

تحلیل پایداری شیروانی خاکهای ریزدانه نیمه اشباع

هادی احمدی^{۱*}، فرزین کلانتری^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران - مکانیک خاک و پی، دانشگاه گیلان

۲- استادیار مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

* HA1360@gmail.com

چکیده

مدل های رفتاری و معادلات تعیین مقاومت برشی برای خاکهای نیمه اشباع غالباً پیچیده و دشوار است. روابط مربوط به تعیین مقاومت برشی خاکهای نیمه اشباع در سالهای اخیر پیشرفت بسیاری کرده است. در مدل های مربوط به خاکهای نیمه اشباع علاوه بر فشار آب حفره ای، فشار هوای منافذ داخلی نیز منظور می گردد و این امر رفتار خاکها را به صورت واقعی تری می تواند نشان دهد. در مورد خاکهای ریزدانه نیمه اشباع، استفاده از روابط مقاومت برشی خاکهای اشباع بسیار محافظه کارانه خواهد بود و در نظر گرفتن خاک به صورت خشک نیز در جهت اطمینان نیست. از سوی دیگر در صورت تحلیل شیروانی خاکهای ریزدانه به صورت خشک، بارندگی های فصلی می توانند سبب افزایش درجه اشباعی لایه های سطحی شوند و در نتیجه گسیختگی شیروانی و زمین لغزش را به دنبال خواهد داشت. در این مطالعه با ارزیابی شرایط معمول شیروانیهای متشکل از خاکهای ریزدانه، تغییرات درجه اشباعی خاک و تأثیر آن بر ضریب اطمینان پایداری شیروانی بررسی شده است.

کلمات کلیدی: خاک نیمه اشباع، شیروانی، پایداری شیبه

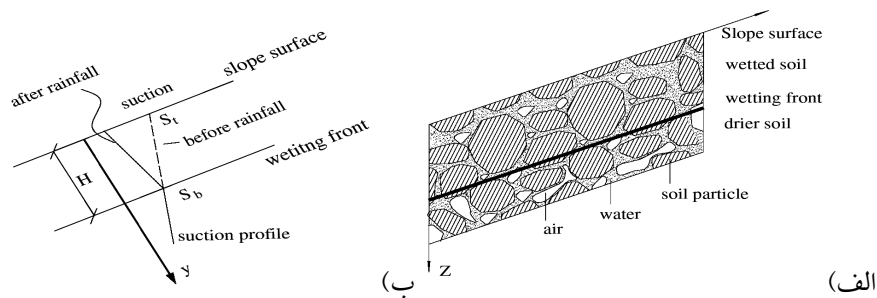
۱. مقدمه

در محاسبات مهندسی عملاً خاکها به صورت یکی از شرایط خشک یا اشباع در نظر گرفته می شوند و این در حالی است که اغلب لایه های سطحی در بسیاری مناطق در شرایط نیمه اشباع قرار دارد. حتی لایه های کاملاً خشک نیز در برخی فصول سال به دلیل بارندگی های فصلی به صورت نیمه اشباع در می آیند. این شرایط به ویژه در مورد شیروانی های که از خاکهای ریزدانه تشکیل شده است، بحرانی خواهد بود. زیرا با افزایش درجه اشباعی در لایه های سطحی، علاوه بر کاهش تنش های مؤثر، مقاومت برشی خاک نیز به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. به جز در مواردی که درجه اشباع نزدیک به واحد است، هوای حفره ای منافذ به هم پیوسته ای را در خاک تشکیل می دهد و آب حفره ای در اطراف نقاط تماس دانه ها متمرکز می گردد [۱]. توجه به اثر نیمه اشباعی خاک و مقدار اختلاف فشار آب حفره ای و هوای حفره ای (مکش) در مورد شیروانی ها حائز اهمیت است. عدم توجه به مکش در لایه های سطحی در برخی موارد بخصوص برای رس های دارای پلاستیسیته بالا منجر به گسیختگی در شیروانی شده است. در بسیاری از شیروانیهای خاکی، تراز آب زیرزمینی از سطح زمین فاصله دارد و لایه هایی از خاک عمق بین سطح شیروانی و تراز آب زیرزمینی را تشکیل داده اند. این لایه ها غالباً مرطوب هستند و در شرایط نیمه اشباع

