

بهینه یابی مکان شمع در پایدارسازی شیب‌های خاکی

محمد حاجی عزیزی*^۱، مسلم باولی^۲

۱- استادیار گروه عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲- دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه

Mhazizi@razi.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۳/۲۱

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۶/۲۴

چکیده- پایدارسازی شیب‌های خاکی و پیشنهاد راهکارهای گوناگون، یکی از مسائل مطرح و مهم در مهندسی ژئوتکنیک است. استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی در پایدارسازی شیب‌های خاکی به کمک شمع، از روش‌های متداولی است که به وسیله پژوهشگران مختلف بررسی شده است. بهینه‌یابی مکان شمع برای پایدارسازی شیب‌های خاکی با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی به وسیله پژوهشگران مختلف، منجر به نتایج متعددی شده است که این سوال را در ذهن طراح مطرح می‌کند که بهترین مکان واقعی برای نصب شمع کجاست؟ به نظر می‌رسد که جای مطالعات آزمایشگاهی برای این منظور خالی است که در این مقاله به عنوان کاری جدید ارائه می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این مقاله قادر است که گروه ایجاد شده در نتایج مختلف و گاه متضاد تحلیل‌های عددی را برای یافتن مکان بهینه‌ی شمع باز کند. این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، برای شیب خاکی ماسه‌ای انجام شده است که به وسیله بارش اشباع می‌شود و پس از آن تحت بارگذاری قرار می‌گیرد. با قرار دادن شمع در مکان‌های مختلف و اشباع کردن شیب خاکی به وسیله بارش و بارگذاری آن‌ها، نتایج قابل توجه و معقولی به دست آمده است که می‌تواند راه‌گشای مناسبی برای طراحان باشد. تمام مدل‌های آزمایشگاهی با استفاده از روش تعادل حدی و روش اجزای محدود نیز مدل‌سازی و مقایسه شده‌اند که تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

واژگان کلیدی: شیروانی خاکی، شمع بتنی، موقعیت بهینه، پایدارسازی.

۱- مقدمه

مختلفی نیز در این زمینه انجام شده است [۱-۱۱]. همه‌ی این مطالعه‌ها نشان می‌دهند که شمع‌ها می‌توانند به عنوان عامل مؤثر برای تثبیت و افزایش ضریب اطمینان شیروانی‌ها در برابر لغزش استفاده شوند. اما سوالی که در این زمینه وجود دارد این است که، بهترین موقعیت شمع در پایدارسازی شیروانی‌های خاکی کجاست؟ تا به حال مطالعات تئوری فراوانی در این زمینه انجام شده است. از این مطالعات تئوری، نتایج متفاوتی هم

همه ساله در زمین لغزش‌های فراوانی رخ می‌دهد و در برخی از موارد، این زمین لغزش‌ها باعث وارد شدن خسارات مالی و حتی جانی شده است. تأمین پایداری شیروانی‌های خاکی، چه شیروانی‌های طبیعی و چه مصنوعی، یک مسأله‌ی اساسی در مهندسی ژئوتکنیک است. استفاده از شمع در شیروانی‌های خاکی یکی از روش‌های متداول در پایدارسازی است که مطالعات

