

مطالعه عددی ظرفیت باربری پی مجاور شیب رسی مسلح شده با ستون سنگی

عادل عساکره*، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان،

بندرعباس

فرید ناصری دریایی، دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه

هرمزگان، بندرعباس

Email: asakereh@hormozgan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۲

چکیده

پی‌های بنا شده روی خاک‌های نرم به دلیل نشست‌پذیری زیاد و نیز شیب‌های خاکی حاوی این نوع خاک به دلیل احتمال زیاد وقوع گسیختگی، بایستی اصلاح گردند. استفاده از ستون‌های سنگی به عنوان یکی از روش‌های اصلاح خاک‌های نرم و افزایش ضریب اطمینان شیروانی‌های خاکی مطرح می‌شود که علاوه بر سادگی و راحتی اجرا، می‌تواند از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشد. هدف از انجام این پژوهش، مطالعه عددی اثر استفاده از ستون‌های سنگی بر ظرفیت باربری پی واقع بر شیب رسی و نیز پایداری آن شیب می‌باشد. با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC3D، شیب به صورت سه‌بعدی، با ابعاد مناسب و رعایت شرایط مزی، مدل شده است. ظرفیت باربری پی به روش کنترل تنش به دست آمده و ضریب اطمینان پایداری شیب از روش کاهش مقاومت برشی محاسبه شده است. به طور کلی، دو نوع مکانیزم گسیختگی در ستون‌های سنگی مشاهده گردید. در ستون‌های زیر پی، شکم‌دادگی ستون در ناحیه بالای آن و برای ستون‌هایی که در زیر پی قرار ندارند پدیده تغییرشکل جانبی در ناحیه بالای آن باعث کاهش اثر ستون بر ظرفیت باربری پی شده است. نتایج نشان داد که به‌طور کلی، ستون سنگی باعث بهبود پایداری شیب رسی و ظرفیت باربری پی خواهد شد. استفاده از ستون سنگی، در زیر پی، بیشترین تأثیر را در افزایش ظرفیت باربری خواهد داشت و نیز با افزایش فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها و پی، از میزان تأثیر آن کاسته خواهد شد. به طوری که در فاصله چهار برابر قطر، دیگر اثر چندانی بر ظرفیت باربری پی ندارد. در مورد ستون‌های گروهی، آرایشی که ستون‌ها در راستای طول پی دارند، به‌علت سطح جایگزین بیشتر، بر آرایشی که ستون‌ها در راستای شیب دارند ترجیح داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شیب رسی نرم، ستون سنگی، ظرفیت باربری، پایداری شیب، روش تفاضل محدود.

۱. مقدمه

با افزایش سریع رشد جمعیت و تحولات اقتصادی-اجتماعی در دهه‌های گذشته، بشر مجبور شده است از زمین‌هایی استفاده کند که قبلاً برای ساخت و سازها مناسب نبودند. با توجه به این که ظرفیت باربری و نشست دو معیار اصلی در مطالعه و طراحی فونداسیون سازه‌ها در نظر گرفته می‌شوند، لذا ساخت سازه‌ها روی خاک‌های نرم باعث به وجود آمدن نشست‌های مخرب و عدم پایداری سازه می‌شود. بنابراین، توسعه روش‌های بهسازی خاک‌های نرم و نامناسب مورد توجه مهندسان بوده است. در اواسط قرن نوزده میلادی، بهسازی خاک به یک حوزه کاربردی مهم در مهندسی ژئوتکنیک تبدیل شده و تعداد زیادی از تکنیک‌های بهبود به دست آمده است. یکی از مناسب‌ترین شیوه‌های اصلاح زمین، اجرای ستون‌های سنگی است. استفاده از ستون‌های سنگی در پروژه‌های ژئوتکنیک به منظور افزایش ظرفیت باربری خاک، کنترل نشست خاک، پایدارسازی شیروانی‌های خاکی، کاهش قابلیت روانگرایی خاک و افزایش مقاومت پی‌ها، کاربرد فراوان داشته است. اجرای خاکریزهای مهندسی روی بسترهای نرم ممکن است با مشکلاتی نظیر ناپایداری شیروانی مواجه شود. سازوکار بهسازی خاک عمدتاً بستگی به نوع خاک دارد. مقاومت خاک‌های رسی را می‌توان با استفاده از ستون سنگی بهبود داد. همچنین، ممکن است از ستون‌های سنگی در نهشته‌های ماسه‌ای استفاده شود. اما کاربرد ویژه آن‌ها در خاک‌های نرم، غیرآلی و چسبنده است. مطالعات بسیاری به منظور برآورد ظرفیت باربری و نشست بسترهای اصلاح شده با استفاده از ستون سنگی انجام شده است. بالام و بوکر (۱۹۸۵) ظرفیت باربری پی گسترده انعطاف‌پذیر واقع بر زمین بهسازی شده با ستون سنگی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این بررسی، افزایش ظرفیت باربری و کاهش

