

ارائه یک روش جدید برای تعیین ضریب اطمینان پایداری بر مبنای کاهش مقاومت با استفاده از حل دینامیکی صریح به روش اجزاء محدود در نرم افزار ABAQUS

سید دانیال غفاریان^۱، مرتضی نائیج^۲.

۱- دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (نویسنده مسئول)

۲- دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

بررسی پایداری شیب‌ها، شیروانی‌ها و گودها عموماً با استفاده از تحلیل تعادل حدی (LEM) به روش‌های مختلف از جمله روش Bishop, Morgenstern-Price, Spencer و ... انجام می‌شود. در این روش‌ها، توسعه تدریجی گسیختگی، رابطه تنش - کرنش و رفتار مصالح قبل از وقوع شرایط گسیختگی در نظر گرفته نمی‌شود. از طرف دیگر روش‌های دیگر برای تعیین ضریب اطمینان پایداری بر مبنای حل ضمنی به روش اجزاء محدود وجود دارد که در نرم‌افزارهایی مانند Plaxis مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطالعات پارامتریک نشان می‌دهد که نتایج این روش در مورد شیب‌های با زاویه تند و گودها عموماً فاصله قابل توجهی با مقادیر بدست آمده از روش‌های تحلیلی دارد. به منظور رفع نواقص مربوط به هر کدام از این دو روش، در مطالعه حاضر، به ارائه یک روش جدید بر مبنای کاهش مقاومت با استفاده از تحلیل دینامیکی صریح به روش اجزاء محدود پرداخته شده است. در روش پیشنهاد شده، شروع ناپایداری بر اساس افزایش ناگهانی انرژی جنبشی کل سیستم تعیین شده است. بعبارت دیگر در صورتی که سیستم پایدار باشد، انرژی جنبشی کل سیستم در مقایسه با انرژی کل سیستم مقدار کوچکی بوده و مقدار آن در گذشت زمان کاهش می‌یابد. در صورتی که سیستم شروع به ناپایداری کند، سرعت هر کدام از المان‌ها افزایش یافته و مقدار انرژی جنبشی کل سیستم به ناگاه افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج مربوط به ضریب اطمینان پایداری بدست آمده از روش ارائه شده در مطالعات حاضر (FEM/E)، با مقادیر بدست آمده از تحلیل تعادل حدی به روش Morgenstern-Price (LEM) و مقادیر بدست آمده از مدل‌سازی عددی به روش حل ضمنی اجزاء محدود در نرم‌افزار Plaxis (FEM/I) نشان می‌دهد که در محدوده مورد مطالعه، تطابق نتایج بدست آمده از روش ارائه شده در مطالعه حاضر، با بررسی ضریب اطمینان پایداری در شرایط هندسی مختلف، مشاهده شد که روش پیشنهادی تطابق خوبی با نتایج بدست آمده از روش LEM و FEM/I دارد و در مورد شیب‌های با زاویه تند و گودها نیز نتایج بدست آمده از روش ارائه شده، به مقادیر بدست آمده از روش LEM بسیار نزدیک‌تر است.

واژه‌های کلیدی: ضریب اطمینان پایداری، کاهش مقاومت، حل دینامیکی صریح، روش اجزاء محدود، انرژی جنبشی.

۱. مقدمه

تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها بعنوان یکی از پرکاربردترین مسائل ژئوتکنیکی، عموماً با استفاده از تحلیل‌های تعادل حدی (LEM: Limit Equilibrium Method) انجام می‌شود. روش‌های مختلفی برای انجام این تحلیل‌ها وجود دارد که از جمله پرکاربردترین این روش‌ها، می‌توان به روش Morgenstern-Price, Spencer, Bishop و ... اشاره کرد [۱-۳]. در تحلیل پایداری به روش LEM رابطه تنش - کرنش مصالح در نظر گرفته نمی‌شود و تنها پارامترهای مقاومتی مصالح بعنوان معیار خرابی لحاظ می‌شود. بنابراین در این روش، امکان مطالعه خرابی پیش‌رونده وجود ندارد. علاوه بر این روش لازم است فرضیاتی به منظور تعیین شکل سطح لغزش انجام شود. با این حال در نرم‌افزارهای جدید، روش‌هایی برای بهینه‌سازی شکل سطوح لغزش دایره‌ای وجود دارد [۴].

