

تحلیل پایداری سه بعدی شیروانی‌ها بر اساس مکانیسم گسیختگی چرخشی

فرج اله عسکری^{۱*}، اورنگ فرزانه^۲ و مسعود فاضلی نیا^۳

^۱استادیار پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

^۲استادیار دانشکده عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

^۳دانش آموخته کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۰/۱۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۱۰/۲۵، تاریخ تصویب ۸۸/۲/۲۰)

چکیده

در این مقاله بر مبنای روش تحلیل حدی مرز بالا به بررسی سه بعدی پایداری شیروانی‌ها بر اساس مکانیسم گسیختگی چرخشی پرداخته شده است. برای سطح زیرین مکانیسم گسیختگی از یک روبه اسپیرال لگاریتمی استفاده شده است. سطوح جانبی مکانیسم گسیختگی با حل یک معادله دیفرانسیل غیر خطی به دست می‌آید که یک جواب ممکن این معادله در این بررسی استفاده شده است. در این تحقیق الگوریتمی تهیه شده است که با استفاده از آن می‌توان کمترین ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌ها را محاسبه کرد. همچنین در این الگوریتم امکان محاسبه کوچک‌ترین مقدار بارحدی پی‌ها با بار خارج از مرکز که روی شیروانی‌ها واقع شده‌اند گنجانده شده است. نتایج حاصل از این تحقیق به صورت نمودارهای بدون بعد ارائه شده که با استفاده از آنها می‌توان ظرفیت باربری پی‌های سطحی واقع روی شیروانی‌های خاکی را در شرایط مختلف هندسه مسئله و خصوصیات خاک تعیین نمود.

واژه های کلیدی: پی‌های سطحی، تحلیل حدی مرز بالا، شیروانی‌های خاکی، تحلیل سه‌بعدی، مکانیسم گسیختگی چرخشی

مقدمه

میخالفسکی (۱۹۸۹) اشاره کرد [۳ و ۲]. عسکری در سال ۱۹۹۹ با توسعه و اصلاح روش میخالفسکی، پاسخ های وی را بهبود بخشید، نرم افزاری را با عنوان TRASS تهیه کرد [۵ و ۴]. این برنامه با روش تحلیل حدی مرز بالا و استفاده از مکانیسم لغزشی متشکل از بلوک‌های صلب با حرکت انتقالی به تحلیل پایداری شیروانی‌ها در حالات مختلف می‌پردازد. این مکانیسم در عین حال که قادر است ناپایداری را با اثر بارهای قائم یا مایل مرکزی مدل کند، در زمینه پی‌های تحت اثر بارهای خارج از مرکز محدودیت دارد.

رفع این محدودیت مستلزم استفاده از مکانیسم گسیختگی چرخشی است. برای این منظور در این تحقیق با توسعه الگوریتم ارائه شده در سال ۱۹۹۸ توسط دوبوهان و گارنیه [۶]، به ایجاد چنین مکانیسمی پرداخته شده است.

مبانی روش تحلیل حدی

اغلب یافتن مقدار بار حدی در مسائل پایداری با حل همزمان معادلات تعادل، معادلات رفتاری و معادلات

تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی، یکی از مسائل اساسی علم مکانیک خاک است که به طور معمول با فرض شرایط کرنش مسطح و به صورت دو بعدی انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر فرض می‌شود که طول مکانیسم گسیختگی نامحدود بوده و شرایط کرنش صفحه ای برقرار است. این فرض در برخی شرایط بسیار دور از واقعیت است. در این تحقیق با در نظر گرفتن یک مکانیسم گسیختگی سه بعدی، مسئله پایداری شیروانی‌ها بررسی می‌شود.

در زمینه تحلیل شیروانی‌ها اغلب از سه روش تعادل حدی^۱، خطوط مشخصه^۲ و تحلیل حدی^۳ استفاده شده است. روش تحلیل حدی یکی از قدرتمندترین روش‌های حل مسائل در علم مکانیک خاک است که شامل دو روش مرز بالا و مرز پایین است و در آن جایگاه واقعی جواب نسبت به جواب واقعی کاملاً مشخص است. از جمله محققانی که با استفاده از روش تحلیل حدی مرز بالا به بررسی مسئله پایداری شیروانی‌ها به صورت سه بعدی پرداخته اند، می‌توان به گیگر و کریزک (۱۹۷۵ و ۱۹۷۶) و

در قضیهٔ مرز بالا، مسائل با لحاظ کردن شرایط سینماتیکی حل می‌شوند. در این قضیه با در نظر گرفتن یک میدان سرعت فرضی و مساوی قرار دادن نمو کار 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 تأمین 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 کرد. در مسائلی که جواب دو روش یکسان باشد، جواب درست به دست آمده است. بدین ترتیب در این روش جایگاه هر جواب نسبت به پاسخ واقعی مسئله و اضافی یا نقصانی بودن تقریب به طور کامل مشخص است. مزیت اصلی روش تحلیل حدی نیز در همین نکته است.

روش تحلیل سه بعدی در تحقیق حاضر

مکانیسم گسیختگی در این روش سه سطح دارد (شکل ۱). این سطوح شامل یک سطح زیرین و دو سطح جانبی است که سطوح جانبی نسبت به مرکز شیروانی قرینه هستند.

