

مطالعه سازوکار گسیختگی شیب های خاکی چند لایه تحت شرایط مختلف اشباع شدگی

یونس سجودی^۱، حسن شرفی^{۲*}

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بناب

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه

* H_sharafi@razi.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۹

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۲۹

چکیده

افزایش میزان رطوبت لایه های خاک در شیب باعث گسیختگی شیبها می شود. هدف اصلی این مطالعه، بررسی سازوکار گسیختگی در شیب های چند لایه تحت تاثیر افزایش میزان رطوبت لایه های خاک است. برای این منظور با استفاده از تحلیل های عددی و مطالعات آزمایشگاهی تاثیر موقعیت های مختلف قرارگیری شمع ها در شیب تحت شرایط مختلف اشباع شدگی لایه ها بررسی شده قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می دهند سطح لغزش ایجاد شده در شیب های چند لایه اشباع، بسته به موقعیت های مختلف قرارگیری شمع ها و شرایط متفاوت اشباع شدگی لایه ها متفاوت از یکدیگر هستند و عامل افزایش رطوبت در میان لایه رسی بیشترین تاثیر را در سطح لغزش ایجاد شده در شیب و سایر پارامترهای مورد مطالعه از قبیل نسبت ظرفیت باربری پی های مستقر بر تاج شیب و نسبت بهسازی ضریب اطمینان پایداری شیب دارد همچنین نتایج آزمایش های آزمایشگاهی و تحلیل های عددی نشان می دهند برای افزایش پایداری شیب، نصب شمع در نزدیکی وسط شیب بیشترین کارایی را دارد. در صورتی که بهینه موقعیت نصب شمع برای افزایش ظرفیت باربری پی های مستقر بر شیب بستگی به شرایط پایداری شیب قبل از اعمال سربار در تاج و شرایط اشباع شدگی لایه های خاک در شیب داشته و در اغلب موارد در نزدیکی تاج شیب است. مقایسه نتایج آزمایش های آزمایشگاهی و مدل های عددی نشان می دهند همخوانی نسبتا مناسبی بین نتایج مدل های فیزیکی با نتایج تحلیل های عددی وجود دارد.

واژگان کلیدی: شیب چند لایه، شمع، موقعیت بهینه، ضریب بهسازی، مدلسازی فیزیکی.

۱- مقدمه

اگر چه وجود آب مستقیما باعث ایجاد جابجایی در شیبها نمی شود ولی به دلایل ذیل یکی از فاکتورهای تاثیر گذار در پایداری است [1-2].

اشباع شدگی لایه های خاک در شیبها یکی از پارامترهای مهم و تاثیر گذار در تحلیل پایداری شیروانی های خاکی است.

۱- افزایش میزان آب در توده خاک باعث افزایش وزن بخش محرک در شیب‌های خاکی می‌شود.

۲- افزایش میزان رطوبت خاک می‌تواند باعث تغییر در زاویه پایداری شیب شود.

۳- آب می‌تواند باعث کاهش سیمان‌تاسیون بین ذرات شده و موجب کاهش چسبندگی شود.

از جنبه‌های دیگر تاثیر آب در پایداری شیروانی‌های خاکی افزایش فشار آب منفذی است که مستقیماً باعث کاهش تنش موثر شده و این عامل تاثیر به سزایی در مقاومت برشی خاک دارد. بنابراین تحلیل فشار آب حفره‌ای و نشت نقش مهمی در حل بسیاری از مسائل ژئوتکنیکی به خصوص پایداری شیروانی‌های خاکی دارد و گسیختگی شیب‌های خاکی طبیعی و ساخته شده توسط انسان‌ها بعد از بارندگی‌ها که یکی از پدیده‌های معمول است به علت ایجاد شرایط مذکور در پارامترهای مقاومتی خاک و یا افزایش نیروهای محرک در شیب ایجاد می‌شود. وقوع زمین‌لغزشها تحت تاثیر بارندگیهای سنگین، گاه و بیگاه باعث ایجاد خسارات گسترده مالی و جانی می‌شود. تحلیل پایداری شیب‌ها شامل تعیین مشخصات مکانیکی خاک و مشخص نمودن شکل و موقعیت سطح گسیختگی محتمل است.

برای تثبیت و جلوگیری از لغزش در شیب‌ها، روش‌های مختلفی توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است. استفاده از شمع‌های پایدارساز برای ایمن سازی و تثبیت شیب‌های در حال لغزش مورد استفاده قرار می‌گیرد [3-4]. سطح آب زیرزمینی را می‌توان با استفاده از ترانسه‌های زهکشی پائین آورد که این امر باعث افزایش پایداری شیب‌ها به ویژه در هنگام بارندگی می‌شود [5-6]. به تازگی مطالعات زیادی در رابطه با سازوکار گسیختگی شیب‌ها بر اساس رفتار خاک‌های غیر اشباع، تحت تاثیر کاهش تنش موثر در اثر اشباع شدگی خاک انجام شده است [7-11]. به عنوان نمونه یاقی و همکاران (۱۹۹۰) بر اساس تحلیل داده‌های شیب Shirasu روشی را برای پیش بینی گسیختگی ناشی از بارندگی ارائه دادو با استفاده از تحلیل‌های عددی، مساله پایداری شیب‌های تحت تاثیر فشار آب حفره‌ای را به روش تنش موثر تحلیل کرد

[12]. شرفی و سجودی در سال ۲۰۱۶ با استفاده از مدل‌سازی‌های فیزیکی و تحلیل‌های عددی الگوی تغییر شکل در شیب‌های خاکی هموزن را بررسی کردند [13]. عبدالعزیز و همکارانش در سال ۲۰۱۷ با تحلیل سه بعدی شیب‌های مسلح شده با شمع بهینه موقعیت نصب شمع برای افزایش ضریب اطمینان پایداری را نزدیک میانه شیب به دست آورده‌اند [14]. جیانگ و همکارانش تاثیر موقعیت‌های مختلف سربار در سازوکار گسیختگی شیب‌های سیمانته را بررسی و نشان دادند که با افزایش فاصله سربار از تاج شیب ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر شیب افزایش می‌یابد [15]. شرفی و شمس ملکی (۲۰۱۸) رفتار ردیفی از شمع‌های شناور نصب شده در شیب‌های ماسه‌ای سست را با استفاده از تحلیل سه بعدی مورد مطالعه قرار دادند [16].

در این مقاله رفتار خاک در شیب‌های خاکی چند لایه مسلح و غیر مسلح تحت شرایط خشک و اشباع بودن لایه‌های خاک بررسی شده، و تاثیر اشباع شدگی لایه‌های خاک در سازوکار گسیختگی شیب‌های چند لایه غیر مسلح و مسلح شده با شمع با استفاده از روش تصویری PIV بررسی شده است.