با افزایش کاربرد روش‌های عددی (مثل اجزاء محدود و اختلاف محدود) در تحلیل مسائل ژئوتکنیکی، روش کاهش مقاومت (strength reduction method) برای تعیین ضریب اطمینان پایداری معرفی شد. روش کاهش مقاومت در بسیاری از نرم‌افزارهای ژئوتکنیکی (از جمله Plaxis و FLAC)، به منظور محاسبه ضریب اطمینان پایداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، در هر مرحله از تحلیل مقدار اولیه پارامترهای مقاومتی خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک) توسط ضریب کاهش مقاومت (SRF) کاهش می‌یابد. وقتی مقدار این پارامترهای مقاومتی به اندازه کافی کاهش یابد، ناپایداری توده خاک به واسطه وقوع تغییرشکل‌های بزرگ و عدم همگرایی تحلیل عددی تعیین شده و معکوس مقدار SRF در این مرحله، بعنوان ضریب اطمینان پایداری (SoF) در نظر گرفته می‌شود. یکی از اولین کاربردهای روش کاهش مقاومت در تعیین ضریب اطمینان پایداری توسط Zienkiewicz et al. (1975) انجام شد [۵]. این روش بعدها توسط سایر محققان نیز برای مطالعه پایداری شیب‌ها مورد استفاده قرار گرفت [۶-۸].

از طرف دیگر، مدل‌سازی مسائل با تغییرشکل‌های زیاد، می‌تواند توسط تحلیل عددی به روش اجزاء محدود صریح (Explicit Finite Element Method: FEM/E) انجام شود. در این روش، عموماً تغییرشکل‌های بزرگ بعنوان معیار ناپایداری نمی‌تواند مد نظر قرار گیرد. بعبارت دیگر در مسائل استاتیکی که به روش FEM/E آنقدر گام زمانی کوچک در نظر گرفته می‌شود که با وجود تغییرشکل‌های زیاد، همچنان حل دچار ناپایداری نمی‌شود. با توجه به اینکه در لحظه وقوع گسیختگی، المان‌های خاک در محدوده گوه گسیختگی ناپایدار شده و حرکت می‌کنند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که انرژی جنبشی کل سیستم (که تابعی از سرعت المان‌های تشکیل دهنده آن است) در لحظه وقوع ناپایداری بصورت ناگهانی افزایش می‌یابد.

در این مقاله، با استفاده از تحلیل به روش FEM/E و اعمال تدریجی نیروهای حجمی، روند تغییرات انرژی جنبشی شیب‌ها مورد بررسی قرار گرفته است و شروع ناپایداری، با استفاده از معیار انرژی جنبشی تعیین شده است. بدین صورت که افزایش ناگهانی انرژی جنبشی، بعنوان معیاری برای شروع ناپایداری در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از روش کاهش مقاومت، پارامترهای مقاومتی خاک تا جایی کاهش یافته‌اند که شیب در آستانه ناپایداری قرار گیرد. ضریب اطمینان پایداری بدست آمده از این روش پیشنهادی، برای شیب‌های با زوایای مختلف، و خاک‌های با پارامترهای مقاومتی مختلف با دو روش پرکاربرد در ادبیات فنی موضوع توسط نرم‌افزارهای تجاری مرسوم برای مطالعه ضریب اطمینان پایداری، مورد مقایسه قرار گرفته و در نهایت کاربرد این روش در حل مسائل ژئوتکنیکی در نرم‌افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. تحلیل عددی

در روش FEM/E حل مساله توسط اعمال بار در تعداد زیادی گام‌های زمانی کوچک انجام می‌شود. تحلیل عددی در این روش به روش دینامیکی بوده و در هر گام زمانی، بخش کوچکی از نیروی خارجی، به مدل اعمال شده و مساله تحلیل می‌شود.

در این روش به منظور حل یک مساله استاتیکی لازم است مقدار گام زمانی، متناسب با سختی مصالح و ابعاد المان‌ها، به اندازه‌ای انتخاب شود که نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی کل سیستم مقدار ناچیزی شود.

نرم‌افزار ABAQUS مستقلاً توانایی تحلیل ضریب اطمینان پایداری را ندارد. در پژوهش حاضر به منظور اعمال روش کاهش مقاومت در تحلیل پایداری شیب‌ها در این نرم‌افزار، از کد نویسی PYTHON استفاده شده است. مراحل تحلیل ضریب اطمینان پایداری با استفاده از کد مذکور به شرح زیر است:

مدل‌سازی هندسی و اختصاص ویژگی‌های مصالح و شرایط مرزی در نرم‌افزار ABAQUS.