در روش تحلیل حدی مرز بالا، این سطوح باید به گونه‌ای باشند که بردار سرعت با سطح لغزش، زاویه‌ای برابر زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک (φ) بسازد. به همین دلیل برای سطح زیرین مکانیسم (سطح $n'n$) در شکل ۱) از رویهٔ استوانه‌ای با مقطع اسپیرال لگاریتمی^۶ (رابطه ۲) استفاده شده است:

$$r = r_0 \exp[(\theta - \theta_0) \tan \varphi] \quad (2)$$

سطوح جانبی در مختصات استوانه‌ای به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$z = f(r, \theta) \quad (3)$$

بردار \underline{N} در هر نقطه از این سطوح به این صورت تعریف می‌شود:

$$\underline{N} = \frac{\partial f}{\partial r} \underline{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \underline{e}_\theta - \underline{e}_z \quad (4)$$

که در این رابطه \underline{e}_r ، \underline{e}_θ و \underline{e}_z بردارهای یکه متعام در هر نقطه روی سطوح جانبی است. با فرض اینکه زاویه بین بردار سرعت و سطح گسیختگی در روش تحلیل حدی مرز بالا برابر زاویه اصطکاک داخلی خاک φ است می‌توان این رابطه را نوشت:

سازگاری دشوار بوده و به همین دلیل، وجود روش‌های تقریبی برای تخمین بارهای حدی در این گونه مسائل ضرورت یافته است. این روش‌ها به روش‌های حدی موسوم‌اند که روش تحلیل حدی از دقیق‌ترین آنها است. این روش که در قالب "قضایای حدی" مطرح شده است، تعمیم اصل "کار خمیری حداکثر" است. اصل مزبور را هیل (Hill) در سال ۱۹۴۸ مطرح کرد. پس از وی دراکر (Drucker)، گرین برگ (Greenberg) و پراگر (Prager) در سال ۱۹۵۲ با تعمیم اصل هیل، قضایای حدی را ارائه کردند.

فرضیه‌های 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^۴ نامیده می‌شود، بیان می‌گردد. نمایش این تابع در فضای تنش‌های اصلی به سطح تسلیم موسوم است.

ج- رفتار خمیری مصالح تابع قانون جریان وابسته^۵ است. به عبارت دیگر:

$$\varepsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial F(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \quad \lambda \geq 0 \quad ; \quad (1)$$

در این رابطه، ε_{ij}^p تانسور نمو یا سرعت تغییر شکل نسبی خمیری و σ_{ij} تانسور تنش و λ تابعی اسکالر و غیر منفی است.

در قضیهٔ مرز پایین، مسئله با تعریف میدان‌های تنش فرضی حل می‌شود. میدان تنش فرضی مورد استفاده باید شرایط ذیل را تأمین کند:

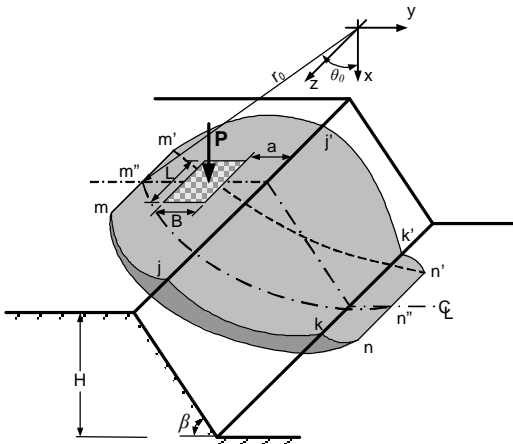
الف- معادلات تعادل

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» تأمین 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.

$$\dot{D} = CvA \cos \varphi \quad (10)$$



شکل ۱: مکانیسم گسیختگی چرخشی سه بعدی استفاده شده در تحقیق حاضر.

$$e_{\theta} \cdot \underline{N} = |N| \sin \varphi \quad (5)$$

با ساده کردن رابطه بالا خواهیم داشت:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta}\right)^2} \sin \varphi \quad (6)$$

و یا

$$\tan^2 \varphi \left(1 + \left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)^2\right) = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta}\right)^2 \quad (7)$$

تعیین معادله سطوح کناری مکانسیم لغزش (سطوح m'j'k'n' و mjkn در شکل ۱) مستلزم حل معادله دیفرانسیل بالا است. دوبرهان و گارنیه یک جواب خاص برای معادله دیفرانسیل بالا را به صورت رابطه زیر ارائه کرده اند.