۲- تئوری روش سرعت سنجی تصویری ذرات PIV در مدل‌سازی‌های ژئوتکنیک

یکی از روش‌هایی که امکان اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها را بدون نیاز به ابزارآلات مکانیکی گران قیمت فراهم نموده، استفاده از روش تصویر مینا است. Particle Image Velocimetry (PIV) در واقع یک روش سرعت سنجی است که در ابتدا در رشته مکانیک سیالات و برای اندازه‌گیری سرعت میدان جریان ۲ و ۳ بعدی به کار برده شد [17]. سپس یک رویکرد اصلاح شده برای کاربرد PIV در آزمایش‌های ژئوتکنیکی صورت گرفته است که در آن تغییر شکل خاک به عنوان جریان با سرعت کم بیان می‌شود [18]. حاجی‌علیلو و همکارانش با استفاده از این روش گوه‌های کرنش ایجاد شده در اطراف شمع‌های تحت بار جانبی را بررسی کرده و روشی برای تعیین

شده است. نمودار مربوط به منحنی دانه‌بندی ماسه استفاده در شکل (۲) ارائه شده است. یکی از نکات قابل توجه در ساخت مدل‌های فیزیکی در رابطه با چگونگی ریزش ماسه و رعایت یکنواختی مدل و پیوستگی در ریزش ماسه است. برای این منظور از روش پاشش خشک ماسه استفاده شده و ماسه از ارتفاع حدود ۲۵ سانتی‌متری ریخته شد. شیب‌های چند لایه ساخته شده در آزمایشگاه شامل سه لایه است. در بخش پائین از ماسه بد دانه‌بندی شده با وزن مخصوص $\gamma_d=18.2 \text{ KN/m}^3$ استفاده شد برای ساخت این لایه ابتدا ماسه از ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری در ضخامت‌های ۵ سانتی‌متری ریخته شده و سپس با استفاده از یک وزنه با سطح مسطح و به وزن ۳ کیلوگرم متراکم شد و سپس به همین صورت لایه‌های بعدی تا رسیدن به تراز مورد نظر ریخته شده و عملیات تراکم تکرار شد. بخش میانی شامل لایه نازکی از رس با وزن مخصوص $\gamma_d=10.2 \text{ KN/m}^3$ است که در سطح لایه متراکم به ضخامت ۵ سانتی‌متر ایجاد شد. با توجه به حساسیت رسها به دست خوردگی و احتمال تغییر مشخصات آنها در مدل‌های مختلف، برای ایجاد شرایط یکسان از نظر پارامترهای مقاومتی در لایه رسی، به جای رس از بنتونیت بدون ایجاد تراکم در آن استفاده شد. در بخش بالایی نیز از ماسه بد دانه بندی شده با وزن مخصوص $\gamma_d=14.9 \text{ KN/m}^3$ استفاده شد. این لایه نیز به روش پاشش خشک بدون انجام تراکم ساخته شد. بعد از ریختن لایه‌های خاک در ظرف آزمایش، شیب مورد نظر به ارتفاع ۴۴ و طول ۷۱/۵ سانتی‌متر و به روش خاکبرداری ایجاد شد. ضریب اطمینان پایداری شیب ساخته شده در حالت غیر مسلح و خشک، با استفاده از تحلیل تفاضل محدود FLAC 3D و به روش کاهش مقاومت برابر ۱/۰۶ به دست آمد. برای مسلح سازی شیب از شمع‌های فولادی با مقطع مستطیلی به پهنای ۴ سانتی‌متر و ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر و طول ۶۰ سانتی‌متر استفاده شد که به صورت کوبشی در محل‌های مورد نظر نصب شدند. مشخصات خاک در لایه‌های مختلف شیب چند لایه برای حالت‌های خشک و اشباع که با استفاده از آزمایش برش مستقیم روی نمونه‌های بازسازی شده به دست آمده‌اند به ترتیب در جدول‌های (الف و ۱-ب) آورده شده است.

ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها ارائه دادند [19-20]. پردازش عکس‌ها به وسیله نرم‌افزارهای Matpiv و GeoPIV که تحت برنامه Matlab نوشته شده است انجام می‌گیرد. برای پردازش، اولین تصویر به قطعات کوچک تقسیم می‌شود (مش‌بندی می‌شود) و مختصات هر یک از قطعات بر حسب پیکسل تعیین می‌شود (u_1 و v_1). برای تعیین مختصات هر یک از پچ‌ها در تصویرهای دیگر گرفته شده، همبستگی پچ کوچک استخراج شده از تصویر اول در یک محدوده تعریف شده برای همان پچ کوچک در تصویر دوم ارزیابی و تعیین می‌شود. جایی که بیشترین همبستگی وجود دارد وضعیت تغییر یافته پچ کوچک (u_2 و v_2) را نشان می‌دهد. این عمل برای تمامی پچ‌های کوچک مش‌بندی شده در داخل تصویر گرفته شده، تکرار می‌شود و مختصات پچ‌ها در هر یک از تصاویر گرفته شده تعیین می‌شود. خروجی این نرم افزارها به صورت ماتریس دو بعدی u و v است که اولی نشان دهنده مولفه افقی و دومی نشان دهنده مولفه عمودی بردار جابه‌جایی هر یک از پچ‌ها است. با استفاده از ماتریس دو بعدی به دست آمده برای هر یک از تصاویر گرفته شده به کمک نرم‌افزار Geo PIV بردارهای جابه‌جایی و کرنش‌های برشی و حجمی ایجاد شده محاسبه می‌شوند.

۳- آزمایش‌های آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی از یک ظرف فلزی مکعبی به ابعاد $100 \times 40 \times 120$ سانتی‌متر استفاده شد. ظرف فلزی در کناره‌ها با استفاده از المان‌هایی تقویت شد تا صلبیت آن تا حد امکان افزایش یابد. برای مشاهده تغییر شکل خاک در شیب و زیر پی، در جلوی ظرف از یک طلق شفاف به ضخامت ۲ سانتی‌متر استفاده شد. برای مشاهده سطح آب در موقعیت‌های مختلف شیب و کنترل اشباع شدگی لایه‌های خاک در موقعیت‌های مختلف ظرف آزمایش از پیژومترهای نصب شده در فواصل ۲۵ سانتی‌متری استفاده شد. نمای کلی ظرف آزمایش و سیستم بارگذاری در شکل (۱) نشان داده شده است. خاک مورد استفاده در مدلسازی‌های آزمایشگاهی، ماسه بد دانه‌بندی

سانتی متر مربع گرفت تا آبهای اضافی آن زهکشی شده و تخلیه شد.

بعد از آماده سازی مصالح رسی اشباع، لایه رسی مورد نظر با بریدن ورقه‌هایی به ضخامت ۵ سانتی متر از لایه اشباع شده ایجاد شد. در هر یک از آزمایش‌ها حالت خشک و اشباع بعد از ساخت مدل شیب، پی نواری در تاج شیب در موقعیت خود قرار داده شده و سربار مورد نیاز برای ایجاد گسیختگی در خاک، به صورت افزایشی و در گام‌های مختلف بر آن اعمال شد. نیروی اعمال شده بر پی با استفاده از یک نیرو سنج به ظرفیت ۵ کیلونیوتن اندازه‌گیری شد. در حالت‌های مختلف اشباع شدگی لایه‌های خاک نیز، ابتدا شیب مطابق شرایط ذکر شده در حالت خشک ساخته شده و سپس لایه‌های خاک با استفاده از جریان از بالادست شیب اشباع، برای این منظور مطابق شکل (۱-الف) در بالادست و پائین دست شیب به ترتیب از یک مخزن تغذیه و تخلیه (برای زهکشی آب) استفاده شد. مشخصات آزمایش‌های انجام شده که شامل ۱۶ مورد آزمایش است در جدول (۲) آورده شده است.

برای اندازه‌گیری تغییر شکل‌های ایجاد شده در خاک، در هر یک از مراحل بارگذاری از خاک در حال تغییر شکل با استفاده از دوربین نصب شده در جلوی مدل عکس گرفته شد و در هر یک از مدل‌های آزمایشگاهی مقادیر جابه‌جایی‌های ایجاد شده در خاک با تحلیل عکس‌ها با استفاده از نرم افزار Geo PIV مشخص شد.

