

استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند در تخمین تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع

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

^۱ دانشیار گروه مهندسی ژئومکانیک، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک
^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ژئومکانیک، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک

دریافت: ۱۴۰۰/۲/۱۷، بازنگری: ۱۴۰۰/۷/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۱۶، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۸/۱۶

چکیده

خاک‌های غیراشباع حدود ۴۰ درصد از خاک‌های سطح زمین را پوشانده و در اکثر پروژه‌های مهندسی ژئومکانیک به چنین خاک‌های برخورد می‌شود. تعیین مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع براساس اصل تنش مؤثر (هر) به‌منظور استفاده در این‌گونه پروژه‌ها، مستلزم انجام آزمایش‌های نسبتاً وقت‌گیر، پرهزینه و پیچیده است. از طرفی به‌دلیل تغییرات در خصوصیات خاک هر منطقه استفاده از روش‌های تجربی به‌منظور تخمین تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع از دقت کم‌تری برخوردار بوده و با خطا همراه است. به‌منظور برآورد صحیح مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع، هدف از نگارش این مقاله کاربرد روش‌های جدید هوشمند برای تخمین پارامتر تنش مؤثر، با استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند گرگ خاکستری، (Grey wolf optimization) و سینوس-کسینوس، (Sine cosine algorithm) می‌باشد. در این مدل‌ها از پارامترهایی نظیر: مقدار ورودی هوا، مقدار آب حجمی در شرایط باقی‌مانده و اشباع، شیب منحنی مشخصه آب-خاک، فشار محدودکننده خالص و مکش به‌عنوان پارامترهای ورودی و از پارامتر تنش مؤثر به‌عنوان خروجی استفاده شده است. در انتها برای صحت و ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی از شاخص‌های ضریب همبستگی مربع (R^2)، میانگین درصد خطای مطلق، (Mean Absolute Percentage Error)، شمول واریانس، (Variance accounted for)، مجذور میانگین خطای مربع، (Root mean squared error) و میانگین خطای مربع، (Mean squared error) استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند گرگ خاکستری و سینوس-کسینوس دقت و کارایی قابل قبولی را در تخمین پارامتر تنش مؤثر برای خاک‌های غیراشباع دارد.

کلیدواژه‌ها: پارامتر تنش مؤثر، خاک غیراشباع، تخمین غیرمستقیم، الگوریتم گرگ خاکستری، الگوریتم سینوس-کسینوس.

۱- مقدمه

معیارهای شکست موهر-کولمب^۱، مقاومت برشی خاک‌ها به-صورت رابطه زیر است (Bishop, ۱۹۵۹):

$$\tau = \sigma' \tan(\phi') + c' \quad (1)$$

در این رابطه، τ مقاومت برشی، σ' تنش نرمال مؤثر در صفحه شکست، c' و ϕ' پارامترهای مقاومت برشی مؤثر خاک است. تنش مؤثر برای خاک‌های غیراشباع توسط Bishop (۱۹۵۹) به-صورت رابطه (۱) است:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2)$$

با توجه به رابطه فوق، σ تنش کل، u_a فشار هوای منفذی، u_w فشار آب منفذی و χ پارامتر تنش مؤثر است که برای خاک‌های

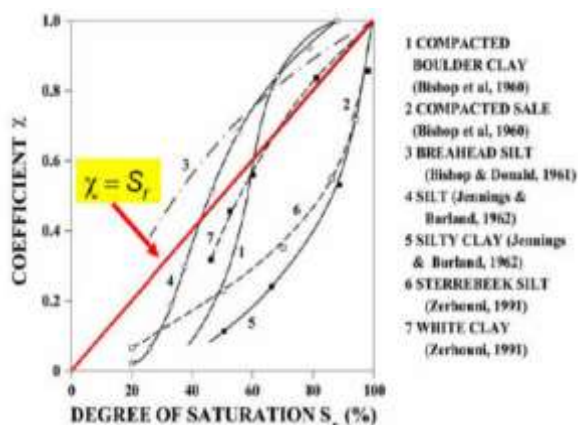
تنش مؤثر (هر) مهم‌ترین بخش از تنش کل است که در تعیین رفتار مقاومتی و تغییر شکل خاک‌ها نقش اساسی داشته و تابع تنش‌های خارجی اعمال شده بر روی توده خاک و فشارهای سیال درون خاک می‌باشد. تنش مؤثر پارامتری مهم برای ارزیابی واکنش‌ها و بررسی رفتار خاک‌های اشباع و غیراشباع می‌باشد. در واقع تنش مؤثر محیط چندفازی با شرایط نفوذپذیری چندگانه خاک را به محیطی تک‌فازی و تک‌تنشی با شرایط مکانیکی واحد تبدیل می‌کند و به‌نوعی ارتباط‌دهنده تغییر شکل خاک، با تغییرات تنش فاز آب و هوا می‌باشد. از آنجاکه مقاومت برشی خاک یکی از پارامترهای مهم و اساسی در تجزیه و تحلیل پایداری سازه‌های سطحی، سدهای خاکی، پی‌ها و شیب‌های طبیعی است، با فرض

1. Mohr-Coulomb

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۸۶-۳۳۴۰۰۷۹۳

که در آن k یک پارامتر مناسب و $\bar{\theta}$ برابر با θ/θ_s است. Garven و Vanapalli (۲۰۰۶) رابطه بین k و شاخص پلاستیسیته^۲ خاک را کردند. نتایج آزمون نشان داد که فشار محدودکننده خاص به-طور قابل توجهی بر منحنی مشخصه آب-خاک (SWCC)^۳ تأثیر می‌گذارد و پارامترهای این منحنی با تغییرات تنش متفاوت هستند (Lee و همکاران، ۲۰۰۵). بنابراین، اثر فشار خاص روی محتوای آب اشباع شده و باقی‌مانده در معادلات (۳) و (۴) در نظر گرفته شد.

در این زمینه برای پارامتر تنش مؤثر روابط متعددی توسط محققین مختلف ارائه شده است که وجه مشترک بیشتر این روابط وابستگی پارامتر تنش مؤثر به رطوبت و درجه اشباع نمونه خاک می‌باشد. بر همین اساس می‌توان به شکل (۲) که نشان‌دهنده یک نمودار از نتایج تحقیقات محققین مختلف برای محاسبه پارامتر تنش مؤثر براساس درجه اشباع می‌باشد، اشاره کرد. در این شکل نمودارهای محققین مختلف ارائه شده است که همگی بر تأثیرپذیری پارامتر تنش مؤثر و روند صعودی آن با افزایش درجه اشباع اتفاق نظر دارند.



شکل ۲- مقادیر مختلف پارامتر تنش مؤثر در برابر درجه اشباع برای تعدادی از خاک‌های مختلف (Zerhouni, ۱۹۹۱)

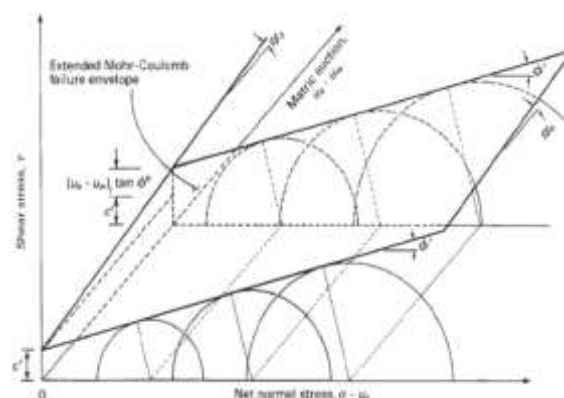
برای محاسبه پارامتر تنش مؤثر روابط و نمودارهای دیگری نیز ارائه شد که از جمله آن‌ها می‌توان به نتایج تحقیقات Khalili و Khabbaz در این زمینه اشاره کرد که نسبت به دیگر روابط ارائه‌شده کامل‌تر می‌باشد. آن‌ها رابطه (۵) را برای محاسبه پارامتر تنش مؤثر ارائه کردند (Khalili و Khabbaz، ۱۹۹۸):

$$\chi = \left(\frac{(u_a - u_w)_a}{(u_a - u_w)_b} \right)^{\gamma} \quad (5)$$

کاملاً خشک برابر صفر و برای خاک‌های کاملاً اشباع برابر ۱ می‌باشد. اما پارامتر تنش مؤثر در خاک‌های غیراشباع به ساختار و خصوصیات خاک بستگی دارد (Loret و Khalili، ۲۰۰۲). به همین دلیل Fredlund و همکاران (۱۹۹۶) وجود پارامتر تنش مؤثر در رابطه ارائه‌شده توسط Bishop را به دلیل وابستگی این پارامتر به خصوصیات نمونه خاک، مورد نقد و بررسی قرار دادند و به همین دلیل Fredlund و همکاران با استفاده از دو پارامتر تنش خاص و مکش موجود، یک پوش گسیختگی مطابق با شکل (۱) برای بررسی خاک‌های غیراشباع ارائه کردند. آن‌ها برای هر یک از پارامترهای تنش خاص و مکش بافتی یک رفتار جداگانه تعریف کردند و تأثیر این دو پارامتر بر روی مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع را متفاوت از یکدیگر دانستند. بنابراین خط گسیختگی موهر-کولمب را به یک صفحه گسیختگی تبدیل کردند. رابطه ارائه‌شده برای پیش‌بینی مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع براساس دو متغیر حالت تنش مستقل توسط Fredlund و همکاران (۱۹۹۶)، به صورت زیر ارائه شد:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi' \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \quad (3)$$

که در آن، θ مقدار آب حجمی در حالت بحرانی، θ_r مقدار آب حجمی باقی‌مانده و θ_s مقدار آب حجمی در شرایط اشباع است.



