

تحلیل پایداری شیروانی های قوس دار در پلان به روش آنالیز حدی

نوید گنجیانⁱ؛ فرج اله عسکریⁱⁱ؛ اورنگ فرزانهⁱⁱⁱ

چکیده

در این مقاله، الگوریتمی برای بررسی پایداری شیروانی های قوس دار در پلان پیشنهاد گردیده است. این الگوریتم، با مدل کردن مکانیسم سه بعدی لغزش به شکل مجموعه ای از گوه های صلب دارای حرکت انتقالی و بهینه سازی آن، حداقل ضریب ایمنی پایداری شیروانی های قوس دار در پلان و یا ظرفیت باربری پی های واقع بر اینگونه شیروانی ها را محاسبه می کند. روش استفاده شده، روش تحلیل حدی مرز بالاست که در آن جایگاه جواب های حاصل از الگوریتم نسبت به حل درست مسأله کاملاً مشخص است. پس از مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی با نتایج دیگر محققان، تاثیر قوس دار بودن شیروانی بر روی پایداری آن بررسی شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که ضریب اطمینان پایداری شیروانی های قوس دار در پلان تحت اثر وزن توده خاک، بیش از ضریب اطمینان حاصل از تحلیل های دوبعدی است. در پایان، نمودارهای بدون بعد ضرایب پایداری شیروانی های با زوایای شیب و شعاع انحناهای مختلف، واقع در انواع خاکها، ارائه شده است.

کلمات کلیدی

تحلیل سه بعدی پایداری، شیروانی خاکی قوس دار در پلان، روش آنالیز حدی مرز بالا

Stability Analysis of Convex Slopes in Plan View Based on Limit Analysis Approach

N. Ganjian; F. Askari; O. Farzaneh

ABSTRACT

This paper proposes a rigorous method of three-dimensional slope stability analysis for convex slopes in plan view based on the upper-bound theorem of limit analysis approach and discusses about the effect of plan curvature on the stability of convex slopes. A rigid-block 3-D translational collapse mechanism is considered, with energy dissipation taking place along planar velocity discontinuities. This mechanism is optimized to obtain the minimum factor of safety for stability of the slope or to obtain the bearing capacity of rectangular foundations located on such slopes. Based on comparisons with the known solutions, the method was generally found to be accurate in predicting the stability of convex slopes. The results show that the stability of convex slopes in plan view is more than the stability of slopes obtained by 2D analysis. Dimensionless diagrams for various parameters are also presented.

KEYWORDS

3-D stability analysis, convex slopes in plan view, Upper bound theorem, Limit Analysis.

ⁱ دانشجوی دکتری دانشکده عمران پردیس های فنی دانشگاه تهران، گرایش خاک و پی: nganjian@ut.ac.ir

ⁱⁱ استادیار پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله: Askari@iiees.ir

ⁱⁱⁱ استادیار دانشکده عمران پردیس های فنی دانشگاه تهران: ofarzane@ut.ac.ir

خاک میسر است و تغییر شکل های قبل از گسیختگی را می توان محاسبه کرد، لیکن حجم محاسبات بیشتر بوده و بررسی تأثیر پارامترها در محاسبات وقت گیر است.

روشی که در تحقیق حاضر استفاده شده است، روش تحلیل حدی مرز بالا (Upper-Bound) است. این روش که از نوع روش های گروه «الف» است، بر پایه قضایای نظری دقیقی استوار شده و در پنج دهه اخیر توسعه یافته است.

کاربرد روش آنالیز حدی مرز بالا در تحلیل سه بعدی پایداری شیروانی های خاکی را نخستین بار میخالفسکی در سال ۱۹۸۹ بررسی نمود [۷]. فرزانه و عسکری در سال ۱۳۷۸ با توسعه و اصلاح روش میخالفسکی، پاسخ های وی را بهبود بخشیدند. این اصلاح در چارچوب یک رساله دکتری در دانشکده فنی دانشگاه تهران صورت پذیرفت و در جریان آن نرم افزاری تحت عنوان TRASS تهیه شد [۱]. در ادامه، نخعی در سال ۱۳۸۱ قابلیت اعمال اثر فشار آب حفره ای خاک را به نرم افزار TRASS افزود [۲]. در تحقیق حاضر، الگوریتم مورد استفاده در برنامه TRASS برای تحلیل پایداری شیروانی های با قوس محدب در پلان تعمیم داده شده است.

در این مقاله، ابتدا اصول روش مرز بالای تحلیل حدی مرور گردیده است. سپس مکانیسم و الگوریتم پیشنهادی برای تحلیل سه بعدی پایداری شیروانی های قوس دار در پلان تشریح و نتایج حاصل از کاربرد الگوریتم ارائه شده در این مقاله با نتایج دیگر محققان مقایسه شده است. در بخش اصلی مقاله، نمودارهایی برای بررسی اثر هندسه شیروانی بر پایداری آن ارائه شده است.

۲- مبانی روش تحلیل حدی

غالباً یافتن مقدار بار حدی در مسائل پایداری با حل همزمان معادلات تعادل، معادلات رفتاری و معادلات سازگاری دشوار بوده و به همین دلیل، وجود روش های تقریبی برای تخمین بار حدی در اینگونه مسائل ضرورت یافته است. این روش ها به روش های حدی موسوم هستند و روش تحلیل حدی از دقیق ترین این گروه روش هاست. این روش، که در قالب "قضایای حدی" مطرح شده، تعمیم اصل "کار خمیری حداکثر" است. اصل مزبور را هیل (Hill) در سال ۱۹۴۸ مطرح کرد و پس از وی دراکر (Drucker)، گرین برگ (Greenberg) و پراگر (Prager) در سال ۱۹۵۲ با تعمیم اصل هیل، قضایای حدی را ارائه کردند. فرضیات استفاده شده در روش تحلیل حدی عبارتند از [۸]:

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

وجود موارد فراوان شیروانی های طبیعی و مصنوعی قوس دار در پلان، بررسی روشی مناسب برای تحلیل پایداری اینگونه شیروانی ها را ایجاب می کند. تحلیل پایداری شیروانی های خاکی معمولاً با فرض شرایط کرنش مسطح و به صورت دوبعدی انجام می گیرد، لیکن در حالات زیر لزوم تحلیل سه بعدی پایداری کاملاً محسوس است و فرض دوبعدی بودن مسأله ممکن است خطای زیادی را در پی داشته باشد [۱]:

الف- شیروانی های تحت اثر بارهای متمرکز

ب- شیروانی های با نسبت طول به ارتفاع کم

ج- شیروانی های به شکل منحنی در پلان (خاکریزه های واقع در قوس راه ها، معادن روباز، گودبرداری ها)

هدف این مقاله، تحلیل سه بعدی پایداری شیروانی های قوس دار در پلان (شیروانی های محدب یا دماغه ها) تحت اثر نیروهای ناشی از وزن توده خاک و سربار شالوده واقع در بالادست شیب، و بررسی اثر قوس دار بودن شیروانی بر روی پایداری آن است.

