

بررسی آزمایشگاهی تأثیر میزان چسبندگی در پایداری شیب‌های خاکی مسلح با ستون سنگی

محمد حاجی عزیزی^{۱*}، مسعود نصیری^۲

۱- دانشیار گروه عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه

*mhazizi@razi.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۳/۱۶]

تاریخ دریافت: [۹۴/۰۸/۰۹]

چکیده - پایداری سازی شیب‌های طبیعی یکی از مسائل حائز اهمیت در مهندسی ژئوتکنیک است. استفاده از راهکارهای مفید، ساده و مقرون به صرفه در پایدار سازی شیب‌های خاکی ضروری است، چرا که امروزه در طبیعت با توجه به پیشرفت و توسعه‌ی ساخت و ساز در نواحی شیب‌ها، پایدار سازی شیروانی‌های مشکوک و کسب اطمینان از مقاومت کافی آن‌ها در برابر بارهای وارد شده یکی از چالش‌های اساسی پیش روی مهندسی است. استفاده از روش‌های متداول پایدار سازی شیروانی‌ها بسته به شرایط محیطی، اهمیت محل مورد نظر و درجه ناپایداری آن، هزینه‌های مصرفی مصالح موجود، امکانات و غیره بسیار متنوع است. یکی از روش‌های متداول و مناسب برای مسلح کردن شیروانی‌های خاکی استفاده از ستون‌های سنگی است. استفاده از ستون‌های سنگی به عنوان یکی از روش‌های پایدار سازی و افزایش ضریب اطمینان شیروانی‌های خاکی مطرح می‌شود که علاوه بر سادگی و راحتی اجرا، از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است. هدف از انجام این پژوهش مطالعه‌ی آزمایشگاهی بررسی مقدار چسبندگی بر پایداری شیروانی‌های خاکی مسلح با ستون سنگی است که نتایج حاصل از آن علاوه بر جدید بودن به عنوان یک کار پژوهشی تأمل برانگیز است؛ این کار با استفاده از ساخت مدل شیروانی ماسه‌ای و اشباع آن به کمک بارش و سپس اعمال بارگذاری صورت گرفته است. سپس نتایج به دست آمده به کمک روش اجزای محدود (نرم افزار PLAXIS^{2D}) و روش تفاضل محدود (نرم افزار FLAC^{3D}) مورد تأیید قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاه و تحلیل‌های عددی نشان داده‌اند که ۵ درصد خاک ریزدانه‌ی چسبنده تأثیر چشمگیری در افزایش پایداری شیروانی مسلح شده با ستون سنگی دارد. نتایج به دست آمده از تحلیل‌های عددی هماهنگی خوبی با مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی دارند.

واژگان کلیدی: شیروانی خاکی، ستون سنگی، مقدار چسبندگی، پایدار سازی.

۱- مقدمه

فهم پایداری شیروانی‌ها نیاز است تا دانش بشری در مورد موضوعاتی از قبیل روش‌های تحلیلی، ابزارهای تحقیقی و اکتشافی و روش‌های پایدار ساز افزایش یابد. روش‌های پایدار سازی شامل تکنیک‌های ویژه‌ای است که باید به خوبی شناخته شده و به صورت واقعی و عملی نیز قابل مدل‌سازی باشند [1]. استفاده از ستون‌های سنگی به عنوان یکی از روش‌های پایدار سازی و افزایش ضریب اطمینان شیروانی‌های خاکی مطرح می‌شود که علاوه بر سادگی و راحتی اجرای آن در شیب‌های

مشکلات پایداری شیب‌های خاکی از دیرباز مورد توجه بوده است چرا که در طول تاریخ چه عوامل انسانی و چه عوامل طبیعی سبب برهم خوردن تعادل شیب‌های خاکی طبیعی شده‌اند. در سال‌های اخیر تقاضای رو به رشد برای شیب‌های خاکریزی و خاکبرداری شده که محل ساخت و ساز پروژه‌های عمرانی است، نیاز به درک بیشتر موضوعات پایداری شیروانی را بیش از پیش افزایش داده است. برای درک بیشتر

خاک دو لایه به این نتیجه رسیدند که در صورتی که لایه‌ی زیرین متراکم‌تر باشد، اثر ستون سنگی بسیار چشمگیر خواهد بود و در چنین خاک‌هایی، عملکرد ستون سنگی به طور چشمگیری به ضخامت لایه‌ی ضعیف‌تر فوقانی بستگی دارد، هر چقدر که ضخامت این لایه بیشتر باشد، توانایی ستون سنگی کاهش می‌یابد. امبلی و گاندهی [10] با مطالعه‌ی آزمایشگاهی و تحلیل عددی دریافتند که علت اصلی بهبود خاک مسلح شده با ستون سنگی، سختی بالاتر ستون سنگی نسبت به خاک اطرافش است. بنابر مطالعات بابو و همکاران [11] طول بحرانی ستون سنگی (کوتاه‌ترین ستونی که می‌تواند بار نهایی را تحمل کند) بین چهار تا پنج برابر قطر ستون است. پژوهش‌های چوب بستی و همکاران [12] نشان داد که عملکرد ستون‌های سنگی به صورت چشمگیری به فاصله بین ستون‌ها از هم بستگی دارد و تنش‌های اعمالی هم با فاصله گرفتن از ستون‌های سنگی کاهش پیدا می‌کنند. نتایج پژوهش‌های تبرساز و سروش [13] نشان داد که شکم دادگی ستون که به گسیختگی آن منجر می‌شود، در قسمت‌های بالایی ستون (بین دو تا چهار برابر قطر از سر ستون) اتفاق می‌افتد. مَهتسی و سامانتا [14] با آزمایش روی ستون‌های سنگی در خاک لایه‌ای نشان دادند که رفتار ستون‌های سنگی در چنین خاک‌های غیر همگنی به طور چشمگیری وابسته به لایه‌ی بالایی خاک است و شرایط خاک فوقانی تعیین‌کننده‌ی وضعیت رفتاری ستون سنگی است. نظری افشار و قضاوی [15] برای بهبود عملکرد ستون‌های سنگی از پوشش مسلح‌کننده‌ی ژئوتکستایل دور آن استفاده کردند، استفاده از این غلاف مسلح‌کننده سبب افزایش ظرفیت باربری نهایی ستون می‌شود. یو و همکاران [16] پیشنهاد داده‌اند که برای جلوگیری از شکم‌دادگی ستون از یک غلاف مسلح‌کننده استفاده شود. در پژوهش خبازیان و همکاران [17] دو راهکار برای افزایش سختی ستون سنگی پیشنهاد شده است؛ یکی استفاده از غلاف به دور ستون سنگی و دیگری استفاده از دوغاب سیمان در ستون سنگی.

هدف از این مقاله، بررسی تأثیر میزان چسبندگی خاکریز و مقدار آن در بهبود عملکرد ستون سنگی در شیب‌های خاکی می‌باشد. نوع‌آوری این پژوهش، استفاده از ستون سنگی در شیبی دو لایه با تراکم‌های متفاوت دارای چسبندگی می‌باشد. این کار با

پرخاطر، از نظر اقتصادی نیز نسبت به سایر روش‌های اجرایی، مقرون به صرفه است چرا که تهیه‌ی مصالح ستون سنگی هزینه‌های زیادی را در بر نخواهد داشت. از جمله دلایل مناسب بودن ستون سنگی می‌توان به افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست، افزایش مقاومت برشی (در خاک‌های سیلتی و رسی)، کنترل روانگرایی و زهکشی (به دلیل نفوذ پذیری بالا) اشاره کرد.