نشست را به ازای افزایش نسبت سطح جایگزینی (نسبت مساحت ستون‌ها به مساحت کل زمین)، افزایش طول ستون و کاهش فاصله بین ستون‌ها نشان داد. اندرو و پاپادوپولوس (۲۰۰۶) تأثیر میزان بار، نسبت سطح، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی زهکشی نشده بر تغییر مکان افقی یک ستون سنگی را در یک خاک چسبنده مورد بررسی و تحقیق قرار دادند. موروگسان و راجاگوپال (۲۰۱۰) عملکرد ستون‌های سنگی روکش شده قائم (VESC)^۱ با ژئوستتیک را با مدل‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که ظرفیت باربری و سختی ستون سنگی می‌تواند به وسیله محفظه ژئوستتیک افزایش داده شود. قضاوی و نظری افشار (۲۰۱۳) با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، تأثیر ستون سنگی مسلح به ژئوستتیک را برای افزایش ظرفیت باربری خاک نرم مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داده که ظرفیت باربری ستون سنگی با تسلیح ستون سنگی افزایش می‌یابد. سازوکارهای مختلف شکست ستون‌های سنگی نیز توسط بعضی محققین مورد مطالعه قرار گرفته است. هوگس و ویتز (۱۹۷۴) سازوکار خمره‌ای شدن ستون‌های سنگی منفرد را شرح دادند. آمبیلی و گاندی (۲۰۰۷) رفتار ستون‌های سنگی را با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که حداکثر شکم‌دادگی^۲ در عمق ۰/۵ برابر قطر ستون از بالا است. همچنین، بسته به فاصله بین ستون‌های سنگی، ظرفیت باربری به میزان ۱/۵ تا ۲/۵ برابر افزایش یافته، اما با افزایش فاصله بین ستون‌ها تا سه برابر قطر آنها و نسبت‌های بیشتر، تغییرات ظرفیت باربری قابل چشم‌پوشی است. دب و همکاران (۲۰۱۱) تحقیقاتی در مورد خاک دانه‌ای مسلح به ژئوستتیک قرار گرفته روی خاک نرم مسلح به ستون سنگی انجام دادند. نتایج

^۱- Vertical encased stone column

^۲- Bulging

که حداکثر جابجایی رخ می‌دهد، تعیین کرده است. وی و چنگ (۲۰۰۹)، که به مطالعه فاکتور ایمنی شیب مسلح- شده با یک ردیف از شمع پرداختند، نظر حاجی عزیزی و نصیری (۲۰۱۹) را تأیید می‌کنند. مدل عددی آن‌ها، موقعیت بهینه شمع را بین دو خط مرکزی شیب و خط مرکزی سطح لغزش شیب ارائه می‌دهد. لذا، موقعیت بهینه شمع کمی بالاتر از میانه شیب است. راعی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و روش عددی، اثر صلبیت و فاصله‌داری ستون‌های سنگی معمولی، مسلح و شمع بتنی را بر ظرفیت باربری پی نواری واقع بر شیب ماسه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. یافته‌های آنان نشان داد که افزایش صلبیت و کاهش فضای ستون‌های سنگی باعث افزایش ظرفیت باربری پی می‌شود. این افزایش در ظرفیت باربری به اثر قوسی خاک^۱، بین ستون‌های سنگی، نسبت داده شد. حاجی عزیزی و نصیری (۲۰۱۹) پایداری شیب ماسه‌ای تقویت‌شده با ستون سنگی مسلح‌شده با ژئوگرید را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، پارامترهای مختلفی از جمله قطر ستون سنگی، سختی، چسبندگی و اصطکاک فشر کویل ژئوگرید، فاصله مرکز به مرکز ستون‌های سنگی، نسبت S/D و نحوه آرایش مسلح‌کننده‌ها بررسی شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که پارامتر تأثیرگذار بر ژئوگرید به منظور مسلح کردن ستون سنگی، چسبندگی فشر کویل است، که با افزایش این پارامتر، ظرفیت باربری شیب مسلح‌شده به صورت خطی افزایش می‌یابد (این بدان معنی است که استفاده از ستون سنگی مسلح با پوشش ژئوگرید می‌تواند ظرفیت باربری شیب را، بسته به نوع مشخصات ژئوگرید، تا $1/8$ برابر شیب مسلح با ستون سنگی تقویت‌نشده بهبود بخشد). در حالت استفاده از ردیف ستون‌های سنگی، بیشترین افزایش ظرفیت باربری در حالت $S/D=2$ به وجود می‌آید. اما کاهش نسبت S/D الزاماً به معنی افزایش چشمگیر

نشان داد که شکم‌دادگی ستون سنگی با اجرای ژئوگرید کاهش یافته و حداکثر شکم‌دادگی در عمقی بیشتر نسبت به حالت بدون اجرای ژئوگرید قرار گرفته است. مطالعات مختلفی نیز در مورد پایداری شیب خاک نرم و ظرفیت باربری پی واقع بر آنها انجام گرفته است. کاسترو (۲۰۱۷) عملکرد گروه ستون سنگی قرار گرفته در زیر یک فونداسیون صلب را با استفاده از تحلیل المان محدود دو و سه‌بعدی مورد مطالعه قرار داد. وکلی و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از روش آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، اثر ستون‌های سنگی که به طور عمود در یک شیب خاک نرم قرار گرفته‌اند را بر پایداری شیب، ظرفیت باربری و نشست مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ستون‌های سنگی باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست شده و پایداری شیب بسته به اثر نسبی پارامترهای مختلف از $1/18$ تا $1/62$ برابر افزایش یافت. کادیم و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش تفاضل محدود دوبعدی و به کمک نرم‌افزار FALC2D، پایداری خاکریز تقویت‌شده با ستون سنگی معمولی و روکش‌شده را در شرایط کوتاه‌مدت مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که روکش ژئوسنتتیک پیرامون ستون سنگی باعث افزایش ضریب اطمینان پایداری خاکریز ساخته شده در خاک نرم به میزان $1/2$ تا $1/8$ برابر خواهد شد. آل شکور (۲۰۱۵) با به‌کارگیری روش تعادل حدی، پایداری شیب تقویت‌شده با چند ردیف ستون سنگی و نیز نگهدارنده بولت را بررسی نمود و مشاهده کرد که با افزایش عرض معادل ستون سنگی و زاویه اصطکاک مصالح سنگی، فاکتور ایمنی به میزان 1 تا 7 درصد افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده شد که برای دستیابی به بیشترین فاکتور ایمنی شیب، بهترین موقعیت ستون باید در بالا و اطراف آن باشد. این نتیجه، در تناقض با نتیجه حاجی عزیزی و نصیری (۲۰۱۹) می‌باشد که موقعیت بهینه ستون سنگی را در وسط شیب، یعنی جایی

