

# معرفی سطوح گسیختگی انتقالی - دورانی و کاربرد آنها در مسائل ظرفیت باربری

نوید گنجیان (استادیار)

دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

فرج اله عسکری (استادیار)

بزهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

اورنگ فزانه (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

در اغلب روش های تحلیل حدی پایداری، انتخاب مکانیسم گسیختگی اولین و مهم ترین مرحله محسوب می شود. مکانیسم های گسیختگی که تاکنون مورد استفاده قرار گرفته اند، در یکی از دو گروه مکانیسم های دارای حرکت دورانی یا حرکت انتقالی جای گرفته اند و در حالات ترکیبی قادر به ارائه ی پاسخ مناسب نبوده اند. علاوه بر این، مکانیسم های دورانی پیشنهادی فقط از یک بلوک صلب تشکیل شده و استفاده از سیستم های چندبلوکی در یک مکانیسم گسیختگی دورانی میسر نبوده است. برای رفع این محدودیت ها، در نوشتار حاضر فرمول بندی سطوح گسیختگی دارای حرکت های انتقالی و دورانی استخراج شده و برای اولین بار، مکانیسم گسیختگی حاصل از ترکیب بلوک های صلب با حرکت های انتقالی و دورانی بر پایه ی روش تحلیل حدی مرز بالا معرفی شده است. برای تعیین مکانیسم گسیختگی بحرانی، الگوریتمی مبتنی بر روش الگوریتم ژنتیک توسعه یافته و در نرم افزار تدوین شده مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور بررسی صحت و دقت الگوریتم حاضر، نتایج تحلیل ظرفیت باربری پی های نواری تحت اثر بار مایل خارج از محور با نتایج دیگر روش های موجود مقایسه شده است. نتایج حاصله بیانگر دقت مناسب روش پیشنهادی در عین سادگی است. مسئله ی تعیین ظرفیت باربری پی های تحت اثر بار خارج از محور واقع بر لایه های خاک متکی بر سنگ بستر، به عنوان نمونه یی از قابلیت های خاص مکانیسم پیشنهادی، مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: مکانیسم گسیختگی انتقالی - دورانی، ظرفیت باربری، تحلیل حدی مرز بالا.

## ۱. مقدمه

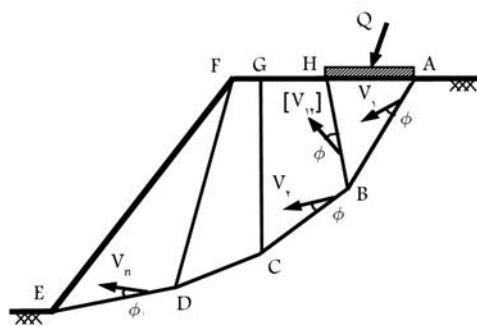
در مکانیک خاک، روش های رایج برای حل تحلیلی مسائل پایداری عبارتند از: «تبادل حدی»، «خطوط مشخصه» و «تحلیل حدی». در روش تعادل حدی فقط معادلات کلی تعادل ارضا می شوند؛ قانون جریان در این روش در نظر گرفته نشده و شکل مکانیسم گسیختگی به صورت اختیاری انتخاب می شود. در روش خطوط مشخصه تنش نیز که مبتنی بر انتقال گیری از معادلات تعادل در حالت خمیری است، قانون جریان در نظر گرفته نمی شود. روش تحلیل حدی بر پایه ی اصل کار مجازی و فرض قانون جریان وابسته استوار بوده و شامل دو شیوه ی «مرز بالا» و «مرز پایین» است. مرحله ی اول در روش های تعادل حدی و تحلیل حدی مرز بالا، انتخاب یک

الگوی گسیختگی برای توده ی خاک تحت بار است. این الگوی گسیختگی (مکانیسم گسیختگی) باید تا حد امکان به واقعیت نزدیک باشد. البته تفاوت اساسی بین دو روش مذکور این است که در روش تحلیل حدی مرز بالا «قانون جریان خمیری وابسته» یا به عبارت دیگر، رابطه ی بین تانسور تنش و تانسور نمو کرنش خمیری منظور می شود. این موضوع ضمن ارتقاء دقت نسبی روش، در تعریف مکانیسم های گسیختگی قابل قبول شرط جدیدی را وارد می سازد: مکانیسم گسیختگی باید طوری تعریف شود که در هر نقطه از سطح گسیختگی، بردار سرعت نسبی بین دو بلوک صلب مجاور، زاویه یی برابر با زاویه ی اصطکاک داخلی خاک با این سطح بسازد. مکانیسم های گسیختگی که در این دو روش به کار برده می شوند، اغلب متشکل از یک یا چند بلوک صلب اند که به وسیله ی مرزهای گسیختگی مستوی در حرکت انتقالی، و غیرمستوی در حرکت دورانی از همدیگر و نیز از بقیه ی توده خاک

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۷/۳۰، اصلاحیه ۱۳۸۸/۲/۱۳، پذیرش ۱۳۸۹/۱۰/۱۸.

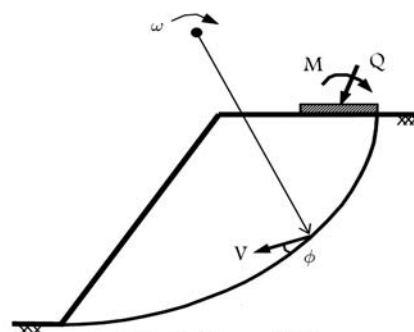
روش مرز بالا، موجب به دست آمدن جواب‌های بسیار بیشتر از جواب‌های تجربی می‌شود. محدودیت‌های یادشده را می‌توان در دو گروه طبقه‌بندی کرد:

الف) در صورت استفاده از یک مکانیسم انتقالی متشکل از گوه‌های صلب در مسائل تعیین ظرفیت باربری، بار خارجی در لحظه‌ی گسیختگی فقط می‌تواند حرکت انتقالی داشته باشد و نمی‌توان اثر لنگر ناشی از خروج از محوریت بار شالوده را در نظر گرفت. از طرف دیگر استفاده از یک بلوک با سطح گسیختگی ماریچ لگاریتمی در بیشتر موارد، به‌ویژه در مسائل تعیین ظرفیت باربری، فرضی دور از واقعیت بوده و جواب‌های بسیار دست‌بالایی را در پی خواهد داشت.



الف) مکانیسم انتقالی شامل چند گوه صلب؛

ب) نمی‌توان از مکانیسم‌های انتقالی یا دورانی در برخی حالات عملی که مکانیسم گسیختگی متأثر از وجود شرایط مرزی خاص است استفاده نمود؛ مثلاً در حالتی که شیروانی روی لایه‌ی خاک واقع بر سنگ بستر قرار دارد (شکل ۲ الف) یا در مسئله‌ی تعیین ظرفیت باربری پی‌های واقع بر لایه‌ی خاک متکی بر سنگ بستر (شکل ۲ ب)، مکانیسم گسیختگی از نوع دورانی - انتقالی خواهد بود.



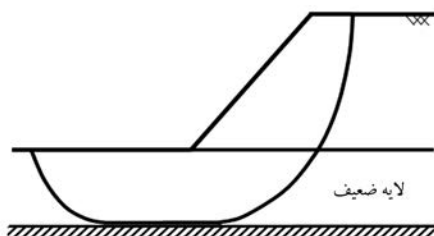
ب) مکانیسم دورانی تک بلوکی.

در نوشتار حاضر با توجه به مبانی روش تحلیل حدی مرز بالا، مکانیسم گسیختگی متشکل از سطوح جدیدی پیشنهاد می‌شود که ترکیب چند بلوک دورانی یا چند بلوک دورانی - انتقالی را ممکن می‌سازد. بدین ترتیب مکانیسم گسیختگی می‌تواند با توجه به نحوه‌ی بارگذاری، دارای یکی از حرکت‌های دورانی، انتقالی، یا هر دو باشد.

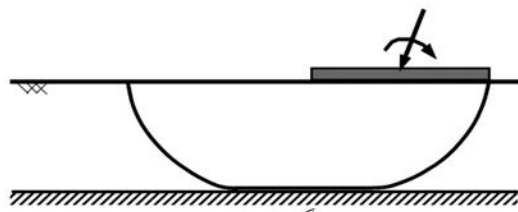
شکل ۱. مکانیسم‌های گسیختگی رایج در بررسی مسائل پایداری.

به‌منظور بررسی کارایی و دقت مکانیسم پیشنهادی، پس از ارائه‌ی فرمول‌بندی آن برای مسائل ظرفیت باربری، مقایسه‌هایی میان نتایج حاصل از این مکانیسم و نتایج روش‌های رایج تعیین ظرفیت باربری در حالات مختلف بارگذاری پی نواری واقع بر زمین مسطح انجام می‌شود. در ادامه، استفاده از این مکانیسم برای تعیین ظرفیت باربری پی واقع بر لایه‌ی خاک با ضخامت محدود تحت بارگذاری مرکب (شکل ۲ ب) بررسی شده و کارایی خاص این مکانیسم نشان داده می‌شود.

جدا می‌شوند. برای مدل‌کردن حرکت دورانی در مسائل دوبعدی (کرنش مسطح) به روش تحلیل حدی مرز بالا، خط لغزش در شرایط زهکشی نشده ( $\phi = 0$ ) لزوماً دایره‌یی و در شرایط زهکشی شده ( $\phi \neq 0$ ) لزوماً ماریچ لگاریتمی خواهد بود. همچنین نتیجه‌ی رعایت شرط سازگاری کرنش‌ها استفاده از مکانیسمی متشکل از چند بلوک دارای حرکت انتقالی (مکانیسم گوه‌یی، نظیر شکل الف) یا مکانیسمی متشکل از یک بلوک با حرکت دورانی (مکانیسم فرضی روش تیلور در زمینه‌ی پایداری شیروانی‌ها، نظیر شکل ب) بوده است. به‌عبارت دیگر، امکان استفاده از چند گوه صلب دورانی یا تلفیق حرکت دورانی و انتقالی گوه‌ها در یک مکانیسم گسیختگی واحد وجود نداشته، و همین نکته محدودیت‌های قابل ملاحظه‌یی را به‌ویژه برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های تحت اثر خروج از محوریت ایجاد می‌کند.



