

چکیده

در این مقاله بر مبنای روش تحلیل حدی مرز بالا به بررسی پایداری سه بعدی شیروانی‌ها در مقابل زلزله بر اساس مکانیسم‌های گسیختگی دورانی و انتقالی و نیز مقایسه نتایج آنها پرداخته شده است. تعریف سطوح جانبی مکانیسم‌های گسیختگی سه بعدی در روش مرز بالا مستلزم رعایت قانون جریان وابسته است که تشکیل صفحات جانبی مسطح را در مکانیسم انتقالی بسیار مقید می‌کند و در حالت مکانیسم دورانی لازم است معادلات این سطوح، معادله دیفرانسیل خاصی را ارضا کنند. در ادامه تحقیقات مربوط به پایداری سه بعدی شیروانی‌های خاکی به روش مرز بالا با استفاده از مکانیسم‌های انتقالی و دورانی، تحقیق حاضر به مقایسه نتایج حاصل از یک مکانیسم انتقالی با یک مکانیسم دورانی که الگوریتم آن در این تحقیق بر اساس حل نهایی میخالوفسکی و به روشی ساده‌تر تدوین شده است، می‌پردازد. به طور کلی روند تغییرات ضریب پایداری شیروانی با افزایش ضریب زلزله برای هر دو مکانیسم دورانی و انتقالی تقریباً مشابه است. همچنین اهمیت تحلیل‌های سه بعدی در حالت لرزه‌ای نسبت به حالت استاتیکی بیشتر است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مکانیسم دورانی در اکثر موارد و به خصوص در شیب‌های قائم نتایج بهتری ارائه می‌دهد، اگرچه مکانیسم انتقالی برای خاک‌های چسبنده و با مکانیسم‌های مقید نتایج بهتری دارد.

واژگان کلیدی: پایداری شیروانی‌ها، مکانیسم دورانی، مکانیسم انتقالی، تحلیل حدی مرز بالا، تحلیل سه بعدی.

بررسی و مقایسه دو مکانیسم انتقالی و دورانی در تحلیل سه بعدی پایداری لرزه‌ای شیروانی‌ها به روش تحلیل حدی مرز بالا

بهزاد امیرلو

دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

اورنگ فرزانه

دانشیار دانشکده عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

فرج‌اله عسکری (نویسنده مسئول)

دانشیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، askari@iiees.ac.ir

۱- مقدمه

از این میان، روش‌های تعادل حدی بیشتر از دو روش دیگر به کار گرفته شده‌اند. در این روش پس از در نظر گرفتن یک مکانیسم گسیختگی فرضی، رابطه عمومی بار حدی و یا ضریب اطمینان به کمک حل معادلات تعادل توده خاک در حال گسیختگی تعیین می‌شود و سپس با استفاده از یک روش بهینه‌سازی، مقدار حداقل بار و یا حداقل ضریب اطمینان با تغییر پارامترهای مکانیسم گسیختگی به دست می‌آید. نخستین بار کولمب با استفاده از این روش، فشار جانبی خاک وارد بر دیوارهای حائل را به دست آورد. در سال ۱۹۲۶، فلینیوس روش کولمب را به حل مسائل متعدد دیگری تعمیم داد. از جمله متداول‌ترین روش‌های تحلیل پایداری شیروانی به روش تعادل حدی می‌توان به روش‌های بیشاپ، جانبو، مرگنسترن و پرایس، و اسپنسر در حالت دو بعدی و

تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی یکی از مسائل اساسی علم مکانیک خاک است که معمولاً با فرض شرایط کرنش مسطح و به صورت دو بعدی انجام می‌شود. به عبارت دیگر فرض می‌شود که عرض مکانیسم گسیختگی نامحدود است که این فرض در بسیاری از موارد دور از واقعیت می‌باشد. در بسیاری از موارد واقعی مربوط به ناپایداری شیروانی‌ها مشاهده می‌شود که به دلایل مختلفی همچون وجود لایه‌های سنگی در طرفین مکانیسم، محدب یا مقعر بودن شیروانی در پلان و یا وجود بارهای خارجی در بالادست شیروانی، امکان پیشروی در عرض و ارائه عملکرد دو بعدی برای شیروانی وجود ندارد. در تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی، بیشتر از روش‌های تعادل حدی، خطوط مشخصه و روش تحلیل حدی استفاده می‌شود.

یک میدان سرعت فرضی و مساوی قرار دادن نمودار نیروهای خارجی و داخلی، بار گسیختگی محاسبه می‌شود. بر اساس قضیه 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. با انتخاب میدان‌های مناسب تنش و سرعت و نزدیک کردن جواب‌های حاصل از دو روش می‌توان محدوده‌ای را که بار گسیختگی واقعی در آن قرار می‌گیرد، کوچک‌تر نمود. در مسائلی که جواب دو روش یکسان باشد، جواب واقعی به دست آمده است. بدین ترتیب در این روش جایگاه هر جواب نسبت به پاسخ واقعی مشخص می‌باشد و اضافی یا نقصانی بودن تقریب کاملاً مشخص است. مزیت اصلی روش تحلیل حدی نیز در همین نکته است [۱].

در کاربرد روش تحلیل حدی در مسائل سه‌بعدی از هر دو مکانیسم انتقالی و دورانی جهت تحلیل پایداری شيرواني‌ها استفاده شده است. از نخستین کارهایی که در آنها از روش تحلیل حدی سه‌بعدی استفاده شده، تحلیل‌های گیگر و کریزک [۳] در سال‌های ۱۹۷۶ و ۱۹۷۵ می‌باشد که با یک مکانیسم دورانی به بررسی پایداری شيرواني قائم گوشه‌دار تحت اثر بار متمرکز پرداختند. از مهم‌ترین کاربردهای مکانیسم‌های دورانی در تحلیل‌های سه‌بعدی مرز بالا می‌توان به روش‌های دوبوهان و گارنیه [۴]، فاضلی‌نیا [۵] و میخالوفسکی [۶] و در بین مکانیسم‌های انتقالی به روش‌های میخالوفسکی [۷] و فرزانه و عسکری [۸] اشاره کرد. در این مقاله ضمن معرفی اجمالی مکانیسم‌های انتقالی و دورانی، به بررسی و مقایسه نتایج این مکانیسم‌ها با یکدیگر در شرایط استاتیکی و لرزه‌ای پرداخته شده است.