شکل ۱- پوش گسیختگی Fredlund و همکاران (Fredlund و همکاران، ۱۹۹۶)

Vanapalli و همکاران (۱۹۹۶) یک معادله مشابه با معادله Fredlund و همکاران (۱۹۹۶)، برای مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع پیشنهاد کردند.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi' (\bar{\theta})^k \quad (4)$$

لازم به ذکر است که خصوصیات خاک‌های غیراشباع را می‌توان با استفاده از منحنی مشخصه آب- خاک (SWCC) تعیین کرد. این منحنی مشخصه بسیار مهمی در آنالیز مسائل مکانیک خاک غیراشباع می‌باشد. در واقع، منحنی مشخصه آب- خاک به عنوان رابطه‌ای بین پارامتر مکش و درجه اشباع (درصد رطوبت یا آب حجمی) تعریف می‌شود. منحنی‌های مشخصه خاک‌ها برحسب مورداستفاده، به شکل‌های مختلفی ارائه شده‌اند. اغلب محققان پیشنهاد کرده‌اند که منحنی مشخصه به صورت رابطه بین درصد رطوبت حجمی (θ) و مکش ماتریسی ($u_a - u_w$) در نظر گرفته شود. همچنین برخی از رایج‌ترین و مهم‌ترین معادلات تجربی برای منحنی مشخصه آب- خاک در جدول (۱) ارائه شده است.

مطابق با رابطه فوق، مقدار ورودی هوا در فرآیند خشک شدن و ($u_a - u_w$) مکش موجود در خاک می‌باشد. Zhou فرمول مشابهی را برای پارامتر تنش مؤثر با استفاده از تئوری به صورت زیر مطرح کرده است (Khalili و Russell، ۲۰۰۶).

$$\chi = \begin{cases} 1 & \text{for } \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} < 1 \\ \left(\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right)^{-0.55} & \text{for } 1 < \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} < 25 \\ 25^{0.45} \left(\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right)^{-1} & \text{for } \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} > 25 \end{cases} \quad (۶)$$

جدول ۱- فهرست معادلات پیشنهادی محققان مختلف برای منحنی مشخصه آب- خاک

توضیح پارامترها	معادله	مرجع
θ_s : محتوای آب حجمی اشباع شده θ_w : درصد رطوبت حجمی آب θ_L : حداقل رطوبت ممکن ψ : ارتفاع کاپیلاری ^۴ خاک ψ_L : ارتفاع کاپیلاری خاک در θ_L ξ : ثابت‌های منحنی	$\theta_w = \theta_L + (\theta_s - \theta_L) \left[1 - \exp \left[-\xi \left(\frac{1}{\psi} - \frac{1}{\psi_L} \right)^\eta \right] \right]$	Assouline و همکاران (۱۹۹۸)
$C(\psi)$: تابع تصحیح مکش برای این که در مکش 10 ⁶ kPa درصد رطوبت به صفر برسد. b و c: ثابت‌های معادله	$\theta_w = C(\psi) \times \frac{\theta_s}{\left[\ln \left[\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a} \right)^b \right] \right]^c}$ $C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \right]$	Xing و Fredlund (۱۹۹۴)
a و b: ثابت‌های معادله θ_r : مقدار آب باقی‌مانده	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \left(\frac{\psi}{a} \right)^b}$	Gardner (۱۹۵۸)
A و B: ثابت‌های معادله	$\ln \psi = A + B \ln \theta_w$	Williams و همکاران (۱۹۸۳)
α : ثابت تجربی	$\psi = a \exp \left[\alpha (\theta_s - \theta_w) \right]$	Larson و Farrell (۱۹۷۲)
	$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{a_b}{\psi} \right)^{b_b}$	Corey و Brooks (۱۹۶۴)
	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \exp((\psi - a)/b)}$	Bumb و McKee (۱۹۸۷)
	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a} \right)^b \right]^c}$	Van Genuchten (۱۹۸۰)

تجربی مختلف نشان داده است که هیچ‌یک نمی‌تواند مقاومت برشی انواع خاک‌های غیراشباع را به طور موفقیت‌آمیزی پیش‌بینی کند. به همین دلیل استفاده از روابط بالا در پروژه‌های مختلف با

اگرچه روابط تجربی قبلی برای تخمین تنش مؤثر (χ) ممکن است روشی ساده و کم‌هزینه باشد اما به دلیل متفاوت بودن مقاومت برشی در هر منطقه (وجود عدم قطعیت)، ارزیابی روابط

و الگوریتم سینوس-کسینوس (SCA) به منظور تخمین غیرمستقیم تنش مؤثر برای خاک‌های غیراشباع استفاده شده که در ادامه با استفاده از شاخص‌های آماری، کارایی روش‌های پیشنهادی در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- خلاصه‌ای از الگوریتم‌های هوشمند مورد استفاده در این تحقیق

۲-۱- الگوریتم گرگ خاکستری^۷

الگوریتم گرگ خاکستری، یک الگوریتم فرا ابتکار که توسط Mirjalili و همکارانش (۲۰۱۴) برای حل مسائل بهینه‌سازی معرفی شد. این الگوریتم الهام گرفته از زندگی گروهی گرگ‌ها و طریقه شکار آن‌ها است. زندگی گروهی گرگ‌ها دارای سلسله‌مراتب اجتماعی دقیق و بسیار منظمی است و در رأس زنجیره غذایی قرار دارند. تعداد متوسط گرگ‌های هر گله بین ۵ تا ۱۲ است و در هر گله چهار رتبه اصلی به صورت زیر وجود دارد: ۱- گرگ‌های رهبر گروه آلفا (α) نامیده می‌شوند که می‌توانند مذکر یا مؤنث باشند. این گرگ‌ها بر گله مسلط هستند و مواردی مانند محل استراحت یا نحوه شکار را مدیریت می‌کنند.

۲- گرگ‌های بتا (β) که بعد از گرگ‌های آلفا قرار دارند در فرآیند تصمیم‌گیری به گرگ‌های آلفا کمک می‌کنند و همچنین مستعد انتخاب شدن به جای آن‌ها هستند و در نبود گرگ‌های آلفا می‌توانند نقش رهبر گروه را داشته باشند.

۳- گرگ‌های دلتا (δ) که پایین‌تر از گرگ‌های بتا هستند، عمدتاً شامل گرگ‌های پیر، شکارچی‌ها و گرگ‌های مراقبت‌کننده از نوزادان هستند.

۴- گرگ‌های امگا (ω) که پایین‌ترین مرتبه را در بین گرگ‌ها دارند، کم‌ترین حق را نسبت به بقیه گروه دارند. بعد از همه غذا می‌خورند و در فرآیند تصمیم‌گیری مشارکتی ندارند (Mirjalili و همکاران، ۲۰۱۴؛ Mech، ۱۹۹۹).

با توجه به رتبه‌بندی گرگ‌های خاکستری، شکل (۳) ساختار سلسله‌مراتبی گروهی گرگ‌های خاکستری را نشان می‌دهد.

خطاهای زیادی همراه است. لذا امروزه با توسعه روش‌های هوشمند و علم داده‌کاوی علاوه بر کاهش خطاهای محاسباتی، توانایی بالایی در مدل‌سازی رفتار خطی و غیرخطی داده‌ها به وجود آمده است. اخیراً تحقیقات زیادی در این راستا صورت گرفته که در این مقاله به برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود. Kayadelen (۲۰۰۷) با استفاده از مجموعه داده‌های جمع‌آوری شده از ادبیات و داده‌های مختلف به کمک روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۵ به برآورد تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع پرداختند. تجزیه و تحلیل‌ها نشان داد که نتایج به دست آمده از مدل ANN با نتایج تجربی مطابقت رضایت‌بخشی دارد و می‌توان از ANN به عنوان ابزاری مطمئن برای پیش‌بینی تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع استفاده کرد (Kayadelen، ۲۰۰۸).

Ajdari و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از روش شبکه عصبی پرسپترون^۶ چندلایه با شش نورون در لایه ورودی محتوای حجمی آب در شرایط باقی‌مانده و اشباع‌شده، منحنی مشخصه شیب آب خاک، محتوای حجمی آب، تنش محدود و مکش خالص به پیش‌بینی تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع پرداختند. آن‌ها ادبیات موجود از پایگاه داده تهیه‌شده از نتایج آزمایش برش سه‌محوری برای آموزش و آزمایش شبکه استفاده کردند. نتایج نشان داد که رویکرد پیشنهادی برای برآورد پارامتر تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع بسیار مناسب است (Ajdari و همکاران، ۲۰۱۲).

Samui و Jagan (۲۰۱۳) با استفاده از روش رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR)^۷ توسط پارامترهای ورودی فشار محدودکننده خالص (σ_3)، محتوای آب حجمی اشباع‌شده (θ_s)، مقدار آب باقی‌مانده (θ_r)، فشار حباب (h_b)، مکش‌ها (λ) به پیش‌بینی تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع پرداختند. آن‌ها یک مطالعه مقایسه‌ای بین مدل‌های توسعه‌یافته GPR و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) انجام دادند و نتایج نشان داد که روش GPR توسعه‌یافته یک مدل قابل‌اعتماد برای پیش‌بینی تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع می‌باشد (Samui و Jagan، ۲۰۱۳).