لایه ضعیف  
سنگ بستر صلب  
الف) خاکریز؛



ب) پی تحت اثر بارگذاری مرکب.

شکل ۲. نمونه‌هایی از موارد کاربرد مکانیسم‌های گسیختگی دورانی - انتقالی در مسائل خاص.

تعیین ظرفیت باربری پی‌های نواری تحت بارگذاری مرکب (بار مایل خارج از محور) جزو مسائل پایه‌یی در مهندسی ژئوتکنیک است. نوع بارگذاری در اغلب سازه‌ها به‌نحوی است که شالوده‌ی آنها تحت اثر بارهای قائم، افقی و نیز لنگر قرار می‌گیرد. روش رایج در اغلب تحقیقات صورت‌گرفته در این زمینه استفاده از ضرایب کاهنده‌ی تجربی (یا نیمه‌تجربی) بارگذاری مایل یا خارج از محور است که بر پایه‌ی فرمول پیشنهادی ترزاقی در سال ۱۹۴۳<sup>[۱]</sup> اعمال می‌شود. براین اساس روابط گوناگونی ارائه شده است که از جمله رایج‌ترین آنها می‌توان به روابط مایرهورف<sup>[۲]</sup>، هسن<sup>[۴]</sup> و وسیک<sup>[۵]</sup> اشاره کرد. دقت روابط ارائه‌شده برای پی‌های تحت بارگذاری مرکب نیز توسط برخی از محققین مورد بررسی قرار گرفته است.<sup>[۶-۱۰]</sup>

برای بررسی نظری اثر خروج از محوریت باربری ظرفیت باربری پی نواری، استفاده از مکانیسم‌های دورانی ضروری است. اما نتایج حاصل از تحلیل‌ها حاکی از آن است که استفاده از مکانیسم‌های تک‌بلوکی (با سطح گسیختگی لوگ ماریچ) در

## ۲. مبانی روش تحلیل حدی مرز بالا

روش تحلیل حدی که در قالب «قضایای حدی» مطرح شده است، تعمیم اصل «کار خمیری بیشینه» است که در سال ۱۹۴۸ مطرح شد. در سال ۱۹۵۲ محققین با تعمیم این اصل قضایای حدی را ارائه کردند.<sup>[۱۱] و [۱۲]</sup> فرضیات مورد استفاده در روش تحلیل حدی عبارت‌اند از:

(الف) رفتار مصالح در حالت حدی، خمیری کامل است.

(ب) حالت حدی با تابعی محدب به نام «تابع تسلیم»<sup>(۱)</sup> و به معادله‌ی  $F(\sigma_{ij}) = 0$  بیان می‌شود. نمایش این تابع در فضای تنش‌های اصلی به سطح تسلیم موسوم است.

(ج) رفتار خمیری مصالح تابع قانون جریان وابسته<sup>(۲)</sup> است؛ به عبارت دیگر:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^P = \lambda \frac{\partial F(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}}; \quad \lambda \geq 0 \quad (1)$$

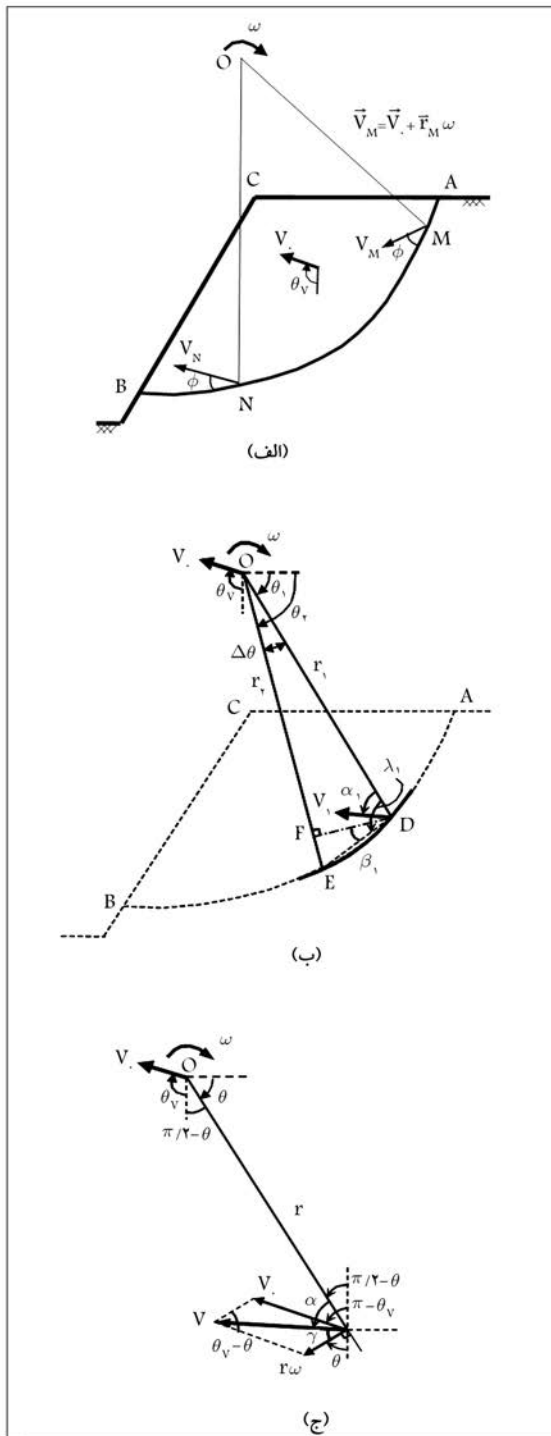
که در آن  $\dot{\epsilon}_{ij}^P$  تانسور نمو یا سرعت تغییر شکل نسبی خمیری،  $\sigma_{ij}$  تانسور تنش، و  $\lambda$  تابعی اسکالر و غیر منفی است. برقراری قانون جریان وابسته در مصالح تابع معیار گسیختگی موهر - کولمب بدان معناست که در لحظه‌ی گسیختگی، بردار نمو کرنش خمیری (بردار سرعت نسبی) در هر نقطه از سطح گسیختگی بر سطح تسلیم عمود است.

در روش تحلیل حدی مرز بالا، با در نظر گرفتن یک میدان سرعت فرضی قابل قبول (از نظر سینماتیکی) و مساوی قراردادن نمو کار نیروهای خارجی و داخلی، بار گسیختگی نهایی محاسبه می‌شود. براساس قضیه‌ی مرز بالا، اگر میدان سرعت در نظر گرفته شده شرایط مرزی سرعت و شرایط سازگاری را ارضا کند، بار محاسبه شده بیش از بار گسیختگی واقعی خواهد بود.

از جمله شرایط مطرح‌شده برای قابل قبول بودن یک میدان سرعت فرضی، برقراری شرط قانون جریان وابسته است؛ بدین معنا که باید در هر نقطه از سطح گسیختگی بردار سرعت نسبی بین بلوک‌ها زاویه‌ی برابر با زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک ( $\phi$ ) با امتداد مماس بر سطح گسیختگی بسازد. به عنوان مثال، در مکانیسم نشان داده شده در شکل ۱ الف، بردار سرعت بلوک اول ( $V_1$ ) با سطح AB و نیز بردار سرعت نسبی بین بلوک‌های ۱ و ۲ (یعنی  $V_{12}$ ) با سطح BH زاویه‌ی  $\phi$  دارد.

## ۳. تعیین معادله‌ی سطوح انتقالی - دورانی

برای تعیین معادله‌ی سطح گسیختگی دارای حرکت‌های دورانی و انتقالی (شکل ۳ الف) مکانیسمی متشکل از یک بلوک صلب ABC که هم‌زمان تحت اثر حرکت دورانی حول نقطه‌ی O (با سرعت دورانی  $\omega$ ) و حرکت انتقالی با سرعت  $V$  قرار دارد، در نظر گرفته می‌شود. شرط اصلی در روش مرز بالا برای قابل قبول بودن مکانیسم گسیختگی (میدان ناپیوستگی سرعت) این است که در تمامی نقاط واقع بر سطوح ناپیوستگی، بردار سرعت نسبی بلوک ( $\vec{V}' + \vec{r}'\omega$ ) با مماس بر سطح، زاویه‌ی برابر با زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک ( $\phi$ ) داشته باشد. با توجه به این شرط معادله‌ی سطح گسیختگی AB به دست می‌آید. بدین منظور، دو نقطه‌ی دلخواه D و E واقع بر سطح AB و با فاصله‌ی اندک از یکدیگر فرض می‌شوند (شکل ۳ ب). مختصات این نقاط در سیستم قطبی با مرکز O به ترتیب  $(r_1, \theta_1)$  و  $(r_2, \theta_2)$  خواهد بود. با این فرضیات،  $\alpha_1$  زاویه‌ی میان بردار سرعت بلوک ABC در نقطه‌ی D (یعنی  $V_1$ ) و شعاع OD،  $\beta_1$  زاویه‌ی میان قطاع DE و خط DF، و  $\lambda_1$  زاویه‌ی



شکل ۳. تعیین معادله‌ی سطوح دارای حرکت‌های دورانی و انتقالی هم‌زمان.