۲- مکانیسم انتقالی در تحلیل پایداری شيرواني‌ها

همان‌طور که اشاره شد مهم‌ترین مکانیسم‌های انتقالی، روش‌های میخالوفسکی [۷] و روش فرزانه و عسکری [۸] بودند که با توجه به توسعه روش میخالوفسکی در روش فرزانه و عسکری، از نتایج روش اخیر در مقاله استفاده خواهیم کرد.

همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود مکانیسم گسیختگی فرزانه و عسکری [۸] از تعدادی سطوح ناپوستگی سرعت تشکیل

یوگای، عزوز و بلیغ، و استینر در حالت سه‌بعدی اشاره نمود. روش خطوط مشخصه هنوز به‌طور گسترده مورد استفاده کاربردی قرار نگرفته است و این به علت دشواری‌هایی است که در این روش وجود دارد. با این حال از مهم‌ترین راه‌حل‌های ارائه شده در این زمینه می‌توان به کارهای سوکولوفسکی اشاره کرد [۱-۲].

روش تحلیل حدی، به دلیل اینکه در آن جایگاه جواب نسبت به جواب واقعی مسئله مشخص است یکی از قدرتمندترین روش‌ها به منظور تحلیل پایداری شيرواني‌های خاکی می‌باشد. این روش که شامل دو قضیه مرز بالا و مرز پایین است تعمیم اصل «کار خمیری حداکثر» می‌باشد. اصل مزبور را هیل در سال ۱۹۴۸ مطرح نمود [۱]. با تعمیم این اصل، دراکر، گرین‌برگ، و پراگر در سال ۱۹۵۲، قضایای حدی را ارائه کردند [۱].

فرضیات مورد استفاده در روش تحلیل حدی عبارتند از:

الف- رفتار مصالح در حالت حدی به صورت خمیری کامل است.
ب- حالت حدی با تابعی محدب به معادله $F(\sigma_{ij})=0$ که تابع تسلیم^۱ نامیده می‌شود، بیان می‌گردد. نمایش این تابع در فضای تنش‌های اصلی به سطح تسلیم موسوم است.

ج- رفتار خمیری مصالح تابع قانون جریان وابسته^۲ است.
در قضیه مرز پایین، مسئله با تعریف میدان‌های تنش فرضی حل می‌شود. میدان تنش فرضی مورد استفاده باید شرایط زیر را ارضا نماید:

الف- معادلات تعادل
ب- شرایط مرزی تنش
ج- عدم خروج بردار تنش از فضای تنش‌های محدود به سطح تسلیم بر اساس این قضیه، تحت هر میدان تنش مفروضی که شرایط «الف» تا «ج» ارضا شود، جریان خمیری آزاد به وقوع نخواهد پیوست. به عبارت دیگر، بار خارجی نظیر میدان تنش مزبور از بار گسیختگی واقعی بیشتر نخواهد بود. در روش مرز پایین، معادلات سازگاری سرعت کرنش‌ها (شرایط سینماتیکی) در نظر گرفته نمی‌شود.

از سوی دیگر در قضیه مرز بالا، مسائل با در نظر گرفتن شرایط سینماتیکی حل می‌شوند. در این قضیه با در نظر گرفتن

کار نیروهای داخلی (I) در مکانیسم در نظر گرفته شده مطابق رابطه (۲) است:

$$E = C \cos \varphi \left(\sum_{k=0}^3 V_k S_k + \sum_{k=0}^2 V_{k,k+1} S_{k,k+1} \right) \quad (2)$$

در روابط بالا k ضریب شتاب افقی زلزله C و φ چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک، V_k مقدار بردار سرعت بلوک k ، $V_{k,k+1}$ مقدار بردار سرعت در محل تماس دو بلوک k و $k+1$ ، S_k مساحت سطح ناپیوستگی در محل تماس بلوک شماره k و زمین و $S^{k,k+1}$ مساحت سطح ناپیوستگی در محل تماس دو بلوک k و $k+1$ می باشد.

۳- مکانیسم‌های دورانی در تحلیل پایداری شیروانی‌ها

در این بخش به معرفی مهم‌ترین مکانیسم‌های دورانی که قبلاً نیز به آنها اشاره شد پرداخته می‌شود. تا جایی که بررسی‌های مؤلفین نشان می‌دهد اغلب مکانیسم‌های دورانی استفاده شده در حالت سه بعدی شامل یک سطح زیرین و دو سطح جانبی بوده‌اند که سطوح جانبی در آنها نسبت به مرکز شیروانی قرینه هستند. در روش تحلیل حدی مرز بالا همان‌طور که در مکانیسم انتقالی نیز اشاره شد، این سطوح باید به گونه‌ای باشند که بردار سرعت با سطح لغزش زاویه‌ای برابر زاویه اصطکاک داخلی خاک (φ) بسازد.

