

بررسی پایداری شیروانی‌ها روی نهشته‌های طبیعی ناهمسان و ناهمگون به روش عددی در شرایط زهکشی نشده

علیرضا اردکانی^{۱*}

علی ماهیگیر^۲

چکیده

پیدایش طبیعی نهشته‌های خاکی منجر به شکل‌گیری ناهمسانی و ناهمگنی در خصوصیات آن‌ها می‌شود. بررسی اثرات ناهمسانی و ناهمگنی مقاومت برشی بر روی پایداری شیروانی‌ها به کمک روش‌های سنتی مانند روش تعادل حدی، روش حد بالا و روش قطعات انجام‌گرفته است. هدف این تحقیق نشان دادن اثر ناهمسانی مکانیکی و ناهمگنی مشخصه چسبندگی خاک بر روی پایداری شیروانی‌ها است. ناهمسانی مکانیکی که با نسبت $AF=C_H/C_V$ مشخص می‌شود، با تعمیم مدل موهر-کلمب همسان به حالت ناهمسان به حساب آورده شد. مطالعه بر روی یک شیروانی در شرایط زهکشی نشده ($\phi=0$) صورت گرفت و نتایج نشان‌دهنده اهمیت ناهمسانی و ناهمگونی چسبندگی خاک روی پایداری شیروانی‌ها است. به‌طور کلی در نظر گرفتن ناهمسانی و ناهمگنی خاک منجر به تحلیل و طراحی صحیح‌تر و اقتصادی‌تر می‌شود، به‌طوری‌که ضریب اطمینان در حالت نسبت ناهمسانی برابر با ۲ ($AF=2$) حدود ۴۰٪ نسبت به حالت همسان ($AF=1$) افزایش داشته است.

واژه‌های کلیدی

پایداری شیروانی‌ها، مقاومت برشی زهکشی نشده، ناهمگونی، ناهمسانی، ضریب اطمینان

۱. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

۲. دانشجوی دکترای ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

مقدمه

تنش و کرنش بستگی دارد. کاساگرانده و کاریلو (۱۹۴۴) اولین کسانی بودند که ناهمسانی خاک را به دو جزء ذاتی و القایی تقسیم کردند. بیش تر خاک‌ها ترکیبی از ناهمسانی ذاتی و القایی را در خود می‌بینند که به آن ناهمسانی اولیه می‌گویند.

یکی از مهم‌ترین مباحث ژئوتکنیکی پایداری شیروانی‌ها می‌باشد. عدم شناخت و اطلاعات مناسب و در نتیجه طراحی‌های نادرست منجر به ریزش و یا گسیختگی شیروانی‌ها می‌شود. برای بدست آوردن ضریب اطمینان پایداری شیروانی روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش تعادل حدی، روش تحلیل حدی، روش بلوک‌های لغزش و روش‌های عددی مانند روش اجزاءمحدود و تفاضل نام برد. در اکثر این روش‌های کلاسیک فرض بر همگن و همسان بودن خصوصیات خاک در کل محیط است، درحالی‌که با فرض ناهمسانی و ناهمگنی خصوصیات خاک مکانیسم گسیختگی و در نتیجه ضریب اطمینان شیروانی تغییر خواهد کرد.

تأثیر ناهمسانی بر روی پایداری شیروانی موضوع مقاله‌های متعددی در مکانیک خاک بوده است. اگرچه که بیشتر این مطالعه‌ها فقط شرایط زهکشی نشده متناظر با حالت $\phi=0$ را در نظر گرفتند و از فرآیند جرم برای تحلیل پایداری استفاده کردند. لو (۱۹۶۵) با استفاده از فرآیند روش جرم و آنالیز تعادل حدی، تأثیر ناهمسانی چسبندگی خاک را روی مقدار ضریب اطمینان موردبررسی قرار داد. نتایج نشان داد که تأثیر ناهمسانی روی پایداری شیروانی، برای شیروانی‌های تند ناچیز و برای شیروانی‌های مسطح‌تر با اهمیت است. همبستگی بین ناهمسانی چسبندگی و پایداری شیروانی در خاک‌های $c-\phi$ توسط چن و همکاران (۱۹۷۵) و به‌وسیله حد بالای آنالیز حدی و با فرض سطح لغزش به‌صورت اسپیرال لگاریتمی موردبررسی قرار گرفت. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تأثیر ناهمسانی چسبندگی بر روی عدد پایداری در حالت شیروانی‌های مسطح‌تر و دارای زاویه اصطکاک داخلی

تقریباً تمام نهشته‌های خاکی به‌طور ذاتی ناهمسان هستند (بیشاپ (۱۹۶۶)). ناهمسانی در خاک از فرآیند رسوب‌گذاری و تحکیم یک‌بعدی پس‌از آن به وجود می‌آید. برای مثال، رس‌ها به‌صورت صفحه‌ای رسوب می‌کنند و در مقیاس کوچک دارای مشخصات یکسان در جهت عرضی (عمود بر جهت رسوب‌گذاری) هستند (سادا و بیانچینی (۱۹۷۵)). مطالعه ساختار رس نشان می‌دهد که ذرات رس در حین تحکیم یک‌بعدی متمایل به قرارگیری در جهت عمود بر جهت تنش اصلی حداکثر می‌باشند (میشل (۱۹۷۶)). مشخصات فیزیکی و مقاومتی این رس‌ها در جهت افق مشابه است و با جهت عمود بر آن متفاوت است. شکل‌گیری ساختار ناهمسان در رس‌ها مستلزم وجود تفاوت بین تنش‌های اصلی است که خود تابع عواملی چون نوع رس، خواص شیمیایی، سیال منفذی و جهت اولیه ذرات آن‌ها است. علاوه بر فشار تحکیمی، عوامل دیگری نظیر نوع رسوب‌گذاری، نسبت پیش‌تحکیمی و تاریخچه تنش هم بر ناهمسانی رس‌ها مؤثر می‌باشند (میشل (۱۹۷۶)).