ستون سنگی نخستین بار در فرانسه و در سال ۱۸۳۰ اجرا شده است [2]. از ستون‌های سنگی می‌توان برای پایداری و جلوگیری از زمین لغزش استفاده کرد [3]. پایدار سازی شیروانی‌های اطراف بزرگراه‌های آلاسکا، کالیفرنیا، فلوریدا، آیووا، کنتاکی، می‌سی‌سی‌پی، نیویورک، تگزاس، داکوتای جنوبی، ویرجینیا و ویسکونسین به کمک ستون‌های سنگی انجام شده است [4]. وکلی و همکاران [5] ظرفیت باربری و نشست شیروانی خاکی مسلح با ستون سنگی را به کمک مدل آزمایشگاهی به دست آوردند و به این نتیجه رسیدند که با کاهش فاصله‌ی بین ستون‌های سنگی، ظرفیت باربری افزایش و نشست کاهش می‌یابد. یکی از نتایج حاصل از مقاله وان تائیک و همکاران [6] که با تحلیل‌های پایداری شیروانی همگن متراکم به همراه در نظر گرفتن نفوذ بارش آب داخل خاک به کمک نرم افزار ژئواسلپ انجام شده، این بوده است که افزایش مقدار چسبندگی در خاک سبب افزایش چشمگیر ضریب اطمینان می‌شود. ابوشرار و ژی هان [7] با تحلیل دو بعدی اثر ستون سنگی بر روی شیروانی خاکی پارامترهای متفاوتی از قبیل فاصله ستون‌ها، زاویه اصطکاک، چسبندگی، اثر آب، ارتفاع خاکریز و ضخامت ستون را بررسی کردند که مهمترین نتایج آنان این بوده که افزایش چسبندگی خاکریز سبب افزایش ضریب اطمینان می‌شود. پژوهشگران متعددی در مورد موقعیت بهینه شمع در شیروانی‌ها تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی انجام دادند که نتیجه کلی آن پژوهش‌ها این است که بهترین محل برای قرارگیری شمع در شیروانی خاکی وسط شیروانی است. حاجی عزیزی و باولی [8] با انجام آزمایش‌هایی روی شیب ماسه‌ای به این نتیجه دست یافتند که بهینه‌ترین محل برای قرارگیری شمع، وسط شیروانی است.

شیواشانکار و همکاران [9] با مطالعه‌ی آزمایشگاهی روی

شکل (۳) نمودار دانه‌بندی ماسه

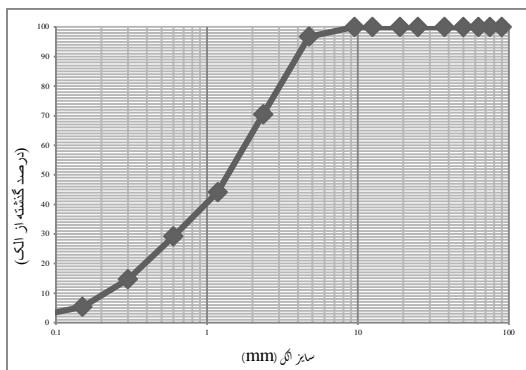


Fig. 3. Grain size distribution for modeled sand

جدول (۱) مشخصات ماسه

First layer unite weight (Dry condition)	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
First layer unite weight (Saturated condition)	$\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$
Second layer unite weight (Dry condition)	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
Second layer unite weight (Saturated condition)	$\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$
First layer internal friction angle (Dry condition)	49°
First layer internal friction angle (Saturated condition)	45°
Second layer internal friction angle (Dry condition)	47°
Second layer internal friction angle (Saturated condition)	43°
Cohesion	5 K Pa
Elastic modulus (E)	30 M Pa
Specific gravity (G_s)	2.65
Poisson's ratio	0.30
Maximum void ratio	0.6
Minimum void ration	0.3

Table 1. Sand properties

۲-۳- ستون سنگی

مصالح ستون سنگی در شکل (۴) نشان داده شده است. برای ساخت ستون سنگی از غلافی پلاستیکی به قطر ۳/۶ سانتی‌متر (برای حذف اثر شعاع تأثیر با توجه به محدودیت عرض جعبه این قطر انتخاب شد، تا با فاصله داشتن ستون به اندازه ۵ برابر شعاع آن از جداره‌ها اثر جداره‌های جعبه بر ستون سنگی از بین برود) استفاده شد که پیش از ساخت مدل، آن را در محل مورد نظر قرار داده و در حین ساخت مدل در هر مرحله با توجه به میزان وزن مخصوص ستون،

استفاده از ساخت مدل شیروانی ماسه‌ای و اشباع آن به کمک بارش و سپس اعمال بارگذاری صورت گرفته است.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

در این بخش، توضیحاتی در مورد وسایل مورد استفاده در آزمایشگاه برای انجام فرآیند مدل‌سازی که عبارتند از جعبه‌ی آزمایش، ماسه‌ی استفاده شده و مصالح ستون سنگی به همراه مشخصات آن‌ها ارائه می‌شود.

۱-۲- جعبه آزمایش

مطابق شکل (۱)، این جعبه شامل چهار قسمت می‌باشد که عبارتند از: قسمت تأمین آب، قسمت میانی (محل ساخت مدل)، قسمت خروجی (زهکشی) آب و تابلوهای پیزومتر (برای اطمینان از اشباع شدن شیروانی).

شکل (۱) جعبه‌ی انجام آزمایش



Fig. 1. Experimental modeling test box

۲-۲- ماسه‌ی مورد استفاده در ساخت شیروانی

شکل (۲) نمونه‌ی ماسه‌ی به کار رفته در مدل‌سازی را نشان می‌دهد. به کمک آزمایش برش مستقیم زاویه‌ی اصطکاک خاک در حالت خشک ۴۷ درجه و مقدار چسبندگی خاک ۵ کیلوپاسکال به دست آمده است. منحنی دانه‌بندی ماسه در شکل (۳) و مشخصات ماسه‌ی مورد نظر در جدول (۱) آورده شده است.

شکل (۲) نمونه‌ی ماسه استفاده شده در ساخت شیروانی



Fig. 2. Sand sample used in experimental modeling

و زاویه‌ی شیروانی هم با توجه به اینکه زاویه‌ی اصطکاک داخلی ماسه‌ی خشک ۴۷ درجه به دست آمده، برای برقراری تعادل در حین ساخت ۴۵ درجه انتخاب شده است. ارتفاع شیب ۳۰ سانتی‌متر است و ارتفاع کلی مدل ساخته شده ۴۵ سانتی‌متر است.

۳- پس از ساخت مدل، برای جلوگیری از آب شستگی سطح شیروانی از یک لایه‌ی نازک دوغاب روی سطح شیب استفاده شده است.

۴- اشباع کردن مدل به کمک بارش مصنوعی صورت گرفته است.

۵- عملیات زهکشی و خروج آب مخزن از طریق قسمت پایین دست جعبه‌ی آزمایش انجام می‌شود.

