

بهینه‌یابی طول شمع در پایدارسازی شیب‌های خاکی

محمد حاجی‌عزیزی^{۱*}، علیرضا مرادی^۲، مسعود نصیری^۳، احمدرضا مظاهری^۴ و حسن شرفی^۵

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه رازی

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی، دانشگاه رازی

^۳ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی، دانشگاه رازی

^۴ استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه آیت‌اله العظمی بروجردی

^۵ استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه رازی

(دریافت: ۹۵/۱۱/۱۴، پذیرش: ۹۶/۷/۱۷، نشر آنلاین: ۹۶/۷/۱۷)

چکیده

پایدارسازی شیب‌های خاکی و پیشنهاد راهکارهای گوناگون، یکی از مسائل مطرح و به روز در دانش مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی در پایدارسازی شیب‌های خاکی به کمک شمع، از روش‌های متداولی است که توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. بهینه‌یابی طول شمع در پایدارسازی شیب‌های خاکی از جمله مواردی است که تحقیقات جدید را می‌طلبد. از این جهت، در این پژوهش به عنوان کاری جدید سعی شده است تا با استفاده از تحلیل‌های عددی و مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی معادله‌ای برای بهینه‌یابی طول شمع ارائه شود. در این مقاله با استفاده از دو نرم‌افزار اجزاء محدود پلاکسیس و ژئواستودیو تحلیل‌های عددی انجام شده است و برخی از خروجی‌های به دست آمده با نتایج مطالعات آزمایشگاهی مقایسه و صحت‌سنجی شده‌اند. تحلیل‌های عددی برای به دست آوردن معادله مذکور، بر روی شیب ماسه‌ای مسلح با شمع در میانه شیب (به عنوان موقعیت بهینه قرارگیری) انجام شده است. در این پژوهش، علاوه بر پیشنهاد رابطه‌ای جدید برای طول بهینه شمع، بهینه‌یابی قطر شمع نیز بررسی شده است. تحلیل‌های عددی و مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی نتایج خوب و قابل قبولی ارائه می‌دهند که می‌توانند برای کارهای عملی مناسب باشند.

کلیدواژه‌ها: شیروانی خاکی، شمع، طول بهینه، پایدارسازی.

۱- مقدمه

گسیختگی‌های خاکریز به صورت موضعی و در شیروانی خاکریز می‌باشند؛ به همین علت، استفاده از شمع به عنوان مسلح کننده در خاکریزهای در معرض خطر راهکار بسیار مناسبی می‌تواند باشد.

سؤالی که در این زمینه وجود دارد این است که بهترین طول شمع در پایدارسازی شیروانی‌های خاکی چه مقداری است؟ تا به حال در زمینه موقعیت بهینه شمع، کارهای متعددی انجام شده و نتایج متفاوتی نیز به دست آمده است؛ اما مسئله بهینه‌یابی طول شمع در شیب‌های خاکی، آن‌گونه که شایسته است در کانون توجه پژوهشگران قرار نگرفته است.

برخی از کارهایی که در زمینه طول گیرداری شمع‌ها صورت گرفته است بدین شرح است؛ (Ito و Mastui، ۱۹۷۵) و (Ito و همکاران، ۱۹۷۵) در بررسی‌های طول گیرداری شمع‌ها، طول را

همه ساله زمین لغزش‌های فراوانی در نقاط مختلف جهان رخ می‌دهد و در برخی از موارد، این زمین لغزش‌ها باعث وارد شدن خسارات مالی و جانی شده است. تأمین پایداری شیروانی‌های خاکی، چه شیروانی‌های طبیعی و چه مصنوعی، یک مسأله اساسی در مهندسی ژئوتکنیک است. استفاده از شمع در شیروانی‌های خاکی یکی از روش‌های متداول در پایدارسازی است که مطالعات مختلفی نیز در این زمینه انجام شده است (Fukuoka، ۱۹۹۷؛ Won و همکاران، ۲۰۰۵).

نتایج تمامی این مطالعات نشان می‌دهند که شمع‌ها می‌توانند به عنوان عامل مؤثر جهت تثبیت و افزایش ضریب اطمینان شیب‌ها در برابر لغزش استفاده شوند. نتایج تحقیقات بدو و دیلمقانی ۱۳۹۳ در ارزیابی پایداری خاکریز میان‌گذر دریاچه ارومیه نشان می‌دهد اکثر

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲۸۳۱۳۹۹۶

افزایش طول شمع سبب کاهش نشست نامتقارن می‌شود، اما تأثیری در کاهش لنگرهای خمشی ندارد؛ اما به منظور طراحی اقتصادی، باید طول شمع بهینه‌یابی شود و از طول بیشتر فقط در نواحی باش نشست بیشتر استفاده شود. (Sawwaf, ۲۰۰۵) نشان داد که طول بهینه شمع باید به گونه‌ای انتخاب شود که قسمتی از شمع در زیر صفحه گسیختگی قرار گیرد. (Zhou و همکاران، ۲۰۱۵) بر اساس راه حل میندلین به بررسی طول بهینه شمع پرداختند. (Stefania و همکاران، ۲۰۱۵) با روش عددی تفاضل محدود طول بهینه شمع را بررسی کردند.

تاکنون بیشتر کارهایی که به صورت عددی یا آزمایشگاهی در زمینه طول گیرداری شمعی که در معرض حرکت جانبی خاک یا در شیب ناپایدار قرار دارد، انجام شده است، طول گیرداری شمع را در بالای سطح گسیختگی بررسی کرده‌اند و یا نسبت طول گیرداری شمع در لایه ناپایدار به طول در لایه پایدار را بررسی کرده‌اند (Yang و همکاران، ۲۰۱۱).

برای طول‌هایی از شمع که پس از سطح گسیختگی شیب واقع می‌شود بررسی‌های منسجمی انجام نگرفته است. از این رو جای انجام مطالعات بیشتری در این زمینه احساس می‌شود که هدف این پژوهش نیز بررسی جامع‌تر این مسأله است.

۲- تحلیل‌های عددی

تحلیل‌های عددی برای دو نوع شیب خاکی انجام شده است. این دو شیب خاکی از لحاظ هندسی مشابه هم هستند اما از نظر لایه‌بندی متفاوتند؛ شیروانی اول دو لایه بوده و لایه پایینی سخت‌تر از لایه بالایی است. شیروانی دوم نیز همگن است. ابتدا بررسی‌ها روی شیروانی خاکی دولایه و سپس شیب همگن انجام شده است. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار پلکسیس^۱ و نرم‌افزارهای ژئوسلوپ^۲ و سیگما^۳ (از مجموعه ژئوآفیس^۴) به طور مشترک استفاده شده است. مش‌بندی‌ها از نوع مثلثی و ۱۵ گره‌ای هستند. مدل موهر-کولمب در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی بر اساس شرایط متداول در تحلیل‌های استاتیکی بوده است (مرزهای کناری در جهت افق و کف مدل در هر دو جهت افق و قائم بسته شده‌اند و فقط مرز بالا باز است تا نشست در شیب انجام پذیرد).