قرار دارند. لایه‌های نزدیک به تراز آب زیرزمینی تحت شرایط موئینگی قرار دارند و لایه‌های سطحی نیز در معرض بارندگی یا جریانهای سطحی تر می‌شوند. بر اساس رابطه لامب عمق لایه در اثر ترشدگی از رابطه زیر بدست می‌آید [2]:

$$Z_w = \frac{K_s t}{n(s_f - s_o)} \quad (1)$$

که در آن K_s ضریب نفوذپذیری در شرایط اشباع n پوکی (تخلخل) و t زمان سپری شده برای رسیدن درجه اشباع اولیه (S_o) به درجه اشباع نهایی (S_f) می‌باشد. مسأله ترشدگی شیبهای خاکی در اثر بارندگی و در نتیجه افزایش درجه اشباع لایه سطحی، سبب ایجاد شرایط جدید در خاک شده و این در حالی است که در ترازهای پایین تر حالت نیمه اشباع و نزدیک به خشک وجود دارد. این شرایط در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین تغییرات مکش در ترازهای مذکور در شکل ۵-۹ بطور شماتیک مشخص شده است [3]. تحقیقات رحیمی و همکاران نشان می‌دهد که مساله تر شدگی برای خاکهای ریزدانه در شرایط شدت کم بارندگی بحرانی تر است [4].



شکل ۱- توسعه ترشدگی در یک شیروانی: الف) پروفیل خاک، ب) پروفیل مکش ایجاد شده در اثر تر شدگی [3]

۲. اثر نیمه اشباعی خاک در پایداری شیروانی‌ها

بر اساس تحلیل‌های متداول جهت تعیین ضریب پایداری شیب‌های خاکی، مقدار پایداری برای شیروانی‌ها علاوه بر هندسه شیب، تابعی از تنش مؤثر در لایه‌های مختلف، مقاومت برشی خاک و همچنین شرایط حرکت آب در خاک و نفوذپذیری آن می‌باشد. این در حالی است که صرف نظر از هندسه شیب، سایر پارامترهای ذکر شده، به ویژه در مورد خاکهای ریزدانه تابعی از درجه اشباعی می‌باشد و خصوصیات خاکهای نیمه اشباع کاملاً متفاوت از وضعیت اشباع آن است. در جدول ۱ تفاوت شرایط تعیین تنش مؤثر و مقاومت برشی خاک در شرایط کاملاً اشباع و نیمه اشباع قابل مشاهده است. در روابط خاکهای نیمه اشباع پارامتر χ تابعی از درجه اشباع است.

جدول ۱ - روابط تعیین تنش مؤثر و مقاومت برشی در خاکهای اشباع و نیمه اشباع

رابطه	خاک اشباع	خاک نیمه اشباع	مرجع
تنش مؤثر	$\sigma' = \sigma - u_w$	$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$	Bishop [5]
مقاومت برشی	$\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi'$	$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + \chi(u_a - u_w) \tan \phi'$	Khalili & Khabbaz [6]

با توجه به اینکه در خاکهای ریزدانه چسبنده غالباً شرایط زهکشی نشده وضعیت بحرانی می باشد، می توان جهت تعیین چسبندگی زهکشی نشده از رابطه واناپالی و همکارانش [7] به صورت زیر استفاده نمود:

$$C_u = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{c' \cos \phi' + (u_a - u_w) \left\{ \left(\Theta^k \right) \tan \phi' \right\} \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (2)$$