^۱- Arching effect

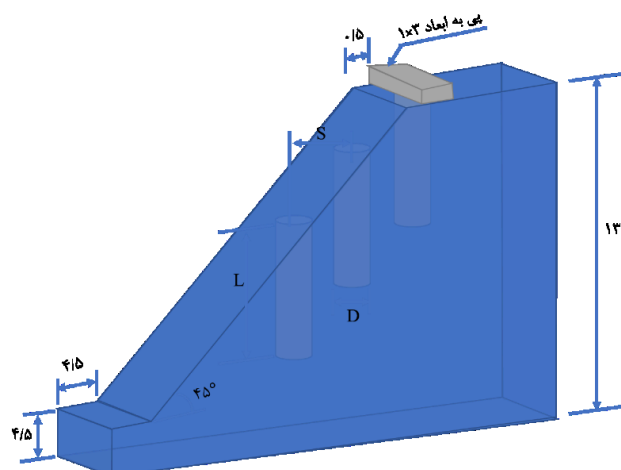
ظرفیت باربری و یا پایداری شیب بررسی شده است. در حالی که آرایشی از ستون‌های سنگی که بیشترین ظرفیت باربری را به دست می‌دهد لزوماً ممکن است بیشترین پایداری را ایجاد نکند. لذا، در این تحقیق، سعی شده که یک ضریب بهبود عملکرد تعریف شود که اثر ستون‌های سنگی را بر ظرفیت باربری و پایداری شیب به صورت توأمان در نظر گیرد. در نهایت، چیدمان بهینه‌ای که باعث بهبود ظرفیت باربری و پایداری شیب شود ارائه شده است.

۲. مدل عددی

امروزه، روش‌های عددی، به دلیل قابلیت انعطاف‌پذیری زیاد و امکان تحلیل سریع و دقیق رفتار سنگ و خاک، کاربرد ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. لذا، مطالعه حاضر، با روش تفاضل محدود سه‌بعدی و با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D v5.01 انجام گرفته است. این نرم‌افزار، مدل‌سازی عددی برای تحلیل ژئوتکنیک پیشرفته خاک، سنگ و المان سازه در فضای سه‌بعدی را فراهم می‌آورد. در پژوهش حاضر، به منظور بررسی اثر ستون‌های سنگی بر پایداری شیب‌های رسی و نیز ظرفیت باربری پی نواری واقع بر آن، آرایش‌های مختلف ستون سنگی شامل ستون منفرد و گروهی مورد بررسی قرار گرفته است. آرایش ستون‌ها در گروه ستون‌های سنگی به صورت خطی و مستطیلی می‌باشد. در آرایش خطی، تنها از یک ردیف ستون در امتداد طول شیب استفاده می‌شود و تعداد ستون‌ها و فواصل آنها تغییر می‌کند. ولی در آرایش مستطیلی، جانمایی ستون‌ها به صورت دوطبقه و در عرض و طول شیب خواهد بود. به طور کلی، برای آرایش خطی ستون‌های سنگی، چهار مدل پایه در نظر گرفته شده است. در شکل ۱، شماتیکی از هندسه مدل و متغیرهای آن نشان داده شده است (ابعاد به متر می‌باشند).

ظرفیت باربری شیب نخواهد بود. لاجوردی و همکاران (۲۰۱۹) رفتار ستون‌های سنگی منفرد و گروهی در دو حالت غیرمسلح و مسلح شده با پوشش ژئوتکستایل پیرامون آن را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. ستون‌های سنگی منفرد با قطر ۶۳ و ۸۰ میلی‌متر، با نسبت طول به قطر ۵، تحت بارگذاری قرار گرفتند. چندین آرایش در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا، اثر افزایش قطر و مسلح کردن ستون سنگی منفرد مورد مطالعه قرار گرفت و مشاهده شد که در هر دو حالت، میزان افزایش در ظرفیت باربری ۱۴/۶ درصد می‌باشد. سپس، یک آرایش شش ضلعی، با یک ستون در مرکز، مورد مطالعه قرار گرفت که قطر همه ستون‌ها ۶۳ میلی‌متر بوده و بارگذاری فقط در ستون مرکزی انجام گرفت. در این حالت، ۶/۳ درصد افزایش در ظرفیت باربری نسبت به ستون منفرد مشاهده شد. در ادامه، یک آرایش ۹ ضلعی با هسته ۳ ستونی نیز بررسی شد که در این حالت تنها حدود ۸ درصد افزایش در ظرفیت باربری نسبت به هسته سه‌تایی ملاحظه گردید.

با مروری بر پژوهش‌های چند دهه گذشته ملاحظه می‌شود که محققین زیادی به بررسی اثر ستون‌های سنگی بر ظرفیت باربری و نشست پی از روش‌های مختلف تحلیلی، تجربی و عددی پرداخته‌اند. لیکن مسئله پایداری شیب یا خاکریز رسی به روش ستون سنگی، حجم اندکی از مطالعات را به خود اختصاص داده است، و همین مطالعات اندک نیز اغلب روی خاکریزهای تقویت شده با ستون سنگی در مقایسه با شیب‌ها متمرکز شده‌اند. همچنین، استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در بالا بردن ظرفیت باربری زمین از مقوله‌هایی است که در سال‌های اخیر مورد توجه خاص محققین قرار گرفته است. در پژوهش حاضر نیز اثر ستون سنگی بر ظرفیت باربری پی واقع بر شیب رسی نرم و پایداری شیب به هر دو صورت مسلح و غیرمسلح مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در تحقیقات گذشته، اثر ستون سنگی تنها بر



شکل ۱. هندسه، ابعاد و متغیرهای مستقل مدل شیب رس نرم (ابعاد به متر)

برای شیب رسی، ستون سنگی، پی و روکش ستون در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق جدول ۱، مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی ۱۲ برابر مصالح رسی در نظر گرفته شده است و مدول الاستیک پی به اندازه کافی بزرگ انتخاب شده است تا رفتار جسم صلب را نشان دهد. همین طور، خواص مکانیکی مصالح معمول روکش مسلح کننده مورد استفاده در تقویت شیب، همان گونه که در تحقیق نادری و همکاران (۲۰۱۸) آمده، مطابق جدول ۱ است و در مدل، از المان سازه‌ای ژئوگرید برای این منظور استفاده شده است.