تعیین معادلات سطوح جانبی در مختصات استوانه‌ای مستلزم حل معادله دیفرانسیل رابطه (۳) است:

$$\tan^2 \varphi \left(1 + \left(\frac{\partial z}{\partial r} \right)^2 \right) = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial z}{\partial \theta} \right)^2 \quad (3)$$

نخستین بار دوبوهان و گارنیه [۴] مطابق رابطه (۴) یک جواب خاص برای این معادله دیفرانسیل ارائه کردند:

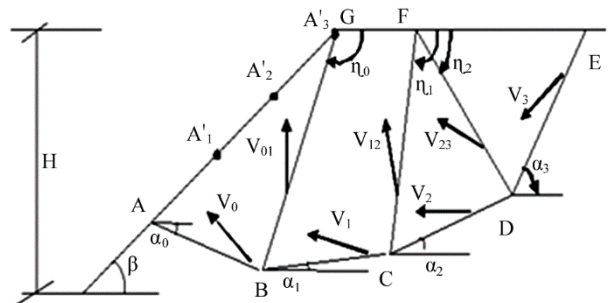
$$z = r \sinh(\theta \tan \varphi + c) + b \quad (4)$$

همچنین پاسخ دیگری توسط فاضلی‌نیا [۵] مطابق رابطه (۵) به شرح زیر ارائه گردید:

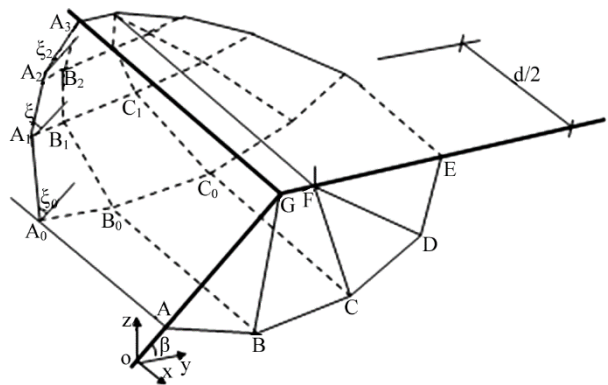
$$z = c \ln \left(\frac{c + \sqrt{c^2 - r^2}}{r} \right) - \sqrt{c^2 - r^2} + c \theta \tan \varphi + b \quad (5)$$

پاسخ سومی نیز در سال ۲۰۰۹ توسط میخالوفسکی [۶] ارائه

می‌شود که در این سطوح به منظور ارضای شرط نرمالیت در معیار موهر-کولمب، زاویه بردار سرعت بر روی سطوح ناپیوستگی سرعت باید برابر با زاویه اصطکاک داخلی خاک باشد. باید توجه داشت که سطوح جانبی بلوک‌ها نیز در تحلیل‌های سه بعدی در زمره ناپیوستگی‌های سرعت می‌باشند و بایستی شرط نرمالیت بر روی این سطوح نیز ارضا گردد (شکل ۲). بدین منظور پس از معلوم شدن مقدار و امتداد بردار سرعت بلوک‌های مختلف، معادله صفحات جانبی هر بلوک به نحوی تعیین می‌گردد که با بردار سرعت آن بلوک زاویه‌ای برابر با زاویه اصطکاک داخلی خاک بسازد.



شکل (۱): جزئیات مربوط به محاسبه مکانیسم انتقالی مطابق با روش فرزانه و عسکری [۸].



شکل (۲): شکل سه بعدی مربوط به مکانیسم انتقالی مطابق با روش فرزانه و عسکری [۸].

نیروهای خارجی در این مکانیسم، وزن بلوک‌ها و مؤلفه افقی نیروی زلزله می‌باشد. کار نیروهای خارجی (E) در میدان سرعت در نظر گرفته شده مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$E = \sum_{k=0}^3 W_k \cdot (V_k)_v + \sum_{k=0}^3 k W_k \cdot (V_k)_h \quad (1)$$

(۶) به دست می‌آید [۱].

$$z = \sqrt{\left(\frac{r_1 - r_2}{2}\right)^2 - \left(r - \frac{r_1 + r_2}{2}\right)^2} \quad (۶)$$

در معادله (۶) شعاع‌های r_1 و r_2 مطابق روابط (۷) و (۸) معادلات دو منحنی اسپیرال لگاریتمی را در صفحه تقارن رویه تشکیل می‌دهند.

$$r_1 = r_0 e^{((\theta - \theta_0) \tan \varphi)} \quad (۷)$$

$$r_2 = cr_0 e^{((\theta_0 - \theta) \tan \varphi)} \quad (۸)$$

اگر از رابطه (۶) نسبت b به θ مشتق بگیریم خواهیم داشت:

$$\frac{\partial z}{\partial r} = \frac{\frac{r_1 + r_2}{2} - r}{z} \quad (۹)$$

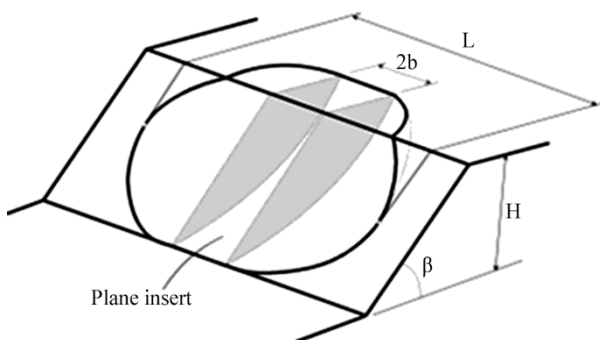
$$\frac{\partial z}{\partial \theta} = \frac{r \left(\frac{r_1 - r_2}{2}\right)}{z} \tan \varphi \quad (۱۰)$$

با قرار دادن روابط (۹) و (۱۰) در معادله (۳) مشخص می‌شود که معادله (۶) به‌عنوان یکی از پاسخ‌های مربوط به معادله دیفرانسیل ارائه شده در رابطه (۳) قابل قبول است [۱].

در حالت کلی، جواب ارائه شده در رابطه (۶) را می‌توان به شکل رابطه (۱۱) نوشت:

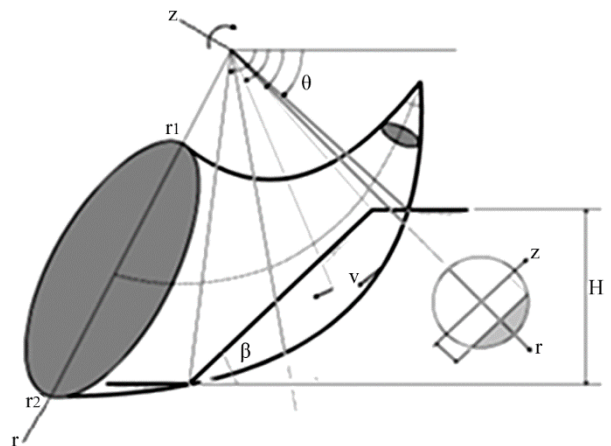
$$z = \sqrt{\left(\frac{r_1 - r_2}{2}\right)^2 - \left(r - \frac{r_1 + r_2}{2}\right)^2} + b \quad (۱۱)$$

پارامتر b به‌عنوان سطح اسپیرال لگاریتمی در شکل (۵) نشان داده شده است [۹].