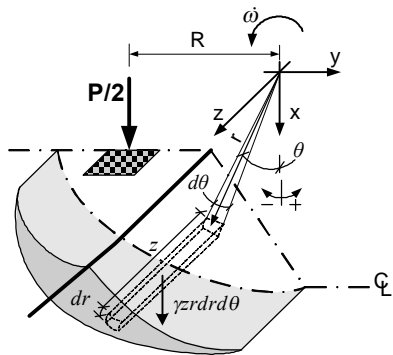
$$z = r \sinh(\theta \tan \varphi + c) + b \quad (8)$$

که در آن c و b ثابت‌های اختیاری هستند. در این روش با تشکیل مکانسیم گسیختگی، کار نیروهای خارجی که شامل وزن توده خاک و بار وارد بر شیروانی است و کار نیروهای داخلی که ناشی از تنش مقاومت برشی در سطوح گسیختگی (تابع چسبندگی و اصطکاک داخلی) است، حول مرکز دوران محاسبه می شود. با مسای قرار دادن کار داخلی و خارجی، یک جواب مرز بالا برای ظرفیت باربری شالوده به دست می آید. با تغییر پارامترهای موجود نظیر مختصات مرکز دوران، نقطه شروع مکانسیم و همچنین پارامترهای ثابت موجود در معادله سطوح جانبی، کوچک ترین جواب مرز بالا تعیین می شود. اگر P بار شالوده و R فاصله آن تا مرکز دوران باشد، با فرض قرار داشتن دستگاه مختصات xoy در صفحه تقارن مکانسیم گسیختگی (شکل ۲)، کار نیروهای خارجی (\dot{W}_{γ}) را برای کل مکانسیم می توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{W}_{\gamma} = PR \dot{\omega} + 2 \iint \gamma \dot{\omega} z r^2 \sin \theta dr d\theta \quad (9)$$

که در آن $z = f(r, \theta)$ معادله سطوح جانبی مکانسیم گسیختگی است که f در رابطه (۸) تعریف شده است. γ وزن مخصوص خاک و $\dot{\omega}$ بردار سرعت زاویه ای اسلا. ضریب ۲ نیز به دلیل قرینه بودن سطوح جانبی است.

اگر A مساحت سطح ناپیوستگی سرعت، v بردار سرعت روی سطح ناپیوستگی، C ضریب چسبندگی و φ زاویه اتساع سطوح ناپیوستگی سرعت باشد، نمو کار داخلی روی این سطوح به صورت زیر تعریف می شود:



شکل ۲: جزییات مربوط به محاسبه ظرفیت باربری پی واقع بر روی شیروانی.

به این ترتیب کار نیروهای داخلی روی سطوح ناپیوستگی در این تحقیق برابر است با:

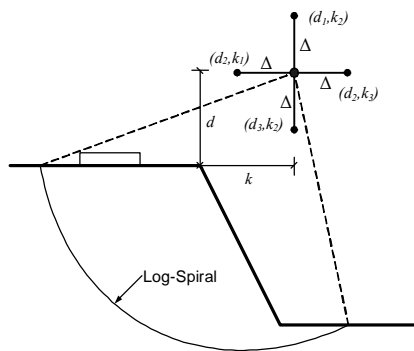
$$\dot{D} = 2 \iint C \dot{\omega} \cos \varphi r ds + 2 \int C \dot{\omega} \cos \varphi r z dl \quad (11)$$

در این رابطه جمله اول انتگرال سطح است که کار نیروهای داخلی را بر روی سطوح جانبی محاسبه می کند و جمله دوم انتگرال خط است که کار نیروهای داخلی بر روی سطح زیرین مکانسیم (رویه اسپیرال لگاریتمی) را به دست می دهد. در رابطه ۱۰، C ضریب چسبندگی خاک است و ds و dl نیز به صورت زیر تعریف می شوند:

$$ds = \sqrt{r^2 + r^2 \left(\frac{\partial z}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \theta}\right)^2} dr d\theta \quad (12)$$

$$dl = \sqrt{r^2 + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2} d\theta \quad (13)$$

بهینه یابی ادامه می‌یابد تا سرانجام محل مرکز دوران مکانیسمی که کمترین پاسخ را دارد به دست آید.



شکل ۳: نحوه تغییر مرکز دوران مکانیسم گسیختگی.

مقایسه نتایج تحلیل‌ها با نتایج سایر محققان

مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم تدوین شده در دو حالت دو بعدی و سه بعدی انجام شده است.

الف - مقایسه ظرفیت باربری در حالت دوبعدی

در سال ۱۹۹۰ ناریتا و یاماگوچی با استفاده از سطح لغزش اسپیرال لگاریتمی به بررسی ظرفیت باربری پی‌های واقع بر شیب با بار بدون خروج از مرکز پرداختند. ایشان با استفاده از روش مرز بالای تحلیل حدی، ظرفیت باربری اینگونه پی‌ها را در حالت دو بعدی در شرایط مختلف بررسی کرده و نتایج کار خود را به صورت حلی بسته ارائه داده اند [۷]. در جدول (۱) مقایسه ای بین نتایج به دست آمده توسط ناریتا و یاماگوچی و تحقیق حاضر انجام شده است. نتایج حاصل از تحقیق حاضر تطابق قابل قبولی با نتایج ناریتا و یاماگوچی دارد. بر اساس جدول (۱)، جز در حالت $C/\gamma B=1$ ، $\phi=30^\circ$ ، $\beta=30^\circ$ ، $a/B=4$ در سایر موارد، نتایج تحقیق حاضر از نتایج این محققان کمتر است. از آن جا که مکانیسم گسیختگی در هر دو روش یکسان است، اختلاف نتایج، ناشی از محاسبه به صورت عددی در تحقیق حاضر نسبت به حل بسته ناریتا و یاماگوچی است.

