

مطالعه رفتار خاک در شیب‌های خاکی چندلایه و همگن غیرمسلح و مسلح شده با شمع

حسن شرفی*^۱ و یونس سجودی^۲

^۱ استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

^۲ استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بناب

(دریافت: ۹۶/۵/۱۵، پذیرش: ۹۷/۴/۲۴، نشر آنلاین: ۹۷/۴/۲۴)

چکیده

در تحقیق حاضر مکانیسم گسیختگی و تغییر شکل‌های ایجاد شده در خاک و تأثیر مسلح‌سازی شیب با ردیفی از شمع‌ها بر این فرایند در زیر پی نواری و شیب به کمک روش تصویری PIV و مطالعات عددی بررسی شده است. در مدل‌سازی‌های فیزیکی در هر مرحله از بارگذاری پی نواری مستقر بر شیب، از توده تغییر شکل یافته خاک عکس‌برداری شده و تصاویر مورد پردازش قرار گرفته‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که وجود لایه نازکی از خاک ضعیف، تأثیر عمده‌ای در سازوکار گسیختگی و پایداری شیب‌ها دارد. بر اساس مطالعات انجام یافته مشاهده گردید در شیب‌های همگن و چند لایه، موقعیت بهینه قرارگیری شمع‌ها برای افزایش ضریب اطمینان پایداری در وسط شیب است. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهند موقعیت بهینه نصب شمع برای افزایش پایداری شیب متفاوت از موقعیت بهینه آن برای افزایش ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر تاج شیب است و در شیب‌هایی که در حالت اولیه بدون اعمال سربار ضریب اطمینان پایداری آن‌ها بیشتر از یک است بیشترین مقدار نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای پی‌های مستقر در تاج شیب، برای شیب‌های همگن هنگامی به دست می‌آید که شمع‌ها بین وسط و تاج شیب نصب گردند. ولی موقعیت بهینه نصب شمع برای شیب‌های چند لایه با میان لایه ضعیف شیب‌دار، در نزدیکی تاج شیب است.

کلیدواژه‌ها: شیب، شمع، ضریب بهسازی، روش PIV، مدل‌سازی فیزیکی.

۱- مقدمه

گرفته و موارد متعددی از خسارت‌های ناشی از این پدیده در کشور گزارش شده است. بسیاری از مسیرهای ترابری کشور در معرض خطر رانش قرار دارد، همچنین بسیاری از روستاهای ایران در بسیاری از استان‌ها از جمله استان‌های گیلان، لرستان، چهارمحال بختیاری و ... روی شیب‌های ناپایدار یا مستعد زمین لغزش قرار گرفته‌اند و در بسیاری از شهرها در مسئله توسعه شهری موضوع پایداری شیروانی‌ها از جمله موارد محدود کننده گسترش شهرهای بزرگ به شمار می‌آید. با توجه به تأثیرات نامطلوب وقوع زمین-لغزش‌ها، بررسی پتانسیل وقوع و مکانیزم گسیختگی آن‌ها ضروری است. گسیختگی شیروانی‌ها ممکن است در شرایط طبیعی و تحت اثر وزن توده ناپایدار یا در اثر عواملی نظیر نیروهای دینامیکی، باران‌های شدید و طولانی که با نفوذ در خاک باعث کاهش مقاومت برشی خاک می‌گردد و یا جریان سیلاب در پای شیب به وقوع بپیوندد. همچنین در شرایط طبیعی وجود عوامل دیگری از قبیل فرسایش بخش‌هایی از شیروانی در اثر جریان آب و یا باد، بالا آمدن تدریجی سطح آب زیرزمینی و یا بارگذاری و باربرداری بر روی

وقوع لغزش و ناپایداری در شیروانی‌های طبیعی و مصنوعی، از جمله پدیده‌هایی است که در بسیاری از نقاط جهان اتفاق می‌افتد. جابه‌جایی و لغزش توده زمین، اعم از خاک و سنگ، اثرات مخرب فراوانی بر راه‌های ارتباطی و تونل‌ها، خطوط آب و فاضلاب و حتی ساختمان‌ها و تأسیسات زیربنایی می‌گذارد. وقوع ناپایداری‌ها و زمین‌لغزش‌ها در نقاط مختلف دنیا سالانه موجب بروز تلفات جانی و مالی زیادی می‌گردد، به طوری که بر اساس تحقیقات انجام یافته، خسارت ناشی از وقوع ناپایداری و گسیختگی شیروانی‌ها در نواحی مختلف دنیا هرساله به بیش از ۱۰ میلیارد دلار خسارت مالی و هزاران کشته در سال می‌رسد (Earl و Brabb، ۱۹۹۱). جابه‌جایی و لغزش توده زمین، اعم از خاک و سنگ، اثرات مخرب فراوانی بر راه‌های ارتباطی، تونل‌ها، خطوط آب و فاضلاب و ساختمان‌ها و ... می‌گذارد (Spiker و Geori، ۲۰۰۳). کشور ایران نیز با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی و زمین ریخت‌شناسی و اقلیمی، همواره تحت تأثیر این پدیده قرار

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۸۱۳۲۱۲۹۲

آدرس ایمیل: h_sharafi@razi.ac.ir (ح. شرفی)، sojodi@tabrizu.ac.ir (ی. سجودی).

شیروانی، می‌تواند ناپایداری شیب‌ها را تشدید کند. موارد زیادی وجود دارند که پی‌های سطحی برخی از سازه‌ها در سطح شیب‌ها و نزدیک تاج شیب قرار می‌گیرند در چنین مواردی علاوه بر این که ظرفیت باربری پی به‌صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد، بسته به موقعیت قرارگیری پی پتانسیل گسیختگی شیب نیز افزایش می‌یابد بنابراین پایداری شیب‌ها یکی از زمینه‌های مورد علاقه محققان جهت مطالعه است (Sawwaf, 2010). با توجه به خسارات ناشی از رخداد زمین‌لغزش و ناپایداری شیروانی‌ها و با مدنظر قرار دادن اجتناب از خطر ناپایداری‌ها، ارائه روش‌های بهینه کنترل این پدیده بایستی مورد توجه قرار گیرد. با در نظر گرفتن خسارات زیاد ناشی از لغزش شیروانی‌های خاکی، تأمین پایداری شیروانی‌های خاکی طبیعی و مصنوعی یکی از مسائل اساسی در مهندسی ژئوتکنیک است. استفاده از شمع‌ها یکی از روش‌های نوین پایداری است که در سال‌های اخیر مطالعات موفقی در این زمینه انجام شده است (Ito و همکاران، 1982؛ Ausilio و همکاران، 2001؛ Chow، 1996؛ Kourkoulis و همکاران، 2012؛ Poulos، 1995؛ Hassiotis و همکاران، 1997؛ Cai و Ugai، 2002؛ Ito و Matsui، 1975؛ Jeong و همکاران، 2003؛ Kourkoulis و Gelagoti، 2011؛ Xipno و Xiangjun، 2012).