جدول (۲) مشخصات آزمایشات آزمایشگاهی

Variable parameters	Constant parameter	Slope	Row
$L_x/L = [0.25, 0.5, 0.75, 1.0]$	(S/D=2.5), (b/B=2)	layered slope and various layers saturation conditions	1
- Below layer saturated - Below and clayey layer saturated - All Layers saturated	b/B=2	No piled layered slope	2

Table 2. Characteristics of laboratory tests

۴- تحلیل‌های عددی

جدول (۱-الف) مشخصات لایه‌های خاک در مدل‌های آزمایشگاهی (در حالت خشک)

Soil Properties in dry conditions					Layer
v	E (kPa)	ϕ (°)	C (kPa)	γ_d (kN/m ³)	
0.3	20000	28	0.075	14.9	Loose Sand
0.4	10000	8	4.5	10.2	Clay Layer

جدول (۱-ب) مشخصات لایه‌های خاک در مدل‌های آزمایشگاهی (در حالت اشباع)

Soil Properties in saturated conditions					Layer
v	E (kPa)	ϕ (°)	C ^{sat} (kPa)	γ^v (kN/m ³)	
0.3	20000	26	0.015	19	Loose Sand
0.4	10000	3	0.6	14	Clay Layer
0.3	40000	38	0.0024	21	Dense Layer

Table 1b. Characteristics of soil layers in laboratory models (in saturated condition)

برای اشباع کردن لایه‌های خاک با توجه به اینکه لایه‌های ماسه‌ای دارای نفوذپذیری بالایی هستند با تعبیه یک مخزن آب در بالادست شیب آب از بالادست لایه در تراز ثابت وارد لایه‌های خاک شده و به وسیله مخزن تعبیه شده در پائین دست شیروانی زهکشی شد. برای کنترل اشباع شدگی لایه‌ها از پیژومترهای تعبیه شده در ظرف آزمایش استفاده شد. این پیژومترها در فواصل ۲۰ سانتی متری از یکدیگر در امتداد طول شیب قرار داده شده‌اند. با جریان آب از داخل لایه‌های خاک، با گذشت زمان و بعد از اشباع لایه‌ها تراز آب در داخل پیژومترها ثابت مانده و جریان ماندگار در داخل لایه‌ها برقرار شد. برای اشباع لایه رسی، قبل از مدلسازی لایه رسی در آزمایشگاه، ابتدا با استفاده از یک همزن مکانیکی، رس مورد استفاده در آزمایش‌ها به صورت دوغاب آماده، و برای مدت دو هفته در یک ظرف بزرگ نگهداری شد. بعد از گذشت مدت زمان، دوغاب رسی در ظروف مستطیلی به ارتفاع ۱۰ سانتی متر ریخته شده و تحت سربار ۰/۲۵ کیلوگرم بر

در این پژوهش، برای بررسی سازوکار گسیختگی شیب‌های چند لایه از تحلیل سه بعدی تفاضل محدود با استفاده از نرم افزار 3D FLAC استفاده شده است. برای این منظور تمام مدل‌های فیزیکی به صورت سه بعدی و با مقیاس ۱:۱۰ مدلسازی شده‌اند. مدل رفتاری استفاده شده برای خاک، مدل موهر کلمب و شمع‌ها با استفاده از مدل رفتاری الاستیک مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. اندرکنش بین خاک و شمع نیز با استفاده از اندرکنش اصطکاکی (S_{Coh} و S_{Fric}) و سختی برشی و نرمال (k_n , k_s) تحلیل شده و ضریب اطمینان پایداری شیب غیر مسلح در حالت خشک بودن لایه‌های خاک و بدون اعمال سربار در بالادست شیب برابر ۱/۰۶ به دست آمده است. برای مدلسازی عددی حالت‌های مختلف اشباع شدگی لایه‌ها، تراز آب در بالادست شیب تعریف شده و بعد از تحلیل جریان و ایجاد جریان ماندگار، پایداری شیب به روش کاهش مقاومت مورد بررسی قرار گرفت.

شکل ۱. مدل آزمایشگاهی الف) پیکربندی مدل آزمایشگاهی ب) پلان مدل و پارامترهای استفاده شده

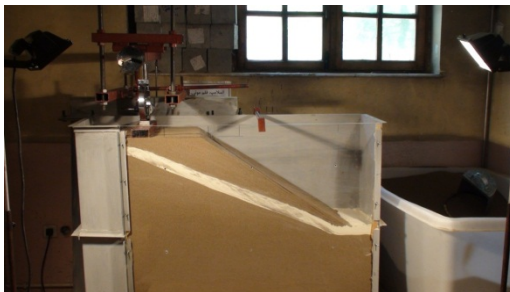
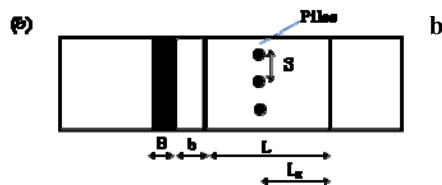
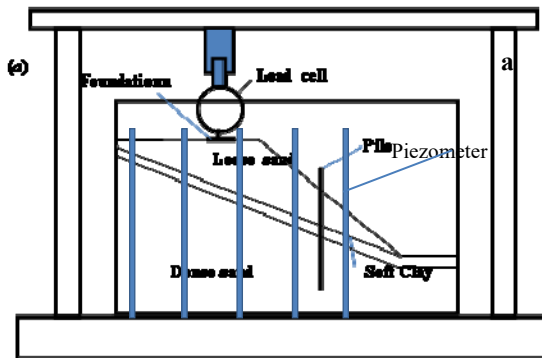


Fig. 1. Slope model (a) elevation view (b) plan view

در همه حالت‌ها ذرات خاک تمایل به حرکت رو به پایین دارند و زون گسیختگی کاملاً واضح است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند با افزایش میزان رطوبت لایه‌های خاک، به و در

۵- نتایج و بحث

در این مطالعه تاثیر موقعیت‌های مختلف نصب شمع و تغییرات سطح آب زیر زمینی در سازوکار گسیختگی و پایداری شیب‌های چند لایه و به تبع آن در میزان ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر شیب با استفاده از مدلسازیهای فیزیکی و تحلیل‌های عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین برای مطالعه تاثیر استفاده از شمع در پایداری شیب‌ها از عدد بی بعد نسبت بهسازی ضریب اطمینان پایداری استفاده شده است که به صورت نسبت ضریب اطمینان پایداری شیب در حالت مسلح به ضریب اطمینان پایداری شیب در حالت غیر مسلح تعریف می‌شود

$$(N_s = \frac{F_S - \text{Reinforced}}{F_S - \text{Un Reinforced}})$$

۵-۱- تاثیر اشباع شدگی لایه‌های خاک در پایداری

شیب

۵-۱-۱- در حالت غیر مسلح

برای بررسی تاثیر اشباع شدگی هر یک از لایه‌های خاک در سازوکار گسیختگی شیب، تغییر شکل‌های ایجاد شده در شیب ناشی از اشباع شدگی هر یک از لایه‌ها و بارگذاری در تاج شیب برای حالت غیر مسلح در شکل (۳) نشان داده شده است.

لایه‌های بالایی، میزان تغییر شکل‌های ایجاد شده در خاک افزایش می‌یابد.

شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه استفاده شده

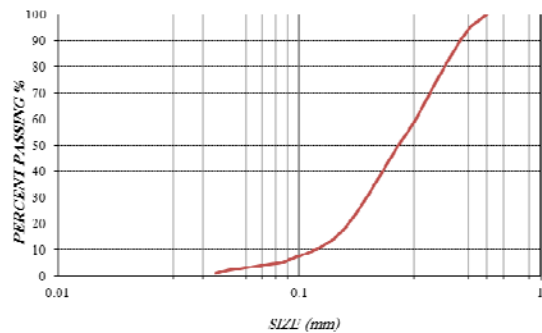


Fig. 2. Particle size distribution of the sand

شکل (۳ الف) شیب چند لایه غیر مسلح در حالت خشک را نشان می‌دهد که بدون اعمال سربار در تاج شیب پایدار است. در این مورد با توجه به اینکه نیروی مقاوم در برابر حرکت رو به پائین خاک بسیار کم و ناچیز است صفحه گسیختگی به سمت پای شیب حرکت کرده و به سمت سطح زمین حرکت نکرده است بنابراین مد گسیختگی ایجاد شده در شیب، گسیختگی کلی است و پی مستقر بر تاج شیب در خاک زیرین پانچ شده است. برای این حالت منحنی بار-نشست پی مستقر بر تاج شیب دارای نقطه پیک کاملاً مشخصی نبوده و با افزایش میزان نشست مقدار بار اعمالی نیز افزایش می‌یابد. شکل (۳ ب) بردارهای جابه‌جایی ایجاد شده در شیب را برای حالتی که فقط لایه متراکم زیرین اشباع شده و سطح آب هم‌انگ بر سطح لایه متراکم زیرین است نشان می‌دهد. مقایسه بردارهای جابه‌جایی ایجاد شده برای این حالت با حالت خشک نشان می‌دهد اشباع لایه پائین تاثیر چندانی در مقادیر تغییر شکل‌های ایجاد شده در شیب و سازوکار گسیختگی ندارد. ولی همان‌طور که در شکل (۳ ج و ۳ د) نشان داده شده است با بالا آمدن سطح آب در لایه‌های نزدیک سطح زمین، مقادیر تغییر شکل‌ها افزایش قابل توجهی یافته است. برای این حالت‌ها شیب بدون اعمال سربار ناپایدار نیست و برای هر دو حالت شکل سطح گسیختگی شبیه یکدیگر بوده و گسیختگی ایجاد شده در شیب از نوع گسیختگی کلی

است و سطح گسیختگی از میان لایه رسی عبور کرده است. کرنش‌های برشی ایجاد شده در شیب‌ها که با استفاده از نتایج تحلیل‌های PIV عکس‌های گرفته شده از توده خاک در حال تغییر شکل به دست آمده‌اند در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌شود سطح لغزش ایجاد شده و رفتار تغییر شکلی لایه‌های خاک در شیب بسته به شرایط خشک و اشباع بودن لایه‌های خاک تغییر می‌کند. به عنوان نمونه عمق گسیختگی برای حالتی که لایه‌ها اشباع هستند نسبت به حالت خشک عمیق‌تر است. مقایسه سطوح گسیختگی ایجاد شده در شیب‌ها نشان می‌دهند تغییرات سطح گسیختگی وابسته به مقاومت برشی میان لایه رسی در حالت خشک و اشباع است و با توجه به کاهش مقاومت برشی میان لایه رسی در حالت اشباع سطح گسیختگی در میان لایه رسی ایجاد می‌شود و ضریب اطمینان پایداری شیب به کمتر از ۱ کاهش می‌یابد. هر چند نباید از تاثیر جریان آب در پاشنه شیب صرف‌نظر کرد.

همان‌گونه که در شکل‌های (۴ ج و ۴ د) مشاهده می‌شود سطح گسیختگی شامل حجم زیادی از خاک نسبت به سایر حالت‌های اشباع شدگی است و نوع گسیختگی ایجاد شده، گسیختگی کلی می‌باشد.

به غیر از حالتی که همه لایه‌های خاک اشباع شده‌اند، با نصب شمع در وسط شیب، گسترش جابه‌جایی‌ها در پایین دست شمع‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت با مسلح‌سازی شیب با یک ردیف شمع با فواصل مرکز به مرکز برابر $S/D=2.5$ با توجه به پایدار بودن شیب بدون شمع، جابجایی المان‌های خاک در پائین دست شمع (بین پنجه شیب و شمع) برای کلیه موقعیت‌های نصب شمع کاهش یافته و تقریباً برابر صفر شده است. ولی برای حالتی که هر سه لایه اشباع می‌باشند با توجه به اینکه ضریب اطمینان پایداری شیب در حالت بدون اعمال سربار در تاج شیب کمتر از یک می‌باشد، ماکزیمم جابه‌جایی‌های ذرات خاک در پایین دست شمع‌های نصب شده ایجاد شده است.

شکل ۴. کرنش برشی ایجاد شده در شیب بر اساس نتایج آزمایش‌ها آزمایشگاهی. الف) خشک بودن همه لایه‌ها ب) اشباع لایه پائین ج) اشباع لایه پائین و میان لایه رسی د) اشباع هر سه لایه

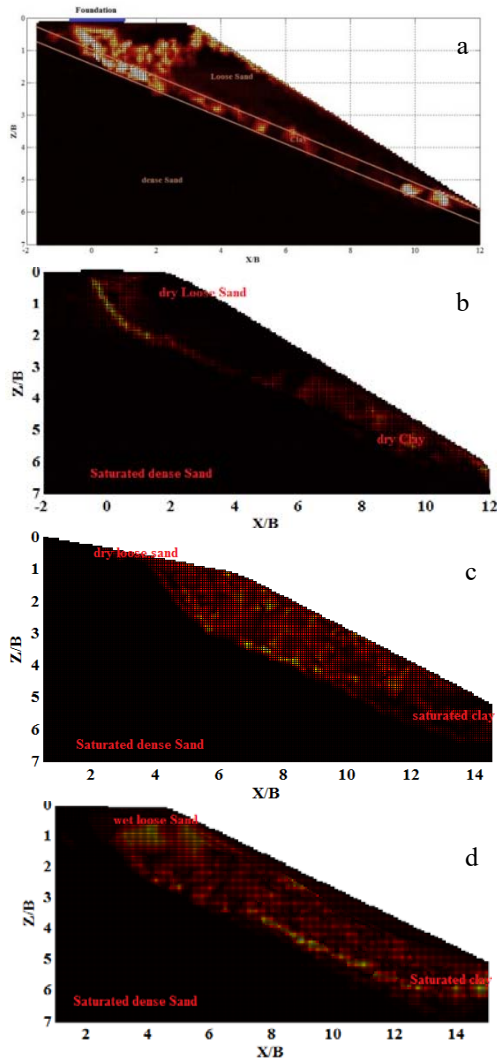


Fig. 4. Total maximum shear strain obtained from experimental results (No-piled slope); a) all layers are dry b) dense sand layer saturated c) dense sand and clay layers saturated d) all layers saturated

دلیل این امر افزایش پایداری شیب در بالادست شمع‌ها و ناپایداری پائین دست شمع‌ها در این حالت (اشباع هر سه لایه) است. مقایسه جابه‌جایی المان‌های خاک در حالت مسلح و غیر مسلح نشان می‌دهد در حالت غیر مسلح حجم زیادی از خاک در شیب تمایل به لغزش دارد که از زیر پی شروع و تا پنجه شیب امتداد می‌یابد ولی با مسلح سازی شیب حجم توده لغزشی کاهش یافته و از کناره‌های پی تا بالادست شمع امتداد

شکل ۳. جابه‌جایی‌های ایجاد شده در شیب بر اساس نتایج آزمایش‌ها آزمایشگاهی. الف) خشک بودن همه لایه‌ها ب) اشباع لایه پائین ج) اشباع لایه پائین و میان لایه رسی د) اشباع هر سه لایه