اثر قوس دار بودن شیروانی بر پایداری آن از سوی برخی محققان بررسی شده است، لیکن روشی جامع و کاربردی، که بتواند این مسأله را در حالت کلی تحلیل کند، مشاهده نشده است. در طول چهار دهه گذشته آندره (۱۹۶۲)، دنو (۱۹۶۸)، پیتو و جنینگ (۱۹۷۰)، گیگر (۱۹۷۴)، گیگر و کریزک (۱۹۷۵)، کیم و براون (۱۹۷۷) و لشینسکی و بیکر (۱۹۸۷) تحقیقاتی در این زمینه انجام داده اند که اغلب این تحقیقات برای موارد خاص صورت گرفته است. به عنوان مثال، گیگر و کریزک پایداری شیروانی های گوشه دار قائم را تحت اثر بار متمرکز استاتیکی و وزن خاک بررسی کرده اند [۴]، [۵]. لشینسکی و بیکر نیز پایداری توده های مخروطی خاک تحت اثر وزن آن را بررسی کرده اند [۶].

برای بررسی پایداری شیروانی ها، روش های گوناگونی مطرح شده است که عمدتاً در یکی از دو گروه ذیل جای دارند:

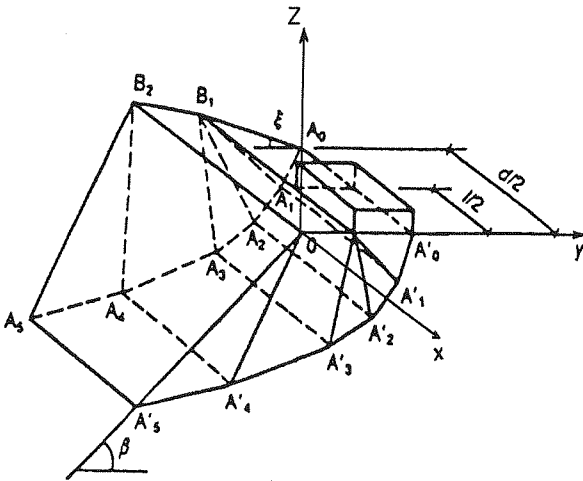
الف- روش های حدی مبتنی بر رفتار صلب - خمیری خاک

ب- روش های عددی مبتنی بر رفتار ارتجاعی - خمیری خاک

روش های حدی، شامل روش تعادل حدی، روش خطوط مشخصه و روش آنالیز حدی، بر مدل نسبتاً ساده ای از رفتار خاک استوارند و مزیت عمده آنها یافتن راه حل های بسته و عام در مسائل کاربردی است. با این روش ها بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مقاومت خاک و هندسه زمین به سهولت انجام پذیر است. در مقابل، در روش های تحلیل عددی مانند روش اجزای محدود، استفاده از روابط رفتاری پیچیده تر برای

آن برنامه می‌باشد، ابتدا فرمول بندی و مکانیسم استفاده شده در برنامه مذکور تشریح و سپس به تغییرات ایجاد شده برای تعمیم آن در این تحقیق اشاره می‌شود.

مکانیسم استفاده شده در برنامه TRASS در شکل (۱) نشان داده شده است [۹]. این مکانیسم متشکل از بلوک‌های پنج و یا شش وجهی با وجوه مستوی است که صرفاً حرکت انتقالی دارند و تعداد آنها را می‌توان تغییر داد. در شروع محاسبات، کاربر مکانیسمی فرضی را تعریف می‌کند. سپس میدان سرعت نظیر این مکانیسم و ضریب اطمینان پایداری و یا ظرفیت باربری شالوده به وسیله برنامه محاسبه می‌شود و در مراحل بعدی به روش سعی و خطا، مکانیسم بهینه به دست می‌آید.



شکل (۱): مکانیسم گسیختگی استفاده شده در برنامه TRASS [۹]

فرمول بندی این برنامه براساس قضیه مرز بالای روش آنالیز حدی پایه ریزی شده است. کاربرد قضیه مرز بالا نیازمند محاسبه کار نیروهای داخلی (\dot{D}) و کار نیروهای خارجی شامل کار ناشی از وزن توده خاک (\dot{W}_g) و کار نیروهای وارد بر شالوده (\dot{W}_T) است. برای استخراج روابط، شکل (۲) بررسی می‌شود. در این شکل، مقطع شیبی که با ϵ بلوک مدل گردیده نشان داده شده است. کار نیروهای داخلی از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\dot{D} = c \cdot \cos \Phi \cdot \sum_{k=1}^n [I_k v_k + t_k [v]_k] \quad (2)$$

در این معادله، I_k مساحت دو سطح کناری و سطح زیرین بلوک k ، t_k مساحت سطح ناپیوستگی سرعت بین بلوک k و $k-1$ ، v_k سرعت مطلق بلوک k ، $[v]_k$ سرعت نسبی بین بلوک های k و $k-1$ و Φ و c به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و ضریب چسبندگی خاک است.