اعمال نیروهای حجمی بصورت رمپ در طی مدت زمان ۵ ثانیه و برآورد انرژی جنبشی کل سیستم. برآورد پایداری اولیه شیب.

در صورتی که پایداری اولیه برقرار نباشد، $SRF > 1$ اعمال می‌شود؛ بعبارت دیگر مقادیر پارامترهای مقاومتی افزایش می‌یابند و مجدداً پایداری شیب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در صورتی که پایداری اولیه برقرار باشد، $SRF < 1$ اعمال می‌شود؛ بعبارت دیگر مقادیر پارامترهای مقاومتی کاهش می‌یابند و مجدداً پایداری شیب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با افزایش یا کاهش تدریجی SRF، مراحل ۴ و ۵ تا جایی ادامه پیدا می‌کنند که:

الف) اگر پایداری اولیه برقرار نباشد، شیب در آستانه پایداری قرار گیرد.

ب) اگر پایداری اولیه برقرار باشد، شیب در آستانه ناپایداری قرار گیرد.

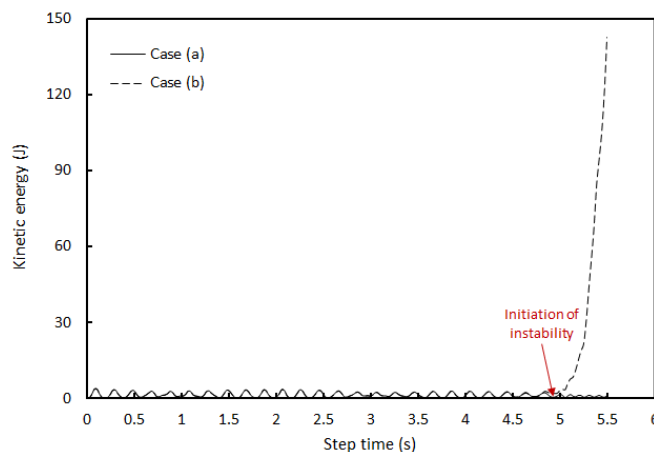
مقدار ضریب اطمینان پایداری برابر است با معکوس آخرین مقدار SRF بدست آمده از مرحله ۶.

به منظور مدل‌سازی رفتار خاک در مطالعه حاضر، از مدل رفتاری الاستیک خطی و پلاستیک کامل با معیار خرابی موهر-کولمب استفاده شده است. استفاده از این مدل رفتاری باعث ایجاد یک حالت انتقالی سریع، بین رفتار الاستیک و پلاستیک می‌شود که می‌تواند لحظه وقوع گسیختگی را به وضوح نشان دهد. به منظور دسترسی به پارامترهای رفتاری مصالح و تغییر آن‌ها در حین تحلیل، بایستی مدل رفتاری مورد نظر بعنوان VUMAT (مدل رفتاری تعریف شده توسط کاربر) در نرم‌افزار ABAQUS معرفی شود. این روند توسط Naeij et al. (2019) و Naeij and Soroush (2021) در مطالعات دیگری انجام شده است [۹، ۱۰].

همانطور که اشاره شد، اساس تشخیص ناپایداری در روش پیشنهادی در مقاله حاضر، بر مبنای کنترل انرژی جنبشی کل سیستم است که با استفاده از رابطه ۱ در نرم‌افزار محاسبه می‌شود.

$$E_{KE} = \frac{1}{2} \int_V \rho \dot{U}^T \dot{U} dV \quad (1)$$

در رابطه فوق، E_{KE} انرژی جنبشی کل سیستم، ρ چگالی خاک، \dot{U} سرعت المان‌ها، و V حجم المان‌ها است. نیروهای حجمی در طی مدت زمان اختیاری ۵ ثانیه بصورت رمپ به مدل وارد می‌شوند. در صورتی که پایداری برقرار باشد، انرژی جنبشی سیستم رفته رفته کاهش می‌یابد و قابل صرف‌نظر کردن خواهد بود. در صورتی که ناپایداری به وقوع بپیوندد، انرژی جنبشی سیستم بصورت ناگهانی افزایش می‌یابد. شکل ۱ نمونه‌ای از تغییرات انرژی جنبشی سیستم را در شرایط پایدار (مورد a) و شرایط ناپایدار (مورد b) نشان می‌دهد.