شمع‌ها به طور گسترده‌ای جهت کنترل زمین‌لغزش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روش، توده خاک بین شمع‌ها را می‌توان بر اساس پدیده قوس‌زدگی پایدار نمود (Dawson و همکاران، 1999). این شمع‌ها نیروهای برشی و حجمی توده خاک لغزشی را به لایه‌های پایدار زیرین انتقال می‌دهند که براساس پدیده قوس‌زدگی خاک در بین شمع‌ها ایجاد می‌گردد. نخستین کار در مطالعه شیب‌ها تعیین ضریب اطمینان پایداری است تا بتوان بر اساس آن از گسیختگی شیب‌ها جلوگیری کرد. برای این منظور استفاده از روش تعادل حدی یکی از روش‌های معمول است که به‌طور وسیعی استفاده می‌گردد. اخیراً با افزایش قدرت پردازش کامپیوترها، استفاده از روش‌های المان محدود و تفاضل محدود نیز افزایش یافته است. در این روش‌ها با استفاده از روش کاهش مقاومت (SRM)^۱ ضریب اطمینان پایداری شیب محاسبه می‌گردد. این روش‌ها نسبت به روش تعادل حدی دارای امتیازات متعددی از قبیل امکان محاسبه توزیع تنش و تغییر شکل در توده خاک و المان‌های پایدارکننده هستند و می‌توان براساس آن‌ها سازوکار گسیختگی را مورد مطالعه قرار داد (Ardalan و Ashour، 2012؛ Cheng، 2007).

استفاده از شمع‌ها جهت پایداری زمین‌لغزش‌های فعال یکی از روش‌های مهم است و در سال‌های اخیر به‌طور موفقیت‌آمیزی جهت بهسازی شیب‌ها استفاده شده و روش‌های

متعددی برای تحلیل پایداری شیب‌های مسلح شده با شمع گسترش یافته است. پارامترهای زیادی در افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب‌های پایدار شده با شمع تأثیرگذار می‌باشند. برخی از پارامترهای مذکور شامل هندسه شیب، مشخصات مصالح شمع و مشخصات خاک، موقعیت شمع در شیب و فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها است (Ashour و همکاران، 2004). شمع‌های استفاده شده برای بهسازی شیب‌ها معمولاً تحت تأثیر نیروهای جانبی ناشی از حرکت افقی خاک‌های اطراف قرار دارند و بنابراین آن‌ها را شمع‌های مقاوم می‌گویند. در واقع شمع‌ریزی در داخل شیروانی‌ها، یکی از کارآمدترین راهکارها برای پایداری آن‌ها در برابر وقوع گسیختگی‌های انتقالی یا صفحه‌ای در امتداد سطوح لغزش است. در این حالت برای تأمین پایداری کلی شیروانی به همراه شمع‌های داخل شیب، بایستی پایداری شمع و شیروانی به‌طور جداگانه ارضا شود. در شیب‌هایی که مستعد لغزش هستند اجرای شمع میزان جابه‌جایی محتمل آن‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش داده و از وقوع گسیختگی در شیب جلوگیری می‌کند. در این حالت، در واقع شمع‌ها به‌عنوان یکی از المان‌های مقاوم در برابر جابه‌جایی توده خاک مستعد گسیختگی عمل نموده و نیروهای ناشی از توده ناپایدار بالایی را به لایه‌های پایدار زیرین منتقل می‌کند. در واقع، میزان انتقال بار از توده خاک مستعد لغزش شیروانی به شمع‌ها، به اندازه و نرخ جابه‌جایی آن وابسته است. استفاده از روش تصویری PIV^۲ به عنوان روشی کارآمد در مدل‌سازی‌های ژئوتکنیکی در سال‌های اخیر توسط محققان مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Hajjalilue-Bonab و همکاران، 2011) با استفاده از روش تصویری PIV تغییر شکل‌های ایجاد شده در اطراف شمع‌های تحت بار جانبی را مورد مطالعه قرار داده و معادلاتی را گوه‌های کرنش تشکیل شده در جلوی شمع‌ها ارائه دادند. (Sharafi و Sojoudi، 2016) تغییر شکل‌های ایجاد شده در شیب‌های همگن مسلح شده با شمع‌ها را مورد مطالعه قرار دادند و بهینه موقعیت نصب شمع برای افزایش پایداری شیب را بین تاج و وسط شیب به‌دست آوردند. در این مقاله تأثیر استفاده از شمع در پایداری شیب و تغییر شکل‌های ایجاد شده در شیب‌های غیرمسلح و مسلح شده با شمع به کمک روش تصویری PIV و عددی بررسی شده است. همچنین تأثیر موقعیت‌های مختلف نصب ردیفی از شمع‌ها در مقادیر تغییر شکل و ظرفیت باربری شیب‌های مسلح بررسی شده و بهینه موقعیت برای نصب شمع جهت کاهش تغییر شکل‌ها در شیب و نشست پی‌های مستقر بر شیب‌های همگن و چند لایه بررسی شده است. با توجه به این که جهت اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها از روش تصویری PIV استفاده