بارگذاری پی به صورت کنترل تنش انجام شد. به صورتی که بار به صورت گسترده و طی چندین مرحله روی سطح افقی معادل پی به ابعاد ۱×۳ متر، که عرض پی روی قطر ستون سنگی بالایی قرار می‌گیرد، اعمال شده است. همچنین، این سطح مستطیلی، ۵۰ سانتی متر از لبه شیب فاصله دارد. گام‌های بارگذاری به قدری کوچک (۵۰ Pa) در نظر گرفته شده که تشخیص ظرفیت باربری نهایی پی سطحی به سهولت امکان پذیر باشد. برای شیب رسی و نیز مصالح ستون سنگی، از مدل رفتاری موهر-کولمب و برای مصالح پی از مدل رفتاری الاستیک استفاده شده است. پارامترهای ژئوتکنیک مورد استفاده

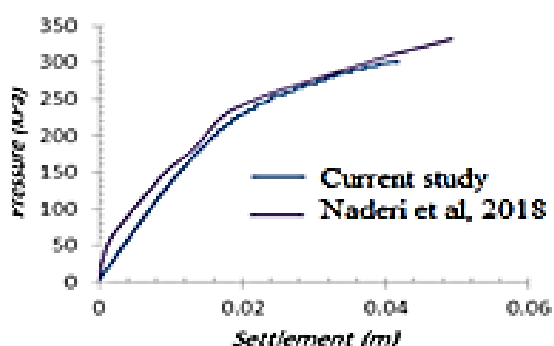
جدول ۱. پارامترهای ژئوتکنیک و مدل رفتاری مصالح مورد استفاده در تحقیق

مصالح				واحد	نماد	ویژگی
روکش ژئوگرید	پی	ستون سنگی	رس نرم			
۱۶	۲۰۰	۶۰	۵	MPa	E	مدول الاستیسیته
--	--	۰	۱۵	kPa	c_u	مقاومت برشی زهکشی نشده
--	--	۴۵°	۱۹°	degree	ϕ	زاویه اصطکاک داخلی
--	--	۱۵	۰	degree	ψ	زاویه اتساع
--	۲۵	۱۶	۱۵	kN/m ³	γ	وزن مخصوص
--	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۴۵	-	ν	ضریب پواسون
۰/۴۴	--	--	--	MPa	σ_t	مقاومت کششی
۱/۷	--	--	--	mm	t	ضخامت
--	الاستیک	موهر-کولمب	موهر-کولمب	-	-	مدل رفتاری

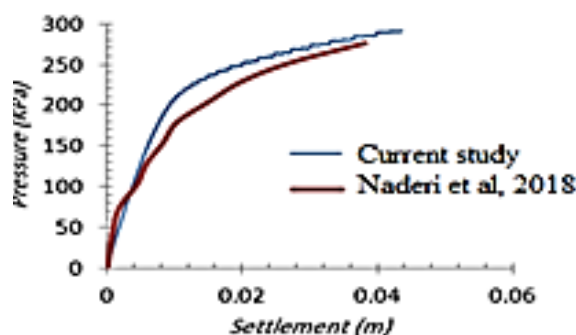
۳. اعتبارسنجی مدل

از جمله موارد حائز اهمیت در مدل‌سازی عددی، اعتبارسنجی مدل می‌باشد. بر این اساس، از اطلاعات موجود در مطالعات پیشین و یا مقادیر اندازه‌گیری شده در محل می‌توان استفاده کرد. مشخصات جدول ۱ در مدل وارد و مدل‌سازی انجام شده است. در نهایت، خروجی‌های مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده در محل و یا مقادیر ارائه شده توسط مطالعات پیشین مقایسه می‌شود. در نتیجه، دقت و قابلیت اعتماد نتایج حاصل از مدل‌سازی بدین وسیله مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفته و در مورد تصحیح پارامترهای ورودی مدل (آنالیز

برگشتی) و یا ادامه مراحل مدل‌سازی تصمیم‌گیری می‌شود. در پژوهش حاضر، به منظور اعتبارسنجی و تأیید اعتبار مدل عددی، از نتایج مطالعات آزمایشگاهی و عددی نادری و همکاران (۲۰۱۸) استفاده شده است. نتایج برای شیب رسی بدون استفاده از ستون سنگی و نیز شیب تقویت شده با ستون سنگی منفرد معمولی و مسلح و نیز گروه ستون سنگی مقایسه گردید. نتایج اعتبارسنجی مدل برای ستون تقویت شده با یک ستون سنگی مسلح و غیرمسلح در شکل ۲ ارائه شده است. به طور کلی، مدل عددی مطالعه حاضر و نتایج آزمایشگاهی نادری و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت خوبی نشان می‌دهند.