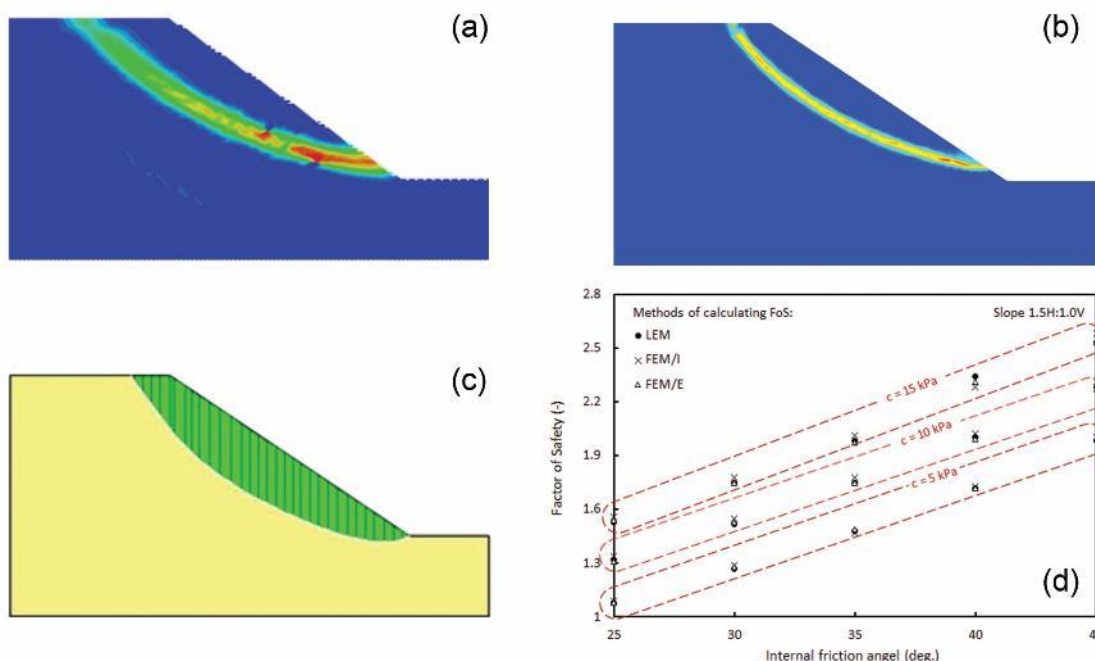
شکل ۱ - تغییرات انرژی جنبشی در یک سیستم پایدار (case a) و یک سیستم ناپایدار (case b).

۳. نتایج

به منظور بررسی توانایی روش ارائه شده برای تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها و گودها، مقادیر ضریب اطمینان بدست آمده از این روش (FEM/E)، با مقادیر بدست آمده از روش FEM/I توسط نرم‌افزار Plaxis 2D (2020) [۱۱] و تحلیل LEM با استفاده از روش Morgenstern and Price (1965) [۱] در نرم‌افزار Slope/W [۴] مقایسه شده است. برای این منظور، شیب‌هایی با ارتفاع ۱۰ متر و با نسبت عرض به ارتفاع $۱:۰.۵$ ، $۱:۱.۰$ ، $۱:۱.۵$ و $۱:۲.۰$ و گود قائم مورد بررسی قرار گرفته است. برای هر مورد، مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک، در محدوده‌ای انتخاب شده است که ضریب اطمینان پایداری شیب در محدوده واحد قرار بگیرد.

۱.۳. شیب $۱:۰.۵$

شکل ۲ سطوح لغزش بحرانی در شیب‌های $۱:۰.۵$ که توسط روش‌های FEM/E، FEM/I و LEM برای خاک با $\phi = 45^\circ$ و $c = 10 \text{ kPa}$ تعیین شده است را نشان می‌دهد. مقدار ضریب اطمینان بدست آمده از روش‌های مختلف در این شرایط در حدود ۲.۲۵ می‌باشد. همچنین در این شکل، مقادیر ضریب اطمینان بدست آمده توسط روش‌های مختلف، برای مقادیر مختلف ϕ و c نیز آمده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، شکل سطح لغزش و مقادیر ضریب اطمینان بدست آمده برای شرایط مختلف، نزدیک به یکدیگر می‌باشد. در روش‌های FEM/E و FEM/I شکل سطح لغزش با کانتور کرنش برشی تعیین شده است. عبارت دیگر در لحظه گسیختگی، مقدار کرنش برشی روی سطح لغزش به مقدار قابل توجهی نسبت به محیط اطراف افزایش می‌یابد و توده خاک در بالای این سطح، تقریباً بصورت صلب شروع به حرکت می‌کند.



