

# بهینه‌یابی سطح گسیختگی بحرانی در شیروانی‌های غیراشباع تحت بارش باران با الگوریتم برخورد اجسام

شوازه سادات ناصری (کارشناس ارشد)  
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

حامد صادقی (استادیار)  
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

امیر اکبری گرگانی\* (استادیار)  
گروه پژوهشی سازه‌های صمت برق، پژوهشگاه نیرو، تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱ (ص. ۳۸-۲، شماره ۲/۱، ۶۳-۵۱، پژوهشی)

تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی از مسائل مهم در طراحی ایمن زیرساخت‌هاست و تاریخچه‌ی مخاطرات ناشی از لغزش و گسیختگی شیروانی‌های غیراشباع در اثر بارندگی، مؤید این مطلب است. اما چالش پیش رو، توسعه‌ی الگوریتم‌های نوین بهینه‌یابی سطح گسیختگی همچون الگوریتم فراکوشی است، که علاوه بر لحاظ گشتاورهای محرک و مقاوم در تحلیل پایداری، بتواند شرایط پیچیده‌ی جریان گذرای آب در شرایط دو فازی غیراشباع، شامل: بارندگی و آبیاری را نیز در تحلیل تراوش لحاظ کند. بنابراین هدف اصلی پژوهش حاضر، توسعه‌ی یک برنامه‌ی رایانه‌ی مبتنی بر روش بهینه‌یابی برخورد اجسام (CBO) برای اولین بار در چارچوب روش عددی تفاضل‌های محدود است، تا بتواند در مطالعات آبی، شرایط پیچیده‌تری همچون پوشش گیاهی و ترک را در معادله‌ی ریچاردز لحاظ کند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم جدید محاسباتی، قادر به کاهش درصد به کارگیری واحد پردازنده‌ی مرکزی تا ۷۱٪ به طور متوسط در مقایسه با الگوریتم قدرتمند به کار رفته در بسته‌ی نرم‌افزاری ژئواستودیو است.

واژگان کلیدی: پایداری شیروانی غیراشباع، بارندگی، بهینه‌یابی، الگوریتم بهینه‌یابی برخورد اجسام، روش تفاضل محدود.

## ۱. مقدمه

امکان همگرایی به کمینه‌ی محلی را دارند و اگر تعداد زیادی از سطوح گسیختگی، آزمایش شوند، زمان اجرای آن طولانی می‌شود. همچنین حافظه‌ی زیادی از رایانه را اشغال می‌کنند.

بسیاری از پژوهشگران دریافته‌اند که روش‌های هوش مصنوعی، امکانات پیش‌بینی بهتری نسبت به روش‌های آماری دارند. در دهه‌های اخیر، به دلیل پیشرفت در فناوری محاسبات نرم، برای حل پایداری شیروانی به عنوان مشکل بهینه‌سازی، بسیاری از رویکردهای فراابتکاری استفاده شده است. الگوریتم‌های فراابتکاری انواع زیادی دارند، که به تفکیک توسط کاوه (۲۰۱۷)<sup>[۱۰]</sup> به آنها اشاره شده است. در ادامه، به الگوریتم‌های به کار رفته در مسئله‌ی پایداری شیروانی اشاره شده است.

الگوریتم جستجوی هارمونی (HS)<sup>[۱۱]</sup> و<sup>[۱۲]</sup> الگوریتم بهینه‌یابی کلونی مورچه (ACO)<sup>[۱۳-۱۵]</sup>، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)<sup>[۱۶-۱۹]</sup>، الگوریتم کلونی زنبور عسل (ABC)<sup>[۲۰]</sup>، الگوریتم شبیه‌سازی تیرید (SA)<sup>[۲۱]</sup>، الگوریتم

پایداری شیروانی‌های خاکی از مسائل مهم ژئوتکنیکی بوده و توجه پژوهشگران بسیاری را به خود جلب کرده است. ارزیابی ضریب اطمینان با روش تعادل حدی، توسط برخی پژوهشگران<sup>[۱-۴]</sup> انجام شده است؛ همچنین اسمیت<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۳)<sup>[۵]</sup> با روش کاهش مقاومت توسط اجزاء محدود به بررسی پایداری شیروانی پرداخته‌اند. برای تحلیل پایداری شیروانی، باید سطح گسیختگی بحرانی با کمینه‌ی ضریب اطمینان انتخاب شود. جستجوی سطح گسیختگی بحرانی از طریق روش‌های سنتی انجام شده است. بسیاری از پژوهشگران، از روش‌های بیکر و گاربر<sup>۲</sup> (۱۹۷۸)<sup>[۶]</sup>، بیکر (۱۹۸۰)<sup>[۷]</sup>، پنگوین<sup>۳</sup> (۱۹۸۵)<sup>[۸]</sup> و یا روش گرادیان مزدوج توسط آرای و تیگو<sup>۴</sup> (۱۹۸۵)<sup>[۹]</sup> برای کمینه‌سازی ضریب اطمینان استفاده کرده‌اند. روش‌های اخیر سرعت بالایی دارند؛ اما به علت در نظر گرفتن تعداد محدود سطوح گسیختگی،

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۶/۲۷، اصلاحیه ۱۴۰۰/۰۹/۲۷، پذیرش ۱۴۰۰/۱۱/۱۴.

DOI:10.24200/J30.2022.59000.3016

فاخته (CS) <sup>[۲۲]</sup>، <sup>۱۰</sup> الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) <sup>[۲۱]</sup>، <sup>۱۱</sup> الگوریتم بهینه‌سازی سنجاب پرنده (FSO) <sup>[۲۳]</sup>، <sup>۱۲</sup> الگوریتم انفجار بزرگ انهدام بزرگ (BB-BC) <sup>[۲۴]</sup>، <sup>۱۳</sup> الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (RVM) <sup>[۲۵]</sup>، <sup>۱۴</sup> الگوریتم (MSC) <sup>[۲۶]</sup>، <sup>۱۵</sup> الگوریتم جستجوی ممنوعه (TS) <sup>[۲۷]</sup>، <sup>۱۶</sup> الگوریتم ژنتیک (GA) <sup>[۲۳-۲۷]</sup>، <sup>۱۷</sup> الگوریتم آتش بازی (FWA) <sup>[۲۳]</sup>، <sup>۱۸</sup> الگوریتم سیاه چاله (BHA) <sup>[۲۵]</sup>، <sup>۱۹</sup> الگوریتم (IEP) <sup>[۲۶]</sup>، <sup>۲۰</sup> الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) <sup>[۲۶]</sup>، <sup>۲۱</sup> الگوریتم فرگشتی (ES) <sup>[۲۶]</sup>، <sup>۲۲</sup> الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO) <sup>[۲۷]</sup>، <sup>۲۳</sup> الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) <sup>[۲۴]</sup>، <sup>۲۴</sup> [۲۸]

یک رویکرد عملی تحلیل قابلیت اطمینان پایداری شیروانی‌های غیراشباع توسط جوهری و غلامپور در سال ۱۸ و ۲۰ ارائه شده است. <sup>[۲۹]</sup> میدان‌های تصادفی شرطی با در نظر گرفتن تغییر پارامترهای خاک غیراشباع در محدوده‌ی ممکن، شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود یک مطالعه‌ی موردی نشان داد که اگرچه قابلیت اعتماد در شرایط غیراشباع بالاتر است، اما ناحیه‌ی گسیختگی می‌تواند به طور بالقوه، گستردگی بیشتری داشته باشد. در پژوهش دیگری، اثر عدم قطعیت در تعیین منحنی نگهداشت آب - خاک در مسیر ترشوندگی توسط جوهری و طالبی (۲۰۱۹) بررسی شده است. <sup>[۴۰]</sup> پس از تعیین تابع احتمالاتی ضریب نفوذپذیری در مقابل مکش، شاخص قابلیت اطمینان شیروانی‌های غیراشباع تحت تأثیر سناریوهای مختلف بارش با تکیه بر سطوح گسیختگی بررسی و تحلیل شده است.

در نوشتار حاضر، نویسندگان از الگوریتم بهینه‌یابی برخورد اجسام (CBO) <sup>۲۵</sup> برای تحلیل پایداری شیروانی استفاده کرده‌اند. زیرا یکی از پارامترهای مهم در انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی، بحث پیچیدگی محاسباتی مسئله است. به علت نیاز به حل معادله‌ی همبسته‌ی پیوستگی جریان و داری و غیرخطی بودن معادله‌ی حاصله، مسئله پیچیدگی بالایی دارد. همچنین حساسیت مسئله به شرایط اولیه بالاست، به این معنا که با تغییر شرایط اولیه، پاسخ نهایی تغییرات زیادی می‌کند؛ لذا الگوریتمی باید انتخاب شود که پیچیدگی محاسباتی آن خطی باشد، که الگوریتم CBO قابلیت آن را دارد. در نتیجه، سرعت همگرایی قابل قبولی دارد. بنابراین، نوآوری اصلی پژوهش حاضر، ارائه‌ی رویکرد حل معادله‌ی دیفرانسیل جریان دوفاز با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی برای اولین بار است. اگرچه که طی مثال حل شده در پژوهش حاضر، فقط سطوح گسیختگی دایروی استفاده و نتایج حاصل با خروجی‌های یک نرم‌افزار تجاری مقایسه شده است. هدف غایی فقط نشان دادن این نکته بوده است که هر دو دسته‌ی معادلات تراوش و تعادل حدی به درستی در برنامه‌ی رایانه‌ی وارد شده‌اند. بنابراین، خروجی نرم‌افزار تجاری فقط به عنوان یک مرجع راستی‌آزمایی در نظر گرفته شده است. اما با توسعه‌ی روش مذکور در ادامه‌ی کارهای پژوهشی، دیگر هیچ محدودیتی در هندسه، الگوی بارش، جنس مصالح و ماهیت سطح گسیختگی وجود نخواهد داشت، که البته از محدودیت‌های پژوهش حاضر به شمار می‌رود.

