کاربرد ستون سنگی در مقاوم‌سازی و افزایش ظرفیت باربری جاده‌ها

محمد حاجی عزیزی، استادیار گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
مسعود نصیری، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: nasiri.masoud@stu.razi.ac.ir
دریافت: ۹۴/۰۱/۱۵- پذیرش: ۹۴/۰۴/۳۰

چکیده

مقاوم‌سازی، بهسازی و افزایش ظرفیت باربری جاده‌ها از مسائل مهم و کاربردی در سیستم حمل و نقلی جاده‌ای به شمار می‌رود که به منظور کاهش خطرات جانی و مالیِ جاده‌ای، امری کاملاً ضروری می‌باشد و استفاده از شیوه‌های مفید، ساده و مقرون به صرفه در پایدار سازی و تثبیت این مناطق بسیار حائز اهمیت است. با توجه به پیشرفت و توسعه‌ی جاده‌ای به ویژه در نواحی شیب‌ها، تثبیت و مقاوم سازی این شریان‌های حیاتی و کسب اطمینان از پایداری آن‌ها در برابر بارهای وارده یکی از چالش‌های اساسیِ پیش روی مهندسین و دست‌اندر کاران در این زمینه می‌باشد. استفاده از روش‌های متداولِ مقاوم‌سازی در این مناطق بسته به شرایط محیطی، اهمیت محل مورد نظر و درجه ناپایداری آن، هزینه‌های مصرفی مصالح موجود، امکانات و غیره بسیار متنوع می‌باشد. یکی از روش‌های مناسب و سازگار با محیط زیست برای مسلح کردن چنین مناطق حساسی، استفاده از ستون‌های سنگی می‌باشد. استفاده از ستون‌های سنگی به عنوان یکی از روش‌های پایدار سازی، افزایش مقاومت، و بهبود ظرفیت باربری مطرح می‌شود که علاوه بر سادگی و راحتی اجرا، از نقطه نظر اقتصادی نیز نسبت به سایر روش‌های موجود مقرون به صرفه می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش، ارائه نتایج مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و مطالعات عددی (روش تفاضل محدود سه بعدی؛ $FLAC^{3D}$) در بهبود و افزایش ظرفیت باربری شیب‌های خاکی و خاکریزهای جاده‌ای با استفاده از ستونِ سنگی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جاده‌ها، ظرفیت باربری، ستون‌سنگی، پژوهش آزمایشگاهی

۱- مقدمه

مقاوم‌سازی، بهسازی و افزایش ظرفیت باربری جاده‌ها می‌تواند با روش‌ها و شیوه‌های متعددی از جمله استفاده از مسلح کننده‌های خاک و یا نصب سازه‌های تقویت کننده مانند ستون سنگی افزایش یابد؛ ریزش و گسیختگی شیب‌های کناره‌ی جاده‌ها در سرتاسر دنیا سالانه گزارش می‌گردد که عدم توجه به این مسئله‌ی مهم، سبب رخ دادن حوادث جاده‌ای ناگواری می‌شود که می‌تواند علاوه بر جبران ناپذیر بودن و ایجاد خسارات ذکر شده، سبب انسداد جاده‌ها و شریان‌های حیاتی کشور و بروز ترافیک‌های گسترده‌ای گردد که خود دلیلی بر اهمیتِ توجه ویژه به شیوه‌های تثبیت و بهبود ظرفیت باربری این مناطق است. در پژوهش پیش‌رو به بررسی آزمایشگاهی و عددی افزایش ظرفیت باربری جاده‌ها به کمک ستون سنگی پرداخته می‌شود. استفاده از ستون‌های سنگی به عنوان یکی از روش‌های افزایش ظرفیت باربری و تسلیح مطرح می‌شود که علاوه بر سادگی و راحتی اجرای آن در همه‌ی نواحی، از نظر اقتصادی نیز نسبت به سایر روش‌های اجرایی، مقرون به صرفه می‌باشد.

ستون سنگی یک روش اصلاحی برای خاک‌ها می‌باشد که هدفِ آن افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست است (Barksdale and Bachus, 1983). تاریخچه و ایده‌ی اولیه‌ی استفاده از ستون سنگی به کشور فرانسه و به

---

* - نویسنده مسئول

سال ۱۸۳۰ بر می‌گردد (Dheerendra (et al.), 2013) که برای بهبود خاک طبیعی از آن استفاده شده است (Fattah and Majeed, 2012). ستون سنگی با کاربردهای متنوع در بهسازی زمین به عنوان یک روشِ موفق جهت دست‌یابی به شرایطی است که عبارتند از (Thompso and White, 2005): بهبود پایداری شیب‌های طبیعی و خاکریزهای کناری جاده‌ها، کاهش نشست‌های نسبی و کلی، افزایش ظرفیت باربری خاک، افزایش سرعت و کاهش زمان تحکیم خاک، کاهش پتانسیل روانگرایی. یکی از موارد استفاده از ستون سنگی در زمینه راه‌سازی و امور حمل ونقل می‌باشد؛ در بسیاری از موارد در راه‌سازی که نیاز به خاکریزی جهت احداث راه می‌باشد و از طرفی بستر خاکریزی نشست پذیری بالایی دارد با استفاده از ستون سنگی، بستر مناسبی جهت خاکریزیِ (کاهش زمان تحکیم و کاهش نشست پذیری) راه فراهم می‌شود (قضاوی و نظری‌افشار، ۱۳۹۱).