Uysal (۲۰۱۹) در مطالعه خود از دو مدل سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS)، شامل مدل SC-FIS (خوشه‌بندی کاهشی) و مدل FCM-FIS (خوشه‌بندی فازی C-means) برای مقایسه و پیش‌بینی تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع استفاده کرد. در این مطالعه پارامترهای منحنی مشخصه خاک-آب، فشار ثابت، مکش و محتوای آب حجمی به عنوان پارامترهای ورودی برای این دو مدل استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی در این مطالعه نشان داد که این دو مدل قادر به پیش‌بینی تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع با دقت بسیار بالایی می‌باشد (Uysal، ۲۰۲۰). در این مقاله، از دو روش هوشمند جدید به نام‌های الگوریتم گرگ خاکستری (GWO)

7. Gaussian process regression
8. Grey wolf optimization

5. Artificial neural network
6. Perceptron neural network

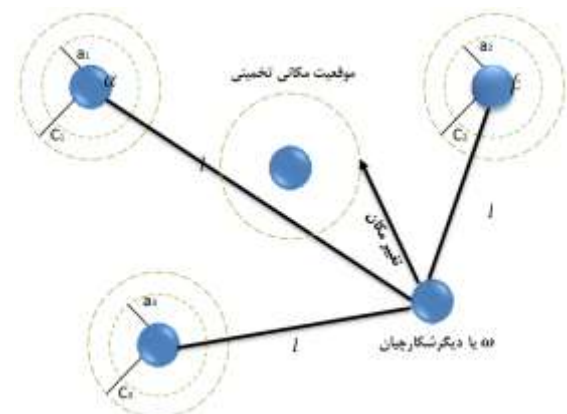
گرگ‌های خاکستری، فرض بر این است که سه دسته اول تا سوم، گرگ آلفا (بهترین راه‌حل‌کننده)، بتا و دلتا از لحاظ موقعیت شکار و طعمه، ارزش و دانش بیشتری دارند. آنگاه دیگر گرگ‌ها متناسب با موقعیت به‌دست‌آمده به‌طور تصادفی، حول شکار حلقه می‌زنند. روابط (۷) تا (۹) چگونگی این تغییر مکان‌ها را بیان می‌کند.

$$\begin{cases} \bar{D}_\alpha = |\bar{C}_1 \times \bar{X}_\alpha - \bar{X}| \\ \bar{D}_\beta = |\bar{C}_2 \times \bar{X}_\beta - \bar{X}| \Rightarrow \bar{C}_i = 2 \times \bar{r}_i \\ \bar{D}_\delta = |\bar{C}_3 \times \bar{X}_\delta - \bar{X}| \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \bar{X}_1 = \bar{X}_\alpha - \bar{A}_1 \times \bar{D}_\alpha \\ \bar{X}_2 = \bar{X}_\beta - \bar{A}_2 \times \bar{D}_\beta \Rightarrow \bar{A}_i = 2 \times \bar{a} \times \bar{r}_i - \bar{a} \\ \bar{X}_3 = \bar{X}_\delta - \bar{A}_3 \times \bar{D}_\delta \end{cases} \quad (8)$$

$$X_{t+1} = \text{mean}(X_1, X_2, X_3) \quad (9)$$

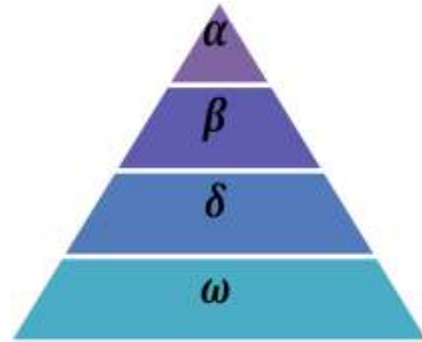
در روابط فوق، \bar{C}_i و \bar{A}_i به ترتیب معرف بردارهای ضرایب به سمت بهترین مکان \bar{r}_1 و \bar{r}_2 بردارهای تصادفی در بازه ۰ و ۱ می‌باشند. \bar{a} ضریبی است که در طول تکرار در بازه ۰ تا ۲ به صورت خطی کاهش می‌یابد. \bar{X} موقعیت مکانی متغیر در وضعیت فعلی، \bar{X}_{t+1} موقعیت مکانی متغیر در وضعیت بعدی و \bar{X}_α ، \bar{X}_β ، \bar{X}_δ به ترتیب موقعیت گرگ آلفا، بتا و دلتا می‌باشد. شکل (۵) چگونگی محاصره جواب نهایی در درون یک دایره به واسطه سه دسته گرگ آلفا، بتا و دلتا در فضای جستجو، و نیز مشخص شدن موقعیت گروه امگا را نشان می‌دهد (Mirjalili و همکاران، ۲۰۱۴).



شکل ۵- موقعیت به‌روزرسانی الگوریتم گرگ خاکستری (Mirjalili و همکاران، ۲۰۱۴)

۲-۱-۳- تشخیص موقعیت طعمه (شناسایی)

گرگ‌های خاکستری عمدتاً با توجه به موقعیت گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا به فرآیند جستجو می‌پردازند. آن‌ها برای جستجوی شکار از یکدیگر فاصله گرفته و برای حمله به آن به یکدیگر نزدیک شده

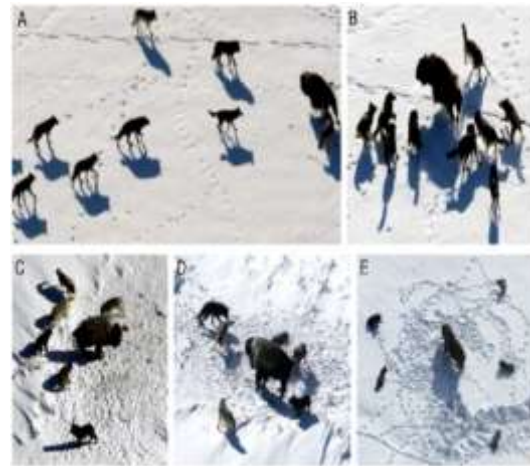


شکل ۳- سلسله‌مراتب گرگ خاکستری (Mirjalili و همکاران، ۲۰۱۴)

۲-۱-۱- فرآیند شکار گرگ‌های خاکستری

مطابق بررسی‌های Muro و همکارانش مراحل اصلی شکار گرگ‌های خاکستری شامل سه فاز اصلی زیر می‌باشند (Mousavi و همکاران، ۲۰۱۶؛ Muro و همکاران، ۲۰۱۱):

- مشاهده شکار، ردیابی و تعقیب آن
 - نزدیک شدن، احاطه کردن (حلقه زدن) به دور شکار و گمراه کردن آن تا زمانی که از حرکت باز بماند.
 - حمله به شکار
- تمامی این مراحل در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- رفتار شکار گرگ‌های خاکستری: الف) تعقیب، نزدیک شدن و ردیابی طعمه، ب، ج، د) تعقیب، محاصره و آزار طعمه، ه) وضعیت ثابت و حمله (Muro و همکاران، ۲۰۱۱)

۲-۱-۲- تشخیص موقعیت طعمه (محاصره طعمه و شکار)

گرگ‌های خاکستری توانایی تشخیص موقعیت طعمه و دور زدن آن‌ها را دارند. شکار کردن معمولاً توسط گرگ آلفا راهنمایی می‌شود. همچنین گرگ بتا و دلتا ممکن است بعضی اوقات در شکار مشارکت کنند. به همین دلیل، در شبیه‌سازی ریاضی رفتار

Mirjalili در سال ۲۰۱۶ مطرح شد (Mirjalili, ۲۰۱۶). معمولاً روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت فرآیند بهینه‌سازی را با یک مجموعه از جواب‌های تصادفی آغاز می‌کند. این مجموعه جواب‌های تصادفی به‌صورت مکرر و پی‌درپی توسط تابع هدف ارزیابی شده و با استفاده از مجموعه قوانینی که هسته تکنیک‌های بهینه‌سازی محسوب می‌شوند، بهبود می‌یابد. از آنجایی که روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت، هدف آن پیدا کردن یک نقطه به‌عنوان تابع بهینه مسئله است، تضمینی برای یافتن یک راه‌حل بهینه مسئله، در یک بار اجرا وجود ندارد. هرچند، با وجود تعداد زیاد و کافی از راه‌حل‌های تصادفی و گام‌های بهینه‌سازی (تکرار)، احتمال یافتن جواب بهینه سراسری، افزایش می‌یابد.