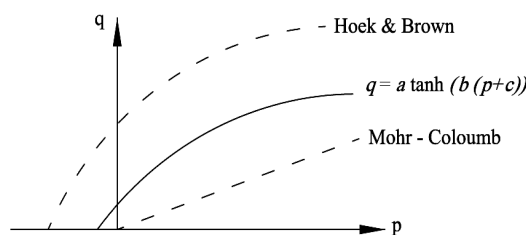
یکی از مهمترین عوامل عدم استفاده از روابط خاکهای نیمه اشباع در مسائل عملی و مهندسی به ویژه در کشور ما، فقدان تجهیزات آزمایشگاهی مناسب و کافی جهت تعیین پارامترهای فشارهای آب و هوای منفذی و در نتیجه مکش ماتریک است. احمدی و همکاران [8] با استفاده از برازش خطی گام به گام رابطه‌ای را ارائه داده‌اند که بتوان بدون محاسبه مکش ماتریک، مقاومت برشی خاکهای ریزدانه نیمه اشباع را با دقت مناسب تخمین زد. بر اساس مطالعات مذکور معادله رفتاری خاکهای ریزدانه نیمه اشباع از رابطه هیربولیک زیر قابل تعیین است:

$$q = a \tanh(b(p + c)) \quad (3)$$

بطوریکه پارامترهای a ، b و c تابعی از درصد رطوبت (w)، دامنه خمیری (PI)، خواص سخت‌شدگی (m)، وضعیت مقاومت در شرایط اشباع (M) و مقاومت تک محوری در شرایط خشک (q_u) بوده و از روابط زیر قابل تعیین است. در شکل ۲ معیار گسیختگی براساس رابطه هیربولیک ارائه شده، نشان داده شده است.

$$\begin{cases} a = -4880 + 26.69 w - 30.2 PI + 1299 m_{(HB)} + 709 M + 0.215 q_u \\ b = 0.0148 - 0.000119 w + 0.000182 PI - 0.00293 m_{(HB)} - 0.00209 M \\ c = 632 - 2.17 w - 1.70 PI - 144 m_{(HB)} - 30.5 M - 0.0463 q_u \end{cases} \quad (4)$$

در روابط فوق M شیب معیار گسیختگی موهر-کولمب در شرایط اشباع در فضای $q-p$ و m پارامتر ثابت معیار هوک و براون است که از طریق آزمایش‌های معمول مکانیک خاک و سنگ قابل تعیین هستند.



شکل ۲ - معیار گسیختگی بصورت رابطه هیربولیک و مستقل از مکش ماتریک

در مورد تفاوت نفوذپذیری هم می توان گفت که نفوذپذیری خاکهای اشباع به طور عمده تابعی از نسبت تخلخل (e) آنها است، در حالیکه در مورد خاکهای نیمه اشباع، علاوه بر تخلخل تابعی از درصد رطوبت (w) نیز می باشد. با توجه به اینکه نسبت تخلخل، درصد رطوبت و درجه اشباعی (S_r) با یکدیگر در ارتباط هستند، بنابراین در مورد خاکهای نیمه اشباع ضریب نفوذپذیری (k_w) را می توان به صورت زیر نوشت [9]:

$$k_w = f(e, w) \quad ; \quad k_w = f(Sr, e) \quad ; \quad k_w = f(Sr, w) \quad (5)$$

۳. تحلیل پایداری شیب های نیمه اشباع

تحلیل شیروانی ها با روش های مختلفی قابل محاسبه است. روش هایی همچون تعادل حدی، حالت حدی و روش های عددی جهت تحلیل شیروانی ها بکار گرفته می شوند و در نرم افزارهای ویژه تحلیل پایداری مورد استفاده قرار می گیرند. با توجه به لزوم تحلیل گوه های لغزش فراوان در تحلیل پایداری یک شیروانی خاکی و تعیین ضریب اطمینان پایداری، امروزه غالباً این کار با استفاده از نرم افزارهای تخصصی انجام می گیرد تا بتوان ضمن در نظر گرفتن تعداد زیادی گوه محتمل لغزش، عدد پایداری یا ضریب اطمینان در برابر ناپایداری را با دقت بالا و در زمان کم استخراج نمود. نرم افزارهایی همچون SLOPE/W، PLAXIS، ZSOIL، FLAC از جمله نرم افزارهای تخصصی تحلیل پایداری شیروانی های خاکی هستند. منتها تحلیل شیب های نیمه اشباع با نرم افزارهای فوق الذکر دارای دو محدودیت عمده است:

- ۱) عدم امکان در نظر گرفتن شرایط نیمه اشباعی در داده های ورودی نرم افزارهای رایج
 - ۲) دشواریها و محدودیت های تعیین پارامترهای ویژه شرایط نیمه اشباعی مانند فشار هوای منفذی و مکش ماتریک.
- در نتیجه برای در نظر گرفتن اثر نیمه اشباع بودن خاک باید شرایط را با آنچه برای نرم افزارهای تجاری رایج تعریف شده است، تطبیق داد.