باشند تا بیشترین ضریب اطمینان به دست آید. کای و یوگای [۸] بر اساس روش اجزای محدود سه بعدی نشان دادند که شمع‌ها باید در مرکز شیروانی قرار گیرند تا بیشینه ضریب اطمینان به دست آید. اوسیلیو و همکارانش [۷] یک رویکرد سینماتیکی جداسازی حدی برای جداسازی پایداری شیروانی‌های خاکی به کار گرفتند. آن‌ها نشان دادند که به دلیل آنکه نیروی مورد نیازی که شمع برای پایدار ماندن شیروانی فراهم می‌کند در نزدیکی پنجه کمینه است، بهینه‌ترین موقعیت شمع نزدیک پنجه است. ون و همکارانش [۱۱] با استفاده از برنامه‌ی فلک سه بعدی^۲ نشان دادند که شمع‌ها باید در وسط شیروانی، یعنی جایی که بیشترین فشار به شمع وارد می‌شود قرار گیرند. نیان و همکارانش [۱۳] بر اساس جداسازی حدی به این نتیجه رسیدند که بهینه‌ترین موقعیت شمع در نزدیکی پنجه، یعنی جایی که نیروهای مورد نیاز برای افزایش ضریب اطمینان کمترین مقدار خود را دارند، است. وی و چنگ [۱۴] یک شیروانی مسلح به شمع را با استفاده از فلک سه بعدی مدل کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که موقعیت بهینه شمع‌ها بین وسط شیروانی و وسط سطح گسیختگی بحرانی است. آن‌ها همچنین نشان دادند که در شیروانی ماسه‌ای گسیختگی کم عمق اتفاق می‌افتد و سطح گسیختگی از نزدیکی تاج شروع می‌شود. بنابراین وسط سطح گسیختگی نزدیک به وسط شیروانی است و در نتیجه موقعیت بهینه‌ی شمع‌ها بسیار نزدیک به وسط شیروانی است. اما در حالتی که شیروانی از جنس رس است، گسیختگی عمیق خواهد شد و سطح گسیختگی از تاج دور است، بنابراین وسط سطح گسیختگی از وسط شیروانی قاصله خواهد گرفت و در نتیجه موقعیت بهینه به وسط شیروانی نزدیک نخواهد بود. زینپو و همکارانش [۱۵] مسئله بهینه‌یابی موقعیت شمع را به وسیله‌ی ترکیبی از روش‌های آنالیز حدی و تئوری آیتو

به دست آمده که در برخی از موارد این نتایج متضاد با یکدیگر است.

پولس [۶] با استفاده از روش تعادل حدی به این نتیجه رسید که موقعیت شمع باید در کنار مرکز گوه گسیختگی باشد. لی و همکارانش [۱۰] یک رویکرد ساده شده برای مطالعه‌ی یک ردیف شمع، برای پایداری شیروانی ارائه داد. این رویکرد بر اساس فرمول نویسی غیرهمبسته^۱ است که در آن پاسخ شمع و پایداری شیروانی به صورت جداگانه در نظر گرفته می‌شوند. در این تحلیل نیروهای برشی و لنگرهای خمشی ناشی از حرکت جانبی توده‌ی خاک به وسیله‌ی روش المان مرزی اصلاح شده که قبلاً به وسیله‌ی هول و همکارانش [۱۲] توضیح داده شده بود، محاسبه شده‌اند و برای تعیین سطح گسیختگی بحرانی از روش معمولی بیشاپ ساده شده کمک گرفته شده است. تحلیل انجام شده در حالات زیر صورت گرفته است:

الف) خاک یک لایه: آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در این حالت مؤثرترین موقعیت شمع در پنجه و تاج شیروانی است.

ب) خاک دو لایه (زمانی که لایه بالا متراکم تر از لایه پایین باشد): آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در این حالت مؤثرترین موقعیت شمع بین وسط شیروانی و تاج آن است.

ج) خاک دو لایه (زمانی که لایه پایین متراکم تر از لایه بالا باشد): آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در این حالت مؤثرترین موقعیت شمع در پنجه و تاج شیروانی است.

لازم به ذکر است که با توجه به فرضیه در نظر گرفته شده، این نتایج تنها برای سطوح گسیختگی دایروی است و ممکن است استفاده از سطح لغزش غیر دایروی نتایج را تغییر دهد. هسیوتیس و همکارانش [۹] بر اساس روش دایره اصطکاک توسعه یافته و رویکرد آیتو و ماتسویی [۴-۲] نشان دادند که شمع‌ها باید نزدیک به بالای شیروانی

۲-۱- جعبه آزمایشگاه

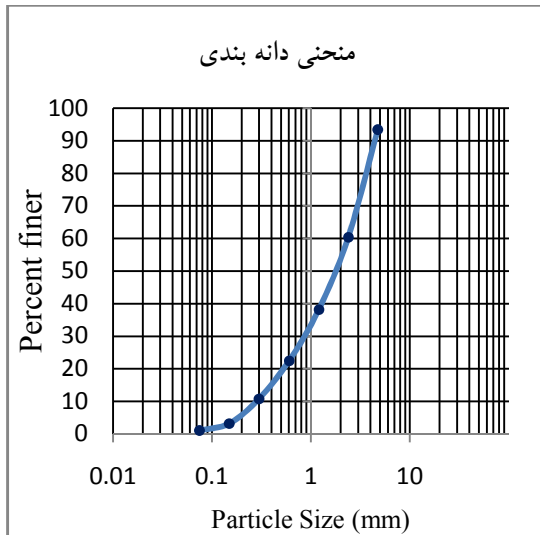
این جعبه همان‌گونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، دارای ۴ قسمت میانی، محفظه تامین آب، محفظه خروج و زهکشی آب، و تابلوی پیزومترهاست.