برای بهبود فونداسیون پلِ بزرگراه اصلی نزدیک بمبئی هندوستان، از ستون‌های سنگی استفاده شده است، در این محل تعداد ۳۷ ستون سنگی با قطر ۷۵۰ میلی‌متر و با فاصله‌ی ۱/۷ متری از هم به کار رفته است. تحت بارگذاری مشخص، نشست خاک در حالت بدون تسلیح ۱/۷۵ متر تخمین زده شد، در حالی که این میزان در صورت استفاده از ستون سنگی ۸ سانتی‌متر می‌باشد (کمتر از ۵ درصدِ نشست خاک بدون مسلح کننده) (Dayte and Madhav, 1988). در ۲۳ فوریه‌ی سال ۱۹۹۸ جاده نوجوکی در سانتاباربارا واقع در کالیفرنیا به دلیل زمین لغزش دچار گسیختگی گردید؛ پس از ارائه‌ی پیشنهادهای مختلف استفاده از ستون سنگی به منظور تسلیح این جاده پیشنهاد شد و کار ساخت و ساز آن در ۵ مارس آغاز شد و در ٢٤ مارس همان سال، جاده‌ی مذکور بازگشایی گردید (Connor and Gorski, 2000). به منظور تعریض جاده از ستون‌های سنگی استفاده گردید (Tweedie (et al.)). پایدار سازی شیب‌های کناری بزرگراهایی همچون آلاسکا، کالیفرنیا، فلوریدا، آیووا، کنتاکی، می‌سی‌سی‌پی، نیویورک، تگزاس، داکوتای جنوبی، ویرجینیا و ویسکونسین به کمک ستون‌های سنگی انجام شده است (Xanthakos (et al.), 1994). با استفاده از ستون‌های سنگی می‌توان به خوبی از گسیختگی‌های عمیق جلوگیری کرد و ظرفیت باربری را بهبود بخشید (Cooper and Rose, 1999).

۲- مطالعات آزمایشگاهی بهبود ظرفیت باربری با استفاده از ستون سنگی

۲- ۱- تجهیزات آزمایشگاهی

جعبه‌ی 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. جعبه آزمایش

ماسه

در این پژوهش از دو نوع ماسه استفاده شده است به کمک آزمایش برش مستقیم پارامترهای مقاومتی ماسه‌ها در حالت خشک و اشباع به دست آمده است

(جداول ۱و۲). ماسه‌های مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است (نصیری، ۱۳۹٤).

شکل ۲. ماسه نوع ۱ و ۲ مورد استفاده در مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی

جدول ۱. مشخصات ماسه نوع ۱

وزن مخصوص خاکریز (حالت خشک)	۱۸ کیلونیوتن بر متر مکعب
وزن مخصوص خاکریز (حالت اشباع)	۲۰ کیلونیوتن بر متر مکعب
زاویه اصطکاک داخلی خاکریز (حالت خشک)	٤۷ درجه
زاویه اصطکاک داخلی خاکریز(حالت اشباع)	٤۰ درجه
چسبندگی	۵ کیلوپاسکال
مدول الاستیسیته	۳۰ مگا پاسکال
نسبت پواسن	۰/۳

جدول ۲. مشخصات ماسه نوع ۲

وزن مخصوص خاکریز (حالت خشک)	۱٦ کیلونیوتن بر متر مکعب
وزن مخصوص خاکریز (حالت اشباع)	۱۸ کیلونیوتن بر متر مکعب
زاویه اصطکاک داخلی خاکریز (حالت خشک)	٤۰ درجه
زاویه اصطکاک داخلی خاکریز(حالت اشباع)	۳٦ درجه
چسبندگی	۰
مدول الاستیسیته	۳۰ مگا پاسکال
نسبت پواسن	۰/۳

شن

در مدل‌سازی‌ها فقط از یک نوع شن برای ساخت ستون سنگی استفاده شده است. با آزمایش برش مستقیم پارامترهای مقاومتی شن مطابق جدول ۳ به‌دست آمد. برای ساخت ستون سنگی، غلافی پلاستیکی به قطر ۳/٦ سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفت که پیش از ساخت مدل، آن را در محلِ مورد نظر قرار داده و در حین ساختِ مدل در هر مرحله با توجه به میزان وزن مخصوص ستون، شنِ مورد نیاز درون آن ریخته شده و متراکم می‌گردد. شکل ۳ شن مورد استفاده در مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

شکل ۳. شن به کار رفته در ساخت ستون سنگی

جدول ۳. مشخصات شن

وزن مخصوص (حالت خشک)	۱٦ کیلونیوتن بر متر مکعب
وزن مخصوص (حالت اشباع)	۱۸ کیلونیوتن بر متر مکعب
زاویه اصطکاک داخلی (حالت خشک)	٤۱ درجه
زاویه اصطکاک داخلی (حالت اشباع)	۳۷ درجه
چسبندگی	۰
مدول الاستیسیته	۱۰۰ مگا پاسکال
نسبت پواسن	۰/۲