ب - مقایسه ظرفیت باربری در حالت سه بعدی

هانسن با استفاده از ترکیبی از روش خطوط مشخصه و روش تعادل حدی ظرفیت باربری پی‌ها را محاسبه کرده است [۸].

برای تعیین ظرفیت باربری شالوده نزدیک شیروانی در این تحقیق با مساوی قرار دادن روابط (۹) و (۱۱) مقدار P به دست می‌آید و با تقسیم آن بر مساحت پی، مقدار ظرفیت باربری آن محاسبه می‌شود.

ضریب اطمینان در مسائل پایداری شیروانی به صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شود:

$$F = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_d} = \frac{C}{C_d} \quad (14)$$

که C_d و φ_d در این رابطه به ترتیب ضریب چسبندگی کاهش یافته و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته خاک است با توجه به قضیه مرز بالای تحلیل حدی، با نوشتن روابط (۹) و (۱۱) 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 با C_d و φ بر حسب رابطه (۱۴)، رابطه (۱۵) حاصل می‌شود.

$$F = \frac{2 \iint C \dot{\omega} \cos(\varphi_d) r ds + 2 \int C \dot{\omega} \cos(\varphi_d) r z dl}{PR \dot{\omega} + 2 \iint \gamma \dot{\omega} z r^2 \sin \theta dr dz} \quad (15)$$

که در رابطه فوق φ_d به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varphi_d = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \varphi}{F} \right) \quad (16)$$

بدیهی است که محاسبه F در رابطه (۱۵) نیازمند سعی و خطا خواهد بود.

نحوه بهینه سازی مکانیسم گسیختگی

بهینه سازی در الگوریتم تحقیق حاضر با تغییر مکان مرکز دوران در دو راستای متعامد افقی و قائم، تغییر شعاع دوران مکانیسم و تغییر ثابت های مربوط به صفحات جانبی (b و c در رابطه ۸) انجام می‌گیرد. با توجه به اینکه فاصله افقی مرکز دوران اولیه تا لبه شیب با k و فاصله قائم آن با d نشان داده شود، بسته به جهات تغییر مکان در دو امتداد ذکر شده، چهار حالت نشان داده شده در شکل (۳) را خواهیم داشت. در هر یک از این نقاط با بهینه سازی پارامترهای تعریف شده در فوق، کمترین بار حدی و یا کوچکترین ضریب اطمینان محاسبه می‌شود. سپس نتایج به دست آمده مقایسه می‌شوند و کمترین آنها به عنوان پاسخ بهینه معرفی می‌شود.

در این مرحله با اختیار نمودن مرکز دورانی که دارای پاسخ بهینه است و تکرار الگوریتم ذکر شده، روند

جدول ۱: مقایسه نتایج ناریتا و یاماگوچی و تحقیق حاضر.

$C/\gamma B$	ϕ	β	a/B	$q/\gamma B$	
				Narita et al.	Current
25	0	30	0	107.0	100
5				21.1	19.9
1				3.94	3.72
0.5				--	0.53
25	30	30	0	499.9	419
5				92.3	85
1				20.7	19.4
0.5				11.7	10.8
1	30	30	15	35.2	33.2
			30	20.7	19.4
			45	12.1	11.3
			60	7.11	6.4
1	30	30	0.5	24.5	23.1
			1	28.6	27.1
			2	35.5	34.5
			4	49.6	52.4

با استفاده از مشتق‌گیری و حل بسته به دست آمده است، در زمره کوچک‌ترین جواب‌های موجود برای شیروانی‌های همگن در حالت دو بعدی است.

در جدول (۳) مقایسه ای بین نتایج حاصل از الگوریتم حاضر با ضرایب پایداری چن ارائه شده است. ملاحظه می شود که این اختلاف در جواب ها بسیار ناچیز است (حداکثر ۰.۴٪) و در مجموع هر دو روش تطابق خوبی در جواب‌های به دست آمده دارند.

جدول ۲: مقایسه نتایج هانسن و تحقیق حاضر.

$C/\gamma B$	ϕ	β	$q/\gamma B$			
			$e/B=0.1$		$e/B=0.25$	
			Hansen	Current	Hansen	Current
25	0	45	109.2	119.4	101.5	87.0
5			21.9	23.7	20.3	17.3
1			4.37	4.64	4.06	3.41
0.5			2.18	2.14	2.03	1.67
1	0	30	4.93	5.45	4.63	3.51
		45	4.37	4.64	4.06	3.41
		60	3.86	3.87	3.55	3.25
25	30	45	774.8	799.0	681.1	537.3
5			155.0	156.9	136.3	108.7
1			31.1	31.5	27.3	23.3
0.5			15.6	16.3	13.7	12.3
1	30	30	36.7	52.4	32.0	30.7
		45	31.1	31.5	27.3	23.3
		60	26.5	20.4	23.2	17.0

جدول ۳: مقایسه ضریب پایداری N_s در تحلیل های چن و تحقیق حاضر.