میان شعاع OD و قطاع DE است. با توجه به شرایط هندسی مسئله در حالت دیرانسلیبی و با در نظر گرفتن مثلث‌های ODE و DEF می‌توان نوشت:

$$\beta_1 = \lambda_1 - (\pi/2 - \Delta\theta) \quad (2)$$

$$DF = r_1 \sin \Delta\theta \quad (3)$$

$$EF = DF \tan \beta \quad (4)$$

بنابراین:

$$EF = (r_1 \sin \Delta \theta) \operatorname{tg}(\lambda + \Delta \theta - \pi/2) \quad (5)$$

در حالت حدی که  $\Delta \theta$  به سمت صفر میل می‌کند، پاره خط ED در نقطه‌ی D بر سطح گسیختگی مماس است و با بردار  $V_1$  زاویه‌ی  $\phi$  می‌سازد. همچنین پاره‌خط EF به سمت dr میل می‌کند. بدین ترتیب می‌توان نوشت:

$$\lambda_1 = \alpha_1 + \phi \quad (6)$$

$$dr = (r_1 d\theta) \operatorname{tg}(\alpha_1 + \phi - \pi/2) \quad (7)$$

که در آن زاویه‌ی  $\alpha_1$  مجهول است و باید براساس پارامترهای مسئله به دست آید. بدین منظور نقطه‌ی دلخواه روی سطح گسیختگی انتخاب شده و زاویه‌ی میان بردار سرعت دورانی  $r\omega$  و بردار سرعت برآیند V در این نقطه (شکل ۳ ج) برابر  $\gamma$  فرض می‌شود:

$$\gamma = \pi/2 - \alpha \quad (8)$$

$$\vec{V}_1 \wedge \vec{r}\omega = \theta_V - \theta \quad (9)$$

$$\operatorname{Sin} \gamma = (V_1/V) \operatorname{Sin} |\theta_V - \theta| \quad (10)$$

در نتیجه:

$$\alpha = \operatorname{ArcCos} [(V_1/V) \operatorname{Sin} |\theta_V - \theta|] \quad (11)$$

که

$$V = \sqrt{V_1^2 + (r\omega)^2 + 2r\omega V_1 \operatorname{Cos}(\theta_V - \theta)} \quad (12)$$

با استفاده از روابط فوق، معادله‌ی دیفرانسیل مربوط به سطح مورد نظر به دست می‌آید:

$$\frac{dr}{r} = \operatorname{tg}[(\alpha - \pi/2) + \phi] \cdot d\theta \quad (13)$$

که در آن:

$$\alpha = \operatorname{ArcCos} \left[ \frac{V_1}{\sqrt{V_1^2 + (r\omega)^2 + 2r\omega V_1 \operatorname{Cos}(\theta_V - \theta)}} \cdot \operatorname{Sin}(\theta_V - \theta) \right] \quad (14)$$

با توجه به پیچیدگی معادله‌ی حاصل، امکان حل صریح آن به صورت تحلیلی و تعیین معادله‌ی سطح مورد نظر وجود ندارد، و به منظور حل آن در این تحقیق استفاده از روش‌های عددی ضرورت می‌یابد. در حالت خاص مکانیسم دورانی (سرعت انتقالی برابر با صفر،  $V_1 = 0$ ) داریم:

$$\frac{dr}{r} = \operatorname{tg}(\phi) \cdot d\theta \quad (15)$$

$$r = r_0 \cdot e^{\theta \cdot \operatorname{tg}(\phi)} \quad (16)$$

رابطه‌ی ۱۶ معادله‌ی سطح معروف لوگ ماریچ است. در دیگر حالت خاص، اگر مکانیسم دارای سرعت انتقالی  $(V_1)$  و سرعت دورانی صفر ( $\omega = 0$ ) فرض شود، رابطه‌ی ۱۷ به دست می‌آید. این رابطه، معادله‌ی سطحی مستوی است که با بردار سرعت انتقالی  $V_1$  زاویه‌ی  $\phi$  می‌سازد.

$$r = c_0 / \operatorname{Cos}(\theta - \theta_V + \phi) \quad (17)$$

لازم به ذکر است که اگرچه می‌توان ترکیب حرکت‌های دورانی و انتقالی را معادل با یک حرکت دورانی حول نقطه‌ی دیگری در نظر گرفت، اما فرض سرعت‌های انتقالی و دورانی، امکان داشتن بلوک‌هایی با حرکت صرفاً انتقالی و نیز ترکیب بلوک‌های انتقالی و دورانی را در صورت لزوم میسر می‌سازد.

#### ۴. استفاده از سطوح گسیختگی پیشنهادی در مسائل

##### تعیین ظرفیت باربری

از مهم‌ترین محدودیت‌های موجود در کاربرد مکانیسم‌های لغزش دورانی در مسائل تعیین ظرفیت باربری به‌روش مرز بالا، نرخ کم جمع‌شدگی آنها در خاک‌های دارای زاویه‌ی اصطکاک داخلی است که موجب افزایش مقدار جواب‌های مرز بالا و به عبارتی دورشدن جواب‌های مرز بالا از جواب واقعی می‌شود. با افزایش تعداد بلوک‌های تشکیل‌دهنده‌ی مکانیسم لغزش، انعطاف‌پذیری آن بیشتر شده و امکان جمع‌شدن مکانیسم گسیختگی فراهم می‌آید. به این ترتیب شکل مکانیسم گسیختگی به واقعیت نزدیک‌تر، و جواب‌های حاصل نیز به مقدار حقیقی نزدیک‌تر می‌شوند.

در شکل ۴ الف مکانیسم گسیختگی فرضی متشکل از سه بلوک صلب نشان داده شده است. هر بلوک دارای حرکت دورانی با سرعت  $\omega_i$  حول مرکز دوران مربوطه و حرکت انتقالی با سرعت  $V_i$  در نظر گرفته می‌شود. تعیین سطح کف هر بلوک با توجه به سرعت‌های متناظر و با استفاده از روابط ارائه شده در بخش قبل امکان‌پذیر است. سطوح بین بلوک‌ها نیز با توجه به فرضیات مورد استفاده در این روش و محدودیت‌های میدان سرعت مشخص می‌شوند. مثلاً در نقطه‌ی فرضی P روی سطح بین بلوک‌های ۱ و ۲ (شکل ۴ ب) داریم:

$$\vec{V}_{12} = \vec{V}_2 - \vec{V}_1 \quad (18)$$

$$\vec{V}_{12} = (y_1 \omega_1 - y_2 \omega_2 + V_{01} \cdot \operatorname{Cos} \theta_{V1} - V_{02} \cdot \operatorname{Cos} \theta_{V2}) \hat{i} - (x_1 \omega_1 - x_2 \omega_2 + V_{01} \cdot \operatorname{Sin} \theta_{V1} - V_{02} \cdot \operatorname{Sin} \theta_{V2}) \hat{j} \quad (19)$$

$$\vec{T} = dX \hat{i} + dY \hat{j} \quad (20)$$

$$\vec{T} \cdot \vec{V}_{12} = |\vec{T}| \cdot |\vec{V}_{12}| \cdot \operatorname{Cos}(\varphi) \quad (21)$$

$$x_1 = X + x_{01}, \quad (22)$$

$$x_2 = X + x_{02} \quad (23)$$

$$y_1 = Y + y_{01}, \quad (24)$$

$$y_2 = Y - y_{02} \quad (25)$$

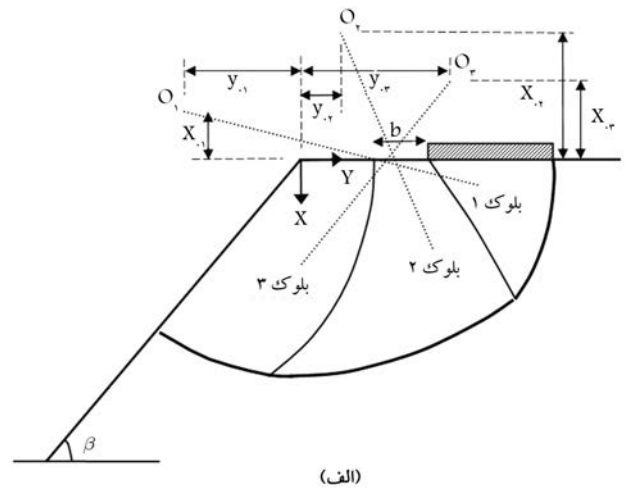
با استفاده از رابطه‌های داده شده و در نظر گرفتن فرض اصلی (رابطه‌ی ۲۰)، معادله‌ی دیفرانسیل متناظر با سطح میانی به دست می‌آید که با استفاده از روش‌های عددی محاسبه می‌شود. البته یادآور می‌شود که هنگام تشکیل سطح گسیختگی میان هر دو بلوک (به صورت گام به گام)، همواره شرایط لازم برای بردار سرعت نسبی بین دو بلوک کنترل می‌شود.

تعیین ظرفیت باربری پی‌های نواری تحت اثر بارگذاری مرکب، با فرض مکانیسمی متشکل از سه بلوک دارای حرکت‌های دورانی و انتقالی مجزا امکان‌پذیر است. بدین منظور در این تحقیق برنامه‌ی مبتنی بر نظریه‌ی تحلیل حدی مرز بالا و الگوریتم پیشنهادی تهیه شده است. این برنامه در سه بخش اصلی تدوین شده است: تشکیل مکانیسم گسیختگی، تعیین ظرفیت باربری حدی متناظر با هر مکانیسم فرضی، و

بلوک‌های ۱ و ۲) به دست می‌آید. با ادامه‌ی این روند، مختصات نقطه‌ی E، یعنی محل تقاطع دو منحنی مذکور، محاسبه می‌شود.

ب) تشکیل بلوک دوم. تعیین هندسه‌ی این بلوک نیز مشابه با بلوک اول صورت می‌گیرد. منحنی کف این بلوک (منحنی EF) از نقطه‌ی E شروع شده و براساس متغیرهای این بلوک تعیین می‌شود. هم‌زمان منحنی مرز میان بلوک‌های ۲ و ۳ نیز با استفاده از روابط ۱۸ تا ۲۴، و براساس متغیرهای بلوک‌های ۲ و ۳ و نیز متغیر b تعیین می‌شود. بدین ترتیب محل تقاطع دو منحنی مذکور (نقطه F) مشخص می‌شود.

ج) تشکیل بلوک سوم. هندسه‌ی کف این بلوک (منحنی FG) نیز با توجه به متغیرهای این بلوک از نقطه‌ی F تا محل تقاطع با سطح شیروانی (نقطه G) به دست می‌آید.



