000, "Reliability analysis of slopes using fuzzy sets theory", *Computers and Geotechnics*, 27: 101-115.
- Erzin Y., Cetin T., 2013, "The prediction of the critical factor of safety of homogeneous finite slopes using neural networks and multiple regressions", *Computers & Geosciences*, 51: 305-313.
- Farah K., Ltfi M., Hassis H., 2011, "Reliability analysis of slope stability using stochastic finite element method", *Procedia Engineering*, 10: 1402-1407.
- Giasi C., Masi P., Cherubini C., 2003, Probabilistic and fuzzy reliability analysis of a sample slope near Aliano, *Engineering Geology*, 67: 391-402.
- Hammah R., Yacoub T., Curran J. "Probabilistic slope analysis with the finite element method". In: 43rd US Rock Mechanics Symposium & 4th US-Canada Rock Mechanics Symposium, 2009. American Rock Mechanics Association ,
- Hong H., Roh G., 2008, "Reliability evaluation of earth slopes", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134: 1700-1705.
- Jha S.K., 2015, "Effect of spatial variability of soil properties on slope reliability using random finite element and first order second moment methods", *Indian Geotechnical Journal*, 45: 145-155.
- Johari A., Fazeli A., Javadi A., 2013, "An investigation into application of jointly distributed random variables method in reliability assessment of rock slope stability", *Computers and Geotechnics*, 47: 42-47.
- Kacewicz M., 1987, "Fuzzy slope stability method", *Mathematical Geology*, 19: 757-767.
- Li D.-Q., Jiang S.-H., Cao Z.-J., Zhou W., Zhou C.-B., Zhang L.-M., 2015, "A multiple response-surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties", *Engineering Geology*, 187: 60-72.
- Li D.-Q., Xiao T., Cao Z.-J., Phoon K.-K., Zhou C.-B., 2016, Efficient and consistent reliability analysis of soil slope stability using both limit equilibrium analysis and finite element analysis, *Applied Mathematical Modelling*, 40: 5216-5229.
- Li D., Chen Y., Lu W., Zhou C., 2011, "Stochastic response surface method for reliability analysis of rock slopes involving correlated non-normal variables", *Computers and Geotechnics*, 38: 58-68.
- Liang L., Xue-song C., 2012, "The location of critical reliability slip surface in soil slope stability analysis", *Procedia Earth and Planetary Science*, 5: 146-149.
- Low B., Lacasse S., Nadim F., 2007, "Slope reliability analysis accounting for spatial variation", *Georisk*, 1: 177-189
- Malkawi A.I.H., Hassan W.F., Abdulla F.A., 2000, "Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability", *Structural Safety*, 22: 161-187.
- Phoon K.-K. (2008) *Reliability-based design in geotechnical engineering: computations and applications*. CRC Press ,
- Radhi M.M., Pauzi N.M., Omar H. "Probabilistic approach of rock slope stability analysis using Monte Carlo simulation". In: *International Conference in Construction and Building Technology*, Malayzya, 2008 .
- Saboya Jr F., da Glória Alves M., Pinto W.D., 2006, "Assessment of failure susceptibility of soil slopes using fuzzy logic", *Engineering Geology*, 86: 211-224.