شکل ۱. جعبه آزمایشگاه و تابلوی پیزومتر جهت ساختن مدل

۲-۲- ماسه

با استفاده از آزمایش برش مستقیم مقدار چسبندگی ماسه برابر صفر و مقدار اصطکاک آن برابر ۳۶ درجه اندازه‌گیری شده است. همچنین منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی استفاده شده برای ساخت شیروانی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار دانه بندی ماسه

و ماتسویی [۴-۲] برای محاسبه‌ی بار جانبی اعمال شده به شمع دنبال کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که موثرترین موقعیت شمع در نزدیکی پنجه است که در آن مکان مقدار نیروی بسیج شده به وسیله‌ی شمع برای رسیدن به ضریب اطمینان مورد نیاز، کمینه است. این نتیجه یه وسیله‌ی اوسیلسو و همکارانش [۷] نیز به دست آمده است. این موضوع به این دلیل است که شکل گسیختگی به صورت اسپیرال لگاریتمی است و هر چه از بالای شیروانی به سمت پنجه می‌رویم، به دلیل افزایش بازوی نیروی تأمین شده به وسیله‌ی شمع، مقدار لنگر مقاوم افزایش می‌یابد. بنابراین برای داشتن یک لنگر ثابت می‌توان با افزایش بازوی لنگر، مقدار نیروی تأمین شده به وسیله‌ی شمع را کاهش داد. این موضوع همچنین نشان می‌دهد که قرارگیری شمع در نزدیکی پنجه، اقتصادی ترین حالت نیز است.

از مطالعه‌ی موارد فوق می‌توان نتیجه گرفت که تحلیل‌های عددی، موقعیت بهینه شمع را نزدیک به وسط شیروانی پیشنهاد می‌کنند در حالی که ترکیب روش تعادل حدی و معادلات آیتو و ماتسویی [۴-۲] موقعیت بهینه را نزدیک به بالای شیروانی پیشنهاد می‌کند و روش جداسازی حدی آن را نزدیک به پنجه‌ی شیروانی پیشنهاد می‌کند [۱۵]. لی و همکارانش [۱۰] بر این باورند که نتایج این تئوری‌ها، باید به وسیله‌ی مدل‌های آزمایشگاهی تأیید شوند که در این مقاله به عنوان کاری نو به آن پرداخته می‌شود.

۲- تجهیزات آزمایشگاه

در این قسمت به توضیح و نمایش جعبه آزمایشگاه، ماسه‌ی استفاده شده برای ساخت مدل، شمع بتنی به منظور مسلح‌سازی و کنترل اشباع شدن ماسه به وسیله‌ی پیزومترها پرداخته می‌شود.

۲-۳- شمع بتنی

شمع استفاده شده در آزمایش‌ها از جنس بتن مسلح است. برای مسلح کردن بتن از مفتول‌هایی به قطر ۲ میلی‌متر استفاده شده است. مفتول‌های استفاده شده در شمع طوری در نظر گرفته شده‌اند که علاوه بر مسلح سازی شمع، ضابطه‌ی کمینه و بیشینه فولاد لازم برای سطح مقطع دایره‌ای بتن (A_s) در نظر گرفته شود. مقدار وزن مخصوص شمع برابر ۲۴ کیلو نیوتن بر مترمکعب، قطر آن برابر ۳/۶ سانتی‌متر و طول آن به اندازه‌ی فاصله‌ی سطح شیب تا نزدیکی کف جعبه آزمایش (به فاصله یک برابر قطر شمع) است تا تأثیر گیرداری شمع و کف جعبه بی‌اثر شود.