۲-۱- مشخصات هندسی مدل

مشخصات مصالح شیروانی خاکی دو لایه و همگن به ترتیب،

نامحدود فرض کردند. علت این فرض نیز این بود که در شیب‌هایی که عمق لغزش زیادی دارند، فاصله بین سطح زمین تا لایه سخت یا بستر سنگی زیاد است و گیردار کردن شمع در این لایه‌ها عملاً غیر ممکن است. (Ito و همکاران، ۱۹۸۱) روشی برای طراحی ردیف شمع‌ها در شیبی با سطح گسیختگی ثابت ارائه کردند. آن‌ها در بررسی‌های خود، تأثیر طول شمع بر ضریب اطمینان را در نواحی بالاتر از سطح گسیختگی مورد بررسی قرار دادند. (Poulos, ۱۹۹۵) روشی برای طراحی شمع‌های پایدارکننده شیب ارائه کرد و در زمینه طول بهینه شمع نیز بررسی‌هایی انجام داد. او به این نتیجه رسید که طول بهینه شمع حدود ۱/۷ الی ۲ برابر عمق سطح گسیختگی شیب در هر نقطه است. (Van Impe و Reese, ۲۰۰۱) با مطالعه گروه شمع‌های پایدارکننده شیب به این نتیجه رسیدند که منطقه‌ی تأثیر هر شمع در گروه از ۵ برابر قطر آن بیشتر نمی‌شود و حداکثر طول مناسب برای شمع‌ها را ۱۰ برابر قطر آن‌ها تخمین زدند. (Kourkoulis و همکاران، ۲۰۱۱) در تحقیقات خود، طول شمع‌ها را برابر طول لایه ناپایدار (لایه بالایی شیب) در نظر گرفتند. مشکل روش آن‌ها این است که این ایده در خاک‌هایی که دارای لایه ناپایدار با ضخامت زیاد هستند جوابگو نیست. (Yang, ۲۰۱۱) طول گیرداری شمع‌ها را در شیبی که با یک ردیف شمع مسلح شده بود، به وسیله روش کاهش مقاومت برشی مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنان عبارت است از:

۱- با افزایش طول شمع، ضریب اطمینان شیب افزایش پیدا می‌کند و ضریب اطمینان زمانی که طول شمع از طول بحرانی عبور می‌کند، روند ثابتی را از خود نشان می‌دهد.

۲- خصوصیات خاک تأثیر به‌سزایی بر طول گیرداری شمع‌ها دارد. طول بحرانی شمع‌ها برای شیب‌هایی که از نوع رسی هستند، کم‌تر از شیب‌هایی است که از نوع ماسه‌ای می‌باشند.

شوش‌پاشا و امیردهی (۲۰۱۴)، بررسی‌هایی روی طول بهینه شمع در گروه شمع انجام دادند و چنین نتیجه گرفتند که با افزایش فاصله بین شمع‌ها در گروه، طول بهینه شمع کاهش می‌یابد. آن‌ها نسبت عمق سطح گسیختگی به طول بهینه شمع را برای فواصل دو، سه، چهار و شش برابر قطر به ترتیب ۰/۴۰، ۰/۴۳، ۰/۴۶ و ۰/۵۱ به دست آوردند. به عبارت دیگر طول بهینه برای فاصله‌ای مانند شش برابر قطر، تقریباً به اندازه ۲ برابر عمق سطح لغزش خواهد بود. تحقیقات (Nguyen و همکاران، ۲۰۱۴) نشان داد که

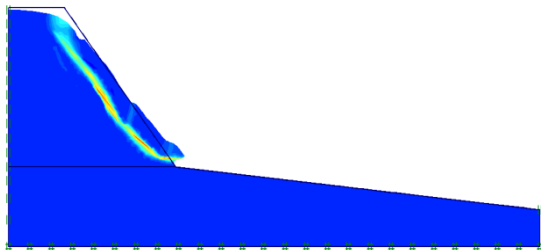
3. Sigma
4. Geo office

1. PLAXIS
2. Geo slope

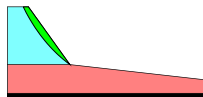
۲-۲- شیب خاکی دو لایه

با توجه به نتایج تحلیل‌های عددی، این شیب خاکی دو لایه در حالت غیر مسلح ناپایدار است و ضریب اطمینان آن مطابق جدول (۳) ارائه شده است. سطوح گسیختگی در نرم‌افزارهای پلکسیس و اسلوب مطابق شکل‌های (۲) و (۳) می‌باشد. هندسه شیب به گونه‌ای است که از دو لایه تشکیل شده و در آن لایه دوم از لایه اول سخت‌تر است.

شش جایگاه برای نصب شمع‌ها در شیب در نظر گرفته شد، به طوری که فاصله آن‌ها از یکدیگر پنج سانتی‌متر است. موقعیت این جایگاه‌ها در شکل (۵) دیده می‌شود. در هر یک از این جایگاه‌ها، شمعی قرار داده شد و تحلیل‌های جداگانه‌ای برای تعیین پایداری شیب انجام گرفت. مشخصات این شمع‌ها در جدول (۴) آمده است. در هر جایگاه روی شیب، طول شمع به صورت تدریجی و در گام‌های دو سانتی‌متری تا رسیدن آن به انتهای لایه سخت‌ترین افزایش داده شد. حداکثر طول شمع برای جایگاه یک، ۴۵ سانتی‌متر است و برای جایگاه‌های بعدی به تناسب کم‌تر می‌شود به طوری که در جایگاه ۶، حداکثر طول شمع ۲۰ سانتی‌متر است.



شکل ۳- سطح گسیختگی به دست آمده از نرم‌افزار پلکسیس FS=1.067



شکل ۴- سطح گسیختگی به دست آمده از نرم‌افزار اسلوب FS=1.06

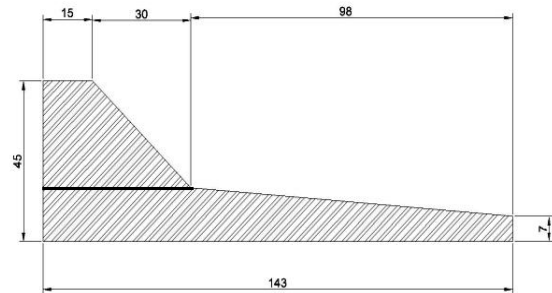
مطابق جداول (۱) و (۲) است و هندسه شیب دو لایه در شکل (۱) و هندسه شیب همگن در شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح تشکیل‌دهنده شیروانی خاکی دو لایه

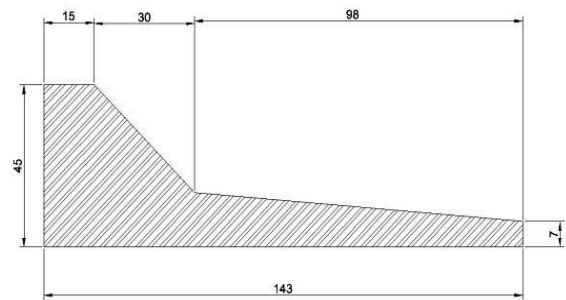
مشخصات خاک	γ ($\frac{kN}{m^3}$)	E ($\frac{kN}{m^2}$)	C ($\frac{kN}{m^2}$)	ϕ
لایه اول	۲۰	3×10^4	۰	۴۷
لایه دوم	۲۲	4×10^4	۰	۴۹

جدول ۲- مشخصات مصالح تشکیل‌دهنده شیروانی خاکی همگن

مشخصات خاک	γ ($\frac{kN}{m^3}$)	E ($\frac{kN}{m^2}$)	C ($\frac{kN}{m^2}$)	ϕ
شیب همگن	۲۰	3×10^4	۰	۴۷