ناهمگونی ذاتی خاک حاصل پروسه‌ای طبیعی زمین‌شناختی است که در طی آن خاک ایجاد و به‌طور پیوسته دست‌خوش تغییر بوده است. تنگ (۱۹۸۴) ناهمگونی را به تغییرات موجود در کانی‌شناسی، شرایط محیطی در حین رسوب‌گذاری، تاریخچه تنش و تغییر در درصد رطوبت نسبت داد. هنگامی که ذرات رسوبی از هم جدا شده در طی فرآیند ته‌نشینی و تحکیم متعاقب آن به تعادل می‌رسند، یک ساختار ویژه از خاک را شکل می‌دهند. شرایط اعمال‌شده در طی این فرآیندها جهت‌گیری ذرات و وضعیت اتصال بین آن‌ها را کنترل می‌کند که تعیین‌کننده واکنش خاک در برابر تنش و کرنش‌های اعمالی می‌باشد. از آنجاکه فرآیند رسوب‌گذاری خاک در نتیجه نیروی جاذبه زمین است، اتصال ذرات به جهت وابسته می‌باشد و یا به‌عبارت‌دیگر ناهمسان است و واکنش آن‌ها در برابر بار اعمالی به جهت اعمال تغییرات

مستقل از جهت بارگذاری می‌باشد. از طرف دیگر مقاومت برشی زهکشی نشده و چسبندگی به جهت بارگذاری و نوع آزمایش انجام شده برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی کاملاً وابسته می‌باشند. اگرچه رفتار ناهمسانی ماسه در آزمایش برش ساده تحکیم یافته زهکشی شده مورد ارزیابی قرار گرفت و ثابت گردیده هنگامی که تنش اصلی حداکثر منطبق بر جهت ته‌نشینی ماسه باشد زاویه اصطکاک داخلی بیشتر از حالتی است که تنش اصلی حداکثر عمود بر جهت ته‌نشینی ماسه می‌باشد؛ بنابراین در تحقیق انجام شده اثر ناهمسانی فقط برای چسبندگی لحاظ شده و فرض می‌شود که زاویه اصطکاک داخلی مقدار ثابتی در تمام جهات و نقاط محیط خاک داشته باشد. از سال ۱۹۴۰ تلاش‌های زیادی برای اندازه‌گیری ناهمسانی چسبندگی خاک انجام شد. کاساگرانده و کاریلو (۱۹۴۴) پیشنهاد کردند که چسبندگی در هر جهت در صفحه افق- قائم می‌تواند با استفاده از معادله زیر بیان شود:

$$C_i = C_H + (C_V - C_H) \sin^2 i \quad (1)$$

C_H و C_V به ترتیب چسبندگی در صفحات افق و قائم هستند و C_i نشانگر چسبندگی در جهت i است که i میزان انحراف جهت اصلی حداکثر نسبت به صفحه افق را نشان می‌دهد. نسبت C_H/C_V نسبت ناهمسانی (AF) نامیده می‌شود و بنا به فرض لو (۱۹۶۵) برای یک خاک مشخص، ثابت در نظر گرفته می‌شود. پوش گسیختگی متناظر با معیار تسلیم اصلاح شده موهر- کلمب از دو تابع تسلیم برشی و کششی تشکیل شده است. قانون جریان برشی ناهمراه^۲ و قانون جریان کششی همراه^۳ می‌باشد. در فرمولاسیون تفاضل محدود این مدل تنش‌های اصلی σ_1 ، σ_2 و σ_3 به کار برده می‌شوند. با فرض کرنش صفحه‌ای، تنش خارج از صفحه σ_{zz} ، به عنوان یکی از تنش‌های اصلی در نظر گرفته می‌شود.

کمتر بسیار زیاد است. الکرنی و الشمرانی (۲۰۰۰) با استفاده از روش قطعات^۱ به بررسی تأثیر ناهمسانی چسبندگی بر روی پایداری شیروانی‌ها در خاک‌های همگن و با زاویه اصطکاک داخلی بزرگ‌تر از صفر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد هنگامی که زاویه شیب شیروانی از ۵۳ درجه کمتر باشد، ناهمسانی خاک تأثیر زیادی بر روی پایداری شیروانی‌ها دارد. هیکس و سامی (۲۰۰۲) تأثیر ناهمگنی مقاومت برشی زهکشی نشده را بر روی پایداری شیروانی‌های رسی بررسی کردند. تحلیل‌های هیکس و سامی (۲۰۰۴) اهمیت وابستگی ناهمگنی به عمق و ناهمسان بودن آن را آشکار نمود. گریفیتس و فنتون (۲۰۰۴) تأثیر تغییرپذیری فضایی مقاومت برشی زهکشی نشده را بر روی احتمال گسیختگی شیروانی بررسی نمودند. لو و همکاران (۲۰۰۷) یک روش کاربردی EXCEL را برای تحلیل قابلیت اعتماد شیروانی‌ها با پذیرش تغییرات فضایی پارامترهای مقاومت برشی ارائه نمودند. جمشیدی چناری و اعلائی (۲۰۱۵) با در نظر گرفتن خصوصیات همبستگی متفاوت در جهت قائم و افق به بررسی پایداری شیروانی‌ها پرداختند. دو نوع ناهمسانی تحت عنوان ناهمسانی ناهمگنی و ناهمسانی مکانیکی (هیدرولیکی) وجود داشت.

در این تحقیق اثر ناهمسانی و ناهمگونی مشخصه چسبندگی روی ضریب اطمینان پایداری شیروانی به روش عددی تفاضل محدود و با کمک نرم‌افزار FLAC^{2D} و با استفاده از مدل رفتاری اصلاح شده موهر- کلمب در حالت زهکشی نشده (0) $(\phi=)$ مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای در نظر گرفتن اثر ناهمسانی چسبندگی و بررسی اثرات آن بر پایداری شیروانی مدل موهر کلمب به حالت ناهمسان تعمیم داده شد.