شکل ۳. شمع بتنی مورد استفاده در مسلح سازی شیب

تا محل تماس ماسه و جعبه‌ی آزمایش باشد. در صورت افزایش بیشتر شمع تأثیر که بر جداری باکس اعمال خواهد شد، ممکن است نتایج غیر واقعی حاصل شود. بنابراین ۵ برابر شمع مساوی با ۹ سانتیمتر خواهد شد که کوچکتر از نصف عرض جعبه‌ی آزمایش است.

۲-۴- تابلوی پیزومترها

برای تشخیص اشباع شدن نمونه از تابلوی پیزومترها مطابق با شکل ۴ استفاده شده است.



شکل ۴. تابلوی پیزومترها

۳- آزمایش‌های انجام شده

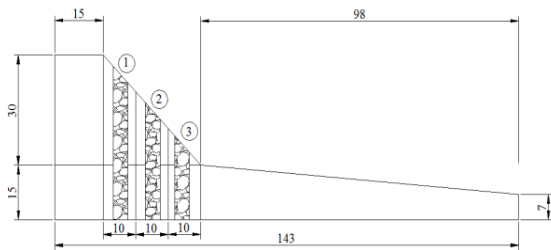
تمامی مدل‌های ساخته شده دارای مشخصات زیر است:

- ۱- برای از بین بردن اصطکاک جداره‌ها، دیواره‌های جعبه آزمایشگاهی قبل از ساخت مدل روغن کاری شده است.
- ۲- در تمامی مدل‌ها، طول تاج ۱۵ سانتی‌متر، زاویه شیروانی ۴۵ درجه، ارتفاع شیب ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع کل مدل ۴۵ سانتی‌متر است (شکل ۵)

علت در نظر گرفتن قطر ۳/۶ سانتی برای شمع، عرض ۲۰ سانتی جعبه‌ی آزمایش است. برای حذف اثر شمع بر دیواره‌های جعبه لازم است که حداقل به اندازه‌ی ۵ برابر شعاع شمع فاصله وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، قطر شمع باید به اندازه‌ی باشد که شعاع تأثیر آن بیشینه حداکثر

(الف) شیروانی غیرمسلح (ب) شیروانی مسلح به شمع در پایین دست (ج) شیروانی مسلح به شمع در بالادست (د) شیروانی مسلح به شمع در وسط.

شکل ۶ موقعیت شمع را در حالات مختلف که به صورت جداگانه در شیروانی قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد. اگر شیب شیروانی را به سه قسمت تقسیم کنیم و شمع را در مرکز هر قسمت قرار دهیم، شعاع تاثیر شمع، کل آن قسمت را تحت تاثیر قرار خواهد داد.



شکل ۶. موقعیت شمع در مرکز هر قسمت از شیروانی

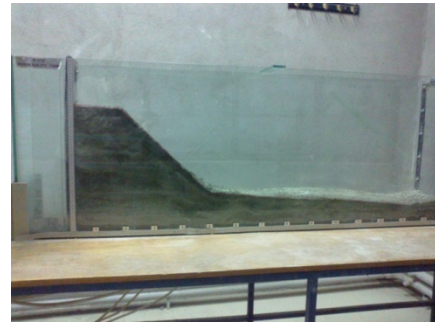
۳-۱- شیروانی غیرمسلح (مدل اول)

در مدل غیر مسلح، شیروانی پس از گذشت ۵۰ دقیقه در اثر اشباع شدن به وسیله بارش مصنوعی گسیخته شد (شکل ۷).



شکل ۷. گسیختگی شیروانی پس از ۵۰ دقیقه در اثر بارش مصنوعی در مدل اول

این آزمایش نشان می‌دهد که این شیروانی در حالت خشک پایدار است و مقدار ضریب اطمینان آن بیشتر از عدد ۱



شکل ۵. مدل ساخته شده در جعبه

۴- همه‌ی مدل‌ها به کمک بارش مصنوعی، اشباع می‌شوند و برای کنترل اشباع شدن از تابلوی پیزومترها استفاده شده است.

۵- آب از طریق مخزن پایین دست زهکش می‌شود. ۶- در تمامی مدل‌هایی که با شمع مسلح شده‌اند، انتهای شمع با کف جعبه به اندازه‌ی قطر شمع فاصله دارد. ۷- وزن مخصوص ماسه قبل از اشباع شدن برابر با ۱۸ کیلو نیوتن بر مترمکعب است و پس از اشباع در جعبه‌ی آزمایش به ۲۱/۵ کیلو نیوتن بر مترمکعب می‌رسد.