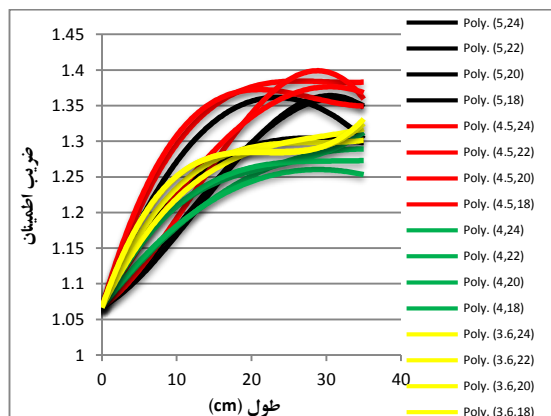
شکل ۱- هندسه شیب خاکی دو لایه (ابعاد به سانتی‌متر)



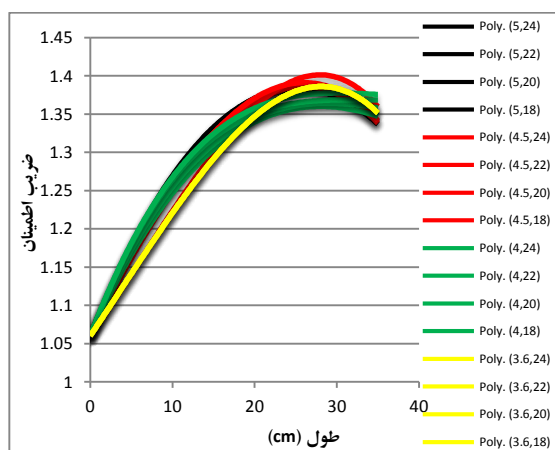
شکل ۲- هندسه شیب خاکی همگن (ابعاد به سانتی‌متر)

جدول ۳- ضرایب اطمینان به دست آمده از نرم‌افزارها در حالت

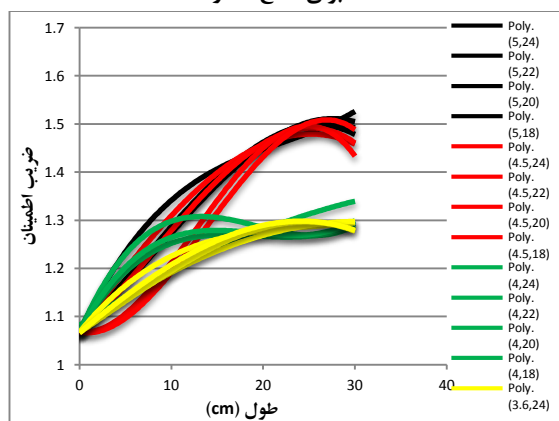
شیب خاکی دو لایه غیر مسلح	
ضریب اطمینان	نرم‌افزار
۱/۰۶	اسلوب
۱/۰۶۷	پلکسیس



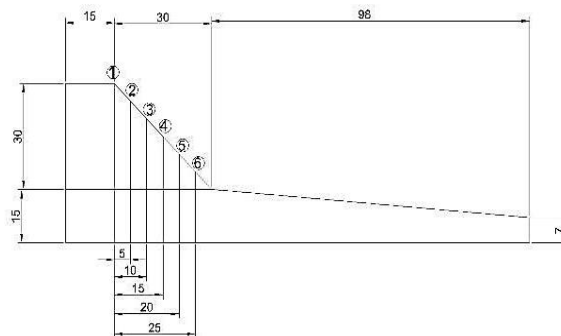
شکل ۷- نتایج به دست آمده از نرم افزار پلکسیس برای ۱۶ حالت مختلف شمع شماره ۳



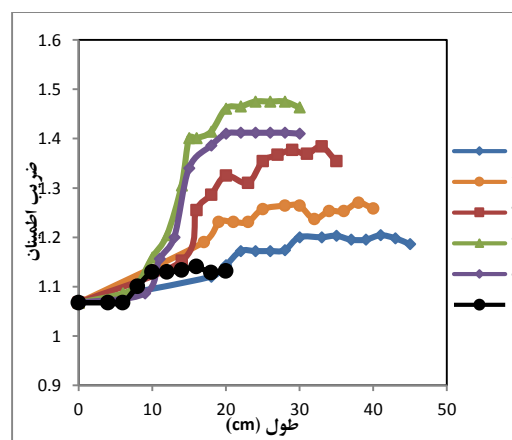
شکل ۸- نتایج به دست آمده از نرم افزار اسلوب برای ۱۶ حالت مختلف برای شمع شماره ۳



شکل ۹- نتایج به دست آمده از نرم افزار پلکسیس برای ۱۶ حالت مختلف شمع شماره ۴



شکل ۵- مکان قرارگیری شمع ها (ابعاد به سانتی متر)



شکل ۶- مقایسه ضریب اطمینان ۶ حالت مختلف

جدول ۴- مشخصات شمع

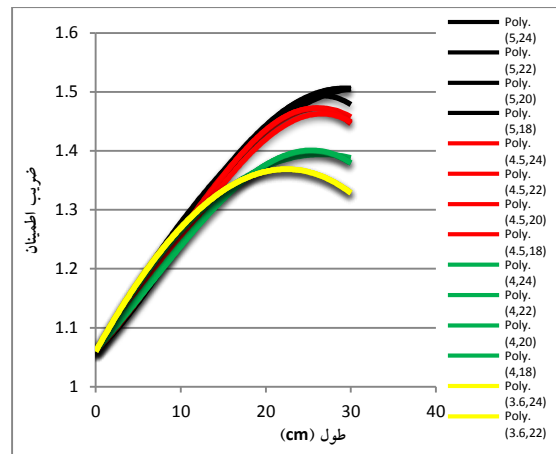
مشخصات	$E \left(\frac{kN}{m^2}\right)$	$\gamma \left(\frac{kN}{m^3}\right)$	قطر (cm)
شمع	4×10^4	۲۴	۴/۵

ضریب اطمینان‌های به دست آمده برای هر یک از حالات ذکر شده محاسبه و برای مقایسه بهتر در نمودار شکل (۶) ترسیم شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، شمع‌های قرار گرفته در جایگاه‌های ۱، ۲ و ۶ در ازای تمامی طول‌ها ضریب اطمینان کم‌تری نسبت به سه جایگاه دیگر ایجاد می‌کنند. همچنین شمع شماره ۴ بیش‌ترین ضریب اطمینان را نسبت به سایر جایگاه‌ها داراست. برای بررسی دقیق‌تر این قضیه بررسی‌ها روی سه شمع باقی‌مانده (شمع‌های ۳، ۴ و ۵) ادامه پیدا کرد. در ادامه پژوهش، چهار نوع قطر (۳/۶، ۴، ۴/۵ و ۵ سانتی‌متر) و چهار نوع وزن مخصوص مختلف (۱۸، ۲۰، ۲۲ و ۲۴ کیلو نیوتن بر متر مکعب) به هر یک از سه حالت باقی‌مانده اعمال شدند.