معیار تسلیم اصلاح شده موهر - کلمب

معیار تسلیم موهر-کلمب مقاومت خاک را به وسیله دو کمیت چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) توصیف می‌کند. محققین زیادی مانند دانکن و سید (۱۹۶۶) و ماین (۱۹۸۵) به این نتیجه رسیدند که زاویه اصطکاک داخلی خاک ناهمسانی کمی از خود نشان می‌دهد و در رس‌ها کاملاً

^۲- non-associated shear flow rule

^۳- associated tensile flow rule

^۱- method of slices

v_{HH} : ضریب پواسون برای تأثیر کرنش‌های افق بر روی یکدیگر

پوش تسلیم برای معیار تسلیم اصلاح‌شده موهر- کلمب اصلاح‌شده در صفحه (σ_1, σ_3) در شکل (۱) نشان داده شده است. پوش گسیختگی از نقطه A تا B به وسیله تابع تسلیم اصلاح‌شده موهر- کلمب به صورت زیر تعریف می‌شود:

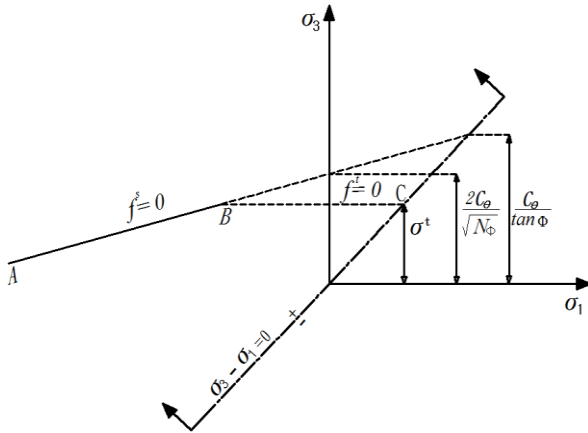
$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2C_\theta \sqrt{N_\phi} \quad (۶)$$

که داریم:

$$N_\phi = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (۷)$$

از نقطه B تا C به وسیله تابع تسلیم کششی به شکل:

$$f^t = \sigma^t - \sigma^3 \quad (۸)$$



شکل(۱): پوش گسیختگی متناظر با معیار تسلیم

اصلاح‌شده موهر - کلمب (جمشیدی و ماهیگیر (۲۰۱۴))

که ϕ زاویه اصطکاک داخلی، σ^t مقاومت کششی و C_θ چسبندگی در جهتی که با افق زاویه θ می‌سازد و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C_\theta = C_H + (C_V - C_H) \sin^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} + \theta \right) \quad (۹)$$

تنش‌ها و جهات اصلی با استفاده از مؤلفه‌های تانسور تنش محاسبه‌شده و به صورت زیر مرتب می‌شوند:

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \quad (۲)$$

نمو کرنش‌های اصلی $\Delta e_1, \Delta e_2$ و Δe_3 به شکل زیر تجزیه می‌شوند:

$$\Delta e_i = \Delta e_i^e + \Delta e_i^p \quad i = 1, 3 \quad (۳)$$

که بالانویس e و p به ترتیب اشاره به بخش الاستیک و پلاستیک دارد.

قانون هوک در حالت تنش‌های اصلی برابر است با:

$$\Delta \sigma_1 = \alpha_2 \Delta e_1 + \alpha_3 \Delta e_2 + \alpha_4 \Delta e_3 \quad (۴)$$

$$\Delta \sigma_2 = \alpha_5 \Delta e_1 + \alpha_6 \Delta e_2 + \alpha_5 \Delta e_3$$

$$\Delta \sigma_3 = \alpha_4 \Delta e_1 + \alpha_3 \Delta e_2 + \alpha_2 \Delta e_3$$

که ضرایب از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 - 2\nu_{HV}\nu_{VH} - 2\nu_{HV}\nu_{VH}\nu_{HH} - \nu_{HH}\nu_{HH}} \quad (۵)$$

$$\alpha_2 = \alpha_1(1 - \nu_{VH}\nu_{HV})E_H$$

$$\alpha_3 = \alpha_1\nu_{VH}(1 + \nu_{HH})E_H$$

$$\alpha_4 = \alpha_1(\nu_{HH} + \nu_{VH}\nu_{HV})E_H$$

$$\alpha_5 = \alpha_1\nu_{HV}(1 + \nu_{HH})E_V$$

$$\alpha_6 = \alpha_1(1 - \nu_{HH}\nu_{HH})E_V$$

E_H : مدول یانگ در جهت افق

E_V : مدول یانگ در جهت قائم

ν_{VH} : ضریب پواسون برای تأثیر کرنش قائم بر روی کرنش افق

ν_{HV} : ضریب پواسون برای تأثیر کرنش افق بر روی کرنش قائم

که θ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\theta = 0.5 \tan^{-1} \left(\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_y - \sigma_x} \right) \quad (10)$$

مقاومت برشی c_m و ϕ_m با استفاده از معادلات (۱۴) و (۱۵) بدست می‌آیند و در نهایت کمترین مقدار SRF که منجر به گسیختگی شیروانی می‌شود، به‌عنوان ضریب اطمینان در نظر گرفته می‌شود.

ضریب اطمینان

وقتی که مقاومت برشی در سطح لغزش از مقاومت لازم جهت مقاومت در برابر تنش‌های برشی بیشتر باشد شیروانی گسیخته می‌شود. وقتی ضریب اطمینان بزرگ‌تر از ۱ باشد شیروانی موردنظر پایدار می‌باشد درحالی‌که مقادیر کمتر از ۱ به معنی عدم پایداری شیروانی می‌باشد. با در نظر گرفتن گسیختگی برشی در این مطالعه ضریب اطمینان در برابر گسیختگی از رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$FOS = \frac{\tau_f}{\tau_m} \quad (11)$$

در این رابطه τ_f و τ_m مقاومت برشی و تنش موجود بسیج شده روی سطح لغزش هستند که از معیار اصلاح‌شده موهر-کلمب تعیین می‌شوند:

$$\tau_f = c_f + \sigma_n \tan \phi_f \quad (12)$$

$$\tau_m = c_m + \sigma_n \tan \phi_m \quad (13)$$

در این روابط، پارامترهای مقاومت برشی بسیج شده c_m و ϕ_m از رابطه زیر بدست می‌آیند:

$$c_m = \frac{c_f}{SRF} \quad (14)$$

$$\phi_m = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi_f}{SRF} \right) \quad (15)$$

در این روابط، SRF ضریب کاهش مقاومت برشی می‌باشد. برای دستیابی به مقدار صحیح و دقیق آن می‌بایست مقادیر ضریب اطمینانی را که منجر به گسیختگی کامل شیروانی می‌شود را به دست آوریم. این روش با به‌کارگیری یک دنباله کاهشی برای پارامترهای مقاومت برشی (c, ϕ) که در نهایت منجر به گسیختگی شیروانی می‌شود، ضریب اطمینان شیروانی را بدست می‌آورد. مقادیر کاهش‌یافته پارامترهای