تسلیم (Yield Function) نام دارد، بیان می‌شود. نمایش این تابع در فضای تنش‌های اصلی به سطح تسلیم موسوم است. ج- رفتار خمیری مصالح تابع قانون جریان وابسته (Associated Flow Rule) است. به عبارت دیگر:

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

در رابطه فوق $\dot{\epsilon}_{ij}^P$ تانسور نمو تغییر شکل نسبی (کرنش) خمیری و σ_{ij} تانسور تنش و λ تابعی اسکالر و غیر منفی است. در قضیه مرز پایین، مسأله با تعریف میدان‌های تنش فرضی حل می‌شود. میدان تنش فرضی استفاده شده باید شرایط ذیل را ارضا 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» ارضاشود، 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 روش مرز بالا، مسائل با در نظر گرفتن شرایط سینماتیکی حل می‌شوند. در این روش با در نظر گرفتن یک میدان سرعت فرضی و مساوی قراردادن نمودار نیروهای خارجی و داخلی، بارگسیختگی محاسبه می‌شود. براساس قضیه مرز بالا، اگر میدان سرعت در نظر گرفته شده شرایط مرزی سرعت و شرایط سازگاری را ارضا کند، بارمحاسبه شده بیش از بارگسیختگی واقعی خواهد بود.

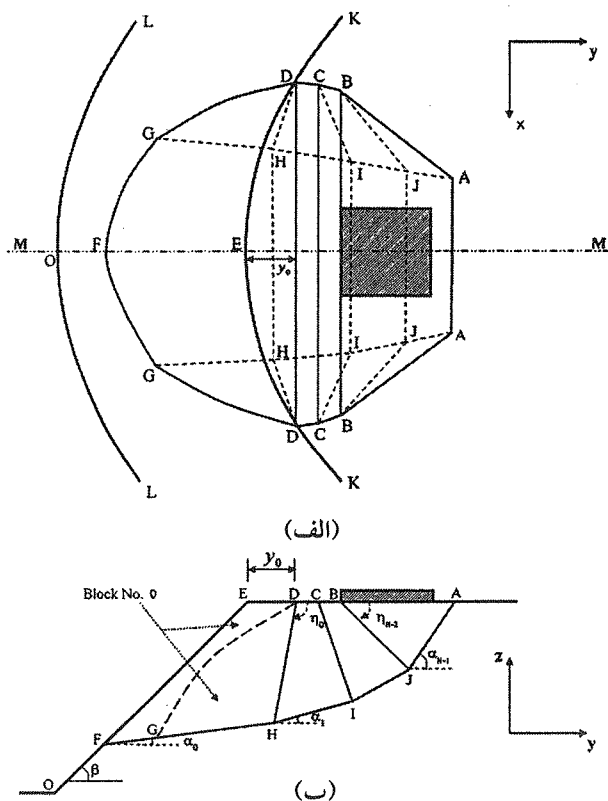
با انتخاب میدان‌های مناسب تنش و سرعت و نزدیک کردن جواب‌های حاصل از دو روش می‌توان محدوده‌ای را، که بارگسیختگی واقعی در آن قرار می‌گیرد، کوچک تر کرد. در مسائلی که جواب دو روش یکسان باشد، جواب درست به دست آمده است. بدین ترتیب در این روش جایگاه هر جواب نسبت به پاسخ درست مسأله و اضافی یا نقصانی بودن تقریب کاملاً مشخص است. مزیت اصلی روش تحلیل حدی نیز در همین نکته است.

۳- فرمول بندی برنامه استفاده شده

از آنجا که الگوریتم تدوین شده در این تحقیق، تا حد زیادی مشابه با الگوریتم برنامه TRASS بوده است و در واقع، تعمیم

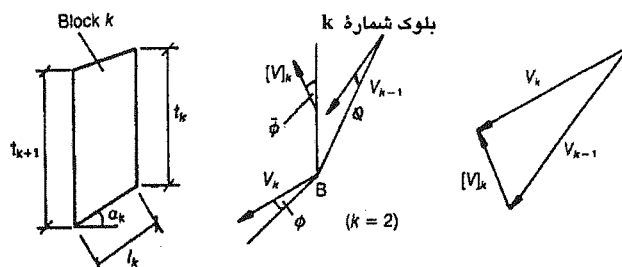
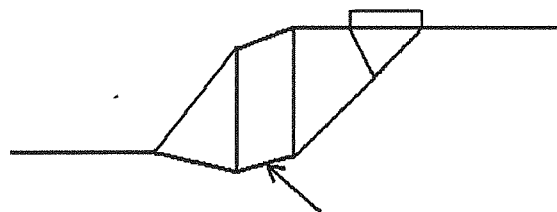
۴- الگوریتم تدوین شده

با توجه به هندسه شیروانی‌های قوس دار در پلان، تشکیل مکانیسم‌های گسیختگی قابل قبول مستلزم ایجاد تغییرات اساسی در بخش‌هایی از الگوریتم اولیه برنامه TRASS بوده است. شیروانی قوس‌دار در این تحقیق به شکل بخشی از یک مخروط ناقص در نظر گرفته شده است. مثالی از مقطع و پلان یک شیروانی قوس‌دار در پلان و مکانیسم گسیختگی استفاده شده در این مقاله برای تحلیل پایداری اینگونه شیروانی‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): جزئیات مکانیسم استفاده شده برای مدل کردن شیروانی های قوس‌دار: الف) پلان، ب) مقطع

چنانچه مکانیسم گسیختگی مطابق با روال قبلی برنامه TRASS تشکیل شود، در حالت کلی سه نوع بلوک خواهیم داشت. بعضی از بلوک‌های نزدیک به سطح شیروانی فاقد صفحه جانبی در داخل خاک هستند. در برخی دیگر از بلوک‌ها، بخشی از صفحات جانبی بلوک‌ها در داخل و بخشی در خارج از حجم شیروانی واقع می‌شود. در نتیجه، محاسبه بخشی از مساحت سطوح جانبی واقع در داخل خاک و سطح کف این بلوک‌ها و نیز حجم آنها ضروری است. سایر بلوک‌ها نیز، که در فاصله بیشتری از دامنه شیروانی قرار دارند، به صورت پنج و یا شش وجهی مستوی باقی مانده و محاسبات مربوط به آنها طبق روال قبلی برنامه امکان‌پذیر است.