شکل ۲ - شکل سطح گسیختگی برای شیب $1.5:1.0$ و برای خاک با $\phi = 45 \text{ deg}$ و $c = 10 \text{ kPa}$: (a) روش FEM/E، (b) روش FEM/I، (c) روش LEM و (d) تغییرات ضریب اطمینان پایداری با تغییرات ϕ و c در هر کدام از روش‌ها.

۲.۳. شیب $1.0:1.0$

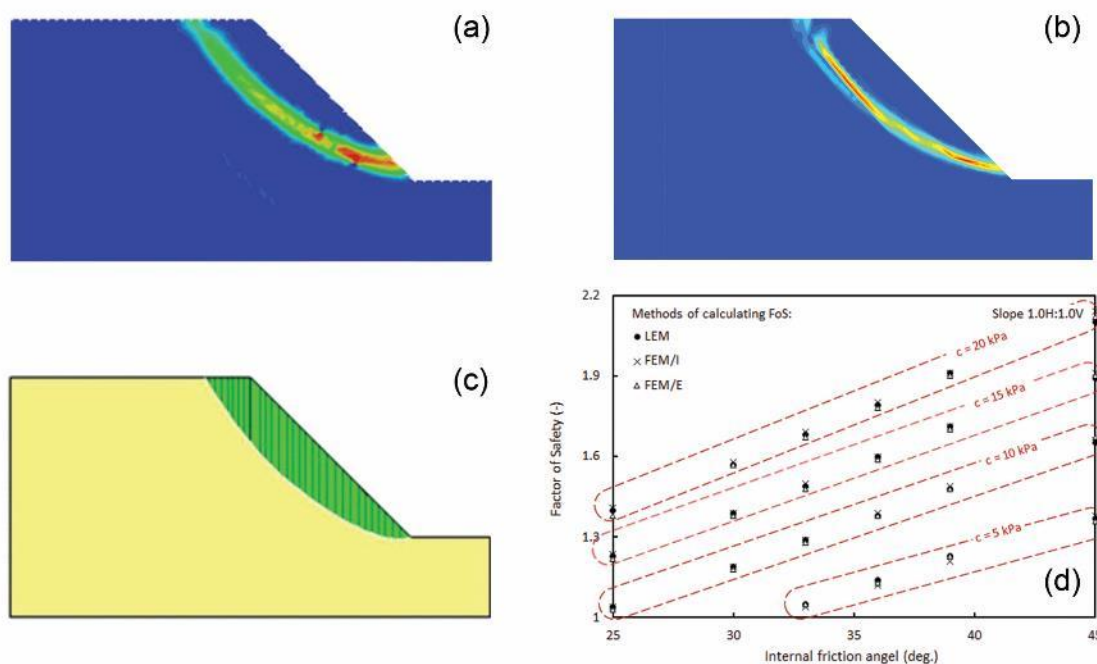
در شکل ۳ سطوح لغزش بحرانی در شیروانی‌های با زاویه 45 درجه نسبت به افق برای خاک همگن با $\phi = 39 \text{ deg}$ و $c = 20 \text{ kPa}$ که توسط روش‌های FEM/I، FEM/E و LEM محاسبه شده است، نشان داده شده است. مقدار ضریب اطمینان بدست آمده از روش‌های مختلف در این شرایط در حدود 1.90 می‌باشد. در این شکل، مقادیر ضریب اطمینان بدست آمده از روش‌های مختلف، برای مقادیر ϕ در بازه 25 تا 45 درجه و c در بازه 5 تا 20 کیلوپاسکال نیز ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، شکل و عمق سطح لغزش و مقادیر ضریب اطمینان بدست آمده از روش پیشنهادی در محدوده پارامترهای مقاومتی مورد مطالعه، تطابق مناسبی با سایر روش‌ها دارد.