۸- روش تراکم در جعبه‌ی آزمایش برای رسیدن به وزن مخصوص ۱۸ کیلو نیوتن بر مترمکعب به این ترتیب بوده است که ابتدا جعبه‌ی آزمایش به صورت شطرنجی خط‌کشی می‌شود. آنگاه با توجه به حجم هر بلوک در جعبه، وزن لازم از ماسه برای رسیدن به وزن مخصوص ۱۸ کیلو نیوتن بر مترمکعب به وسیله‌ی ترازو تهیه می‌شود. در آخر همان وزن تهیه شده در بلوک مشخص شده، به گونه‌ای متراکم می‌شود که در آن حجم معین قرار گیرد. بنابراین وزن مخصوص ۱۸ کیلو نیوتن بر مترمکعب برای شیروانی ماسه‌ای قبل از اشباع شدن حاصل می‌شود. همین مقادیر وزن مخصوص نیز در مدل سازی‌های عددی اعمال شده است.

برای تشخیص بهترین موقعیت شمع در شیروانی، ۴ حالت زیر مدل‌سازی شده است،

مدل با دقت فراوان و به صورت تدریجی تحت بارگذاری قرار گرفت و در پایان تحت فشاری معادل با ۳/۱۲ کیلوپاسکال گسیخته شد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. گسیختگی در مدل دوم تحت فشار ۳/۱۲ کیلوپاسکال

۳-۳-۳- شبروانی مسلح به شمع در بالا دست (مدل سوم)

در این مدل، شمع در موقعیت $x/t=0/75$ قرار داده شد. در این حالت نیز بارندگی به مدت صد دقیقه به طول انجامید. در این مدت هیچ ترک و یا گسیختگی در شبروانی دیده نشد. سپس مدل تحت بارگذاری تدریجی قرار گرفت و تحت فشاری معادل با ۷/۸ کیلوپاسکال گسیخته شد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. گسیختگی در مدل سوم تحت فشار ۷/۸ کیلوپاسکال

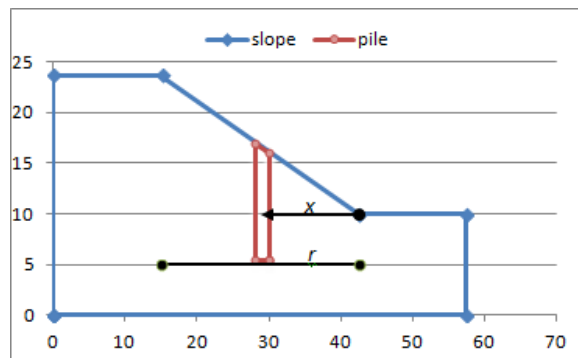
۳-۳-۴- شبروانی مسلح به شمع در وسط (مدل چهارم)

در این مدل شمع در موقعیت $x/t=0/5$ قرار گرفت و به

است اما در اثر اشباع شدن و افزایش فشار آب منفذی، شبروانی ناپایدار شده و مقدار ضریب اطمینان آن کمتر از عدد ۱ می‌شود. بنابراین مسلح سازی چنین شیبی ضروری است تا پس از اشباع شدن، همچنان پایدار بماند.

۳-۲- شبروانی مسلح به شمع در پایین دست (مدل دوم)

این مدل از نظر هندسی مطابق مدل اول است، با این تفاوت که شمع در موقعیت $x/t=0/25$ قرار گرفته است. شکل ۸ موقعیت قرارگیری شمع را نشان می‌دهد.



شکل ۸. موقعیت قرارگیری شمع در شبروانی (x/t)

بارش مصنوعی به مدت صد دقیقه به طول انجامید اما هیچ گونه ترک و یا گسیختگی در شبروانی اتفاق نیفتاد. برای ایجاد گسیختگی در شبروانی، تاج شبروانی تحت بارگذاری قرار داده شد (شکل ۹).