## ۲. روش‌شناسی پژوهش

### ۲.۱. ایجاد سطح گسیختگی بحرانی

برای یافتن سطح گسیختگی بحرانی ابتدا نیاز است یک سطح گسیختگی آزمایشی در نظر گرفته شود. در پژوهش حاضر، یک سطح دایره‌ی به مرکز  $(x_c, y_c)$  و شعاع  $(r_c)$  در نظر گرفته شده است. مختصات نقاط دیگری  $(x_i, y_i)$  برای تعریف هندسه‌ی شیروانی استفاده و تراز آب با تابع  $y_{pwp}(x)$  بیان می‌شود. در گام بعدی، سطح گسیختگی با سه متغیر کنترل  $(x_c, y_c, r_c)$  ایجاد می‌شود.

در حین جستجوی سطح گسیختگی بحرانی، سطح شکست آزمایشی به طور تصادفی تولید می‌شود.

در مطالعه‌ی حاضر، پایداری شیروانی خاکی با روش تعادل حدی <sup>۲۶</sup> به دست آمده است. در این روش سطح گسیختگی به قطعاتی عمودی تقسیم و احتمال لغزش توده‌ی خاک بر اثر نیروی جاذبه بررسی شده است. مینای روش تعادل حدی، مقایسه‌ی نیروهای مقاوم (نیروها، گشتاورها، یا تنش‌های مقاوم در برابر حرکت توده) نسبت به نیروهای محرک (نیروها، گشتاورها، یا تنش‌های به وجودآورنده‌ی حرکت ناپایدار) است.

### ۲.۲. تحلیل تراوش

بررسی و تحلیل تراوش برای برآورد توزیع فشار آب حفره‌ی در شیروانی به علت در نظر گرفتن بارندگی با تحلیل حالت گذرا انجام شده است. پیش‌بینی حرکت سیالات در نواحی غیراشباع از مسائل مهم در بسیاری از شاخه‌های علوم مهندسی، از جمله مهندسی ژئوتکنیک است. تقریباً در تمام مطالعات مربوط به ناحیه‌ی غیراشباع فرض بر این است که حرکت سیال از معادله‌ی کلاسیک ریچاردز <sup>۲۷</sup> پیروی می‌کند. <sup>[۲۱]</sup> معادله‌ی ریچاردز، یک معادله‌ی دیفرانسیل جزئی غیرخطی است و هیچ راه حل تحلیلی ندارد، بنابراین باید به صورت عددی حل شود.

معادله‌ی ریچاردز با در نظر گرفتن هد فشار  $h[L]$  یا میزان رطوبت  $\theta[L^3/L^3]$  به عنوان عوامل متغیر، به سه حالت مختلف نوشته می‌شود. رابطه‌ی بین  $\theta$  و  $h$  امکان تبدیل معادلات به هم را فراهم می‌کند. اگر هر کدام از مجهولات اخیر بر حسب دیگری جایگذاری شود، آن‌گاه، سه فرم استاندارد از معادله‌ی جریان غیراشباع را می‌توان در قالب معادلات ۱ الی ۳ نوشت. رابطه‌ی ۱، بر پایه‌ی  $h$ ، <sup>۲۸</sup> رابطه‌ی ۲ بر پایه‌ی  $\theta$  <sup>۲۹</sup> و رابطه‌ی ۳ معادله به شکل ترکیبی <sup>۳۰</sup> است.

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot K(h) \nabla h - \frac{\partial K}{\partial z} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot D(\theta) \nabla \theta - \frac{\partial K}{\partial z} = 0 \quad (۲)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \nabla \cdot K(h) \nabla h - \frac{\partial K}{\partial z} = 0 \quad (۳)$$

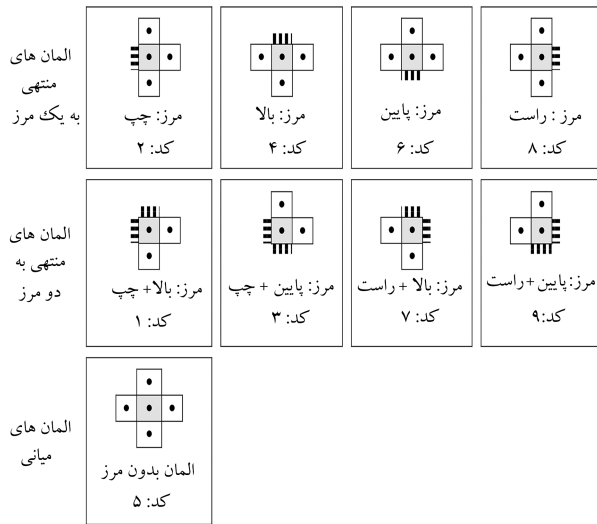
که در آنها،  $C(h) = d\theta/dh$  ظرفیت رطوبت ویژه  $[1/L]$ ،  $K(h)$  هدایت هیدرولیکی،  $[L/T]$  و  $D(\theta) = K(\theta)/C(\theta)$  هدایت غیراشباع  $[L^2/T]$  است.  $Z$  راستای قائم را نشان می‌دهد.

معادله‌ی ریچاردز در حالت دو بُعدی به صورت رابطه‌ی ۴ نوشته می‌شود. سلیا <sup>۳۱</sup> و همکاران (۱۹۹۰)، <sup>[۲۲]</sup> از روشی کاملاً ضمنی برای حل معادله‌ی ریچاردز استفاده کرده و نشان داده‌اند که نتایج حل‌های عددی معادله‌ی ریچاردز مبتنی بر فرم مخلوط، خطای کمتری نشان داده‌اند. معادله‌ی ریچاردز در حالت دو بُعدی به صورت رابطه‌ی ۴ نوشته می‌شود:

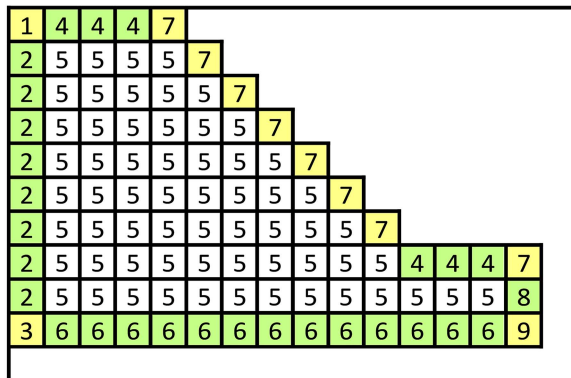
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z (\frac{\partial h}{\partial z} - 1)) \quad (۴)$$

که در آن،  $\theta$  رطوبت خاک،  $k_x$  و  $k_z$  هدایت هیدرولیکی خاک در دو راستای  $x$  و  $z$ :  $h$ : هد فشار آب منفذی (منفی در ناحیه‌ی غیراشباع و مثبت در ناحیه‌ی اشباع)  $x$ : در راستای افقی،  $z$ : راستای قائم (مثبت در جهت پایین) هستند.

رطوبت خاک، خود تابعی از هد فشار خاک است، لذا رابطه‌ی بین دو پارامتر اخیر را اصطلاحاً رابطه‌ی مشخصه‌ی خاک و رطوبت <sup>۳۲</sup> می‌نامند. مدل‌های مختلفی برای بیان رابطه‌ی مشخصه‌ی خاک و رطوبت ارائه شده است، که از مهم‌ترین آنها



شکل ۲. حالت‌های مختلف شرط مرزی برای یک المان.



شکل ۳. کدگذاری المان‌های یک شیروانی به صورت نمونه.

شود. دو نوع شرط مرزی برای هر کدام از مرزها در نظر گرفته شده است: شرط مرزی اول، دبی عبوری از هر مرز است. شرط مرزی دوم، نیز مقدار مشخص هد فشار در مرزهاست. در جدول‌های ۱ و ۲، اصلاحات لازم در هر مرز و هر نوع شرط مرزی ارائه شده است. در المان‌هایی که دو مرز دارند، اعمال هر دو شرط به صورت هم‌زمان باید انجام شود.

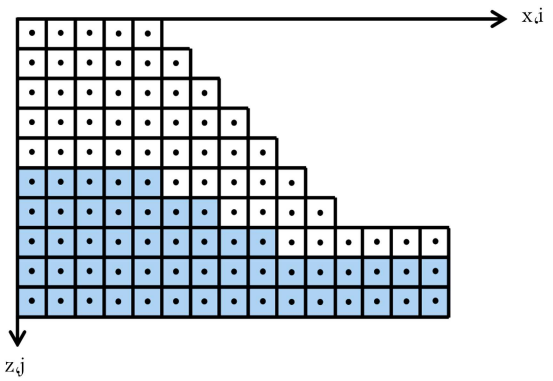
ضریب ستاره‌دار و ضرایب بدون ستاره دو تفاوت با یکدیگر دارند. تفاوت اول در محاسبه  $k$  میانگین (هدایت هیدرولیکی میانگین) است، که از هد فشار در گره (در تکرار قبل) و هد مرز استفاده می‌شود. تفاوت دوم، دارای ضریب ۲ است. به عنوان مثال به رابطه ۵ می‌توان اشاره کرد:

$$A^* = 2 \times \frac{1}{\Delta x^2} k(h_{i,j}^{n+1,m}, h_{BC}) \quad (5)$$

### ۳.۲. تابع هدف

همان‌طور که در ابتدا گفته شد، مناسب‌ترین سطح گسیختگی شامل کمینه‌ی ضریب اطمینان مرتبط است. در مطالعه‌ی حاضر، از روش بیشاپ، بر اساس روش تعادل حدی برای به دست آوردن ضریب اطمینان شیروانی استفاده شده است.

