

# تاثیر فشار آب حفره‌ای بر پایداری شیروانی‌ها در تحلیل سه‌بعدی به روش آنالیز حدی مرزبالا

فرج‌الله عسکری

استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

اورنگ فرزانه

استادیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

جواد نخعی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۱/۴/۱۱، تاریخ تصویب ۸۲/۷/۱۲)

## چکیده

در این مقاله با استفاده از روش آنالیز حدی مرز بالا اثر تغییرات فشار آب حفره‌ای بر پایداری سه‌بعدی شیروانی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. پایداری شیروانی‌ها از مسایل دیر پای مهندسی خاک و پی بوده و تغییرات فشار آب حفره‌ای از عوامل بسیار مهم در این ارتباط است. این تغییرات اغلب دارای تبعات منفی بر پایداری شیروانی‌ها می‌باشد و سبب کاهش ضریب اطمینان پایداری می‌گردد. مکانیسم مورد استفاده در این تحقیق متشکل از تعدادی بلوک صلب است که نسبت به یکدیگر حرکت انتقالی دارند. نتایج حاصل از تحقیق حاضر و مقایسه آن با نتایج دیگر محققان مؤید اهمیت تحلیل سه‌بعدی پایداری شیروانی در حالاتی است که تغییرات فشار آب در نظر گرفته می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** فشار آب حفره‌ای، پایداری شیروانیها، تحلیل سه‌بعدی، آنالیز حدی مرز بالا

## مقدمه

پایداری شیروانی‌ها یکی از مباحث اساسی در مکانیک خاک است و تاکنون اثر عوامل گوناگون بر روی آن توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از مهمترین این عوامل فشار آب حفره‌ای می‌باشد.

تحلیل پایداری شیروانیها غالباً با استفاده از یکی از روشهای حدی (تعادل حدی، خطوط مشخصه و تحلیل حدی) و در حالت دوبعدی صورت گرفته است. در تحقیق حاضر اثر فشار آب حفره‌ای بر پایداری شیبها در حالات سه‌بعدی بررسی شده است. روش مورد استفاده در این تحقیق، روش تحلیل حدی می‌باشد.

در نظر گرفتن فشار آب حفره‌ای در روش تحلیل حدی سابقه محدودی دارد و از مهمترین آنها در حالت دوبعدی می‌توان به تحلیل ارائه شده توسط میخالفسکی (Michalowski) در سال ۱۹۹۵ و کیم و سالگادو (Kim & Salgado) در سال ۱۹۹۹ اشاره نمود [۱۴، ۱۶].

در حالت سه‌بعدی اثر فشار آب حفره‌ای بندرت در

تحلیلهای پایداری در نظر گرفته شده است. چن و چامو (Chen & Chameau) در سال ۱۹۸۲ و لشینسکی (Leshchinsky) در سال ۱۹۸۸ راه‌حلهایی را بر اساس روش تعادل حدی جهت تحلیل سه‌بعدی پایداری شیروانیها ارائه نموده‌اند و با استفاده از ضریب  $r_{II}$  اثر فشار آب منفذی را در محاسبات در نظر گرفته‌اند [۸، ۱۵].

یادآوری می‌شود که در روشهای مبتنی بر  $r_{II}$  فشار آب حفره‌ای اضافی در هر نقطه به صورت درصدی از تنش کل قائم در همان نقطه در نظر گرفته می‌شود که مقدار این درصد با  $r_{II}$  نشان داده می‌شود.

باید اذعان نمود که در ارتباط با در نظر گرفتن اثر فشار آب حفره‌ای در تحلیلهای سه‌بعدی، الگوریتمی بر پایه روش تحلیل حدی در دسترس نمی‌باشد. در زمینه تحلیل سه‌بعدی پایداری شیبها، تحقیقاتی در دانشکده فنی انجام یافته که نتایج آن بعنوان زیربنا در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. در بررسی مذکور از روش مرزبالای تحلیل حدی استفاده شده و برای

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 مرزپایین، معادلات سازگاری سرعت کرنشها (شرایط سینماتیکی) در نظر گرفته نمی‌شوند.

از سوی دیگر در قضیه مرز بالا، مسئله با فرض یک مکانیسم گسیختگی و در نظر گرفتن شرایط سینماتیکی حل می‌شود. در این قضیه با در نظر گرفتن یک میدان سرعت فرضی و مساوی قرار دادن 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 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، کوچک تر نمود. در مسائلی که جواب دو روش یکسان باشد، جواب واقعی بدست آمده است. بدین ترتیب در این روش جایگاه هر جواب نسبت به پاسخ واقعی مشخص می‌باشد و اضافی یا نقصانی بودن تقریب حل کاملاً مشخص است. قدرت و استواری روش تحلیل حدی نیز در همین نکته است.

### محاسبه کار ناشی از اعمال فشار آب حفره‌ای در تحلیل حدی مرز بالا

باتوجه به اینکه میدانهای سینماتیکی مورد استفاده در تحقیق حاضر دارای یک یا چند سطح ناپیوستگی سرعت می‌باشند، در این بخش نحوه محاسبه کار نیروهای داخلی بر روی این سطوح ارائه می‌گردد. در شکل (۱) دو بخش صلب که بر روی یکدیگر می‌لغزند نشان داده شده است.