علی‌رغم، تفاوت بین الگوریتم‌ها در حوزه بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت تصادفی، عمدتاً فرآیند بهینه‌سازی به دو فاز اکتشاف و استخراج تقسیم می‌شوند (Črepinšek و همکاران، ۲۰۱۳). در فاز اول، یک الگوریتم بهینه‌سازی راه‌حل‌های تصادفی را در مجموعه راه‌حل‌های ناگهانی با نرخ بالایی از تصادفی بودن برای یافتن نواحی مطلوب در فضای جستجو، ترکیب می‌کند. در فاز استخراج، تغییرات تدریجی در راه‌حل‌های تصادفی وجود دارد و تغییرات تصادفی به نسبت، کم‌تر از فاز اکتشاف هستند. معادلات به-روزرسانی شده برای هر دو فاز به‌صورت زیر می‌باشند:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + r_1 \times \cos(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t| \quad (10)$$

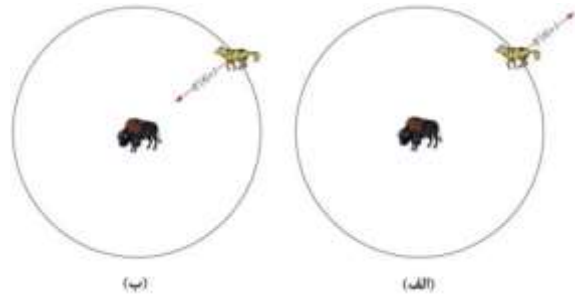
$$X_i^{t+1} = X_i^t + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t| \quad (11)$$

در این رابطه X_i^t وضعیت راه‌حل فعلی در i امین بعد و در تکرار t ام می‌باشد، r_1 و r_2 و r_3 اعداد تصادفی هستند، و P_i^t وضعیت نقطه مقصد در بعد i ام است. معادلات (۱۰) و (۱۱) برای استفاده به‌صورت زیر با هم ترکیب می‌شوند:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t| & r_4 < 0.5 \\ X_i^t + r_1 \times \cos(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t| & r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

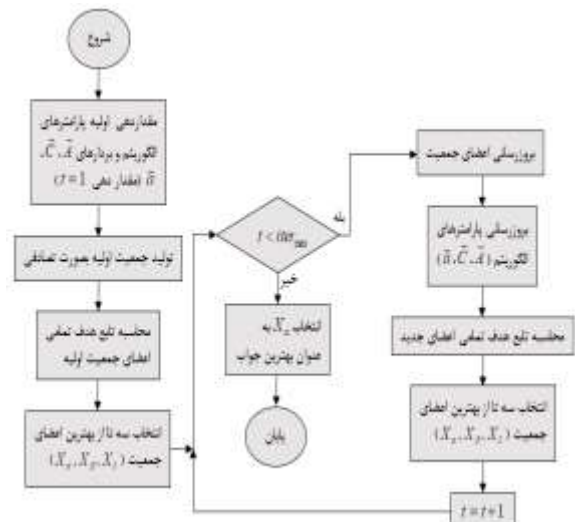
یک مدل فرضی در مورد اثرات تابع‌های سینوسی و کسینوسی با دامنه $[-2, 2]$ در شکل (۸) نشان داده شده است که نشان می‌دهد چگونه یک پاسخ، نیازمند به تغییر دامنه سینوس و کسینوس برای به‌روز کردن موقعیت خود در خارج از فضای بین خود جواب و راه‌حل دیگر است.

و همکاری می‌کنند. شکل (۶-الف) نشان می‌دهد که مقدار $|A| > 1$ گرگ‌ها را وادار به واگرایی از طعمه و یافتن شکاری مناسب‌تر می‌کند. درحالی‌که به‌ازای $|A| < 1$ گرگ‌ها وادار به حمله به سمت شکار می‌شوند (شکل (۶-ب)).



شکل ۶- الف) حمله به شکار، ب) جستجو برای شکار

یکی دیگر از اجزای گرگ خاکستری که بر فرآیند شناسایی تأثیر می‌گذارد، مقدار C است. مقدار این بردار عددی در بازه 0 و 2 است. این مقدار تصادفی تأثیر موقعیت طعمه را در تعیین فاصله، شدت ($C > 1$) یا ضعف ($C < 1$) می‌بخشد. این بردار را نیز می‌توان به‌عنوان تأثیر موانعی در نظر گرفت که از نزدیک شدن به طعمه در طبیعت جلوگیری می‌کنند (Mech, ۱۹۹۹). به‌طور کلی مطابق با توضیحات گفته‌شده، فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷- فلوچارت الگوریتم گرگ خاکستری (Mirjalili و همکاران، ۲۰۱۴)

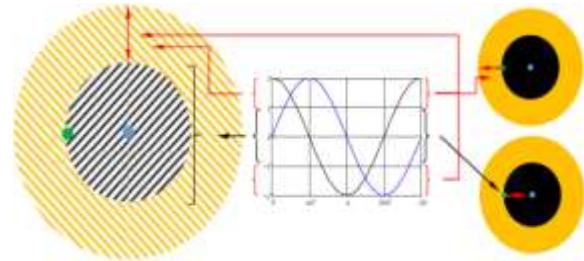
۲-۲- الگوریتم سینوس - کسینوس (SCA)

الگوریتم سینوس - کسینوس (SCA) یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت برای حل مسائل بهینه‌سازی است که اولین بار توسط

لازم به ذکر است ممکن است آزمایشات سه محوری بر روی نمونه‌های غیراشباع انجام شود که در آن صورت این مرحله از آزمایش حذف می‌شود. در مرحله تحکیم به نمونه فشار محدودکننده اعمال می‌شود و در طی این مرحله شیرهای زهکشی در آزمایش‌های CU و CD باز و در آزمایش UU بسته می‌باشد. در عین حال در بیشتر نقاط به دلیل ساخت و ساز خاک‌های کوبنده و متراکم شده، از الگوهای تنشی تست‌های CU و CD پیروی نمی‌کنند. در این گونه موارد اضافه فشار آب حفره‌ای همگام با زمان به سرعت انتشار می‌یابد. در این شرایط می‌توان چنین تصور کرد که فاز هوا زهکشی و فاز آب در حالت زهکشی نشده می‌باشد. این شرایط را می‌توان در تست سه محوری با درصد رطوبت ثابت CW پدید آورد. نتایج تجربی تست‌های CW بر روی خاک نشان می‌دهد که در یک فشار محدودکننده خالص یکسان مقاومت برشی نمونه‌های غیراشباع بسیار بیشتر از نمونه‌های اشباع می‌باشد و در تنش‌های همه‌جانبه پایین با افزایش مقدار مکش خاک عملکردی شبیه به خاک‌های پیش تحکیم یافته از خود نشان می‌دهند.

۴- تخمین غیرمستقیم پارامتر تنش مؤثر با استفاده از الگوریتم‌های گرگ خاکستری و سینیوس - کسینوس

همان‌طور که قبلاً گفته شد، به دلیل هزینه و زمان بر بودن آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌توان از روش‌های غیرمستقیم برای تخمین پارامتر تنش مؤثر استفاده کرد. به همین دلیل، برای نزدیک بودن این گونه روش‌ها با مقادیر واقعی روش‌های هوشمند جایگزین بسیار مناسبی برای روش‌های تجربی و رگرسیونی می‌باشد. به همین منظور، در این مقاله، از روش‌های الگوریتم گرگ خاکستری و سینیوس - کسینوس برای تخمین پارامتر تنش مؤثر استفاده شده است. در این مدل‌سازی مجموعه نتایج آزمایشگاهی سه محوری تقارن محوری حاصل از دو دسته آزمایش‌های CU و CD (مقدار آب ثابت) اشباع و غیراشباع انجام شد و نتایج ۱۰۰ آزمایش CD در ۱۴ نوع خاک مختلف و ۲۰ آزمایش CW (مجموعاً ۱۲۰ آزمایش) از منابع مختلف جمع‌آوری شد (Bishop و Blight، ۱۹۶۳؛ Khalili و همکاران، ۲۰۰۴؛ Lee و همکاران، ۲۰۰۵؛ Miao و همکاران، ۲۰۰۲؛ Rahardjo و همکاران، ۲۰۰۴؛ Rampino و همکاران، ۲۰۰۰؛ Russell و Khalili، ۲۰۰۶؛ Russell و Khalili، ۲۰۰۴؛ Thu و همکاران، ۲۰۰۶). قسمتی از این داده‌ها به همراه پارامترهای ورودی و خروجی برای این مدل‌سازی در جدول (۲) آورده شده است. در این مدل‌سازی به منظور تخمین دقیق پارامتر تنش مؤثر، داده‌های ورودی به صورت تصادفی به دو گروه داده‌های



شکل ۸- تأثیر دو تابع sin و cos با دامنه [۲ و -۲]

مراحل الگوریتم سینیوس - کسینوس به صورت زیر نشان داده شده است:

- ارائه یک مجموعه از عوامل جستجو (راه‌حل‌ها)
- ارزیابی عوامل جستجو با استفاده از تابع هدف
- به‌روزرسانی بهترین جواب به دست آمده
- به‌روزرسانی r_1, r_2, r_3 و r_4
- به‌روزرسانی موقعیت عوامل جستجو با استفاده از معادله (۶) (تا زمانی که t کوچک‌تر از حداکثر تعداد تکرارها باشد)
- ثبت بهترین راه‌حل به دست آمده تاکنون بعد از پایان حداکثر تعداد تکرار به عنوان بهینه سراسری

۳- آزمایش CD و CW^۱

آزمایش برش سه محوری، قابل‌اعتمادترین روش برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک می‌باشد که بر حسب شرایط آزمایش و کاربرد خاک مورد آزمایش، آزمایش سه محوری را به سه نوع مختلف دسته‌بندی می‌کنند:

- آزمایش تحکیم یافته زهکشی شده یا آزمایش زهکشی شده (آزمایش CD)
 - آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده (آزمایش CU^۱)
 - آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده یا آزمایش زهکشی نشده یا آزمایش سریع (آزمایش UU^۱)
- هر سه آزمایش فوق، شامل سه مرحله: ۱- اشباع^{۱۳}، ۲- تحکیم^{۱۴} و ۳- برش یا گسیختگی^{۱۵} می‌شوند. مرحله اشباع‌سازی در سه آزمایش یکسان است و طی آن فرصت داده می‌شود تا نمونه خاک مورد آزمایش اشباع شود (ملاک اشباع نمونه پارامتر فشار آب حفره‌ای B می‌باشد که اگر بزرگ‌تر از ۰/۹۵ باشد بیانگر رسیدن خاک به حالت اشباع است).

$$B = \frac{u_c}{\sigma_3} \leq 1 \quad (13)$$

13. Saturation
14. Consolidation
15. Failure

9. Consolidated Drained
10. Constant Water
11. Consolidated Undrained
12. Unconsolidated Undrained

نرمال سازی می شوند تا برای مدل سازی کاملاً آماده شوند. بنابراین، با استفاده از معادله (۱۴)، مقادیر داده های ورودی و خروجی در بازه [۰ و ۱] نرمال می شوند.