مورد استفاده در مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی، ماسه بد دانه-بندی شده است. نمودار مربوط به منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در شکل (۲) ارائه شده است. یکی از نکات قابل توجه در ساخت مدل‌های فیزیکی، نحوه 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 پایین از ماسه بد دانه‌بندی شده با وزن مخصوص $\gamma_d=18.2 \text{ KN/m}^3$ استفاده گردید برای ساخت این لایه ابتدا ماسه از ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری در ضخامت‌های ۵ سانتی‌متری ریخته شده و سپس با استفاده از یک چکش و صفحه فلزی و تعداد ضربات ۵ ضربه متراکم گردید و سپس به همین صورت لایه‌های بعدی تا رسیدن به تراز موردنظر ریخته شده و عملیات تراکم تکرار می‌شد. 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 گردید. در بخش بالایی نیز از ماسه بد دانه-بندی شده با وزن مخصوص $\gamma_d=14.9 \text{ KN/m}^3$ استفاده گردید. این لایه نیز به روش پاشش خشک بدون انجام تراکم ساخته شد. برای کنترل یکنواختی تراکم هر یک از لایه‌ها مرز لایه‌ها روی طلق شفاف مشخص شده و حجم مشخصی از خاک در آن تراکم شده است. بعد از ریختن لایه‌های خاک در ظرف آزمایش، شیب موردنظر به ارتفاع ۴۴ و طول ۷۱/۵ سانتی‌متر با ضریب اطمینان ۱/۰۶ برای شیب چند لایه و ضریب اطمینان ۱/۱۲ برای شیب همگن به روش خاک‌برداری ایجاد گردید. جهت مسلح‌سازی شیب از شمع‌های فولادی به پهنای ۴ سانتی‌متر استفاده گردید که به صورت کوبشی در محل‌های موردنظر نصب شدند. همچنین جهت ساخت شیب همگن نیز از ماسه بد دانه‌بندی شده با وزن مخصوص، حدود $\gamma_d=14.9 \text{ KN/m}^3$ استفاده گردید. مشخصات خاک در لایه‌های مختلف شیب چندلایه و شیب همگن در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات لایه‌های خاک در مدل‌های آزمایشگاهی

لایه	پارامترهای خاک		
	ϕ (درجه)	E (kPa)	γ_d (kN/m ³)
ماسه شل (لایه بالایی و شیب همگن)	۲۸	۲۰۰۰۰	۱۴/۹
رس (لایه میانی)	۸	۱۰۰۰۰	۱۰/۲
ماسه متراکم (لایه پایینی)	۴۱	۴۰۰۰۰	۱۸/۲

شده است برای آشنایی به طور خلاصه فرآیند کار روش PIV معرفی و ارائه می‌گردد.

۲- تئوری روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات PIV در مدل-سازی‌های ژئوتکنیک

یکی از روش‌هایی که امکان اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها را بدون نیاز به ابزارآلات مکانیکی گران‌قیمت فراهم نموده است استفاده از روش تصویر مینا است. PIV در واقع یک روش سرعت‌سنجی است که در ابتدا در رشته مکانیک سیالات و برای اندازه‌گیری سرعت میدان جریان دو و سه بعدی به‌کار برده شد (Adrian, ۱۹۹۱). 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 (White, ۲۰۰۳). پردازش عکس‌ها به‌وسیله نرم‌افزارهای matPIV و geoPIV که تحت برنامه Matlab نوشته شده است انجام می‌گیرد. جهت پردازش، اولین تصویر به قطعات کوچک تقسیم می‌شود (مش‌بندی می‌شود) و مختصات هر یک از قطعات تعیین می‌گردد (v_1, u_1). برای تعیین مختصات جدید این پچ^۳ در تصویر 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 می‌گردد. جایی که بیشترین همبستگی وجود دارد وضعیت تغییر یافته پچ کوچک را نشان می‌دهد و مختصات آن پچ (v_2, u_2) در تصویر دوم به‌دست می‌آید. 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 می‌گردد. خروجی این نرم‌افزارها به صورت ماتریس دو بعدی (u, v) است که اولی نشان‌دهنده مؤلفه افقی و دومی نشان‌دهنده مؤلفه قائم بردار جابه‌جایی هر پچ است. با استفاده از ماتریس دو بعدی به‌دست 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 گردید. ظرف فلزی در کناره‌ها با استفاده از آلومان‌هایی تقویت گردید تا صلبیت آن تا حد امکان افزایش یابد. جهت مشاهده تغییر شکل خاک در شیب و زیر پی، در جلوی ظرف از یک طلق شفاف به ضخامت ۲ سانتی‌متر استفاده گردید. نمای کلی ظرف آزمایش و سیستم بارگذاری در شکل (۱) نشان داده شده است. خاک

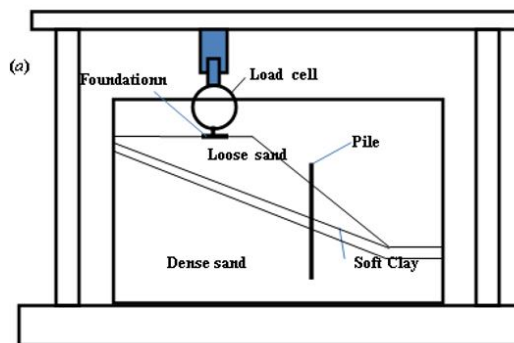
جدول ۲- مشخصات آزمایش‌های آزمایشگاهی

پارامترهای متغیر	پارامترهای ثابت	نوع شیب
$L_x/L = [0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0]$	$(S/D=2.5), (b/B=2)$	شیب چندلایه مسلح
-	$b/B=2$	شیب چندلایه غیرمسلح
$L_x/L = [0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0]$	$(S/D=2.5), (b/B=2)$	شیب همگن مسلح
-	$b/B=2$	شیب همگن غیرمسلح

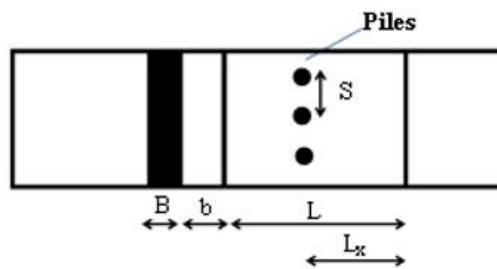
نیروی اعمال شده بر پی با استفاده از نیروسنج به ظرفیت ۵ کیلونیوتن اندازه‌گیری گردید. مشخصات آزمایش‌های انجام شده که شامل ۱۲ مورد آزمایش است در جدول (۲) آورده شده است. جهت اندازه‌گیری تغییر شکل‌های ایجاد شده در خاک، در هر یک از مراحل بارگذاری از خاک در حال تغییر شکل با استفاده از دوربین نصب شده در جلوی مدل عکس گرفته می‌شد و در هر یک از مدل‌های آزمایشگاهی مقادیر جابه‌جایی‌های ایجاد شده در خاک با تحلیل عکس‌ها با استفاده از نرم‌افزار GeoPiv مشخص گردید.