لازم به ذکر است که دو نوع رویکرد برای به دست آوردن مقاومت برشی خاک غیراشباع وجود دارد: الف) رویکرد  $\phi_b$ ، ب) رویکرد تنش مؤثر، که در مطالعه‌ی



شکل ۴. وضعیت گره‌ها و المان‌ها در یک شیروانی با سطح آب زیرزمینی.

می‌توان به رابطه‌های ونگنوختن<sup>۳۳</sup>، فردلانند و زینگ<sup>۳۴</sup> اشاره کرد. در ادامه، در مورد روابط مذکور، توضیحات بیشتری ارائه شده است. علاوه بر این، هدایت هیدرولیکی خاک نیز تابعی از هد فشار است، که بر اساس روابط مشخصه‌ی خاک و رطوبت قابل استخراج است.

### ۱.۲.۲. گسسته‌سازی مکانی

گسسته‌سازی مکانی یا به عبارت دیگر المان‌بندی محیط، بر اساس ابعاد المان‌های ورودی  $(\Delta x, \Delta z)$  محیط را مش‌بندی می‌کند. خروجی مش‌بندی اخیر، یک آرایه است که تعداد درایه‌های آن، نشان‌دهنده‌ی تعداد ستون‌های تشکیل‌دهنده‌ی محیط و مقدار هر درایه، نشان‌دهنده‌ی تعداد المان‌های آن ستون است.

گره‌ها، نقاط میانی هر المان هستند. وضعیت گره‌ها و المان‌ها در شکل ۱ مشاهده می‌شود. لذا برای تعیین تعداد گره‌های موجود، کافی است تا مقادیر کلیه‌ی درایه‌های آرایه‌ی مذکور با یکدیگر جمع شوند. تعداد گره‌ها، نشان‌دهنده‌ی ابعاد دستگاه معادلات  $A \cdot h = B$  است، که با حل آن در هر گام زمانی، هد فشار در گره‌ها تعیین می‌شود.

شماره‌گذاری گره‌ها از سلول سمت چپ و بالا شروع و به سلول سمت راست و پایین ختم می‌شود. بیشترین تعداد سلول‌ها در راستای قائم (تعداد سلول‌های ستون اول) را  $J_{max}$  و بیشترین تعداد سلول‌ها در راستای افقی (تعداد ستون‌ها)،  $I_{max}$  نامیده می‌شود.

برای برقراری ارتباط بین شماره‌ی گره و موقعیت آن و بالعکس، دو زیربرنامه در نظر گرفته شده است. یک زیربرنامه که با مشخص شدن  $i$  و  $j$ ، شماره‌ی گره را در اختیار کاربر قرار می‌دهد و زیربرنامه‌ی دیگر، با دریافت شماره‌ی گره، موقعیت گره یعنی  $i$  و  $j$  آن را بر می‌گرداند. از دو زیربرنامه‌ی اشاره شده در تشکیل دستگاه معادلات و تعیین موقعیت ضرایب در ماتریس ضرایب (A) و بردار معلومات (B) استفاده می‌شود.

### ۲.۲.۲. اعمال شرایط مرزی روی گره‌های کناری محیط

از دیدگاه اعمال شرایط مرزی، المان‌ها دارای ۹ حالت هستند: ۴ حالت، المان‌هایی هستند که فقط در یک وجه خود مرز و در سه وجه دیگر با سایر المان‌ها در ارتباط‌اند. ۴ دسته‌ی دیگر، المان‌هایی هستند که از دو وجه به مرز و از دو وجه به المان‌های مجاور محدود می‌شوند. دسته‌ی نهم المان‌هایی هستند که از هر ۴ وجه توسط المان‌های دیگر محصور شده‌اند. در شکل ۲، ۹ حالت مذکور مشاهده می‌شوند. المان‌های یک سطح شیروانی نیز به صورت نمونه همانند شکل ۳ کدگذاری شده‌اند. با مشخص شدن وضعیت شرط مرزی برای هر المان، رابطه‌ی ۵ باید بر اساس شرط مرزی برای المان‌های کناری محیط (المان‌های با کدهای غیر از ۵) اصلاح

جدول ۱. تغییرات معادله در شرایط مرزی هد کل آب در مرزها.

طرف راست	ضریب					مقدار شرط مرزی	مرز
	$h_{i+1,j}^{n+1,m+1}$	$h_{i,j+1}^{n+1,m+1}$	$h_{i,j}^{n+1,m+1}$	$h_{i,j-1}^{n+1,m+1}$	$h_{i-1,j}^{n+1,m+1}$		
$-B^* h_{top}(i)$ اضافه می‌شود.	-	-	B* با B جایگزین می‌شود.	صفر	-	$h_{top}(i)$	بالا
$-E^* h_{bottom}(i)$ اضافه می‌شود.	-	صفر	E* با E جایگزین می‌شود.	-	-	$h_{bottom}(i)$	پایین
$-A^* h_{left}(j)$ اضافه می‌شود.	-	-	A* با A جایگزین می‌شود.	-	صفر	$h_{left}(j)$	چپ
$-F^* h_{right}(j)$ اضافه می‌شود.	صفر	-	F* با F جایگزین می‌شود.	-	-	$h_{right}(j)$	راست

جدول ۲. تغییرات معادله در شرایط مرزی شار در مرزها.

طرف راست	ضریب					مقدار شرط مرزی	مرز
	$h_{i+1,j}^{n+1,m+1}$	$h_{i,j+1}^{n+1,m+1}$	$h_{i,j}^{n+1,m+1}$	$h_{i,j-1}^{n+1,m+1}$	$h_{i-1,j}^{n+1,m+1}$		
R حذف می‌شود. $-\frac{q_{top}(i)}{\Delta z}$ اضافه می‌شود.	-	-	B از تعریف D حذف می‌شود.	صفر	-	$q_{top}(i)$	بالا
P حذف می‌شود. $\frac{q_{bottom}(i)}{\Delta z}$ اضافه می‌شود.	-	صفر	E از تعریف D حذف می‌شود.	-	-	$q_{bottom}(i)$	پایین
$-\frac{q_{left}(j)}{\Delta z}$ اضافه می‌شود.	-	-	A از تعریف D حذف می‌شود.	-	صفر	$q_{left}(i)$	چپ
$\frac{q_{right}(j)}{\Delta z}$ اضافه می‌شود.	صفر	-	F از تعریف D حذف می‌شود.	-	-	$q_{right}(j)$	راست

حاضر از رویکرد تنش مؤثر استفاده شده است. لازم به ذکر است که امکان انطباق بین روابط استفاده شده در تعیین مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع از هر دو دیدگاه تنش مؤثر و متغیرهای مستقل حالت تنش، یعنی تنش خالص و مکش بافتی، وجود دارد. این مهم با معادل قرار دادن مقاومت برشی منتج از هر یک از رویکردها با هم حاصل می‌شود، که در آن صورت، رابطه  $\tan(\varphi_b) = \chi \tan(\varphi')$  میان زاویه اصطکاک داخلی خاک و زاویه افزایش مقاومت برشی با مکش توسط پارامتر  $\chi$  بیشاپ به هم مرتبط می‌شود. در این صورت، مقاومت برشی حاصل از دو رویکرد یکسان خواهد بود. برای توضیح بیشتر، می‌توان به فصل ششم از کتاب مرجع لو و لیکاس (۲۰۰۴) مراجعه کرد. [۲۳]

(۶)

$$FS = \frac{\sum \left[ \frac{(c'.b) + (W - u_a b) \tan \phi' + (u_a - u_w).b \tan \phi^b}{m_\alpha} \right]}{\sum W. \sin \alpha}$$

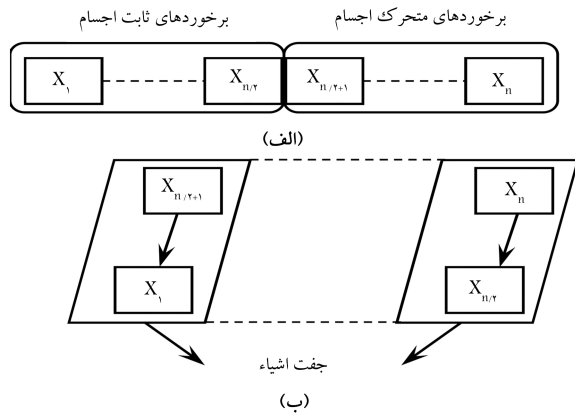
که در آن،  $m_\alpha$  از رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

$$m_\alpha = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{FS} \quad (۷)$$