۲- ۲- مشخصات آزمایش‌ها

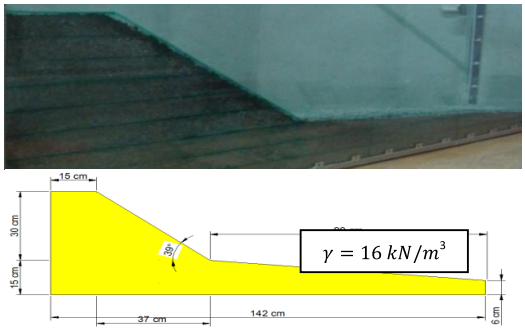
به منظور بررسی اثر ستون سنگی در شیب خاکی، دو نوع خاک مورد مطالعه قرار گرفته است و از هر کدام از این دو نمونه خاک چهار تیپ مدلِ ساخته شده است. مدل اول شامل شیروانی خاکی غیر مسلح و سپس انجام عملیات بارش و اشباع می‌باشد و مدل دوم شامل شیروانی مسلح به کمکِ ستون سنگی در وسطِ شیروانی (به عنوان موقعیت بهینه‌ی قرارگیری آن) و انجام عملیات بارش و اشباع نمونه می‌باشد. مشخصات و شرایط زیر برای هر دو مدل مشابه و یکسان می‌باشند: برای از بین بردن اثر اصطکاکِ جداره‌های جعبه، پیش از شروع کار آن‌ها را به روغن آغشته کرده تا اصطکاک آن با ماسه تا حد ممکن از بین برود. طول تاج شیروانی در مدل خاک نوع اول، یکبار ۱۵ سانتی‌متر بوده و بار دیگر ۳۰ سانتی‌متر بوده است و زاویه‌ی شیروانی در هر دو حالت تقریباً ۳۹ درجه انتخاب شده است. طول تاج شیروانی در مدل خاک نوع دوم،

یکبار ۱۵ سانتی‌متر بوده و بار دیگر ۳۰ سانتی‌متر بوده است و زاویه‌ی شیروانی ٤٥ درجه انتخاب شده است. در تمامی مدل‌ها، ارتفاع شیب ۳۰ سانتی‌متر است و ارتفاع کلی مدلِ ساخته شده ٤٥ سانتی‌متر می‌باشد. پس از ساخت مدل، به منظور جلوگیری از آب شستگیِ سطح شیروانی از یک لایه‌ی نازکِ دوغاب سیمان روی سطح شیب استفاده شده است. اشباع کردن مدل به کمک بارشِ مصنوعی صورت گرفته است و سرعت بارش هم حدود ۲ لیتر بر دقیقه بوده است. عملیات زهکشی و خروج آب مخزن از طریق قسمتِ پایین دست جعبه‌ی آزمایش انجام می‌شود. در شیروانی مسلح، انتهای ستون سنگی به اندازه‌ی ۵ سانتی‌متر (حدود ۱/٤ برابر قطر ستون) از کفِ جعبه فاصله دارد. این کار برای بر طرف کردن موضوعِ گیرداری در کف انجام شده است.

۲- ۳- نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی استفاده از ستون سنگی در افزایش ظرفیت باربری خاکریز نوع ۱ با طول تاج ۱۵ سانتی‌متر

۲-۳-۱- شیب ماسه‌ای غیر مسلح

پس از ساخت شیروانیِ غیر مسلح (شکل ٤)، شیروانی از نظر پایداری بدون مشکل بوده است، سپس مدل تحت بارش مصنوعی قرار داده شد که این شیب پس از گذشت حدود ٤٠ دقیقه از فرآیند اشباع، دچار ترک‌هایی در وسط شیروانی گردید و پس از گذشت دقایقی شیب بدون تحمل هیچ‌گونه ظرفیت باربری دچار گسیختگی کامل گردید (شکل ٥).

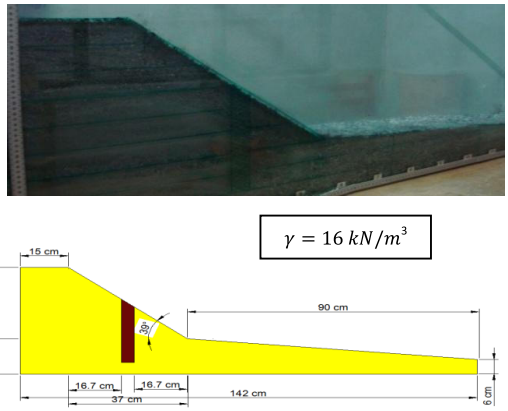


شکل ٤. هندسه و مدل شیروانی غیر مسلح

شکل ٥. گسیختگی شیروانی غیر مسلح

۲-۳-۲- شیب ماسه‌ای مسلح با ستون سنگی

برای انجام آزمایش در شیروانیِ مسلح، ستون سنگی در وسطِ شیروانی قرار داده شد و همراه هر لایه خاکریزی و تراکم، مصالح ستون درون غلاف ریخته شده و متراکم می‌گردد. پس از اتمام ساختِ مدل، به آرامی و با احتیاط کامل غلاف بیرون کشیده می‌شود. شکل ٦ هندسه‌ی شیب و مدل ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ٦. هندسه و مدل شیروانی مسلح با ستون سنگی

پس از تکمیل ساخت مدل، شیروانی را تحت بارش مصنوعی قرار داده و پس از اشباعِ کامل بیش از ۹۰ دقیقه هیچ گونه ترکی در شیروانی روی نداد پس می‌توان نتیجه گرفت پس از تسلیح با ستون سنگی ظرفیت باربری خاکریز افزایش یافته است. در گام بعدی ظرفیت باربری این خاکریز سنجیده شد که پس از بارگذاری روی تاج شیب، ظرفیت باربری این خاکریز ٦/۰٦ کیلوپاسکال به دست آمد. در شکل ۷ گسیختگی نشان داده شده است.