اگر  $t$  ضخامت ناپیوستگی سرعت و  $\delta u$  و  $\delta v$  به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در امتدادهای تنش برشی  $\tau$  و تنش عمودی  $\sigma$  باشند، سرعت کرنش برشی یا  $\dot{\gamma}$  برابر با  $\delta u/t$  و سرعت کرنش قائم یا  $\dot{\epsilon}$  برابر با  $\delta v/t$  خواهد بود. از آنجا که

انجام محاسبات، نرم‌افزاری بنام TRASS تهیه گردیده است. در تحقیق حاضر الگوریتم نرم‌افزار مذکور جهت نظر گرفتن اثر فشار آب حفره‌ای در حالت سه‌بعدی گسترش یافته است.

### کلیات روش تحلیل حدی

روش تحلیل حدی یکی از روشهای بسیار مناسب جهت تعیین حد و دبار گسیختگی است. این روش که در قالب قضایای حدی مطرح شده است تعمیم اصل کار خمیری حداکثر می‌باشد. اصل مزبور را هیل (Hill) در سال ۱۹۴۸ مطرح نمود و دراکر (Drucker)، گرین برگ (Greenberg) و پراگر (Prager) در سال ۱۹۵۲ با تعمیم آن، قضایای حدی را ارائه کردند [۹].

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 نامیده می‌شود بیان می‌گردد. نمایش این تابع در فضای تنشهای اصلی به سطح تسلیم موسوم است.  
ج- رفتار خمیری مصالح تابع قانون جریان وابسته است. به عبارت دیگر:

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

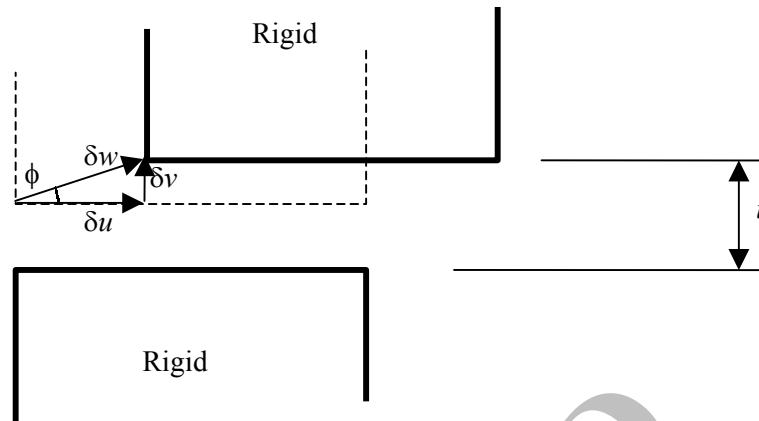
در رابطه فوق  $\dot{\epsilon}_{ij}^P$  تانسور سرعت تغییر شکل نسبی خمیری و  $\sigma_{ij}$  تانسور تنش و  $\lambda$  تابعی اسکالر و غیر منفی است.

شایان ذکر است که در روش تحلیل حدی رفتار وابسته به زمان مصالح در نظر گرفته نشده و عامل زمان نقشی در محاسبات ندارد.  $\dot{\epsilon}_{ij}^P$  را میتوان به نمو تغییر شکل نسبی نیز تعبیر نمود.

در قضیه مرز پایین، مسئله با تعریف میدانهای فرضی تنش حل می‌شود. میدان تنش مورد استفاده باید شرایط زیر را ارضا نماید:

الف - معادلات تعادل؛

ب - شرایط مرزی تنش؛



شکل ۱: اصول محاسبه کار نیروهای داخلی بر روی سطوح ناپیوستگی سرعت.

ناپیوستگی سرعت تشکیل میدهد، شامل دو قسمت است:  
 الف- کار ناشی از تغییر حجم توده خاک  
 ب- کار انجام شده بر روی ناپیوستگی های سرعت  
 اگر مدل مورد استفاده متشکل از تعدادی بلوک صلب جدا شده توسط ناپیوستگی های سرعت باشد، کار ناشی از تغییر حجم توده خاک برابر با صفر خواهد بود. در چنین حالتی کافی است که مقدار کار صرفاً بر روی سطوح ناپیوستگی سرعت محاسبه شود.

با توجه به شکل (۱)، در حالتی که مقدار فشار آب منفذی بر روی سطوح ناپیوستگی با متغیر  $U$  نشان داده شود، مقدار کار در واحد سطح از رابطه ذیل بدست می آید:

$$\dot{w} = -U\dot{\epsilon}(t \times 1 \times 1) = -U.\delta v \quad (5)$$

مقدار کل کار با انتگرال گیری از رابطه (۵) بر روی سطوح ناپیوستگی محاسبه می شود. اگر مقدار بردار سرعت بر روی هر سطح ناپیوستگی برابر با مقدار ثابت  $[V]$  و مقدار فشار آب برابر با مقدار ثابت  $U$  باشد، با توجه به اینکه بردار سرعت  $[V]$  با سطح ناپیوستگی زاویه ای برابر با  $\Phi$  میسازد و نیروی حاصل از فشار آب حفره ای بر سطح ناپیوستگی عمود است، کار فشار آب حفره ای بر روی هر سطح از رابطه (۶) قابل محاسبه خواهد بود.