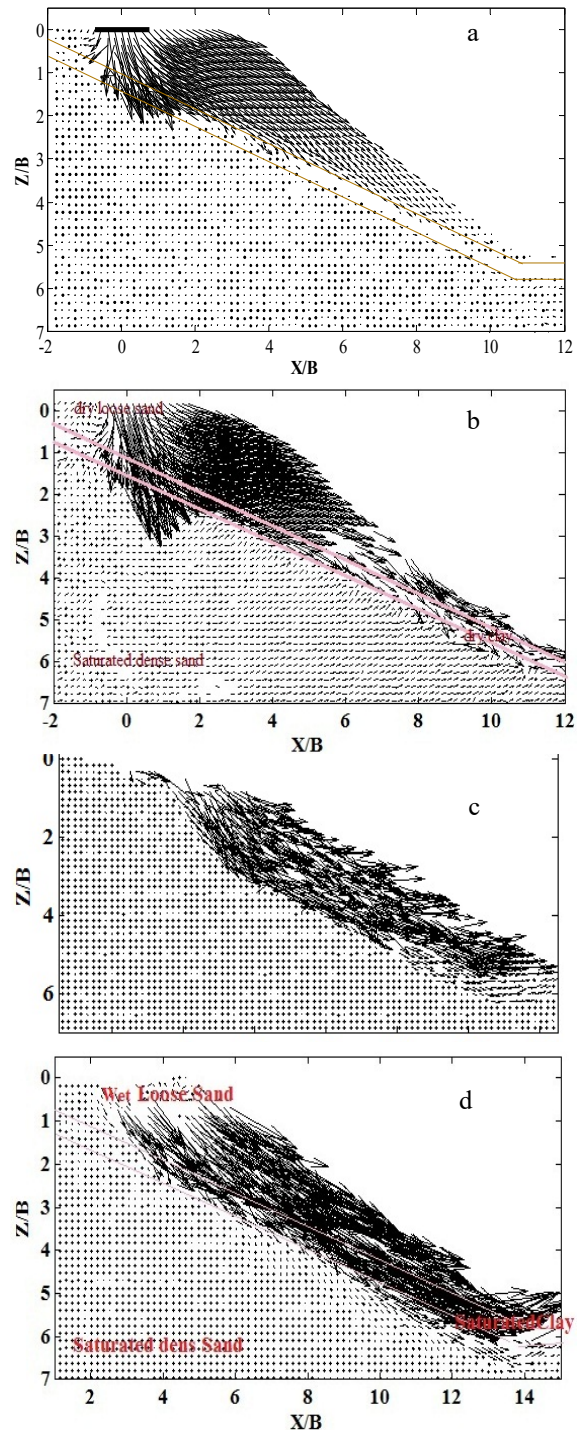


Fig. 3. Displacement fields obtained from experimental results (No-piled slope); a) all layers are dry b) dense sand layer saturated c) dense sand and clay layers saturated d) all layers saturated

همچنین کرنش‌های برشی ایجاد شده در شیب‌های چند لایه مسلح برای حالتی که شمع‌ها در وسط شیب نصب شده‌اند، برای شرایط مختلف اشباع شدگی لایه‌ها که با استفاده از تحلیل‌های عددی به دست آمده‌اند در شکل (۷) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود سطح لغزش ایجاد شده ناشی از بارگذاری در تاج شیب برای شرایط مختلف اشباع شدگی لایه‌ها مشابه نتایج به دست آمده از مدلسازی‌های آزمایشگاهی هستند و هماهنگی نسبتاً مناسبی بین نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی وجود دارد.

شکل ۶. ماکزیمم کرنش برشی ایجاد شده در شیب مسلح ($Lx/L=0.5$) بر اساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی. الف) اشباع لایه پائین ب) اشباع لایه پائین و میان لایه رسی ج) اشباع هر سه لایه

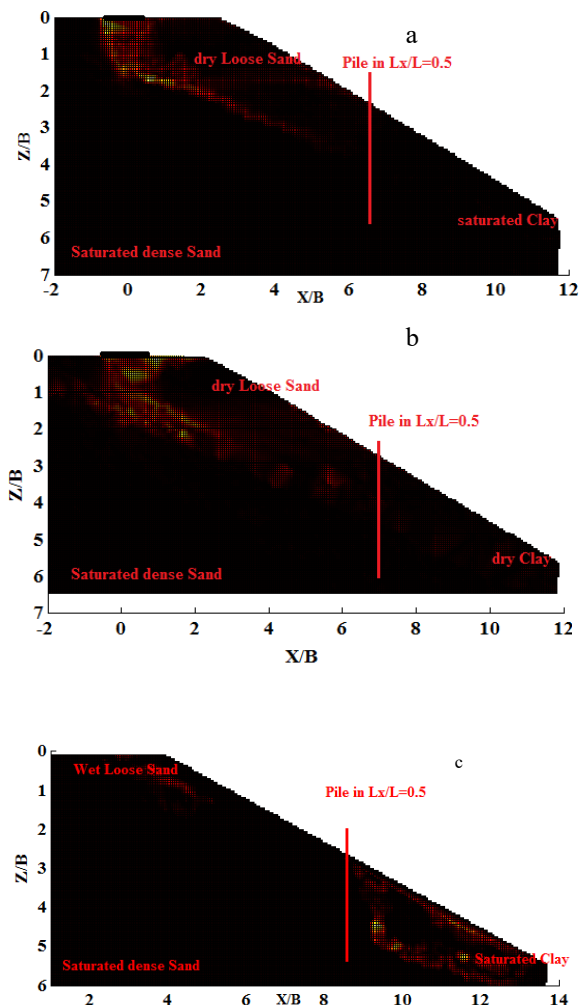


Fig. 6. Total maximum shear strain obtained from experimental results (piled slope $Lx/L=0.5$); a) dense sand layer saturated b) dense sand and clay layers saturated c) all layers saturated

یافته است. کرنش‌های برشی ایجاد شده در شیب مسلح ($Lx/L=0.5$) برای حالت‌های مختلف اشباع شدگی لایه‌های خاک در شکل (۶) نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود برای حالت‌هایی که شیب بدون اعمال سربار در بالادست آن پایدار است. برای حالت مسلح شده با شمع بخش بالایی آن از نظر پایداری بحرانی می‌باشد و ماکزیمم کرنش برشی در بالادست آن اتفاق می‌افتد ولی برای حالتی که شیب بدون اعمال سربار در بالادست شیب ناپایدار است (حالتی که هر سه لایه اشباع هستند) بخش پائین دست شمع‌ها بحرانی است و سطح لغزش در پائین دست شمع‌ها اتفاق می‌افتد.