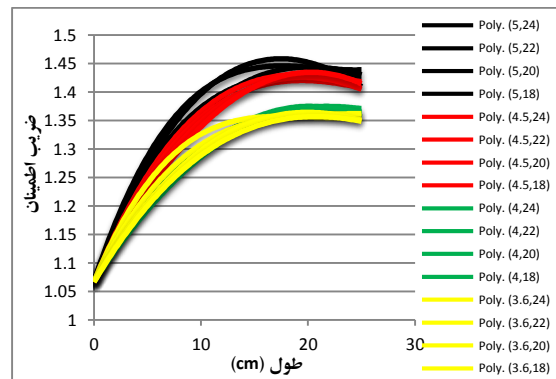
با توجه به این که برای هر حالت ۴ قطر و ۴ وزن مخصوص استفاده شده است، بنابراین هر یک از حالت‌های قرارگیری شمع، خود به ۱۶ حالت تقسیم می‌شود. با توجه به نتایج تحلیل‌ها، مشخص شد که شمع شماره ۴ بهترین ضریب اطمینان را نسبت به حالت‌های دیگر دارد. شکل‌های (۷) تا (۱۲) نتایج تحلیل‌های عددی در پلکسیس و ژئواسلپ را برای سه شمع ۳، ۴ و ۵ نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج تحلیل‌ها، مشخص است که شمع شماره ۴ بهترین ضریب اطمینان را نسبت به حالت‌های دیگر دارد. با توجه به تحقیقات گذشته (Shooshpasha و Amirdehi (۲۰۱۴)، حاجی‌عزیزی و نصیری (۱۳۹۶)، Mazaheri و Hajiazizi (۲۰۱۵)) نیز توسط مطالعات آزمایشگاهی میانه شیب را بهترین مکان قرارگیری شمع به دست آورده‌اند. بنابراین با استفاده از این شمع کار ادامه می‌یابد.

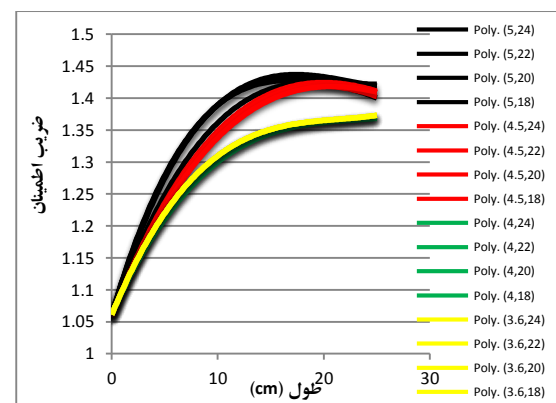
هر یک از منحنی‌ها در شکل‌های قبلی با برازش تک نقطه‌ای که توسط تحلیل‌های عددی به دست آمده‌اند، ترسیم گشته‌اند؛ لذا معادله ریاضی آن‌ها در دست است. از آنجایی که نتایج به دست آمده برای هر گروه از منحنی‌ها، تا حد زیادی نزدیک به هم هستند، به منظور دسته‌بندی بهتر و تسهیل در یافتن معادله X ، هر یک از چهار منحنی شکل (۸) به یک منحنی تبدیل شد که این کار با میانگین‌گیری انجام گرفت؛ به صورتی که نقطه‌ای با فاصله یک سانتی‌متر را روی محور افقی (طول) در نظر گرفته و با داشتن معادله منحنی‌ها، ضریب اطمینان متناظر هر طول به دست آمد. برای هر قطر از شمع، و به ازای هر نقطه روی محور طولی، چهار X وجود دارد. با میانگین‌گیری عددی از این چهار X ، یک عدد به عنوان نماینده آن قطر خاص در آن طول مشخص به دست آمد. این روند برای همه نقاط دیگر روی سایر منحنی‌ها تکرار گشت و با اعداد حاصل، منحنی‌های شکل (۱۲) ترسیم شد. با استفاده از مقادیر جدید کار ادامه یافت به این صورت که ۴ منحنی مربوط به هر قطر که وزن مخصوص‌های متفاوتی داشتند با استفاده از برازش و میانگین‌گیری تبدیل به یک منحنی شدند؛ بنابراین در نهایت ۱۶ منحنی تبدیل به ۴ منحنی شد (شکل (۱۳)).



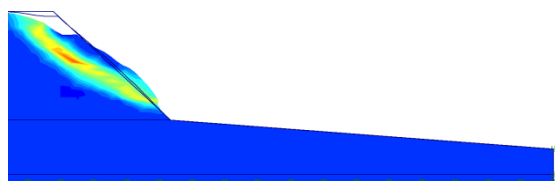
شکل ۱۰- نتایج به دست آمده از نرم‌افزار اسلپ برای ۱۶ حالت مختلف شمع شماره ۴



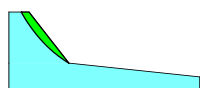
شکل ۱۱- نتایج به دست آمده از نرم‌افزار پلکسیس برای ۱۶ حالت مختلف شمع شماره ۵



شکل ۱۲- نتایج به دست آمده از نرم‌افزار اسلپ برای ۱۶ حالت مختلف شمع شماره ۵

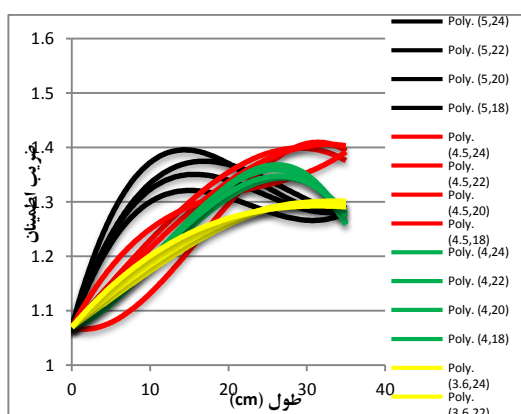


شکل ۱۴- سطح گسیختگی به دست آمده از نرم افزار پلکسیس FS=1.07

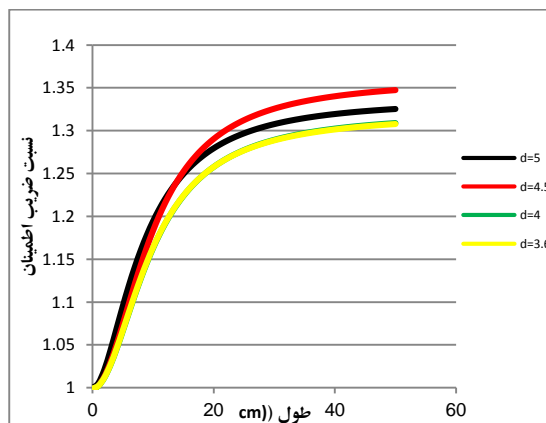


شکل ۱۵- سطح گسیختگی به دست آمده از نرم افزار اسلپ FS=1.08

در این قسمت تحلیل‌های عددی بر روی سه شمع ۳، ۴ و ۵ در شکل (۵) انجام شده است. روند بررسی‌ها مطابق با آنچه در بخش ۲-۲ می‌باشد؛ به این ترتیب که چهار نوع قطر (۳/۶، ۴، ۴/۵ و ۵ سانتی‌متر) و چهار نوع وزن مخصوص مختلف (۱۸، ۲۰، ۲۲ و ۲۴ کیلونیوتن بر متر مکعب) به هر یک از سه حالت اعمال شدند که نتایج آن در شکل‌های (۱۶) تا (۲۱) آورده شده است.