شکل (۲): نمایش پارامترهای استفاده شده در روابط

یادآوری می‌شود که قانون جریان وابسته (رابطه ۱) بدین معناست که در کلیه سطوح ناپیوستگی سرعت، حرکت دو بخش طرفین سطوح نسبت به یکدیگر اتساعی است و زاویه اتساع برابر با زاویه اصطکاک داخلی خاک (Φ) می‌باشد. جزئیات کامل مربوط به نحوه محاسبه میدان‌های سرعت در مرجع [۱] آمده است. کار نیروهای خارجی از روابط ذیل به دست می‌آید:

$$\dot{W}_g = \sum_{k=1}^n G_k v_k \sin(\alpha_k - \Phi) \quad (2)$$

$$\dot{W}_T = T \cdot V_0 \quad (4)$$

در عبارات فوق، G_k وزن بلوک k ، T بار قائم وارده بر پی و V_0 مولفه قائم بردار سرعت بلوک زیر پی است. مقدار ضریب اطمینان به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$F = \frac{\tan \Phi}{\tan \Phi_d} = \frac{c}{c_d} \quad (5)$$

به ترتیب ضریب چسبندگی کاهش یافته و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته هستند.

با توجه به قضیه مرز بالا، از مساوی قرار دادن کار نیروهای داخلی و خارجی و جایگزینی c و Φ برحسب c_d و Φ_d در رابطه‌ای که از این تساوی به دست می‌آید، مقدار ضریب اطمینان از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$F = \frac{c_d \cdot \cos \Phi_d \cdot \sum_{k=1}^n [l_k v_k + t_k [v]_k]}{\sum_{k=1}^n \{v_k \cdot [G_k \cdot \sin(\alpha_k - \Phi_{dk})]\} + T \cdot V_0} \quad (6)$$

مختصات x تمامی گره ها نیز محاسبه می‌شوند. این روند از پایین دست شیروانی شروع و به سمت شالوده ادامه می‌یابد. بلوک‌ها در این روش می‌توانند در هر طرف تنها یک سطح جانبی داشته باشند.

۴-۲- نحوه محاسبه احجام و مساحت ها

احجام و مساحت‌های مربوط به کلیه بلوک‌ها به استثنای بلوک اول با توجه به پنج و یا شش وجهی بودن آنها مطابق روند استفاده شده در برنامه TRASS محاسبه می‌شوند. برای محاسبه حجم و سطوح مربوط به بلوک اول، از روش انتگرال‌گیری عددی استفاده می‌شود. به منظور استفاده از قابلیت‌های فعلی برنامه TRASS در اعمال تغییرات ضریب چسبندگی و نیز شتاب زلزله با عمق، محاسبه حجم و سطوح مربوط به بلوک اول با تقسیم این بلوک به تعدادی المان افقی انجام می‌گیرد [۳].

۴-۳- روند بهینه سازی مکانیسم لغزش

با ایجاد تغییرات لازم در روند بهینه سازی مکانیسم لغزش، متغیر y_0 وارد روند بهینه‌سازی شده است. بدین ترتیب، با تغییر متغیرهای معرف مکانیسم گسیختگی به صورت تکتک و یا همزمان با یکدیگر، کمترین ضریب اطمینان مربوط به بحرانی ترین مکانیسم لغزش محاسبه می‌شود [۱].

۴-۴- کنترل های لازم

با مشخص شدن هندسه تمامی بلوک‌ها و مختصات گره‌ها، شرط واقع نشدن نقطه A در محدوده زیر پی کنترل می‌شود. در صورتی که این نقطه زیر شالوده قرار نداشته باشد، مکانیسم تشکیل شده قابل قبول بوده و برنامه، مساحت‌ها و احجام مورد نظر را محاسبه و ضریب اطمینان مربوطه را به دست می‌آورد. در غیر این صورت، با افزایش y_0 و یا کاهش زاویه شکستگی صفحات جانبی، مکانیسم جدیدی تعریف و مراحل قبل تکرار می‌شود.

ذکر این نکته لازم است که این الگوریتم برای بررسی پایداری شیروانی‌های گوشه‌دار نیز تهیه و استفاده شده است.

۵- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج سایر محققان

با توجه به محدودیت پژوهش‌های قبلی در این زمینه و عدم دسترسی به روشی برای تحلیل پایداری اینگونه شیروانی‌ها در حالت کلی، امکان مقایسه کامل نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات سایر محققان وجود ندارد. بنابراین نتایج در حالات خاص مقایسه شده اند.

اگر چه الگوریتم تدوین شده در این تحقیق، روشی سه‌بعدی

در این حالت، استفاده از الگوریتم اولیه برنامه TRASS بدین معناست که در هر مرحله از روند بهینه‌سازی و با تشکیل هر مکانیسم گسیختگی، برنامه بتواند بلوک‌های تشکیل دهنده مکانیسم را به سه گروه مذکور تقسیم و برای هر بلوک با توجه به نوع آن، مساحت‌ها، احجام و دیگر پارامترهای مورد نیاز را محاسبه کند. این امر با توجه به عدم محدودیت تعداد بلوک‌ها در برنامه TRASS، نحوه بهینه‌سازی در این برنامه و طولانی بودن محاسبات عددی لازم برای تعیین پارامترهای ذکر شده در بلوک‌های نوع ۱ و ۲، سبب افزایش زمان تحلیل برنامه و کاهش نسبی دقت محاسبات می‌شود. بنابراین با اعمال تغییرات لازم، این الگوریتم تعمیم داده شده است.

تغییرات ایجاد شده در الگوریتم اولیه برنامه TRASS برای تعمیم کاربرد آن برای تحلیل پایداری شیروانی‌های قوس دار در پلان را می‌توان در چهار بخش خلاصه کرد [۲]:

۴-۱- نحوه تشکیل مکانیسم لغزش

همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، الگوریتم تدوین شده با در نظر گرفتن هندسه شیروانی مورد نظر، مکانیسم‌هایی را تشکیل می‌دهد که در آنها تنها نزدیک‌ترین بلوک به سطح شیروانی تحت تاثیر هندسه شیروانی قرار گرفته و از حالت پنج و یا شش وجهی که شکل مورد استفاده برای بلوک‌ها در برنامه TRASS می‌باشد، خارج شود (بلوک شماره صفر). در نتیجه، تنها دو نوع بلوک در مکانیسم استفاده شده وجود خواهد داشت:

۱- بلوک مجاور دامنه شیروانی که تحت تاثیر هندسه شیروانی قرار می‌گیرد.