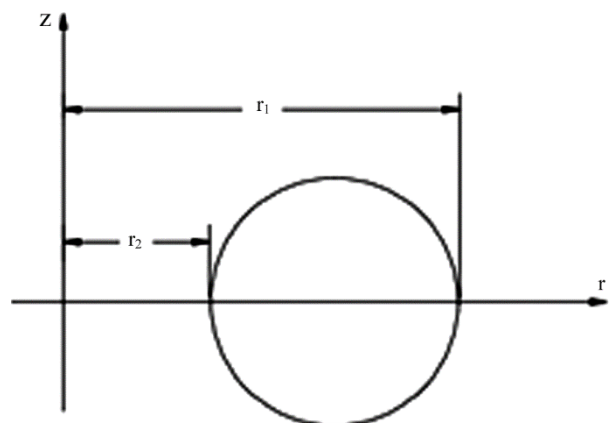


شکل (۵): شکل سه‌بعدی مکانیسم گسیختگی مطابق با روش میخالوفسکی [۶].

شد. میخالوفسکی در مقاله خود معادله صریح این رویه را ارائه نکرده و تنها معادلات لازم برای محاسبه توان نیروهای داخلی و خارجی را معرفی کرده است. در تحقیق حاضر، معادله صریح این رویه به شرحی که در زیر می‌آید به‌دست آمده و با استفاده از آن توان نیروهای داخلی و خارجی محاسبه شده است. در شکل (۳) نمای کلی رویه پیشنهادی توسط میخالوفسکی دیده می‌شود. مطابق شکل (۳) نحوه تشکیل معادله رویه به‌گونه‌ای است که هر مقطع از آن در صفحه $Z-r$ یک دایره می‌باشد. در شکل (۴) مقطعی از شکل (۳) مشاهده می‌گردد.



شکل (۳): شکل مربوط به مکانیسم دورانی مطابق با روش میخالوفسکی [۶].



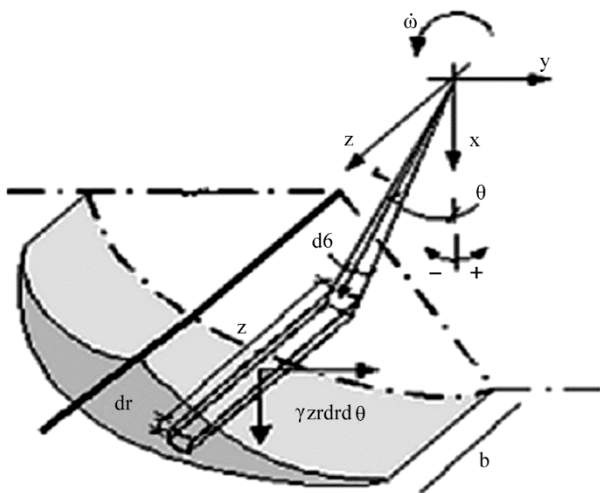
شکل (۴): مقطع دایره‌ای مربوط به مکانیسم دورانی مطابق با روش میخالوفسکی [۱].

در این شکل‌ها با نوشتن معادله مربوط به یک دایره در دستگاه مختصات $Z-r$ ، معادله رویه شیپوری شکل مطابق رابطه

که در آن C_d و ϕ_d به ترتیب ضریب چسبندگی کاهش یافته و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته خاک می‌باشند. با توجه به قضیه مرز بالای تحلیل حدی، با نوشتن روابط (۱۲) و (۱۵) بر حسب C_d و ϕ_d و سپس مساوی قرار دادن این دو رابطه با یکدیگر و در نهایت با جایگزین کردن ϕ_d و C_d با ϕ و C بر حسب رابطه (۱۸)، رابطه (۱۹) حاصل می‌شود.

$$F = \frac{2 \iint C \omega \cos(\tan^{-1}(\frac{\tan \phi}{F})) r ds + 2 \int C \omega \cos(\tan^{-1}(\frac{\tan \phi}{F})) r z dl}{2 \iint \gamma \omega z r^2 \sin \theta dr d\theta + 2 \iint k \gamma \omega z r^2 \cos \theta dr d\theta} \quad (19)$$

بدیهی است که محاسبه F در رابطه فوق نیازمند سعی و خطا خواهد بود.



شکل (۶): جزئیات مربوط به محاسبه توان چرخشی نیروهای داخلی و خارجی [۵].

۴- مقایسه نتایج

با توجه به بررسی‌های انجام شده توسط مؤلفین و مقایسه نتایج مکانیسم دورانی میخالفوسکی [۶] با دو مکانیسم دورانی دیگر (دوبوهان و گارنیه [۴] و فاضلی‌نیا [۵])، مکانیسم میخالفوسکی در اغلب موارد نتایج بهتری ارائه می‌دهد. بنابراین در تحقیق حاضر تنها به مقایسه نتایج مکانیسم دورانی میخالفوسکی با مکانیسم انتقالی فرزانه و عسکری [۸] پرداخته می‌شود. برای مقایسه ضرایب اطمینان

در هر سه پاسخ ارائه شده برای معادله (۳)، b و c ثابت‌های اختیاری بوده و در روند بهینه‌سازی تعیین می‌شوند. با ایجاد مکانیسم (شکل ۶) بر اساس یک میدان سینماتیکی قابل قبول (با ارضای شرط نرمالیه بر روی سطوح ناپیوستگی سرعت)، توان چرخشی نیروهای خارجی (E) مطابق رابطه (۱۲) که شامل توان نیروی وزن توده خاک (W_r) مطابق رابطه (۱۳) و نیز توان نیروی جانبی زلزله (E_{eq}) مطابق رابطه (۱۴) به دست می‌آید؛ توان نیروهای داخلی (D) مطابق رابطه (۱۵) که ناشی از مقاومت برشی در سطوح گسیختگی است، محاسبه می‌شود.