۶- در شیروانی مسلح، انتهای ستون سنگی به اندازه‌ی ۵ سانتی‌متر (حدود ۱/۴ برابر قطر ستون) از کف جعبه فاصله دارد. این کار برای بر طرف کردن موضوع گیرداری در کف انجام شده است. همچنین میزان نفوذ ستون در لایه‌ی متراکم‌تر زیرین به اندازه ۳ برابر قطر ستون بوده است.

۷- لایه‌های ماسه به صورت دو لایه‌ای اجرا شده‌اند که لایه زیرین دارای ۱۵ سانتی‌متر ضخامت، و لایه فوقانی دارای ۳۰ سانتی‌متر ضخامت است که وزن مخصوص خشک در لایه‌ی زیرین ۲۰ کیلونیوتن بر متر مکعب و در لایه‌ی بالایی برابر ۱۸ کیلونیوتن بر متر مکعب است. همچنین مقدار وزن مخصوص ستون سنگی در شیروانی مسلح، ۱۷ کیلونیوتن بر متر مکعب است.

۸- روش تراکم مصالح در جعبه اینگونه بوده است که ابتدا جعبه‌ی آزمایش را به صورت شطرنجی خط کشی کرده، سپس با توجه به حجم هر بلوک، وزن لازم برای رسیدن به وزن مخصوص مورد نظر در هر لایه به وسیله‌ی ترازو اندازه‌گیری می‌شود. پس از قرارگیری وزن اندازه‌گیری شده، این مقدار از ماسه در بلوک مورد نظر ریخته شده و تراکم انجام می‌شود تا حجم بلوک کاملاً پُر شود. برای اطمینان از درستی وزن مخصوص به دست آمده در حین کوبش، پیش از انجام آزمایش ظرفی را در یکی از بلوک‌های مشخص شده قرار داده، پس از تکمیل عملیات کوبش، ظرف وزن می‌شود و با توجه به حجم

شبن مورد نیاز را درون آن ریخته و عملیات تراکم و کوبش انجام می‌شود. دانه‌بندی شبن به گونه‌ای است که از ال‌ک شماره‌ی ۰/۵ اینچ عبور کرده و روی ال‌ک شماره‌ی ۴ باقی مانده باشند. مشخصات شبن در جدول (۲) ارائه شده است.

شکل (۴) شبن استفاده شده در ساخت ستون سنگی



Fig. 4. Gravel used in stone column

جدول (۲) مشخصات مصالح ستون سنگی

Unite weight (Dry condition)	$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$
Unite weight (Saturated condition)	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
Internal friction angle (Dry condition)	41°
Internal friction angle (Saturated condition)	37°
Cohesion	0.0
Elastic modulus (E)	100 M Pa
Specific gravity (G_s)	2.60
Poisson's ratio	0.20
Maximum void ratio	0.75
Minimum void ration	0.35

Table 2. Characteristics of stone column material

۳- آزمایش‌های انجام شده

به منظور بررسی اثر ستون سنگی در شیروانی خاکی دو نوع مدل ساخته و مطالعه شد، مدل اول شامل شیروانی خاکی غیر مسلح و سپس انجام عملیات بارش و اشباع است و مدل دوم شامل شیروانی مسلح به کمک ستون سنگی در وسط شیروانی و انجام عملیات بارش و اشباع نمونه است. مشخصات و شرایطی که در زیر ارائه می‌شود برای هر دو مدل مشابه و یکسان است.

۱- برای از بین بردن اثر اصطکاک جداره‌های جعبه، پیش از شروع کار آن‌ها را به روغن آغشته کرده تا اصطکاک آن با ماسه از بین برود.

۲- طول تاج شیروانی در هر دو مدل ۳۰ سانتی‌متر انتخاب شد

شکل (۷) شیروانی غیر مسلح ساخته شده



Fig. 7. Unreinforced modeled slope

شکل (۸) ایجاد ترک در وسط شیروانی غیر مسلح اشباع

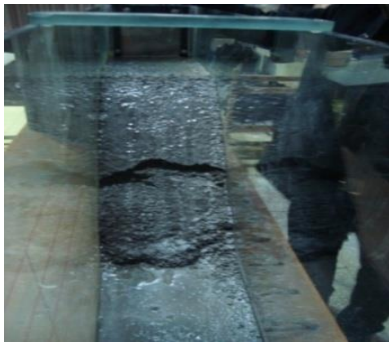


Fig. 8. Crack propagation in middle of saturated unreinforced slope

شکل (۹) گسیختگی کامل شیروانی غیر مسلح اشباع



Fig. 9. Completed rupture of saturated unreinforced slope

این موضوع که ترک در وسط شیروانی ایجاد شده است خود اثباتی بر این مدعا است که موقعیت بهینه‌ی قرارگیری ستون سنگی در وسط شیروانی است، چرا که بیشترین تغییر مکان ایجاد شده در شیروانی در وسط آن است و بهترین محل قرارگیری مسلح کننده همین محل است تا از ایجاد این تغییر مکان‌ها شکل (۸) جلوگیری به عمل آید.

۳-۲- شیروانی مسلح

با توجه به پژوهش‌های گذشته [۱۸، ۱۹، ۲۰] و نکاتی که در بخش قبل اشاره شد، محل بهینه‌ی قرارگیری ستون سنگی در وسط شیروانی است، به همین دلیل برای انجام آزمایش در شیروانی مسلح، ستون سنگی در وسط شیروانی قرار داده شد. برای این کار ابتدا جداره‌های داخلی و خارجی غلاف ستون را به روغن آغشته کرده (این کار به منظور تسهیل

آن، به راحتی وزن مخصوص ماسه موجود در آن به دست می‌آید، که نتیجه‌ی حاصل شده هماهنگی بسیار مناسبی با میزان مورد انتظار دارد، به گونه‌ای که برای لایه‌ی زیرین که دارای وزن مخصوص ۲۰ کیلونیوتن بر متر مکعب بوده، وزن مخصوص به دست آمده از داخل ظرف ۱۹/۹۸ کیلونیوتن بر متر مکعب به دست آمد. این مطلب در شکل (۵) نشان داده شده است.

شکل (۵) قرارگیری ظرف و کوبش ماسه درون آن



Fig. 5. Placement of a can and compaction of sand in it

۳-۱- شیروانی غیر مسلح

هندسه‌ی این شیب در شکل (۶) نشان داده شده است. پس از ساخت شیروانی غیر مسلح و ریختن لایه‌ی نازک دوغاب روی سطح شکل (۷)، شیروانی از نظر پایداری بدون مشکل بوده است و این موضوع نشان می‌دهد که در حالت خشک ضریب اطمینان مدل ساخته شده بیش از عدد ۱ است. سپس مدل تحت بارش مصنوعی قرار داده شد که این شیروانی پس از گذشت حدود ۴۰ دقیقه از فرآیند اشباع، دچار ترک‌هایی در وسط شیروانی شد و پس از گذشت دقایقی گسیختگی کامل در آن رخ داد. شکل‌های (۸) و (۹) گسیختگی در وسط شیروانی و شکست کامل را نشان می‌دهند. این موضوع نشان می‌دهد ضریب اطمینان شیروانی پس از عملیات اشباع کاهش پیدا می‌کند و به مقداری کمتر از عدد ۱ می‌رسد.