۲- سایر بلوک‌ها که در فاصله بیشتری از دامنه شیروانی قرار دارند و محاسبات مربوط به آنها طبق روال قبلی برنامه TRASS امکان‌پذیر است.

در این روش، متغیری به نام y_0 در روند تشکیل مکانیسم وارد شده است. با توجه به مقدار y_0 و هندسه شیروانی، پهنای مکانیسم گسیختگی همواره به نحوی تعیین می‌شود که نقطه D بر روی فصل مشترک سطح تشکیل دهنده رویه شیروانی و سطح افقی بالادست قرار گیرد.

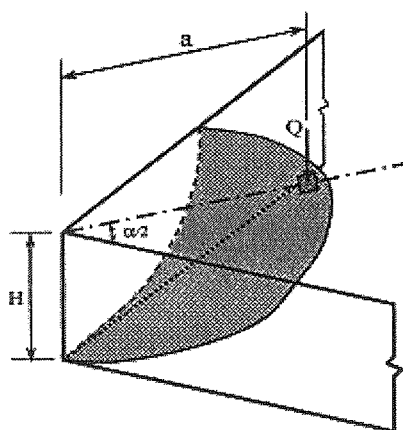
برای تشکیل مکانیسم گسیختگی، با تعیین مختصات y و z نقاط A, B, C, D, E, F (گره های مرزی) و زوایای η_i و α_i توسط کاربر و یا برنامه، مختصات y و z تمامی گره‌ها محاسبه می‌شود. روند محاسبات از بالادست، یعنی زیر پی شروع شده و به سمت پایین شیروانی ادامه می‌یابد. سپس با در نظر گرفتن زوایای صفحات جانبی بلوک‌ها (ξ) و با توجه به این نکته که نقطه D باید بر روی لبه شیروانی واقع شود،

متمركز (شكل ۴) و با استفاده از روش تحليل حدی مرز بالا بررسی و با تحليل گوشه‌های با زوایای مختلف، نمودارهایی را در این زمینه ارائه کرده اند [۵]. پارامترهای بی بعد استفاده شده در نتایج ایشان با توجه به روابط (۷) تا (۹) تعریف می‌شوند:

$$N_H = \frac{\gamma \cdot H}{c} \quad (۷)$$

$$N_s = \frac{Q}{H^2 \cdot c} \quad (۸)$$

$$n = \frac{a}{H} \quad (۹)$$



شكل (۴): شیروانی قائم گوشه دار در تحقیقات گیزر و کریزک [۵]

برای مقایسه نتایج، تحلیل‌هایی بر اساس الگوریتم حاضر و با در نظر گرفتن شعاع انحنای زیاد (شیروانی خطی) به منظور تعیین عدد پایداری شیروانی‌های تحت اثر بار متمركز انجام شده است. در شكل (۵)، اعداد پایداری (N_s) شیروانی‌های قائم با زاویه گوشه ۱۸۰ درجه برای مقادیر مختلف N_H و n و $\phi = 0$ حاصل از تحقیقات گیزر و کریزک با نتایج حاصل از تحقیق حاضر و نیز نتایج برنامه TRASS مقایسه شده‌اند.

نتایج تحلیل‌ها مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. ملاحظه می‌شود که الگوریتم تدوین شده عدد پایداری کمتری را نسبت به نتایج تحقیقات گیزر و کریزک به دست می‌دهد که با توجه به مرز بالا بودن پاسخ‌های حاصل از این تحقیق، می‌توان گفت که این جواب‌ها به جواب درست مسأله نزدیک‌ترند.

در شكل (۶) نتایج تحلیل حاضر با نتایج تحلیل‌های سه بعدی یوگای (Ugai) و لشینسکی (Leshchinsky) و نیز برنامه TRASS، در خاک‌های چسبنده؛ که به ترتیب در سال‌های ۱۹۸۵، ۱۹۸۶ و ۲۰۰۳ ارائه شده‌اند [۱۰]، [۱۱]، برای حالت شیب قائم با یکدیگر مقایسه شده است. در این نمودار، نسبت ضریب اطمینان حاصل از تحلیل سه بعدی به تحلیل دوبعدی

را برای تحلیل پایداری شیروانی‌های قوس‌دار ارائه کرده است؛ لیکن یکی از راه‌های بررسی صحت آن، مقایسه نتایج حاصل از این الگوریتم در حالت خاص دوبعدی با نتایج سایر تحلیل‌های دوبعدی موجود است. در زمینه تحلیل سه بعدی پایداری شیروانی‌های غیر خطی، نتایج تحلیل‌های گیزر و کریزک در حالت خاص شیروانی‌های گوشه دار قائم تنها نتایج قابل استناد برای مقایسه است. علاوه بر مورد فوق، می‌توان این الگوریتم را با مقایسه نتایج در حالت خاص شعاع انحنای بسیار زیاد؛ که نظیر تحلیل سه بعدی شیروانی‌های خطی است، آزمود.

۵-۱- مقایسه نتایج در حالت دوبعدی

با افزایش پهنای مکانیسم گسیختگی و بزرگ تر شدن این پهنای نسبت به سایر ابعاد، مسأله به شرایط دوبعدی نزدیک می‌شود. این شرایط در تحقیق حاضر با انتخاب شعاع قوس بسیار بزرگ و عدم محدودسازی پهنای مکانیسم ایجاد می‌شود.

از آنجا که الگوریتم استفاده شده بر اساس روش تحلیل حدی مرز بالاست، ترجیح داده شده است تا نتایج حاصل از آن با نتایج تحقیقات چن (Chen W.F.; 1975) که آن نیز بر اساس روش تحلیل حدی مرز بالا صورت پذیرفته مقایسه شود. چن با فرض سطح گسیختگی به شکل اسپیرال لگاریتمی، عدد پایداری ($N_s = \frac{\gamma \cdot H \cdot c}{C}$) شیروانی‌های مختلف را محاسبه کرده است. در این رابطه Hc ارتفاع بحرانی شیب است.