شکل ۵. جابه‌جایی‌های ایجاد شده در شیب مسلح ($Lx/L=0.5$) بر اساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی. الف) اشباع لایه پائین ب) اشباع لایه پائین و میان لایه رسی ج) اشباع هر سه لایه

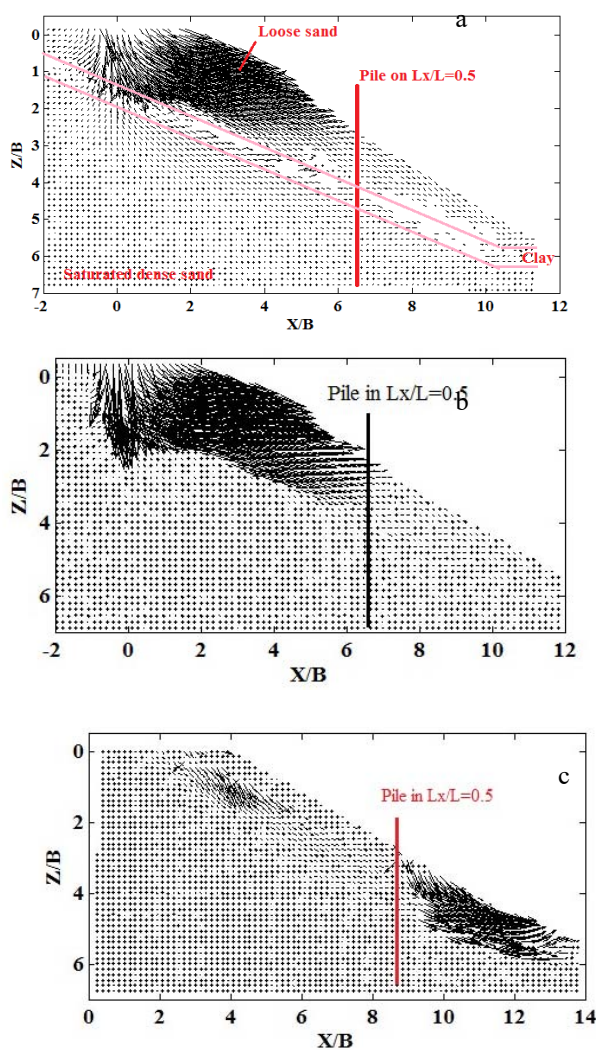


Fig. 5. Displacement fields obtained from experimental results (piled slope $Lx/L=0.5$); a) dense sand layer saturated b) dense sand and clay layers saturated c) all layers saturated

برابر ۱:۱ تحلیل شدند. تاثیر موقعیت های مختلف نصب شمع، در میزان سربار قابل تحمل شیب برای حالتی که سطح آب هماهنگ بر زیر میان لایه رسی است در جدول (۳) آورده شده است. در کلیه مدلسازی های انجام شده شیب ها با استفاده از یک ردیف شمع مسلح شده اند فاصله مرکز به مرکز شمع ها برابر ۲/۵ در نظر گرفته شده است. در حالت مسلح تغییرات میزان سربار اعمالی بر تاج شیب برای موقعیت های مختلف نصب شمع ($L_x/L=0.25, 0.50, 0.75, 1.0$)، با استفاده از تحلیل های عددی به دست آمده و نتایج آن با نتایج مدل های فیزیکی مقایسه شده است. مشاهده می گردد در این حالت ماکزیمم سربار اعمالی برای ایجاد گسیختگی در شیب هنگامی به دست می آید که شمع در نزدیکی تاج شیب نصب گردد. مقایسه نتایج تحلیل های عددی و مدل های فیزیکی نشان می دهند ماکزیمم و مینیمم میزان انحراف نتایج تحلیل های عددی نسبت به نتایج مدل های فیزیکی ۱۹/۷ و ۶/۷ درصد است و هماهنگی مناسبی بین نتایج وجود دارد.

جدول ۳. تغییرات ظرفیت باربری پی های مستقر بر شیب نسبت به موقعیت های مختلف نصب شمع (اشباع لایه پائین و خشک بودن لایه های

بالا)

$L_x/L=$	$L_x/L=0$	L_x/L	$L_x/L=0$	No-Piled	Pile
1	.75	=0.5	.25	slope	Position
7.66	7.36	5.89	4.63	4.35	$q_u^{(experimental)}$ (kpa)
6.23	6.76	6.2	5.21	4.057	$q_u^{(Numerical)}$

Table 3. Variation of footing bearing capacity for different pile positions (L_x/L) for water table conducted below clay layer

با اشباع میان لایه رسی ضریب اطمینان پایداری شیب کمتر از یک به دست آمد که هماهنگ با نتایج آزمایش های آزمایشگاهی است. ولی برای حالت های مختلف مسلح سازی، شیب بدون بارگذاری پایدار بود. برای این حالت ها تغییرات ظرفیت باربری پی های مستقر بر تاج شیب برای شیب مسلح شده با شمع در موقعیت های مختلف که با استفاده از تحلیل های عددی و مدل های فیزیکی به دست آمده است در جدول (۴) ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهند برای این حالت ماکزیمم ظرفیت باربری هنگامی به دست

شکل ۷. ماکزیمم کرنش برشی ایجاد شده در شیب مسلح ($L_x/L=0.5$) بر اساس نتایج تحلیل های عددی. الف) اشباع لایه پائین ب) اشباع لایه پائین و میان لایه رسی ج) اشباع هر سه لایه

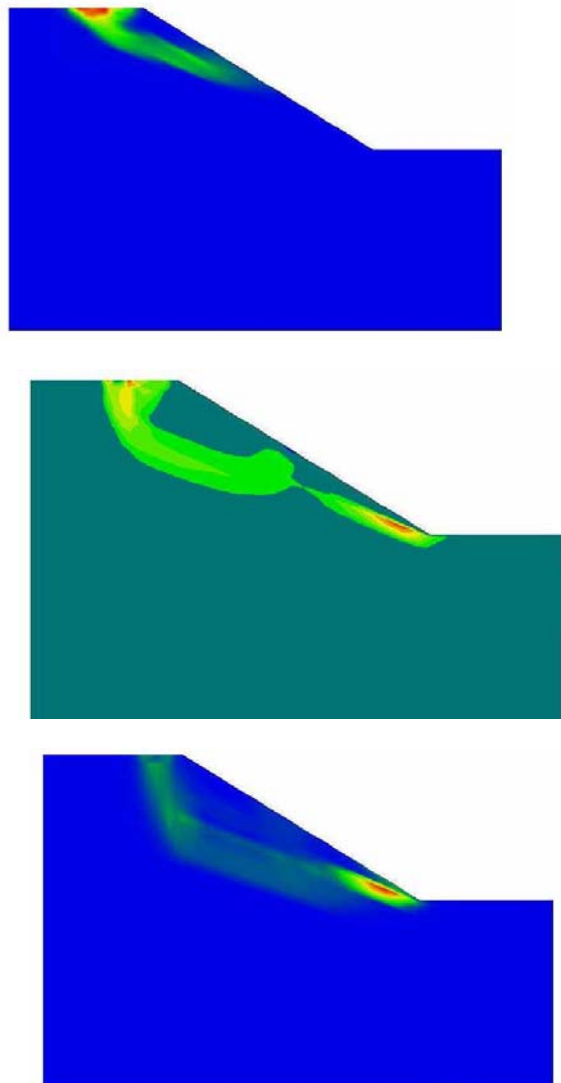


Fig. 7. Total maximum shear strain obtained from Numerical results (piled slope $L_x/L=0.5$); a) dense sand layer saturated b) dense sand and clay layers saturated c) all layers saturated

۲-۵- تاثیر موقعیت نصب شمع در ظرفیت باربری پی های مستقر بر شیب

برای بررسی تاثیر استفاده از شمع در ظرفیت باربری پی های مستقر بر شیب برای حالت های مختلف اشباع شدگی لایه های خاک تعداد ۱۵ آزمایش برای ۴ موقعیت مختلف نصب شمع و بدون شمع و سه حالت مختلف اشباع شدگی لایه ها انجام شد. همچنین برای درستی آزمایشی مدل های آزمایشگاهی کلیه مدل های فیزیکی با استفاده از نرم افزار FLAC 3D و با مقیاس

موقعیت‌های مختلف نصب شمع برای حالتی که هر سه لایه اشباع می‌باشند در شکل (۹) نشان داده شده است. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهند بهینه موقعیت برای نصب شمع برای افزایش پایداری شیب بدون اعمال سربار در تاج شیب در وسط شیب است. این موضوع از نتایج مدل‌های فیزیکی و نتایج تحلیل‌های عددی قابل استناد می‌باشد و هر دو نتایج مشابهی از نظر بهینه موقعیت نصب شمع به دست می‌دهند.