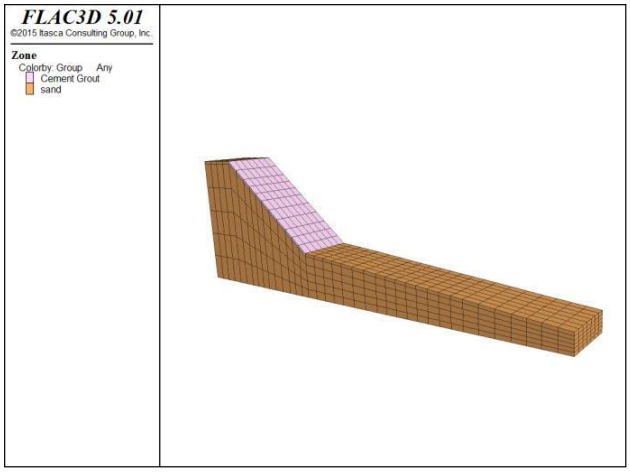
شکل ۷. گسیختگی شیروانی مسلح با ستون سنگی با ظرفیت باربری ٦/٠٦ کیلوپاسکال

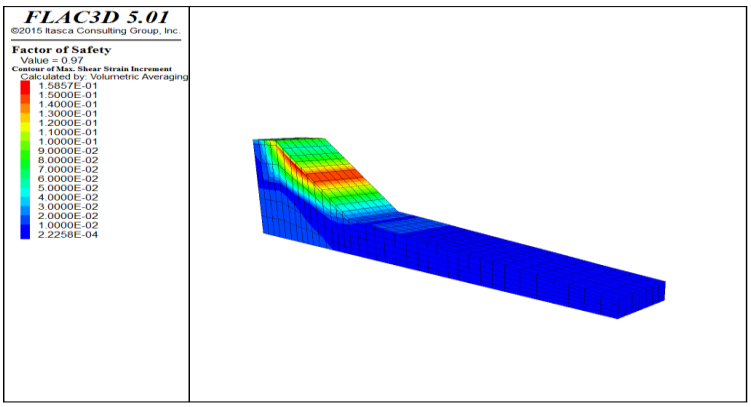
۲-۳-۳- تحلیل عددی شیب غیر مسلح

تحلیل عددی مدل‌های آزمایشگاهی به کمک نرم افزار $FLAC^{3D}$ انجام شده است. مدل‌سازی شیروانی غیر مسلح در حالت اشباع بر اساس مشخصات جدول ٤ انجام گردید، در حالت اشباع خاکریز هیچ ظرفیت باربری را تحمل نکرده و دچار گسیختگی گردید. شکل ۸ مدل شیروانی غیر مسلح و تحلیل آن را در شرایط اشباع نشان می‌دهند.

جدول ٤. مشخصات مصالح در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ در تحلیل شیروانی غیر مسلح خاک نوع ۱ در حالت اشباع

مدل ماده	φ_{sat} °	C_{sat} KPa	مدول برشی (N/m^2)	مدول بالک (N/m^2)	γ_{sat} KN/m^3	نوع سازه
موهر-کولمب	۳٦	۰	$۱/۵\times۱۰^{۷}$	$۳/۳\times۱۰^{۷}$	۱۸	خاکریز





شکل ۸. هندسه و تحلیل عددی خاکریز غیر مسلحِ خاک نوع ۱ در حالت اشباع (ظرفیت باربری برابر با صفر است)

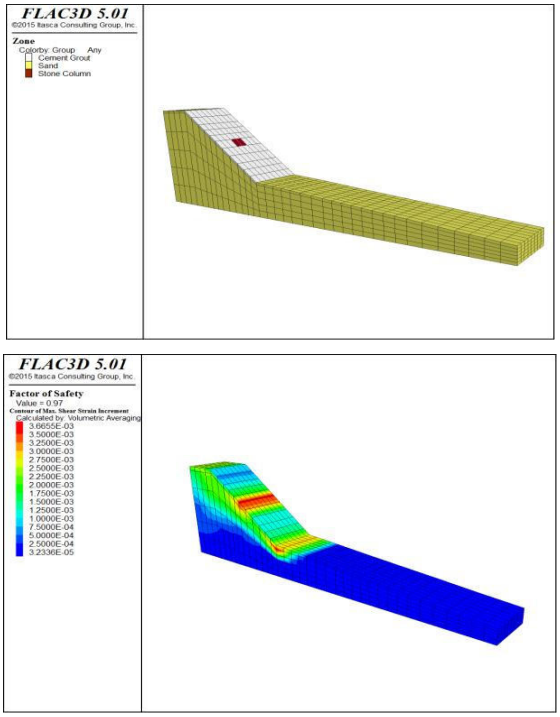
۲-۳-٤- تحلیل عددی شیب مسلح با ستون سنگی

شیروانی مسلح با ستون سنگی مطابق مشخصات جدول ۵ مدل‌سازی عددی گردید. خاکریز در حالت اشباع تحلیل گردید و مقدار ظرفیت باربری آن ۵/۸۵ کیلوپاسکال به دست آمد (شکل ۹).