در جدول (۱) مقایسه میان اعداد پایداری حاصل از الگوریتم حاضر و تحقیقات چن ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که اختلاف جواب‌ها، ناچیز بوده و حداکثر به ۵٪ می‌رسد. شایان ذکر است که در مورد شیروانی‌های قائم، تطابق جواب‌ها بیشتر بوده و حداکثر اختلاف‌ها به ۱٪ محدود می‌شود.

جدول (۱): مقایسه اعداد پایداری حاصل از تحقیقات چن و تحقیق حاضر

β (درجه)	۳۰		۶۰		۹۰	
	چن	تحقیق حاضر	چن	تحقیق حاضر	چن	تحقیق حاضر
۰	۵/۵۲	۵/۸۲	۵/۲۸	۵/۴۱	۲/۸۲	۲/۸۷
۱۰	۱۲/۵۰	۱۲/۸۲	۷/۲۶	۷/۳۹	۴/۵۸	۴/۶۲
۲۰	۴۱/۲۲	۴۱/۵۵	۱۰/۲۹	۱۰/۶۴	۵/۵۰	۵/۵۶
۳۰	-	-	۱۶/۱۴	۱۶/۴۵	۶/۶۹	۶/۷۲

۵-۲- مقایسه نتایج در حالت سه بعدی

گیزر و کریزک (Giger & Krizek) در سال‌های ۱۹۷۵ و ۱۹۷۶ پایداری شیروانی‌های قائم گوشه‌دار را تحت اثر بار

روابط (۱۰) و (۱۱) تعریف شده‌اند:

$$N_s = \frac{\gamma H F_s}{c} \quad (10)$$

$$\lambda_{\phi c} = \frac{\gamma H}{c} \tan \phi \quad (11)$$

این نتایج برای شیب‌های ۳۰ و ۹۰ درجه، مقادیر $\lambda_{\phi c}$ برابر، ۱ و ۱۰ و شیروانی‌های با شعاع‌های مختلف محاسبه و در شکل های (۸) تا (۱۳) نشان داده شده‌اند. مقدار ضریب پایداری در حالت دوبعدی $N_{S(2D)}$ در جدول (۲) ارائه شده است.

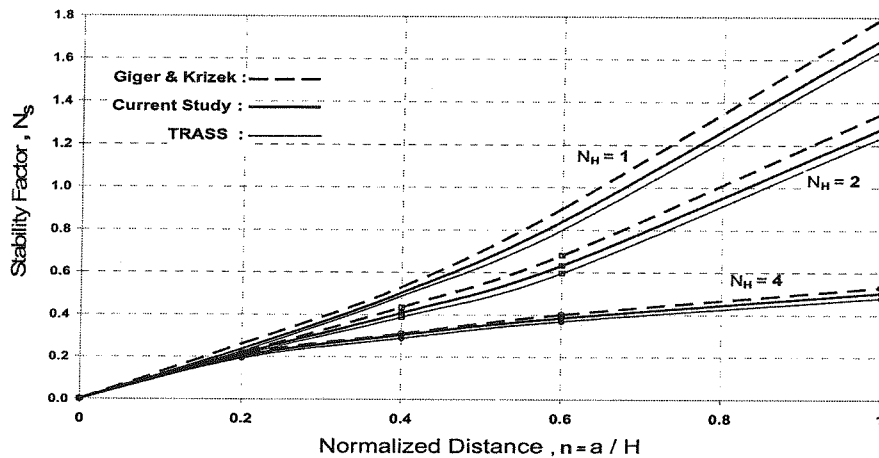
در این نمودارها، d پهناي مکانیسم لغزش، H ارتفاع شیروانی، α زاویه گوشه شیروانی و N_{3D}/N_{2D} نسبت عدد پایداری حاصل از تحلیل سه‌بعدی به عدد پایداری حاصل از تحلیل دوبعدی است. مکانیسم لغزش استفاده شده در تحلیل‌ها و پارامترهای مذکور در شکل (۷) نشان داده شده است.

برای مکانیسم‌های با پهناهای مختلف رسم شده است. در این شکل، d پهناي مکانیسم گسیختگی و H ارتفاع شیروانی است. اختلاف ناچیز میان نتایج الگوریتم حاضر و برنامه TRASS ناشی از تفاوت روش‌های بهینه‌سازی است.

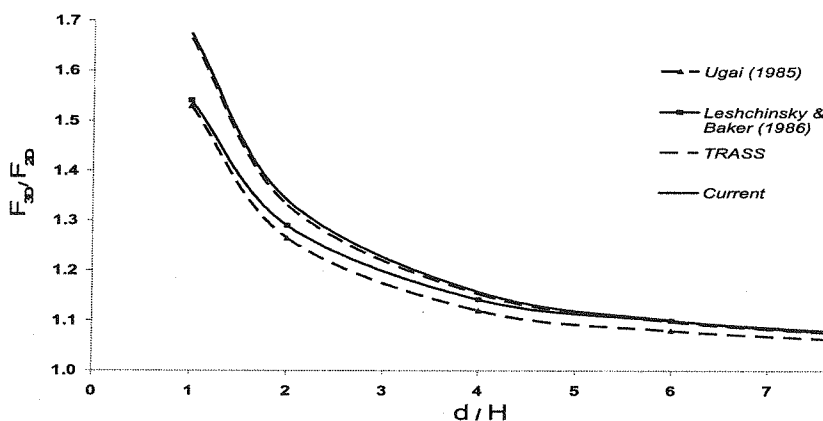
این مقایسه؛ که برای شیب قائم صورت گرفته است، بیانگر هماهنگی نسبتاً خوب جواب‌های حاصل از تحقیق حاضر و برنامه TRASS با نتایج روش لشینسکی می‌باشد. یادآوری می‌شود که روش‌های استفاده شده در تحلیل‌های یوگای و لشینسکی از نوع تعادل حدی می‌باشند.