### ۶. ظرفیت باربری متناظر با مکانیسم گسیختگی فرضی

برای تعیین بار حدی ( $Q_u$ ) وارد بر پی در روش مرز بالا، محاسبه‌ی توان نیروهای داخلی و خارجی در لحظه‌ی گسیختگی (با توجه به میدان ناپیوستگی سرعت فرضی) ضرورت می‌یابد. توان نیروهای داخلی ناشی از مقاومت برشی خاک روی سطوح گسیختگی (سطوح کف بلوک‌ها و سطوح میانی) با استفاده از رابطه‌ی ۲۵ قابل محاسبه است:

$$U_i = C \cos \varphi \cdot \left[ \sum_{i=1}^3 \int c_s (V_i)_s ds + \sum_{j=1}^2 \int c_s (V_{j,j+1})_s ds \right] \quad (25)$$

که در آن  $c_s$  ضریب چسبندگی خاک در عمق متناظر با جزء سطح  $s$ ام،  $(V_i)_s$  مقدار سرعت جزء سطح  $s$ ام واقع بر سطح کف بلوک  $i$ ام،  $ds$  جزء سطح و  $(V_{j,j+1})_s$  مقدار سرعت نسبی مربوط به جزء سطح  $s$ ام واقع در سطح مشترک بلوک‌های  $j$  و  $j+1$  زام است.

نیروهای خارجی نیز شامل وزن خاک و نیروی وارد بر پی واقع بر شیروانی هستند. توان نیروی وزن با استفاده از رابطه‌ی ۲۶، و توان بار حدی پی با استفاده از رابطه‌ی ۲۷ تعیین می‌شود.

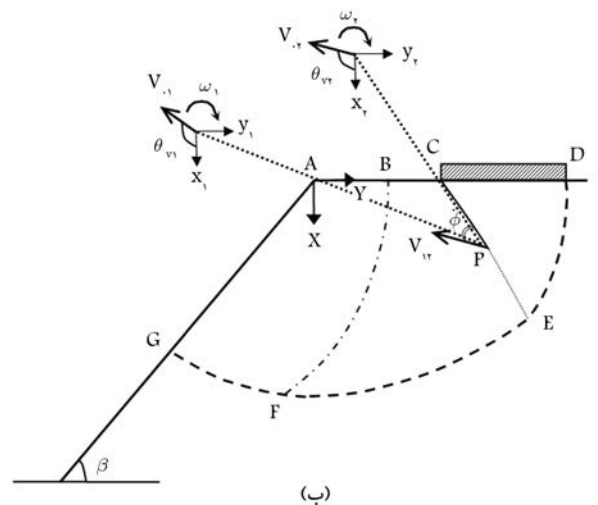
$$U_w = \sum_{i=1}^3 \int \gamma_v (V_{vi})_v dv \quad (26)$$

$$U_Q = Q \cdot \{ \omega_1 [(y_{o1} + a + B/2 + e) \cdot \cos \alpha + x_{o1} \cdot \sin \alpha] + V_{o1} [\cos \theta_{V1} \cos \alpha + \sin \theta_{V1} \sin \alpha] \} \quad (27)$$

در روابط یادشده،  $\gamma_v$  وزن مخصوص خاک در عمق متناظر با جزء حجم  $v$ ام و  $(V_{vi})_v$  مؤلفه‌ی قائم سرعت جزء حجم  $v$ ام واقع در بلوک  $i$ ام است. سایر پارامترهای مورد استفاده در روابط فوق در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.

با استفاده از روابط ۲۵ تا ۲۷ و اصل تساوی توان نیروهای داخلی و خارجی، بار حدی متناظر با مکانیسم گسیختگی فرضی محاسبه می‌شود (رابطه‌ی ۲۸).

$$U_i = U_w + U_Q \quad (28)$$



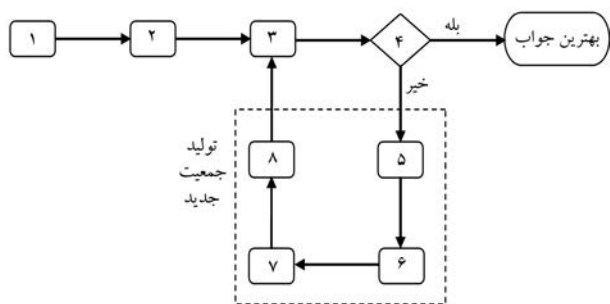
شکل ۴. پارامترهای مورد استفاده در تعیین معادله‌ی سطوح مکانیسم سه‌بلوکی دارای حرکت دورانی و انتقالی.

بهینه‌سازی مکانیسم برای دست‌یابی به ظرفیت باربری کمینه متناظر با ضعیف‌ترین مکانیسم گسیختگی.

### ۵. تشکیل مکانیسم گسیختگی فرضی

مکانیسم گسیختگی با فرض مقدار متغیرهای نشان داده شده در شکل ۴ تشکیل می‌شود. این متغیرها شامل مختصات مراکز دوران بلوک‌ها  $(y_{o1}, x_{o2}, y_{o2}, x_{o2}, y_{o3}, x_{o3})$ ، سرعت‌های دورانی و انتقالی متناظر با هر بلوک  $(\omega_1, \theta_{V1}, \omega_2, V_{o2}, \omega_3, V_{o3}, \theta_{V3})$ ،  $(\omega_1)$  و نقطه‌ی شروع مرز میان بلوک‌های دوم و سوم (b) هستند. مراحل مختلف تشکیل مکانیسم گسیختگی، با توجه به شکل ۴ ب، عبارت است از:

الف) تشکیل بلوک اول. هندسه‌ی کف این بلوک (منحنی DE) براساس رابطه‌های ۱۳ و ۱۴، با شروع از نقطه‌ی D (براساس متغیرهای این بلوک) تعیین می‌شود. هم‌زمان مختصات نقاط واقع بر فصل مشترک این بلوک و بلوک شماره ۲ نیز با استفاده از رابطه‌های ۱۸ تا ۲۴، با شروع از نقطه‌ی C (براساس متغیرهای



شکل ۵. فلوچارت مراحل اصلی مورد استفاده در الگوریتم‌های ژنتیک.

### ۱.۱.۷. کدگذاری

به منظور شبیه‌سازی متغیرها با ژن‌های مورد بحث در علم وراثت، غالباً الگوریتم ژنتیک متغیرها را به صورت رشته‌های دودویی درمی‌آورد. اما خصوصیات مطلوب الگوریتم ژنتیک صرفاً وابسته به تبدیل متغیرها به رشته‌های دودویی نیست، و این الگوریتم قابلیت در نظر گرفتن متغیرها به صورت اعداد واقعی را نیز دارد. به چند دلیل در تحقیق حاضر استفاده از روش مذکور بر روش دودویی برتری داشته است از جمله: ۱. استفاده از دامنه‌های جست‌وجوی وسیع‌تر حتی بازه‌هایی با محدوده‌ی نامعلوم، بدون کاهش دقت محاسبات میسر می‌شود؛ ۲. نمایش متغیرها به صورت اعداد طبیعی استفاده از خاصیت تدریجی بودن تابع در این بازه را ممکن می‌سازد و از این طریق الگوریتم را در بهینه‌سازی متغیرها به صورت محلی توانمند می‌سازد -- که این امتیازی ویژه است. ۳. به فرمول‌بندی طبیعی اغلب مسائل نزدیک است و به مراحل کدگذاری و رمزگشایی معمول در روش الگوریتم ژنتیک نیازی ندارد. در تحقیق حاضر، با توجه به شرایط مسئله، مجموعه‌ی ۱۶ عضوی از اعداد حقیقی به صورت یک بردار (کروموزوم) در نظر گرفته شده‌اند.

### ۲.۱.۷. ایجاد جمعیت اولیه

قبل از آغاز بهینه‌یابی جواب‌ها (تولید نسل)، باید جمعیت اولیه‌ی از جواب‌ها (نسل اول) وجود داشته باشد. در تحلیل‌های انجام‌شده، تعداد اعضا در هر نسل برابر ۱۸ تا ۲۴ در نظر گرفته شده است. تولید جمعیت اولیه با توجه به محدودیت‌های هر متغیر و بازه کاربرد آن، به صورت تصادفی در بازه‌های مختلف صورت می‌گیرد.

### ۳.۱.۷. ارزیابی جواب‌ها براساس تابع هدف

ارزش هر کروموزوم یا مجموعه‌ی متغیرها با توجه به مقدار تابع هدف متناظر با آن ارزیابی می‌شود. در این تحقیق هدف از بهینه‌یابی، یافتن کوچک‌ترین جواب مرز بالا (ظرفیت باربری) است. اما از آنجا که در مسائل رایج بهینه‌یابی به روش الگوریتم ژنتیک، هدف تعیین مقدار بیشینه‌ی یک تابع است، در تحقیق حاضر نیز تابع هدف، معکوس ظرفیت باربری در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که در این مرحله محدودیت‌های خاص مسئله کنترل شده و چنانچه هریک از متغیرهای مربوط به کروموزوم انتخابی شرایط مورد نظر را نداشته باشند، مقدار تابع هدف متناظر با این کروموزوم نزدیک به صفر انتخاب می‌شود و احتمال حذف آن در نسل‌های بعدی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر کروموزوم‌های غیر شایسته جریمه می‌شوند.

### ۴.۱.۷. معیار کفایت بهینه‌سازی

پس از ارزیابی شایستگی جواب‌ها و قبل از ورود به چرخه تولید نسل بعدی، کفایت بهینه‌سازی با توجه به معیار در نظر گرفته شده کنترل می‌شود و در صورت عدم ارضای شرایط مورد نظر، فرایند بهینه‌یابی ادامه می‌یابد. در برنامه‌ی تدوین شده در

## ۷. تعیین مکانیسم گسیختگی بحرانی

چنان که اشاره شد، شکل مکانیسم گسیختگی پیشنهادی و در نتیجه ظرفیت باربری پی، تابعی از ۱۶ متغیر است. تعیین بحرانی‌ترین مکانیسم گسیختگی متناظر با حداقل ظرفیت باربری، بخش نهایی الگوریتم پیشنهادی را تشکیل می‌دهد. بیشتر روش‌های تعیین سطح لغزش بحرانی در مسائل تحلیل پایداری شیروانی‌ها مبتنی هستند بر روش‌های رایج بهینه‌سازی غیرخطی یا روش‌های سعی و خطا. عیب این روش‌ها عدم قطعیت در تعیین مقدار بهینه‌ی مطلق تابع و احتمال دست‌یابی به مقدار بهینه‌ی نسبی است. به‌ویژه در شرایطی که مسئله پیچیده‌تر شده و تعداد متغیرها افزایش می‌یابد، نقص اینگونه روش‌ها بیشتر ملموس است و استفاده از روش‌های نوین از کارآمدی بیشتری برخوردار خواهد بود.