۳.۱. اصلاح وضعیت مقاومت برشی

همانگونه که ذکر شد معیار گسیختگی برای خاکهای نیمه اشباع با معیار موهر-کولمب مطابقت ندارد و می بایست معیار گسیختگی مختص شرایط نیمه اشباعی را با در نظر گرفتن تغییرات درجه اشباع بکار برد. بدین منظور استفاده از روش های زیر پیشنهاد می شود:

الف) استفاده از پوش عمومی مقاومت با تکنیک داده - نقطه (data-point)

در صورتیکه پوش گسیختگی برای خاک در شرایط نیمه اشباع تعیین گردیده باشد، می توان با استفاده از تکنیک data-point وضعیت مقاومتی به صورت تابع تنش برشی بر حسب تنش های نرمال تعریف نمود. این قابلیت در برخی از نرم افزارهای رایج از جمله SLOPE/W وجود دارد [10]. بدیهی است استفاده از مدل مذکور هنگامی کاربردی خواهد بود که معیار مقاومت برشی برای خاک مورد نظر شناخته شده باشد و پارامترهای مختص نیمه اشباعی از طریق آزمایش های استاندارد استخراج شده باشد.

ب) تخمین مقاومت از روی میزان رطوبت با استفاده از روش های تجربی

بر اساس رابطه (۲) و (۳) معیار گسیختگی از طریق پارامترهای متداول خاکهای اشباع و خشک برای حالت نیمه اشباع نیز قابل تعمیم است. بدین وسیله بدون نیاز به اندازه گیری فشار هوای منفذی و مکش ماتریک که نیاز به تجهیزات اندازه گیری خاص دارند، می توان معیار گسیختگی را از طریق پارامترهای رایج تعیین کرد. از آنجائیکه برای یک خاک مشخص، q_u ، m ، PI و M ثابت می ماند، تنها w تابعی از درجه اشباع خواهد بود و داریم:

$$a = a(w) \quad , \quad b = b(w) \quad , \quad c = c(w) \quad (6)$$

بنابراین معیار گسیختگی نیز تابعی از w خواهد بود و داریم:

$$q = a(w) \tanh(b(w)(p + c(w))) \quad (7)$$

در نتیجه در لایه های بالاتر از سطح آب زیرزمینی، می توان از رابطه (۶) جهت معرفی مصالح خاکی استفاده کرد.

(ج) تغییر در نسبت فشار حفره ای

در تحلیل پایداری شیروانی ها، خاکریزها و سدها، فشار آب حفره ای به کمک پارامتری به نام نسبت فشار حفره ای (R_u)

لحاظ می شود. نسبت فشار منفذی (R_u) از رابطه زیر تعیین می شود:

$$r_u = \frac{u}{\gamma H} \quad (8)$$

که در رابطه فوق γ وزن مخصوص خشک و H ضخامت خاک (خاکریز) در بالای نقطه موردنظر است و فشار آب حفره ای (u) از رابطه زیر بدست می آید:

$$u = \frac{P_a V_a}{0.02 V_w} \quad (9)$$

که در آن u فشار آب حفره ای به وجود آمده (psi)، P_a فشار اتمسفر مطلق (psi)، V_w نسبت حجم آب حفره ای به حجم اولیه خاکریز و V_a نسبت حجم هوای موجود در منافذ به حجم اولیه خاکریز می باشد [11]. مقدار R_u برای یک خاک اشباع تقریباً برابر یک بوده و در رطوبت های کم به حدود ۰/۵ می رسد. از اینرو یکی از راهکارهای لحاظ نمودن اثر نیمه اشباعی در پایداری خاکریزها و شیب های خاکی، تغییر در نسبت فشار آب حفره ای برای خاکهای نیمه اشباع در داده های ورودی تحلیل می باشد.