آموزش و آزمون تقسیم شدند. بنابراین از مجموع ۱۲۰ داده، ۸۰ درصد از مجموع داده ها (۹۶ داده) برای داده های آموزش (ساخت مدل های پیش بینی) و ۲۰ درصد از مجموع داده ها (۲۴ داده) برای داده های آزمون (ارزیابی مدل های پیش بینی) استفاده شده است. در ابتدا برای دستیابی به نتایج درست و قابل قبول، داده ها

جدول ۲- بخشی از داده ها جمع آوری شده با استفاده از آزمون های CD و CW جهت مدل سازی

پارامتر خروجی	پارامترهای ورودی				مرجع
	χ	λ	P/P_0	S/h_b	
	۱	۰/۸۹	۰/۴۹۳۴۶۲	۰/۵	Rahardjo و همکاران (۲۰۰۴)
	۱	۰/۶۲	.	.	Lee و همکاران (۲۰۰۵)
	۰/۴۱	۰/۱۹	.	۱۲/۸۶۴۸۶	Blight و Bishop (۱۹۶۳)
	۰/۶۴۶۲	۰/۴۸	۱/۹۷۳۸۴۷	۱/۰۵۲۶۳۲	Khalili و همکاران (۲۰۰۴)
	۰/۱۵۵	۱۱/۸۲	۰/۹۸۶۹۲۳	۶۶/۶۶۶۶۷	Khalili و Russell (۲۰۰۶ و ۲۰۰۴)
	۰/۵۷۱۵	۰/۹۴	۲/۹۶۰۷۷	۸/۸۱۴۸۱۵	Thu و همکاران (۲۰۰۶)
	۰/۵۳۰۸	۰/۲۱	۳/۹۴۷۶۹۳	۳۰۰	Rampino و همکاران (۲۰۰۰)
	۰/۶۰۴	۰/۳۳	۰/۲۹۶۰۷۷	۴	Miao و همکاران (۲۰۰۲)

جدول ۴- پارامترهای تنظیم برای الگوریتم سینوس - کسینوس

پارامترها	مقدار
ماکزیمم تعداد تکرار	۱۰۰۰
تعداد عوامل جستجو	۳۰

پس از ایجاد رابطه و پارامترهای تنظیم، با کدنویسی صورت گرفته برای دو الگوریتم در نرم افزار MATLAB ضرایب روابط پیش بینی زیر به صورت غیر خطی برای تخمین پارامتر تنش مؤثر، به ترتیب برای دو الگوریتم گرگ خاکستری و سینوس - کسینوس به صورت زیر به دست آمد:

$$\chi = (1.8505 \times (P/P_0)^{10}) + \exp(10 \times (S/h_b)^{6.7991}) \quad (16)$$

$$-(-0.7371 \times (\theta_r/\theta_s)^{5.5778}) + (-0.0123 \times (\lambda)^{-2.3231}) + (-1.0012) \quad (17)$$

$$\chi = (-1.2179 \times (P/P_0)^{2.0774}) + \exp(-1.7964 \times (S/h_b)^{8.3406})$$

$$- (3.3995 \times (\theta_r/\theta_s)^{0.65338}) + (8.897 \times (\lambda)^{-5.5548}) + (3.9132)$$

۵- اعتبارسنجی مدل ها

پس از ساخت مدل های پیش بینی توسط الگوریتم های پیشنهادی (گرگ خاکستری و سینوس - کسینوس)، به منظور صحت سنجی و دقت مدل ها از چندین شاخص و معیار شامل ضریب همبستگی مربع (R^2)، میانگین درصد خطای مطلق (MAPE)، شمول واریانس (VAF)، مجذور میانگین خطای مربع (RMSE) و میانگین خطای مربع (MSE) معرفی شدند. در این معادلات N تعداد نمونه ها، Y_{mea} مقادیر اندازه گیری شده و Y_{pre} مقادیر پیش بینی شده هستند. در صورتی که مقادیر R^2 و VAF به عدد ۱ و مقادیر MAPE، RMSE و MSE به عدد صفر نزدیک شوند،

$$X_n = [(X_{mea} - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})] \quad (14)$$

در این معادله، X_n مقدار نرمال شده، X_{mea} مقدار واقعی، X_{max} و X_{min} حداکثر و حداقل مقدار می باشند. پس از نرمال سازی داده های آموزش و آزمون، برای تخمین پارامتر تنش مؤثر با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی گرگ خاکستری و سینوس - کسینوس دو معادله یکسان غیر خطی که در سعی و خطا بهترین جواب را دادند به صورت زیر پیشنهاد شد:

$$\chi = (w_1 \times (P/P_0)^{w_2}) + \exp(w_3 \times (S/h_b)^{w_4}) \quad (15)$$

$$- (w_5 \times (\theta_r/\theta_s)^{w_6}) + (w_7 \times (\lambda)^{w_8}) + w_9$$

که در آن w_i عوامل وزن دهی متناظر با پارامترهای ورودی هستند. برای ساخت یک رابطه دقیق جهت تخمین پارامتر تنش مؤثر توسط دو الگوریتم گرگ خاکستری و سینوس - کسینوس علاوه بر رابطه به دست آمده (معادله (۱۵)) به یک سری از پارامترهای تنظیم که توسط کاربر و با روش آزمون و خطا صورت می گیرد وابسته است. به همین دلیل بهترین مدل های گرگ خاکستری و سینوس - کسینوس با استفاده از پارامترهای مشخص شده توسط کاربر به ترتیب در جداول (۳) و (۴) ارائه شده است.

جدول ۳- پارامترهای تنظیم برای الگوریتم گرگ خاکستری

پارامترها	مقدار
ماکزیمم تعداد تکرار	۳۰۰۰
تعداد گرگ ها	۱۸

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m |Y_{mea} - Y_{pre}| \quad (20)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{mea} - Y_{pre})^2} \quad (21)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{mea} - Y_{pre})^2 \quad (22)$$

مقادیر شاخص‌های بالا برای مدل‌های پیش‌بینی به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی گرگ خاکستری و سینوس-کسینوس در دو حالت آموزش و آزمون به‌صورت جدول (۵) به‌دست‌آمده است.

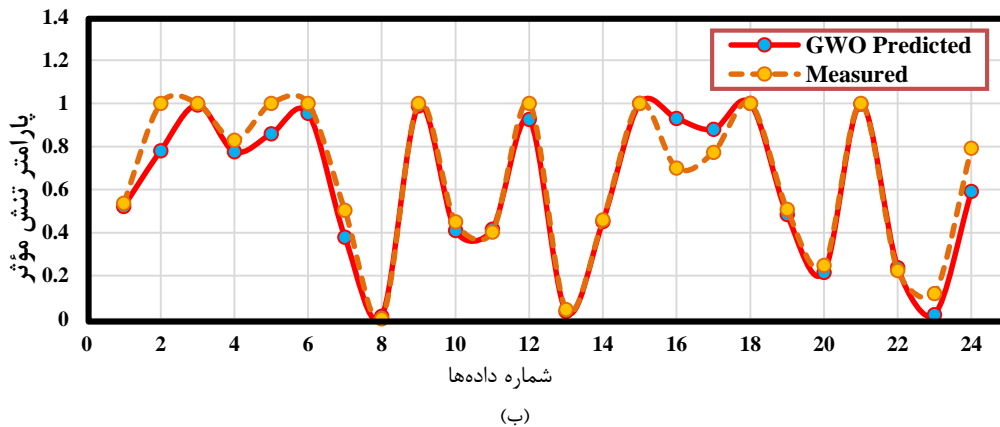
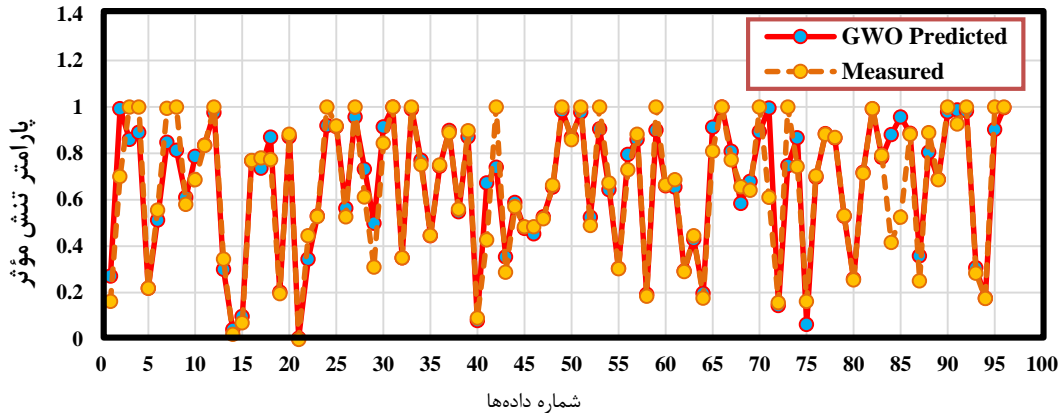
مدل پیش‌بینی‌شده به‌مقدار واقعی نزدیک‌تر بوده و خطای آن بسیار کم می‌باشد. در این حالت مدل ساخته‌شده ایده‌آل و دقیق است. روابط مربوط به شاخص‌های R^2 ، $MAPE$ ، $RMSE$ و MSE را می‌توان به‌ترتیب به‌صورت زیر تعریف کرد (Fattahi, Moradi و Fattahi؛ ۲۰۱۹؛ Fattahi؛ ۲۰۱۸؛ ۲۰۱۷b؛ ۲۰۱۷a؛ ۲۰۱۸):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (Y_{mea} - Y_{pre})^2}{\sum_{k=1}^n Y_{mea}^2 - \frac{\sum_{i=1}^n Y_{pre}^2}{n}} \quad (18)$$