۶- نتایج تحلیل‌های عددی

در این بخش، نتایج تحلیل پایداری شیروانی‌های قوس دار تحت اثر وزن توده خاک، با در نظر گرفتن مکانیسم گسیختگی نشان داده شده در شکل (۷)، به صورت نمودارهای پایداری ارائه شده است. پارامترهای استفاده شده (N_s و $\lambda_{\phi c}$) طبق

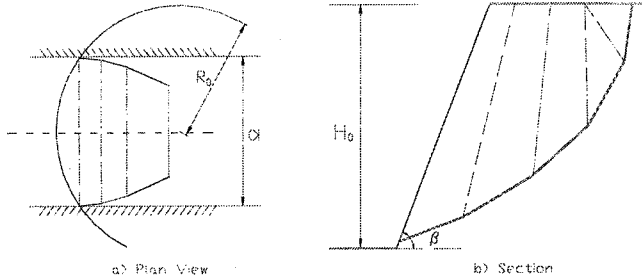


شکل (۵): مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحلیل‌های سه‌بعدی گیگر و کریزک و TRASS برای شیب‌های قائم خطی



شکل (۶): مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحلیل‌های سه‌بعدی یوگای، لشینسکی و TRASS برای شیب‌های قائم در خاک‌های چسبیده قوس‌دار، همواره عدد پایداری و به عبارتی ضریب اطمینان بیشتری را نسبت به نتایج تحلیل‌های دوبعدی نشان می‌دهند. - نتایج تحلیل‌های سه‌بعدی پایداری شیروانی‌های با بررسی نمودارهای ارائه شده، ملاحظه می‌شود:

N_{2D}	$\beta=30$	$\beta=90$
$\lambda_{\phi C} = 0$	9.02	4.01
$\lambda_{\phi C} = 1$	12.8	4.36
$\lambda_{\phi C} = 10$	40.7	12.13



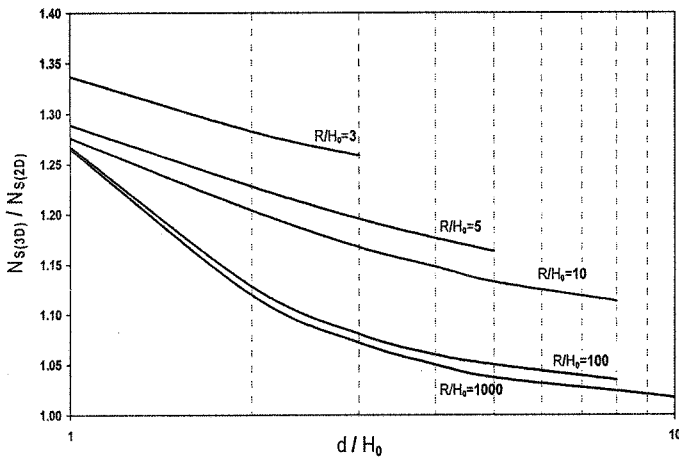
شکل (۷): فرضیات مکانیسم گسیختگی برای انجام تحلیل‌های عددی

این اختلاف در موارد در نظر گرفته شده حداکثر به ۹۰٪ می‌رسد.

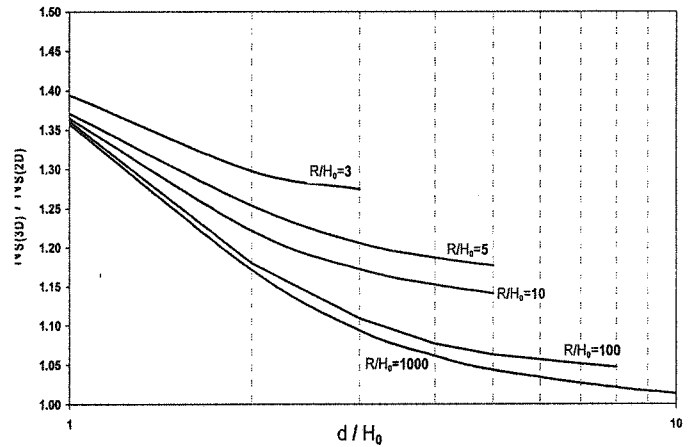
- با کاهش $\lambda_{\phi C}$ ، اثر قوس دار بودن شیروانی بر عدد پایداری افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، در خاک‌های چسبنده این اثر بیشتر است.

- در شیروانی‌های با شیب کمتر، اثر قوس دار بودن شیروانی بیشتر است.

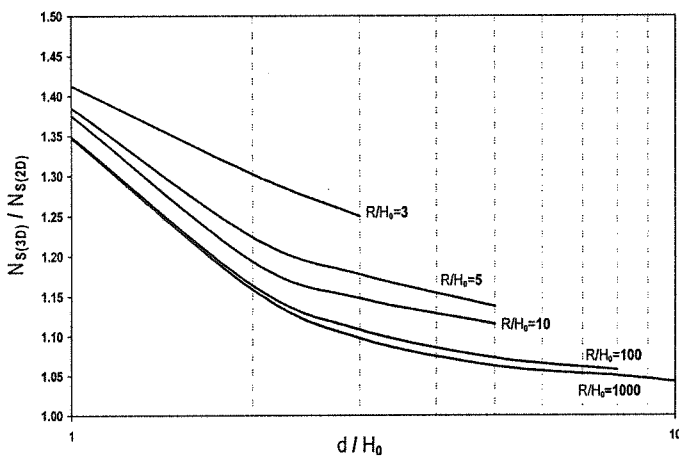
جدول (۲): اعداد پایداری در حالت دوبعدی



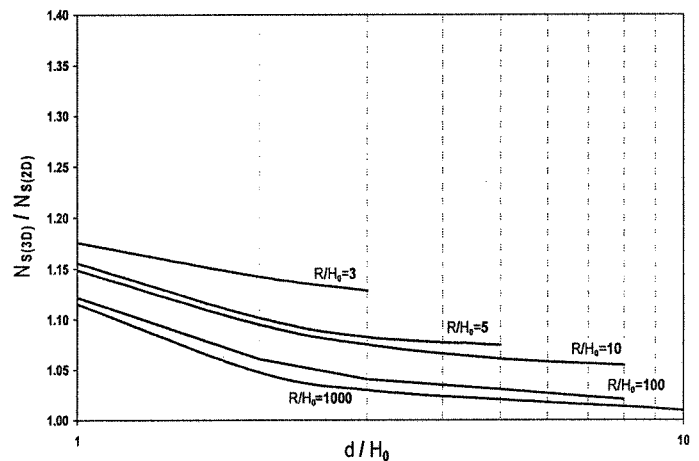
شکل (۸): تغییرات نسبت اعداد پایداری در حالت سه‌بعدی به دوبعدی برای شیروانی قوس دار با شیب $\beta = 30^\circ$ و $\lambda_{\phi C} = 1$