شکل (۶) هندسه شیروانی غیر مسلح

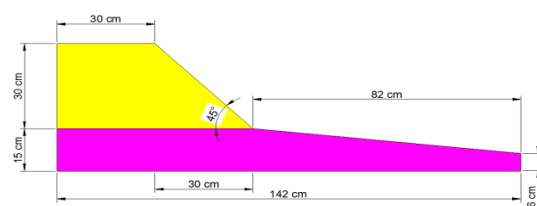


Fig. 6. Geometry of unreinforced slope

شیروانی به صورت تدریجی بارگذاری شد و مقاومت بسیار خوبی از خود نشان داد تا در نهایت در بار ۱۶۰ کیلوگرم (معادل ۵۲ کیلوپاسکال) دچار گسیختگی شد. پس از گسیختگی مدل، این سوال مطرح شد که علت مقاومت فوق العاده شیروانی چیست؟ در ابتدا میزان وزن مخصوص لایه‌ها بررسی شد که مشخص شده لایه‌ی زیرین که در ابتدا دارای وزن مخصوص ۲۰ کیلونیوتن بر متر مکعب بوده است، پس از اشباع و بارگذاری دارای وزن مخصوص ۲۶ کیلونیوتن بر متر مکعب شده است و لایه‌ی بالایی که در ابتدا وزن مخصوص ۱۸ کیلونیوتن بر متر مکعب داشته است، اکنون دارای مقدار ۲۲ کیلونیوتن بر متر مکعب است. سپس دانه‌بندی خاک ماسه‌ای انجام شد. مهمترین نکته در این زمینه مقدار ریزدانه (عبوری از الک شماره ۲۰۰) است. ریزدانه‌ی موجود در خاک ماسه‌ای در حدود ۵ درصد است (به نظر می‌رسد این مقدار صحیح است زیرا بخشی از ریزدانه به هنگام الک کردن و وزن کردن از بین می‌رود از طرفی بخش دیگری از ریزدانه ممکن است به ماسه‌ها چسبیده باشد و در برآوردها لحاظ نشده باشد). به منظور تأثیر مقدار ریزدانه بر افزایش پایداری شیروانی، ماسه‌ی شسته شده‌ای که مقدار ریزدانه‌ی آن در حدود صفر درصد است، دوباره تحت آزمایش و تحلیل عددی با نرم افزار فلک سه بعدی قرار گرفت. شرایط ساخت مدل و مسلح کردن شیب، دقیقاً مانند قبل بوده است. این شیروانی نیز دوباره تحت بارگذاری قرار گرفت و تحت بار ۷۴ کیلوگرم گسیخته شد. این تفاوت مقدار بارگذاری (۱۶ کیلوگرم) ناشی از تأثیر مقدار ریزدانه در شیب ماسه‌ای است. برای اثبات درستی تأثیر چشمگیر مقدار ۵ درصد ریزدانه به کمک نرم افزار فلک سه بعدی تحلیل‌های دیگری نیز انجام شد که در بخش‌های بعد به آن‌ها اشاره می‌شود.

۴- مقایسه‌ی نتایج مدل سازی‌های آزمایشگاهی با نتایج تحلیل‌های عددی

به منظور مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های انجام شده با تحلیل‌های عددی، از نرم افزار PLAXIS^{2D} نسخه‌ی ۸ و نرم افزار FLAC^{3D} نسخه‌ی ۵ استفاده شد. نتایج تحلیل‌های عددی

در بیرون کشیدن غلاف پس از اتمام ساخت انجام می‌شود) و پیش از آغاز کار، آن را در محل مورد نظر (روی لایه‌ی ۵ سانتی متری اول) قرار داده و همراه هر لایه خاکریزی و تراکم، مصالح ستون را درون غلاف ریخته و متراکم می‌شود. پس از اتمام ساخت مدل به آرامی و با احتیاط کامل غلاف بیرون کشیده می‌شود. در انتهای کار، روی سطح شیروانی (دامنه شیب) لایه‌ی دوغاب نازکی ریخته تا از آب شستگی شیب ممانعت شود. شکل (۱۰) هندسه و شکل (۱۱) مدل ساخته شده‌ی شیروانی مسلح را نشان می‌دهد.

شکل (۱۰) هندسه شیروانی مسلح با ستون سنگی

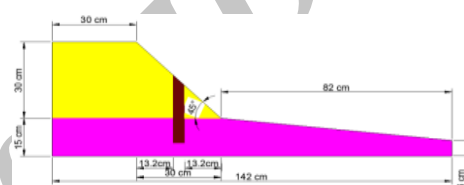


Fig. 10. Geometry of reinforced slope using stone column

شکل (۱۱) ساخت شیروانی مسلح با ستون سنگی



Fig. 11. Constructing reinforced slope using stone column

پس از تکمیل ساخت مدل، شیروانی را تحت بارش مصنوعی قرار داده و پس از اشباع کامل بیش از ۹۰ دقیقه هیچ گونه ترک‌ی در شیروانی روی نداد پس می‌توان نتیجه گرفت پس از تسلیح با ستون سنگی ضریب اطمینان شیروانی افزایش یافته و به بیش از عدد ۱ رسیده است. برای ایجاد گسیختگی در شیروانی قسمت تاج آن تحت بارگذاری به صورت تدریجی قرار داده می‌شود. شکل (۱۲) بارگذاری را روی تاج شیروانی نشان می‌دهد.

شکل (۱۲) بارگذاری تدریجی اعمالی به شیروانی مسلح



Fig. 12. Gradual loading on slope crest

شکل (۱۶) تغییر شکل‌های ایجاد شده در شیب غیر مسلح

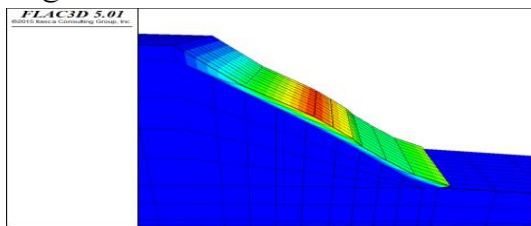


Fig. 16. Deflections created in unreinforced slope

در مرحله بعد با نرم‌افزار PLAXIS^{2D} شیروانی مسلح با قرار دادن ستون سنگی در وسط شیروانی مدل شد. در این نرم افزار از حالت کرنش مسطح با المان ۱۵ گرهی و شرایط زهکشی شده استفاده شد. با انجام تحلیل پس از اشباع، شیروانی پایدار بود؛ سپس اقدام به اعمال بارگذاری در مدل شد، مقدار بار بحرانی برای گسیختگی این شیب ۵۱ کیلو پاسکال به دست آمد که هماهنگی خوبی با مقدار ۵۲ کیلو پاسکال در آزمایشگاه دارد. در جدول (۳) مشخصات مدل نشان داده شده است؛ شکل (۱۷) تحلیل این شیروانی را نشان می‌دهد.