۴- نتایج آزمایش‌ها

در طول آزمایش از توده خاک در حال تغییر شکل در هر مرحله از بارگذاری با استفاده از دوربین دیجیتال با وضوح تصویری ۱۲ مگاپیکسل عکس‌برداری و در حافظه داخلی ذخیره شد و بعد از اتمام آزمایش‌ها، عکس‌های گرفته شده با استفاده از نرم‌افزار GeoPiv8 مورد پردازش تصویری قرار گرفتند. در این تحقیق با مش بندی عکس‌های گرفته شده در اندازه ۳۲×۳۲ پیکسل بافت تصویری مناسبی جهت تحلیل‌ها ایجاد شده و جابه‌جایی‌ها در توده خاک در حال تغییر شکل به دست آمد. چند نمونه از نتایج حاصل از پردازش تصویری عکس‌ها در ادامه ارائه گردیده است. در این شکل‌ها، نمودارهای سمت راست، بردارهای جابه‌جایی المان‌های خاک و نمودارهای سمت چپ، کرنش‌های برشی ایجاد شده در اثر اعمال سربار در تاج شیب در شرایط و موقعیت‌های مختلف را نشان می‌دهند. با مقایسه نمودارهای به دست آمده تفاوت کلی سازوکار رفتاری در شیب‌های مسلح و غیرمسلح کاملاً بارز است. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد در شیب‌های همگن که لایه خاک در حالت سست است، المان‌های خاک تمایل به تراکم در زیر پی در اثر بارگذاری دارند و جهت بردارهای تغییر مکان در زیر پی، به سمت پائین و طرفین متمایل است. در این شیب‌ها، در حالت مسلح نشده با شمع، پی قبل از تشکیل گوه گسیختگی دچار نشست قابل توجهی شده است و آثار این نشست تا اعماق حدود ۱/۵ برابر پهنای پی نواری ($Z/B=1.5$) ادامه دارد.



(الف)

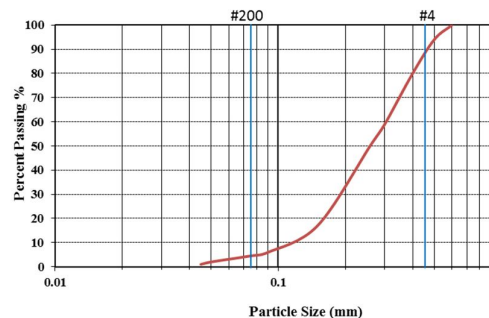


(ب)



(ج)

شکل ۱- مدل آزمایشگاهی: الف) پیکربندی مدل آزمایشگاهی، ب) پلان مدل و پارامترهای استفاده شده، ج) مدل واقعی

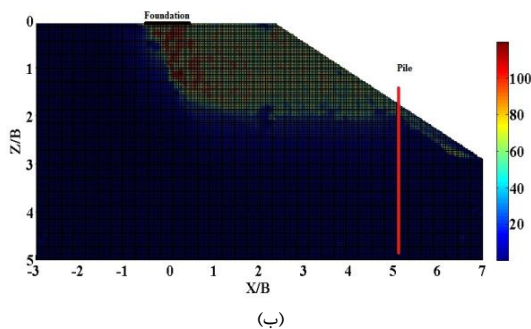
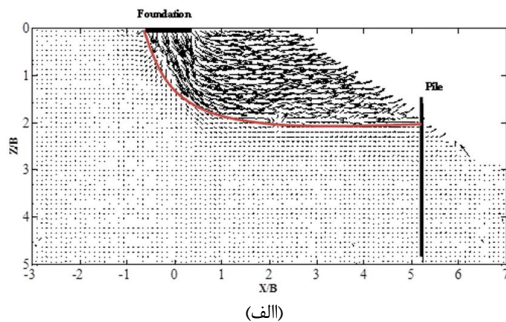


شکل ۲- منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده

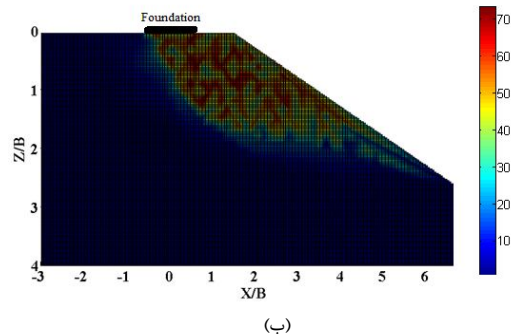
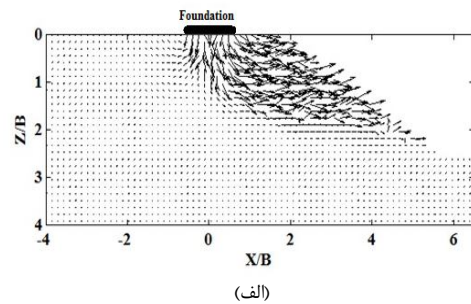
در هر یک از آزمایش‌ها، بعد از ساخت مدل شیب، پی نواری به طول ۳۹/۵ و عرض ۸ سانتی‌متر در تاج شیب در موقعیت خود قرار داده شده و سربار موردنیاز جهت ایجاد گسیختگی در خاک، به صورت افزایشی و در گام‌های مختلف بر آن اعمال گردید.

پهنای بی ($Z/B=2$) افزایش یافته است و این امر ناشی از افزایش تنش جانبی روی گوه گسیختگی در طرف نزدیک به شیب به علت نصب شمع در روی شیب و افزایش پایداری آن است.

بردارهای جابه‌جایی و کرنش برشی در شیب‌های چند لایه که لایه نازکی از خاک ضعیف (لایه رسی) در آن به صورت شیب‌دار است در شکل (۵) و (۶) آورده شده است. در این مدل‌ها لایه‌های پایینی ماسه متراکم هست و در بالای آن لایه نازکی از خاک رسی به ضخامت ۵ سانتی‌متر مدل‌سازی شده است در بالای خاک رسی نیز ماسه شل با مشخصات ماسه مورد استفاده در شیب همگن قرار دارد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد در شرایط نهایی اعمال سربار، گوه گسیختگی در زیر پی در لایه متراکم گسترش نیافته است و در حالت شیب غیرمسلح، گوه گسیختگی از کناره پی شروع و تا پای شیب ادامه دارد. در این شیب‌ها و در شرایطی که ضخامت لایه سست کم است سطح گسیختگی در داخل لایه ضعیف اتفاق می‌افتد. کرنش‌های برشی ایجاد شده در شیب نیز به‌وضوح این سازوکار گسیختگی را نشان می‌دهد شکل (۵-ب). با مسلح‌سازی این شیب‌ها با ردیفی شامل پنج شمع، مشاهده گردید که مشابه شیب‌های همگن مسلح شده با شمع، گوه گسیختگی در بالای شیب و بین شمع و سربار اعمالی اتفاق می‌افتد. این امر به‌وضوح در شکل (۶-الف) و (۶-ب) نشان داده شده است. در این حالت نیز مشابه شیب غیرمسلح، سطح گسیختگی در لایه رسی و بین لایه شل و متراکم ایجاد می‌گردد.