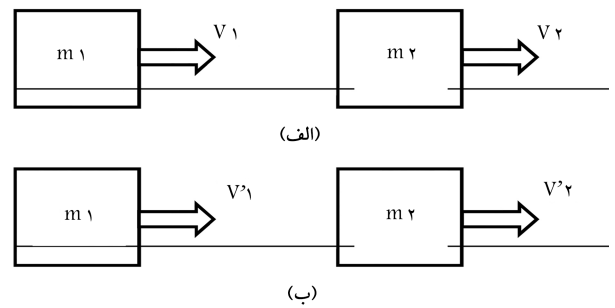
که در آن،  $c'$  چسبندگی مؤثر خاک،  $W$  وزن قطعه،  $a$  فشار هوا،  $u_w$  فشار آب،  $\varphi'$  زاویه اصطکاک مؤثر،  $b$  عرض قطعه،  $\varphi_b$  پارامتر مقاومت برشی خاک غیراشباع و  $\alpha$  زاویه قطعه با افق است. در صورت استفاده از رویکرد تنش مؤثر، پارامتر  $\varphi_b$  در رابطه‌ی ۶ با رابطه‌ی ۸ جایگزین می‌شود:

$$\varphi_b = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tan \varphi' \quad (۸)$$

که در آن، پارامتر تنش مؤثر  $\chi$  نام دارد،  $\theta_r$  درصد رطوبت حجمی ماندگار،  $\theta_s$  درصد رطوبت حجمی در شرایط اشباع و  $\theta$  درصد رطوبت حجمی هستند.



شکل ۵. الف) طبقه‌بندی CB ها، ب) برخورد.



شکل ۴. برخورد بین دو جسم قبل و بعد از برخورد.

بنابراین، تعیین سطح گسیختگی بحرانی با هدف کمیته‌سازی رابطه‌ی ۵ با تغییر موقعیت مرکز کمان گسیختگی و شعاع مربوط به آن در فضای جستجو است.

#### ۴.۲. الگوریتم بهینه‌سازی برخورد اجسام CBO

الگوریتم CBO، مبتنی بر برخورد یک‌بُعدی بین اجسام است. هر راه‌حل به عنوان یک جسم با جرم در نظر گرفته می‌شود. پس از برخورد دو جسم متحرک، که توده و سرعت مشخص دارند، با سرعت‌های جدید از هم جدا می‌شوند. این برخورد باعث می‌شود تا عوامل به سمت موقعیت‌های بهتر در فضای جستجو حرکت کنند. CBO مفهوم ساده‌ی دارد و به هیچ پارامتر داخلی بستگی ندارد. نتایج عددی نشان می‌دهند که CBO با سایر روش‌های فرا اکتشافی در حال رقابت است. [۴۷]

#### ۱.۴.۲. قوانین برخورد اجسام

برخورد بین اجسام تابع قوانین حرکت و انرژی است. هنگامی که یک برخورد در یک سیستم رخ می‌دهد مطابق شکل ۴، کل حرکت سیستم اشیاء حفظ می‌شود. به شرط عدم وجود نیروهای خارجی بر روی اشیاء، حرکت همه‌ی اشیاء قبل از برخورد برابر با حرکت همه‌ی اشیاء پس از برخورد است (رابطه‌ی ۹).

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \quad (9)$$

به همین ترتیب، پایستگی انرژی جنبشی به شرح رابطه‌ی ۱۰ تعیین می‌شود:

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v'^2_1 + \frac{1}{2} m_2 v'^2_2 + Q \quad (10)$$

فرمول سرعت پس از برخورد یک بُعدی به صورت رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ است:

$$v_1' = \frac{(m_1 - \varepsilon m_2) v_1 + (m_2 + \varepsilon m_1) v_2}{m_1 + m_2} \quad (11)$$

$$v_2' = \frac{(m_2 - \varepsilon m_1) v_2 + (m_1 + \varepsilon m_2) v_1}{m_1 + m_2} \quad (12)$$

که در آنها،  $\varepsilon$  ضریب بازتاب برخورد (COR) از دو جسم برخوردکننده، به عنوان نسبت سرعت نسبی جدایی به سرعت نسبی رویکرد تعریف شده است (رابطه‌ی ۱۳):

$$\varepsilon = \frac{|v'_2 - v'_1|}{|v_2 - v_1|} = \frac{v'}{v} \quad (13)$$

با توجه به ضریب COR، دو مورد خاص از هرگونه برخورد به این شرح است:

۱- برخورد کاملاً کشسان به عنوان موردی تعریف شده است، که در اثر برخورد انرژی سینماتیکی تلف نشده است ( $Q = 0, \varepsilon = 1$ ). در واقعیت، هر برخورد

ماکروسکوپی بین اشیاء، مقداری از انرژی جنبشی را به انرژی درونی و سایر شکل‌های انرژی تبدیل می‌کند. در این حالت، پس از برخورد، سرعت جداسازی زیاد است.

۲- برخوردی از نوع غیرکشسان است، که در آن بخشی از انرژی جنبشی به شکل دیگری از انرژی در برخورد تغییر می‌یابد. جنبش در برخوردهای غیرکشسان محافظت می‌شود (همانند برخورد کشسان)، اما نمی‌توان انرژی جنبشی را از طریق برخورد ردیابی کرد زیرا برخی از آن به شکل‌های دیگر انرژی تبدیل می‌شود. در این حالت، ضریب بازتاب برخورد مساوی ۱ نیست ( $0 \leq \varepsilon < 1$  و  $Q \neq 0$ ) پس از برخورد، سرعت جداسازی کم است. برای واقعی‌ترین اشیاء، مقدار  $\varepsilon$  بین ۰ تا ۱ است.

#### ۲.۴.۲. تئوری الگوریتم CBO

با استفاده از قوانین برخورد، که در بخش قبل بحث شده است، روش CBO را می‌توان به طور خلاصه به این شرح بیان کرد:

۱- موقعیت‌های اولیه‌ی CB با مقاردهای اولیه‌ی تصادفی از یک جمعیت از افراد در فضای جستجو تعیین می‌شود (رابطه‌ی ۱۴).

$$x_i = x_{min} + rand(x_{max} - x_{min}), i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

که در آن،  $X_i$  مقدار اولیه‌ی بردار CB را تعیین می‌کند.  $X_{min}$  و  $X_{max}$  کمینه و بیشینه‌ی بردارهای مقادیر مجاز متغیرها هستند. rand یک عدد تصادفی در فاصله‌ی  $[0, 1]$  و  $n$  تعداد CB است.

۲- بزرگی جسم برای هر CB مطابق رابطه‌ی ۱۵ است:

$$m_k = \frac{\frac{1}{fit(k)}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{fit(i)}} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

که در آن،  $fit(i)$  نشان‌دهنده‌ی مقدار تابع هدف برخورد جسم  $i$  ام و  $n$  تعداد اجسام است.

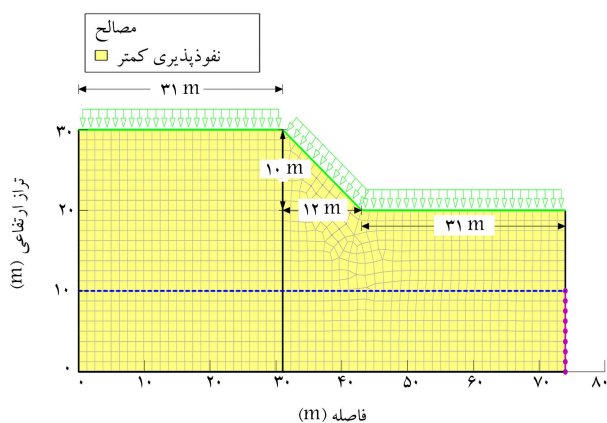
۳- تنظیم مقادیر تابع هدف CB به ترتیب صعودی مانند شکل ۵ - الف انجام می‌شود. CB‌های طبقه‌بندی شده به همان اندازه به دو گروه تقسیم می‌شوند.

- نیمه‌ی پایینی CB: این CB‌ها عوامل خوبی هستند، که ثابت هستند؛ یعنی سرعت این اجسام قبل از برخورد صفر است (رابطه‌ی ۱۶):

$$v_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, \frac{n}{2} \quad (16)$$



شکل ۶. تعیین گویه گسیختگی با روش بهینه‌سازی.



شکل ۷. مدل هندسه‌ی شیروانی و شرایط مرزی.

### ۱.۳. مدل‌سازی در برنامه‌ی SLOPE/W

برای مقایسه و صحت‌سنجی کد نوشته شده، از بخش‌های SLOPE/W و SEEP/W در نرم‌افزار ژئواستوديو (۲۰۱۸) استفاده شده است. هدف، بررسی پایداری سطوح شیب‌دار و تعیین ضریب اطمینان در طراحی شیب است. این فرایند از روش‌های تعادل حدی مختلفی انجام می‌شود، که در این‌جا از روش بیشاپ استفاده شده است.