$$W_u = -U.[V].A.\sin \Phi \quad (6)$$

کار نیروهای داخلی در واحد حجم نوار ناپیوستگی برابر با  $\tau\dot{\gamma} - \sigma\dot{\epsilon}$  است (تنش و کرنش عمودی در خلاف جهت یکدیگر فرض شده است) کار نیروهای داخلی در واحد سطح لایه رامی توان از رابطه ذیل بدست آورد:

$$D = (\tau\dot{\gamma} - \sigma\dot{\epsilon})(t \times 1 \times 1) = \tau\delta u - \sigma\delta v \quad (2)$$

رابطه فوق در مصالحی که از معیار خمیری موهر - کولمب و قانون جریان وابسته  $(\frac{\delta v}{\delta u} = \tan \Phi)$  تبعیت می کنند به شکل رابطه (۳) درمی آید:

$$D = \delta u(\tau - \sigma.\tan \Phi) \quad (3)$$

و یا:

$$D = \delta u.c \quad (4)$$

این رابطه بیانگر آن است که کار نیروهای داخلی در واحد سطح یک ناپیوستگی سرعت، در صورت برقراری معیار موهر-کولمب، از حاصل ضرب ضریب چسبندگی ( $c$ ) در مؤلفه مماسی سرعت ( $\delta u$ ) بدست می آید. در کاربرد روش آنالیز حدی مرز بالا، درحالتیکه فشار آب حفره ای در توده خاک وجود دارد، لازم است کار انجام شده توسط این فشار در معادلات در نظر گرفته شود. مقدار کار مذکور در توده ای از خاک که مرزهای آن را سطوح

در معادله فوق  $l_k$  سطوح زیرین و جانبی بلوک  $k$ ،  $t_k$  سطح ناپیوستگی سرعت بین بلوکهای  $k$  و  $k-1$ ،  $v_k$  سرعت مطلق بلوک  $k$ ،  $[v]_k$  سرعت نسبی بین بلوکهای  $k$  و  $k-1$ ،  $\Phi$  زاویه اصطکاک داخلی و  $c$  چسبندگی خاک میباشند.

کار نیروهای خارجی از روابط ذیل بدست می آید:

$$\dot{W}_\gamma = \sum_{k=1}^n G_k v_k \sin(\alpha_k - \Phi) \quad (1-8)$$

$$\dot{W}_u = -\sum_{k=1}^n \{v_k l_k U_k \sin \Phi + [v]_k t_k \bar{U}_k \sin \Phi\} \quad (2-8)$$

$$\dot{W}_T = T.V_0 \quad (3-8)$$

در روابط فوق  $G_k$  وزن بلوک  $k$ ،  $T$  بار قائم وارده بر شالوده،  $V_0$  مولفه قائم بردار سرعت بلوک زیر شالوده،  $U_k$  مقدار فشار آب حفره ای در سطح زیرین بلوک  $k$  و  $\bar{U}_k$  مقدار متوسط فشار آب حفره ای در سطح تماس بین بلوکهای  $k$  و  $k-1$  میباشد.

فرمول بندی مسائل پایداری شیروانی معمولاً در جهت یافتن ضریب ایمنی است. یک تعریف مورد قبول از ضریب ایمنی در مکانیک خاک بر پایه مفهوم مقاومت برشی بسیج شده میباشد [۱۶]:

$$F = \frac{\tan \Phi}{\tan \Phi_d} = \frac{c}{c_d} \quad (9)$$

$\Phi$  و  $c$  به ترتیب ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی واقعی خاک و  $c_d$  و  $\Phi_d$  مقادیر بسیج شده آنها یعنی مقادیر لازم جهت برقراری تعادل میباشند. با توجه به قضیه مرز بالا، از مساوی قرار دادن کار نیروهای داخلی و خارجی و جاگذاری  $c$  و  $\Phi$  بر حسب  $c_d$  و  $\Phi_d$  در رابطه ای که از این تساوی بدست می آید، مقدار ضریب اطمینان بدست می آید [۱۶].

$A$  مساحت سطح ناپیوستگی سرعت است.

### فرمول بندی و مکانیسم مورد استفاده

مکانیسم مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۲) ملاحظه می شود. این مکانیسم از نوع انتقالی و شامل چهار بلوک صلب است که با صفحات قائم ناپیوستگی سرعت از یکدیگر جدا شده اند.

کاربرد روش مرز بالای آنالیز حدی نیازمند استفاده از میدانهای سینماتیکی قابل قبول است. در حالاتی نظیر شکل (۲) که مکانیسم گسیختگی از تعدادی سطوح ناپیوستگی سرعت تشکیل می گردد، لازمه ارضای شرط نرمالیه با توجه به معیار موهر - کولمب آن است که زاویه بردار سرعت بر روی سطح ناپیوستگی سرعت برابر با زاویه اصطکاک داخلی خاک باشد. در شکل ۲ نحوه محاسبه سرعت بلوکها و سرعت نسبی آنها نسبت به یکدیگر نشان داده شده است [۱۶].