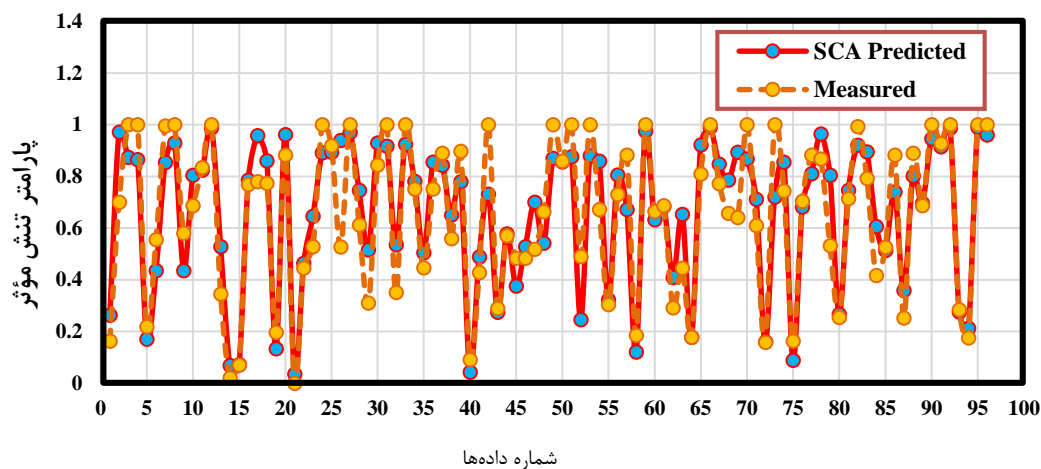
$$VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(Y_{mea} - Y_{pre})}{\text{var}(Y_{mea})} \right] \quad (19)$$

جدول ۵- اعتبارسنجی روابط پیش‌بینی به‌دست‌آمده با استفاده از الگوریتم‌های گرگ خاکستری و سینوس-کسینوس

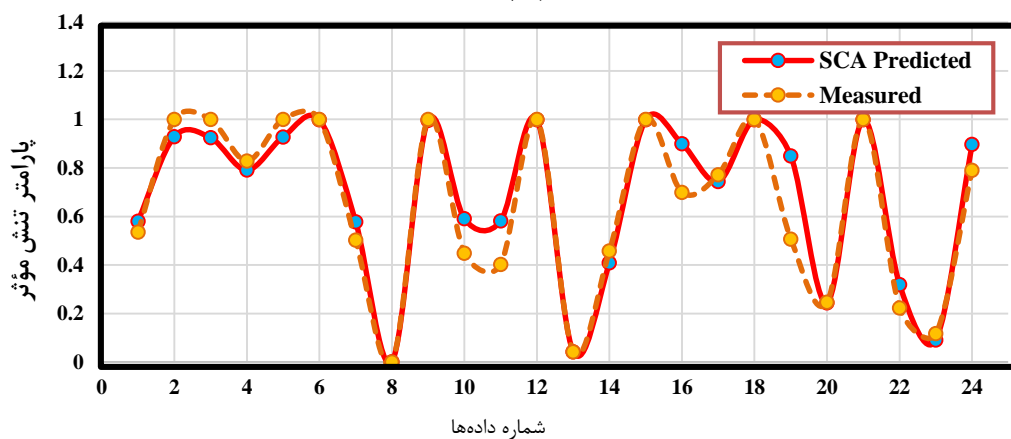
MSE	RMSE	MAPE	VAF	R ²	شرح	نوع الگوریتم
۰/۰۰۹۶۷۶	۰/۰۰۹۸۳	۰/۰۱۰۰	۰/۹۱۳۴	۰/۸۶۳۲	آموزش	گرگ خاکستری
۰/۰۰۵۵۲۹	۰/۰۰۷۴۳	۰/۰۰۷۵	۰/۹۵۵۳	۰/۹۳۲۵	آزمون	
۰/۰۱۵۰۲۹	۰/۰۱۲۲۵	۰/۰۱۲۵	۰/۸۸۶۷	۰/۸۳۰۶	آموزش	سینوس-کسینوس
۰/۰۰۷۰۸۴	۰/۰۰۸۴۱	۰/۰۰۸۵	۰/۹۲۶۰	۰/۹۱۷۱	آزمون	



شکل ۹- مقایسه بین پارامتر تنش مؤثر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط الگوریتم گرگ خاکستری برای: الف) داده‌های آموزش، ب) داده‌های آزمون



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- مقایسه بین پارامتر تنش مؤثر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط الگوریتم سینوس کسینوس برای: الف) داده‌های آموزش، ب) داده‌های آزمون

روش‌های غیرمستقیم رگرسیونی و تجربی از دقت بالایی برخوردار نمی‌باشند و با مقادیر واقعی فاصله زیادی دارند. به همین منظور روش‌های هوشمند، در مقایسه با روش‌های تجربی و رگرسیونی از دقت و سرعت بسیار بالایی برخوردار است. در این مقاله، از پارامترهای مختلف به دست آمده از آزمایشگاه شامل مقدار ورودی هوا، مقدار آب حجمی در شرایط باقی‌مانده و اشباع، شیب منحنی مشخصه آب- خاک، فشار محدودکننده خالص و مکش برای تخمین پارامتر تنش مؤثر توسط دو الگوریتم هوشمند گرگ خاکستری و سینوس- کسینوس بهره گرفته شد. برای ساخت یک مدل دقیق با استفاده از دو الگوریتم مذکور، از ۱۰۰ داده حاصل از آزمایش CD و ۲۰ داده حاصل از آزمایش CW از مراجع مختلف جمع‌آوری شد. در مرحله مدل‌سازی، به صورت تصادفی ۸۰ درصد از مجموعه داده‌ها به عنوان آموزش (جهت ساخت مدل) و ۲۰ درصد باقی‌مانده به عنوان آزمون (جهت ارزیابی مدل ساخته‌شده)

همان‌طور که از جدول (۵) مشخص است، مدل‌های غیرخطی پیشنهادشده توسط الگوریتم گرگ خاکستری جهت تخمین پارامتر تنش مؤثر از دقت بالایی برخوردار می‌باشد و مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی به دست آمده اختلاف چندانی ندارند. به منظور نشان دادن کارایی الگوریتم‌های هوشمند در تخمین پارامتر تنش مؤثر در خاک‌های غیراشباع، شکل‌های (۹) و (۱۰) مقایسه بین پارامتر تنش مؤثر پیش‌بینی و اندازه‌گیری را در دو حالت آموزش و آزمایش برای ۱۲۰ داده را نشان می‌دهند.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به کاربرد فراوان پارامتر تنش مؤثر در مهندسی ژئومکانیک، تعیین مستقیم این پارامتر امری هزینه‌بر و زمان‌بر است. به همین دلیل استفاده از روش‌های غیرمستقیم جایگزین بسیار خوبی برای محاسبه این پارامتر می‌باشد. اما از آنجاکه

- Fredlund DG, Xing A, "Equations for the soil-water characteristic curve", Canadian geotechnical journal, 1994, 31 (4), 521-532.
- Fredlund DG, Xing A, Fredlund MD, Barbour S, "The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve", Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33 (3), 440-448.
- Gardner W, "Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table", Soil Science, 1958, 85 (4), 228-232.
- Garven E, Vanapalli S, "Evaluation of empirical procedures for predicting the shear strength of unsaturated soils", In Unsaturated Soils, 2006, 2570-2592.
- Kayadelen C, "Estimation of effective stress parameter of unsaturated soils by using artificial neural networks", International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics, 2008, 32 (9), 1087-1106.
- Khalili N, Geiser F, Blight G, "Effective stress in unsaturated soils: Review with new evidence", International journal of Geomechanics, 2004, 4 (2), 115-126.
- Khalili N, Khabbaz M, "A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils", Geotechnique, 1998, 48 (5), 681-687.
- Lee I-M, Sung S-G, Cho G-C, "Effect of stress state on the unsaturated shear strength of a weathered granite", Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42 (2), 624-631.
- Loret B, Khalili N, "An effective stress elastic-plastic model for unsaturated porous media", Mechanics of Materials, 2002, 34 (2), 97-116.
- McKee C, Bumb A, "Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas", SPE formation Evaluation, 1987, 2 (04), 608-500.
- Mech LD, "Alpha status, dominance, and division of labor in wolf packs", Canadian Journal of Zoology, 1999, 77 (8), 1196-1203.
- Miao L, Liu S, Lai Y, "Research of soil-water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil", Engineering Geology, 2002, 65 (4), 261-267.
- Mirjalili S, "SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems", Knowledge-based systems, 2016, 96, 120-133.
- Mirjalili S, Mirjalili SM, Lewis A, "Grey wolf optimizer", Advances in Engineering Software, 2014, 69, 46-61.
- Mousavi SMR, Khishe M, Ghamgosar A, "Classification of sonar data set using the gray wolf optimizer algorithm", 2016.
- Muro C, Escobedo R, Spector L, Coppinger R, "Wolf-pack (Canis lupus) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations", Behavioural Processes, 2011, 88 (3), 192-197.
- Rahardjo H, Heng OB, Choon LE, "Shear strength of a compacted residual soil from consolidated drained and constant water content triaxial tests", Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41 (3), 421-436.
- Rampino C, Mancuso C, Vinale F, "Experimental behaviour and modelling of an unsaturated compacted soil", Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37 (4), 748-763.
- مورد استفاده قرار گرفتند. پس از ایجاد مدل‌های پیش‌بینی با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB، به منظور صحت‌سنجی مدل‌های پیش‌بینی از شاخص‌های R^2 ، MAPE، VAF، RMSE و MSE برای هر دو الگوریتم در مرحله داده‌های آموزش و آزمون مورد استفاده قرار گرفت. اعتبارسنجی مدل‌ها نشان دادند که الگوریتم گرگ خاکستری برای تخمین پارامتر تنش مؤثر از دقت بالایی برخوردار است گرچه از نتایج پیداست که الگوریتم سینوس-کسینوس نیز دارای کارایی بالایی است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش‌های هوشمند می‌تواند به‌عنوان راه‌حل برای تحلیل و مدل‌سازی سایر مسائل پیچیده در حوزه‌های مختلف علم ژئومکانیک باشد.