معیار گسیختگی

یکی از شاخص‌های مناسب برای تشخیص گسیختگی شیروانی همگرایی نتایج در تعداد تکرار مشخص در برنامه می‌باشد. معیار همگرایی که با میزان جابجایی در هر گام زمانی تعیین می‌شود و میزان تغییرات در جابجایی یک نقطه بین دو مرحله زمانی با بیشترین مقدار قدرمطلق جابجایی نرمالیزه می‌شود و برای اطمینان همگرایی می‌بایست کمتر از ۰/۰۰۱ باشد. عدم همگرایی نتایج به‌منزله این است که توزیع تنش نمی‌تواند به‌طور هم‌زمان معیار اصلاح‌شده موهر-کلمب و تعادل کلی را ارضاء کند و یکی از نشانه‌های وقوع گسیختگی در شیروانی است که همراه با افزایش در میزان جابجایی‌ها می‌باشد.

مدل‌سازی عددی

در مطالعه انجام‌شده تأثیر ناهمسانی و ناهمگونی مشخصه چسبندگی روی پایداری شیروانی‌ها به روش عددی تفاضل محدود و با کمک نرم‌افزار FLAC^{2D} و زبان برنامه‌نویسی فیش (FISH) که در نرم‌افزار FLAC^{2D} قرار داده‌شده و با استفاده از مدل رفتاری اصلاح‌شده موهر-کلمب موردبررسی قرار گرفته است. به دلیل مطالعه و تعیین دقیق اثرات ناهمگنی خاک این مطالعه به بررسی شیروانی‌های رسی در شرایط زهکشی نشده با هندسه مشخص محدودشده است. دو پارامتر خاک (چسبندگی زهکشی نشده و مدول تغییر شکل خاک (E)) به‌صورت ناهمگن و ناهمسان در نظر گرفته شده است. فرض شده است که مدول تغییر شکل E، به‌طور کامل با مقاومت برشی زهکشی نشده همبسته خطی می‌باشد. وزن مخصوص خاک در تمامی مطالعات پارامتریک دارای یک مقدار ثابت برای کل ناحیه مورد تحلیل می‌باشد و مقدار آن برابر با ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب (2000 kg/m^3)

مدول یانگ در جهت قائم (G_{VH}/E_V) هم ثابت در نظر گرفته می‌شود و مقدار $0/5$ برای آن اختیار می‌شود. برای حالت زهکشی نشده مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک برابر با صفر $(\phi = 0)$ است و در نتیجه مقدار زاویه اتساع خاک نیز برابر با صفر $(\psi = 0)$ در نظر گرفته شده است. نسبت چسبندگی افقی به چسبندگی قائم $(AF = C_H/C_V)$ در حالت زهکشی نشده برابر با $0/50$ ، 1 ، $1/5$ و 2 در این مطالعه لحاظ می‌گردد ((جمشیدی و ماهیگیر (۲۰۱۴)).

شکل (۲) هندسه و شرایط مرزی یک شیروانی رسی با زاویه $54/5$ درجه و ارتفاع 7 متر را که بر روی فونداسیونی به عمق 10 متر قرار گرفته است را نشان می‌دهد. مبنای انتخاب ابعاد هندسی مدل مقایسه بین نتایج بین این تحقیق و مطالعات دیگران و اطمینان از صحت نتایج می‌باشد. در ابتدا شرایط برجا با در نظر گرفتن وزن مخصوص خاک برابر با 2000 کیلوگرم بر مترمکعب در مدل ایجاد شد. کل توده به 1640 المان تقسیم شده و دیواره‌های کناری توده فقط دارای درجه آزادی قائم و کف توده خاک هم در جهت افقی و هم در جهت قائم محدود می‌باشد. نواحی قسمت بالایی شیروانی مطابق با زاویه شیروانی تنظیم گشتند، به طوری که نواحی واقع بر قسمت وجه جلویی شیروانی به شکل چهارضلعی باقی می‌مانند. برای تحلیل‌های پلاستیک این گونه نواحی مناسب تر می‌باشند.

در این مطالعه 3 نوع خاک رس بررسی شده که ویژگی‌های آن در جدول (۱) ارائه گردیده است.

انتخاب شده است. در نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ مدول الاستیسیته به‌عنوان مدول سختی پایه در مدل الاستیک و مشابه تنش می‌باشد. مدول الاستیسیته خاک در هر دو راستای افق و قائم به‌طور کامل با چسبندگی زهکشی نشده در همان راستا همبسته خطی در نظر گرفته شده است و با رابطه‌های زیر نشان داده می‌شوند:

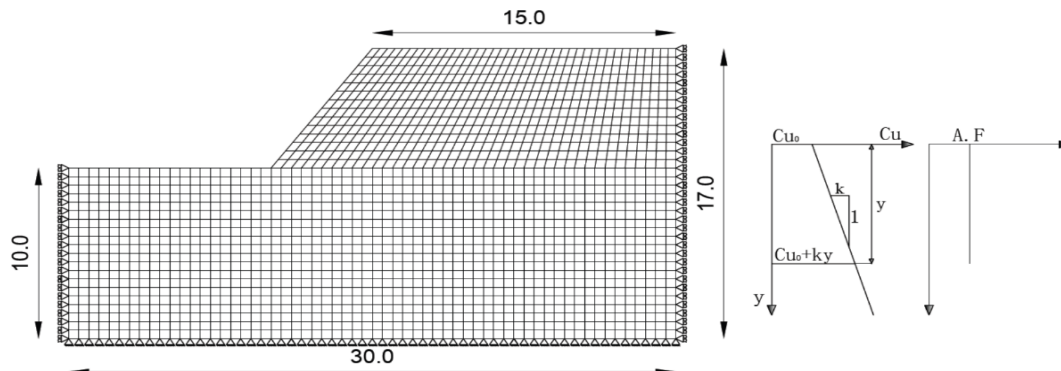
$$E_H = \alpha C_H \quad (16)$$

$$E_V = \alpha C_V \quad (17)$$

نوبهار و همکاران (۲۰۰۱) مقدار α را برای خاک‌های رسی بین 300 تا 1500 پیشنهاد دادند، در این مطالعه برای α مقدار 500 انتخاب شده است. مقدار v_{VH} در حالت زهکشی نشده برابر با $0/50$ می‌باشد، ولی چون در محاسبات منظور نمودن مقدار $0/50$ موجب حالت تقسیم بر صفر می‌شود، در نتیجه مقدار v_{VH} برای شرایط زهکشی نشده در نرم‌افزار $FLAC$ برابر با $0/49$ لحاظ می‌گردد. مقدار v_{HH} در حالت زهکشی نشده طبق رابطه (۱۸) برابر است با:

$$v_{HH} = 1 - \frac{1}{2} \frac{E_H}{E_V} \quad (18)$$

گیبسون (۱۹۷۴) سه مقدار $0/5$ ، $0/33$ و $0/167$ را برای نسبت (G_{VH}/E_V) در نظر گرفت. نسبت مدول برشی به



شکل(۲): هندسه و شرایط مرزی شیروانی مورد مطالعه

$$Cv_{uy} = Cv_{u0} + ky \quad (20)$$

Cv_{u0} مقدار روند مشخصه در سطح زمین و k نرخ تغییر روند مشخصه با عمق که مقدار آن $2kPa/m$ ، $1kPa/m$ و $0kPa/m$ فرض می‌شود. شکل (۲) تغییرات Cv_u را با عمق نشان می‌دهد.

نتایج

مطالعه پارامتریک مطابق مقادیر جدول (۲) بر روی شیروانی موردنظر انجام گرفت. مقادیر چسبندگی سطحی به‌گونه‌ای انتخاب شدند که تا حدودی بیانگر شرایط رس نرم، متوسط و سخت باشند. شکل (۳) نمونه‌ای از روند تغییرات چسبندگی را با عمق نشان می‌دهد که در سطح دارای مقدار $۸/۶$ کیلو پاسکال می‌باشد.

شکل (۴) نحوه توزیع سرعت المان‌های مدل را به ازای چسبندگی سطحی $8.3kPa$ در دو حالت نسبت ناهمسانی برابر با ۲ ($AF=2$) و روند مشخصه خطی $2kPa/m$ و حالت همگن و همسان ($AF=1$ و $K=1$) را نشان می‌دهد. از مقایسه بین دو شکل می‌توان پی برد که سرعت جابجایی ذرات در حالت ناهمسان و ناهمگن نسبت به حالت کاملاً همسان بسیار کمتر شده است. همچنین عمق جابجایی‌ها در حالت ناهمسان و ناهمگن نسبت به حالت همسان و همگن کاهش یافته است. از آنجاکه با افزایش عمق در حالت ناهمگن و ناهمسان، چسبندگی و در نتیجه مقاومت برشی افزایش می‌یابد، این موضوع امری طبیعی است.

نمودار شکل (۵) تأثیر نرخ تغییر روند مشخصه k به ازای مقادیر مختلف چسبندگی در سطح Cv_{u0} در حالت همسان ($AF=1$) بر روی ضریب اطمینان (FOS) را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از تأثیر زیاد نرخ روند مشخصه (k) و تغییرات چسبندگی با عمق بر روی ضریب اطمینان می‌باشد. به‌طوری‌که با افزایش مقدار آن از $0kPa/m$ به $2kPa/m$ مقدار ضریب اطمینان پایداری شیروانی حدوداً ۲۷ درصد افزایش می‌یابد.

برای سنجش میزان اعتبار نتایج، بین نتایج بدست آمده از این آنالیز عددی و نتایج دیگران با روش دیگر مقایسه‌ای صورت گرفته است. الکرنی و الشمرانی (۲۰۰۰) با استفاده از روش قطعات و همچنین چن و همکاران (۱۹۷۵) به کمک روش جرم^۱ به بررسی تأثیر ناهمسانی چسبندگی بر روی پایداری شیروانی‌های همگن پرداختند. آن‌ها به‌منظور ارزیابی پایداری شیروانی عدد پایداری را طبق رابطه زیر در نظر معرفی کردند:

$$N_s = \frac{C_v}{F_s \gamma H} \quad (19)$$

در جدول (۱) مقادیر حاصل از نتایج این مطالعه و نتایج حاصل از تحقیق الکرنی و الشمرانی (۲۰۰۰) و چن و همکاران (۱۹۷۵) در حالت همگن ($k=0$) و شرایط زهکشی همکاران نشده ($\phi=0$) در دو مقدار ضریب ناهمسانی $A.F=0.5, 1$ نشان داده شده است. مقایسه بین نتایج حاکی از اختلاف ناچیز دارد که می‌تواند ناشی از فرضیه‌های به‌کاررفته در روش‌های مورد استفاده باشد. به‌عنوان مثال الکرنی و الشمرانی (۲۰۰۰) به‌جای قسمت دایره‌ای زیرین قطعه‌ها، آن‌ها را خط مستقیم فرض کردند.

(۱): مقادیر پارامترهای لحاظ شده برای شیروانی مدل شده

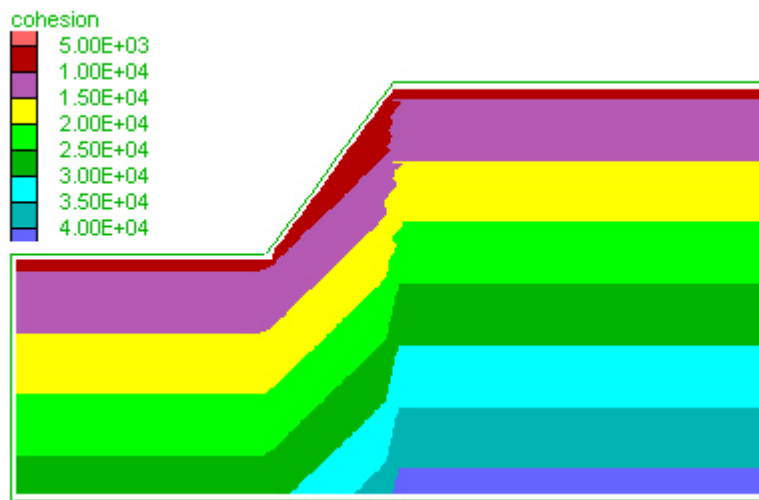
محقق	روش به‌کاررفته شده	Ns	
		A.F=۰٫۵	A.F=۱
الکرنی و الشمرانی (۲۰۰۰)	روش قطعات	۰٫۲۴۵	۰٫۱۷۸
چن و همکاران (۱۹۷۵)	روش جرم	۰٫۲۵۳	۰٫۱۹
مطالعه کنونی	روش عددی	۰٫۲۲۲	۰٫۲