در تحلیلهای سه بعدی، سطوح جانبی بلوکها نیز در زمره ناپیوستگیهای سرعت می باشند و باید شرط نرمالیه بر روی این سطوح نیز ارضا گردد. بدین منظور پس از معلوم شدن مقدار و امتداد بردار سرعت بلوکهای مختلف، معادله صفحات جانبی هر بلوک به نحوی تعیین می گردد که با بردار سرعت آن بلوک زاویه ای برابر با زاویه  $\Phi$  بسازد. این محاسبات و کلیه روابطی که در ادامه ارائه می شود با استفاده از نرم افزاری (موسوم به TRASS) که به منظور تحلیل سه بعدی پایداری شیروانیها تهیه گردیده و در تحقیق حاضر فرمول بندی آن در جریان این تحقیق برای در نظر گرفتن اثر فشار آب حفره ای تکمیل گردیده انجام شده است [۵].

در قضیه مرز بالا کار نیروهای داخلی ( $\dot{D}$ ) با توجه به رابطه (۴) محاسبه میشود. کار نیروهای خارجی شامل کار ناشی از وزن توده خاک ( $\dot{W}_g$ )، کار ناشی از فشار آب منفذی ( $\dot{W}_u$ ) و کار نیروهای وارد بر شالوده ( $\dot{W}_T$ ) است.

کار نیروهای داخلی بصورت زیر تعریف میشود:

$$\dot{D} = c \cdot \cos \Phi \cdot \sum_{k=1}^n [l_k v_k + t_k [v]_k] \quad (7)$$

## مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحلیل‌های دو بعدی

همانگونه که در بالا بدان اشاره شد، میخالفسکی (Michalowski) در سال ۱۹۹۴ تحقیقاتی را بر روی پایداری شیروانی‌ها در شرایط حضور آب انجام داده است. روش مورد استفاده وی، روش آنالیز حدی مرز بالا بوده که در آن، در حالت دوبعدی، مکانیسم گسیختگی مکانیسمی دورانی به شکل اسپیرال لگاریتمی می‌باشد. وی برای اعمال فشار آب حفره‌ای از مفهوم  $r_{ii}$  استفاده کرده و در تحقیقاتی که متعاقباً در سال ۱۹۹۵ به انجام رسانیده همان روش را جهت سطوح گسیختگی با اشکال مختلف بکار گرفته است [۱۶].

میخالفسکی نتایج تحلیل‌های خود را به صورت ضرایب پایداری ارائه کرده است. یادآوری می‌شود که ضریب پایداری در تحلیل‌های پایداری شیروانی بصورت ذیل تعریف می‌شود:

$$N_s = \frac{\gamma \cdot H_c}{c} = \frac{F\gamma H}{c} \quad (10)$$

در این رابطه  $\gamma$  وزن مخصوص خاک،  $H_c$  ارتفاع بحرانی شیروانی،  $c$  ضریب چسبندگی خاک،  $F$  ضریب اطمینان و  $H$  ارتفاع شیروانی می‌باشد.

مقادیر ضرایب پایداری در تحقیق حاضر با استفاده از برنامه TRASS (مکانیسم انتقالی) محاسبه و با مقادیر متناظر در روش میخالفسکی (مکانیسم دورانی) مقایسه شده‌اند. این نتایج در جداول (۱) تا (۴) ارائه شده‌است.

چنانکه ملاحظه می‌شود نتایج هر دو روش نسبتاً به یکدیگر نزدیک هستند. نکته قابل توجه اینست که نرم‌افزار TRASS برای شیب‌های کمتر عمدتاً مقدار بیشتری را

برای  $F\left(\frac{\gamma H}{c}\right)$  بدست می‌دهد و در شیب‌های بیشتر،

وضعیت بر عکس می‌شود. به عبارت دیگر چنین به نظر می‌رسد که مکانیسم لغزش بحرانی در شیب‌های زیاد انتقالی و در شیب‌های کم، دورانی است. همچنین ملاحظه

می‌شود که با افزایش شیب، مقدار  $F\left(\frac{\gamma H}{c}\right)$  و یا به تعبیری ارتفاع بحرانی شیروانی کاهش می‌یابد و با افزایش

ضریب فشار آب حفره ای ( $r_{ii}$ )، مقدار  $F\left(\frac{\gamma H}{c}\right)$  یا به عبارت دیگر ضریب اطمینان پایداری شیب کاهش می‌یابد.

کیم و سالگادو (Kim & Salgado) نیز در سال ۱۹۹۹ پایداری شیروانی‌های دوبعدی تحت اثر فشار آب حفره ای را به روش‌های مرز بالا و مرز مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق از روش اجزاء محدود استفاده شده و فشار آب با در نظر گرفتن خط آزاد سطح آب معرفی گردیده است [۱۴]. آنها نتایج خود را با روش ساده شده بیشاپ و جانبو مقایسه کرده‌اند.

با فرض  $H=10\text{m}$ ،  $c'=20\text{ kN/m}^2$  و  $18\text{ kN/m}^3$   $\gamma =$ ، در حالات  $\Phi'$  برابر ۱۰ و ۱۵ درجه نتایج تحقیق حاضر با نتایج محققان مذکور و همچنین روش‌های جانبو و بیشاپ در جداول (۵) و (۶) مقایسه شده‌است.