۳.۳. شیب $1.0:2.0$

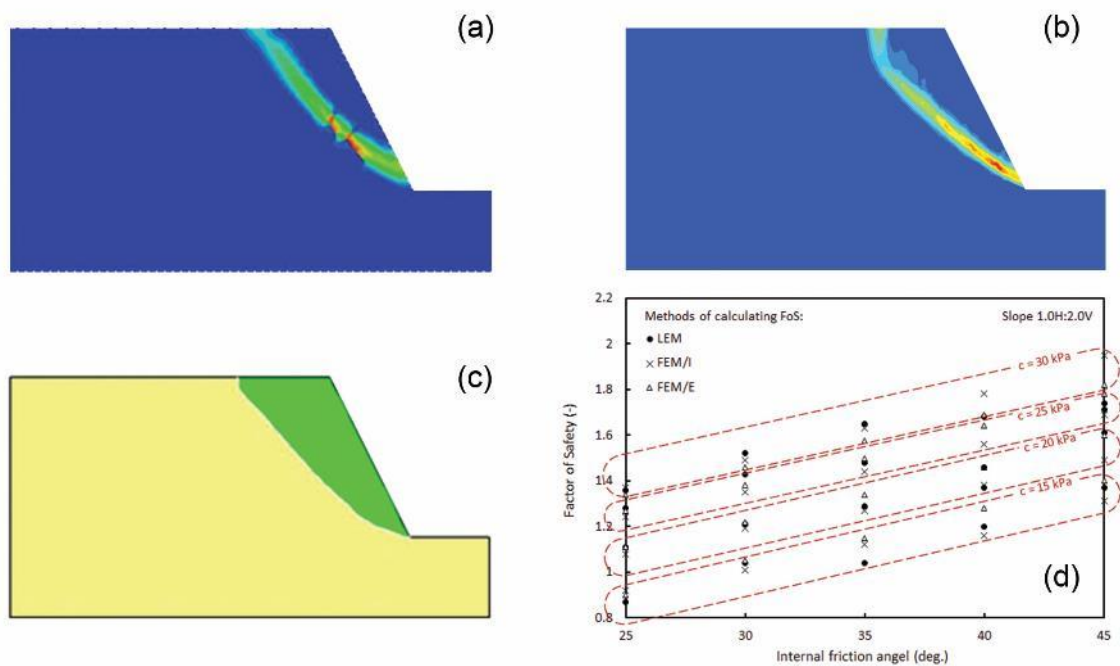
شکل ۴ سطوح لغزش بحرانی در شیب‌های $1.0:2.0$ که توسط روش‌های FEM/I، FEM/E و LEM برای خاک با $\phi = 40 \text{ deg}$ و $c = 25 \text{ kPa}$ تعیین شده است را نشان می‌دهد. مقدار ضریب اطمینان بدست آمده از روش‌های مختلف در این شرایط در حدود 1.60 می‌باشد. همچنین در این شکل، مقادیر ضریب اطمینان بدست آمده توسط روش‌های مختلف، برای مقادیر مختلف ϕ در بازه 25 تا 45 درجه و c در بازه 15 تا 30 کیلوپاسکال نیز آمده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، شکل و عمق سطح لغزش و مقادیر ضریب اطمینان بدست آمده توسط روش پیشنهادی (FEM/E)، تطابق بسیار مناسبی با روش‌های FEM/I و LEM دارد. هرچند پراکندگی بیشتری در مورد داده‌های ضریب اطمینان پایداری بدست آمده در مورد شیب $1.0:2.0$ نسبت به شیب‌های کمتر در روش‌های مختلف مشاهده می‌شود.