در این مطالعه برای در نظر گرفتن اثر ناهمگنی مقاومت برشی زهکشی نشده خاک فرض شده که چسبندگی دارای یک روند مشخصه خطی ثابت با عمق (تغییر ویژگی‌های نهشته حاکی با عمق ناشی از تنش‌های زمین و وزن خود) می‌باشد. در این مورد روند مشخصه خطی خاک به‌عنوان تابعی از عمق فرض شده است:

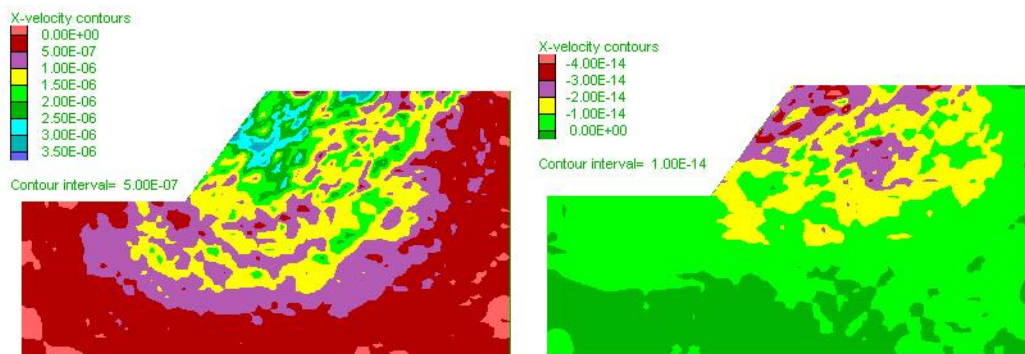
^۱. Mass method

جدول (۲): مقادیر پارامترهای لحاظ شده برای شیروانی مدل شده

پارامترها	مقادیر در نظر گرفته شده
C_{vu}	۸,۳kPa, ۱۹,۷۶kPa, ۲۳,۴۸kPa
ϕ	۰°
k	۰ kPa/m, ۱ kPa/m, ۲kPa/m
Eu/Cu	۵۰۰
G_{vH}/E_v	۰,۵
AF	0.5, 1, 1.5, 2



شکل (۳): تغییرات خطی چسبندگی با عمق (kPa/m $\phi=۰, k=۸,۶$ C_{vu} $AF=$)

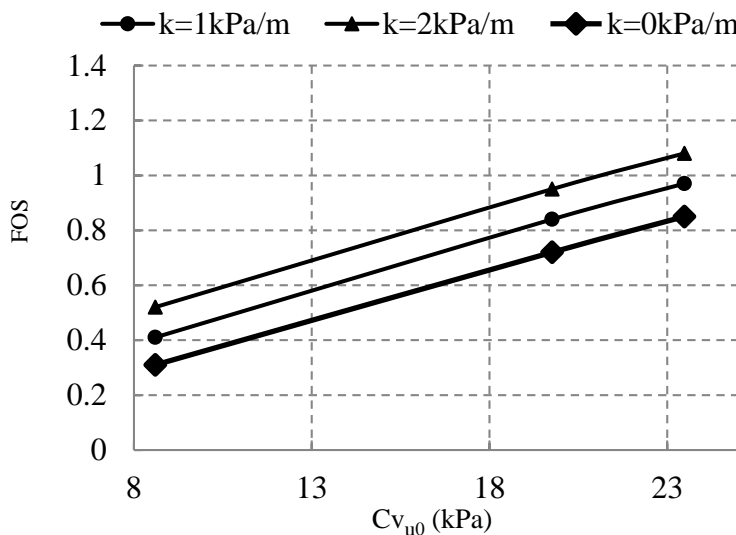


(ب)

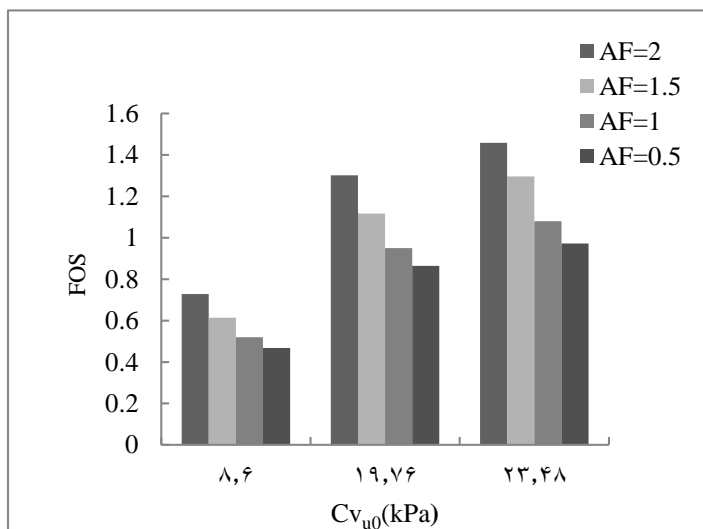
(الف)

شکل (۴): تغییرات سرعت المانها در حالت (الف) و $AF=۲$ و $K=۲$ kPa/m $AF=$ و $K=۲$ kPa/m (ب)

با افزایش k چسبندگی افزایش یافته و در نتیجه سطح گوه گسیختگی دارای مقاومت بیشتری گشته و در اثر آن ضریب اطمینان افزایش می‌یابد. البته به‌طور واضح چسبندگی در سطح زمین ($C_{v_{u0}}$) تأثیر بسیار زیادتری بر روی ضریب اطمینان دارد و افزایش آن نسبت به افزایش k چشمگیرتر می‌باشد. مهم‌ترین دلیل آن می‌تواند به نحوه شکل‌گیری گوه گسیختگی مرتبط باشد. از آنجاکه گوه گسیختگی در اعماق سطحی‌تر شکل می‌گیرد تأثیر چسبندگی سطحی بر روی گوه گسیختگی به مراتب بیشتر از