چنانکه در این جداول دیده می‌شود، نتایج تحقیق حاضر به نتایج تحلیل مرز بالای کیم و سالگادو نزدیک است. همچنین مقایسه جواب‌های مرز بالای TRASS با نتایج مرز پائین کیم و سالگادو نشان دهنده حداکثر اختلافی بین ۱۰ تا ۱۵ درصد می‌باشد. به عبارت دیگر در مسئله مورد مطالعه الگوریتم تحقیق حاضر ضریب اطمینان را در بدترین حالت با دقت حدود ۱۵ درصد تخمین زده است.

## مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج موجود در حالت سه بعدی

چن و شامو (Chen & Chameau) در سال ۱۹۸۲ بررسی‌هایی را در مورد آنالیز پایداری شیروانی‌های سه بعدی به روش تعادل حدی انجام داده‌اند [۸]. در این بررسی توده همگن خاک به تعداد زیادی ستون قائم تقسیم شده است.

در یکی از مثال‌های مورد بررسی در تحقیق مزبور توده خاکی با زاویه اصطکاک داخلی ۱۵ درجه و ضریب چسبندگی ۲۸/۷ کیلوپاسکال مورد مطالعه قرار داده شده است. ارتفاع شیب برابر ۶/۱ متر (۲۰ فوت) فرض گردیده و شیب شیروانی در سه حالت مختلف به شرح زیر در نظر گرفته شده‌است:

الف - ۳۳/۷ درجه (۱:۱/۵)

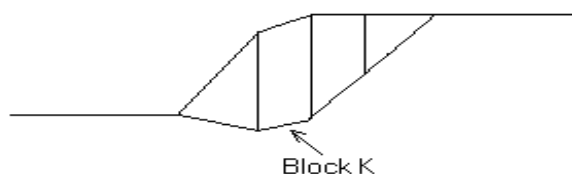
استوانه‌ای که منتهی به دو سطح نیمه بیضوی میباشد استفاده نموده اند.

مقایسه نتایج بدست آمده حاکی از آنست که نتایج در حالات مورد مقایسه با دقت بسیار بالایی بهم نزدیک می باشند. ضمناً مشاهده می شود که با افزایش شیب شیروانی ضریب اطمینان، هم در حالت سه بعدی و هم در حالت دو بعدی، کاهش می یابد و نسبت این دو نیز با افزایش شیب کاهش می یابد.

ب - ۲۱/۸ درجه (۲/۵: ۱)

ج - ۱۶ درجه (۳/۵: ۱)

در جدول ۷ نتایج این دو محقق با نتایج تحقیق حاضر برای سه حالت مختلف عرض گوه گسیختگی مقایسه گردیده است. فشار آب حفره‌ای با استفاده از ضریب  $r_u$  در محاسبات اعمال شده و مقدار آن برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. چن و شامو در مدل خود از یک سطح



شکل ۲: مقطع مکانیسم مورد استفاده و بردارهای سرعت.

جدول ۱: مقایسه  $F\left(\frac{\gamma H}{c}\right)$  بدست آمده از تحقیق حاضر با نتایج میخالفسکی در حالت  $\Phi = 10^\circ$  و  $H=10m$  و  $c=10 \frac{kN}{m^2}$ .

$\beta$ زاویه شیب (درجه)	میخالفسکی		تحقیق حاضر	
	$r_u=0/25$	$r_u=0/50$	$r_u=0/25$	$r_u=0/50$
۱۵	-	۳۵	-	۳۹/۵
۳۰	۲۰	۱۲	۲۱/۵	۱۳/۱
۴۵	۱۲	۸	۱۲/۴	۸/۸
۶۰	۸	۶	۸/۱	۶/۴
۷۵	۷	۵	۶/۱	۴/۸
۹۰	۴/۵	۴	۴/۵	۳/۷

جدول ۲: مقایسه بدست آمده از تحقیق حاضر با نتایج میخالفسکی در حالت  $\Phi = 20^\circ$  و  $H=10m$  و  $c=10 \frac{kN}{m^2}$  .

$\beta$ زاویه شیب (درجه)	میخالفسکی		تحقیق حاضر	
	$r_u=0/25$	$r_u=0/50$	$r_u=0/25$	$r_u=0/50$
۱۵	۲۴	۱۴	۲۵/۶	۱۵/۴
۳۰	۱۰	۸	۱۳/۶	۹/۳
۴۵	۸	۷	۸/۸	۷/۶
۶۰	۷	۶	۶/۸	۶
۷۵	۶	۵	۵/۴	۴/۷
۹۰	۴/۵	۴	۳/۴	۳/۹

جدول ۳: مقایسه بدست آمده از تحقیق حاضر با نتایج میخالفسکی در حالت  $\Phi = 30^\circ$  و  $H=10m$  و  $c=10 \frac{kN}{m^2}$  .