(ب)



(الف)

شکل ۲. نتایج اعتبارسنجی و منحنی بار-نشست برای شیب رسی: (الف) تقویت شده با یک ستون سنگی غیرمسلح و (ب)

تقویت شده با یک ستون سنگی مسلح

وارد می‌شود و منحنی تنش-جابجایی قائم به دست می‌آید. مقدار گام تنش به میزان کوچکی انتخاب شد تا روند اعمال بار به صورت استاتیکی محقق شود. در این پژوهش، اگرچه روش تعیین منحنی بار-جابجایی به صورت کنترل تنش انجام گرفته است اما با استفاده از یک دستور کنترلی بار استاتیکی تا زمانی که نشست قائم کوچک‌تر از ۱۰۰ میلی‌متر است با گام معینی (۵۰ Pa) افزایش یافته و پس از آن روند حل مسأله خاتمه می‌یابد و منحنی بار-جابجایی برای مرکز و گوشه‌های پی تعیین می‌شود. مقدار ۱۰۰ میلی‌متر به این دلیل انتخاب شد که

۴. مدل‌سازی عددی

در مطالعه‌ی حاضر، تحلیل با توجه به آرایش‌های مستطیلی، توزیع تنش‌های پیرامون شیب رسی و بررسی رفتار آن مستلزم استفاده از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی است. در همین زمینه، برنامه تفاضل محدود FLAC3D در نوشتار تحقیقاتی متعددی استفاده شده است. روند شبیه‌سازی به صورت کنترل تنش بوده و به این صورت است که ابتدا شیب رسی ساخته شده و اجازه داده می‌شود تا تحت نیروی ثقل به وضعیت تعادل برسد. سپس، بار استاتیکی با گام‌های افزایشی به میزان ۵۰ پاسکال به خاک

کنترل کننده در تعیین قابلیت باربری مجاز است و طراحی فونداسیون‌ها براساس نشست مجاز انجام می‌شود. بر اساس مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان ایران (پی و پی‌سازی) مقادیر نشست قابل قبول در زیر انواع پی‌های قرار گرفته روی خاک‌های مختلف به شرح جدول ۲ است.

حداکثر نشست مجاز توصیه شده در مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان ایران (۱۳۹۲) مطابق جدول ۲، ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. انتخاب مقادیر بزرگ برای نشست کنترلی سبب طولانی‌تر شدن زمان اجرای برنامه می‌شود و از طرف دیگر این مقدار به اندازه کافی بزرگ هست که اجازه دهد منحنی پوش وارد ناحیه غیرخطی شود. موضوع دیگر آنکه عمدتاً در طراحی پی‌های سطحی، نشست عامل

جدول ۲. مقادیر اولیه نشست مجاز تحت بارگذاری استاتیک- مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان ایران (۱۳۹۲)

۱- نشست مجاز بر حسب میلی‌متر		۲- نوع پی	۳- خاک
۴- یکنواخت	۵- غیر یکنواخت		
۶-۲۵	۷-۲۰	۸- منفرد	۹- ماسه
۱۰-۵۰	۱۱-۲۰	۱۲- شبکه‌ای و گسترده	
۱۳-۶۵	۱۴-۲۵	۱۵- منفرد	
۱۷-۱۰۰-۶۵	۱۸-۲۵	۱۹- شبکه‌ای و گسترده	۱۶- رس

مضاعف^۱ به دست می‌آید. از این روش در چندین پژوهش از جمله نادری و همکاران (۲۰۱۸) نیز استفاده شده است. در این روش، دو مماس بر بخش ابتدایی و انتهایی منحنی بار-جابجایی رسم و نقطه تلاقی خطوط مماس به عنوان ظرفیت باربری پی در نظر گرفته می‌شود. در ادامه مباحث این بخش، شیب رسی ساده و اثر ستون‌های سنگی بر ظرفیت باربری پی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در ابتدا، ستون‌های منفرد معمولی و مسلح با فواصل مختلف، مورد مطالعه قرار خواهند گرفت. سپس، گروه ستون‌های سنگی با آرایش‌های موقعیتی مختلف بررسی می‌شوند. در تمامی این مدل‌ها، نسبت طول به قطر ستون سنگی ($L/D=6$) رعایت شده است.

همچنین، به منظور بررسی اثر گروه ستون‌های سنگی بر ظرفیت باربری پی، سه نوع آرایش مختلف در نظر گرفته شده است. در شکل ۳، آرایش‌های مختلف گروه ستون‌های سنگی مورد مطالعه نشان داده شده است که در آن قطر ستون (D) یک متر و طول ستون ۶ متر یا ۶D

مقادیر مندرج در جدول ۲، مقادیر اولیه بوده و مقادیر نشست مجاز پس از بررسی دقیق عملکرد سازه مورد نظر انتخاب می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای خاک‌های رسی، مقادیر نشست مجاز برای حالت غیریکنواخت و یکنواخت به ترتیب ۲۵ و ۶۵ میلی‌متر توصیه شده است. به عبارتی، ظرفیت باربری پی باید به گونه‌ای باشد که در مقادیر نشست در حالت غیریکنواخت و یکنواخت از ۲۵ و ۶۵ میلی‌متر تجاوز نکند. در این پژوهش، علاوه بر روش مماسی، ظرفیت باربری پی برای نشست مجاز نیز تعیین شده است. مقادیر نشست مجاز در این پژوهش برای حالت غیریکنواخت ۲۵ و برای حالت یکنواخت به طور محافظه‌کارانه ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. در ابتدا، ظرفیت باربری پی در حالت بدون استفاده از ستون سنگی محاسبه می‌گردد تا یک مدل پایه برای قیاس نتایج تحلیل وجود داشته باشد. در این پژوهش، پس از ترسیم منحنی بار-جابجایی، ظرفیت باربری پی با استفاده از روش مماسی

^۱- Double tangent method

محورهای مختصات در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین var_n متغیر وابسته مورد مطالعه است که در این تحقیق ظرفیت باربری (BC) و یا ضریب اطمینان پایداری شیب (SF) می باشد. چنانچه از ستون سنگی استفاده نشود نامگذاری مدل ها به صورت رابطه (۲) خواهد بود.