۲.۳. اصلاح وضعیت نفوذپذیری

در نرم افزارهای پیشرفته تحلیل پایداری شیروانی ها مانند SLOPE/W و ZSOIL، اثر تراوش و فشار ناشی از جریان آب در خاک را نیز می توان مدل نمود. ضریب نفوذپذیری آب در خاکها در شرایط نیمه اشباع کمتر از حالت اشباع است، چرا که هوای حفره ای موجود در خاک، از سرعت حرکت آب می کاهد و از اینرو در نظر گرفتن ضریب نفوذپذیری حالت اشباع برای خاکهای نیمه اشباع نتایج غیر واقعی در تحلیل تراوش خواهد داد. به منظور اصلاح ضریب نفوذپذیری در خاکهای نیمه اشباع و رسیدن به شرایط واقعی به دو صورت می توان عمل کرد:

(الف) مقدار واقعی ضریب نفوذپذیری را از طریق آزمایشهای ویژه و پیشرفته بدست آورد و در داده ورودی

جایگذاری کرد، که این کار مستلزم داشتن تجهیزات ویژه و صرف هزینه زیاد می باشد.

ب) تابعی برای نفوذپذیری بر حسب فشار تعریف کرد، بطوریکه در مرز اشباعی، فشار برابر با $p = 0$ و $k = k_{sat}$ باشد و در فشار $p = -p_y$ ، مقدار نفوذپذیری $k = k_{sat}/p_y$ در نظر گرفته شود. این قابلیت در نرم افزار SLOPE/W از طریق لینک با نرم افزار SEEP/W امکان پذیر است.

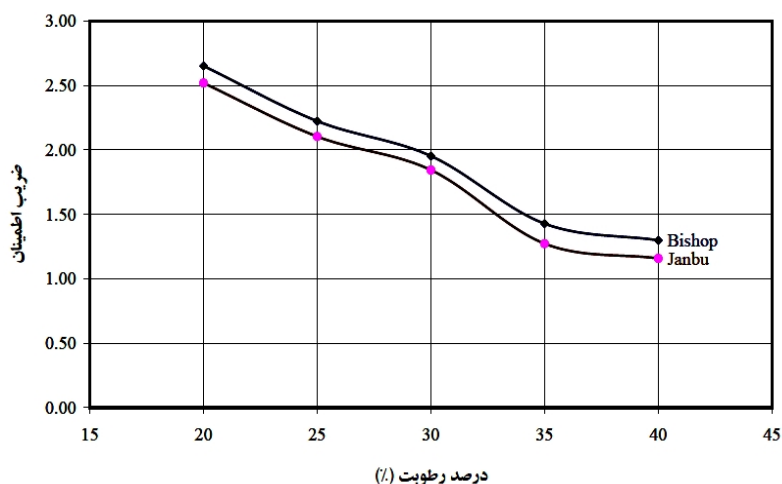
۴. مطالعه موردی

به منظور بررسی تاثیر درجه اشباعی در میزان پایداری شیروانیهای تشکیل شده از خاکهای ریزدانه نیمه اشباع، مطالعه موردی بر روی یک شیروانی به ارتفاع ۱۰ متر و شیب ۱/۵ (افقی) به ۱ (قائم) انجام گرفته است. مشخصات خاک در جدول ۲ گنجانده شده است. جهت تحلیل پایداری از نرم افزار پیشرفته و رایج SLOPE/W (Geo-Slope) استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات خاک شیروانی مورد استفاده در تحلیل

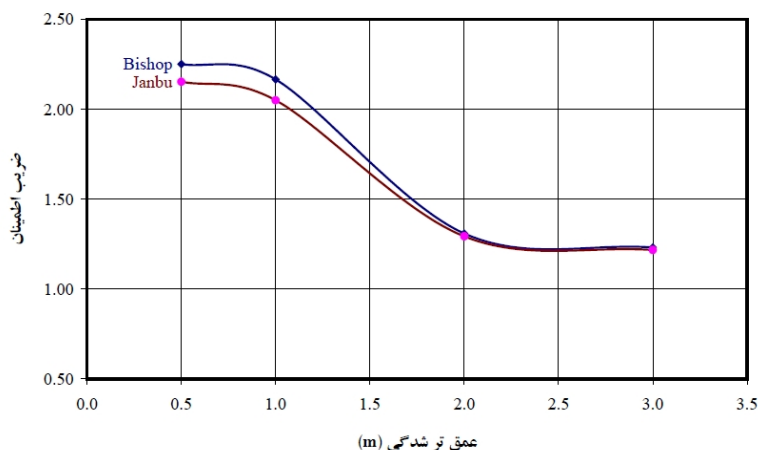
E (MPa)	ν	در حالت اشباع					G _s	PI
		γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (degree)	c _u (kPa)	k (cm/s)		
20	0.45	18	15	17	40	10 ⁻⁶	2.68	30