$\beta$ زاویه شیب (درجه)	میخالفسکی		تحقیق حاضر	
	$r_u=0/25$	$r_u=0/50$	$r_u=0/25$	$r_u=0/50$
۱۵	-	-	-	-
۳۰	-	۱۸	-	۱۹/۳
۴۵	۱۵	۹	۱۶/۷	۱۰
۶۰	۱۰	۶	۹/۸	۶/۵
۷۵	۷	۵	۶/۲	۴/۹
۹۰	۴/۵	۴	۴/۵	۳/۳

جدول ۴: مقایسه بدست آمده از تحقیق حاضر با نتایج میخالفسکی در حالت  $\Phi = 40^\circ$  و  $H=10m$  و  $c=10 \frac{kN}{m^2}$  .

$\beta$ زاویه شیب (درجه)	میخالفسکی		تحقیق حاضر	
	$r_u=0/25$	$r_u=0/50$	$r_u=0/25$	$r_u=0/50$
۱۵	-	-	-	-
۳۰	-	۳۰	-	۳۲
۴۵	۲۵	۱۱	۲۶/۹	۱۱/۷
۶۰	۱۲	۶	۱۰/۸	۶/۶
۷۵	۷	۴	۶/۴	۳/۷
۹۰	۴/۵	۳/۵	۴/۵	۳/۳

جدول ۵: مقایسه ضرایب اطمینان بدست آمده در تحقیق حاضر با نتایج کیم و سالگادو، بیشاپ و جانبو

$$\Phi' = 15^\circ, \gamma = 18 \text{ KN/m}^3, c' = 20 \text{ KN/m}^2, H=10m$$

ارتفاع آب (متر)	کیم و سالگادو		بیشاپ	جانبو	TRASS
	مرز پایین	مرز بالا			
۲	۱/۱۰	۱/۲۳	۱/۱۷	۱/۰۸	۱/۲۲
۴	۱/۰۴	۱/۱۷	۱/۱۰	۱/۰۳	۱/۱۷
۶	۰/۹۷	۱/۰۷	۱/۰۴	۰/۹۷	۱/۰۸

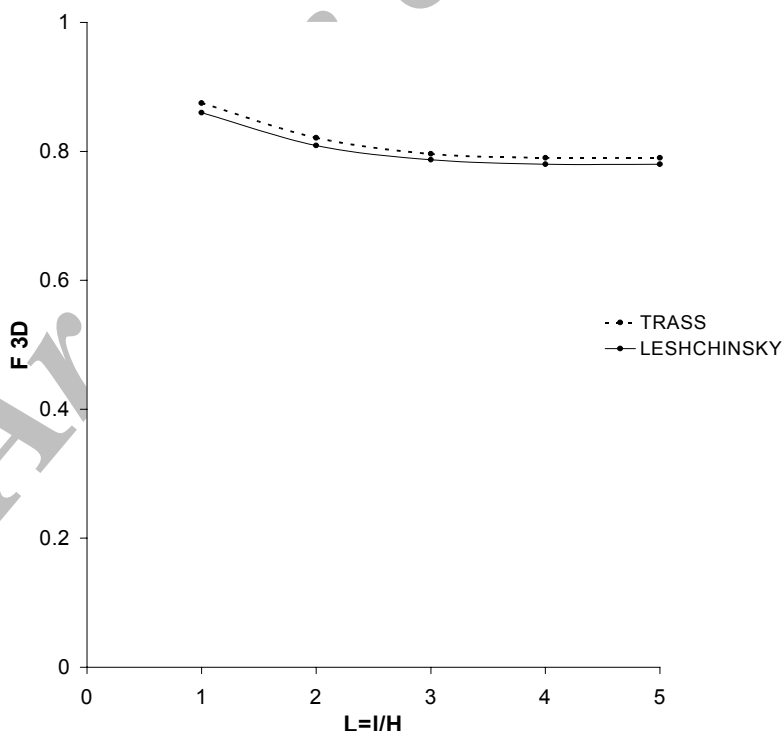
جدول ۶: مقایسه ضرایب اطمینان بدست آمده در تحقیق حاضر با نتایج کیم و سالگادو و بیشاپ

$$\Phi' = 10^\circ, \gamma = 18 \text{ KN/m}^3, c' = 20 \text{ KN/m}^2, H=10\text{m}$$

ارتفاع آب (متر)	کیم و سالگادو		بیشاپ	TRASS
	مرز پایین	مرز بالا		
۲	۰/۹۶	۱/۰۵	۰/۹۹	۱/۰۶
۴	۰/۸۹	۱/۰۰	۰/۹۶	۱/۰۱
۶	۰/۸۳	۰/۸۹	۰/۹۲	۰/۹۶

جدول ۷: مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق چن و چامو از لحاظ نسبت ضرایب اطمینان در حالات سه بعدی و دوبعدی ( $\frac{F_{3D}}{F_{2D}}$ )