شکل ۱۶- نتایج به دست آمده از نرم‌افزار پلکسیس برای ۱۶ حالت مختلف شمع شماره ۳



شکل ۱۳- منحنی‌های برازش شده

در ادامه به دو صورت از چهار منحنی باقی‌مانده میانگین‌گیری شد؛ یک حالت برحسب طول و یک حالت هم برحسب قطر، سپس معادلات هر یک از منحنی‌ها به دست آمد و مطابق با معادله (۱)، معادله نهایی (معادله (۲)) به دست می‌آید.

$$X = f(L), X = g(d) \rightarrow X = \frac{f(L)+g(d)}{2} \quad (1)$$

X: نسبت ضرایب اطمینان

f(L): معادله به دست آمده برحسب طول

g(d): معادله به دست آمده برحسب قطر

$$x = 0.48 + 0.046 d - 0.0005 d^3 + \frac{1+0.015 L^2}{2+0.022 L^2} \quad (2)$$

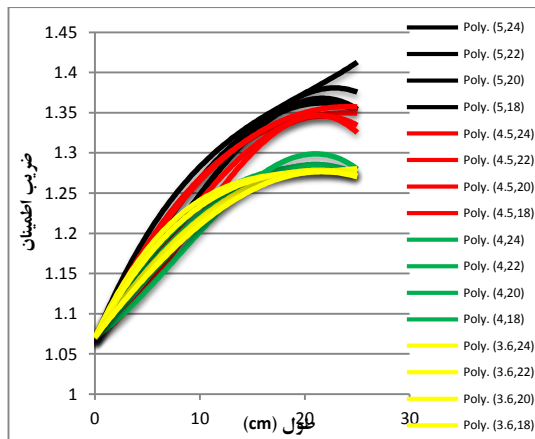
قابل ذکر است که رابطه (۲) برای محدوده ۰/۱ تا ۰/۵ d/L= صدق می‌کند.

۲-۳- شیروانی خاکی همگن

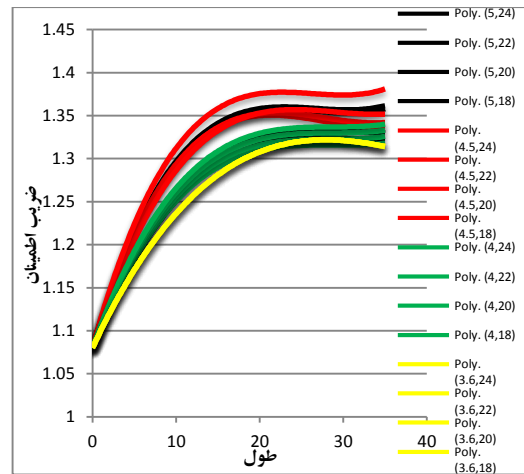
هندس این مدل، در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به نتایج تحلیل‌های عددی، این شیب در حالت غیر مسلح ناپایدار است و ضریب اطمینان آن مطابق جدول (۵) و سطوح گسیختگی آن در نرم افزارهای پلکسیس و اسلپ مطابق شکل‌های (۱۴) و (۱۵) است.

جدول ۵- ضریب اطمینان به دست آمده از نرم‌افزارها

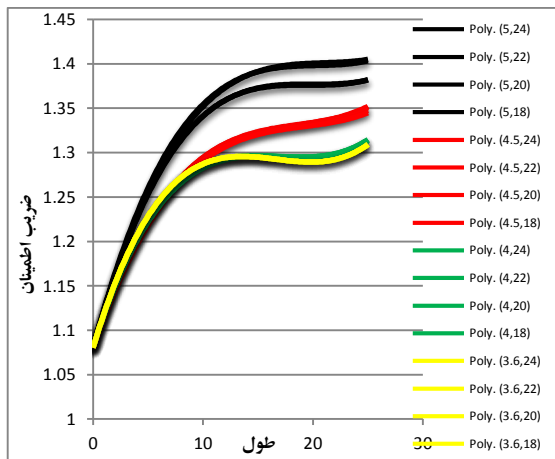
ضریب اطمینان	نرم‌افزار
۱/۰۸	اسلپ
۱/۰۷	پلکسیس



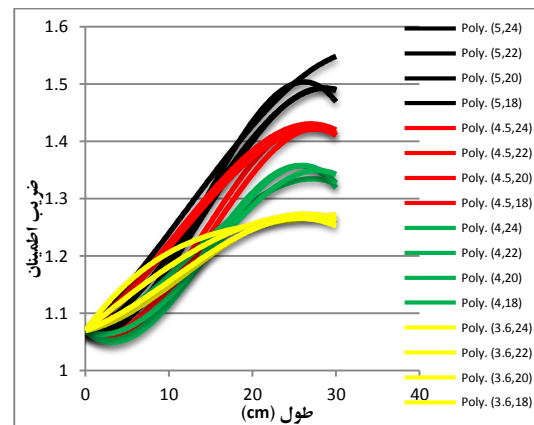
شکل ۲۰- نتایج به دست آمده از نرم افزار پلکسیس برای ۱۶ حالت مختلف شمع شماره ۵



شکل ۱۷- نتایج به دست آمده از نرم افزار اسلوپ برای ۱۶ حالت مختلف شمع شماره ۳

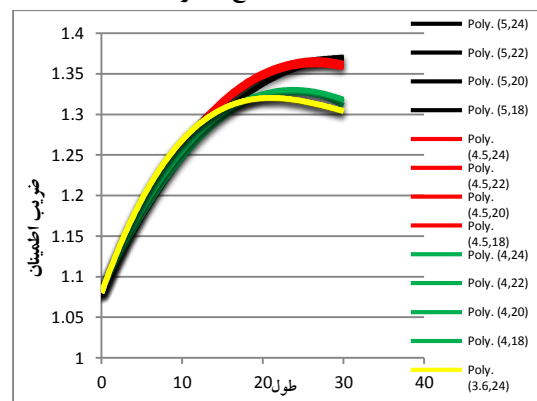


شکل ۲۱- نتایج به دست آمده از نرم افزار اسلوپ برای ۱۶ حالت مختلف شمع شماره ۵



شکل ۱۸- نتایج به دست آمده از نرم افزار پلکسیس برای ۱۶ حالت مختلف شمع شماره ۴

با توجه به نتایج تحلیل‌ها، مشخص است که در شیب همگن نیز شمع شماره ۴ بهترین ضریب اطمینان را نسبت به شمع‌ها با موقعیت‌های دیگر دارد؛ بنابر این با استفاده از این شمع کار ادامه می‌یابد. مقادیر موجود در شکل (۱۷) بر ضریب اطمینان شیروانی خاکی بدون شمع تقسیم شدند و با استفاده از مقادیر جدید کار ادامه یافت؛ به این صورت که ۴ منحنی مربوط به هر قطر که وزن مخصوص‌های متفاوتی داشتند با استفاده از برازش و میانگین‌گیری تبدیل به یک منحنی شدند، بنابراین در نهایت ۱۶ منحنی تبدیل به ۴ منحنی شد که در شکل (۲۲) آمده است.



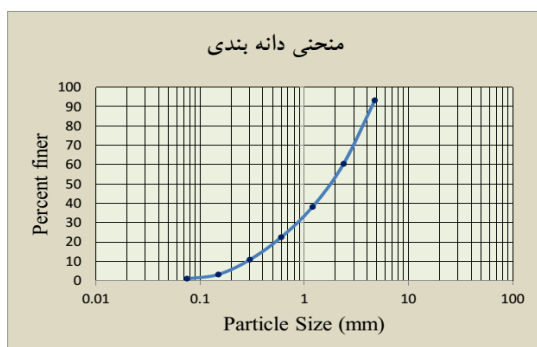
شکل ۱۹- نتایج به دست آمده از نرم افزار اسلوپ برای ۱۶ حالت مختلف شمع شماره ۴



شکل ۲۳- جعبه آزمایش

۳-۱-۲- ماسه

با استفاده از آزمایش برش مستقیم مقدار چسبندگی ماسه تقریباً برابر صفر و زاویه اصطکاک داخلی آن برابر ۴۷ درجه اندازه گیری شده است. همچنین منحنی دانه بندی ماسه استفاده شده برای ساخت شیروانی در شکل (۲۴) نشان داده شده است.