شکل ۹. بارگذاری تدریجی در تاج شبروانی جهت گسیختگی شیب

وسيله‌ی مدل اول در آزمایشگاه نیز پس از ۵۰ دقیقه بارش مصنوعی، دیده شد. همچنین در جدول ۱ مشاهده می‌شود که شیروانی مسلح به شمع، در حالت اشباع و قبل از بارگذاری، پایدار می‌باشد که این موضوع نیز به وسیله‌ی مدل‌های آزمایشگاهی دوم، سوم و چهارم دیده شد. تحلیل‌های عددی نشان می‌دهند که در موقعیت قرارگیری شمع در وسط شیروانی ($x/r=0.5$) بیشترین مقدار ضریب اطمینان حاصل شده است. این نتیجه در آزمایشگاه و قبل از بارگذاری قابل نتیجه‌گیری نیست زیرا قبل از بارگذاری، همه‌ی مدل‌ها در اثر اشباع شدن پایدار بوده‌اند و تشخیص بهترین موقعیت برای شمع در این مرحله امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل تصمیم گرفته شد تا شیروانی تحت بارگذاری قرار گیرد تا روشن شود که تحت چه موقعیتی از قرارگیری شمع، بیشترین مقدار بارگذاری برای گسیختگی شیروانی مسلح، لازم است.

جدول ۲ کمینه فشار لازم برای گسیختگی شیروانی در حالت‌های مختلف قرارگیری شمع با استفاده از نتایج عددی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مقایسه‌ی حداقل فشار لازم جهت گسیختگی شیروانی در آزمایشگاه و روش‌های عددی پس از بارگذاری

موقعیت شمع	حداقل فشار در آزمایشگاه (kPa)	حداقل فشار در برنامه پلکسیس (kPa)	حداقل فشار در برنامه ژئوآفیس (kPa)
$x/r=0.25$	۳/۱۲	۳	۴
$x/r=0.75$	۷/۸	۷/۲	۸/۳
$x/r=0.5$	۱۰/۹	۹/۳	۱۱/۴

همان‌گونه که در جدول ۲ مدیده می‌شود، بیشترین مقدار فشار لازم برای گسیختگی شیروانی در موقعیتی حاصل شده است که شمع در وسط شیروانی قرار گرفته است. این نتیجه توسط آزمایشگاه و روش‌های عددی به طور هم‌زمان تایید شده است. همچنین برای مقایسه‌ی قرارگیری شمع

مدت صد دقیقه تحت بارندگی مصنوعی قرار گرفت. در این مدت هیچ ترک و یا گسیختگی در شیروانی دیده نشد. سپس نمونه تحت بارگذاری تدریجی قرار گرفت و تحت باری معادل با ۱۰/۹ کیلوپاسکال گسیخته شد (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. گسیختگی مدل چهارم تحت فشار ۱۰/۹ کیلوپاسکال

۴- مقایسه نتایج آزمایشگاه و نرم‌افزارهای ژئوآفیس و پلکسیس

برای تصدیق نتایج حاصل از آزمایشگاه، تمامی مدل‌های آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزارهای ژئوآفیس و پلکسیس نیز مدل‌سازی شده است.

جدول ۱. مقادیر ضریب اطمینان با استفاده از برنامه‌های ژئوآفیس و

پلکسیس قبل از بارگذاری

موقعیت شمع	نتایج پلکسیس	نتایج ژئوآفیس
بدون شمع	۰/۸۵۲۶	۰/۹۳۱
$x/r=0.25$	۱/۰۹۴۸	۱/۱۸۵
$x/r=0.75$	۱/۱۹۶۹	۱/۱۹۵
$x/r=0.5$	۱/۴۳۸۴	۱/۳۲۸

جدول ۱ نتایج حاصل از تحلیل پایداری شیروانی را قبل از بارگذاری به کمک برنامه‌های ژئوآفیس و پلکسیس نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که قبل از بارگذاری و در حالت بدون شمع، مقدار ضریب اطمینان کمتر از عدد یک شده است که نشان از ناپایداری شیروانی دارد. این ناپایداری به

پایدارماندن ویا ناپایدارماندنِ شیروانی را تحت تاثیر قرار می دهد.