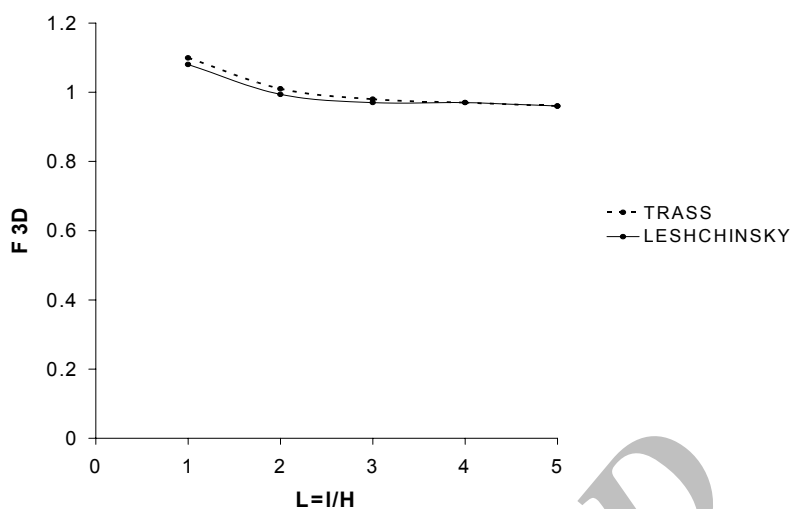
روش مورد بررسی	پهنای مکانیزم (متر)	زاویه شیب (درجه)		
		۱۶	۲۱/۸	۳۳/۷
چن و شامو	۱۸/۳	۱/۲۹	۱/۲۵	۱/۱۴
	۳۰/۵	۱/۱۴	۱/۱۲	۱/۰۷
	۴۲/۷	۱/۱	۱/۰۷	۱/۰۴
TRASS	۱۸/۳	۱/۲۱	۱/۱۹	۱/۱۴
	۳۰/۵	۱/۱۳	۱/۱۲	۱/۰۸
	۴۲/۷	۱/۱	۱/۰۷	۱/۰۵



شکل ۳: مقایسه ( $F_{3D}(r_u = 0.3)$  حاصل از تحقیق حاضر با نتایج تحقیق لشینسکی در حالت  $H = 5m$  و  $c' = 20 \frac{kN}{m^2}$  و

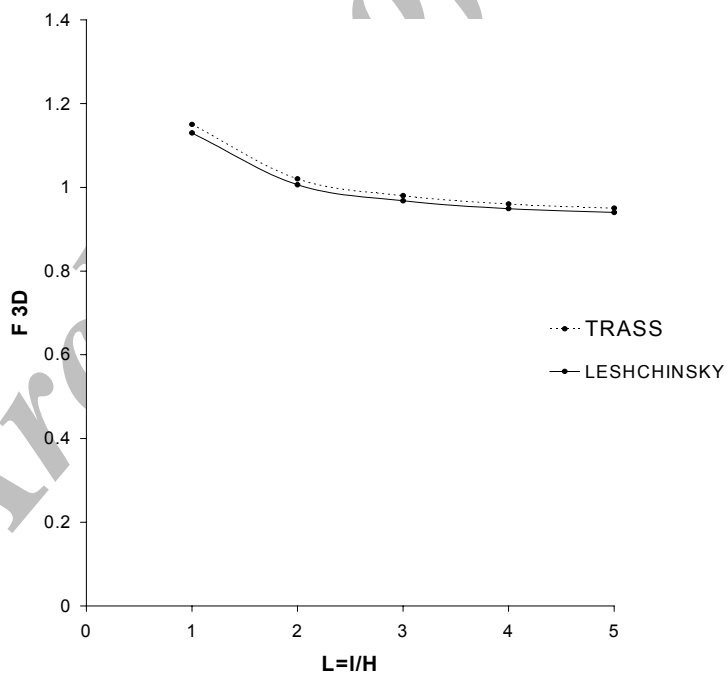
$$\lambda = 0.26 \text{ و } \gamma = 18 \frac{kN}{m^3}$$





شکل ۴: مقایسه  $F_{3D}(r_u = 0.3)$  حاصل از تحقیق حاضر با نتایج تحقیق لشینسکی در حالت  $H = 5m$  و  $c' = 20 \frac{kN}{m^2}$  و

$$\lambda = 0.5 \text{ و } \gamma = 18 \frac{kN}{m^3}$$



شکل ۵: مقایسه  $F_{3D}(r_u = 0.3)$  حاصل از تحقیق حاضر با نتایج تحقیق لشینسکی در حالت  $H = 5m$  و  $c' = 20 \frac{kN}{m^2}$  و

$$\lambda = 1.24 \text{ و } \gamma = 18 \frac{kN}{m^3}$$

شکل ۶: مقایسه  $F_{3D}(r_u = 0.3)$  حاصل از تحقیق حاضر با نتایج تحقیق لشینسکی در حالت  $H = 5m$  و  $c' = 20 \frac{kN}{m^2}$  و  $\gamma = 18 \frac{kN}{m^3}$  و  $\lambda \rightarrow \infty$ .

در شکل‌های (۳) تا (۶) نتایج تحقیق حاضر با نتایج ارائه شده توسط لشینسکی مقایسه شده‌است. در این شکل‌ها  $L=I/H$  معرف نسبت پهنای مکانیسم به ارتفاع شیروانی می‌باشد.

نتایج در حالات مورد مقایسه بسیار به یکدیگر نزدیک هستند. به طور کلی با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۳) تا (۶) ملاحظه می‌شود که:

- به ازای مقداری ثابت برای  $\lambda$ ، با افزایش  $L$  از مقدار ضریب پایداری کاسته می‌شود.