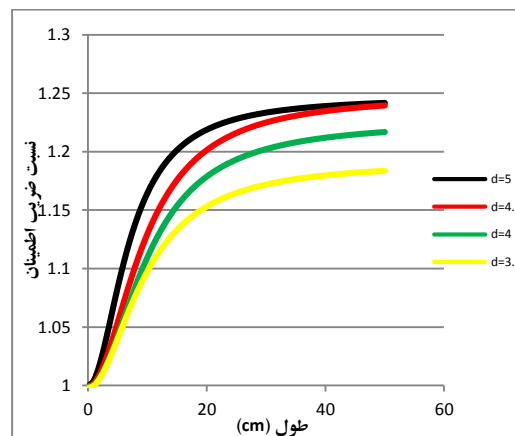
شکل ۲۴- منحنی دانه بندی

۳-۱-۳- شمع

شمع به کار رفته در شیب های مسلح، شمع با همان مشخصات جدول (۴) می باشد.

۳-۲- نحوه انجام آزمایش

- تمامی مدل های ساخته شده دارای مشخصات زیر هستند:
- ۱- برای از بین بردن اصطکاک جداره ها، دیواره های جعبه آزمایشگاه، پیش از مدل سازی روغن کاری شده اند.
 - ۲- در تمامی مدل ها، طول تاج ۱۵ سانتی متر، زاویه شیروانی ۴۵ درجه، ارتفاع شیب ۳۰ سانتی متر و ارتفاع کل مدل ۴۵ سانتی متر بوده است (شکل (۲۵)).
 - ۳- همه مدل ها به کمک بارش مصنوعی، اشباع می شوند و



شکل ۲۲- منحنی های برآزش شده

در ادامه همان طور که در بخش ۲-۲ گفته شده بود از ۴ منحنی باقی مانده میانگین گیری شد، یعنی یک حالت برحسب طول و یک حالت هم برحسب قطر، سپس معادلات هر یک از منحنی ها به دست آمد. مطابق با معادله (۱)، معادله (۳) که همان معادله نهایی و مد نظر است به دست آمد.

$$x = 0.5 + 0.02 d + \frac{1+0.015 L^2}{2+0.024 L^2} \quad (3)$$

قابل ذکر است که رابطه (۳) برای محدوده ۰/۱ تا ۰/۵ d/L صدق می کند.

۳- مطالعات آزمایشگاهی

در این بخش به بررسی آزمایشگاهی تعدادی از حالات موجود در تحلیل های عددی پرداخته شده است.

۳-۱- تجهیزات آزمایشگاه

وسایل مورد نیاز برای آزمایش ها شامل موارد زیر است.

۳-۱-۱- جعبه آزمایش

- این جعبه همان طوری که در شکل (۲۳) مشخص است، شامل ۴ قسمت می باشد:
- ۱- قسمت میانی
 - ۲- محفظه تأمین آب
 - ۳- محفظه خروج و زهکشی آب
 - ۴- تابلوی پیزومتریک



شکل ۲۶- شیب خاکی همگن غیر مسلح



شکل ۲۷- گسیختگی شیب خاکی همگن غیر مسلح

۳-۳-۲- شیروانی خاکی همگن با شمع به قطر ۳/۶ و طول ۱۶ سانتی‌متر

این مدل پس از ساخته شدن، به روش بارش، اشباع گردید. این مدل نیز با گذشت زمانی در حدود ۹۰ دقیقه گسیخته شد. گسیختگی به این صورت بود که ابتدا یک ترک عمیق در پنجه شیب پدیدار گشت (شکل (۲۸)) و بعد از گذشت ۵ دقیقه، شیب به صورت کامل گسیخته شد.



شکل ۲۸- ترک ایجاد شده در پنجه شیب مسلح با شمع به قطر ۳/۶ و طول ۱۶ سانتی‌متر

جهت کنترل اشباع شدن از تابلوی پیزومترها استفاده شده است.

۵- آب از طریق مخزن پایین دست جعبه آزمایش زهکشی می‌شود.

۶- وزن مخصوص شیب ماسه‌ای قبل از اشباع شدن برابر با ۱۸ کیلونیوتن بر متر مکعب است و پس از فرآیند اشباع به مقدار ۲۱/۵ کیلونیوتن بر متر مکعب می‌رسد.

۷- روش تراکم در جعبه آزمایش برای رسیدن به وزن مخصوص ۱۸ کیلونیوتن بر متر مکعب بدین ترتیب بوده است که ابتدا جعبه آزمایش به صورت شطرنجی خط کشی می‌گردید، سپس با توجه به حجم هر بلوک در جعبه، وزن لازم از ماسه برای رسیدن به وزن مخصوص ۱۸ کیلونیوتن بر متر مکعب توسط ترازو تهیه می‌شد. در نهایت آن وزن تهیه شده در بلوک مشخص شده، طوری متراکم می‌گردید که در آن حجم معین قرار گیرد. بنابراین وزن مخصوص ۱۸ کیلونیوتن بر متر مکعب برای شیب ماسه‌ای پس از ساخت مدل حاصل می‌شد.



شکل ۲۵- مدل ساخته شده در آزمایشگاه

۳-۳-۳- آزمایش‌های انجام شده

۱-۳-۳- شیروانی خاکی همگن غیر مسلح

شیروانی خاکی همگن بدون شمع مطابق شکل (۲۶) در آزمایشگاه ساخته شد و به روش بارش اشباع گردید. هندسه این مدل همانند شکل (۲) است. این مدل با گذشت زمانی در حدود ۹۰ دقیقه دچار گسیختگی شد (شکل (۲۷)).

جدول ۶- تبدیل مدل واقعی به آزمایشگاهی توسط ضریب مقیاس S

جرم	نیرو	مساحت	طول	زمان	مدل واقعی
M	F	A	L	T	مدل واقعی
S^3M	S^2F	S^2A	SL	\sqrt{ST}	مدل آزمایشگاهی

بنابر این به کمک جدول (۶) می‌توان هر مدل آزمایشگاهی را تبدیل به مدل واقعی کرد و نیز هر مدل واقعی را در آزمایشگاه مدل سازی کرد. قابل ذکر است که خواص مقاومتی خاک مانند چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و وزن مخصوص، در مدل‌های واقعی و آزمایشگاهی ثابت هستند و تغییر نمی‌کنند.