شکل ۴- الف) بردارهای جابه‌جایی المان‌های خاک در شیب‌های همگن مسلح ($L_x/L=0.25$)، ب) کرنش‌های برشی در اثر اعمال سربار در این شرایط ($L_x/L=0.25$)



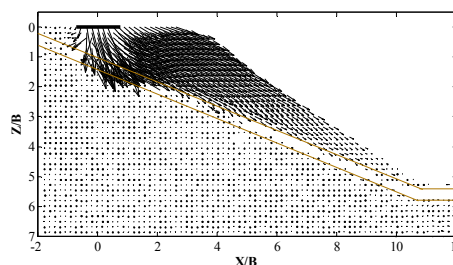
شکل ۳- الف) بردارهای جابه‌جایی المان‌های خاک در اثر اعمال سربار در شیب‌های همگن غیرمسلح، ب) کرنش‌های برشی در اثر اعمال سربار در این شرایط

در ضمن گوه گسیختگی در زیر پی در این حالت به صورت یک‌طرفه است و این مسئله ناشی از چرخش پی نواری در وضعیت نهایی است. از دلایل محتمل این مسئله می‌توان به پائین بودن تنش‌های افقی ناشی از خاک در طرف نزدیک به شیب روی گوه تشکیل شده در زیر پی و دوران پی نواری در شرایط نهایی نزدیک به گسیختگی در شیب اشاره نمود. بنابراین نحوه گسیختگی خاک در زیر پی نواری، به‌شدت به سربار ناشی از خاک و تنش‌های جانبی وارد بر گوه گسیختگی زیر پی در طرفین گوه گسیختگی حساس بوده و کاهش سربار و به‌تبع آن تنش جانبی در یکی از طرفین باعث می‌گردد سازوکار گسیختگی از دو طرف به یک طرف تغییر پیدا کند. گوه گسیختگی ایجاد شده در نمودار کرنش برشی مربوط به همین وضعیت نیز به‌وضوح در شکل (۳-ب) قابل مشاهده می‌شود. بررسی بردارهای جابه‌جایی خاک در شیب‌های همگن غیرمسلح نشان می‌دهد که گوه گسیختگی در این شیب‌ها از کناره پی نواری شروع و تا پای شیب ادامه دارد، ولی در شیب‌های مسلح شده گوه گسیختگی ایجاد شده در شیب از کناره پی شروع و تا بالای شمع ادامه دارد. این امر نشان می‌دهد در شیب‌هایی که تحت تأثیر سربار ناشی از پی نواری در تاج شیب قرار دارند، بخش بالایی شیب بین شمع و پی نواری از نظر پایداری بحرانی است. گوه گسیختگی شیب‌های همگن مسلح شده با شمع در شکل (۴) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در این حالت گسترش کرنش در زیر پی نواری تا اعماق حدود دو برابر

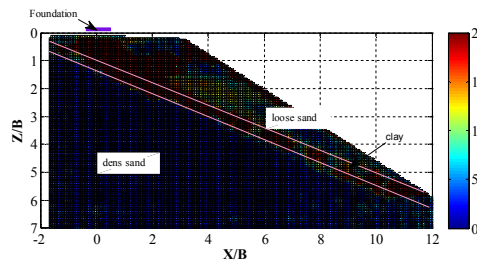
نسبت به حالت غیرمسلح کمتر است. این امر ناشی از افزایش تنش جانبی روی گوه گسیختگی زیر پی در شیب‌های مسلح است.

۵- مدل‌سازی عددی

برای بررسی درستی نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی، تمامی مدل‌های آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D، با مقیاس برابر ۰/۱ تحلیل شدند. جهت انجام تحلیل‌ها برای خاک از مدل موهر-کولمب استفاده شد مشخصات مکانیکی لایه‌های خاک در مدل‌سازی‌های عددی پیشتر در جدول (۱) داده شده است. همچنین شمع‌های مورد استفاده برای مسلح‌سازی شیب به صورت المان‌های الاستیک مدل‌سازی شدند. ضریب ارتجاعی و نسبت پواسون شمع‌ها در تحلیل‌های عددی به ترتیب برابر ۲/۱ گیگا پاسکال و ۰/۲ در نظر گرفته شدند. در کلیه تحلیل‌های عددی تعداد ۹۹۹۰ منطقه و ۱۱۷۰۴ گره در شبکه تفاضل محدود ایجاد گردید. شرایط مرزی در کف به صورت مفصلی و در کناره‌ها به صورت غلتکی در نظر گرفته شدند. جهت مدل‌سازی اندرکنش بین شمع و خاک، از المان‌های فصل مشترک استفاده شد.

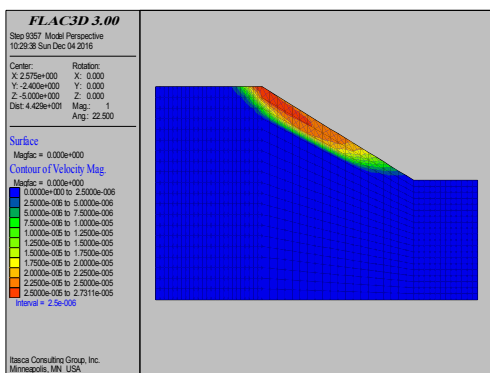


(الف)

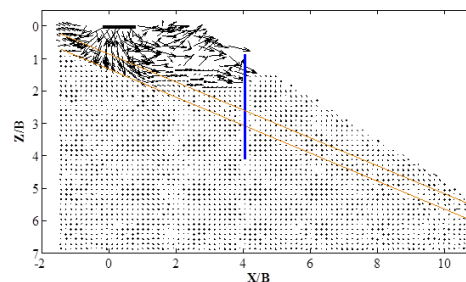


(ب)

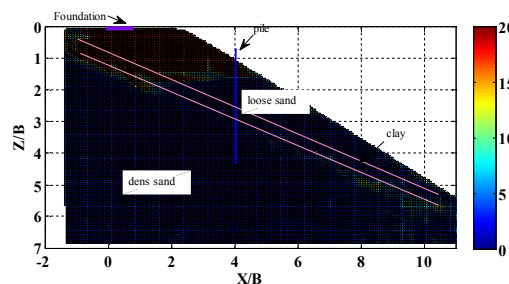
شکل ۵- بردارهای جابه‌جایی المان‌های خاک در شیب‌های چندلایه غیرمسلح، (ب) کرنش‌های برشی در اثر اعمال سربار در این شرایط