- به ازای مقداری ثابت برای  $L$ ، ضریب پایداری با افزایش  $\lambda$  افزایش می‌یابد.

چنانکه ملاحظه می‌شود، در هر دو تحقیق با افزایش عرض مکانیسم مقدار ضریب اطمینان سه‌بعدی کاهش می‌یابد. در مجموع، نتایج حاصل از دو تحلیل بسیار به یکدیگر نزدیک هستند.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای نخستین بار الگوریتمی برای در نظر گرفتن اثر فشار آب حفره‌ای در تحلیل سه‌بعدی پایداری شیروانیهای خاکی با استفاده از روش تحلیل حدی ارائه شده است.

لشینسکی (Leshchinsky) در سال ۱۹۸۸ بررسیهایی را بر روی ترانشه‌های قائم به روش تعادل حدی و با در نظر گرفتن فشار آب حفره‌ای انجام داده است [15]. او در نتایج خود با در نظر گرفتن تغییرات عرض گوه گسیختگی، ضریب اطمینان در حالت سه بعدی (با وجود فشار آب حفره ای) را ارائه نموده است.

نتایج تحلیلهای پایداری شیروانی غالباً به صورت نمودارهای بدون بعد ارائه میشود. یکی از نسبتهای بی‌بعد مورد استفاده در این تحلیلهای ضریب پایداری است که در رابطه (۱۰) تعریف گردید. نسبت بی‌بعد دیگری که در تحلیلهای پایداری شیروانی مورد استفاده قرار گرفته و لشینسکی نیز آن را بکار گرفته ضریب  $\lambda$  می‌باشد که در رابطه (۱۱) تعریف شده است:

$$\lambda = \frac{1}{\gamma H} \cdot \frac{c'}{\tan \Phi'} \quad (11)$$

چنانکه در این رابطه ملاحظه میگردد، مقدار  $\lambda$  به ازای  $c = 0$  برابر با صفر و به ازای  $\Phi = 0$  به سمت بی‌نهایت میل میکنند. به عبارت دیگر،  $\lambda$  برابر با صفر معرف خاک کاملاً دانه‌ای و  $\lambda$  برابر با بینهایت معرف خاک کاملاً چسبنده است.

مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم ارائه شده با نتایج  
تحلیلهای محققان دیگر به روش آنالیز حدی در حالت  
دوبعدی و به روش تعادل حدی در حالت سه بعدی  
نشان دهنده صحت روش و دقت رضایت بخش آن است.

### مراجع

- ۱ - بهنیا، ک. و طباطبائی، ا. "مکانیک خاک." جلد اول و دوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، (۱۳۷۳).
- ۲ - حائری، س. م. "اصول کاربردی سدهای خاکی." نشر گروه مهندسی عمران و صنایع، تهران، (۱۳۶۳).
- ۳ - شاهکار، غ. م.، بزرگ نیا، ا. (ترجمه)، دریا، ن. و اسمیت، ه. (تالیف). "تحلیل رگرسیون کاربردی." مرکز نشر دانشگاهی، تهران، (۱۳۷۸).
- ۴ - عسکری، ف. "تحلیل سه بعدی پایداری شیروانیهای همگن و ناهمگن در حالات استاتیکی و دینامیکی به روش آنالیز حدی." رساله دکتری، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۸).
- ۵ - نخعی، ج. "اثر فشار آب حفره‌ای بر پایداری شیروانیها در تحلیل سه بعدی به روش آنالیز حدی مرز بالا." رساله کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۸۱).
- 6 - Atkinson, J. H. (1981). *Foundations and Slopes*. McGraw-Hill Book Company, UK.
- 7 - Bromhead, E. N. (1986). *The stability of slopes*. Surrey University Press, New York.
- 8 - Chen, R. H. and Chameau, J. L. (1982). "Three-dimensional equilibrium analysis of slopes." *Geotechnique* 32, No.1, PP.31-40.
- 9 - Chen, W. F. (1975). *Limit analysis and soil plasticity*. Elsevier Science Publishing Company, Amesterdam.
- 10 - Chen, W. F. and Liu, X. L. (1900). *Limit analysis in soil mechanics*. Elsevier Science Publishers B. V.
- 11 - Craig, R. F. (1987). *Soil Mechanics*, 4<sup>th</sup> ed., Chapman and Hall.
- 12 - Farzaneh, O. and Askari, F. (2003). "Three-dimensional analysis of nonhomogeneous slopes," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.129, No.2.
- 13 - Huang, Y. H. (1983). *Stability of earth slopes*. Unuversity of Kentucky.
- 14 - Kim, J. and Salgado, R. (1991). "Limit analysis of soil subjected to pore-water pressures." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125, No. 1.
- 15 - Leshchinsky, D. (1988). "Design charts for vertical cuts." *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 144, No, 3.
- 16 - Michalowski, R. L. (1995). "Slope stability: a kinematical approach." *Geotechnique* 45, No.2, PP.283-293.
- 17 - Yagi, N. and Yamagami, T. (1999). *Slope stability engineering*. University Of Tokushima, Japan.