شکل ۸. تغییرات ضریب اطمینان پایداری شیب چند لایه (اشباع هر سه لایه) نسبت به موقعیت‌های مختلف نصب شمع

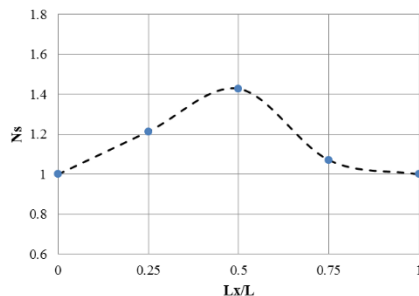


Fig. 8. Variation of N_s ratio with pile position (all layers saturated)

شکل ۹. تغییرات زمان پایداری شیب چند لایه (اشباع هر سه لایه) نسبت به موقعیت‌های مختلف نصب شمع

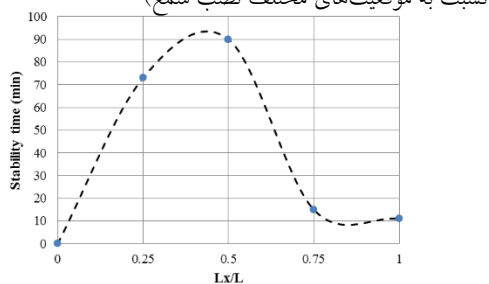


Fig. 9. Variation of stability time with pile position (all layers saturated)

۶- بحث و نتیجه‌گیری

مدل‌های آزمایشگاهی و عددی مختلفی از شیب‌های چند لایه برای بررسی تاثیر مسلح سازی شیب در رفتار خاک زیر پی و سازوکار گسیختگی شیب تحت شرایط مختلف اشباع شدگی لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج کلی به دست آمده به طور خلاصه به صورت زیر است:

می‌آید که شمع‌ها در L_x/L برابر ۰,۷۵ نصب شده باشند.

مقایسه نتایج مدل‌های فیزیکی و عددی نشان می‌دهند در این حالت نیز هماهنگی مناسبی بین نتایج تحلیل‌های عددی و مدل‌های فیزیکی وجود دارد.

مدلسازی فیزیکی و عددی شیب‌های چند لایه که در آن هر سه لایه اشباع است نشان داد، برای همه موقعیت‌های نصب شمع، شیب از نظر پایداری، ناپایدار می‌باشد و قبل از اعمال سربار در تاج شیب و در زمان‌های مختلف دچار گسیختگی شد. بنابراین برای کلیه موقعیت‌های نصب شمع ظرفیت باربری برابر صفر به دست آمد و تاثیر موقعیت‌های مختلف نصب شمع تنها در زمان پایداری شیب بود.

جدول ۴. تغییرات ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر شیب نسبت به موقعیت‌های مختلف نصب شمع (اشباع لایه پائین و میان لایه رسی و خشک بودن لایه بالا)

$L_x/L=1$	$L_x/L=0.75$	$L_x/L=0.5$	$L_x/L=0.25$	No-Piled slope	Pile Position
3.12	4.58	2.95	1.96	0	$Q_u(\text{experimental})$ (kpa)
3.29	4.43	3.46	1.88	0	$Q_u(\text{Numerical})$ (kpa)

Table 4. Variation of footing bearing capacity for different pile positions (L_x/L) for water table conducted above clay layer

۳-۵- تاثیر موقعیت شمع در پایداری شیب

برای بررسی تاثیر اشباع شدگی هر سه لایه در پایداری شیب تعداد ۴ مدل در حالت مسلح و یک مدل در حالت غیر مسلح با استفاده از نرم افزار Flac 3D تحلیل شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها در این حالت برای همه موقعیت‌های نصب شمع کمتر از یک است و مسلح‌سازی شیب با استفاده از یک ردیف شمع تاثیر چندانی در پایداری شیب‌ها ندارد. نسبت بهسازی ضریب اطمینان به دست آمده برای این شیب‌ها برای موقعیت‌های مختلف نصب شمع در شکل (۸) آورده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند برای این حالت نیز ماکزیمم ضریب اطمینان پایداری شیب هنگامی به دست می‌آید که شمع‌ها در وسط شیب نصب شوند. همچنین نتایج به دست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی برای تغییرات زمان پایداری شیب‌ها برای

بخش پائین دست جلوگیری می‌کنند. بخش بالادست شمع‌ها بحرانی است و دچار گسیختگی می‌شود.

۶. بهینه موقعیت نصب شمع برای افزایش پایداری شیب‌هایی که در حالت اولیه بدون اعمال سربار در تاج شیب و حالت خشک پایداری می‌باشند در وسط شیب است.

۷. با توجه به اینکه در شیب‌هایی که در حالت اولیه بدون اعمال سربار در تاج شیب پایدار هستند. با اعمال سربار گسیختگی در بخش‌های بالایی شیب و زیر سربار اعمالی ایجاد می‌شود بنابراین در حالت اعمال سربار در تاج شیب، بهینه موقعیت نصب شمع نزدیک تاج شیب و محل اعمال سربار به دست آمده است.

Reference

مراجع

- [1] Wright S, Duncan J. (1987). "An examination of slope stability Computation Procedures for sudden drawdown". US Army Corps Engineering. Waterway Experiment Station Vicksburg (MS).
- [2] Duncan j, Wright S. (2005). "Soil strength and slope stability". Hoboken (NJ): John Wiley & Sons.
- [3] Song Y.S, Hong W.P and Woo K.S. (2012). "behavior and analysis of stabilizing piles installed in cut slope during rainfall". Engineering Geology, Vol (129-130), pp. 56-67
- [4] Kourkoulis R, Gelagoti F, Anastasopoulos I and Gazetas G (2011). "Slope Stabilizing piles and pile-Groups: Parametric Study and Design Insights". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 137(7), pp. 663-667
- [5] Cai F., Ugai K., Wakai A. and Li Q. (1998). "Effects of horizontal drains on slope stability under rainfall by three-dimensional finite element analysis". Computers and Geotechnics, 23, pp. 255-275.
- [6] Valli P. (2000). "Numerical study to stabilized landslides by trench drains". Computer and Geotechnics, 27, pp. 63-77
- [7] Yatabe, R., Yagi, N. and Enoki, M. (1986). "Consideration on prediction method for occurring time of slope failure during seepage of rainfall". Journal of Geotechnical Engineering, JSCE III, 6 (376), 297-305 in Japanese.
- [8] Yagi, N., Yatabe, R., Enoki, M., (1990). "Prediction of slope failure based on amount of rain fall". Journal of Geotechnical Engineering, JSCE III, 13 (418), 65-73 in Japanese.
- [9] Orense R., Farooq, K. and Towhata, I. (2004). "Deformation behavior of sandy slopes during rainwater infiltration". Soils and Foundation 44 (2), 15-30.