با استفاده از نرم افزار SLOPE/W پایداری شیروانی برای یک لایه خاک ریزدانه در عمق مؤثر و با درصد رطوبت های مختلف ۲۰ تا ۴۰ درصد تحلیل شده است. نتایج تحلیل پایداری شیروانی از نوع تعادل حدی و به روش بیشاپ و جانبو به ازای مقادیر مختلف درصد رطوبت در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس این شکل با افزایش درصد رطوبت و به تبع آن درجه اشباعی، ضریب اطمینان ابتدا به شدت کاهش یافته و سپس در رطوبت های بالا (شرایط نزدیک به اشباع) تغییر چندانی نمی کند.

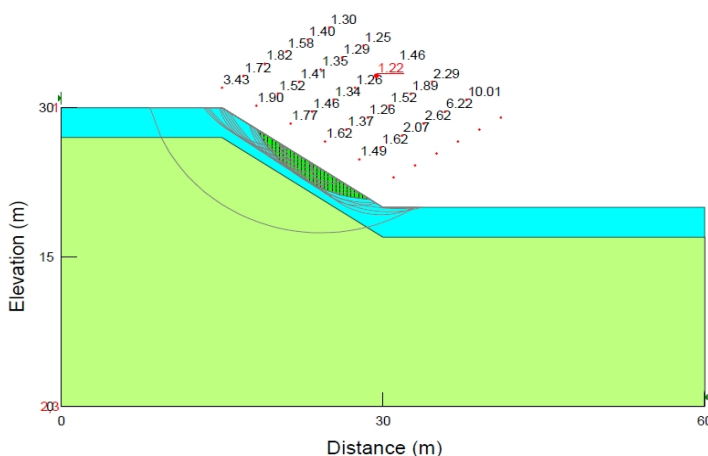


شکل ۳- نتایج تحلیل پایداری شیروانی در خاکهای ریزدانه نیمه اشباع با استفاده از نرم افزار SLOPE/W

همچنین مطالعه اثر ترشدگی (اشباع شدگی) لایه‌های سطحی در اثر بارندگی های آرام (شدت کم) نشان می‌دهد که با افزایش عمق اشباعی خاک از عمق ۱ تا ۲ متر، ضریب اطمینان پایداری شیروانی به شدت کاسته می‌شود. تغییرات ضریب اطمینان پایداری شیروانی بر اساس عمق‌های ۰/۵ تا ۳ متری برای لایه اشباع شده در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس این شکل با افزایش ترشدگی از عمق ۰/۵ تا ۱ متر و همچنین از عمق ۲ تا ۳ متر، حدود ۴ تا ۶ درصد از ضریب اطمینان می‌کاهد، در حالیکه افزایش ترشدگی از عمق ۱ تا ۲ متری بطور بیشینه تا ۴۰ درصد سبب کاهش ضریب اطمینان می‌گردد. بررسی گوه‌های لغزش بحرانی نیز حاکی از آن است که گوه‌های بحرانی اولیه، غالباً قبل از عمق ترشدگی واقع شده‌اند و به عبارت دیگر بطور غالب ترشدگی سبب رخداد گسیختگی موضعی با ضخامت محدود خواهد شد. در شکل ۵، تعداد ۲۰ گوه گسیختگی بحرانی برای عمق ترشدگی ۳ متری نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، تنها یکی از گوه‌های مذکور به شکل عمیق می‌باشد که البته با داشتن ضریب اطمینان ۱/۷۰ پایداری بیشتری نسبت به ۱۹ گوه گسیختگی موضعی دارد.