$$E = 2W_r + 2E_{eq} \quad (12)$$

$$W_r = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{r_1(\theta)}^{r_2(\theta)} \gamma \omega z r^2 \sin \theta dr d\theta \quad (13)$$

$$E_{eq} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{r_1(\theta)}^{r_2(\theta)} k \gamma \omega z r^2 \cos \theta dr d\theta \quad (14)$$

$$D = 2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{r_1(\theta)}^{r_2(\theta)} C \omega \cos \phi r ds + 2 \int_{\theta_0}^{\theta_f} C \omega \cos \phi r z dl \quad (15)$$

در روابط بالا γ وزن مخصوص خاک و ω بردار سرعت زاویه‌ای، C ضریب چسبندگی خاک و $z=f(r, \theta)$ معادله سطوح جانبی مکانیسم گسیختگی است که به ترتیب در روابط (۴)، (۵) و (۱۱) تعریف شده‌اند. در رابطه (۱۵) جمله اول انتگرال سطح می‌باشد که توان نیروهای داخلی را بر روی سطوح جانبی محاسبه می‌کند و جمله دوم انتگرال خط می‌باشد که توان نیروهای داخلی را بر روی سطح زیرین مکانیسم (رویه اسپیرال لگاریتمی) به دست می‌دهد. ds و dl نیز به ترتیب با روابط (۱۶) و (۱۷) تعریف می‌شوند.

$$ds = \sqrt{r^2 + (r \frac{\partial z}{\partial r})^2 + (\frac{\partial z}{\partial \theta})^2} dr d\theta \quad (16)$$

$$dl = \sqrt{r^2 + (\frac{dr}{d\theta})^2} d\theta \quad (17)$$

ضریب اطمینان به صورت رابطه (۱۸) تعریف می‌شود:

$$F = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d} = \frac{C}{C_d} \quad (18)$$

برخلاف مکانیسم‌های با عرض محدود، در حالت دو بعدی مکانیسم دورانی نتایج بهتری می‌دهد، اگرچه اختلاف نتایج با افزایش ضریب شتاب زلزله بسیار کم می‌شود. همچنین با توجه به نمودارهای شکل (۷) مشخص است که اختلاف نتایج با کاهش شیب شیروانی برای حالت سه بعدی ($L/H=1$) کمتر شده و از حدود ۲۸ درصد در شیب قائم به ۱۰ درصد در شیب ۳۰ درجه می‌رسد.

جز در مواردی که اشاره شد، به طور کلی با مشاهده نمودار شکل‌های (۷) تا (۹)، نتایج مربوط به مکانیسم‌های دورانی به ازای شیب‌های مختلف و برای ضرایب مختلف شتاب افقی زلزله از نتایج مکانیسم‌های انتقالی بهتر است. با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، (افزایش λ_{pc} از ۲ به ۱۰) اختلاف نتایج دو مکانیسم بیشتر شده، در بیشترین حالت برای شیب قائم و مکانیسم سه بعدی در $k=0/3$ از ۴ درصد به ۲۸ درصد می‌رسد.

در نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۸) و (۹)، اختلاف نتایج مکانیسم‌های انتقالی و دورانی در $\lambda_{pc}=2$ بین حدود ۴ تا ۱۰ درصد و در $\lambda_{pc}=10$ بین ۶ تا ۱۵ درصد در حالت سه بعدی تغییر می‌کند. این امر به دلیل مقاومت بالاتر بلوک‌های تشکیل دهنده مکانیسم انتقالی در خاک‌های دانه‌ای می‌باشد که باعث زیاده‌تر شدن نتایج مکانیسم‌های انتقالی می‌گردد.

مطابق نمودار شکل‌های (۸) و (۹) با افزایش شیب شیروانی نیز اختلاف نتایج دو مکانیسم بیشتر می‌شود، به طوری که در $\lambda_{pc}=2$ از ۵ درصد به ۱۸ درصد و در $\lambda_{pc}=10$ از ۶ درصد به حدود ۲۱ درصد تغییر می‌کند.

نظیر خاک‌های چسبنده با افزایش ضریب شتاب افقی زلزله برای مکانیسم‌های دو بعدی ($L/H=8$) اختلاف نتایج دو مکانیسم کمتر می‌شود. در مکانیسم‌های سه بعدی این روند عکس بوده و اختلاف نتایج دو مکانیسم انتقالی و دورانی بیشتر می‌شود. این مسئله نشان دهنده تأثیر پذیری بیشتر مکانیسم‌های سه بعدی از نوع مکانیسم در زلزله‌های بزرگ می‌باشد.

پایداری شیروانی‌ها تحت اثر وزن توده خاک از پارامتر λ_{pc} مطابق رابطه (۲۰) استفاده می‌شود. همچنین به جای ضریب اطمینان از پارامتر بدون بعد N_s مطابق رابطه (۲۱) استفاده شده و نمودارهای عدد پایداری شیروانی نسبت به ضریب شتاب افقی زلزله ارائه می‌شود:

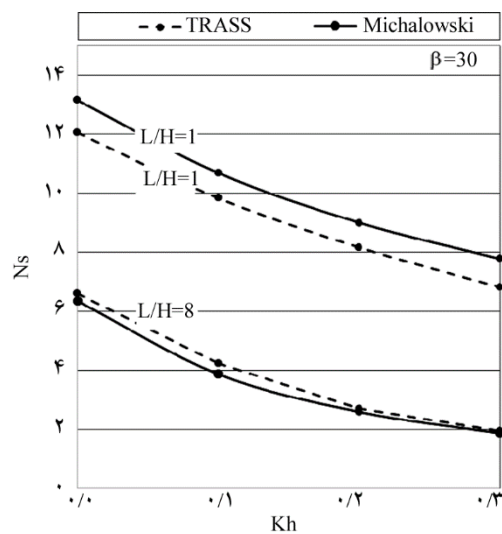
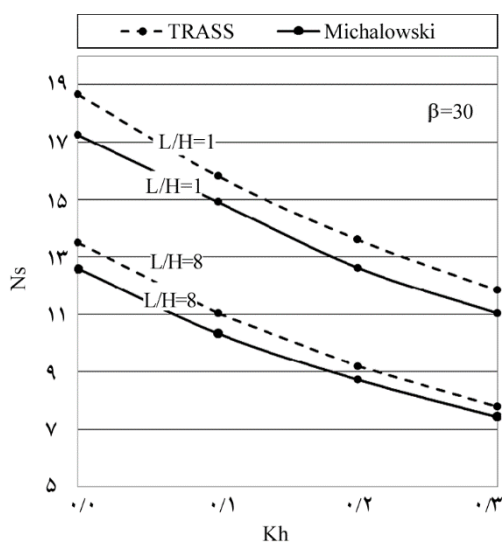
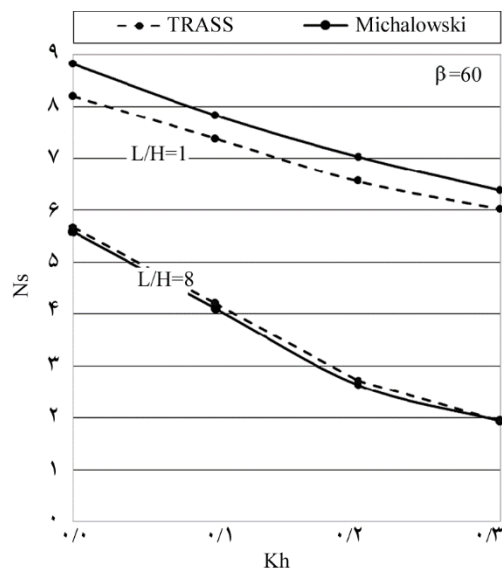
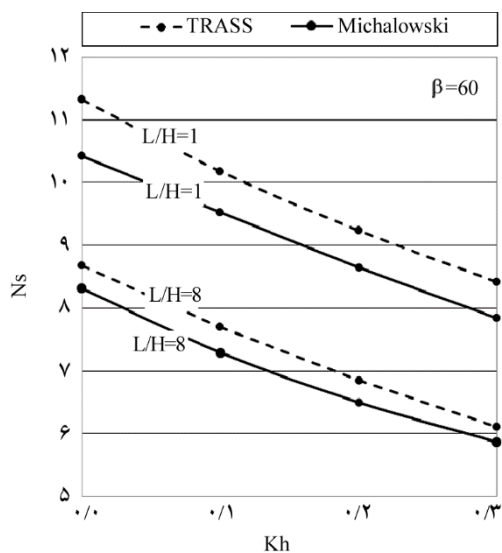
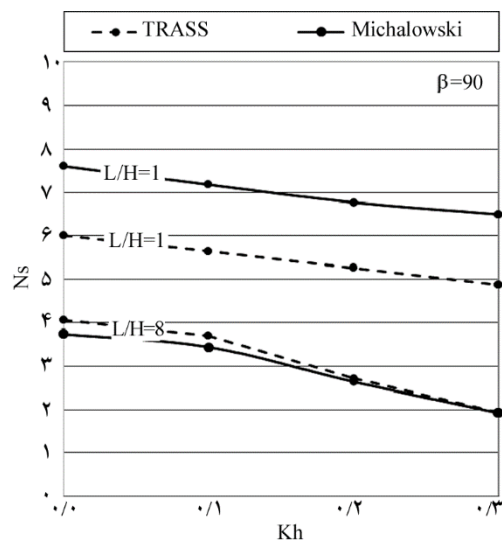
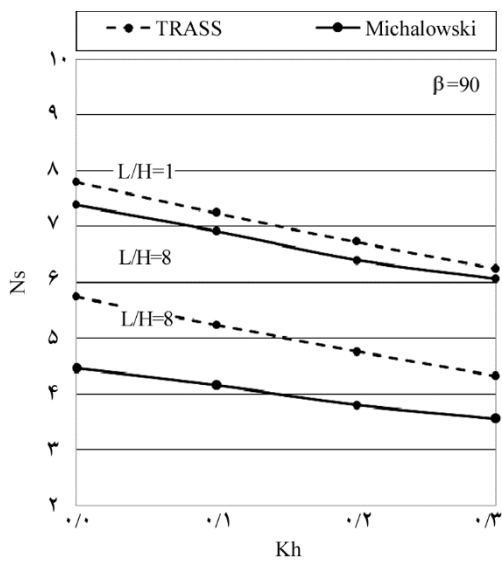
$$\lambda_{pc} = \frac{\gamma H}{c} \tan \phi \quad (20)$$

$$N_s = FS \frac{\gamma H}{c} \quad (21)$$

در روابط بالا H ارتفاع شیروانی، ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک و FS ضریب اطمینان پایداری شیروانی می‌باشد. این مقایسه به ازای شیب‌های مختلف (۳۰، ۶۰، ۹۰ درجه) و نسبت‌های عرض مکانیسم گسیختگی به ارتفاع شیروانی ۸ و ۱ و برای خاک‌های چسبنده ($\lambda_{pc}=0$) و غیر چسبنده ($\lambda_{pc}=0$) در نمودار شکل‌های (۷) تا (۹) انجام شده است. با افزایش پارامتر رفتار خاک به سمت دانه‌ای شدن می‌رود به طوری که در مقادیر $\lambda_{pc}=10$ که در نتایج در نظر گرفته شده، رفتار خاک تقریباً دانه‌ای بوده و در $\lambda_{pc}=2$ خاک رفتاری بین حالت چسبنده و دانه‌ای دارد. همچنین می‌توان چنین ادعان نمود که نتایج $L/H=1$ و $L/H=8$ به ترتیب با رفتار سه بعدی و دو بعدی شیروانی مرتبط است. در این نمودارها L حداکثر پهنای مکانیسم گسیختگی، k_H ضریب شتاب افقی نیروی زلزله و β زاویه شیب شیروانی است. شایان ذکر است که TRASS در شکل‌های ارائه شده، نام نرم‌افزاری است که نتایج مربوط به مکانیسم انتقالی توسط آن به دست آمده است.