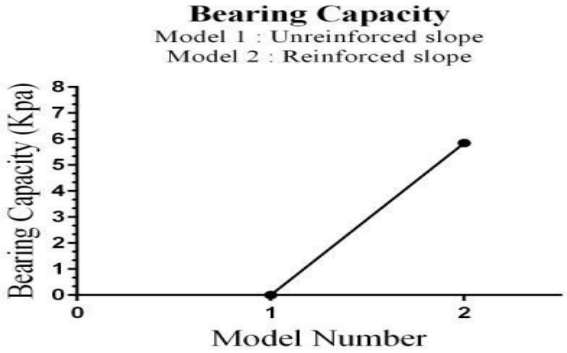
در شکل ۱۰ نتایج کلی تحقیقات آزمایشگاهی بر روی خاک نوع ۱ با طول تاج ۱۵ سانتی‌متر نشان داده شده است.

جدول ۵. مشخصات مصالح در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ در تحلیل شیروانی مسلح با ستون سنگی در حالت اشباع

مدل ماده	φ_{sat}	C_{sat} KPa	مدول برشی (N/m^2)	مدول بالک (N/m^2)	γ_{sat} KN/m^3	نوع سازه
موهر-کولمب	۳۶	۰	$۱/۵\times۱۰^{۷}$	$۳/۳\times۱۰^{۷}$	۱۸	خاکریز
موهر-کولمب	۳۷	۰	$۴/۲\times۱۰^{۷}$	$۵/۶\times۱۰^{۷}$	۱۸	ستون سنگی



شکل ۹. هندسه و تحلیل عددی خاکریز مسلح با ستون سنگیِ خاک نوع ۱ در حالت اشباع (ظرفیت باربری برابر با ۵/۸۵ کیلوپاسکال است)



شکل ۱۰. بهبود ظرفیت باربری خاکریز ماسه‌ای نوع ۱ با طول تاج ۳۰ سانتی‌متر با استفاده از ستون سنگی

۲- ٤- نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی استفاده از ستون سنگی در افزایش ظرفیت باربری خاکریز نوع ۱ با طول تاج ۳۰ سانتی‌متر

این قسمت دقیقا مشابه حالت پیشین است و تنها تفاوت افزایش طول تاج خاکریز است که اندازه‌ی آن از ۱۵ سانتی‌متر به ۳۰ سانتی متر افزایش یافته است؛ به همین خاطر فقط به ذکر نتایج به دست آمده بسنده می‌گردد.

۲-٤-۱- شیب ماسه‌ای غیر مسلح

پس از ساخت مدل، خاکریز تحت بارش مصنوعی قرار داده شد که این شیروانی پس از گذشت حدود ۵۵ دقیقه از فرآیند اشباع، مانند حالت پیشین بدون تحمل هیچ‌گونه ظرفیت باربری دچار گسیختگی کامل گردید.

۲-٤-۲- شیب ماسه‌ای مسلح با ستون سنگی

پس از ساخت مدل، خاکریز تحت بارش مصنوعی قرار داده شد که این شیروانی پس از گذشت حدود ۱۰۰ دقیقه از فرآیند اشباع، ظرفیت باربری شیب مقدار ۹/٦۵ کیلوپاسکال به دست آمد.

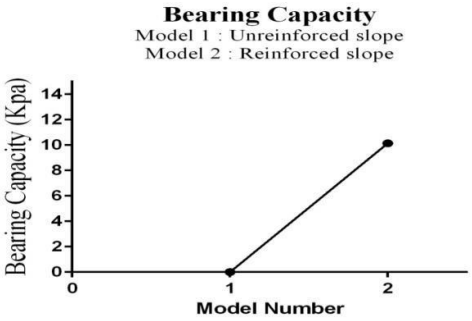
۲-٤-۳- تحلیل عددی شیب غیر مسلح

در تحلیل‌های عددی این مدل، ظرفیت باربری صفر به دست آمد و خاکریز پس از اشباع بدون تحمل سربار، دچار گسیختگی شد.

۲-٤-٤- تحلیل عددی شیب مسلح با ستون سنگی

در این حالت مقدار ظرفیت باربری خاکریز مسلح مقدار ۱۰/۱۵ کیلوپاسکال به دست آمد.

در شکل ۱۱ نتایج کلی تحقیقات آزمایشگاهی بر روی خاک نوع ۱ با طول تاج ۳۰ سانتی‌متر نشان داده شده است.