β	ϕ	0	10	20	30	40
		30	Chen	5.53	13.50	41.22
	Current	5.52	13.21	41.22	--	--
60	Chen	5.25	7.26	10.39	16.04	28.91
	Current	5.38	7.10	9.94	15.99	28.81
90	Chen	3.87	4.40	5.50	6.42	8.29
	Current	3.83	4.58	5.19	6.69	7.91

د-مقایسه ضریب اطمینان پایداری شیروانی در حالت سه بعدی

در این بخش مقایسه میان نتایج تحلیل های سه

در جدول (۲) مقایسه ای بین ظرفیت باربری پی مربع شکل ($L/B=1$) با بار خارج از مرکز، واقع بر لبه شیروانی ($a/B=0$)، که با روش هانسن و تحلیل حاضر محاسبه شده اند، انجام پذیرفته است. در تحقیق حاضر، به دلیل استفاده از مکانیسم چرخشی، در حالتی که خروج از مرکزیت بار زیاد است، ظرفیت باربری به دست آمده بهتر از مقادیر روش هانسن است (حداکثر ۳۷٪ کمتر). با توجه به استفاده از روش تحلیل حدی مرز بالا در تحقیق حاضر، در حالتی که نتایج روش هانسن کمتر هستند، نمی توان درباره مزیت یک روش نسبت به روش دیگر قضاوت کرد.

ج-مقایسه ضریب اطمینان پایداری شیروانی در حالت دو بعدی

چن (Chen) در سال ۱۹۷۵ با استفاده از مکانیسم اسپیرال لگاریتمی و روش مرز بالا در تحلیل حدی، ضرایب پایداری (N_s) را برای شیب‌های مختلف در حالت دوبعدی ارائه کرده است [۹].

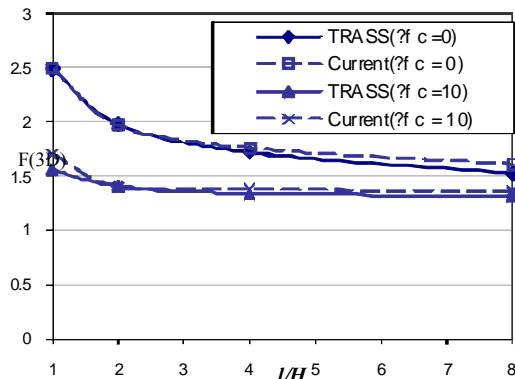
ضریب پایداری در تحلیل های پایداری چن به این شکل تعریف می‌شود:

$$N_s = \frac{\gamma H_c}{C} \quad (۱۲)$$

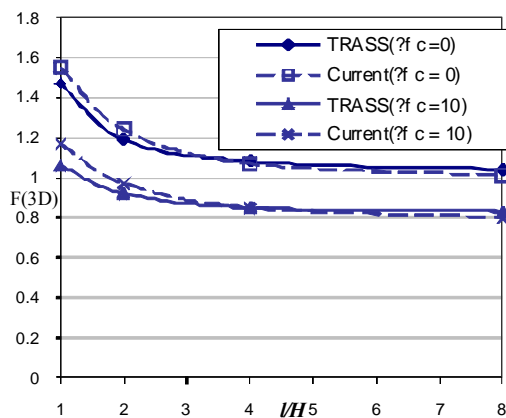
در این رابطه، H_c ارتفاع بحرانی شیروانی (حداکثر ارتفاع پایدار) است. ضرایب پایداری محاسبه شده توسط چن برای مقادیر مختلف ϕ ارائه شده است. این ضرایب که

شده است. با بررسی نمودارهای ارائه شده، ملاحظه می‌شود که:

- در خاک‌های دارای اصطکاک زیاد، با افزایش شیب شیروانی، اثر خروج از مرکز بار کاهش می‌یابد.
- با افزایش مقدار $\gamma B/C$ ، اثر خارج از مرکز بودن بار بر روی ظرفیت باربری افزایش می‌یابد.
- نرخ کاهش ظرفیت باربری، با افزایش میزان خارج از مرکز بودن بار کاهش می‌یابد.



شکل ۵: مقایسه ضریب اطمینان سه بعدی به دست آمده از برنامه TRASS و تحقیق حاضر در شیب $\beta=45^\circ$.



شکل ۶: مقایسه ضریب اطمینان سه بعدی به دست آمده از برنامه TRASS و تحقیق حاضر در شیب $\beta=90^\circ$.

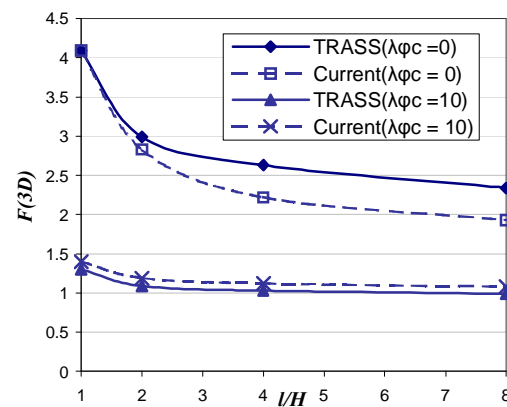
جمع بندی و نتیجه گیری

در مقاله حاضر، الگوریتمی بر مبنای روش مرز بالای تحلیل حدی برای تعیین ظرفیت باربری پی‌ها با بار خارج از مرکز واقع بر شیروانی و همچنین محاسبه ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌ها ارائه شده است. این الگوریتم با مدل کردن مکانیسم سه بعدی به صورت چرخشی و بهینه سازی آن، کم‌ترین بار حدی پی و یا کوچک‌ترین