(الف)

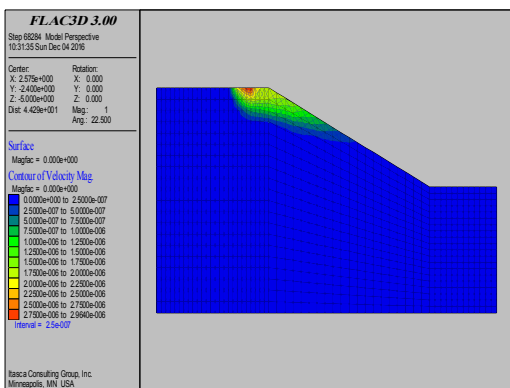


(الف)



(ب)

شکل ۶- بردارهای جابه‌جایی المان‌های خاک در شیب‌های چندلایه مسلح ($L_x/L=0.75$)، (ب) کرنش‌های برشی در اثر اعمال سربار در شیب‌های چندلایه مسلح ($L_x/L=0.75$)



(ب)

شکل ۷- (الف) سطح لغزش بحرانی برای شیب همگن غیرمسلح، (ب) سطح لغزش بحرانی برای شیب همگن مسلح شده با شمع ($L_x/L=0.5$)

مقایسه بردارهای جابه‌جایی المان‌های خاک در حالت مسلح و غیرمسلح برای هر دو شیب همگن و چند لایه نشان می‌دهد که زاویه بردارهای جابه‌جایی خاک در زیر پی در حالت مسلح نسبت به امتداد افق بیشتر از حالت غیرمسلح است. همچنین دوران پی

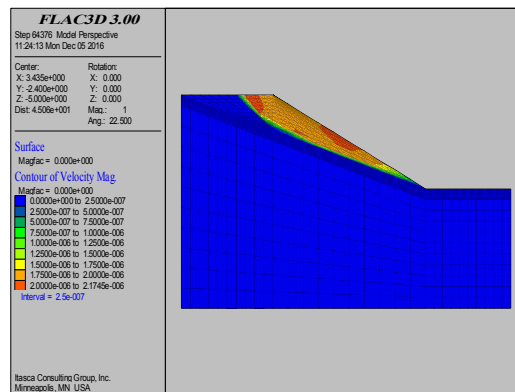
مشاهده می‌گردد مشابه مدل‌های آزمایشگاهی، با مسلح‌سازی شیب سطح لغزش بحرانی در قسمت بالای شیب اتفاق می‌افتد، با توجه به این‌که شیب‌ها در حالت اولیه و بدون اعمال سربار در تاج شیب پایدار بوده و دارای ضریب اطمینان بیشتر از یک هستند، بعد از اعمال سربار، گسیختگی بین شمع و تاج شیب اتفاق می‌افتد و این قسمت شیب از نظر گسیختگی بحرانی است که این امر در نتایج مدل‌های آزمایشگاهی و تحلیلی نشان داده شده است. همچنین مسلح‌سازی شیب همگن، باعث افزایش عمق سطح لغزش بحرانی، بین تاج و شمع می‌گردد، ولی در شیب چند لایه با توجه به این‌که لایه‌های پایینی ماسه متراکم است سطح لغزش بحرانی در لایه رسی ایجاد می‌گردد.

۶- تأثیر موقعیت شمع در پایداری و ظرفیت باربری پی‌های

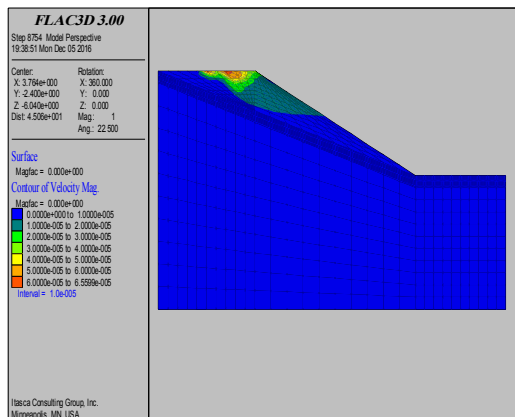
مستقر بر شیب

در شیب‌های مسلح شده با شمع، موقعیت نصب شمع اهمیت بسزایی دارد و تأثیر آن توسط محققان مختلفی بررسی شده است. بر اساس مطالعات Cai و Ugai (۲۰۰۰) ضریب اطمینان پایداری حداکثر در شیب‌های مسلح هنگامی است که شمع‌ها در وسط شیب نصب شوند. به منظور مطالعه موقعیت بهینه نصب شمع در شیب‌ها از نظر ضریب اطمینان پایداری و ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر شیب مدل آزمایشگاهی بدون شمع و تعداد پنج مدل آزمایشگاهی با موقعیت‌های مختلف نصب شمع ($Lx/L=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$) در دو حالت شیب‌های همگن و چند لایه مورد بررسی قرار گرفت. در همه مدل‌ها فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها برابر $2/5$ و فاصله اعمال سربار از تاج شیب برابر ۲ در نظر گرفته شده است ($b/B=2$). همچنین جهت مطالعه تأثیر موقعیت نصب شمع در ضریب اطمینان پایداری، مدل‌های آزمایشگاهی مذکور با مقیاس ده برابر و با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D تحلیل شده است. نتایج به دست آمده از تأثیر موقعیت نصب شمع در نسبت ظرفیت باربری (BCR)^۴ (نسبت ظرفیت باربری شیب مسلح به ظرفیت باربری شیب غیرمسلح) در شکل (۹) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد در شیب‌های چندلایه که در حالت اولیه بدون اعمال سربار پایدار می‌باشند با نزدیک شدن موقعیت نصب شمع به تاج شیب مقدار نسبت ظرفیت باربری (BCR) افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. این امر به دلیل محدود کردن جابه‌جایی افقی المان‌های خاک در روی شیب و افزایش تنش‌های افقی روی گوه گسیختگی زیر پی ایجاد می‌گردد. در این شیب‌ها، نصب شمع باعث محدود کردن لغزش لایه بالایی بر روی لایه رسی و افزایش تنش‌های افقی محدود کننده در بالادست شیب بین محل نصب شمع و محل اعمال سربار می‌گردد.