جدول (۳) مشخصات مصالح در نرم افزار PLAXIS^{2D}

Element Type	γ KN/m ³	$\text{sat}\gamma$ KN/m ³	E KN/m ²	ν	C KN/m ²	ϕ	Model
First Layer	20	26	3e4	0.3	5	49	M-C
Second Layer	18	22	3e4	0.3	5	47	M-C
Stone column	17	20	1e5	0.2	-	-	Linear Elastic

Table3. Properties of model in PLAXIS software

شکل (۱۷) گسیختگی شیروانی مسلح در PLAXIS^{2D}

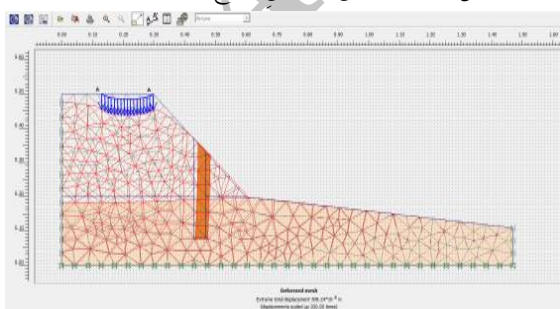


Fig. 17. Rupture of reinforced slope in PLAXIS^{2D}

در گام بعدی به کمک نرم‌افزار FLAC^{3D} همین شیروانی مسلح تحلیل شد. بار بحرانی برای گسیختگی شیروانی ۵۰/۸ کیلو پاسکال به دست آمد. مشخصات مدل در جدول (۴)

به خوبی تصدیق کننده‌ی نتایج مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی است.

در ابتدا با نرم‌افزار FLAC^{3D} با همان مشخصاتی که در بخش ۳ اشاره شد، شیروانی غیر مسلح را در حالت خشک مدل‌سازی کرده و مقدار ضریب اطمینان ۱/۱۷ به دست آمد و شیروانی در این حالت پایدار بود. سپس شیروانی در حالت اشباع مدل‌سازی شد، در حالت اشباع شیروانی دچار حالت گسیختگی شد و مقدار ضریب اطمینان آن ۰/۹۶ به دست آمد. این دو مورد مانند آنچه بود که در آزمایشگاه مشاهده شد. شکل‌های (۱۳ تا ۱۶) تحلیل شیروانی غیر مسلح را نشان می‌دهند.

شکل (۱۳) هندسه‌ی شیروانی غیر مسلح

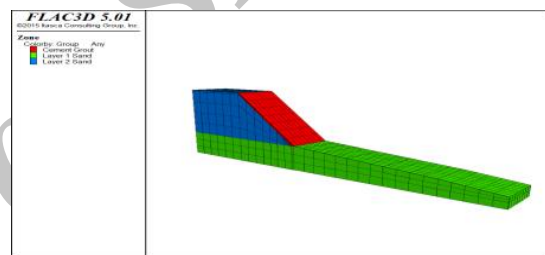


Fig. 13. Geometry of unreinforced slope

شکل (۱۴) ضریب اطمینان شیروانی غیر مسلح در حالت خشک

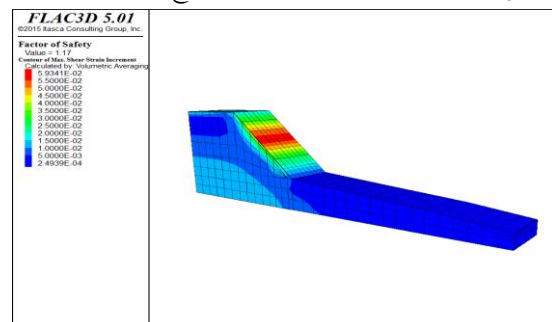


Fig. 14. Unreinforced slope factor of safety in dry condition

شکل (۱۵) ضریب اطمینان شیروانی غیر مسلح در حالت اشباع

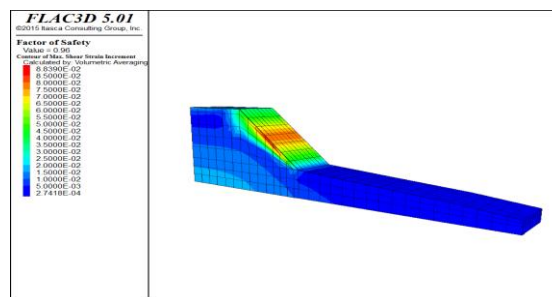


Fig. 15. Unreinforced slope factor of safety in saturated condition

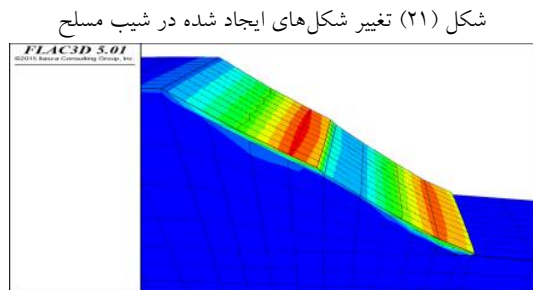


Fig. 21. Deflections created in reinforced slope

نتایج هر دو تحلیل هماهنگی خوب و قابل قبولی با شرایط آزمایشگاهی داشته‌اند چرا که مدل‌سازی آزمایشگاهی دارای برخی خطاهای غیر قابل کنترل از جمله تأثیر جداره‌های کناره (حتی در حالت آغشته شده به روغن) و عملکرد زهکشی ستون سنگی (به طوریکه مانع اشباع ماندن صد در صدی مدل خواهد شد، و این عملکرد در هر دو نرم‌افزار دیده نمی‌شود) است که این عوامل با هم سبب می‌شود تا مقدار بار گسیختگی در آزمایشگاه بیش از مقادیر تحلیل‌های عددی به دست آید.

۵- تحلیل ابعادی

از آنجایی که مقیاس‌های آزمایشگاهی با شرایط طبیعی متفاوت است، به کمک تبدیل‌هایی می‌توان هر مدل آزمایشگاهی را به مدل واقعی تبدیل کرد و برعکس. جدول (۵) این نسبت‌ها را برای تحلیل ابعادی ارائه می‌دهد. به کمک نسبت‌های این جدول و ضریب مقیاس S این کار انجام می‌شود [7]. باید به این نکته توجه داشت که پارامترهای مقاومتی خاک مانند چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و وزن مخصوص در هر دو مدل ثابت است و تغییر نمی‌کنند. واضح است که به دلیل اثر مقیاس، خاک‌ها ممکن است همان نقشی را که در مدل‌های آزمایشگاهی ایفا می‌کنند در نمونه‌ی اصلی نداشته باشند. این تفاوت‌ها ابتدا به علت تفاوت در تراز تنش بین آزمایش‌های مدل و آزمایش‌های صحرائی اتفاق می‌افتد [21]. با توجه به این موضوع سواف [22] پیشنهاد می‌کند که استفاده از مدل‌های $g-1$ می‌تواند فقط در پیش‌بینی رفتارهای کلی و عمومی نمونه‌های اصلی به کار رود. در همین راستا هجد و سیت هارام [23] توضیح داده‌اند که آزمایش‌های کوچک مقیاس در شرایط $g-1$ به دستیابی

آورده شده است. شکل‌های (۱۸ تا ۲۱) به ترتیب ضریب اطمینان، بار بحرانی، مقادیر تنش نرمال بیشینه، و تغییر شکل‌های سطح شیب را نشان می‌دهند.