در شکل ۷، هندسه‌ی شیروانی و شرایط مرزی هیدرولیکی مشاهده می‌شود. زاویه‌ی شیروانی، ۴۰ درجه بوده است. بر پایه‌ی کار تل<sup>۳۸</sup> و همکاران (۱۹۹۹)، شیروانی‌هایی که در سنگاپور دچار گسیختگی شده‌اند، زاویه‌ی پنجه‌ی بین ۲۷-۷۰ درجه داشته‌اند. ارتفاع شیروانی ۱۰ متر بوده و نیز پارامترهای مقاومت برشی خاک  $c' = 2 \text{ KPa}$ ،  $\varphi' = 26^\circ$ ، وزن مخصوص خاک  $20 \text{ KN/m}^3$  و پارامتر خاک غیراشباع  $\varphi_b = 20^\circ$  در نظر گرفته شده است.<sup>[۲۸]</sup> این مسئله برای دو بارندگی با شدت  $9 \text{ mm/hr}$  و  $8 \text{ mm/hr}$  به مدت یک روز و همچنین دو هدایت هیدرولیکی متفاوت، که مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است، حل شده است. لازم به ذکر است که به منظور اخذ نتایج یکسان با نتایج گزارش شده‌ی راه‌آوردجو<sup>۳۹</sup>

نیمه‌ی بالایی CB: این CB ها به سمت نیمه‌ی پایین حرکت می‌کنند. سپس، مطابق شکل ۵ - ب، CB های بهتر و بدتر، یعنی مقادیر بهتر از هر گروه با هم برخورد می‌کنند. تغییر وضعیت جسم، نشان‌دهنده‌ی سرعت این اجسام قبل از برخورد است (رابطه‌ی ۱۷):

$$v_i = x_i - x_{i-\frac{n}{2}} \quad i = \frac{n}{2} + 1, \dots, n \quad (17)$$

که در آن،  $v_i$  و  $x_i$  سرعت و موقعیت بردار CB در گروه قبلی و  $x_{i-\frac{n}{2}}$  موقعیت  $i$ ام در گروه قبلی است.

۴- سرعت اجسام ساکن و متحرک پس از برخورد ( $v'_i$ ) به ترتیب با استفاده از روابط ۱۸ و ۱۹ به دست می‌آیند:

$$v'_i = \frac{(m_{i+\frac{n}{2}} + \varepsilon m_{i-\frac{n}{2}}) v_{i+\frac{n}{2}}}{m_i + m_{i+\frac{n}{2}}} \quad i = 1, 2, \dots, \frac{n}{2} \quad (18)$$

$$v'_i = \frac{(m_i - m_{i-\frac{n}{2}}) v_i}{m_i + m_{i-\frac{n}{2}}} \quad i = \frac{n}{2} + 1, \frac{n}{2} + 2, \dots, n$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\text{iter}}{\text{iter}_{\max}} \quad (19)$$

در رابطه‌ی اخیر، iter و iter<sub>max</sub> تعداد تکرار فعلی و تعداد کل تکرارها برای فرایند بهینه‌سازی و  $\varepsilon$  ضریب جبران هستند.

۵- موقعیت‌های جدید CB با سرعت‌های تولید شده پس از برخورد در موقعیت CB های ثابت ارزیابی می‌شوند. موقعیت‌های جدید هر CB در حال حرکت با رابطه‌ی ۲۰ به‌روزرسانی می‌شوند:

$$x_i^{new} = x_{i-\frac{n}{2}} + \text{rand}^\circ v'_i \quad i = \frac{n}{2} + 1, \dots, n \quad (20)$$

همچنین موقعیت‌های جدید CB ثابت از طریق رابطه‌ی ۲۱ به دست می‌آیند:

$$x_i^{new} = x_i + \text{rand}^\circ v'_i \quad i = 1, \dots, n \quad (21)$$

که در آن،  $x_i$ ،  $v'_i$  به ترتیب موقعیت جدید، موقعیت قبلی و سرعت بعد از برخورد جسم  $i$ ام است. rand یک بردار تصادفی از توزیع یکنواخت در محدوده‌ی [۱، -۱] و علامت ۰، نشان‌دهنده‌ی ضریب عنصر به عنصر است.

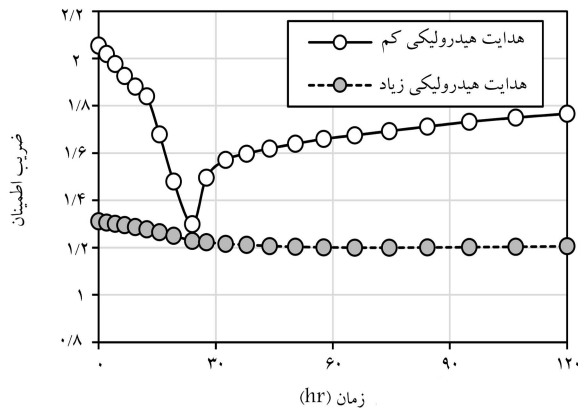
۶- بهینه‌سازی از مرحله‌ی دو تکرار می‌شود، تا زمانی که یک معیار خاتمه مانند بیشینه‌ی تعداد تکرار برآورده شود.

### ۳. حل مثال عددی

بخش حاضر به تعیین سطح گسیختگی شیروانی با استفاده از الگوریتم CBO و مدل‌سازی در نرم‌افزار ژئواستوديو<sup>۳۷</sup> اختصاص یافته است. برای این منظور، ابتدا برخی از پاسخ‌های تصادفی بر اساس روش الگوریتم تولید می‌شوند. هر پاسخ به ترتیب شامل سه داده‌ی جداگانه است: x و y و r، که مختصات کمان گسیختگی و شعاع آن هستند. سپس، هندسه‌ی شیروانی به قطعاتی تقسیم می‌شود. پس از آن، یک مش مناسب برای تولید پارامترهای برش، مانند: وزن، فشار آب منافذ و... با استفاده از تفاضلات محدود تولید و سپس، تابع هدف، یعنی ضریب اطمینان ارزیابی می‌شود. با تکرار روش اخیر، موقعیت مطلوب کمان بحرانی و کمینه‌ی ضریب اطمینان به دست می‌آیند. مراحل کار روش معرفی شده در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

جدول ۳. پارامترهای ورودی و نگونختن.

K - s(m/s)	$\alpha$ (kPa)	n	$\theta_s$	$\theta_r$	Material
$1e^{-6}$	۱۰۰	۱/۵	۰/۴۵	۰/۴۵	هدایت هیدرولیکی کم
$۰/۰۰۰۱$	۱۰	۱/۵	۰/۴۵	۰/۰۵	هدایت هیدرولیکی زیاد



شکل ۹. مقایسه‌ی ضریب اطمینان برای بارندگی ۹ میلی متر بر ساعت.

برابر مکش، ماهیت برازشی دارند و قضاوت مهندسی گروه پژوهشی راهاراجو در تعیین و برازش آن، نقش کلیدی داشته است. [۴۸ و ۴۹]

وجه تسمیه‌ی دو نوع خاک با هدایت هیدرولیکی کم و زیاد از پژوهش رحیمی و همکاران (۲۰۱۱) [۴۹] اقتباس شده و به علت حفظ امانت علمی نویسندگان اصلی، در نوشتار حاضر تغییر نیافته است. خصوصیات هیدرولیکی ارائه شده در شکل ۸ به نحوی بوده است که بیانگر خاک‌های ریزدانه و برجای سنگاپور با دو سطح هدایت هیدرولیکی باشد. طبق منحنی‌های نگهداشت آب - خاک ارائه شده می‌توان استنباط کرد که مصالح خاکی با هدایت هیدرولیکی کم و زیاد به ترتیب تشابه زیادی به خاک‌های سیلت رسی و سیلت ماسه‌یی داشته‌اند.

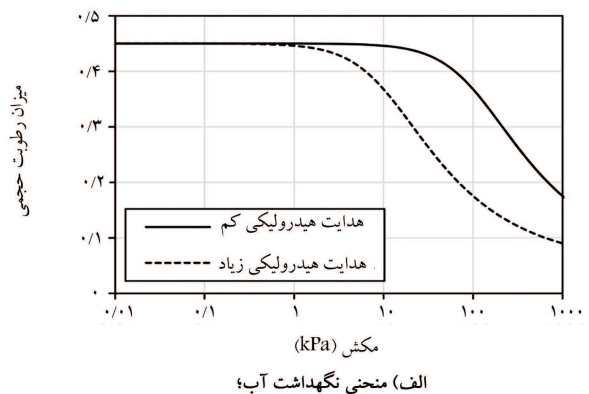
توزیع فشار آب حفره‌یی برای قسمت SLOPE/W تحت حالت گذرا در قسمت SEEP/W تعریف شده است. برای ایجاد جریان گذرا، این شرایط مرزی در نظر گرفته شده است:

- سطح اولیه‌ی آب زیرزمینی با هد فشار حفره‌یی منفی با مقدار  $7/5$  m (kPa) در نظر گرفته شده است. [۴۸]

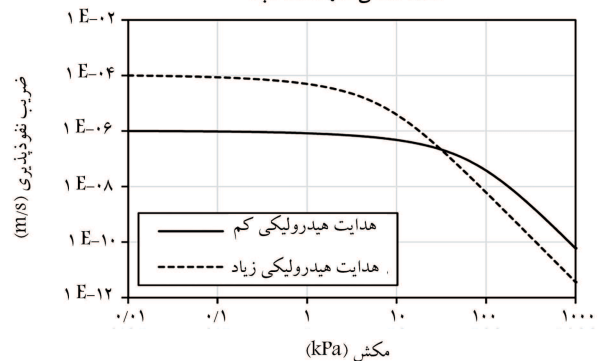
- مقدار بارندگی ۹ و ۸۰ میلی‌متر بر ساعت و میانگین شار نفوذ سالانه، جزء شرایط مرزی اند.

- در هر کل ۱۰ متر در مرزهای سمت راست و سمت چپ مدل، جریان صفر در نظر گرفته شده است.