شکل (۵): نمودار ضریب اطمینان در برابر چسبندگی سطح زمین در حالت همسان ($AF=1$)

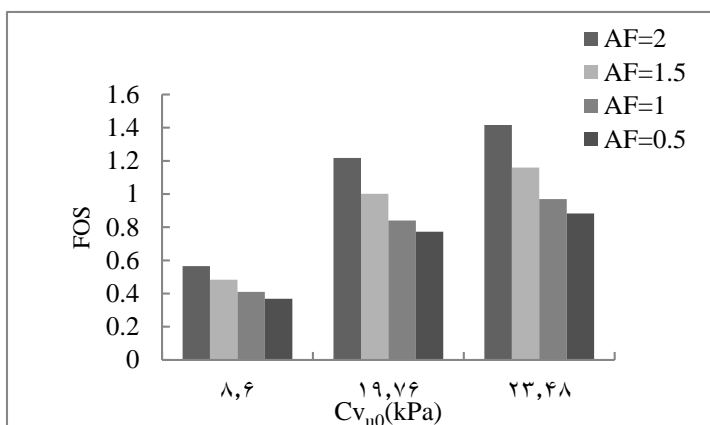


شکل (۶): نمودار ضریب اطمینان در برابر چسبندگی سطح زمین در حالت‌های مختلف ناهمسانی ($k=2$ kPa/m)

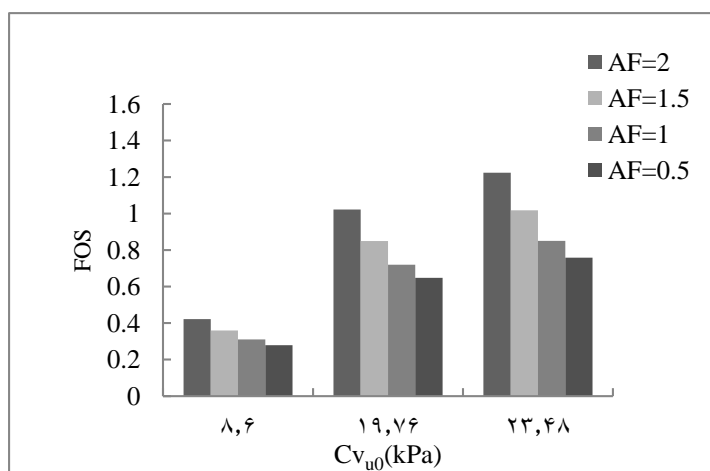
تأثیر افزایش k که ممکن است در اعماق بیشتر خود را نشان دهد، باشد. شکل (۶)، (۷) و (۸) تغییرات ضریب اطمینان شیروانی را با نسبت ناهمسانی (AF) به ازای مقادیر مختلف چسبندگی سطحی ($C_{v_{u0}}$) و نرخ روند مشخصه (k) نشان می‌دهند.

حالت کاملاً همگن ($k=0\text{kPa/m}$) می‌باشد. بیشترین میزان تأثیر نسبت ناهمسانی (AF)، بر روی ضریب اطمینان پایداری در حالت کاملاً همگن ($k=0\text{kPa/m}$) و به ازای نسبت ناهمسانی برابر با ۲ ($AF=2$) حاصل شده است. ضریب اطمینان در حالت نسبت ناهمسانی برابر با ۲ ($AF=2$) حدود ۴۴٪ نسبت به حالت همسان ($AF=1$) افزایش داشته است. افزایش نسبت ناهمسانی منجر به افزایش مقاومت خاک در جهت افق و افزایش مقاومت بسیج شده در سطح لغزش می‌گردد و موجب افزایش ضریب اطمینان شیروانی می‌گردد.

آنچه در این شکل‌ها واضح است، نسبت ناهمسانی (AF)، نرخ‌های مختلف (k) و چسبندگی سطحی ($C_{v_{u0}}$) تأثیر زیادی بر روی ضریب اطمینان گسیختگی شیروانی دارند، به طوری که با افزایش نسبت ناهمسانی (AF) ضریب اطمینان به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همان‌طور که از شکل (۶) مشخص است، ضریب اطمینان شیروانی با افزایش چسبندگی در سطح و در یک نرخ روند مشخصه (2kPa/m) ثابت به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. مشابه همین روند در شکل (۷) و به ازای نرخ روند مشخصه 1kPa/m مشاهده گردید؛ و در نهایت شکل (۸) نشان‌دهنده تأثیر ناهمسانی بر ضریب اطمینان شیروانی در



شکل(۷): نمودار ضریب اطمینان در برابر چسبندگی سطح زمین در حالت‌های مختلف ناهمسانی ($k=1\text{kPa/m}$)



شکل(۸): نمودار ضریب اطمینان در برابر چسبندگی سطح زمین در حالت‌های مختلف ناهمسانی ($k=0\text{kPa/m}$)

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به منظور بررسی دقیق‌تر گسیختگی شیروانی‌های حاکی، با لحاظ کردن اثرات ناهمسانی و ناهمگنی خاک، سعی در به دست آوردن شرایط واقعی‌تر و نزدیک‌تر به حالت طبیعی خاک جهت تعیین ضریب اطمینان پایداری شیروانی شد. ناهمسانی خاک با استفاده از مدل موهر - کلمب اصلاح شده و با تعریف نسبت ناهمسانی (AF) و ناهمگنی خاک با اعمال تغییرات خطی چسبندگی خاک بر روی یک شیروانی با هندسه مشخص لحاظ گشت. به منظور اطمینان از صحت نتایج، بین نتایج حاصل از مدل موهر - کلمب اصلاح شده و کار دیگران با روش‌های دیگر مقایسه‌ای صورت گرفت. مقایسه بین نتایج حاکی از تطابق نسبتاً خوب مدل عددی مطالعه کنونی با روش‌های دیگر نویسندگان داشت. همچنین نتایج زیر بدست آمد:

۱- نتایج حاصل از مطالعات عددی به وسیله نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ حاکی از تأثیر بسیار زیاد نسبت ناهمسانی بر روی ضریب اطمینان پایداری شیروانی داشت، به طوری - که ضریب اطمینان در حالت نسبت ناهمسانی برابر با ۲ ($AF=2$) نسبت به حالت کاملاً همسان ($AF=1$) حدوداً ۴۴ درصد افزایش داشته است.