بعدی انجام شده با برنامه TRASS با تحلیل حاضر ارائه شده است. مکانیسم بالا شامل بلوک‌های صلب با حرکت صرف انتقالی است. برای مقایسه ضرایب اطمینان پایداری شیروانی‌ها تحت اثر وزن توده خاک از پارامتر $\lambda_{\phi c}$ استفاده می‌شود.

$$\lambda_{\phi c} = \frac{\gamma H}{C} \tan \varphi \quad (17)$$

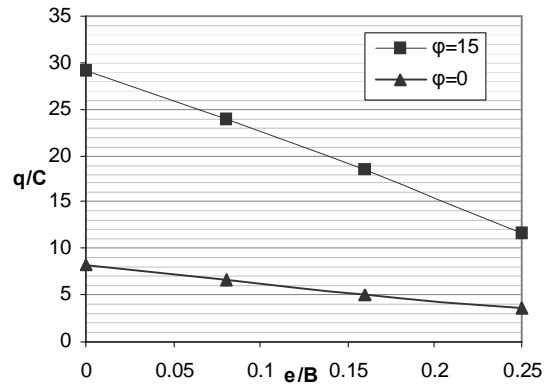
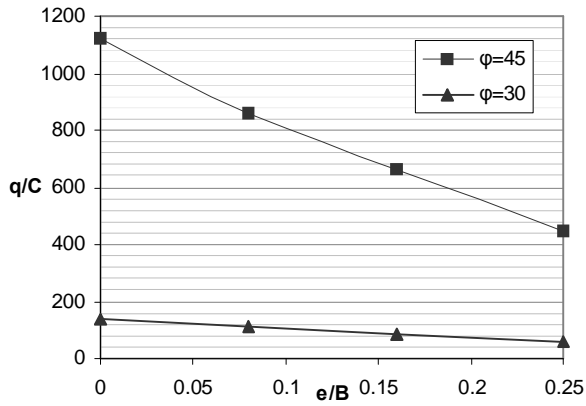
این مقایسه در حالات مختلف شیب و برای خاک‌های چسبنده و دانه‌ای در شکل‌های (۴) و (۵) و (۶) انجام شده است. ملاحظه می‌شود که میزان اختلاف مابین نتایج در اکثر موارد کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. همچنین در خاک‌های چسبنده و در شیب شیروانی کم که مکانیسم گسیختگی از نوع چرخشی است، نتایج حاصل از تحقیق حاضر از نتایج TRASS بهتر است که این موضوع در نمودار شکل (۴) برای خاک‌های چسبنده ($\lambda_{\phi c}=0$) مشخص است. می‌توان توصیه کرد که در کاربردهای عملی، پایداری سه بعدی شیروانی با هر دو روش کنترل و کمترین ضریب اطمینان با توجه به نتایج هر دو انتخاب شود.



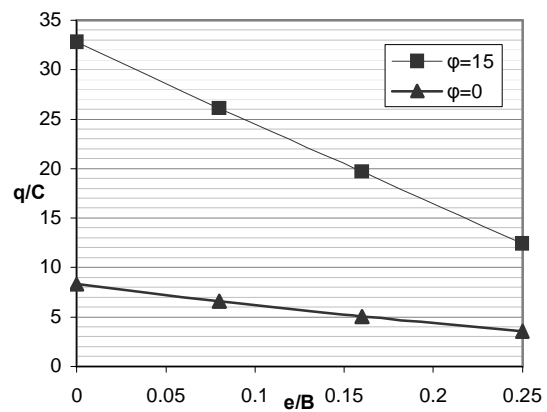
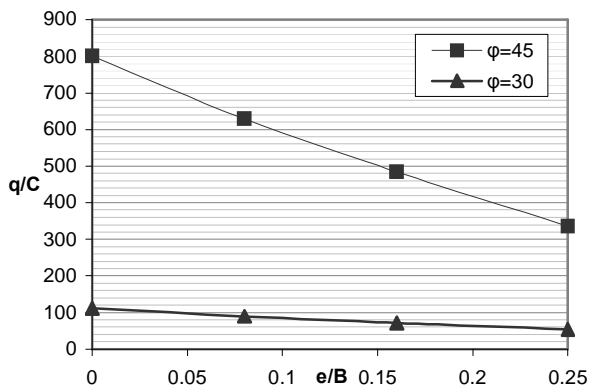
شکل ۷: مقایسه ضریب اطمینان سه بعدی به دست آمده از برنامه TRASS و تحقیق حاضر در شیب $\beta=15^\circ$.