در دهه‌های اخیر روش جایگزین مبتنی بر الگوریتم ژنتیک (GA) ارائه شده و در مسائل بهینه‌یابی از آنها استفاده شده است؛ اصول پایه‌ی این روش توسط هولند ارائه شده است.<sup>[۱۳]</sup> استفاده از الگوریتم ژنتیک حتی در تحلیل دوبعدی پایداری شیروانی‌ها نیز موضوعی جدید به شمار می‌رود و از آغاز پژوهش‌ها در این باب بیش از یک دهه نمی‌گذرد.

الگوریتم ژنتیک ذاتاً در یافتن پاسخ‌های نزدیک به مقدار بهینه بسیار خوب عمل می‌کند، اما از آنجا که در رسیدن به مقدار بهینه‌ی موضعی که شاید تفاوت بسیار کمی با پاسخ یافته‌شده داشته باشد ناتوان است، توانایی مقایسه‌ی منطقی بین حوزه‌های جواب را در محیط‌هایی با حوزه‌های جواب متفاوت و مقدار مطلوبیت نزدیک به هم، از دست می‌دهد. برای یافتن پاسخ‌های بهینه‌ی محلی می‌توان از روش‌های مبتنی بر سعی و خطا در یک حوزه‌ی مشخص از جواب‌ها استفاده کرد. ایجاد ترکیبی بین توانایی‌های جست‌وجوی سراسری و جست‌وجوی محلی منجر به تشکیل الگوریتمی قدرتمند می‌شود. لذا در تحقیق حاضر از ترکیب دو روش الگوریتم ژنتیک و سعی و خطای محلی استفاده شده است. در ادامه، به اصول کلی روش‌های مورد استفاده اشاره می‌شود.

## ۱.۱.۷. الگوریتم ژنتیک

در این روش هر متغیر به صورت یک ژن، و مجموعه‌ی از متغیرها به‌عنوان یک کروموزوم (فرد) در نظر گرفته می‌شوند. در بهینه‌یابی به روش الگوریتم ژنتیک، مجموعه‌ی از افراد (کروموزوم‌ها) به‌عنوان یک نسل در نظر گرفته شده و با الگو گرفتن از قوانین موجود در علم وراثت و استفاده از فرایندهای آماری، به تولید فرزندان با ویژگی‌های بهتر (جواب‌های بهتر مسئله) برای نسل بعدی پرداخته می‌شود. طبق فلوچارت نشان داده شده در شکل ۵، مراحل اصلی الگوریتم ژنتیک عبارت است از:

۱. کدگذاری<sup>۳</sup> به منظور تعریف متغیرها؛

۲. ایجاد جمعیت اولیه به‌عنوان اولین نسل از جواب‌ها؛

۳. ارزیابی جواب‌ها براساس تابع هدف و بررسی میزان برازندگی<sup>۴</sup> آنها؛

۴. کنترل معیار کفایت بهینه‌سازی؛

۵. انتخاب<sup>۵</sup> برخی از جواب‌ها به‌عنوان والدین؛

۶. ترکیب<sup>۶</sup> جواب‌ها؛

۷. جهش<sup>۷</sup>؛

۸. تزیق<sup>۸</sup>.

که در آن  $a_i$  عددی حقیقی است که به صورت تصادفی و کاملاً مستقل برای هر ژن  $(Var)$  در محدوده  $(۱/۲۰ و ۰/۲۰)$  انتخاب می‌شود.

لازم به ذکر است که در این تحقیق، فقط ۵۰ درصد کروموزوم‌های هر نسل از ترکیب والدین منتخب نسل قبلی به وجود می‌آیند. از باقی‌مانده‌ی کروموزوم‌ها نیمی به روش جهش و نیمی با تزریق جواب‌های مطلوب نسل قبلی تولید می‌شوند.

#### ۷.۱.۷. جهش

در علم وراثت پدیده‌ی به نام جهش ژنتیکی وجود دارد که طی آن، با ایجاد تغییری خارج از روند معمول در یک کروموزوم، کروموزوم جدیدی تولید می‌شود که ممکن است نسبت به کروموزوم اولیه از مطلوبیت بیشتری برخوردار باشد. این پدیده در بهینه‌یابی به روش الگوریتم ژنتیک نیز شبیه‌سازی شده است. کارایی و مزیت اصلی ایجاد جهش در جواب‌ها، که غالباً پس از ترکیب برخی اعضا صورت می‌گیرد، امکان دستیابی به جواب‌های خارج از حوزه‌ی دیگر جواب‌ها و کاهش احتمال دست‌یابی به یک جواب بهینه‌ی نسبی به جای مقدار بهینه‌ی مطلق است.

در این تحقیق ایجاد جهش در جواب‌ها با اضافه یا کم کردن یک مقدار تصادفی به برخی متغیرهای تشکیل‌دهنده‌ی یک جواب صورت می‌گیرد.

#### ۸.۱.۷. تزریق

به منظور افزایش کارایی الگوریتم ژنتیک، لازم است برخی از بهترین کروموزوم‌ها برای بقا در نسل بعد حفظ شوند. در این تحقیق ۲۵ درصد جمعیت اولیه که بیشترین برابری را دارند، بدون تغییر به نسل جدید منتقل می‌شوند.

#### ۲.۷. سیستم پویش محلی

پس از تولید جمعیت جدید در هر نسل، نوبت به دخالت روند ترکیبی پویش محلی می‌رسد. بدین منظور کروموزوم دارای مطلوبیت بالاتر انتخاب شده و نواحی اطراف آن به صورت محلی و با دقت بیشتری مورد واریسی قرار می‌گیرد. در نتیجه، اگر سطح لغزشی متناظر با ظرفیت باربری کم‌تر در اطراف این کروموزوم یافت شود، با آن جابجا می‌شود و بهبود موضعی در مقدار مطلوبیت حاصل می‌شود.

پویش محلی در هر مرحله با استفاده از ترکیب زیر برنامه‌هایی صورت می‌گیرد که هر یک مختص بهینه‌سازی یک متغیرند. با این فرض که مقدار اولیه‌ی پارامتر  $\Delta$  برابر  $0/۶۴$  باشد و نیز با استفاده از زیر برنامه‌ی مرتبط، از مقدار اولیه‌ی متغیر یک‌بار به اندازه‌ی  $\Delta$  کاسته و یک‌بار به آن اضافه می‌شود؛ جواب بهتر از میان سه حالت مورد بررسی انتخاب می‌شود. در صورت بهبود نسبی جواب، این مرحله مجدداً تکرار می‌شود و در غیر این صورت مقدار  $\Delta$  نصف  $(\pm\Delta/۲)$ ، و سعی و خطا تکرار می‌شود. البته بهینه‌سازی هر متغیر ممکن است با دیگر متغیرها مرتبط باشد. لذا، در مواردی از زیر برنامه‌های یادشده به صورت هم‌زمان و به شکل ترکیبی استفاده می‌شود.

#### ۳.۷. بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک مورد استفاده

به منظور بررسی کارایی این الگوریتم و انتخاب مقادیر مناسب برای برخی پارامترهای مرتبط، از قبیل تعداد تولید نسل‌های لازم و تعداد جمعیت مناسب در هر نسل  $(Np)$ ، با در نظر گرفتن نمونه‌هایی از مسائل ظرفیت باربری، تحلیل‌های پارامتری انجام شد. این تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار تدوین شده در محیط ویژوال بیسیک صورت گرفته‌اند. در شکل ۶ تأثیر میزان جمعیت هر نسل  $(Np)$  بر روند بهینه‌یابی و سرعت رسیدن به جواب بهینه برای مسئله‌ی نمونه‌ی تعیین ظرفیت باربری نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش پارامتر  $Np$  در روند رسیدن به جواب

تحقیق حاضر، بیشترین نسل‌های ایجادشونده به عنوان ورودی برنامه تعریف شده و برنامه‌ی پس از تولید ۵۰ نسل اول، قبل از شروع هر چرخه‌ی تولید مثل، بهینه‌شدن جواب‌ها را نسبت به جواب‌های ۵۰ نسل قبلی کنترل می‌کند. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، چنانچه جواب بهینه نسبت به ۵۰ نسل قبلی بهبودی نداشته باشد، روند بهینه‌سازی متوقف می‌شود. بیشینه نسل‌های ایجادشده به تعداد ۲۰۰ نسل در نظر گرفته شده است.