برای بهینه یابی مکانِ شمع، مدل سازی های مختلفی در آزمایشگاه انجام شده است که به وسیله ی بارش اشباع شده اند و در پایان برای گسیخته شدن تحت بارگذاری قرار گرفته اند. در تمام آزمایش های انجام شده که شیب مسلح شده است، پس از اشباع شدن، پایدار مانده است. به همین دلیل شیروانی تحت بارگذاری قرار گرفته است تا مقدار فشار لازم برای گسیختگی به دست آید. در مدلی که شمع در وسط شیروانی قرار داده شده است و شرایط مدل سازی و بارش مانند مدل های قبل بوده است، بیشترین فشار برای گسیختگی به وسیله ی شیروانی تحمل شده است. این آزمایش ها نشان می دهند که بهترین موقعیت شمع در شیروانی تحت بارگذاری، در وسط شیب است. نتایج حاصل از روش های عددی تایید کننده ی نتایج آزمایشگاه است به گونه ای که با قراردادن شمع در وسط شیروانی، بیشترین فشار برای گسیخته شدن شیروانی لازم است. هر چند که مطالعات غیر آزمایشگاهی بعضی از پژوهشگران [۱۷] وسط شیروانی را به عنوان مناسب ترین مکان برای قرارگیری شمع معرفی کرده است. نتایج حاصل از این مقاله که مناسب ترین مکان برای مسلح سازی در خاک های ماسه ای را وسط شیروانی معرفی می کند، می تواند الهام بخش و راهنما برای مدل های مشابه با توجه به مطالعات تحلیل ابعادی باشد.

۷- مراجع

[1] Fukuoka, M. (1977). "The effects of horizontal loads on piles due to landslides". In: Proceedings of 9th international conference on soil mechanics and foundation engineering, Tokyo, pp 27-42.

در پایین دست و بالادست، بیشترین مقدار فشار لازم برای گسیختگی شمع زمانی حاصل شده است که شمع در بالادست قرار گرفته است. این نتیجه به این علت است که شمع در نزدیکی بارگذاری قرار دارد و بخشی از فشار وارد بر شیروانی برای گسیختگی، به دلیل فاصله ی کم محل بارگذاری و شمع مستهلک می شود که نسبت به موقعیت شمع در پایین دست فشار بیشتری برای گسیختگی لازم است.

۵- تحلیل ابعادی

در نظر گرفتن اثر اندازه ی واقعی به موضوع تحلیل ابعادی مربوط می شود که از نسبت هایی که در جدول زیر آمده است استفاده می شود به طوری که S نسبت مقیاس است [۱۶].

جدول ۳. تبدیل مدل واقعی به آزمایشگاهی به وسیله ی ضریب مقیاس S

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

بنابراین به کمک جدول ۳ می توان هر مدل آزمایشگاهی را تبدیل به مدل واقعی نمود و هر مدل واقعی را در آزمایشگاه مدل سازی نمود. قابل ذکر است که خواص مقاومتی خاک مانند چسبندگی، زاویه ی اصطکاک داخلی و وزن مخصوص، در مدل های واقعی و آزمایشگاهی ثابت هستند و تغییر نمی کنند.

۶- نتیجه گیری

پایدارسازی شیب های خاکی با استفاده از شمع می تواند به عنوان یکی از راهکارهای موثر پیشنهاد شود. انتخاب بهترین مکان برای قراردادن شمع، موضوع مهمی است که