جدول (۴) مشخصات مصالح در نرم افزار FLAC^{3D}

Element Type	γ_{Sat} KN/m ³	Bulk modulus N/m ²	Shear modulus N/m ²	C Sat KN/m ²	ϕ_{sat} °	Model
First Layer	26	3.3e7	1.5e7	5	45	M-C
Second Layer	22	3.3e7	1.5e7	5	43	M-C
Stone column	20	5.6e7	4.2e7	•	37	Linear Elastic

Table 4. Characteristics of materials in FLAC^{3D} software

شکل (۱۸) گسیختگی شیروانی مسلح با ستون سنگی (F.S.=0.98)

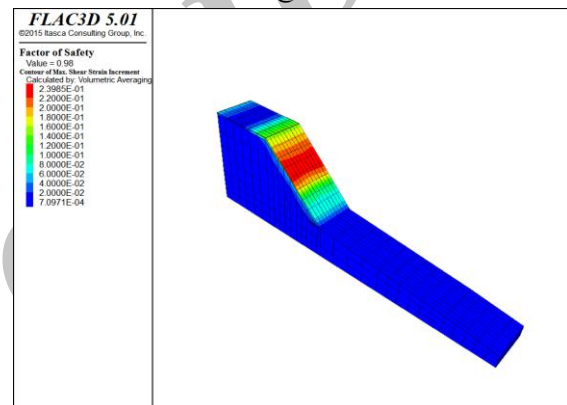


Fig. 18. Rupture of reinforced slope using stone column (F.S.=0.98)

شکل (۱۹) بار بحرانی گسیختگی شیروانی (بر حسب پاسکال)

```

Flac3d>ini szz -50800
--- Szz modified in 1264 zones.
Flac3d>solve fos
--- The following properties if applicable are INCLUDED in the FOS computation :
--- *** friction
--- *** cohesion
--- *** jfriction
--- *** jcohesion
--- Additional settings for the FOS computation :
--- *** Interface excluded
FoS Starting at: Sat Oct 17 15:13:21 2015
--- Characteristic number of steps = 2081
--- *** Factor of Safety is : 0.98
    
```

Fig 19. Critical load in slope failure (in Kilo Pascal)

شکل (۲۰) مقادیر تغییرات تنش نرمال بیشینه در شیب مسلح

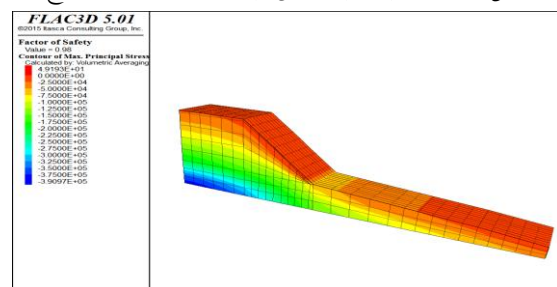


Fig. 20. Variation of maximum normal stress in reinforced slope

که حاوی ۵ درصد ریزدانه و مقدار ۵ کیلوپاسکال چسبندگی است و به صورت دو لایه اجرا شده است، درحالت اشباع ناپایدار بوده و دچار گسیختگی می‌شود. اگر در چنین شیبی از یک ستون سنگی در وسط شیب استفاده شود؛ پایداری این شیب خاکی به طور فوق‌العاده‌ای افزایش پیدا خواهد کرد، به طوری که ستون سنگی، شیروانی را به خوبی پایدار کرده و سبب می‌شود که ظرفیت باربری آن تا مقدار ۵۲ کیلوپاسکال افزایش یابد. همین موضوع نشان می‌دهد که استفاده از ستون سنگی در چنین شرایطی کمک شایانی به پایدار سازی شیب‌های خاکی خواهد کرد. جدول (۶) نتایج به دست آمده را به صورت کلی با هم مقایسه می‌کند. وجود ۵ درصد ریزدانه‌ی چسبنده در خاک ماسه‌ای تأثیر چشمگیری بر افزایش پایداری شیب داشته است. به نظر می‌رسد که ریزدانه‌ی چسبنده نقش کلیدی در ایجاد شبکه‌ی باند چسبندگی بین ذرات ماسه‌ای بازی کرده است به طوری که پس از اشباع شدن تبدیل به یک مجموعه‌ی یکپارچه شده است که همه‌ی ذرات ماسه در مقابل بارگذاری و ایجاد ناپایداری، به صورت یکپارچه مقاومت می‌نمایند.

جدول (۶) مقایسه‌ی کلی نتایج

Bearing Capacity of reinforced slope	Reinforced slope in saturated condition	Bearing capacity of unreinforced slope	Unreinforced slope in saturated condition	Experimental Modeling Analysis
52 Kilo Pascal	Stable	Zero	Unstable	Experimental Modeling Analysis
51 Kilo Pascal	Stable	Zero	Unstable	PLAXIS ^{2D} Analysis
50.8 Kilo Pascal	Stable	Zero	Unstable	FLAC ^{3D} Analysis

Table 6. Total comparison of results

نکته مهم و قابل توجه در این پژوهش که از آن به عنوان یک نوآوری می‌توان یاد کرد این است که مقدار خاک ریزدانه‌ای که سبب بهبود چشمگیر خاکریز می‌شود بررسی شده و تعیین شده است. همانطور که اشاره شد، با پژوهش‌های آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی مقدار ریزدانه‌ای که سبب بهبود پایداری خاکریز دانه‌ای مسلح با ستون سنگی می‌شود مقدار ۵ درصد به دست آمده است. در پژوهشی دیگر از پژوهشگران این اثر، خاکریزی کاملاً اصطکاکی و فاقد ریزدانه

تقریب مناسب اطلاعات در مورد رفتار کلی نمونه‌های اصلی سریع‌تر و ساده‌تر از آزمایش‌های بزرگ مقیاس کمک می‌کنند، هرچند که آزمایش‌های بزرگ مقیاس کنترل بهتری در مورد پارامترهای کلیدی نمونه‌ی مورد نظر دارند. نکته مهم در این زمینه آن است که نتایج آزمایش‌های کوچک مقیاس متأثر از آثار مقیاس هستند و نتایج به دست آمده در شرایط آزمایش‌های $1-g$ مستقیماً برای حالت نمونه‌ی اصلی قابل کاربرد نیستند. فاخر و جونز [24] پیشنهاد کرده‌اند که نتایج آزمایش‌های کوچک مقیاس را می‌توان با استفاده‌ی دقیق از قوانین مقیاس برای نمونه‌های اصلی هم به کار برد. آنان در این مورد هم هشدار می‌دهند که به دلیل دخالت عوامل پیچیده و متعدد در این زمینه ایجاد شرایط کاملاً مشابه بین مدل آزمایشگاهی و نمونه اصلی امکان پذیر نیست و باید تصمیم‌گیری در مورد عوامل موثر در آثار مقیاس به قضاوت پژوهشگران در این زمینه واگذار شود. با توجه به مواردی که گفته شد و نیز توصیه‌ی سواف [22]، پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های بیشتر را با استفاده از آزمایش‌های مقیاس بزرگ یا آزمایش‌های سانتیفریوژ انجام داد تا نتایج به دست آمده از آن پژوهش‌ها را با این پژوهش مقایسه کرد. به منظور درک بیشتر می‌توان به مقاله قضاوی و نظری افشار [25] اشاره کرد، آنان سختی مسلح کننده در مدل آزمایشگاهی خود را یک صدم سختی مسلح کننده در مدل‌های واقعی در نظر گرفته‌اند. در این پژوهش هم با توجه به مطالب گفته شده از مقیاس یک صدم برای در نظر گرفتن اثر مقیاس استفاده شده است.