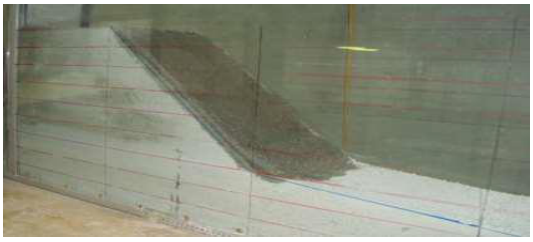


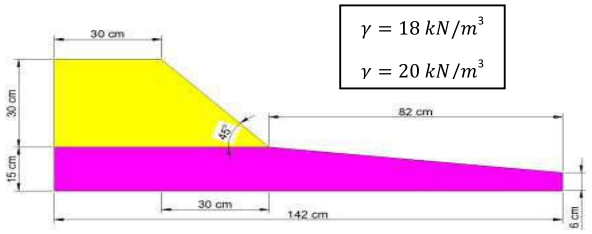
شکل ۱۱. بهبود ظرفیت باربری خاکریز ماسه‌ای نوع ۱ با طول تاج ۳۰ سانتی‌متر با استفاده از ستون سنگی

۲- ۵- نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی استفاده از ستون سنگی در افزایش ظرفیت باربری خاکریز نوع ۲ با طول تاج ۳۰ سانتی‌متر

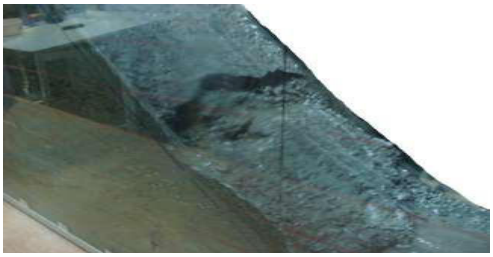
۲-۵-۱- شیب ماسه‌ای غیر مسلح

پس از ساخت شیروانیِ غیر مسلح (شکل ۱۲)، شیروانی از نظر پایداری بدون مشکل بوده است، سپس مدل تحت بارش مصنوعی قرار داده شد که این شیروانی پس از گذشت حدود ۵۰ دقیقه از فرآیند اشباع، بدون تحمل هیچ‌گونه ظرفیت باربری دچار گسیختگی کامل گردید (شکل ۱۳).





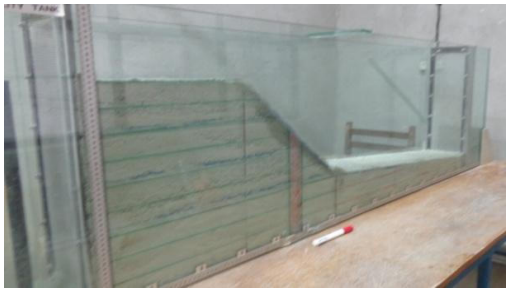
شکل ۱۲. هندسه و مدل شیروانی غیر مسلح

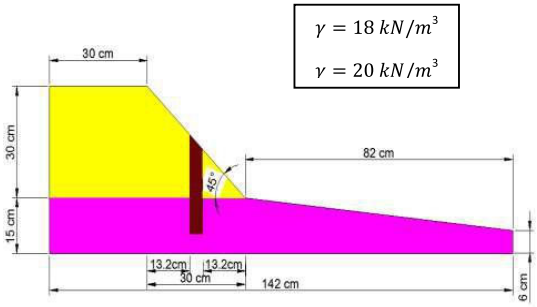


شکل ۱۳. گسیختگی شیروانی غیر مسلح

۲-۵-۲- شیب ماسه‌ای مسلح با ستون سنگی

برای انجام آزمایش در شیروانیِ مسلح، ستون سنگی در وسطِ شیروانی قرار داده شد و همراه هر لایه خاکریزی و تراکم، مصالح ستون درون غلاف ریخته شده و متراکم می‌گردد. پس از اتمام ساختِ مدل، به آرامی و با احتیاط کامل غلاف بیرون کشیده می‌شود. شکل ١٤ هندسه‌ی شیب و مدل ساخته شده را نشان می‌دهند.





شکل ١٤. هندسه و مدل شیروانی مسلح با ستون سنگی

پس از تکمیل ساخت مدل، شیروانی را تحت بارش مصنوعی قرار داده و پس از اشباعِ کامل بیش از ۱۲۰ دقیقه هیچ گونه ترکی در شیروانی روی نداد پس می‌توان نتیجه گرفت پس از تسلیح با ستون سنگی ظرفیت باربری خاکریز افزایش یافته است. در گام بعدی ظرفیت باربری این خاکریز سنجیده شد که پس از بارگذاری روی تاج شیب، ظرفیت باربری این خاکریز ۳۳/۰۹ کیلوپاسکال به دست آمد. در شکل ۱۵ گسیختگی شیب را می‌توان مشاهده کرد.