نمودارهای کاربردی

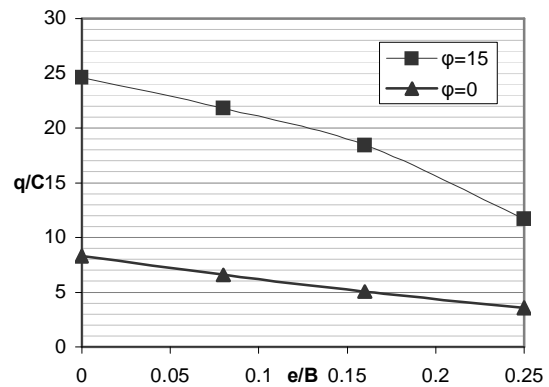
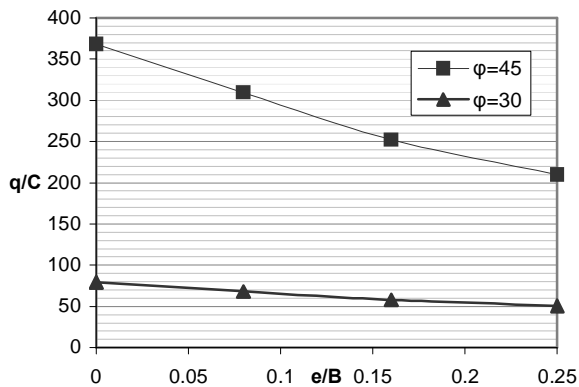
با استفاده از الگوریتم تدوین شده در جریان این تحقیق، ظرفیت باربری پی‌ها روی شیروانی در شرایط مختلف هندسه مسئله و خصوصیات خاک محاسبه شده و نتایج آن به صورت نمودارهای بدون بعد ارائه می‌شود (شکل‌های ۷ تا ۱۲). در این بخش ظرفیت باربری پی‌های مربعی ($L/B=1$) واقع بر شیروانی‌های با شیب ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه با نسبت $\gamma B/C$ برابر ۱ و ۲ و نسبت a/B برابر ۱ ارائه



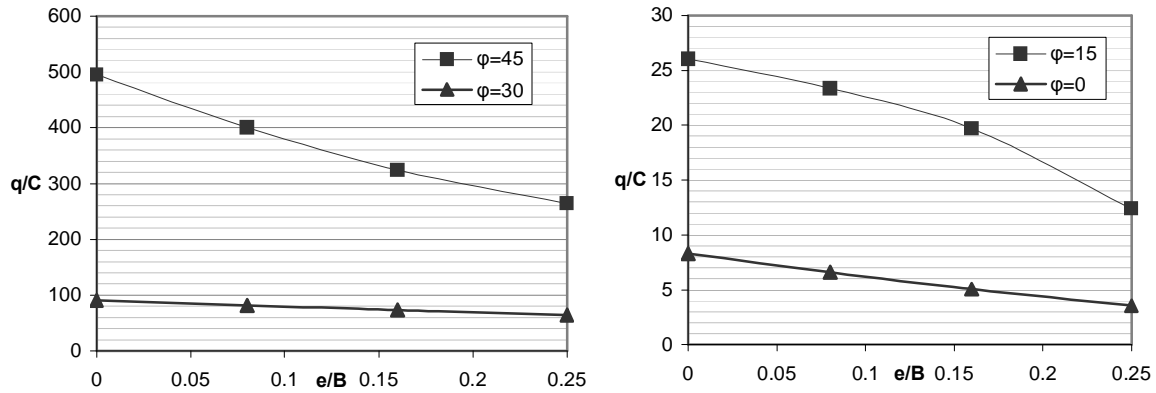
شکل ۷: ظرفیت باربری پی ها واقع بر شیروانی با $\beta=30^\circ$ و $\gamma B/C=1$.



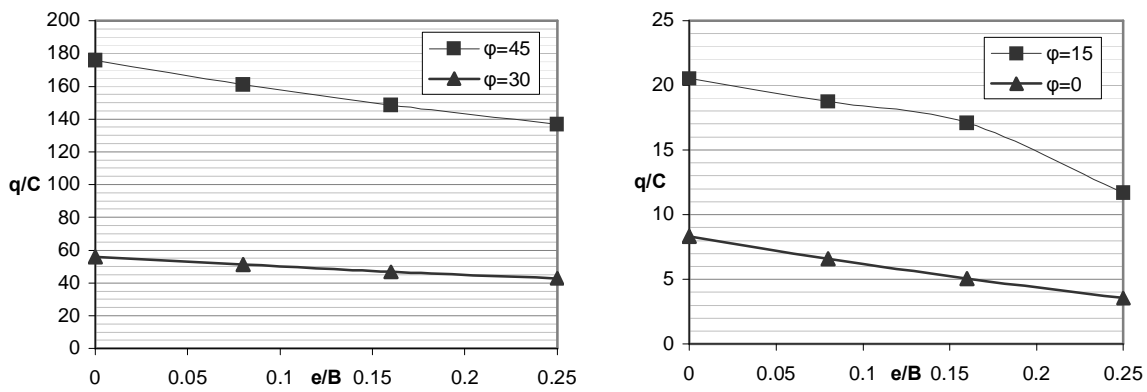
شکل ۸: ظرفیت باربری پی ها واقع بر شیروانی با $\beta=30^\circ$ و $\gamma B/C=2$.