در شکل‌های ۹ و ۱۰، مقدار ضریب اطمینان کمیته برای بارندگی ۹ و ۸۰ میلی‌متر بر ساعت در طی ۱۲۰ ساعت مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که مقدار ضریب اطمینان قبل از بارندگی برای خاک با هدایت هیدرولیکی بالاتر به طور قابل ملاحظه‌یی کمتر از خاک با هدایت هیدرولیکی کمتر بوده است؛ زیرا مقاومت مکش به همان اندازه برای خاک با همان فشار آب حفره‌یی ایجاد نشده است. با افزایش خیس شدن، هر دو خاک با کاهش ضریب اطمینان همراه هستند، اما این کاهش برای خاک با هدایت هیدرولیکی کمتر، بیشتر بوده است؛ که علت آن مقاومت مکش



الف) منحنی نگهداشت آب؛

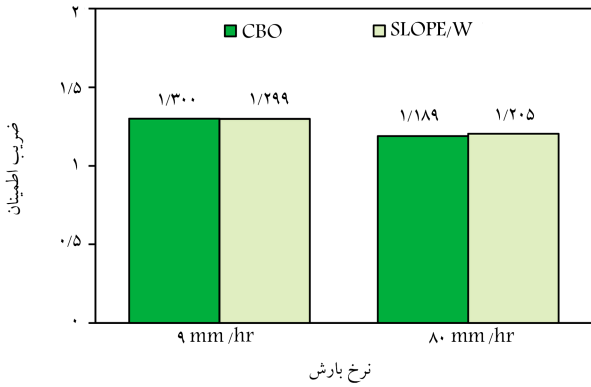


ب) تابع هدایت هیدرولیکی.

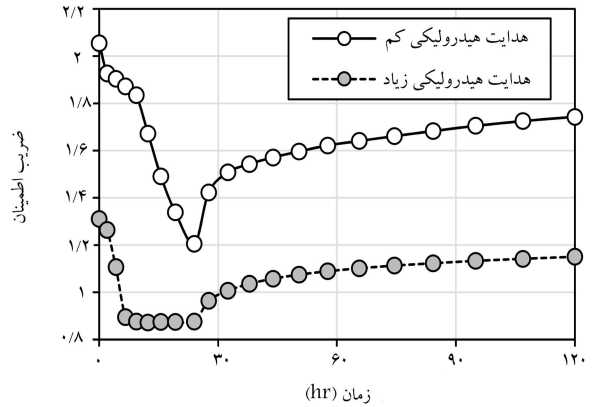
شکل ۸. خصوصیات هیدرولیکی دو نوع خاک با هدایت هیدرولیکی کم و زیاد. [۴۸]

همکاران (۲۰۰۷)، در تحلیل‌های مقایسه‌یی انجام شده از اثر تغییرات غیرخطی  $\varphi_b$  با مکش یا به عبارتی، تابع نرمال شده‌ی رطوبت حجمی در معادله‌ی ۸ صرف نظر شده است. [۴۸] به عبارت دیگر، علی‌رغم قابلیت کد توسعه‌یافته در لحاظ تغییرات غیرخطی  $\varphi_b$  به صورت تابعی از منحنی نگهداشت آب - خاک از طریق ترکیب معادله‌های ۶ و ۸، در مثال موردی کنونی جهت مقایسه‌ی نتایج با نوشتار راهاراجو و همکاران (۲۰۰۷)، از مقدار  $\varphi_b$  ثابت استفاده شده است. دلیل پژوهشگران پیشین برای استفاده از  $\varphi_b$  ثابت، مطالعه‌ی آثار بارش فقط در تغییرات فشار آب حفره‌یی بوده و از تغییر پارامترهای مقاومت برشی خاک در اثر تغییرات مکش خودداری به عمل آمده است.

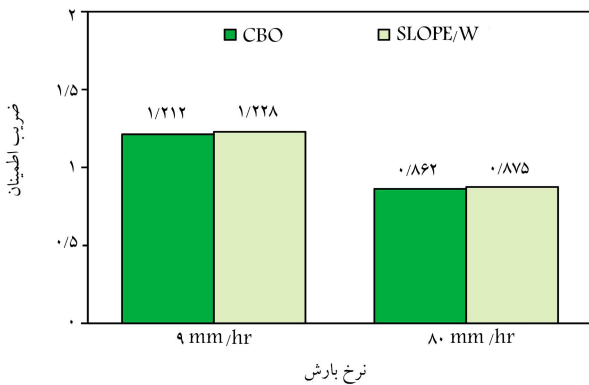
در شکل ۸، خصوصیات هیدرولیکی دو نوع مصالح با عنوان «هدایت هیدرولیکی کم و زیاد» مشاهده می‌شود. شکل ۸ - الف، مربوط به منحنی‌های نگهداشت آب - خاک و شکل ۸ - ب، مربوط به توابع ضریب نفوذپذیری - مکش دو خاک مذکور است. لازم به ذکر است که منحنی‌های ارائه شده برای کنترل عملکرد برنامه‌ی توسعه‌یافته از نوشتار راهاراجو و همکاران (۲۰۰۷) اتخاذ شده است، که مربوط به مطالعه‌ی ناپایداری شیروانی‌های همگن تحت بارش بوده است. [۴۸] بنابراین می‌توان این طور برداشت کرد که توابع ارائه شده مربوط به مسیر هیدرولیکی ترشوندگی خاک هستند. همچنین لازم به ذکر است که توابع نگهداشت آب و ضریب نفوذپذیری در



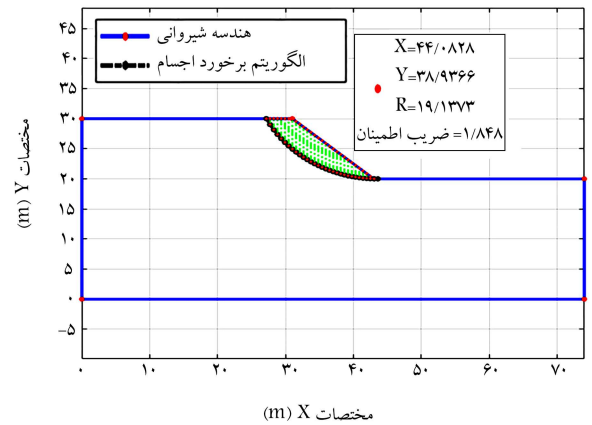
شکل ۱۲. مقایسه‌ی ضریب اطمینان در حالت هدایت هیدرولیکی کم با الگوریتم CBO و نرم‌افزار ژئواستودیو.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی ضریب اطمینان برای بارندگی ۸۰ میلی‌متر بر ساعت.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی ضریب اطمینان در حالت هدایت هیدرولیکی زیاد با الگوریتم CBO و نرم‌افزار ژئواستودیو.



شکل ۱۱. تحلیل شیروانی با الگوریتم CBO.

بیشتر است. همچنین لازم به ذکر است که شیروانی در بارندگی ۹ میلی‌متر بر ساعت به گسیختگی نمی‌رسد.

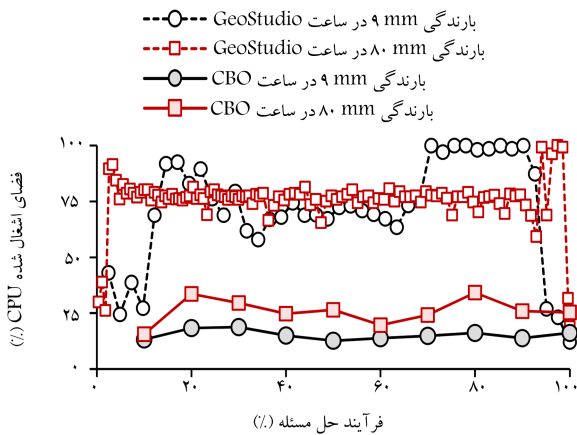
### ۲.۳. نتایج مثال‌های حل شده با CBO

در بخش شیروانی معرفی شده با الگوریتم بهینه‌سازی CBO، که در بخش ۲.۴.۲ کاملاً بررسی شده است، تجزیه و تحلیل صورت گرفته است. اندازه‌ی جمعیت هر الگوریتم  $N=100$  و تعداد تکرار ۱۰۰ در نظر گرفته شده است، که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود و تعداد قطعات ۳۰ بوده است.

در شکل ۱۲، ضریب اطمینان برای هر دو مقدار بارندگی با نرم‌افزار SLOPE/W و با الگوریتم CBO در حالت هدایت هیدرولیکی کم مقایسه شده است. در شکل ۱۳، نیز این مقایسه برای هدایت هیدرولیکی اخیر انجام شده است.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشخص است، در شدت بارندگی ۸۰ میلی‌متر بر ساعت، گرچه الگوریتم ضریب اطمینان کمتر بوده است، ولی قابل اغماض است. همچنین مشاهده می‌شود که الگوریتم بهینه‌یابی برخورد اجسام، ضریب اطمینان بحرانی‌تری را نشان می‌دهد.