۴,۳. گود قائم

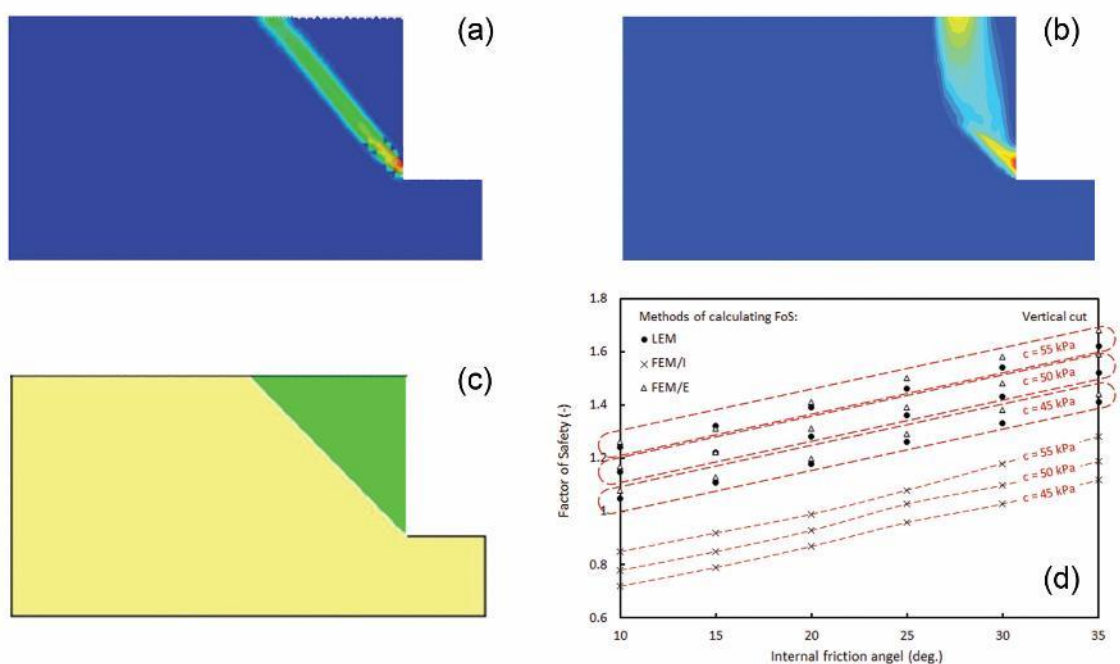
شکل ۵ سطوح لغزش بحرانی در گودهای قائم که توسط پیشنهادی محاسبه شده است را در مقایسه با روشهای FEM/I و LEM برای خاک با $\phi = 30 \text{ deg}$ و $c = 50 \text{ kPa}$ تعیین شده است را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، شکل سطح لغزش بدست آمده توسط روش پیشنهادی و روش کلاسیک LEM، بصورت صفحه‌ای است؛ در حالی که شکل سطح لغزش بدست آمده از روش FEM/I غیر صفحه‌ای است. متعاقباً مقدار ضریب اطمینان بدست آمده از توسط روش پیشنهادی و روش LEM در این شرایط در حدود ۱,۴۵ می‌باشد؛ در حالیکه مقدار ضریب اطمینان بدست آمده از روش FEM/I در حدود ۱,۱ می‌باشد. چنین اختلافی در مقادیر ضریب اطمینان بدست آمده به ازای مقادیر مختلف ϕ در بازه ۱۰ تا ۳۵ درجه و c در بازه ۴۵ تا ۵۵ کیلوپاسکال نیز مشاهده می‌شود. بعبارت دیگر، همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، شکل و عمق سطح لغزش و مقادیر ضریب اطمینان بدست آمده توسط روش پیشنهادی (FEM/E)، تطابق بسیار مناسبی با روش LEM دارد؛ با این حال شکل سطح لغزش در روش FEM/I متفاوت با این دو روش بوده و مقادیر ضریب اطمینان پایداری بدست آمده از روش FEM/I در مورد گودهای قائم، به مقدار قابل توجهی کمتر از مقادیر بدست آمده از روش کلاسیک LEM و روش پیشنهادی در مقاله حاضر است.



شکل ۳- شکل سطح گسیختگی برای شیب ۱:۱ و خاک با $\phi = 39 \text{ deg}$ و $c = 20 \text{ kPa}$: (a) روش FEM/E، (b) روش FEM/I، (c) روش LEM و (d) تغییرات ضریب اطمینان پایداری با تغییرات ϕ و c در هر کدام از روش‌ها.



شکل ۴ - شکل سطح گسیختگی برای شیب ۱:۰.۵:۲:۰ و خاک با $\phi = 40$ deg و $c = 25$ kPa: (a) روش FEM/E، (b) روش FEM/I، (c) روش LEM و (d) تغییرات ضریب اطمینان پایداری با تغییرات ϕ و c در هر کدام از روش‌ها.