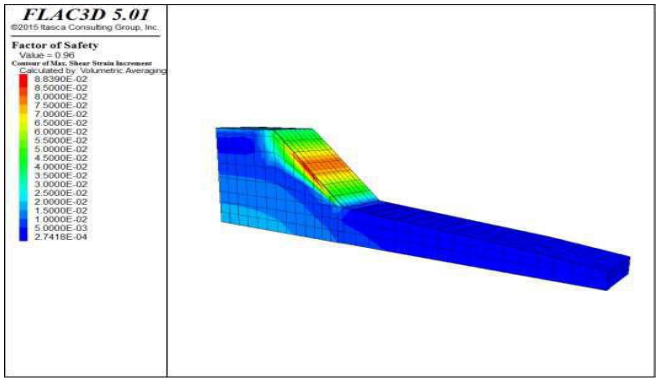
شکل ۱۵. گسیختگی شیروانی مسلح با ستون سنگی با ظرفیت باربری ۳۳/۰۹ کیلوپاسکال

۲-۵-۳- تحلیل عددی شیب غیر مسلح

مدل‌سازی شیروانی غیر مسلح در حالت اشباع بر اساس مشخصات جدول ٦ انجام گردید، در حالت اشباع خاکریز هیچ ظرفیت باربری را تحمل نکرده و دچار گسیختگی گردید. شکل ١٦ تحلیل مدل شیروانی غیر مسلح در شرایط اشباع را نشان می‌دهند.

جدول ٦- مشخصات مصالح در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ در تحلیل شیروانی غیر مسلح خاک نوع ۲ در حالت اشباع

مدل ماده	φ_{sat} °	C_{sat} KPa	مدول برشی (N/m^2)	مدول بالک (N/m^2)	γ_{sat} KN/m^3	نوع سازه
موهر-کولمب	٤٠	٥	$۱/۵\times۱۰^{۷}$	$۳/۳\times۱۰^{۷}$	۲۰	خاکریز



شکل ١٦. تحلیل عددی خاکریز غیر مسلحِ خاک نوع ۲ در حالت اشباع (ظرفیت باربری برابر با صفر است)

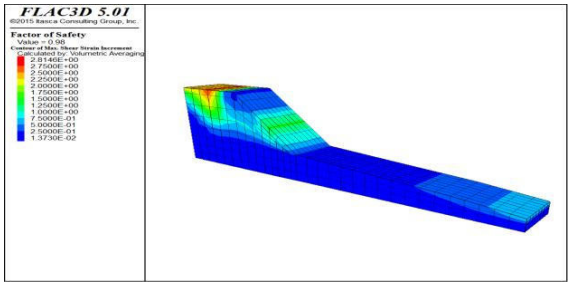
۲-۵-٤- تحلیل عددی شیب مسلح با ستون سنگی

شیروانی مسلح با ستون سنگی مطابق مشخصات جدول ۷ مدل‌سازی عددی گردید. خاکریز در حالت اشباع تحلیل گردید و مقدار ظرفیت باربری آن ٣٤/٥١ کیلو پاسکال به دست آمد (شکل ۱۷).

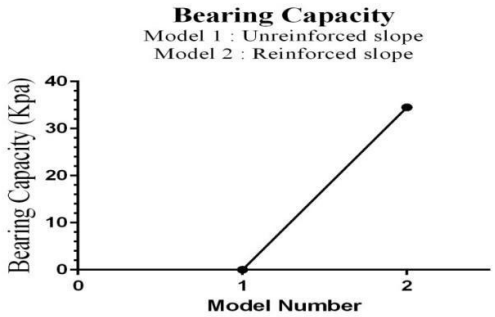
در شکل ۱۸ نتایج کلی تحقیقات آزمایشگاهی بر روی خاک نوع ۲ با طول تاج ۳۰ سانتی‌متر نشان داده شده است.

جدول ۷. مشخصات مصالح در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ در تحلیل شیروانی مسلح با ستون سنگی خاک نوع ۲ در حالت اشباع

مدل ماده	φ_{sat} °	C_{sat} KPa	مدول برشی (N/m^2)	مدول بالک (N/m^2)	γ_{sat} KN/m^3	نوع سازه
موهر-کولمب	٤٠	٥	$۱/۵\times۱۰^{۷}$	$۳/۳\times۱۰^{۷}$	٢٠	خاکریز
موهر-کولمب	٣٧	٠	$۴/۲\times۱۰^{۷}$	$۵/۶\times۱۰^{۷}$	١٨	ستون سنگی



شکل ۱۷. تحلیل عددی خاکریز مسلح با ستون سنگیِ خاک نوع ۲ در حالت اشباع (ظرفیت باربری برابر با ٣٤/٥١ کیلوپاسکال است)



شکل ۱۸. بهبود ظرفیت باربری خاکریز ماسه‌ای نوع ۲ با طول تاج ۳۰ سانتی‌متر با استفاده از ستون سنگی

۲- ٦- نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی استفاده از ستون سنگی در افزایش ظرفیت باربری خاکریز نوع ۱ با طول تاج ۱۵ سانتی‌متر

این قسمت دقیقا مشابه حالت پیشین است و تنها تفاوت افزایش طول تاج خاکریز است که اندازه‌ی آن از ۳۰ سانتی‌متر به ۱۵ سانتی‌متر کاهش یافته است؛ به همین خاطر فقط به ذکر نتایج به دست آمده بسنده می‌گردد.

۲-٦-۱- شیب ماسه‌ای غیر مسلح

پس از ساخت مدل، خاکریز تحت بارش مصنوعی قرار داده شد که این شیروانی پس از گذشت حدود ۵۰ دقیقه از فرآیند اشباع، مانند حالت پیشین بدون تحمل هیچ‌گونه ظرفیت باربری دچار گسیختگی کامل گردید.