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، مقایسه‌ی درصد اشغال شدن واحد پردازنده‌ی مرکزی برای دو خاک ماسه‌یی و سیلتی با الگوریتم بهینه‌یابی برخورد اجسام و نرم‌افزار ژئواستودیو مشاهده می‌شود. در مسائل حجیم و بزرگ، عملاً تحلیل‌گر از زمان حل مسئله، تخمین و پیش‌بینی خاصی ندارد. بنابراین نمی‌توان با آگاهی به زمان پردازش مسئله، به سراغ روش‌های رایانش سریع<sup>۴</sup> رفت. اما در صورت ارائه‌ی گزارشی مبنی



شکل ۱۴. مقایسه‌ی درصد استفاده از واحد پردازنده‌ی مرکزی هنگام استفاده از الگوریتم CBO و نرم‌افزار ژئواستودیو در خاک ماسه‌یی.

بر حجم اختصاص‌یافته‌ی پردازش‌گر، این مهم حاصل خواهد شد و به عبارت دیگر، می‌توان روش‌های رایانش سریع از جمله پردازش موازی را پیاده‌سازی کرد. لازم به ذکر است که نیل به هدف مذکور با ارائه و مقایسه‌ی زمان حل، ممکن نیست (به علت عوامل متعدد تأثیرگذار، از جمله: پارچه‌بندی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری رایانه) و راه آن فقط مقایسه‌ی درصد اشغال واحد پردازنده‌ی مرکزی توسط دو روش مذکور است.

هنگام استفاده از نرم‌افزار ژئواستودیو به طور میانگین از ۶۷٪ ظرفیت واحد



دایره‌یی و روش بیشاپ انجام شده است. الگوریتم بهینه‌یابی برخورد اجسام، نقطه‌ی دوران گوی دایره‌یی لغزش را در فضا به صورت تصادفی رهیابی و پیدا کرده است؛ در نتیجه، مختصات نقاط برخورد دایره با شیروانی به دست آمده است. در صورتی که سطح گسیختگی آزمایشی مورد قبول باشد، گوی لغزش به قطعاتی تقسیم و ضریب اطمینان با روش تفاضل محدود محاسبه می‌شود. این فرایند تا به دست آوردن ضریب اطمینان بهینه ادامه پیدا خواهد کرد. در نهایت، نتایج حاصل از الگوریتم جدید با خروجی‌های نرم‌افزار ژئواستوديو مقایسه شده است.

در بررسی پایداری شیروانی‌های خاکی غیراشباع، تابع هدف ضریب اطمینان است، که با استفاده از آن سطح لغزش شیروانی، که باعث به وجود آمدن کمترین ضریب اطمینان می‌شود، به دست می‌آید. مشخص شده است که الگوریتم بهینه‌یابی برخورد اجسام به دور از بهینه‌ی محلی به صورت موفق‌تری در نشان دادن ضریب اطمینان کمینه نسبت به نرم‌افزار ژئواستوديو عمل می‌کند و هر چه مقدار مش‌بندی ریزتر شود، ضریب اطمینان بحرانی‌تری به دست می‌آید.

از دیگر مزایای استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی برخورد اجسام، می‌توان به کمتر اشغال شدن فضای واحد پردازنده‌ی مرکزی اشاره کرد. هر چند، برای مثال ساده‌ی حل شده، تغییرات ضریب اطمینان جزئی است، اما مهم‌ترین امتیاز کد جدید آن است که باعث کاهش حجم کارکرد واحد پردازنده‌ی مرکزی تا ۷۱٪ مستقل از نوع پردازنده شده است.

لازم به ذکر است که استفاده از نرم‌افزار ژئواستوديو، محدودیت‌هایی مانند مدل‌سازی پوشش گیاهی دارد، که استفاده از هوش مصنوعی امکان مدل‌سازی راحت‌تر پوشش گیاهی را فراهم می‌کند؛ زیرا مسئله تبدیل به یک مسئله ناپویسته می‌شود، که فقط با کدنویسی قابل حل است.

از معایب الگوریتم بهینه‌یابی برخورد اجسام می‌توان به تصادفی بودن آن اشاره کرد، که پس از هر بار خروجی گرفتن، جواب با اندکی تفاوت نسبت به خروجی قبلی حاصل می‌شود؛ البته در الگوریتم‌های بهینه‌یابی قطعی با وجود جواب یکتا، هزینه بیشتر و سرعت کمتر است.

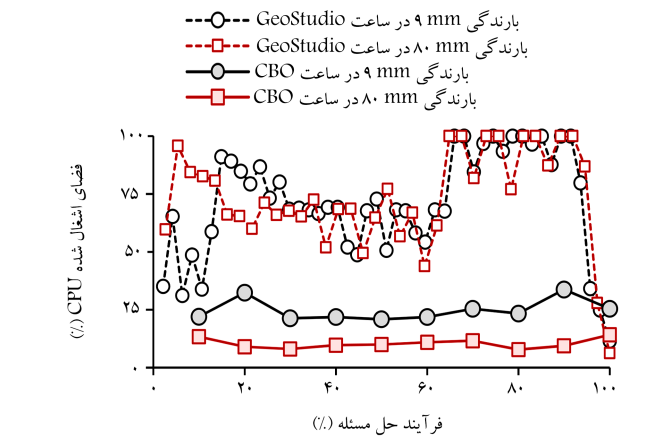
همچنین نتایج نشان می‌دهند که پایداری شیروانی غیراشباع به ویژگی پارامترهای خاک، شار نفوذ و شرایط رطوبت پیشین بستگی دارد. از مقایسه‌ی مقدار دو بارندگی بر روی دو نوع خاک سیلتی و ماسه‌یی این نتیجه گرفته می‌شود که خاک با هدایت هیدرولیکی بیشتر، ضریب اطمینان کمتری را نشان می‌دهد؛ زیرا نفوذ باران در این شرایط راحت‌تر است و در بارندگی با حجم بیشتر، منجر به گسیختگی شیروانی می‌شود.

## تقدیر و تشکر

بدین وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف در قالب پنجمین طرح فراخوان گرنت از برنامه‌ی پژوهشی با عنوان «ارزیابی آزمایشگاهی جریان دوفازه در محیط متخلخل و تغییرشکل‌پذیر» به شناسه‌ی گرنت ۲۹۷۰۹۰۲، صمیمانه قدردانی و تشکر می‌شود.

## پانویس‌ها

1. Smith



شکل ۱۵. مقایسه‌ی درصد استفاده از واحد پردازنده‌ی مرکزی هنگام استفاده از الگوریتم CBO و نرم‌افزار ژئواستوديو در خاک سیلتی.

پردازنده‌ی مرکزی رایانه استفاده شده است، در حالی که هنگام استفاده از نرم‌افزار متلب<sup>۲۱</sup> و الگوریتم بهینه‌یابی برخورد اجسام به طور میانگین از ۱۹٪ ظرفیت واحد پردازنده‌ی مرکزی استفاده شده است. همان‌طور که مشخص است، استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی برخورد اجسام در نرم‌افزار متلب، درصد اشغال واحد پردازنده‌ی مرکزی را به طور میانگین تا ۷۱٪ کاهش می‌دهد.

اشغال شدن ظرفیت بالایی از واحد پردازنده‌ی مرکزی، معایبی از جمله افزایش دمای پردازنده، کاهش سرعت سیستم و عدم امکان استفاده از سایر نرم‌افزارها را به همراه دارد.

هر چقدر واحد پردازنده‌ی مرکزی بیشتر درگیر شود، توان پردازشی پایین می‌آید و مسائل کمتری را می‌توان حل کرد، زمان حل بالا می‌رود و در مواردی دقت حل پایین می‌آید. در نتیجه، امکان پیچیده کردن مسائل کاهش می‌یابد.

## ۴. نتیجه‌گیری

اگرچه نرم‌افزارهای تجاری در زمینه‌ی تحلیل تراوش و پایداری شیروانی‌ها تحت شرایط غیراشباع در ۲ الی ۳ دهه‌ی گذشته توسعه یافته‌اند، اما محدودیت عمده‌ی آنها، عدم دسترسی به جعبه‌ی سیاه کد اصلی است؛ بنابراین محدودیت در لحاظ شرایط پیچیده‌تر دیگری همچون آثار پوشش گیاهی، ترک و بهینه‌تر ساختن دسته‌ی معادلات حاکم است. بنابراین در پژوهش حاضر، ضریب اطمینان در برابر پایداری شیروانی‌های متشکل از خاک غیراشباع تحت تأثیر شار سطحی بهینه‌یابی شده است. الگوریتم بهینه‌یابی توسعه یافته در کد مبتنی بر روش بهینه‌یابی برخورد اجسام (CBO) از زیرمجموعه‌ی الگوریتم‌های فراابتکاری است. کد مورد نظر، در نرم‌افزار متلب توسعه یافته و قادر به محاسبه و بهینه‌یابی مؤثر ضریب اطمینان در برابر پایداری با در نظر گرفتن آثار بارش اعمال شده به یک شیروانی خاکی در چارچوب معادله‌ی ریچاردز بوده است. محاسبات مربوط به ضریب اطمینان با فرض سطح گسیختگی

2. Baker & Garber
3. Nguyen
4. Arai & Tagyo
5. harmony search

6. ant colony optimization
7. particle swarm optimization
8. artificial bee colony
9. simulated annealing
10. cuckoo search
11. firefly algorithm
12. fish swarms algorithm
13. big-bang big-crunch
14. relevance vector machine
15. mutative scale chaos
16. tabu search
17. genetic algorithm
18. fireWorks algorithm
19. black hole algorithm
20. immunised evolutionary programming
21. differential evolution
22. evolutionary strategy
23. biogeography-based optimization
24. teaching learning based optimization
25. colliding bodies optimization
26. limit equilibrium method
27. Richards equation
28. "h"- based
29. "θ"-based
30. mixed form
31. Celia
32. soil-water characteristic
33. VanGenuchten
34. Fredlund-Xing
35. Lu & Likos
36. coefficient of restitution
37. Geostudio
38. Tol
39. Rahardjo
40. high performance computing
41. MATLAB