۲- نرخ تغییرات سرعت چسبندگی خاک (k) بر روی ضریب اطمینان پایداری شیروانی تأثیر می‌گذارد، به طوری که با افزایش مقدار آن از $0kPa/m$ به $2kPa/m$ مقدار ضریب اطمینان پایداری شیروانی حدوداً ۲۷ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش k چسبندگی افزایش یافته و در نتیجه سطح گوه گسیختگی دارای مقاومت بیشتری گشته و در اثر آن ضریب اطمینان افزایش می‌یابد.

۳- چسبندگی در سطح زمین ($C_{V_{u0}}$) تأثیر بسیار زیادی بر روی ضریب اطمینان دارد و تأثیر افزایش آن نسبت به افزایش k چشمگیرتر می‌باشد. شاید مهم‌ترین دلیل آن می‌تواند به نحوه شکل‌گیری گوه گسیختگی باشد. از آنجاکه گوه گسیختگی در اعماق سطحی‌تر شکل می‌گیرد تأثیر چسبندگی سطحی بر روی گوه گسیختگی به مراتب بیشتر از

تأثیر افزایش k که ممکن است در اعماق بیشتر خود را نشان دهد، باشد.

بنابراین مشخص شد که ناهمسانی و ناهمگنی خاک می‌تواند بر روی ضریب اطمینان اثر افزایشی داشته باشد. با این وجود در نظر گرفتن شرایط فوق در تحلیل‌های شیروانی می‌تواند موجب طراحی‌های صحیح‌تر و اقتصادی‌تر گردد و عدم در نظر گرفتن ناهمسانی و ناهمگنی خاک بعضاً منجر به طراحی‌های محافظه‌کارانه و غیراقتصادی نیز گردد.

مراجع

- 1- Al-Karni, A. A. and Al-Shamrani, M. A. (2000). "Study of the effect of soil anisotropy on slope stability using method of slices", Computers and Geotechnics. 26, 83-103.
- 2- Bishop, A.W. (1966). "The strength of soils as engineering material", Geotechnique. 16(2), 89-130
- 3- Casagrande, A. and Carillo, N. (1944). "Shear failure of anisotropic materials", Journal of Boston Society of Civil Engineering. 31(4), 74-87.
- 4- Chen, F.H. Snitbhan, N. Fang, H.Y. (1975) "Stability of slopes in anisotropic, nonhomogeneous soils". Canadian Geotechnical Journal. 12, 146-152.
- 5- Duncan, J.M. and Seed, H.B. (1966). "Anisotropy and stress reorientation in clay." Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE 92(SM5), 21-50.
- 6- Gibson, R.E. (1974). "The analytical method in soil mechanics." Géotechnique. 24, No. 2, 115-140.
- 7- Griffiths, D. V. and G. A. Fenton. (2004). "Probabilistic Slope Stability Analysis by Finite Elements." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130 (5): 507-518.
- 8- Hicks, M. A. and K. Samy. (2002). "Influence of Heterogeneity on Undrained Clay SLOPE Stability." Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 35 (1): 41-49.
- 9- Hicks, M. A. and K. Samy. (2004). "Stochastic Evaluation of Heterogeneous Slope Stability." Italian Geotechnical Journal 38: 54-66.

- 10- Jamshidi Chenari, R. and Alaie, R. (2015). "Effects of anisotropy in correlation structure on the stability of an undrained clay slope", *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 9(2), 109-123.
- 11- Jamshidi Chenari, R. and Mahigir, A. (2014). "The effect of spatial variability and anisotropy of soils on bearing capacity of shallow foundations", *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 47(2), 199-213.
- 12- Lo, K.Y. (1965). "Stability of slopes in anisotropic soils." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE* 31(SM4), 85-106.
- 13- Low, B. K. S. Lacasse, and F. Nadim. (2007). "Slope Reliability Analysis Accounting for Spatial Variation." *Georisk* 1: 177-189.
- 14- Mayne, P.W. (1985). "Stress anisotropy effects on clay strength". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE* 111, 356-66.
- 15- Mitchell. (1976). "Fundamentals of soil behavior". New York, John Wiley and Sons.
- 16- Nobahar, A. and Popescu, R. (2001). "Some effects of soil heterogeneity on bearing capacity of shallow foundations." *Proc. ASCE Spec. Conf. 2001, A Geo-Odyssey, Blacksburg, VA.*
- 17- Saada, A.S. and Bianchini, G.F. (1975). "Strength of one dimensionally consolidated clays." *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE.* 101(GT11),1151-64
- 18- Tang, W. H. (1984). "Principles of probabilistic characterization of soil properties." *Probabilistic Characterization of Soil Properties. Bridge Between Theory and Practice, ASCE, Atlanta, 74-89.*

The effect of anisotropy and heterogeneity of soils on slopes stability using numerical method in undrained condition

Alireza Ardakani*¹

Ali Mahigir²

Abstract

Naturally formation of soil deposits lead to anisotropy and heterogeneity in their properties. The effect of shear strength anisotropy and heterogeneity on the stability of slopes has commonly been investigated using the conventional limit equilibrium method, the upper bound technique and method of slices. The purpose of this research is to indicate effect of mechanical anisotropy and deterministic heterogeneity of cohesion on slope stability. Mechanical anisotropy that is denoted by C_H/C_V is taken into account by generalizing of isotropic Mohr-Coulomb yield criterion to anisotropic one. The study performed on a slope in undrained condition ($\phi=0$) and results indicate that the importance of anisotropy and heterogeneity of soil cohesion on slope stability. In general, considering of anisotropy and heterogeneity lead to proper and economic analysis and design of slope stability, so that the safety of factor in the case of anisotropy equal to 2 ($AF=2$) was approximately 40% greater compared to the fully isotropic ($AF=1$).

Keyword:

Slope stability, Undrained shear strength, Anisotropy, Heterogeneity, Factor of safety

1.*Assistant Professor, Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

2. Ph.D Student, Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University