۷- مراجع

- Ajdari M, Habibagahi G, Ghahramani A, "Predicting effective stress parameter of unsaturated soils using neural networks", Computers and Geotechnics, 2012, 40, 89-96.
- Assouline S, Tessier D, Bruand A, "A conceptual model of the soil water retention curve", Water Resources Research, 1998, 34 (2), 223-231.
- Bishop AW, "The principle of effective stress", Teknisk Ukeblad, 1959, 39, 859-863.
- Bishop AW, Blight G, "Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils", Geotechnique, 1963, 13 (3), 177-197.
- Brooks RH, Corey AT, "Hydraulic properties of porous media", Colorado State University, Libraries, 1964.
- Črepinšek M, Liu S-H, Mernik M, "Exploration and exploitation in evolutionary algorithms: A survey", ACM Computing Surveys (CSUR), 2013, 45 (3), 1-33.
- Farrell D, Larson W, "Dynamics of the soil-water system during a rainstorm", Soil science, 1972, 113 (2), 88-95.
- Fattahi H, "Applying soft computing methods to predict the uniaxial compressive strength of rocks from schmidt hammer rebound values", Computational Geosciences, 2017a, 21 (4), 665-681.
- Fattahi H, "Prediction of slope stability using adaptive neuro-fuzzy inference system based on clustering methods", Journal of Mining and Environment, 2017b, 8 (2), 163-177.
- Fattahi H, "An Estimation of Required Rotational Torque to Operate Horizontal Directional Drilling Using Rock Engineering Systems", Journal of Petroleum Science and Technology, 2018, 8 (1), 82-96.
- Fattahi H, "Tunnel boring machine penetration rate prediction based on relevance vector regression", International Journal of Optimization in Civil Engineering, 2019, 9 (2), 343-353.
- Fattahi H, Moradi A, "A new approach for estimation of the rock mass deformation modulus: a rock engineering systems-based model", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77 (1), 363-374.

- Russell A, Khalili N, "A unified bounding surface plasticity model for unsaturated soils", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, 30 (3), 181-212.
- Russell AR, Khalili N, "A bounding surface plasticity model for sands exhibiting particle crushing", *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41 (6), 1179-1192.
- Samui P, Jagan J, "Determination of effective stress parameter of unsaturated soils: A Gaussian process regression approach", *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2013, 7 (2), 133-136.
- Thu TM, Rahardjo H, Leong E-C, "Effects of hysteresis on shear strength envelopes from constant water content and consolidated drained triaxial tests", *In Unsaturated Soils*, 2006, 1212-1222.
- Uysal F "Prediction of collapse potential of soils using gene expression programming and parametric study", *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13 (19), 1-13.
- Van Genuchten MT, "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil science society of America journal*, 1980, 44 (5), 892-898.
- Vanapalli S, Fredlund D, Pufahl D, Clifton A, "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction", *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33 (3), 379-392.
- Williams J, Prebble R, Williams W, Hignett C, "The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic", *Soil Research*, 1983, 21 (1), 15-32.
- Zerhouni MI, "Rôle de la pression interstielle négative dans le comportement des sols", *Application au Calcul Des Routes-Thèse*, 1991.

EXTENDED ABSTRACTS

Using Two Intelligent Optimization Algorithms to Estimate the Effective Stress of Unsaturated Soils

Hadi Fattahi^{*}, Hossein Ghaedi, Farshad Malekmahmodi

Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Iran

Received: 07 May 2021; Review: 08 October 2021; Accepted: 07 November 2021

Keywords:

Effective stress parameter, Unsaturated soil, Indirect estimation, Gray wolf algorithm, Sine-Cosine algorithm.

1. Introduction

Compacted soils, which are commonly used in geotechnical engineering projects, such as earth dams, highways, embankments, and airport runways, are mostly unsaturated. To achieve a safe design in all these projects, the stress state variable in soil plays a significant role. Any proposed model for the stress state variable should express its independence from the soil properties. In saturated soils, the effective stress is taken into account as the stress state variable. Some researchers have attempted to find the stress state variable for unsaturated soils the same as that for saturated soils with only one variable; however, they have noticed that the soil properties have been involved in the proposed models (Bishop, 1959; Escario and Saez, 1986; Khalili and Khabbaz, 1998; Lu and Likos, 2004; Rahnema et al., 2019). The purpose of this paper is to apply new intelligent methods to accurately estimate the effective stress parameter, using two gray wolf optimization (GWO) and sine-cosine (SCA) optimization algorithms.

2. Methodology

2.1. Database

In this paper, the datasets used to develop two models were derived from 120 collected data from the literature (Bishop and Blight, 1963; Khalili et al., 2004; Lee et al., 2005; Miao et al., 2002; Rahardjo et al., 2004; Rampino et al., 2000; Russell and Khalili, 2006; Russell and Khalili, 2004; Thu et al., 2006). These data were associated with the results of triaxial, shear, pressure plate, and filter paper tests. These datasets consist of seven characteristics of unsaturated soils: suction (S), bubbling pressure (h_b), net confining pressure (P), residual water content (θ_r), saturated volumetric water content (θ_s), soil-water characteristic curve fitting parameter (λ), and effective stress parameter (χ). S , h_b , P , θ_r , and θ_s characteristics of data became dimensionless as follows: P/P_0 is the dimensionless confining pressure parameter $P_0 = 101.325$ KPa, S/h_b is the dimensionless suction parameter, and θ_r/θ_s is the dimensionless volumetric water content parameter.

2.2. Methods

2.2.1. Gray wolf optimization (GWO) algorithm

The GWO algorithm inspired by grey wolves that is suggested by Mirjalili et al. (2014). This algorithm divides the population into four groups: delta, omega, beta and alpha (Fattahi and Hasanipanah, 2020). In addition, the three hunting stages are simulated: attacking prey, looking for prey and encircling prey. The GWO algorithm needs a parameter number to be set, which includes initialize alpha, the stopping criteria, the sites selected

* Corresponding Author

E-mail addresses: h.fattahi@arakut.ac.ir (Hadi Fattahi), hossein.ghaedi74@yahoo.com (Hossein Ghaedi), farshad.malekmahmoodi@gmail.com (Farshad Malekmahmodi).

number for neighborhood search, the search agents number, delta, the maximum iterations number and beta. A detailed explanation of the GWO could be discovered in (Mirjalili et al., 2014; Mirjalili et al., 2016). Many research have highlighted the potential of using the GWO algorithm. Xu et al. (2020) used the GWO algorithm for optimizing the SVR in predicting the UCS and shear strength. Gao et al. (2020) used the GWO algorithm to estimate the peak shear strength. Yu et al. (2020) studied the implementation of the GWO algorithm as well. They used the GWO algorithm to optimize the SVR parameters for assessing rock displacement caused by mine blasting. Shariati et al. (2020) recently estimated the concrete compressive strength using a combination of the GWO algorithm and the intense learning machine. The studies described above verified that the GWO algorithm can be utilized as an efficient algorithm for goal optimization.

2.2.2. Sine-cosine algorithm (SCA)

A newly proposed technique by (Mirjalili, 2016) called SCA simply based on Sine and Cosine function is applied for exploitation and exploration phases in global optimization functions. The SCA creates different initial random agent solutions and requires them to fluctuate outwards or towards the best possible solution using a mathematical model based on sine and cosine functions. Basic principles of SCA is represent in Fig. 1.

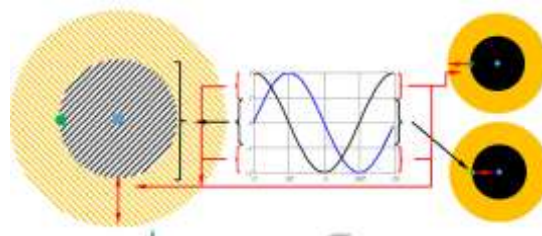


Fig. 1. Basic principle of SCA (Singh and Singh, 2017)

3. Results and discussion

In this paper, GWO and SCA models are suggested to estimate effective stress parameter. Comparative experiments (square correlation coefficient (R^2), mean absolute error percentage (MAPE), variance inclusion (VAF), mean square error (RMSE) and mean square error (MSE)) for two hybrid intelligence models is showed in Table 1. From Table 1, it can be found that the GWO algorithm is more reliable than SCA algorithm for predicting effective stress parameter.