شکل ۴- اثر ترشدگی لایه های سطحی در کاهش ضریب اطمینان پایداری



شکل ۵- گوه‌های گسیختگی بحرانی برای شرایط دارای ۳ متر عمق ترشدگی

۵. نتیجه گیری

شرایط نفوذپذیری و مقدار مقاومت برشی برای خاک‌های نیمه اشباع تابعی از درجه اشباع است و با آنچه در مورد خاکهای کاملاً اشباع رایج است، متفاوت می‌باشد. از اینرو شرایط پایداری شیب‌های خاکی نیز در شرایط نیمه‌اشباع وضعیتی متفاوت خواهد داشت. محدودیت‌های اندازه‌گیری پارامترهای فشار آب حفره ای و فشار هوای حفره‌ای و در نتیجه مکش ماتریک از یک سو، و پیچیدگی روابط مقاومت و نفوذپذیری خاکهای نیمه‌اشباع و نیز عدم تعریف این روابط در نرم‌افزارهای رایج تحلیل پایداری از سوی دیگر سبب شده است که عملاً استقبال چندانی از روابط مذکور در تحلیل شیروانی‌ها توسط مهندسين ژئوتکنیک به عمل نیامده است. یکی از راهکارهای حل این مساله، اصلاح و ساده‌سازی روابط خاکهای نیمه‌اشباع و تطابق آن با شرایط اشباع می‌باشد که می‌تواند شامل اصلاح معیار گسیختگی، ساده‌سازی و تخمین مقاومت از طریق روابط تجربی، مدلسازی نسبت فشار منفذی و ارائه تابعی برای نفوذپذیری می‌باشد. همچنین مطالعه موردی بر روی یک شیروانی نیمه‌اشباع نشان می‌دهد که با افزایش میزان رطوبت و درجه اشباعی به میزان قابل ملاحظه‌ای از ضریب اطمینان کاسته می‌شود که البته در شرایط نزدیک به اشباع شدت این کاهش چندان بالا نیست. همچنین بررسی ترشدگی لایه‌های سطحی نشان می‌دهد که در صورت افزایش عمق ترشدگی احتمال وقوع گسیختگی و لغزش‌های موضعی بیشتر خواهد شد.

مراجع

۱. احمدی، ه.، (۱۳۸۶)، "ارزیابی مدل‌های رفتاری خاکهای نیمه اشباع به منظور کاربری در خاکریز راهها"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه گیلان، رشت.
2. Lumb, P. (1975), "Slope failures in Hong Kong", Quarterly Journal of Engineering Geology, **8**, pp. 31~65.
3. Gavin, K., Xue, J., (2008), "A simple method to analyze infiltration into unsaturated soil slopes", Computers and Geotechnics, **35** (2), pp. 223~230.
4. Rahimi, A., Rahardjo, H., and Leong E. C., (2010), "Effect of hydraulic properties of soil on rainfall-induced slope failure", Engineering Geology, *Accepted Manuscript*.
5. Bishop, A. W. & Blight, G. E., (1963), "Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils", Géotechnique, **13** (3), pp. 177~197.
6. Khalili, N. and Khabbaz, M. H., (1998), "A unique relationship for the determination of the shear strength of unsaturated soils", Géotechnique, **48** (5), pp. 681~687.
7. Vanapalli, S.K., (2001), "A simple experimental procedure for determining the fitting parameter, k FOR predicting the shear strength of an unsaturated soil", An Earth Odyssey, pp.622~629.
8. Ahmadi, H., Arabani, M. and Kalantary F., (2007), "Development of Failure Criterion for Partially Saturated Cohesive Soils", Electronic journal of Geotechnical Engineering (EJGE), **12** (C).
9. Leong, E.C. and Rahardjo, H., (1997), "Permeability function for unsaturated soils", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, **123** (12), ASCE, pp. 1118~1126.
10. SLOPE/W help (2007), <http://www.geo-slope.com>, GEO-SLOPE International Ltd.
11. Bishop A. and Bjerrum, L., (1960), "ASCE Research Conference On Cohesive Soils", Boulder, Colorado, pp. 347~450