## منابع (References)

1. Janbu, N. "Slope stability computations", *Embankment Dam Eng., John Wiley*, New York (1973).
2. Fellenius, W. "Calculation of stability of earth dam", *2<sup>nd</sup> Congr. large dams, Washington, DC*, **4**, pp. 445-446 (1936).
3. Bishop, A.W. "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", *Geotechnique*, **5**(1), pp. 7-17 (1954).
4. Morgenstern, N.R. and Price, V.E. "The analysis of the stability of general slip surfaces", *Geotechnique*, **15**(1), pp. 79-93 (1964).
5. Smith, I.M., Griffiths, D.V. and Margetts, L. "Programming the finite element method", *Google Books*, 5<sup>th</sup> edn. Wiley, Hoboken (2013).
6. Baker, R. and Garber, M. "Theoretical analysis of the stability of slopes", *Geotechnique*, **28**(4), pp. 395-411 (1978).
7. Baker, R. "Determination of the critical slip surface", *Geomechanics*, **4**(4), pp. 333-359 (1980).
8. Nguyen, V.U. "Determination of critical slope failure surfaces", *J. Geotech. Engrg., ASCE*, **111**(2), pp. 238-250 (1985).
9. Arai, K. and Tagyo, K. "Determination of noncircular slip surface giving the minimum factor of safety in slope stability analysis", *Soils Found.*, **25**(1), pp. 43-51 (1985).
10. Kaveh, A. "Applications of metaheuristic methods in civil engineering problems", *Springer*, **373** pp. (2017).
11. Cheng, Y.M., Li, L., Sun, Y.J. and et al. "A coupled particle swarm and harmony search optimization algorithm for difficult geotechnical problems", *Struct. Multidiscip. Optim.*, **45**(4), pp. 489-501 (2012).
12. Cheng, Y.M., Li, L., Lansivaara, T. and et al. "An improved harmony search minimization algorithm using different slip surface generation methods for slope stability analysis", *Eng. Optimization*, **40**(2), pp. 37-41 (2008).
13. Kahatadeniya, K.S., Nanakorn, P. and Neaupane, K.M. "Determination of the critical failure surface for slope stability analysis using ant colony optimization", *Eng. Geol.*, bf 108(1-2), pp. 133-141 (2009).
14. Gao, W. "Premium-penalty ant colony optimization and its application in slope stability analysis", *Appl. Soft Comput. J.*, **43**, pp. 480-488 (2016).
15. Gao, W. "Determination of the noncircular critical slip surface in slope stability analysis by meeting ant colony optimization", *J. Comput. Civ. Eng.*, **30**(2), 06015001 (2016).
16. Cheng, Y.M., Chi, S., and Wei, W.B. "Particle swarm optimization algorithm for the location of the critical non-circular failure surface in two-dimensional slope stability analysis", *Computers and Geotechnics*, **34**(2), pp. 92-103 (2007).
17. Khajehzadeh, M., Taha, M.R. and El-shafie, A. "Locating the general failure surface of earth slope using particle swarm optimisation", *Civ. Eng. Environ. Syst.*, **29**(1), pp. 37-41 (2012).
18. Kumar, D.N. and Reddy, M.J. "Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization", *WATER Resour. Plan. Manag.*, **133**(3), pp. 192-201 (2007).
19. Burman, A. and Himanshu, N. "Determination of critical failure surface of slopes using particle swarm optimization technique considering seepage and seismic loading", *Geotech. Geol. Eng.*, **37**(1), pp. 1261-1281 (2018).
20. Kang, F., Li, J. and Ma, Z. "An artificial bee colony algorithm for locating the critical slip surface in slope stability analysis", *Eng. Optim.*, **45**(2), pp. 207-223 (2013).
21. Cheng, Y.M. "Global optimization analysis of slope stability by simulated annealing with dynamic bounds and Dirac function", *Eng. Optim.*, **39**(1), pp. 17-32 (2007).
22. Gandomi, A.H., Kashani, A.R., Mousavi, M. and et al. "Slope stability analyzing using recent swarm intelligence techniques", *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, **39**(3), pp. 295-309 (2015).
23. Cheng, Y.M., Liang, L., Chi, S.C. and et al. "Determination of the Critical Slip Surface Using Artificial Fish Swarms Algorithm", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **134**(2), pp. 244-251 (2008).
24. Saha, A. "Big-bang big-crunch optimization in locating the critical surface in slope-stability", *In Indian geotechnical conference*, pp. 978-981 (2013).
25. Zhao, H., Yin, S. and Ru, Z. "Relevance vector machine applied to slope stability analysis", *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, **36**(5), pp. 643-652 (2012).

26. Hu, C., Jimenez, R., Li, S.C. and Li, L.P. "Determination of critical slip surfaces using mutative scale chaos optimization", *J. Comput. Civ. Eng.*, **29**(5), pp. 1-9 (2015).
27. McCombie, P. and Wilkinson, Ph. "The use of the simple genetic algorithm in finding the critical factor of safety in slope stability analysis", *Computers Geotech.*, **29**(8), pp. 699-714 (2002).
28. Das, S.K. "Slope stability analysis using genetic algorithm", *Electron. J. Geotech. Eng.* (2005).
29. Zolfaghari, A.R., Heath, A.C. and McCombie, P.F. "Simple genetic algorithm search for critical non-circular failure surface in slope stability analysis", *Comput. Geotech.*, **32**(3), pp. 139-152 (2005).
30. Sengupta, A. and Upadhyay, A. "Locating the critical failure surface in a slope stability analysis by genetic algorithm", *Appl. Soft Comput.*, **9**(1), pp. 387-392 (2009).
31. Jurado-Piña, R. and Optimization, R.J. "A genetic algorithm for slope stability analyses with concave slip surfaces using custom operators", *Eng. Optim.*, **47**(4), pp. 453-472 (2015).
32. Manouchehrian, A., Gholamnejad, J. and Sharifzadeh, M. "Development of a model for analysis of slope stability for circular mode failure using genetic algorithm", *Environ. Earth Sci.*, **71**(3), pp. 1267-1277 (2014).
33. Goh, A.T.C. "Search for critical slip circle using genetic algorithms", *Civ. Eng. Environ. Syst.*, **17**(3), pp. 181-211 (2000).
34. Xiao, Z., Tian, B. and Lu, X "Locating the critical slip surface in a slope stability analysis by enhanced fireworks algorithm", *Cluster Comput.*, **22**(3), pp. 719-729 (2019).
35. Gao, W., Wang, X., Dai, S. and et al. "Study on stability of high embankment slope based on black hole algorithm", *Environ. Earth Sci.*, **75**(20), pp. 1-13 (2016).
36. Gao, W. "Slope stability analysis based on immunised evolutionary programming", *Environ. Earth Sci.*, **74**(4), pp. 3357-3369 (2015).
37. Singh, J., Banka, H. and Verma, A.K. "A BBO-based algorithm for slope stability analysis by locating critical failure surface", *Neural Comput. Appl.*, **31**(10), pp. 6401-6418 (2019).
38. Mishra, M., Gunturi, V.R. and Maity, D. "Teaching-learning-based optimisation algorithm and its application in capturing critical slip surface in slope stability analysis", *Soft Comput.*, **24**(4), pp. 2969-2982 (2020).
39. Johari, A. and Gholampour, A. "A practical approach for reliability analysis of unsaturated slope by conditional random finite element method", *Computers and Geotechnics*, **102**, pp.79-91 (2018).
40. Johari, A. and Talebi, A. "Stochastic analysis of rainfall-induced slope instability and steady-state seepage flow using random finite-element method", *International Journal of Geomechanics*, **19**(8), 04019085 (2019).
41. Daniel, H. "Environmental soil physics", *San Diego, Academic Press* (1998).
42. Celia, M.A., Bouloutas, E.T. and Zarba, R.L. "A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation", *Water Resour. Res.*, **26**(7), pp. 1483-1496 (1990).
43. Lu, N. and Likos, W.J. "Unsaturated soil mechanics", *Wiley*, NY (2004).
44. Khalili, N., Geiser, F. and Blight, G.E. "Effective stress in unsaturated soils: Review with new evidence", *Int. J. Geomech.*, **4**(2), pp. 115-126 (2004).
45. Garakani, A.A., Sadeghi, H., Saheb, S. and et l. "Bearing capacity of shallow foundations on unsaturated soils: analytical approach with 3D numerical simulations and experimental validations", *Int. J. Geomech.*, **20**(3), 04019181 (2020).
46. Gallipoli, D., Gens, A., Sharma, R. and et al. "An elastoplastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour", *Geotechnique*, **53**(1), pp. 123-135 (2003).
47. Kaveh, A. and Mahdavi, V.R. "Colliding bodies optimization: A novel meta-heuristic method", *Comput. Struct.*, **139**, pp. 18-27 (2014).
48. Rahardjo, H., Ong, T.H., Rezaur, R.B. and et al. "Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(12), pp. 1532-1543 (2007).
49. Rahimi, A., Rahardjo, H. and Leong, E.C. "Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **137**(5), pp. 483-491 (2011).