شکل ۵ - شکل سطح گسیختگی برای گودهای قائم و خاک با $\phi = 30$ deg و $c = 50$ kPa: (a) روش FEM/E، (b) روش FEM/I، (c) روش LEM و (d) تغییرات ضریب اطمینان پایداری با تغییرات ϕ و c در هر کدام از روش‌ها.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به فرمولاسیون دینامیکی روش FEM/E، افزایش ناگهانی انرژی جنبشی کل سیستم، می‌تواند بعنوان معیاری برای شروع لغزش گوه گسیختگی و ناپایداری شیب محسوب شود. در این مقاله، ضریب اطمینان شیب‌ها و گودهای قائم با مقادیر مختلف پارامترهای مقاومتی با استفاده از روش ضریب کاهش مقاومت (SRF) و بررسی انرژی جنبشی کل سیستم بعنوان معیار وقوع ناپایداری، با استفاده از تحلیل دینامیکی صریح به روش اجزاء محدود (FEM/E) با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفته است. اثبات عملکرد این روش برای تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها، به گسترش کارایی نرم‌افزار پرکاربرد ABAQUS در حوزه مهندسی ژئوتکنیک کمک خواهد کرد.

به منظور بررسی نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی، با سایر روش‌های پرکاربرد در ادبیات فنی، در این مقاله ضریب اطمینان پایداری شیب‌های با زاویه 33.6° نسبت به سطح افق (1.5×10^{-1}) تا گودهای قائم، با پارامترهای مقاومتی مختلف توسط روش پیشنهادی و همچنین تحلیل ضمني اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار Plaxis 2D (2020) و تحلیل حالت حدی توسط نرم‌افزار Slope/W به روش Morgenstern and Price (1965) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

نتایج تحلیل‌های انجام گرفته در این مقاله نشان می‌دهد که برای شیب‌های با زاویه کمتر از 45° درجه، تطابق بسیار خوبی بین نتایج بدست آمده از تحلیل‌های صورت گرفته با استفاده از روش پیشنهادی (FEM/E) و تحلیل ضمني اجزاء محدود (FEM/I) و تحلیل حالت حدی (LEM) وجود دارد. با این حال در مورد شیب‌های با زاویه تندتر و گودهای قائم، روش FEM/I مقادیر ضریب اطمینان پایین‌تری نسبت به دو روش دیگر نشان می‌دهد. این موضوع عمدتاً به دلیل تفاوت در مبنای وقوع ناپایداری در این روش‌ها و بنابراین تفاوت در شکل سطح لغزش پیش‌بینی شده دارد. مقادیر ضریب اطمینان بدست آمده توسط روش پیشنهادی در این مقاله، در شرایط مختلف تطابق مناسبی با مقادیر بدست آمده از روش کلاسیک LEM دارد و می‌تواند به منظور تعیین ضریب اطمینان پایداری در مسائل مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ABAQUS مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [1] Morgenstern NR, Price VE. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Géotechnique* 1965;15:79–93. doi:10.1680/geot.1965.15.1.79.
- [2] Bishop AW. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique* 1955;5:7–17. doi:10.1680/geot.1955.5.1.7.
- [3] Spencer E. A Method of analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces. *Géotechnique* 1967;17:11–26. doi:10.1680/geot.1967.17.1.11.
- [4] SLOPE/W User's Guide for Slope Stability Analysis. Calgary, Alberta, Canada.: 2007.
- [5] Zienkiewicz OC, Humpheson C, Lewis RW. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics. *Géotechnique* 1975;25:671–89. doi:10.1680/geot.1975.25.4.671.
- [6] Griffiths D V., Lane PA. Slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique* 1999;49:387–403. doi:10.1680/geot.1999.49.3.387.
- [7] Cheng YM, Lansivaara T, Wei WB. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods. *Comput Geotech* 2007;34:137–50. doi:10.1016/j.compgeo.2006.10.011.
- [8] Tu Y, Liu X, Zhong Z, Li Y. New criteria for defining slope failure using the strength reduction method. *Eng Geol* 2016;212:63–71. doi:10.1016/j.enggeo.2016.08.002.
- [9] Naeij M, Soroush A, Javanmardi Y. Numerical investigation of the effects of embedment on

- the reverse fault-foundation interaction. *Comput Geotech* 2019;113:103098. doi:10.1016/j.compgeo.2019.103098.
- [10] Naeij M, Soroush A. Comprehensive 3D numerical study on interaction between structure and dip-slip faulting. *Soil Dyn Earthq Eng* 2021;140:106285. doi:10.1016/j.soildyn.2020.106285.
- [11] Brinkgreve RBJ, Kumarswamy S, Swolfs WM. *Plaxis 3D reference manual anniversary edition version 1*. Plaxis Bv, Delft 2015.