همان‌طور که در نمودارهای مربوط به خاک‌های چسبنده در شکل (۷) مشاهده می‌شود، در شیب‌های مختلف و در حالت عرض گسیختگی محدود (سه بعدی، $L/H=1$) نتایج مکانیسم انتقالی از دورانی بهتر است. علت این است که حداکثر عمق مکانیسم در روش میخالوفسکی محدود به قطر دایره مقطع آن است. لذا در این مکانیسم امکان پیشروی در عمق به منظور دستیابی به نتایج بهتر میسر نیست.

با بیشتر شدن عرض مکانیسم گسیختگی ($L/H=8$) نتایج دو مکانیسم انتقالی و دورانی بسیار نزدیک می‌شوند و



شکل (۸): تغییرات ضریب پایداری شیروانی نسبت به تغییرات kh مربوط به $\lambda_{qc}=2$ و به‌ازای شیب‌های مختلف.

شکل (۷): تغییرات ضریب پایداری شیروانی نسبت به تغییرات kh مربوط به $\lambda_{qc}=0$ و به‌ازای شیب‌های مختلف.

به طور کلی میزان اختلاف نتایج بین دو مکانیسم در خاک‌های دانه‌ای با بیشتر شدن عرض مکانیسم گسیختگی تغییر محسوس نمی‌کند، حال آنکه در خاک‌های چسبنده، این اختلاف کاهش یافته و از ۳۳ درصد در $k_{II}=0.3$ به ۲ درصد در حالت دو بعدی می‌رسد.

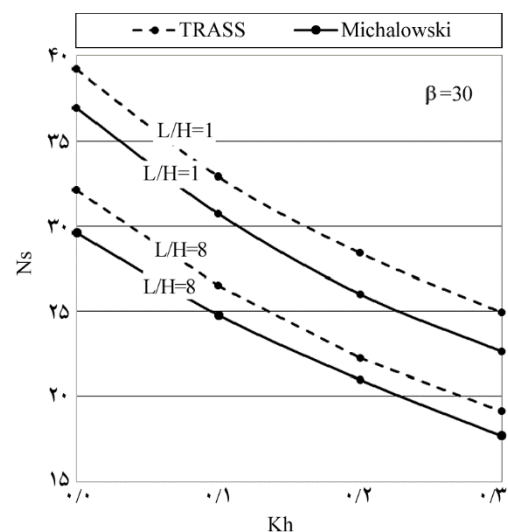
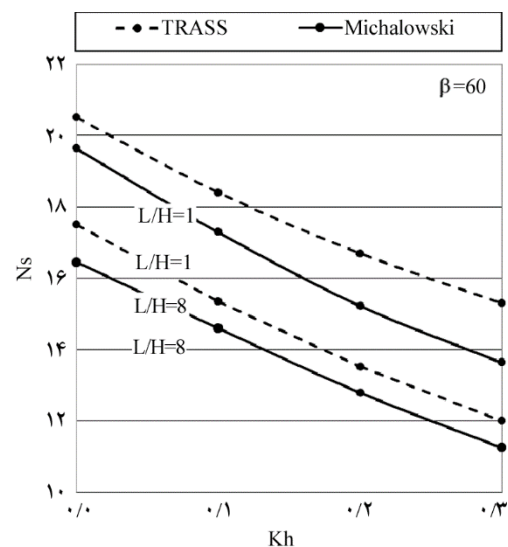
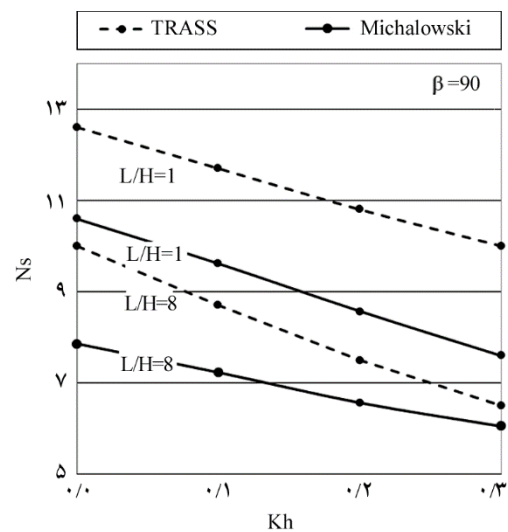
فارغ از نوع مکانیسم مورد بررسی، در ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف بر عدد پایداری شیروانی‌های بررسی شده، با توجه به نمودار شکل‌های (۷) تا (۹) می‌توان به نکات کلی زیر اشاره کرد:

الف) با افزایش ضریب شتاب افقی زلزله k_{II} (از ۰ تا ۰/۳)، عدد پایداری شیروانی کاهش می‌یابد. این کاهش برای خاک‌های چسبنده و شیب ۳۰ درجه در حالت دو بعدی حدود ۶۹ درصد و در حالت سه‌بعدی حدود ۴۰ درصد و برای خاک‌های دانه‌ای و شیب قائم در حالت دو بعدی حدود ۳۵ درصد و در حالت سه‌بعدی حدود ۲۰ درصد است. این نتایج بیانگر تأثیر بیشتر زلزله بر خاک‌های چسبنده و شیب‌های خوابیده است.

ب) با افزایش عرض مکانیسم گسیختگی، عدد پایداری شیروانی کاهش یافته و در مقادیر بزرگ‌تر k_{II} ، این کاهش محسوس‌تر می‌شود. این مسئله بیانگر تأثیرپذیری بیشتر زلزله بر مکانیسم‌های دو بعدی است. برای مثال در خاک‌های چسبنده و شیب ۳۰ درجه این کاهش در $k_{II}=0$ حدود ۵۱ درصد و در $k_{II}=0.3$ حدود ۷۱ درصد می‌باشد.