مشخص است که به دلیل اثرات مقیاس، خاک‌های ماسه‌ای ممکن است همان نقشی را که در مدل‌های آزمایشگاهی دارند در نمونه اصلی نداشته باشند. علت این اختلاف‌ها نیز تفاوت در تراز تنش بین مدل‌های آزمایشگاهی و آزمون‌های صحرایی است (Vesic, ۱۹۷۳). (Sawwaf, ۲۰۰۵) پیشنهاد می‌کند که استفاده از مدل‌های $1-g$ می‌تواند فقط در پیش‌بینی رفتارهای کلی و عمومی نمونه‌های اصلی به کار برود. در همین راستا (Sitharam و Hegde, ۲۰۱۵) شرح داده‌اند که آزمایش‌های کوچک مقیاس در شرایط $1-g$ به دستیابی تقریب مناسب اطلاعات در مورد رفتار کلی نمونه‌های اصلی، ساده‌تر از آزمایش‌های بزرگ مقیاس کمک می‌کنند، هر چند که کلیدی مشخصات مسأله مورد نظر دارند. نکته مهم در این زمینه آن است که نتایج آزمایش‌های کوچک مقیاس وابسته به مقیاس هستند و نتایج به دست آمده در شرایط آزمایش‌های $1-g$ مستقیماً برای حالت نمونه اصلی قابل کاربرد نیستند. همان‌طور که توسط (Jones و Fagher, ۱۹۹۶) پیشنهاد شده است نتایج آزمایش‌های کوچک مقیاس را می‌توان با استفاده دقیق از قوانین مقیاس برای نمونه‌های اصلی هم به کار برد، هر چند که به دلیل پیچیدگی‌های موجود قضاوت مهندسی در این زمینه نقشی اساسی و مهم خواهد داشت. به منظور درک بیشتر در این موضوع می‌توان به نتیجه تحقیقات Ghazavi و NazariAfshar (۲۰۱۳) اشاره کرد، آنان سختی مسلح کننده در مدل آزمایشگاهی خود را یک صدم سختی مسلح کننده در مدل‌های واقعی در نظر گرفته‌اند.

۳-۳-۳- شیروانی خاکی همگن با شمع به قطر ۳/۶ و طول ۲۷ سانتی‌متر

این شیروانی نیز پس از ساخته شدن، به روش بارش اشباع گردید و با گذشت زمانی حدود ۱۲۰ دقیقه نیز دچار گسیختگی نشد. در بالای شمع ترک کوچکی ایجاد شد (شکل (۲۹))، اما این ترک سبب گسیختگی شیروانی نگردید. در ادامه با بارگذاری تاج شیب به اندازه ۲۰ کیلوگرم، شیب گسیخته شد. شکل (۳۰) سطح لغزش را در شیب نشان می‌دهد.



شکل ۲۹- ترک ایجاد شده در شیب خاکی همگن



شکل ۳۰- سطح لغزش در شیب با حضور شمع

۴- تحلیل ابعادی

در نظر گرفتن اثر اندازه واقعی به مبحث تحلیل ابعادی مربوط می‌شود که از نسبت‌هایی که در جدول (۶) آمده است استفاده می‌گردد، در این جدول S نسبت مقیاس است (حاجی عزیزی و نصیری، ۱۳۹۶).

- of earth slopes", International Journal of Civil Engineering, 1, Transaction B: Geotechnical Engineering, 2015.
- Hegde AM, Sitharam TG, "Experimental and numerical studies on protection of buried pipeline sand underground utilities using geocells", Geotextiles and Geomembranes, Article in press: 2015, 1-10.
- Ito T, Matsui T, "Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles", Soils and Foundations, 1975, 15 (4), 43-59.
- Ito T, Matsui T, Hong WP, "Design method for the stability analysis of the slope with landing pier", Soils and Foundations, 1979, 19 (4), 43-57.
- Ito T, Matsui T, Hong WP, "Design method for stabilizing piles against landslide one row of piles", Soils and Foundation, 1981, 21 (1), 21-37.
- Kourkoulis R, Gelagoti F, Anastasopoulos I, Gazetas G, "Slope Stabilizing Piles and Pile-Groups: Parametric Study and Design Insights", Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137, 663-677.
- Nguyen DDC, Kim DS, Jo SB, "Parametric study for optimal design of large piled raft foundations on sand", Journal of Computers and Geotechnics, 2014, 55, 14-26.
- Poulos HG, "Design of reinforcing piles to increase slope stability", Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32 (5), 808-818.
- Reese LC, Van Impe WF, "Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading", AA, Balkema publishers, 2001, 463.
- Sawwaf MA, "Strip footing behavior on pile and sheet pile-stabilized sand slope", Journal of Geomechanical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2005 131 (6), 705-715.
- Shooshpasha I, Amirdehi HA, "Evaluating the stability of slope reinforced with one row of free head piles", Arabian Journal of Geosciences, 2014.
- Stefania L, Massimo R, Caterina T, "Numerical analysis of slopes reinforced with a row of short piles", Journal of Engineering Geology for Society and Territory, 2015, 2, 2077-2081.
- Vesic AS, "Analysis of ultimate loads of shallow foundations", Soil Mechanics and Foundation. 1973, 99 (1), 45-73.
- Won J, You K, Jeong S, Kim S, "Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems", Computers and Geotechnics, 2005, 32, 304-315.
- Yang S, Ren X Zhang J, "Study on embedded length of piles for slope reinforced with one row of piles", Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, 3 (2), 167-178.
- Zhou Z, Wang D, Zhang L, Ma, W, "Determination of large diameter bored pile's effective length based on Mindlin's solution", Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 2 (6), 422-428.

۵- نتیجه‌گیری

- نتایجی که از این تحقیق به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:
- ۱- بهترین مکان قرارگیری شمع‌ها در شیروانی خاکی ماسه‌ای همگن و دو لایه (با لایه پایینی سخت‌تر)، میانه شیب است.
 - ۲- قرارگیری شمع‌ها در بالادست (تاج شیب) توصیه نمی‌شود چون نسبت به موقعیت‌های میانه و پنجه شیب ضریب اطمینان پایین‌تری دارد و همچنین به دلیل داشتن طول بیشتر نسبت به موقعیت‌های دیگر از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه نخواهد بود.
 - ۳- در شیب‌های دارای دو لایه ماسه‌ای که لایه پایینی سخت‌تر از لایه بالایی است، بهترین طول گیرداری شمع، به اندازه ۵ برابر قطر شمع پس از سطح گسیختگی شیب غیرمسلح است. افزایش طول پس از این مقدار، منجر به افزایش ضریب اطمینان شیب نخواهد شد.
 - ۴- در شیب‌های دارای خاک همگن، بهترین طول گیرداری شمع، به اندازه‌ی ۷ برابر قطر شمع پس از سطح گسیختگی شب غیرمسلح است و طول بیشتر از آن تأثیری در افزایش ضریب اطمینان شیب نخواهد داشت.

۶- مراجع

- بدو ک، دیلمقانی ب، "ارزیابی پایداری و نشست خاکریز میان‌گذر دریاچه ارومیه"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۴، شماره ۲، ۱۳۹۳، ۶۰-۶۸.
- حاجی‌عزیزی م نصیری م، "بررسی آزمایشگاهی تأثیر میزان چسبندگی در پایداری شیب‌های خاکی مسلح با ستون سنگی"، مجله علمی پژوهشی عمران مدرس ۱۳۹۶، دوره هفدهم، شماره ۱.
- Fukuoka M, "The effects of horizontal loads on piles due to landslides", Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977, Tokyo, 27-42.
- Fakher A, Jones CJFP, "Discussion on bearing capacity of rectangular footings on geogrid reinforced sand by Yetimoglu, T., Wu, J.T.H., Saglamer, A., 1994" Journal of Geotech. Engineering 1996, 122, 326-327.
- Gazavi M, Nazari Afshar J, "Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns", Geotextiles and Geomembranes, 38, 2013, 26-36.
- Hajiazizi M, Mazaheri AR, "Use of line segments slip surface for optimized design of piles in stabilization

EXTENDED ABSTRACT

Optimization of Pile Length in Earth Slope Stabilization

Mohammad Hajiazizi ^{a,*}, Alireza Moradi ^a, Masoud Nasiri ^a, Ahmad Reza Mazaheri ^b, Hasan Sharafi ^a

^a Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

^b Faculty of Engineering, Ayatollah Borujerdi University, Borujerd, Iran

Received: 02 February 2017; **Accepted:** 09 October 2017

Keywords:

Earth Slope, Pile, Optimal length, Stabilization.