۲-٤-۲- شیب ماسه‌ای مسلح با ستون سنگی

پس از ساخت مدل، خاکریز تحت بارش مصنوعی قرار داده شد که این شیروانی پس از گذشت حدود ۱۰۰ دقیقه از فرآیند اشباع، ظرفیت باربری شیب مقدار ۲۳/۹ کیلوپاسکال به دست آمد.

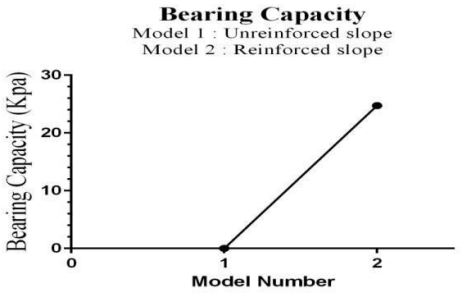
۲-٤-۳- تحلیل عددی شیب غیر مسلح

در تحلیل‌های عددی این مدل، ظرفیت باربری صفر به دست آمد و خاکریز پس از اشباع بدون تحمل سربار، دچار گسیختگی شد.

۲-٤-٤- تحلیل عددی شیب مسلح با ستون سنگی

در این حالت مقدار ظرفیت باربری خاکریز مسلح مقدار ۲٤/۷۳ کیلوپاسکال به دست آمد.

در شکل ۱۹ نتایج کلی تحقیقات آزمایشگاهی بر روی خاک نوع ۲ با طول تاج ۱۵ سانتی‌متر نشان داده شده است.



شکل ۱۹. بهبود ظرفیت باربری خاکریز ماسه‌ای نوع ۲ با طول تاج ۱۵ سانتی‌متر با استفاده از ستون سنگی

۳- نتیجه‌گیری

افزایش ظرفیت باربری به کمک ستون‌های سنگی یکی از روش‌های مفید و اقتصادی می‌باشد که به خوبی سبب تثبیت و پایداری می‌شوند. طبق آزمایش‌های انجام شده و تصدیقِ آن‌ها توسط تحلیل‌های عددی می‌توان نتیجه گرفت که وجود ستون سنگی سبب افزایش چشمگیر پایداری و بهبود ظرفیت باربری خاک می‌شود به‌گونه‌ای که در خاک نوع ۱ به کمک ستون سنگی ظرفیت باربری آن تا حدود ٦ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد و در خاک نوع ۲ این مقدار به بیش از ۲٤ کیلوپاسکال می‌رسد. به همین سبب استفاده از این تکنیک به خوبی می‌تواند سبب تثبیت و افزایش ظرفیت باربری جاده‌ها شود که به سبب آن از خطرات جانی و مالی بسیاری می‌توان جلوگیری به عمل آورد. مطالعات و تحقیقاتی که به آن‌ها اشاره شده، به خوبی نشان می‌دهند که استفاده از ستون‌های سنگی روشی، کارآمد، مفید، مقرون به صرفه و در عین حال بسیار سریع می‌باشد؛ که به کمک آن می‌توان جاده‌ها و شریان‌های حمل و نقلی را به خوبی ایمن کرد.

٤-مراجع

- قضاوی. م.، و نظری افشار. ج.، (۱۳۹۱) "طراحی و وش‌های اجرای ستون‌های سنگی" دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

- نصیری. م.، (۱۳۹٤) "مطالعه آزمایشگاهی پایداری شیب‌های

خاکی مسلح با ستون سنگی تسلیح شده توسط ژئوتکستایل"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه.

- Barksdale, R.D. and Bachus, R.C. (1983), "Design and construction of stone column vol. 1", FHWA/RD - December.

- Connor, S.S. and Gorski, A.G. (2000), "A timely solution for the Nojoqi Grade landslide. Repair US 101 South of Buellton", in the: 51st Annual highway geology symposium, Seattle, pp. 1–11.

- Cooper, M.R. and Rose, A.N. (1999), "Stone column support for an embankment on deep alluvial soils", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, 37 (1), pp.15–25.

- Dayte, K.R. and Madhav, M.R. (1988), "case histories of foundation with stone columns", International conference on case histories in Geotechnical engineering.

- Dheerendra, B.M.R. Sitaram, N. and Shivashankar, R. (2013), "A Critical Review of Construction, Analysis and Behavior of stone column", journal of Geotech. Geol. Eng. vol. 31, pp. 1–22.

- Fattah, M.Y. and Majeed, Q.G. (2012), "Finite Element Analysis of Geogrid Encased Stone Columns", journal of Geotech. Geol. Eng. Vol. 30, pp.713–726.

- Thompson, M. and White, D. (2005), "Review of stability berm alternatives for environmentally sensitive areas", the Lowa Department of Transportation.

- Tweedie, R. Clementini, R. Papanicolas, D. Skirrow, R. and Moser, G. "Stabilization of a highway embankment fill over a culvert using stone columns", In 57th Canadian Geotechnical conference.

- Xanthakos, P.P. Amberson, L.W. and Bruce, D. (1994), "Ground control and improvement", USA: New York, John Wiley & Sons.