Also, Figs. 2 and 3 show a comparison between estimated values of effective stress parameter by the GWO and SCA models and actual values for all 120 data points.

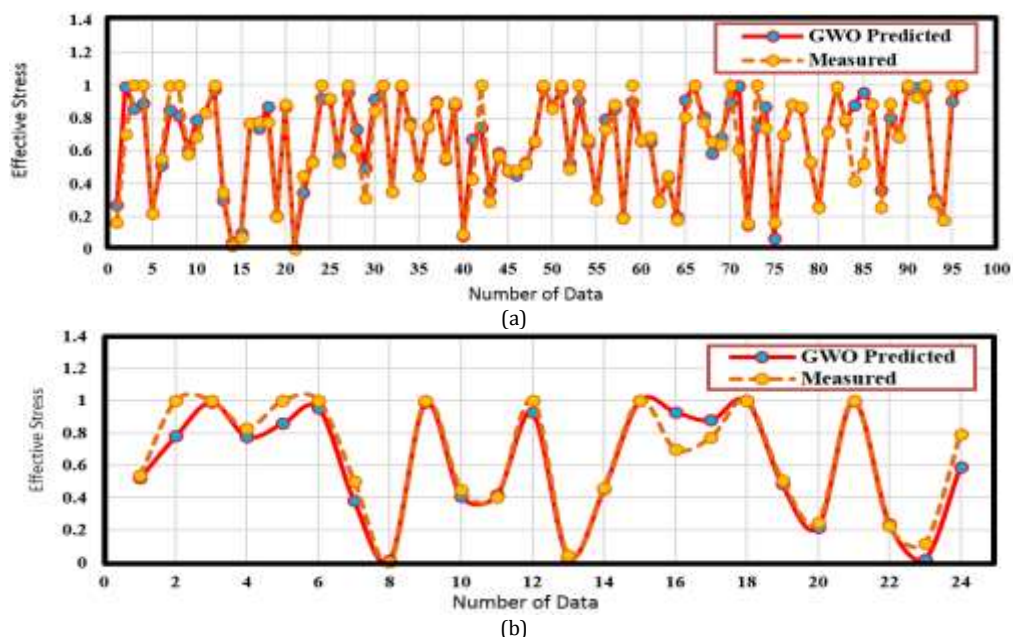


Fig. 2. Demonstrating the errors of effective stress parameter prediction by GWO algorithm for: a) training datasets, b) testing datasets

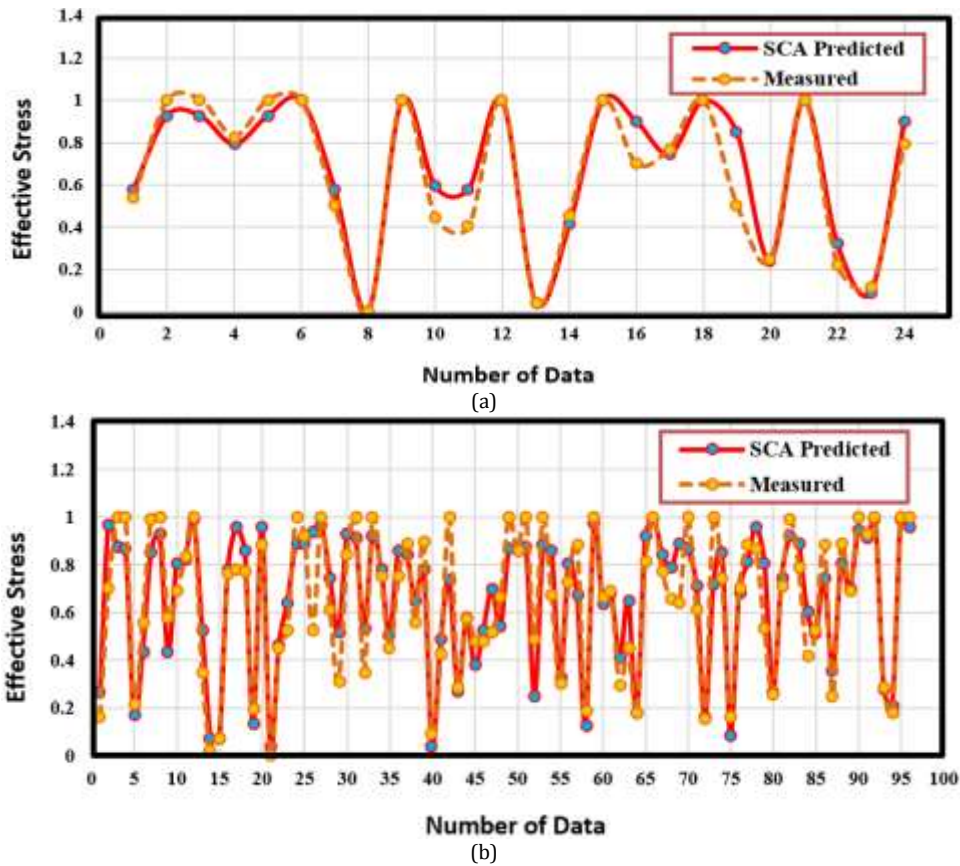


Fig. 3. Demonstrating the errors of effective stress parameter prediction by SCA algorithm for: a) training datasets, b) testing datasets

Table 1. Performance indices for two artificial intelligence methods

Model	MSE (Train)	MSE (Test)	RMSE (Train)	RMSE (Test)	MAPE (Train)	MAPE (Test)	VAF (Train)	VAF (Test)	R ² (Train)	R ² (Test)
GWO	0.009676	0.005529	0.0983	0.0743	0.01	0.0075	0.9134	0.9553	0.8632	0.9325
SCA	0.015029	0.007084	0.1225	0.0841	0.0125	0.0085	0.8867	0.9260	0.8306	0.9171

4. Conclusions

Unsaturated soils cover about 40% of the earth's surface soils and are found in most geotechnical engineering projects. Determining the shear strength of unsaturated soils based on the principle of effective stress for use in such projects requires relatively time-consuming, costly and complex tests. On the other hand, due to changes in soil properties of each region, the use of experimental methods to estimate the effective stress of unsaturated soils is less accurate and is associated with errors. In order to accurately estimate the shear strength of unsaturated soils, the purpose of this paper is to apply new intelligent methods to accurately estimate the effective stress parameter, using two GWO and SCA algorithms. In these models, parameters such as: the air entry value, the volumetric water content at residual and saturated conditions, the slope of soil water characteristic curve, the net confining stress and suction are used as input parameters and effective stress parameter is used as output. Finally, RMSE, VAF, MAPE, MSE and R^2 were used to evaluate the accuracy of the prediction models. The modeling results show that the use of two new algorithms, gray wolf and sine-cosine, has acceptable accuracy and efficiency in estimating the effective stress parameter for unsaturated soils.

5. References

Fattahi H, Hasanipanah M, "Prediction of Blast-Induced Ground Vibration in a Mine Using Relevance Vector Regression Optimized by Metaheuristic Algorithms", *Natural Resources Research*, 2020, 1-15.

Gao J, Amar MN, Motahari MR, Hasanipanah M, Armaghani DJ, "Two novel combined systems for predicting the peak shear strength using RBFNN and meta-heuristic computing paradigms", *Engineering with Computers*, 2020.

Lee IM, Sung SG, Cho GC, "Effect of stress state on the unsaturated shear strength of a weathered granite", *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42 (2), 624-631.

- Mirjalili S, "SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems", Knowledge-Based Systems, 2016, 96, 120-133.
- Mirjalili S, Mirjalili SM, Lewis A, "Grey wolf optimizer", Advances in Engineering Software, 2014, 69, 46-61.
- Mirjalili S, Saremi S, Mirjalili SM, Coelho LdS, "Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-criterion optimization", Expert Systems with Applications, 2016, 47, 106-119.
- Rahnema H, Hashemi Jokar M, Khabbaz H, "Predicting the effective stress parameter of unsaturated soils using adaptive neuro-fuzzy inference system", scientiairanica, 2019, 26 (6), 3140-3158.
- Russell A, Khalili N, "A unified bounding surface plasticity model for unsaturated soils", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30 (3), 181-212.
- Shariati M, Mafipour MS, Ghahremani B, Azarhomayun F, Ahmadi M, Trung NT, Shariati A, "A novel hybrid extreme learning machine-grey wolf optimizer (ELM-GWO) model to predict compressive strength of concrete with partial replacements for cement", Engineering with Computers, 2020, 1-23.
- Singh N, Singh S, "A novel hybrid GWO-SCA approach for optimization problems", Engineering Science and Technology, an International Journal, 2017, 20 (6), 1586-1601.
- Thu TM, Rahardjo H, Leong EC, "Effects of hysteresis on shear strength envelopes from constant water content and consolidated drained triaxial tests", In Unsaturated Soils, 2006, 1212-1222.
- Xu C, Amar MN, Ghriga MA, Ouair H, Zhang X, Hasanipanah M, "Evolving support vector regression using Grey Wolf optimization; forecasting the geomechanical properties of rock", Engineering with Computers, 2020, 1-15.
- Yu Z, Shi X, Zhou J, Chen X, Miao X, Teng B, Ipangelwa T, "Prediction of blast-induced rock movement during bench blasting: use of gray wolf optimizer and support vector regression", Natural Resources Research, 2020, 29 (2), 843-865.