- [11] Won J, You K, Jeong S, Kim S (2005). "Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems". *Comput Geotech* 32:304–315
- [12] Hull, T.S., Lee, C.Y. and Poulos, H.G. (1991). "Mechanics of pile reinforcement for unstable slopes". Research Report No. 636, School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney, Australia.
- [13] Nian TK, Chen GQ, Luan MT, Yang Q, Zheng DF (2008). "Limit analysis of the stability of slopes reinforced with piles against landslide in nonhomogeneous and anisotropic soils". *Can Geotech J* 45(8):1092–1103
- [14] Wei WB, Cheng YM (2009). "Strength reduction analysis for slope reinforced with one row of piles". *Comput Geotech* 36:1176–1185
- [15] Xinpo Li, Xiangjun Pei, Marte Gutierrez, Siming He (2012). "Optimal location of piles in slope stabilization by limit analysis". *Acta Geotechnica* 7:253–259
- [16] Harris, H.G, Sabnis, G.M., (1999). "Structure modeling and experimental technique 2nd", CRC Press.
- [17] Hajiazizi M., MAzaheri A.R., (2015). "Use of Line segment slip surface for optimized design of piles in stabilization of the earth slopes". *International Journal of Civil Engineering*, 13(1), 1-10.
- [2] Ito T, Matsui T (1975). "Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles". *Soils Found* 15:43–59
- [3] Ito T, Matsui T, Hong WP (1979). "Design method for the stability analysis of the slope with landing pier". *Soils Found* 19(4):43–57
- [4] Ito T, Matsui T, Hong WP (1981). "Design method for stabilizing piles against landslide—one row of piles". *Soils Found* 21(1) 21–37
- [5] Ito T, Matsui T, Hong WP (1982). "Extended design method for multi-row stabilizing piles against landslide". *Soils Found* 22(1)1–13
- [6] Poulos H.G (1995). "Design of reinforcing piles to increase slope stability". *Can Geotech J* 32(5):808–818
- [7] Ausilio E, Conte E, Dente G. (2001). "Stability analysis of slopes reinforced with piles". *Comput Geotech* 28:591–611
- [8] Cai F, Ugai K (2000). "Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles". *Soils Found* 40(1):73–84
- [9] Hassiotis S, Chameau JL, Gunaratne M (1997). "Design method for stabilization of slopes with piles". *J Geotech Geoenviron Eng ASCE* 123(4):314–323
- [10] Lee CY, Hull TS, Poulos HG (1995). "Simplified pile-slope stability analysis". *Comput Geotech* 17:1–16.

Optimal Location of pile in Stabilization of Earth Slope

M. Hajiazizi^{1*}, M. Bavali²

1- Assistant Prof., Geotechnical Eng. Dept., Faculty of Civil, Razi University

2- M.Sc. of Geotechnical Engineering, Razi University

mhazizi@razi.ac.ir

Abstract:

Stability analysis of earth slopes is among the major issues raised in geotechnical engineering which has involved so many researchers in different parts of the world. When stability of an earth slope is suspected, it is necessary to take preventive measures before instability happens. The first step to maintain the stability of an earth slope is performing excavation in the slope crest or/and filling in the slope toe. This is the cheapest way (model) for stabilization of earth slopes. If the model cannot provide the required factor of safety, it is necessary to use other stabilization methods. Numerical and laboratory methods are useful for modeling earth slopes stabilization. Modeling the stability of earth slopes using numerical methods is a common practice in geotechnical engineering. Moreover, stabilization of earth slopes using piles has been practiced by many researchers by using numerical and analytical methods. Although numerical and analytical methods have special capabilities, laboratory modeling is more reliable. Hence, it is discussed in this article. Stabilization of earth slopes with reinforced concrete piles is one of the important concerns of geotechnical engineering. Application of numerical and analytical methods to stabilization of earth slopes using piles is an issue commonly discussed by various researchers. Optimal location of concrete pile for stabilization of earth slope by means of numerical and analytical methods, has been practiced by various researchers. Their efforts have led to various results raising the question of what the optimal place for installation of a pile is. It seems that no experimental studies are conducted in this regard, which is discussed in this article. Experimental studies conducted in this article have the potential to solve the problem caused by varying and sometimes contradictory results of numerical analyses performed to find the optimal pile location. In this article, an experimental analysis of a homogeneous sand earth slope is conducted. The slope is saturated through precipitation and failure after loading by installing the reinforced concrete pile in different locations. All of the experimental tests were modeled and compared using the limit equilibrium (LE) and finite element (FE) methods, which are compliant with each other. The results obtained by experimental tests show the optimal location for installing reinforced concrete pile in a homogeneous sand slope for achieving the highest factor of safety and reduce costs of stabilization.

In the present article, the optimal pile location for slope stabilization is determined by conducting laboratory studies of a layer sand slope saturated through precipitation. The resultant failure mechanism leads to acceptable results that help choose the optimal location for pile installation. The slope is stabilized by repeating the test and installing the pile in the optimal location, which is the best place to install the pile. The FE method (Plaxis software) and LE method were used to confirm the laboratory tests as well.

Keywords: Earth Slope, Concrete Pile, Optimal location, Stabilization.