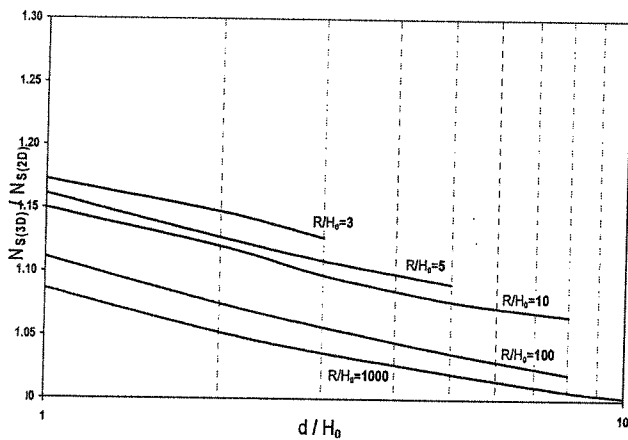
شکل (۹): تغییرات نسبت اعداد پایداری در حالت سه‌بعدی به دوبعدی برای شیروانی قوس دار با شیب $\beta = 30^\circ$ و $\lambda_{\phi C} = 0$



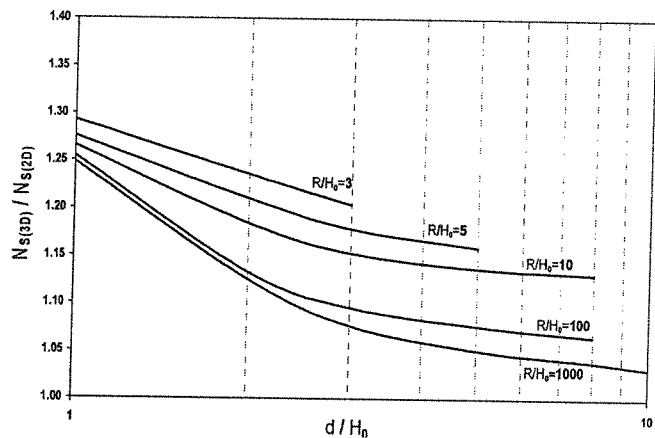
شکل (۱۰): تغییرات نسبت اعداد پایداری در حالت سه‌بعدی به دوبعدی برای شیروانی قوس دار با شیب $\beta = 90^\circ$ و $\lambda_{\phi C} = 10$



شکل (۱۱): تغییرات نسبت اعداد پایداری در حالت سه‌بعدی به دوبعدی برای شیروانی قوس دار با شیب $\beta = 90^\circ$ و $\lambda_{\phi C} = 0$



شکل (۱۳): تغییرات نسبت اعداد پایداری در حالت سه بعدی به دویبعی برای شیروانی قوس دار با شیب $\beta = 90^\circ$ و $\lambda_{\phi C} = 10$



شکل (۱۲): تغییرات نسبت اعداد پایداری در حالت سه بعدی به دویبعی برای شیروانی قوس دار با شیب $\beta = 90^\circ$ و $\lambda_{\phi C} = 1$

۷- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، الگوریتمی بر مبنای روش مرز بالای آنالیز حدی برای تحلیل سه بعدی پایداری شیروانی های قوس دار در پلان ارائه شده است. این الگوریتم با مدل کردن توده های لغزش به صورت بلوک های چندوجهی و بهینه سازی آنها، حداقل ضریب ایمنی پایداری شیروانی های قوس دار و یا ظرفیت باربری پی های واقع بر اینگونه شیروانی ها را محاسبه می کند.

برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری شیروانی های قوس دار در پلان، نمودارهایی مبتنی بر پارامترهای بی بعد تهیه شده است. این نمودارها برای تعیین مرز بالای ضریب اطمینان پایداری شیروانی های واقع در انواع خاکها (برای زوایای شیب و شعاع انحنای مختلف) ارائه شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که ضرایب اطمینان حاصل از تحلیل سه بعدی پایداری شیروانی های محدب همواره بیشتر از ضرایب اطمینان حاصل از تحلیل های دویبعی است. این اثر افزایشی با افزایش چسبندگی خاک و یا کاهش شیب شیروانی، بیشتر می شود.

۸- مراجع

- [۱] عسکری، فرج اله؛ "تحلیل سه بعدی پایداری شیروانی های همگن و ناهمگن در حالات استاتیکی و دینامیکی به روش آنالیز حدی". رساله دکتری، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۷۸.
- [۲] نخعی، جواد؛ "تأثیر فشار آب حفره ای بر پایداری شیروانی ها در تحلیل سه بعدی به روش آنالیز حدی مرز بالا". رساله

کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۱.

کتجیان، نوید؛ "تحلیل سه بعدی پایداری شیروانی قوس دار در پلان به روش آنالیز حدی مرز بالا". رساله کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۲.

Giger, M.W.; Krizek, R.J.; "Stability analysis of vertical cut with variable corner angle.", Soils and Foundation, Tokyo, 15(2), 637-1 1975.

Giger, M.W.; Krizek, R.J.; "Stability analysis of vertical corner cut with concentrated surcharge load.", Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, 102(1), 31-40 1976

Leshchinsky, D.; Baker, R.; "Stability Analysis of Conical heaps.", Soils and Foundations, 27(4), 99 110, 1987.

Michalowski, R.L.; "Three dimensional analysis of locally loaded slopes.", Geotechnique, London, 39(1), 27-38, 1989.

Chen, W. F.; "Limit Analysis And Soil Plasticity.", Elsevier Science Publishing Company, Amesterdam, 1990.

Farzaneh, O.; Askari, F.; "3D Analysis of Nonhomogeneous Slopes.", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129(2), 137-145, February 2003.

Ugai, K.; "Threedimensional stability analysis of vertical cohesive slopes.", Soils and Foundations, 25(3), 41-48, 1985.

Leshchinsky, Dov; Baker, R.; "Threedimensional slope stability.", Soils and Foundations, 26(4), 98 110, 1986