برای حالاتی که سطح آب منطبق بر بالای میان لایه ضعیف می‌باشد و این میان لایه در نزدیکی سطح زمین واقع شده و می‌تواند عامل کنترلی برای سطح لغزش بحرانی باشد با افزایش میزان رطوبت لایه بالایی، پایداری شیب‌ها به شدت کاهش یافته و نصب یک ردیف شمع هرچند باعث افزایش پایداری شیب می‌شود ولی نمی‌تواند مانع گسیختگی و لغزش در پایین دست شمع‌ها شود. در چنین مواقعی لازم است از روش‌های ترکیبی استفاده شده و مانع اشباع لایه‌های بالایی شد و یا با استفاده از چندین ردیف شمع بسته به شرایط، نسبت به پایداری شیب اقدام کرد.

اشباع میان لایه رسی باعث افزایش حجم توده لغزشی در شیب می‌شود برای این حالت مسلح سازی شیب با ردیفی از شمع‌ها، حجم توده لغزشی در بخش بالایی و پائینی شمع‌ها کاهش می‌یابد.

اشباع میان لایه رسی واقع در نزدیکی سطح زمین به علت کاهش پارامترهای مقاومت برشی خاک و افزایش فشار آب حفره‌ای، باعث کاهش قابل توجهی در ضریب اطمینان پایداری شیب می‌شود این امر به ویژه در حالتی که میان لایه ضعیف در نزدیکی سطح زمین باشد عامل کنترل کننده برای سطح لغزش بحرانی بوده و مرز سطح لغزش در این لایه ایجاد می‌شود.

در شیب‌های چند لایه اشباع لایه‌های خاک در زیر سطح لغزش بحرانی تاثیر چندانی در پایداری شیب ندارد. در این حالت تراوش آب در پنجه شیب باعث افزایش ناچیزی در مقادیر جابه‌جایی‌های ایجاد شده در المان‌های خاک نسبت به حالت خشک می‌شود.

برای حالت‌های مختلف اشباع شدگی لایه‌ها که شیب غیر مسلح بدون اعمال سربار و در حالت اولیه ناپایدار است با نصب شمع در شیب و تسلیح آن، به علت مقاومت شمع‌ها در مقابل جابه‌جایی توده لغزشی بالادست شمع‌ها، بخش بالادست شمع‌ها پایدار شده و لغزش در پائین دست شمع‌ها ایجاد می‌شود ولی در شیب‌هایی که در حالت اولیه غیر مسلح پایدار می‌باشند، برای حالت مسلح شده با شمع، هنگام اعمال سربار در تاج شیب به علت اینکه شمع‌ها از انتقال جابه‌جایی‌ها به

- [16] Jiang, M, Zhang, X , Du, W and zhang, A (2018). " DEM analysis of the cemented-soil slope failure caused by surcharge" Geoshanghai International Conference pp, 248-255.
- [17] Sharafi, H and Shams Maleki, Y, (2018). " Studying seismic interaction of piles row-sandy slope under one, two and triaxial loading: a numerical-experimental approach". European Journal of Environmental and Civil Engineering
- [18] Adrian, R.J (1991). "Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics" Annual review of fluidmechanics. 23:261-304.
- [19] White, D.J., Take, W.A. and Bolton, M.D (2003). "Soil deformation measurement using particle imagevelocimetry (PIV) and photogrammetry". Geotechnique 53, No.7: 619-631.
- [20] Hajialilue-Bonab, M, Sojoudi, Y, Puppala, AJ. (2011) " Study of strain wedge parameters for laterally loaded piles" International Journal of Geomechanics 13 (2), 143-152
- [21] Hajialilue-Bonab, M, Azarnya-Shahgoli , H, Sojoudi, Y, (2011). " Soil deformation pattern around laterally loaded piles" International Journal of Physical Modelling in Geotechnics 11 (3), 116-125
- [10] Olivares L., Damiano E., Greco R., Zeni L., Picarelli L., Minardo A., Guida A. and Bernini, R. (2009). "An instrumented flume to investigate the mechanics of rainfall-induced landslides in unsaturated granular soils". Geotechnical Testing Journal ASTM 32 (2), 108–118.
- [11] Kitamura, R., Sako, K., Kato, S., Mizushima, T. and Imanishi, H (2007). "Soil tank test on seepage and failure behaviors of Shirasu slope during rainfall". Japanese Geotechnical Journal, JGS 2 (3), 149–168 in Japanese.
- [12] Kitamura, R. and Sako, K. (2010). "Contribution of "Soils and Foundations" to studies on rainfall-induced slope failure". Soils and Foundations 50 (6), 955–964.
- [13] Yagi, N., Yatabe, R and Enoki, M, (1990). "Prediction of slope failure based on amount of rain fall". Journal of Geotechnical Engineering, JSCE III 13 (418), 65–73 in Japanese.
- [14] Sharafi, H and Sojoudi, Y (2016). "Experimental and numerical study of pile-stabilized slopes under surface load condations". International Journal Of Civil Engineering, 14, pp 221-232
- [15] abdeaziz, A, Hafez D and Hussein A (2017). " The effect of pile parameters on the factor of safety of piled-slopes using 3D numerical analysis". Housing and Building National Research Center Journal, 13, 277-285.

Study Of failure mechanism in Layered Slope Under different Saturated Condatons

Y. Sojoudi¹, H. Sharafi²

1-Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Bonab University, Bonab, Iran

2-Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Abstract

Increasing water in the slope layers induced the failure of slopes. . Water is the most important factor in most of the slope stability analysis. Although water does not directly lead to the slopes displacement, but is an important factor for the following reasons: (1) water increases due to rainfall and snow melt will lead to increasingslope weight. (2) Water can change the angle of slope (angle of slope is an angle that slope is stable in this angle). (3) Water can be absorbed or excreted by minerals are available in the soil. After adding the water, the weight of the rock and soil increases. (4) Water can dissolve the cement between the seeds and cohesion between the seeds is lost. In this paper, the feasibility of using piles to stabilize layered earth slopes were studied. A set of physical modeling of foundations was performed adjacent to layered slopes. The deformation pattern and shear strains of soil near slope and below surcharge load were studied. For this purpose, a comprehensive set of tests and numerical analysis were undertaken on different slope models. In each step of loading, digital image of deformed soil was captured and image processing was applied with GeoPIV software for investigation of soil deformation on slope and below the footing. the effect of pile and saturated conditions effects on improvement ratio (safety factor of stabilized slope with pile / safety factor of the slope stability without piles), bearing capacity of foundations, slope stability and slip surface shape in layered slope were investigated. The results show that the slip surface of layered slopes differs depending strongly on the installed pile positions and layered saturation conditions. In consideration of the model tests and numerical analysis results, it is found that, when clayey layer was near ground surface, changes in clayey layers water content significantly affected on slip surface and layered slope stability. Consideration of slipe surface shape for different layers saturation canditions, it is found, saturation of below layers which is located below the slip surface, has not significant effects on slope stability and slip surface shape. But with increasing upper layers water content, large volume of soil were failed. Experimental and numerical results show, for stable slope before applied surcharge load or before water content increases, critical slipe surface occurred in front the installed pile. But for unstable slope, critical slip surface positions depend on layers saturation and soil properties and occurred in front or behind or in upper and lower part of pile. In general The critical slip surface location dependent on water table level conditions and location of pile. Also from the experimental and numerical results it is found, the optimum location of pile for increasing bearing capacity of foundation which is located on slope crest, is near slope crest and maximum magnitude of Bearing capacity ratio ((bearing capacity of reinforced slope/ bearing capacity of non- reinforced slope)(BCR)) was obtained when piles installed near slope crest. Also optimum location of pile for increasing slope stability are found near mid of slope. A close agreement between the experimental and numerical results in Failure mechanism and the critical values of the studied parameters is observed.

Keywords: Layered slope, Pile, improvement ratio, PIV method, Physical Modeling.