#### ۵.۱.۷. انتخاب

در صورت لزوم ادامه‌ی چرخه‌ی تولید مثل، با توجه به ارزش و شایستگی کروموزوم‌های نسل قبلی و به کمک قوانین احتمالاتی، کروموزوم‌های برتر به عنوان والدین انتخاب شده و در مرحله‌ی بعد، طی عملگرهای ترکیب و جهش، بخشی از نسل جدید را تولید می‌کنند. ابتدا باید با توجه به مقدار تابع هدف متناظر با هر جواب در مقایسه با سایر جواب‌ها، برابری آن جواب مشخص و احتمال انتخاب آن محاسبه شود. بدین منظور تعاریف مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند که از جمله می‌توان به پارامتر SP اشاره کرد. مقدار این پارامتر همواره بزرگ‌تر از ۱ بوده و با انتخاب مقدار بزرگ‌تر برای آن احتمال انتخاب جواب‌های متناظر با تابع هدف بهتر، بیشتر خواهد بود. در تحقیق حاضر مقدار این پارامتر برابر با ۱/۹ در نظر گرفته شده است. به منظور تعیین مطلوبیت جواب‌ها غالباً از رتبه‌بندی جواب‌ها به دو روش خطی و غیر خطی استفاده می‌شود. در روش رتبه‌بندی خطی (مورد استفاده در تحقیق حاضر) ابتدا جواب‌ها بر حسب مقدار مطلق تابع هدف (به ترتیب صعودی) مرتب شده و موقعیت هر جواب به صورت عددی طبیعی بین ۱ تا  $Np$  (جمعیت هر نسل) فرض می‌شود. به عبارت دیگر، موقعیت  $(Pos)$  متناظر با بهترین جواب  $Np$  خواهد بود. سپس برابری هر جواب با استفاده از رابطه‌ی ۲۹ محاسبه می‌شود:

$$Fitness(Pos) = 2 - SP + 2(SP - 1) \frac{Pos - 1}{Np - 1} \quad (29)$$

مطلوبیت نسبی، و به عبارتی احتمال انتخاب هر جواب برابر خواهد بود با:

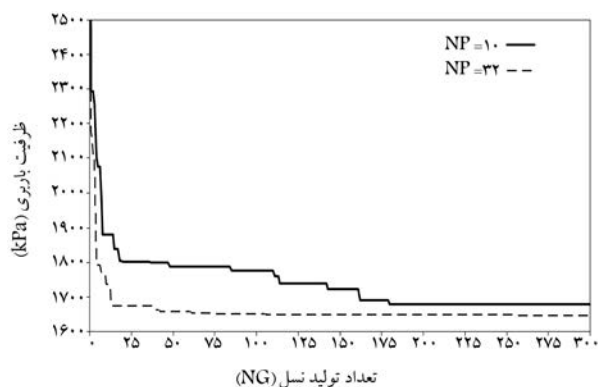
$$Pr ob(Pos) = \frac{Fitness(Pos)}{\sum_{j=1}^{Np} Fitness(j)} \quad (30)$$

با تعیین احتمال انتخاب هر جواب، از روش چرخ گردان<sup>۹</sup> برای انتخاب تعدادی از اعضا به عنوان والدین استفاده شده است. در این روش هر جواب یا کروموزوم حاضر در جمعیت، قطعی از چرخ گردان را تشکیل می‌دهد. البته مساحت این قطعه‌ها متناظر با احتمال انتخاب جواب است.

#### ۶.۱.۷. ترکیب یا تزویج

به منظور ایجاد کروموزوم‌های بهبودیافته در نسل جدید، کروموزوم‌های با مطلوبیت بیشتر که در گام قبلی انتخاب شده‌اند به عنوان والدین فرض شده و از ترکیب آنها کروموزوم‌های جدید متولد می‌شوند. با توجه به نوع کدگذاری مورد استفاده، روش‌های مختلفی برای ترکیب کروموزوم‌ها در الگوریتم‌های با کدگذاری طبیعی و یا دودویی معرفی شده است. در تحقیق حاضر، با توجه به انتخاب سیستم کدگذاری طبیعی، از روش ترکیب واسطه<sup>۱۰</sup> استفاده شده است. در این روش پس از انتخاب والدین  $(P1)$  و  $(P2)$ ، از ترکیب خطی ژن‌ها و طبق رابطه‌ی ۳۱ به ژن متناظر در کروموزوم جدید دست می‌یابیم:

$$Var_i^{new} = Var_i^{P1} \cdot a_i + Var_i^{P2} \cdot (1 - a_i); \quad i \in \{1, 2, \dots, 16\} \quad (31)$$



شکل ۶. تأثیر میزان جمعیت هر نسل ( $Np$ ) بر روند بهینه‌یابی با استفاده از الگوریتم ژنتیک.

نزدیک‌تر است. برای بررسی میزان بهبود جواب‌های مکانیسم پیشنهادی، نتایج به دست آمده با نتایج مرز بالای حاصل از فرض مکانیسم‌های متشکل از ۳ بلوک چندوجهی دارای انتقال<sup>[۱۲]</sup> و نیز روش مرز بالای مبتنی بر مکانیسم گسیختگی دورانی مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که ضرایب حاصل از فرض مکانیسم دورانی در خاک‌های اصطکاکی بسیار دست بالا بوده و حتی تا ۲ برابر افزایش داشته است. همچنین ضرایب حاصل از فرض مکانیسم پیشنهادی همواره بهتر (کم‌تر) از نتایج مکانیسم‌های دورانی و یا انتقالی (دارای سه بلوک) بوده است. یادآور می‌شود نتایج حاصل برای مکانیسم دورانی دارای سطح لوگ ماریچ، با تدوین برنامه‌ی ساده مبتنی بر روش تحلیل حدی مرز بالا و در جریان همین تحقیق به دست آمده است.

بهینه‌تسریع می‌شود. در هر حال جواب مسئله در نسل‌های کم‌تر از ۲۰۰ به مقدار بهینه نزدیک می‌شود.

## ۲.۸. پی تحت اثر بار محوری مایل

در این بخش نتایج حاصل با نتایج ارائه شده توسط جیاج و همکاران<sup>[۱۰]</sup> که مبتنی بر روش تحلیل حدی است مقایسه می‌شود. لازم به ذکر است که ایشان با استفاده از شیوه‌های پیشرفته‌ی عددی مبتنی بر روش تحلیل حدی، مرزهای بالا و پایین ظرفیت باربری پی نواری تحت بارگذاری مورب را با دقت مناسب (حداکثر ۳ درصد اختلاف) ارائه کرده‌اند، اما نتیجه‌ی در زمینه‌ی پی تحت بار خارج از محور ارائه نکرده‌اند.

در جداول ۲ و ۳ به ترتیب، ضریب ظرفیت باربری ( $N_c$ ) و نسبت ظرفیت باربری ( $q/c$ ) پی نواری واقع بر خاک دارای وزن  $\gamma B/2c = 0.75$  تحت بارگذاری محوری قائم و مایل حاصل از الگوریتم پیشنهادی و مرزهای پایین و بالای حاصل از تحلیل‌های عددی توسط جیاج و همکاران ارائه شده است.

ملاحظه می‌شود که ضرایب مرز بالای حاصل از الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر سه بلوک صلب بسیار نزدیک به نتایج حاصل از کاربرد روش‌های عددی و در برخی موارد، حتی کم‌تر از جواب‌های مرز بالا بوده است که این مطلب مؤید کارایی بالای مکانیسم گسیختگی مورد استفاده است.

## ۸. بررسی نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی

برای بررسی ویژگی‌ها و مزیت‌های مکانیسم گسیختگی پیشنهادی و نتایج حاصل از الگوریتم ارائه‌شده در این تحقیق، ظرفیت باربری پی نواری در سه حالت مورد مقایسه و بحث قرار می‌گیرد: اعمال بار قائم محوری بر پی، اعمال بار محوری مایل بر پی، اعمال بار خارج از محور بر پی.

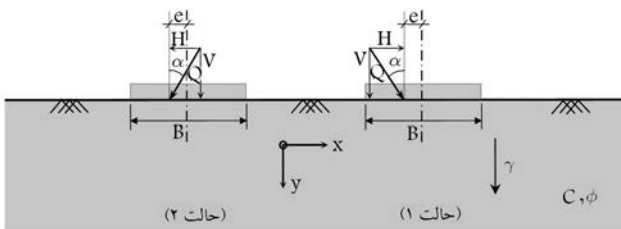
### ۱.۸. پی تحت اثر بار محوری قائم

در جدول ۱ ضرایب ظرفیت باربری ( $N_c, N_q, N_\gamma$ ) حاصل از الگوریتم پیشنهادی با ضرایب پیشنهادی توسط محققین پیشین<sup>[۵] و [۲۰]</sup> مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که با توجه به مرز بالا بودن روش پیشنهادی، نتایج به خصوص در مورد خاک‌های با زاویه اصطکاک کم‌تر از ۴۰ درجه از دقت مناسبی برخوردار بوده و به نتایج وسیک

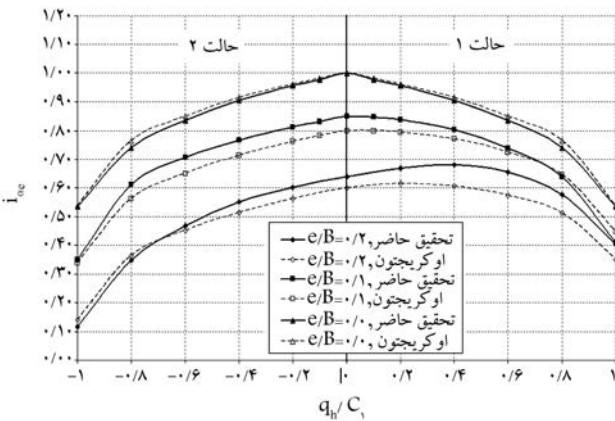
جدول ۱. مقایسه‌ی ضرایب ظرفیت باربری حاصل از روش‌های مختلف با نتایج الگوریتم تحقیق حاضر. (پی نواری تحت بار قائم محوری است.)

$\phi$	N	ترزاقی	مایهوف	وسیک	مکانیسم انتقالی	مکانیسم دورانی	تحقیق حاضر
۰	$N_c$	۵,۷۰	۵,۱۴	۵,۱۴	۵,۲۹	۵,۵۰	۵,۱۷
	$N_q$	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	-	۱,۰۲	۱,۰۰
۱۰	$N_c$	۹,۶	۸,۳۴	۸,۳۴	۸,۷۴	۹,۱۵	۸,۳۸
	$N_q$	۲,۷	۲,۵۰	۲,۵۰	-	۲,۶۰	۲,۵۰
۲۰	$N_\gamma$	۱,۲	۰,۳۷	۱,۲۲	۰,۸۷	۱,۰۵	۰,۸۵
	$N_c$	۱۷,۷	۱۴,۸۳	۱۴,۸۳	۱۵,۹۸	۱۶,۹۷	۱۵,۰
۳۰	$N_q$	۷,۴	۶,۴۰	۶,۴۰	-	۷,۱۷	۶,۵۲
	$N_\gamma$	۵,۰	۲,۸۷	۵,۳۹	۵,۰۱	۸,۰۱	۴,۷۹
۴۰	$N_c$	۳۷,۲	۳۰,۱۴	۳۰,۱۴	۳۴,۲	۳۹,۸	۳۰,۷
	$N_q$	۲۲,۵	۱۸,۴	۱۸,۴	-	۲۲,۱	۱۹,۰
۴۰	$N_\gamma$	۱۹,۷	۱۵,۶۷	۲۲,۴۰	۲۴,۹	۴۱,۸	۲۲,۰
	$N_c$	۹۵,۷	۷۵,۳۱	۷۵,۳۱	۹۴,۸	۹۶,۲	۷۹,۸
۴۰	$N_q$	۸۱,۳	۶۴,۱	۶۴,۱	-	۸۴,۵	۶۹,۷
	$N_\gamma$	۱۰,۰/۴	۹۳,۷۰	۱۰,۹/۴	۱۵۵,۵	۲۵۹	۱۴۰,۰





شکل ۷. پی نواری تحت اثر بار مورب خارج از محور.