این المان‌ها به وسیله سختی نرمال kn ، سختی برشی ks ، چسبندگی و زاویه اصطکاک فصل مشترک شمع بر اساس معیار موهر-کولمب تعریف شده‌اند. برای این منظور مقادیر سختی برشی و نرمال برابر 130 GPa/m و زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی فصل مشترک برابر $0/6$ زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی لایه‌های خاک در نظر گرفته شدند کلیه مدل‌های آزمایشگاهی با مقیاس ده برابر مدل‌سازی شدند. سطح لغزش بحرانی به دست آمده از نتایج تحلیل عددی برای شیب‌های همگن غیرمسلح و مسلح شده با شمع ($Lx/L=0.5$)، به ترتیب در شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) و برای شیب چندلایه با میان لایه ضعیف در حالت غیرمسلح و مسلح شده با شمع ($Lx/L=0.5$)، به ترتیب در شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) آورده شده است.

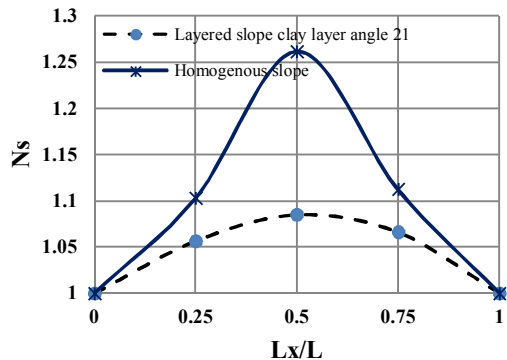


(الف)



(ب)

شکل ۸- الف) سطح لغزش بحرانی برای شیب چندلایه غیرمسلح، ب) سطح لغزش بحرانی برای شیب چند لایه مسلح شده با شمع ($Lx/L=0.5$)



شکل ۱۰- تأثیر موقعیت نصب شمع در نسبت بهسازی ضریب اطمینان پایداری (نتایج مدل سازی عددی)

۷- بحث و نتیجه گیری

مدل های آزمایشگاهی مختلفی از شیب های هموزن^۶ و چند لایه جهت بررسی تأثیر مسلح سازی شیب در رفتار خاک زیر پی و مکانیزم گسیختگی شیب مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج کلی به دست آمده به طور خلاصه به صورت زیر می باشد:

۱- پایداری سازی شیب با ردیفی از شمع ها در شیب های هموزن باعث افزایش عمق تأثیر پی از ۱/۵ برابر عرض پی تا حدود ۲ برابر عرض پی می گردد.

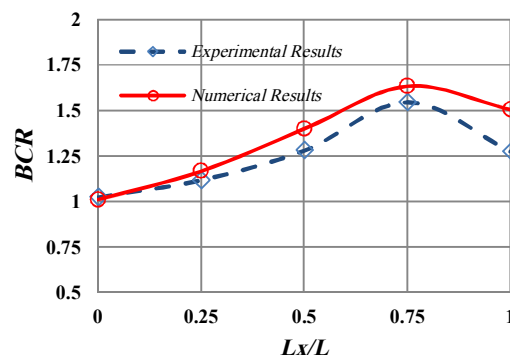
۲- در شیب های غیر هموزن که ضخامت لایه سست در زیر پی کم می باشد سطح گسیختگی بحرانی در داخل لایه ضعیف و بین لایه سست و متراکم قرار می گیرد و سطح گسیختگی در داخل لایه متراکم گسترش نمی یابد.

۳- در شیب های هموزن و غیر هموزن که با شمع پایداری سازی شده اند سطح گسیختگی بحرانی بین شمع و پی واقع شده و دوران پی در حالت نهایی نسبت به شیب های بدون شمع کمتر می باشد.

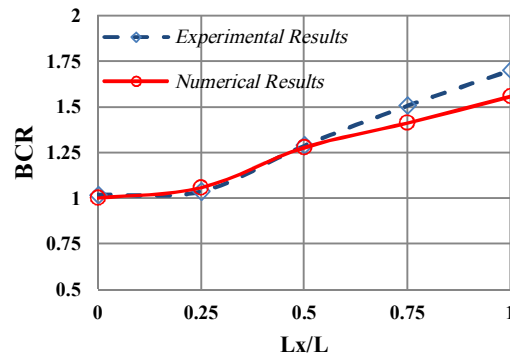
۴- در شیب های همگن و چند لایه بدون سربار که لایه های خاک نسبت به امتداد افق شیب دار می باشند بهینه موقعیت قرارگیری شمع برای افزایش پایداری شیب در وسط شیب قرار می گیرد.

۵- در شیب های چند لایه که در حالت اولیه بدون اعمال سربار پایدار می باشند ماکزیم مقدار برای نسبت ظرفیت باربری پی (BCR) هنگامی به دست می آید که شمع ها در نزدیکی تاج شیب نصب شوند ولی بهینه موقعیت قرارگیری شمع برای افزایش ظرفیت باربری پی های مستقر بر شیب همگن بین وسط و تاج شیب قرار دارد.

برای شیب های همگن نیز حداکثر ظرفیت باربری برای پی های مستقر بر شیب هنگامی به دست می آید که شمع ها در نزدیکی تاج شیب نصب گردد. مقایسه نتایج نشان می دهند نتایج آزمایشگاهی انطباق نسبتاً خوبی با نتایج تحلیل عددی دارند. با توجه به این که امکان به دست آوردن ضریب اطمینان پایداری با استفاده از مدل های آزمایشگاهی وجود ندارد به منظور بررسی تأثیر موقعیت نصب شمع در ضریب بهسازی (Ns)^۵ (نسبت ضریب اطمینان در حالت مسلح به ضریب اطمینان در حالت غیر مسلح)، در شیب های چند لایه و همگن، مدل های آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزار FLAC3D تحلیل شدند. نتایج به دست آمده از تحلیل مدل های آزمایشگاهی در شکل (۱۰) آورده شده است. همان گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می گردد بهینه موقعیت برای نصب شمع جهت افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب های همگن و شیب های چند لایه با میان لایه خاک ضعیف در وسط شیب به دست آمده است.