$$C(0) - var_n \quad (2)$$

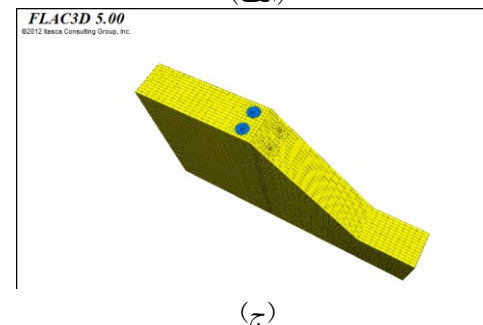
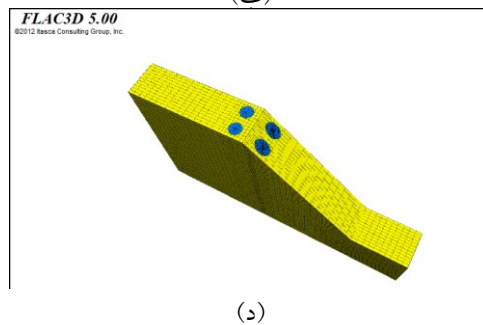
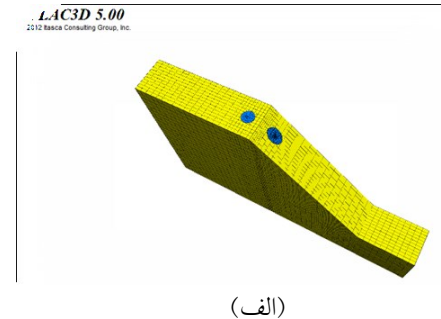
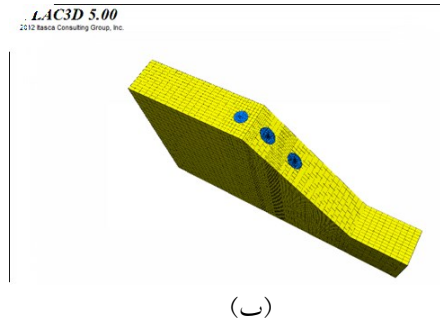
در مواردی که از ستون سنگی مسلح استفاده شود، به جای نماد C از نماد CR استفاده می شود و به عبارتی نام گذاری مدل به صورت رابطه (۳) خواهد بود.

$$CR(n_1 \times n_2) - S(n_3) - var_n \quad (3)$$

در نظر گرفته شده است. همچنین، فاصله مرکز به مرکز ستون های سنگی (S) هر ردیف نسبت به هم دو برابر قطر ستون سنگی یا $2D$ در نظر گرفته شده است که D همانند قبل، یک متر است. همان طور که مشاهده می شود، از سه آرایش خطی و یک آرایش مستطیلی برای تعیین بهترین آرایش گروه ستون های سنگی استفاده شده است. در این تحقیق، نام گذاری مدل های عددی به صورت رابطه (۱) انجام پذیرفته است.

$$C(n_1 \times n_2) - S(n_3) - var_n \quad (1)$$

که در آن n_1 تعداد ستون سنگی در امتداد محور x (طول شیب)، n_2 تعداد ستون سنگی در امتداد محور y (عرض شیب)، n_3 فاصله مرکز ستون های سنگی در یک ردیف نسبت به ردیف دیگر و یا نسبت به مرکز پی می باشد.



شکل ۳. آرایش های مختلف گروه ستون های سنگی: الف) آرایش خطی دو ستونی در امتداد شیب، ب) آرایش خطی سه ستونی در امتداد شیب، ج) آرایش خطی دو ستونی در امتداد طول پی و د) آرایش مستطیلی چهار ستونه

در جدول ۳، مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است.

جدول ۳. مدل‌های مورد استفاده در تحقیق

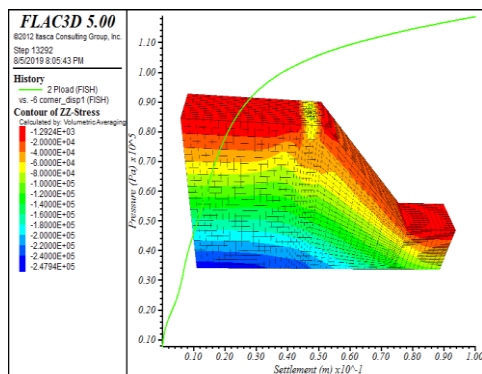
S/D	تعداد ستون سنگی	نوع ستون سنگی	نوع شیب رسی		نام مدل	شماره
			مسلح	غیر مسلح		
-	۰	-		*	C00-BC	۱
۰	۱	غیر مسلح	*		C11-S0-BC	۲
۲	۱	غیر مسلح	*		C11-S2-BC	۳
۴	۱	غیر مسلح	*		C11-S4-BC	۴
۰	۱	مسلح	*		CR11-S0-BC	۵
۲	۱	مسلح	*		CR11-S2-BC	۶
۴	۱	مسلح	*		CR11-S4-BC	۷
۲	۲	غیر مسلح	*		C21-S2-BC	۸
۲	۳	غیر مسلح	*		C31-S2-BC	۹
۰	۲	غیر مسلح	*		C12-S0-BC	۱۰
۲	۴	غیر مسلح	*		C22-S2-BC	۱۱
-	۰	-		*	C00-FS	۱۲
۰	۱	غیر مسلح	*		C11-S0-FS	۱۳
۲	۱	غیر مسلح	*		C11-S2-FS	۱۴
۴	۱	غیر مسلح	*		C11-S4-FS	۱۵
۲	۲	غیر مسلح	*		C21-S2-FS	۱۶
۲	۳	غیر مسلح	*		C31-S2-FS	۱۷
۰	۲	غیر مسلح	*		C12-S0-FS	۱۸
۲	۴	غیر مسلح	*		C22-S2-FS	۱۹