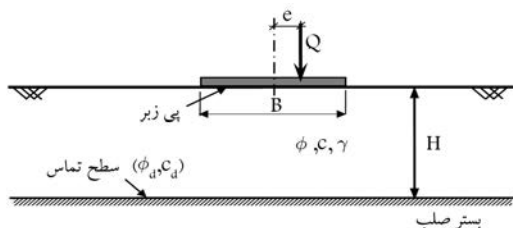
شکل ۸. مقایسه‌ی ضرایب کاهشده  $(i_{e\alpha})$  حاصل از الگوریتم پیشنهادی و تحقیقات قبلی. [۸] (پی نواری تحت اثر بار مایل خارج از محور واقع بر روی خاک چسبنده است).

ارائه شده توسط اوکریجتون در شرایط بارگذاری مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این شکل بیانگر مؤلفه‌ی افقی تنش اعمالی بر پی و  $c$  ضریب چسبندگی خاک است. چنان که مشاهده می‌شود در حالتی که پی صرفاً تحت بارگذاری مایل قرار دارد ( $e/B=0$ ) نتایج تقریباً بر هم منطبق‌اند. در حالت اعمال بار مایل خارج از محور نیز ملاحظه می‌شود که روند تغییرات در شرایط مختلف با یکدیگر هم‌خوانی دارد. در مواردی که پی تحت ممان قابل ملاحظه قرار داشته باشد، نتایج در حالت ۱ تفاوت بیشتری با یکدیگر نشان می‌دهند.

## ۹. کارایی ویژه‌ی مکانیسم پیشنهادی در مسائل خاص

قرارگیری بستر صلب سنگی در اعماق نسبتاً کم (شکل ۹) از جمله موارد کاربردی است که پیچیدگی مسائل تعیین ظرفیت باربری پی‌های سطحی را به دنبال دارد. وجود سنگ بستر در محدوده گسترش مکانیسم گسیختگی زیر پی، سبب محدود شدن عمق مکانیسم و اثرگذاری بر شکل آن خواهد بود.

در عمده تحقیقات صورت‌گرفته تاکنون، سنگ بستر به صورت زبر در نظر گرفته



شکل ۹. پی واقع بر لایه با ضخامت محدود تحت بار خارج از محور.

جدول ۲. مقایسه‌ی ضریب ظرفیت باربری  $N_c$  حاصل از الگوریتم حاضر با نتایج دیگر تحقیقات. [۱۰] (پی نواری تحت اثر بارهای محوری قائم و مایل است).

الگوریتم پیشنهادی	نتایج دیگر تحقیقات [۱۰]		$\phi$ (درجه)	$\alpha$ (درجه)
	U.B.	L.B.		
۶,۴۸	۶,۵۶	۶,۴۷	۵	۰
۱۱,۰۴	۱۱,۱۵	۱۰,۹۰	۱۵	
۳۰,۶۶	۳۰,۸۸	۲۹,۷۴	۳۰	
۷۹,۸۰	۷۷,۲۳	۷۴,۳۵	۴۰	۱۵
۴,۲۹	۴,۳۳	۴,۲۵	۵	
۷,۰۰	۷,۰۴	۶,۹۳	۱۵	
۱۷,۴۸	۱۷,۷۹	۱۷,۲۹	۳۰	
۴۱,۲۰	۴۰,۶۵	۳۸,۹۵	۴۰	

جدول ۳. مقایسه‌ی نسبت ظرفیت باربری  $q/c$  پی واقع بر خاک با  $\gamma B/2c = 0.5$  به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی، با نتایج دیگر تحقیقات. [۱۰] (پی نواری تحت اثر بارهای محوری قائم و مایل است).

الگوریتم پیشنهادی	نتایج دیگر تحقیقات [۱۰]		$\phi$ (درجه)	$\alpha$ (درجه)
	U.B.	L.B.		
۶,۷۶	۶,۷۹	۶,۷۱	۵	۰
۴۴,۰	۴۳,۴۷	۴۲,۱۶	۳۰	
۱۵۷,۰	۱۴۱,۴۹	۱۳۶,۲۹	۴۰	
۲,۰۳	۲,۰۵	۲,۰۴	۵	۳۰
۸,۶۸	۸,۷۷	۸,۶۳	۳۰	
۲۲,۶۵	۲۱,۵۶	۲۰,۹۷	۴۰	

## ۳.۸. پی تحت اثر بار مایل خارج از محور

در روش‌های رایج تعیین ظرفیت باربری، ضرایب نیمه تجربی اعمال اثر میل بار  $(i_e)$  و خروج از محوریت آن  $(i_{e\alpha})$  ارائه شده و در حالت ترکیبی (بار مایل خارج از محور) از حاصل ضرب آنها  $(i_{e\alpha})$  به عنوان عامل کاهشدهی ظرفیت باربری استفاده می‌شود. بنابر این غالباً اختلاف حالت‌های ۱ و ۲ در شکل ۵ در نظر گرفته نشده است.

بررسی‌های انجام شده توسط اوکریجتون و همکاران [۸] در سال ۱۹۹۸ یکی از معدود تحقیقات انجام شده است که در آن اثر میل بار و خروج از محوریت آن به صورت هم‌زمان بررسی شده است. در تحقیق یاد شده ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر خاک‌های چسبنده با استفاده از روش‌های عددی مبتنی بر تحلیل حدی محاسبه شده و با ارائه نمودارهایی، اختلاف ظرفیت باربری پی در حالت‌های مختلف (نشان داده شده در شکل ۷) بررسی شده است. الگوریتم پیشنهادی در تحقیق حاضر دارای این قابلیت است که با در نظر گرفتن فقط سه بلوک می‌توان اثر خروج از محوریت بار مایل را در خاک‌های چسبنده و نیز اصطکاکی مورد بررسی قرار داد. در این بخش به منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی در تعیین ضرایب کاهشدهی خروج از محور بار مایل با در نظر گرفتن جهت آن، مقایسه‌هایی با نتایج حاصل از تحقیقات سال ۱۹۹۸ [۸] صورت گرفته است.

در شکل ۸ ضرایب کاهشده  $(i_{e\alpha})$  حاصل از الگوریتم پیشنهادی و ضرایب

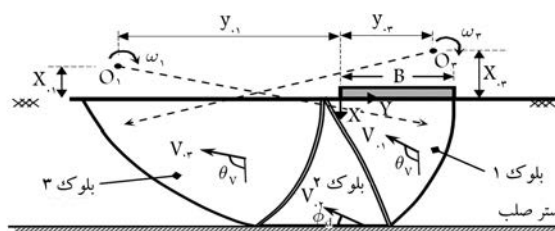
از جمله مزایای مکانیسم پیشنهادی در این نوشتار، کارایی خاص این مکانیسم در بررسی مسئله‌ی یادشده است. به عبارت دیگر، در حالت قرارگیری پی تحت اثر بارگذاری مرکب بر روی لایه‌ی خاک متکی بر سنگ بستر صاف، فقط مکانیسم حاضر دارای قابلیت و کارایی مناسب برای مدل‌کردن سطوح گسیختگی زیر پی خواهد بود. در شکل ۱۰ نمونه‌یی از مکانیسم گسیختگی متشکل از سه بلوک فرضی نشان داده شده است. بلوک‌های اول و سوم دارای ترکیب حرکت‌های دورانی - انتقالی و بلوک دوم فقط دارای حرکت انتقالی در جهت مشخص شده در شکل ۱۰ است. لذا مجموعاً ۱۱ متغیر توسط برنامه بهینه‌یابی می‌شوند.

با استفاده از الگوریتم و برنامه‌ی تهیه‌شده، بررسی اثر عمق و مقاومت برشی سنگ بستر بر ظرفیت باربری شالوده تحت شرایط مختلف بارگذاری در خاک‌های چسبیده و اصطکاکی میسر می‌شود. مثلاً در شکل ۱۱ میزان تأثیر سنگ بستر کاملاً صاف ( $\phi_d = 0^\circ, c_d = 0$ ) بر ظرفیت باربری پی نواری واقع بر خاک بدون وزن، تحت خروج از محوریت‌های مختلف، و در شکل ۱۲ این اثر برای پی نواری واقع بر خاک بدون وزن ( $\phi = 20^\circ$ ) متکی بر سنگ بستر صاف یا زیر نشان داده شده است. در این شکل‌ها، ضریب  $F_c$  عبارت است از نسبت ظرفیت باربری پی در حالت وجود سنگ بستر به ظرفیت باربری متناظر در حالت پی روی محیط نیمه بی‌نهایت. اثرات وجود سنگ بستر صاف در نزدیکی تراز پی را می‌توان از دو دیدگاه بررسی کرد: ۱. نزدیک شدن سنگ بستر به تراز پی (کاهش  $H/B$ ) سبب