(الف)



(ب)

شکل ۹- الف) تغییرات نسبت ظرفیت باربری (BCR) پی های مستقر بر شیب همگن نسبت به موقعیت نصب شمع، ب) تغییرات نسبت ظرفیت باربری (BCR) پی های مستقر بر شیب چند لایه با میان لایه ضعیف نسبت به موقعیت نصب شمع

- Sawwaf M, El "Experimental and numerical study of strip footing supported on stabilized sand slope", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2010, 28, 311-323.
- Sharafi H, Sojoudi Y, "Experimental and numerical study of pile-stabilized slopes under surface load condations", *International Journal of Civil Engineering*, 2016, 14 (4), 221-232.
- Spiker EC, Gori PL, "National landslide hazards mitigation strategya framework for loss reduction", *U.S. Geological Survey Circular*, 2003, 1244, 4-13.
- White DJ, Take WA, Bolton MD, "Soil deformation measurement using particle imagevelocimetry (PIV) and photogrammetry", *Geotechnique* 53, (7), 619-631.
- Xinpo L, Xiangjun P, "Marte Gutierrez, Siming He. Optimal location of piles in slope stabilization by limit analysis", *Acta Geotechnica*, 2012, 7, 253-259.
- ۸- مراجع
- Adrian RJ, "Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics", *Annual Review of Fluidmechanics*, 1991, 23 (1), 261-304.
- Ashour M, Ardalan H, "Analysis of pile stabilized slope based on soil-pile interaction", *Computer and Geotechnics*, 2012, 39, 85-89.
- Ashour M, Pilling P, Noriis G, "Lateral behaviour of pile groups in layerd soils", *Journal Geotech Geoenviron Engineering ASCE* 2004, 130 (6), 580-92.
- Ausilio E, Conte E, Dente G, "Stability analysis of slopes reinforced with piles", *Computers and Geotechnics*, 2001, 28, 591-611.
- Cai F, Ugai K, "Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles", *Soils and Foundations*, 2000, 40 (1), 73-84.
- Chenge YM, Lansivaara T, Wei WB, "Slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods", *Coput Geotech*, 2007, 34, 137-150.
- Chow YK, "Analysis of piles used for slope stabilization", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1996, 20 (9), 635-646.
- Dawson EM, Roth WH, Drescher A, "Slope Stability Analysis by Strength Reduction", *Geotechnique*, 1999, 49 (6), 835-840.
- Earl E, Brabb, "The world landslide problem) Episodes", *Episodes Journal of International Geoscience*, 1991, 14 (1), 52-61.
- Hassiotis S, Chameau JL, Gunaratne M, "Design method for stabilization of slopes with piles", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123 (4), 314-323.
- Hajialilue-Bonab M, AzarnyaShahgoli H, Sojoudi Y, "Soil deformation pattern around laterally loaded piles", *Inernational Journal of Physical Modeling in Geotechnics*, 2011, 11 (3), 116-125.
- Hajialilue-Bonab M, Sojoudi Y, Anand JP, "Study of Strain Wedge Parameters for Laterally Loaded Piles", *International Journal of Geomechanics, ASCE*, 2013, 13 (2), 143-152.
- Ito T, Matsui T, "Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles, *Soils and Foundations*", 1975, 15 (4), 43-60.
- Ito T, Matsui T, Hong WP, "Extended design method for multi-row stabilizing piles against landslide", *Soils and Foundations*, 1982, 22 (1), 1-13.
- Jeong S, Kim B, Won J, Lee J, "Uncoupled analysis of stabilizing piles in weathered slopes", *Computers and Geotechnics*, 2003, 30 (8), 671-682.
- Kourkoulis R, Gelagoti F, Anastasopoulos I, Gazetas G, "Hybrid method for analysis and design of slope stabilizing piles", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138 (1), 1-14.
- Kourkoulis R, Gelagoti F, Anastasopoulos I, Gazetas G. "Slope stabilizing piles and pile-groups: Parametric study and design insights", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137 (7), 663-678.
- Poulos HG, "Design of reinforcing piles to increase slope stability", *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32 (5), 808-818.

EXTENDED ABSTRACT

Investigation on Behavior of Piled and No-Piled Layered Earth Slopes

Hassan Sharafi ^{a,*}, Younes Sojodi ^b

^a Engineering Faculty, Razi University, Kermanshah, Iran

^b Engineering Faculty, Bonab University, Tabriz, Iran

Received: 07 August 2017; **Accepted:** 16 July 2018

Keywords:

Slope, Pile, Improvement ratio, PIV method, Physical modeling.

1. Introduction

In this paper, the feasibility of using piles to stabilize layered and homogenous earth slopes was studied.

2. Methodology

A set of physical modeling of foundations was performed adjacent to homogenous and 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, a digital image of deformed soil was captured, and image processing was applied with GeoPIV software for investigation of soil deformation on the slope and below the footing (Sharafi and Sojoudi, 2016). The effect of the pile and soft soil layer locations on improvement ratio (safety factor of the stabilized slope with pile / safety factor of the slope stability without piles), soil element displacement, slope stability and slip surface shape in homogenous and layered slope were investigated (Hajjalilue-Bonab et al. 2011).

3. Results and discussion

The experimental and numerical results show, the existence of a thin layer of the soft soil layer, has considerable effects on the failure mechanism and stability of the slope. Based on research results, it was found, the optimum location of the pile for increasing slope stability was in the middle of slope. The test results showed that, for layered slopes, optimum location of the 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 the non-reinforced slope) (BCR)) was obtained when piles installed near slope crest. For homogenous slope, optimum location of the pile for increasing foundation bearing capacity was found between the middle of slope and crest. Comparing piled and no piled slopes, showed in piled slope slip surface depth below the surcharge load are larger than no piled slope.

4. Conclusions

From the experimental and numerical results, the magnitude of effective depth in no piled slope found in z/B about 1.5, which is found in z/B about 2.0 in piled slope. Studies on soft soil layer effects on slope stability shows, Existence of the soft soil layer has a significant effect on slope stability, and the critical failure surface obviously controlled by the soft bound layer. For this case, for both slope (stabilized and non-stabilized) the majorities of the critical failure surface lies within the soft soil layer, which has low shear strength.

* Corresponding Author

E-mail addresses: hasansharafi1@gmail.com (Hassan Sharafi), sojodi@tabrizu.ac.ir (Younes Sojodi).

5. References

- Ashour M, Ardalan H, "Analysis of pile stabilized slope based on soil-pile interaction", *Computer And Geotechnics*, 2012, 39, 85-89.
- Hajjalilue-Bonab M, AzarnyaShahgoli H, Sojoudi Y, "Soil deformation pattern around laterally loaded piles", *International Journal of physical Modeling in Geotechnics*, 2011, 3, 116-125.
- Sharafi H, Sojoudi Y, "Experimental and numerical study of pile-stabilized slopes under surface load condations", *International Journal of Civil Engineering*, 14, 221-232.