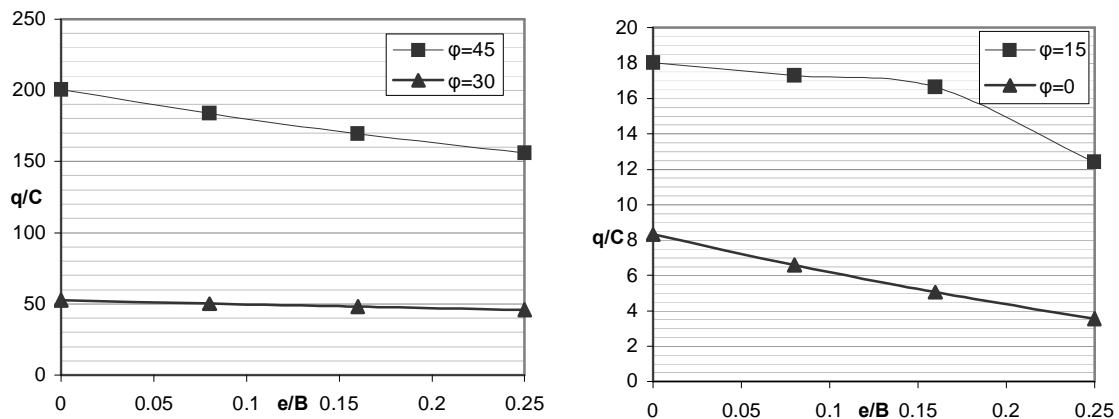
شکل ۹: ظرفیت باربری پی ها واقع بر شیروانی با $\beta=45^\circ$ و $\gamma B/C=1$.



شکل ۱۰: ظرفیت باربری پی ها واقع بر شیروانی با $\beta=45^\circ$ و $\gamma B/C=2$.



شکل ۱۱: ظرفیت باربری پی ها واقع بر شیروانی با $\beta=60^\circ$ و $\gamma B/C=1$.



شکل ۱۲: ظرفیت باربری پی ها واقع بر شیروانی با $\beta=60^\circ$ و $\gamma B/C=2$.

- در خاک‌های دارای اصطکاک زیاد، با افزایش شیب شیروانی، اثر خروج از مرکز بار کاهش می‌یابد.
 - با افزایش مقدار $\gamma B/C$ ، اثر خارج از مرکز بودن بار روی ظرفیت باربری افزایش می‌یابد.
 - نرخ کاهش ظرفیت باربری، با افزایش میزان خارج از مرکز بودن بار کاهش می‌یابد.
 در پایان، نتایج حاصل از تحلیل‌های سه بعدی انجام شده با الگوریتم پیشنهادی، در شرایط مختلف به صورت نمودارهای کاربردی ارائه شده است.

ضریب اطمینان پایداری شیروانی را محاسبه می‌کند. مقایسه نتایج حاصل از تحقیق حاضر با نتایج به دست آمده توسط سایر محققان بسیار رضایت بخش است. علاوه بر این، در مقایسه با نتایج حاصل از تحلیل‌هایی که از مکانیسم انتقالی در آنها استفاده می‌شود، می‌توان چنین نتیجه گرفت که چون در خاک‌های چسبنده و در شیب‌های کم، مکانیسم گسیختگی واقعی به طور معمول از نوع چرخشی است، بنابراین الگوریتم حاضر در این حالات نتایج بهتری نسبت ارائه می‌دهد.
 از جمله نتایج به دست آمده در این تحقیق می‌توان به این موارد اشاره کرد:

مراجع

- 1 - Giger, M. W. and Krizek, R. J. (1975). "Stability analysis of vertical cut with variable corner angle." *Soils and Foundation*, Tokyo, Vol. 15, No. 2, PP. 63-71.
- 2 - Giger, M. W. and Krizek, R.J. (1976). "Stability analysis of vertical corner cut with concentrated surcharge load." *Journal of the Geotechnical engineering, ASCE*, Vol. 102, No. 1, PP. 31-40.
- 3 - Michalowski, R. L. (1989). "Three dimensional analysis of locally loaded slopes." *Geotechnique*, London, Vol. 39, No. 1, PP. 27-38.
- 4 - 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 (In Persian). University of Tehran, Iran
- 5 - Farzaneh, O. and Askari, F. (2003). "Three-dimensional analysis of nonhomogeneous slopes." *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 2, P.P. 137-145.
- 6 - DeBuhan, P. and Garnier, D. (1998). "Three dimensional bearing capacity analysis of a foundation near a slope." *Soil and Foundations*, Tokyo, Vol. 38, No. 3, P.P. 153-163.
- 7 - Narita, K., Yamaguchi, H., (1990). "Bearing capacity analysis of foundation on slopes by use of Log-Spiral sliding surface." *Soils and Foundations*, Tokyo, Vol. 30, No. 3, P.P. 144-152.
- 8 - Hansen, J. B., (1970). "A revised and extended formula for bearing capacity." *Danish Geotechnical Institute*, Copenhagen, Bulletin 28, P.P. 5-11.
- 9 - Chen, W. F., Liu, (1990). *Limit Analysis In Soil Mechanics*, Elsevier Science Publishers B. V.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | | |
|----------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1- Limit Equilibrium | 2- Characteristic-Line | 3-Limit Analysis |
| 4- Yield Function | 5- Associated Flow Rule | 6- Logarithmic Spiral |