1. Introduction

The present paper, illustrated the results of numerical investigation and a series of experimental modeling on optimization of pile length in reinforcing earth slopes using piles. In this paper, the length of different piles with various diameters analyzed and the relationship for optimal length proposed. Stabilization of earth slopes and proposing different methods is one of the main issues in geotechnical engineering. Using numerical and analytical methods in stabilization of earth slopes reinforced by piles are common method, which, carried out by lots of researchers. Finding the optimal length of piles in reinforced slopes is an important matter that reduces the expenses and make the project economical.

2. Methodology

2.1. Numerical study

In this paper, two finite element software, PLAXIS and GEO STUDIO were used in order to find the optimal length of piles in reinforced sandy slopes. A mathematical relationship has been suggested for finding the optimal length on the sandy slope reinforced by pile in middle of slope. The result obtained by this paper can be used in practical projects.

2.2. Experimental study

In laboratory, some physical models constructed confirm numerical results. In modeling, the unreinforced sandy slope constructed and saturated through precipitation, and reinforced slopes using pile were constructed and observed after saturation. The experimental modeling was in good and acceptable agreement with numerical results.

3. Results and discussion

3.1. Numerical analysis for two-layered slope

The geometry of this model shown in Fig. 1. The unreinforced slope in this condition was unstable and in next step 6 place for inserting the pile in order to reinforce sandy slope proposed and analyzed. The total results of analysis illustrated in Fig. 2. Finally, the relationship (1) proposed as the optimal length for two-layered sandy slope.

* Corresponding Author

E-mail addresses: mhazizi@razi.ac.ir (Mohammad Hajiazizi), alimoradiazam@yahoo.com (Alireza Moradi), nasiri.ma@razi.ac.ir (Masoud Nasiri), armazaheri@yahoo.com (Ahmad Reza Mazaheri), h_sharafi@razi.ac.ir (Hasan Sharafi).

$$x = 0.48 + 0.046 d - 0.0005 d^3 + \frac{1+0.015 L^2}{2+0.022 L^2} \quad (1)$$

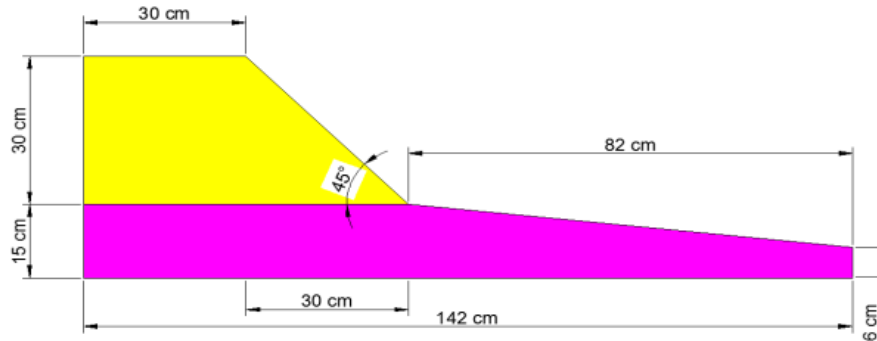


Fig. 1. Slope geometry for two-layered slope

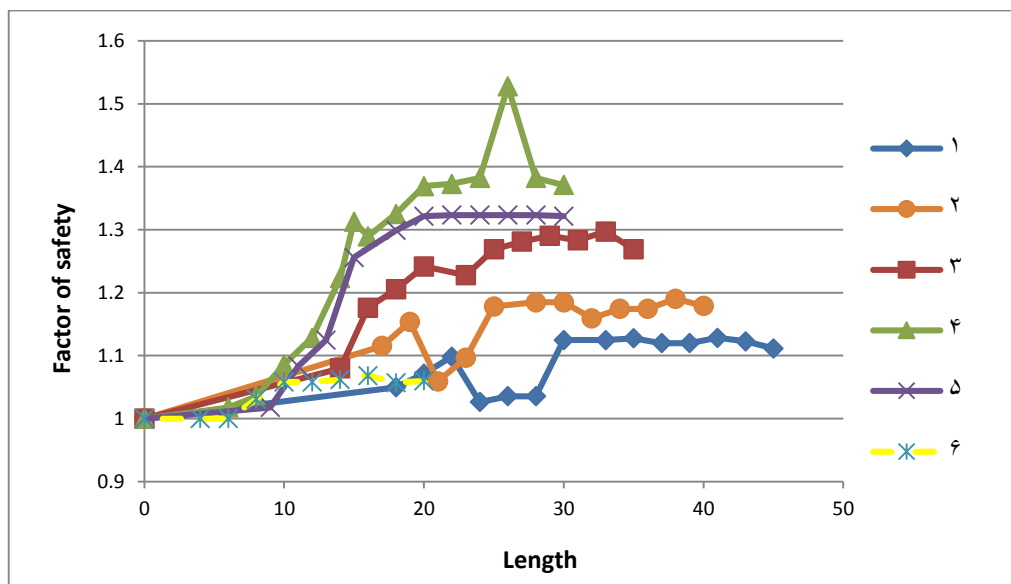


Fig. 2. The safety factors of reinforced slopes using piles in numerical analysis (1, 2, 3, 4, 5, 6 mean 30, 25, 20, 15, 10, 5cm from toe)

3.2. Numerical analysis for one-layered slope

The geometry of this slope is shown in Fig. 3. The final relationship for this slope is obtained:

$$x = 0.5 + 0.02 d + \frac{1+0.015 L^2}{2+0.024 L^2} \quad (2)$$

4. Conclusions

The results obtained from this research can be summarized as below: the optimal location for inserting pile is the middle of slope. In two-layered sandy slopes, in which, the lower layer is stiffer than upper layer, the optimal length for piles is 5 times of pile diameter of failure surface of unreinforced slope, and increasing the pile length more than this amount did not increase factor of safety of slope. In one-layered sandy slopes, the

optimal length for piles is 7 times of pile diameter of failure surface of unreinforced slope, and increasing the pile length more than this amount did not increase factor of safety of slope.

5. References

- Fukuoka M, "The effects of horizontal loads on piles due to landslides", Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977, Tokyo, 27-42.
- Hajiazizi M, Mazaheri AR, "Use of line segments slip surface for optimized design of piles in stabilization of earth slopes", International Journal of Civil Engineering, 1, Transaction B: Geotechnical Engineering, 2015. Ito, T., and Matsui, T. "Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles", Soils and Foundations, 1975, 15 (4), 43-59.
- Ito T, Matsui T, Hong WP, "Design method for the stability analysis of the slope with landing pier", Soils and Foundations, 1979, 19 (4), 43-57.
- Ito T, Matsui T, Hong WP, "Design method for stabilizing piles against landslide one row of piles", Soils and Foundation, 1981, 21 (1), 21-37.
- Kourkoulis R, Gelagoti F, Anastasopoulos I, Gazetas G, "Slope Stabilizing Piles and Pile-Groups: Parametric Study and Design Insights", Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137, 663-677.
- Nguyen DDC, Kim DS, Jo SB, "Parametric study for optimal design of large piled raft foundations on sand", Journal of Computers and Geotechnics, 2014, 55, 14-26.
- Poulos HG, "Design of reinforcing piles to increase slope stability", Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32 (5), 808-818.