۵. نتایج تحلیل

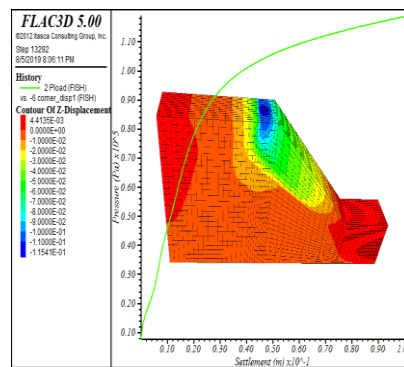
۵-۱. شیب رسی تقویت نشده یا بدون ستون سنگی

در شکل ۴، کانتورهای تنش و جابجایی قائم به همراه منحنی بار-نشست برای شیب رسی (تقویت نشده) در حالت بدون استفاده از ستون سنگی (مدل C0-BC) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، حداکثر تنش نرمال زیر پی ۱۱۸ کیلوپاسکال است که در کانتورهای تنش نیز مشاهده می‌شود. همچنین، کانتورهای جابجایی

به صورت یک گوه وارد دامنه شیب شده است. برای تعیین ظرفیت باربری پی از روش مماسی استفاده گردید که در شکل ۵ نشان داده شده است. ظرفیت باربری شیب رسی در حالت بدون استفاده از ستون سنگی براساس روش مماسی ۱۰۵ کیلوپاسکال محاسبه شده است. ظرفیت باربری پی در نشست ۵۰ میلی‌متر نیز همین مقدار را نشان می‌دهد. چنانچه بار معادل نشست مجاز ۲۵ میلی‌متر به عنوان بار مجاز در نظر گرفته شود، ظرفیت باربری ۸۷/۲ کیلوپاسکال به دست می‌آید.



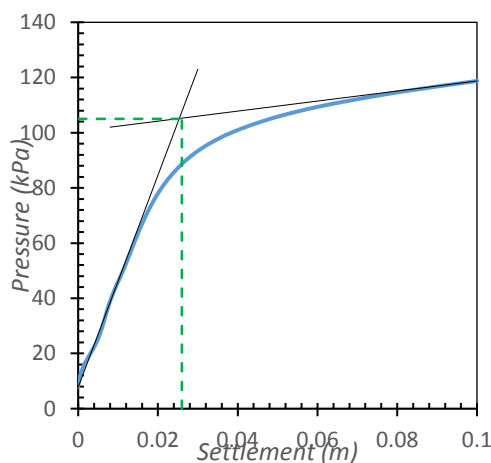
ب



(الف)

شکل ۴. نتایج تحلیل و منحنی بار-جابجایی برای شیب رسی بدون استفاده از ستون سنگی: (الف) کانتور جابجایی قائم و (ب)

کانتور تنش قائم

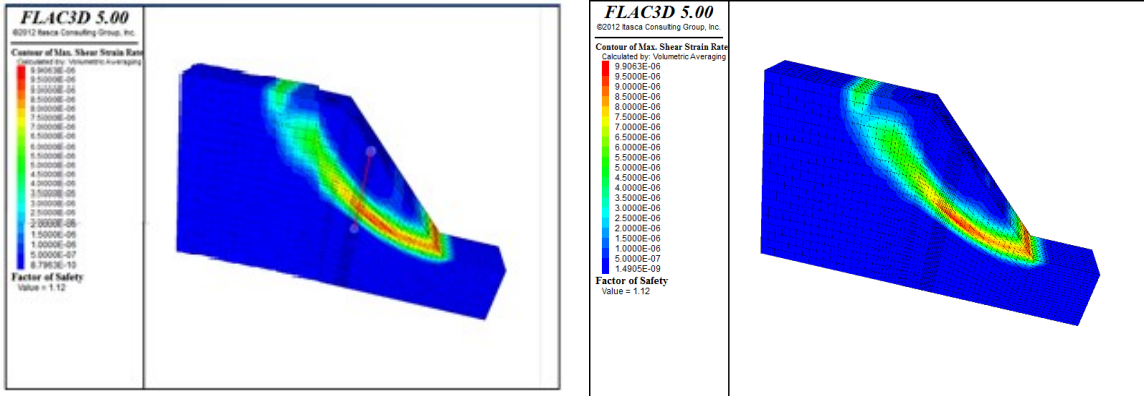


شکل ۵. روش مماسی برای تعیین ظرفیت باربری شیب رسی بدون استفاده از ستون سنگی (مدل C0-BC)

شدن ستون گروهی به مجموعه خاک-پی، از عمق سطح لغزش کاسته شده و لذا مقادیر طول کمتر ستون نیز می‌تواند مناسب باشد. برای مثال، حاجی عزیزی و نصیری (۲۰۱۹) بهینه‌ترین عمق نفوذ ستون سنگی در لایه ماسه‌ای زیرین را در $L/D=3$ تخمین زدند. آنها بر این باورند که یک شیب ناپایدار ماسه‌ای را می‌توان پس از مسلح کردن با ستون سنگی با عمق نفوذ ۳ برابر قطر، در لایه زیرین به شیبی پایدار با ضریب اطمینان $1/42$ تبدیل کرد. همچنین، طول بهینه ستون، به نسبت سطح جایگزین^۱ (A_r) و عرض پی (D) بستگی دارد (حاجی عزیزی و نصیری، ۲۰۱۹).