جدول (۵) مقیاس S برای تبدیل مدل آزمایشگاهی به واقعی [7]

Time	Length	Area	Force	mass	Tension	
T	L	A	F	M	σ	Scaled Model
$\sqrt{S} T$	SL	$S^2 A$	$S^2 F$	$S^3 M$	σ	Real Model

Table 5. S scale in order to convert experimental model to real model

۶- بحث و بررسی

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شیروانی غیر مسلحی

۶-۲ خاک دانه‌ای و با چسبندگی بیش از ۵ درصد

نکته اساسی و مهم در این پژوهش مقدار ۵ درصد چسبندگی است که سبب چنین افزایش چشمگیر پایداری شیب می‌شود. اگر مقدار چسبندگی خاکریز خیلی زیاد باشد، مشکلات جدی به وجود خواهد آمد که مهمترین آن ظهور تغییر شکل‌های بزرگ در شیب و ایجاد ناپایداری است که در این حالت نه تنها وجود چسبندگی مفید نخواهد بود، بلکه ممکن است اشکالات جدی را نیز سبب شود. در مرحله‌ی بعد، همان خاکریز مسلح با ستون سنگی اشاره شده با دو برابر چسبندگی (یعنی با مقدار چسبندگی ۱۰ کیلوپاسکال) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت، مقدار تنش اعمال شده همان ۵۰/۸ کیلوپاسکال وارد شد تا تفاوت بین ضرایب اطمینان در دو حالت مشاهده شود. همان‌گونه که در شکل (۲۳) دیده می‌شود، در خاکریز با چسبندگی ۱۰ کیلوپاسکال در حالت مسلح با ستون سنگی، در اثر اعمال تنش ۵۰/۸ کیلوپاسکال مقدار ضریب اطمینان ۰/۸۳ به دست آمد، در حالی که اگر خاکریز مقدار ۵ کیلوپاسکال چسبندگی داشته باشد ضریب اطمینان شیب مسلح مورد نظر ۰/۹۸ خواهد بود. این مطلب مبین آن است که اگر مقدار چسبندگی در خاکریز ۱۰ درصد باشد، مقدار تنش بحرانی برای ایجاد شرایط گسیختگی در شیب کمتر از شیروانی با ۵ درصد چسبندگی است. در مجموع این موضوع نشان می‌دهد که هر مقدار چسبندگی برای بهبود خاکریز مناسب نیست و مقدار ارائه شده به عنوان دست آورد این پژوهش است که بیشترین تأثیر و کارایی را دارد.

شکل (۲۳) تحلیل شیروانی با خاک ماسه‌ای با ۱۰ کیلوپاسکال

چسبندگی در حالت مسلح با ستون سنگی (در اثر اعمال تنش ۵۰/۸

کیلوپاسکال؛ مقدار ضریب اطمینان ۰/۸۳ محاسبه شد)

```

flac3d>ini szz -50800
--- Szz modified in 1680 zones.
flac3d>solve fos
--- The following properties if applicable are INCLUDED in the FOS computation :
--- *** friction
--- *** cohesion
--- *** jfriction
--- *** jcohesion
--- Additional settings for the FOS computation :
--- *** Interface excluded
FoS Starting at: Tue May 24 19:39:51 2016
--- Characteristic number of steps = 1858
--- *** Factor of Safety is : 0.83
    
```

Fig. 23. Numerical analysis of slope with granular soil and cohesion of 10 Kilo Pascal, reinforced using stone column (In condition of 50.8 Kilo Pascal pressure, the factor of safety obtained 0.83)

با منبع قرصه‌ی متفاوت (ماسه‌ی کاملاً شسته) مطابق شرایطی مشابه، بررسی و تحلیل آزمایشگاهی و عددی با نرم افزار فلک سه بعدی شد که نتیجه‌ی آن پژوهش هم موضوع این مقاله را تأیید می‌کند، در آن نوع خاکریز به دلیل فقط اصطکاکی بودن ماسه، بیشینه تنش قابل اعمال به شیبی در شرایط هندسی مشابه با این پژوهش، ۲۷ کیلوپاسکال بوده است. برای تأیید درستی مطالب موجود در پژوهش پیش‌رو، مدل‌سازی‌های عددی دیگری با استفاده از نرم افزار فلک سه بعدی انجام شد که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود.

۶-۱ خاک فقط دانه‌ای و بدون چسبندگی

در این مرحله خاک استفاده شده در این پژوهش اما بدون هیچ‌گونه چسبندگی مدل‌سازی شد (تمامی شرایط مرزی، مشخصات هندسی، خصوصیات مصالح و سایر موارد یکسان بوده است). نتایج پژوهش به این صورت بوده است که برای شیب غیر مسلح با خاک ماسه‌ای و بدون چسبندگی، در اثر فرآیند اشباع مقدار ضریب اطمینان ۰/۹۴ است و این شیب در اثر شرایط اشباع دچار گسیختگی می‌شود. در شیب ماسه‌ای بدون چسبندگی که با ستون سنگی مسلح شده است، مقدار بار بحرانی بسیار کمتر از حالت خاکریز با ۵ درصد چسبندگی به دست آمده است، به طوری که مقدار تنش ایجاد کننده‌ی گسیختگی در این شیب ۱۸/۳ کیلوپاسکال به دست آمد. شکل (۲۲) این موضوع را تصدیق می‌کند که وجود ۵ درصد چسبندگی در یک شیب ماسه‌ای ظرفیت باربری شیب را تا چه اندازه بهبود می‌بخشد (۳۲/۵ کیلو پاسکال یا تقریباً ۳۶ درصد افزایش ظرفیت باربری).

شکل (۲۲) تحلیل شیروانی با خاکریز فقط دانه‌ای در حالت مسلح با ستون

سنگی (بار بحرانی ۱۸/۳ کیلوپاسکال)

```

flac3d>ini szz -18300
--- Szz modified in 1680 zones.
flac3d>solve fos
--- The following properties if applicable are INCLUDED in the FOS computation :
--- *** friction
--- *** cohesion
--- *** jfriction
--- *** jcohesion
--- Additional settings for the FOS computation :
--- *** Interface excluded
FoS Starting at: Mon May 23 02:55:59 2016
--- Characteristic number of steps = 1998
--- *** Factor of Safety is : 0.96
    
```

Fig. 22. Numerical analysis of reinforced slope with granular soil using stone column (Critical load: 18.3 Kilo Pascal)

۷- نتیجه گیری

پایدار سازی شیروانی‌های خاکی به کمک ستون‌های سنگی یکی از روش‌های مفید و اقتصادی است که به خوبی سبب تثبیت شیب‌ها می‌شوند. طبق آزمایش‌های انجام شده و تصدیق آن‌ها به وسیله‌ی تحلیل‌های عددی می‌توان نتیجه گرفت که وجود مقداری چسبندگی در خاک (در این پژوهش مقدار چسبندگی ۵ کیلو نیوتن بر متر مربع بوده است) به همراه ستون سنگی که به اندازه‌ی ۳ برابر قطر ستون در خاک متراکم‌تر قرار گرفته باشد، به صورت چشمگیری پایداری و ضریب اطمینان شیروانی را افزایش می‌دهد. به طوری که شیروانی غیر مسلحی را که بدون هیچ گونه سربار و فقط تحت اثر اشباع دچار گسیختگی می‌شود را می‌توان به شیئی تبدیل کرد که پایداری آن به حدی می‌رسد که حتی تا بارگذاری ۱۶۰ کیلوگرم را هم به راحتی جواب می‌دهد و دچار مشکل نمی‌شود. گفتنی است که نتایج پژوهش‌ها نشان داده است بهینه‌ترین موقعیت قرارگیری ستون سنگی در وسط شیروانی است. عدم وجود ریزدانه در خاکریز ماسه‌ای نشان داد که مقاومت برشی شیروانی مسلح با ستون سنگی در حالت اشباع خیلی کمتر از نتایج حاصل از خاکریز ماسه‌ای است که در حدود ۵ درصد ریزدانه دارد و چسبندگی آن در حدود ۵ کیلو پاسکال است.