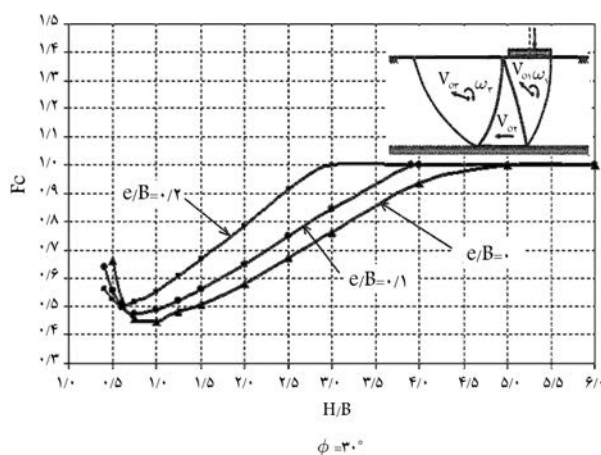
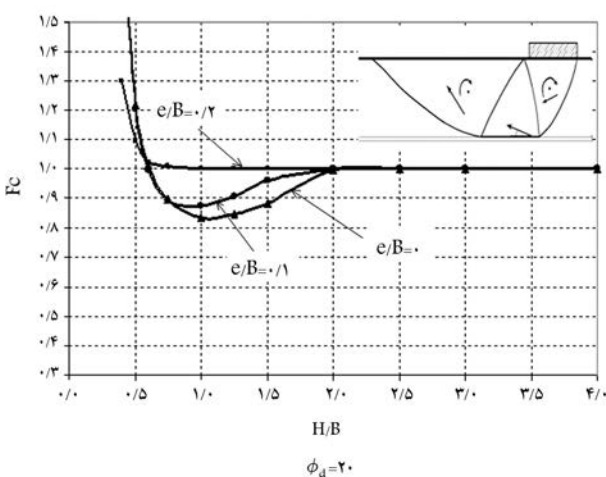
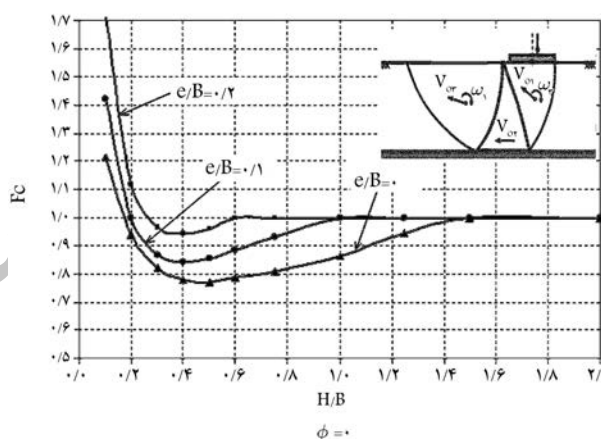
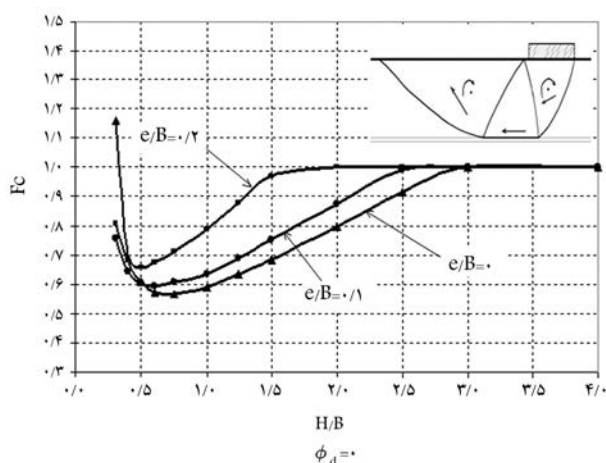
شده و اثر وجود آن همواره افزایش ظرفیت باربری بوده است، در حالی که در شرایط وجود سنگ بستر صاف ممکن است ظرفیت باربری پی کاهش یابد.

اگر مقاومت برشی میان سنگ بستر و خاک فوقانی  $(c_d, \phi_d)$  و نیز ضخامت لایه‌ی خاکی  $(H)$  اندک باشد، مکانیسم گسیختگی تمایل به لغزیدن روی سطح تماس بین خاک و سنگ بستر خواهد داشت. محققین این مسئله را فقط در حالت بارگذاری قائم محوری مورد بررسی قرار داده‌اند.<sup>[۱۵]</sup>

در حالتی که پی تحت بار خارج از محور قرار دارد، لازم است از مکانیسم‌های گسیختگی دورانی استفاده شود، اما این مکانیسم‌ها در شرایط مذکور قادر به لغزیدن بر روی سطح تماس نیستند.



شکل ۱۰. مکانیسم گسیختگی پیشنهادی متشکل از دو بلوک دورانی - انتقالی و یک بلوک انتقالی.



شکل ۱۲. ضریب تأثیر سنگ بستر بر ظرفیت باربری پی تحت اثر بار خارج از محور ( $e/B$ ) واقع بر خاک بدون وزن دارای  $\phi = 20^\circ$ .

شکل ۱۱. ضریب تأثیر سنگ بستر بر ظرفیت باربری پی تحت اثر بار خارج از محور ( $e/B$ ) واقع بر خاک بدون وزن (فصل مشترک لایه و سنگ بستر کاملاً صاف،  $\phi_d = 0^\circ$ ).

انتقالی یا دورانی در برخی حالات باعث ایجاد محدودیت می‌شود. این امر خصوصاً در مسائل تعیین ظرفیت باربری پی‌های تحت اثر بارگذاری مرکب مصداق می‌یابد. در تحقیق حاضر، به‌منظور رفع محدودیت مذکور، مکانیسم گسیختگی متشکل از بلوک‌های صلب دارای ترکیب حرکت‌های انتقالی و دورانی بر پایه‌ی روش تحلیل حدی مرز بالا معرفی شده است. به‌منظور بررسی صحت و دقت الگوریتم حاضر، نتایج حاصل در زمینه‌ی تعیین ظرفیت باربری پی‌های نواری تحت اثر بارگذاری مرکب با نتایج دیگر روش‌های موجود مقایسه شده‌اند. مقایسه‌ی نتایج بیان‌گر دقت مناسب روش پیشنهادی است. با استفاده از مکانیسم پیشنهادی، امکان تلفیق بلوک‌های با حرکت انتقالی و دورانی وجود دارد که با تکیه بر این قابلیت، تعیین ظرفیت باربری پی‌های واقع بر لایه‌های خاک با ضخامت محدود تحت بارگذاری مرکب میسر می‌شود. به‌منظور نشان دادن قابلیت ویژه‌ی این مکانیسم، برنامه‌ی مبتنی بر الگوریتم و مکانیسم پیشنهادی برای بررسی اثر عمق و مشخصات مقاومتی سنگ بستر بر ظرفیت باربری پی تدوین، و نمونه‌هایی از نتایج تحلیل‌های انجام شده ارائه شده است. به‌منظور بهینه‌یابی و تعیین مکانیسم گسیختگی بحرانی، الگوریتمی مبتنی بر ترکیب دو روش الگوریتم ژنتیک و سعی و خطای محلی توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۱۰. نتیجه‌گیری

مقید شدن عمق مکانیسم گسیختگی زیر پی و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری آن می‌شود؛ ۲. با توجه به مقاومت برشی ناچیز سنگ بستر صاف، با نزدیک شدن سنگ بستر امکان لغزش مکانیسم گسیختگی روی سنگ بستر و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری وجود دارد. با نزدیک شدن سنگ بستر به پی، ابتدا عامل دوم غالب است و ظرفیت باربری کاهش می‌یابد، در حالی که برای اعماق خیلی کم (کم‌تر از  $H/B$ ) بحرانی که تابع زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک است) عامل اول تأثیرگذارتر می‌شود و ظرفیت باربری به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. همچنین وجود سنگ بستر تأثیر قابل ملاحظه‌ی بر کاهش ظرفیت باربری دارد، که با افزایش خروج از محوریت بار از میزان و دامنه‌ی تأثیر سنگ بستر بر ظرفیت باربری پی کاسته می‌شود.

یکی از مراحل مهم در بررسی مسائل پایداری با استفاده از روش تحلیل حدی مرز بالا، فرض مکانیسم گسیختگی تا حد ممکن نزدیک به واقعیت است، به‌نحوی که شرایط حاکم بر مسئله و ضروریات روش مورد استفاده را ارضا کند. فرض حرکت صرفاً

## پانویس

1. yield function
2. associated flow rule
3. encoding
4. fitness
5. selection
6. recombination
7. mutation
8. reinsertion
9. roulette wheel
10. intermediate recombination

## منابع

1. Terzaghi, K., *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York (1943).
2. Meyerhof, G.G. "The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads", *Proc. 3rd ICSMFE, Zurich*, **1**, pp. 440-445 (1953).
3. Meyerhof, G.G. "Some recent research on the bearing capacity of foundations", *Can. Geotech. J.*, **1**, pp. 16-26 (1963).
4. Hansen, J., *A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity*, Bull. N.98, The Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, pp. 5-11 (1970).
5. Vesic, A.S. "Analysis of ultimate loads of shallow foundations", *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, **99**(SM1), pp. 45-73 (1973).
6. Muhs, H. and Weiss, K. "The influence of load inclination on bearing capacity of shallow footings", *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **2**, pp. 187-194 (1969).
7. Gottardi, G. and Butterfield, R. "On the bearing capacity of surface footings on sand under general planar loads", *Soils Found*, **33**, pp. 68-79 (1993).
8. Ukritchon, B.; Whittle, A.J. and Sloan, S.W. "Undrained limit analyses for combined loading of strip footings", *J. Geotech. and Geoenv. Eng.*, **124**(3), pp. 265-275 (1998).
9. Marechal O., *Portance de Fondations Superficielles Etablies a Proximite de Talus et Soumises a des Charges Inclines et Excentrees*, These de Doctorat de l'Ecole centrale de Nantes (1999).
10. Hjiarj, M.; Lyamin, A.V. and Sloan, S.W. "Bearing capacity of a cohesive-frictional soil under non-eccentric inclined loading", *Computers and Geotechnics*, **31**, pp. 491-516 (2004).
11. Chen, W.F., *Limit Analysis And Soil Plasticity*, Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam (1990).
12. Farzaneh, O.; Askari, F. and Ganjian, N. "Three dimensional stability analysis of convex slopes in plan view", *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, V134, **8**, pp. 1192-1200 (2008).
13. Holland, J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, Mich (1975).
14. Farzaneh, O. and Askari, F. "3D Analysis of non-homogeneous slopes", *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, V129, **2**, pp. 137-145 (2003).
15. Mandel, J. and Salencon, J. "Force portante d une fondation sur un bicouche a interface lisse", *C.R. Hebd. Seanc. Acad. Sci.*, Part A, **268**, pp. 417-420 (1969b).