ج) عدد پایداری شیروانی در مکانیسم‌های سه‌بعدی بیش از حالت دو بعدی است، دلیل این امر افزایش مقاومت داخلی خاک به دلیل نمود بیشتر سطح صفحات جانبی نسبت به سطح اسپیرال لگاریتمی در مکانیسم سه‌بعدی است.

د) میزان اختلاف عدد پایداری شیروانی بین مکانیسم‌های دو بعدی و سه‌بعدی در خاک چسبنده بیشتر از خاک دانه‌ای است. این امر به دلیل اختلاف عمق گسیختگی نسبتاً زیاد مکانیسم در خاک چسبنده در حالت دو بعدی نسبت به حالت سه‌بعدی و در نتیجه تأثیرپذیری بیشتر از صفحات جانبی



شکل (۹): تغییرات ضریب پایداری شیروانی نسبت به تغییرات kh مربوط به $\lambda_{qc}=10$ و به‌ازای شیب‌های مختلف.

شیب شیروانی اختلاف نتایج دو مکانیسم انتقالی و دورانی بیشتر می‌شود.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر در ارتباط با مطالعات تحلیل سه‌بعدی پایداری شیروانی‌های خاکی در حالات استاتیکی و لرزه‌ای و بخشی از نتایج یک پایان‌نامه کارشناسی ارشد در دانشکده فنی دانشگاه تهران است. این مطالعات در راستا و ادامه پروژه کد ۵۸۹ در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به انجام رسیده است. بدین وسیله از حمایت هر دو نهاد مزبور در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

1. Amirloo, B. (2017) *Analysis of Three-Dimensional Soil Slopes Stability Based on Upper Bound Limit Analysis Using Rotational Failure Mechanisms*. Master's Thesis, University of Tehran, Iran (In Persian).
2. Askari, F. (1999) *Three-Dimensional Analysis of Homogeneous and Nonhomogeneous Slopes in Static and Dynamic Mode Using Upper Bound Theorem of Limit Analysis*. Ph.D. Dissertation Thesis, University of Tehran, Iran (in Persian).
3. Giger, M.W. & Krizek, R.J. (1975) Stability analysis of vertical cut with variable corner angle. *Soils and Foundation*, **15**(2), 63-71.
4. DeBuhan, P. and Garnier, D. (1998) Three dimensional bearing capacity analysis of a foundation near a slope. *Soil and Foundations*, **38**(3), 153-163.
5. Fazelinia, M. (2006) *Analysis of Three-Dimensional Slopes Stability Based on Rotational Failure Mechanisms*. Master's Thesis, University of Tehran, Iran (in Persian).
6. Michalowski, R.L. and Drescher, A. (2009) Three-dimensional stability of slopes and excavations. *Geotechnique*, **59**(10), 839-850.
7. Michalowski, R.L. (1989) Three-dimensional analysis

می‌باشد. هرچه عمق مکانیسم بیشتر باشد، تأثیر صفحات جانبی و در نتیجه افزایش مقاومت داخلی خاک به تبع آن افزایش خواهد یافت. در خاک‌های دانه‌ای عمق مکانیسم گسیختگی در حالت دو بعدی و سه‌بعدی نزدیک بوده و در نتیجه اختلاف عدد پایداری شیروانی در این خاک‌ها تنها ناشی از تأثیر بیشتر صفحات جانبی در مکانیسم سه‌بعدی بر افزایش مقاومت داخلی خاک می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر مقایسه‌ای برای تحلیل نتایج پایداری شیروانی‌های خاکی در برابر زلزله بر مبنای روش تحلیل حدی مرز بالا با استفاده از مکانیسم‌های گسیختگی سه‌بعدی دورانی و انتقالی انجام شده است. در ادامه تحقیقات مربوط به پایداری سه‌بعدی شیروانی‌های خاکی به روش مرز بالا با استفاده از مکانیسم‌های انتقالی و دورانی، تحقیق حاضر به مقایسه نتایج حاصل از یک مکانیسم انتقالی با یک مکانیسم دورانی که الگوریتم آن در این تحقیق بر اساس حل نهایی میخالوفسکی و به روشی ساده‌تر تدوین شده است، می‌پردازد. تحلیل سه‌بعدی شیروانی‌ها و تأثیر هندسی سه‌بعدی مسئله بر نیروهای لرزه‌ای و مقایسه آن با شرایط دو بعدی می‌تواند در تطبیق نتایج روش‌های موجود و دستیابی به نتایج واقعی‌تر بسیار سودمند باشد. برخی از مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر بوده است:

- ۱- به‌طور کلی در تحلیل پایداری شیروانی‌ها، اهمیت تحلیل‌های سه‌بعدی در حالت لرزه‌ای نسبت به حالت استاتیکی بیشتر است.
- ۲- روند تغییرات ضریب پایداری شیروانی با افزایش ضریب زلزله برای دو حالت مکانیسم دورانی و انتقالی تقریباً مشابه می‌باشد.
- ۳- جز در خاک‌های چسبنده و مکانیسم‌های سه‌بعدی، در سایر موارد ضریب اطمینان حاصل از مکانیسم‌های انتقالی از ضریب اطمینان به‌دست آمده از مکانیسم‌های دورانی بیشتر است (در نتیجه از جواب‌های واقعی دورتر است).
- ۴- اختلاف نتایج دو مکانیسم انتقالی و دورانی در خاک‌های چسبنده کمتر و در خاک‌های دانه‌ای بیشتر است. با افزایش

- of locally loaded slopes. *Geotechnique*, London, **39**(1), 27-38.
8. Farzaneh, O. and Askari, F. (2003) Three-dimensional analysis of nonhomogeneous slopes. ASCE, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **129**(2), 137-145.
 9. Chen, W.F. and Liu (1990) *Limit Analysis in Soil Mechanics*, Elsevier Science Publishers, B.V.