REFERENCES

مراجع

- [5] Vekli M., Aytakin M., Ikizler S. B. & Calik U. 2012 Experimental and numerical investigation of slope stabilization by stone columns. *Nat Hazards*, **64**, 797-820.
- [6] Taekoh W. & Vanpalli S. 2010 Influence of rain infiltration on the stability of compacted soil slopes. *Computer and Geotechnics*, **37**(5), 649-657.
- [7] Abusharar S. W. & Han J. 2011 Two-dimensional deep-seated slope stability analysis of embankments over stone column improvement soft clay. *Engineering Geology*, **120**(1-4), 103-110.
- [8] Hajiazizi M. & Bavali M. 2014 Optimal location of pile in stabilizing earth slopes. *Modares Civil Engineering Journal*. **14**(3), 61-69. (In Persian)
- [9] Shivashankar R., Dheerendra M. R., Nayak S. & Rajathkumar V. 2011 Experimental studies on behaviour of stone columns in layered soils. *Geotech Geol Eng*, **29**, 749-757.
- [10] Ambily A. P. & Gandhi. S. R. 2007 Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(4), 405.
- [11] Dheerendra M. R. & Shivashankar. R. 2013 A critical review of construction, analysis and behaviour of stone columns. *Geotech Geol Eng*, **31**(1), 1-22.
- [12] Choobbasti A. J., Zahmatkesh A. & Noorzad R. 2011 Performance of stone columns in soft clay: Numerical Evaluation. *Geotech Geol Eng*, **29**, 675-684.
- [13] Soroush A. & Tabarsaz S. 2010 Numerical analysis of behavior of reinforced earth using group of stone columns. *Modares Civil Engineering Journal*. **10**(2). (In Persian)
- [14] Mohanty P. & Samanta M. 2015 Experimental and numerical studies on response of stone column in layered soil. *Geosynth. and Ground Eng*, **27**, 1-14.
- [15] NazariAfshar J. & Ghazavi M. 2014 Experimental studies on bearing capacity of geosynthetic reinforced stone columns. *Geotech Geol Eng*, **39**(3), 1599-1571.
- [16] Yoo W., Kim B. & Cho W. 2015 Model test study on behavior of geotextile-encased sand pile in soft clay ground. *KSCE Journal of civil engineers*, **19**(3), 592-601.
- [17] Khabbazian M., Meehan C. L. & Kaliakin V.
- [1] Abramson L. W., Lee T., Sharma S. & Boyce G. 2002 *Slope stability and stabilization methods*. New York, John Wiley & Sons.
- [2] Fattah M. Y., & Majeed Q. J. 2012 Finite element analysis of Geogrid encased stone columns. *Geotech Geol Eng*, **30**, 713-726.
- [3] Aboshi H., Ichimato M. & Enoki H. K. 1979 A method to improve characteristics of soft clays by inclusion of large diameter sand columns. International conference on soil reinforcement, pp. 211-216.
- [4] Xanthakos P. P., Amberson L. W. & Bruce D. 1994 *Ground control and improvement*. New York, John Wiley & Sons.

- [21] Vesic A. S. 1973 Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *Soil Mechanics and Foundation*, **99**(1), 45–73.
- [22] Sawwaf M. 2005 Strip footing behavior on pile and sheet pile-stabilized sand slope. *ASCE*. **131**(6), 705-715.
- [23] Hegde A. M. & Sitharam T. G. 2015 Experimental and numerical studies on protection of buried pipeline sand underground utilities using geocells. *Geotextiles and Geomembranes, Article in press*. 1-10.
- [24] Fakher A. & Jones C. J. F. P. 1996 Discussion on bearing capacity of rectangular footings on geogrid reinforced sand. by Yetimoglu T., Wu, J.T.H., Saglamer, A., 1994. *Journal of Geotech. Eng.* **122**, 326-327.
- [25] Gazavi M. & NazariAfshar J. 2013 Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns. *Geotextiles and Geomembranes*, **38**, 26-36.
- N. 2014 Column supported embankments with Geosynthetic encased columns: Parametric study. *Transp. Infrastruct. Geotech*, **1**(3), 301-325.
- [18] Cai F. & Ugai K. 2000 Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles. *Soils and Foundations*, **40**(1), 73–84.
- [19] Wei W. B. & Cheng Y. M. 2009 Strength reduction analysis for slope reinforced with one row of piles. *Computers and Geotechnics* **36**(7), 1176–1185.
- [20] Won J., You K., Jeong S & Kim S. 2005 Coupled effects instability analysis of pile-slope systems. *Computers and Geotechnics*, **32**(4), 304–315

Archive of SID

Experimental Studies of Cohesion Effect on Stability of Soil Slopes Reinforced with stone column

M. Hajiazizi^{1*}, M. Nasiri²

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

2- Ph.D Student, Geotechnical Eng., Razi University

*mhazizi@razi.ac.ir

Abstract:

The increasing demand for engineered cut and fill slopes on construction goals has increased the need of understanding the analytical methods, investigation tools and the most important stabilization methods to solve slope stability problems. The first step to maintain the stability of soil slope is performing excavation in the slope crest or/and filling the slope toe. This is the cheapest method for stabilization of soil slopes. If the method cannot provide the required factor of safety, it is necessary to use other stabilization methods. Numerical and laboratory approaches are useful for modeling soil slopes stabilization. Modeling the stability of earth slopes using numerical methods is a common practice in geotechnical engineering. Moreover, stabilization of soil slopes using piles has been practiced by many researchers in numerical and analytical approaches. Although numerical and analytical methods have special capabilities, laboratory modeling is more reliable. Stability slope analysis has attracted lots of researchers around the world and it shows the significance of this matter. When suspicious about stability of soil slopes, immediate actions and preventative steps should be used for suppression of instability occurrence. Many projects intersect with valleys and rides, which can be prone to slope stability problems. Natural slopes that have been stable for many years may suddenly fail because of many reasons; therefore, finding useful techniques for stabilizing them is a great concern for geotechnical engineers. In all soil slopes, the primary way for stabilization is the excavation in slope crest and/or filling slope toes. If this would not increase safety factor, other procedures should be applied. Three common styles of stabilization methods are; vertical reinforcement (such as stone columns and piles), horizontal reinforcement (like Geo-grids), oblique reinforcement (such as nailing). One of the common methods that is used to increase the safety factor of slopes is stone columns. 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. Understanding soil properties is crucial for analysis of soil slopes. In this study, the effect of cohesion in embankment is investigated. This is carried out by performing laboratory tests and using finite element method software (PLAXIS^{2D}) and finite difference method software (FLAC^{3D}). A sand slope is reinforced with a stone column at the middle of slope. It is then saturated by precipitation and loaded up to the failure. Experimental studies in this article have the potential to give valuable information about the effects of embankment cohesion and penetration depth of stone column into the stiffer layer, in stability of stone column reinforced soil slopes.

Keywords: Earth slopes, Stone Column, Cohesion, Stability