کانتور حداکثر نرخ کرنش برشی شیب رسی در حالت بدون استفاده از ستون سنگی در شکل ۶-الف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ضریب اطمینان شیب در شرایط طبیعی $1/12$ می‌باشد که مقدار کمی محسوب می‌شود. برای تعیین طول مناسب ستون‌های سنگی لازم است که ستون سنگی به گونه‌ای در نظر گرفته شود که از ناحیه لغزش و سطح گسیختگی عبور کند. همان‌طور که در شکل ۶-ب نشان داده شده است، حداقل طول لازم برای ستون‌های سنگی $5/68$ متر است. لذا، بر این اساس، در پژوهش حاضر، طول ستون‌های سنگی ۶ متر (یا ۶ برابر قطر ستون) در نظر گرفته شده که معرف بحرانی‌ترین وضعیت است. لازم به ذکر است که با اضافه

^۱- Area replacement ratio



(ب)

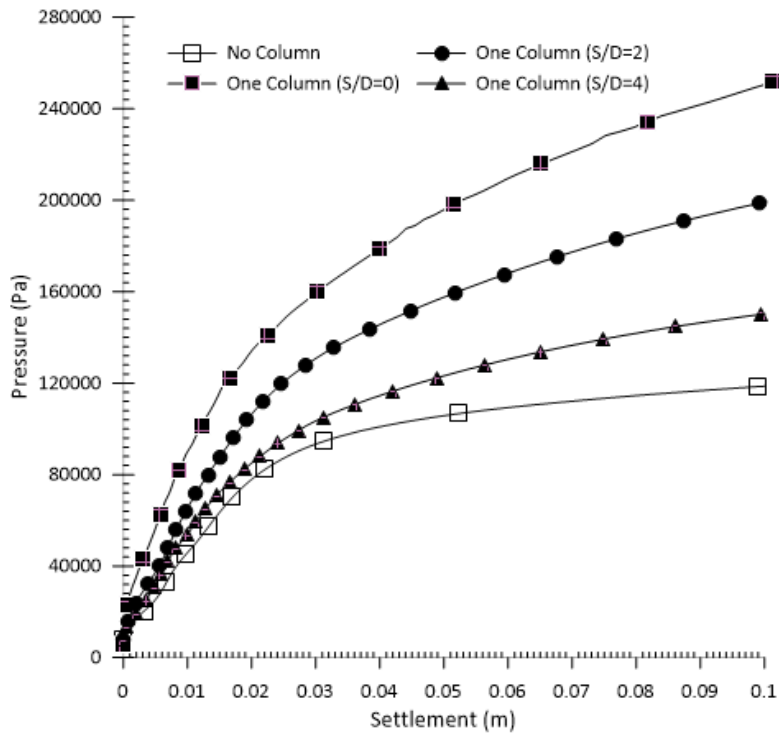
(الف)

شکل ۶. الف) کانتورهای حداکثر نرخ کرنش و سطح لغزش شیب تقویت نشده و ب) محاسبه طول لازم ستون سنگی (مدل C0-FS)

قطر ستون در نظر گرفته شده است. در شکل ۷، منحنی بار-جابجایی پی برای شیب رسی ساده و تقویت شده در حالت‌های مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله مرکز پی و مرکز ستون سنگی، میزان تأثیر ستون بر ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. به طوری که در فاصله بیش از چهار برابر قطر ستون، تأثیر آن بر ظرفیت باربری پی به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

۲-۵. شیب رسی تقویت شده با یک ستون سنگی غیرمسلح

در این بخش، ستون سنگی منفرد در فواصل مختلفی نسبت به مرکز پی قرار داده شده و ظرفیت باربری پی در هر یک از حالات مورد بررسی قرار گرفته است. فاصله مرکز ستون سنگی تا مرکز پی به ترتیب صفر، ۲ و ۴ برابر



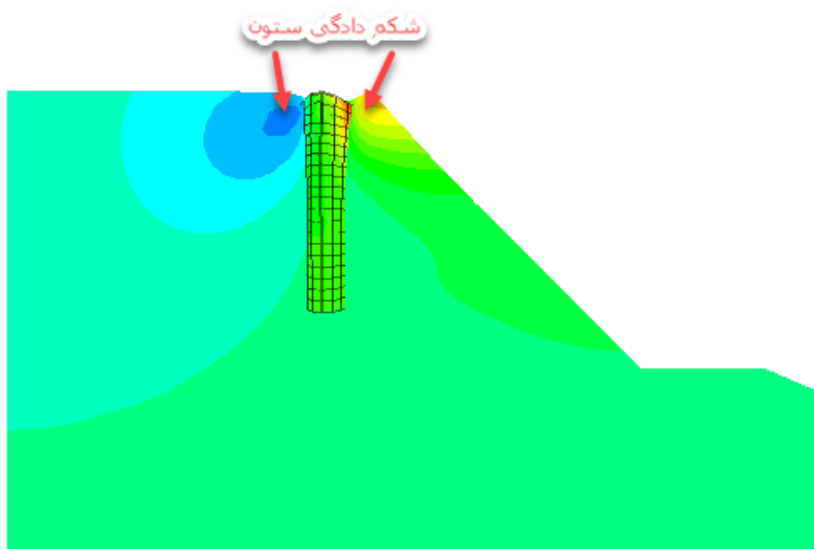
شکل ۷. منحنی بار-جابجایی پی بر شیب رسی ساده و تقویت شده با ستون‌های منفرد غیرمسلح

۳-۵. شیب رسی تقویت شده با یک ستون سنگی

مسلح

مشابه ستون‌های سنگی غیرمسلح، ستون سنگی مسلح شده با ژئوگرید نیز در فواصل مختلفی نسبت به مرکز پی قرار داده شد و ظرفیت باربری پی در هر یک از حالات مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی نیز فاصله مرکز ستون سنگی تا مرکز پی به ترتیب صفر، ۲ و ۴ برابر قطر ستون در نظر گرفته شد. همانند ستون‌های سنگی معمولی، مشاهده می‌شود که در اینجا نیز دامنه جابجایی‌ها برای حالت مسلح کاسته شده است که این میزان کاهش

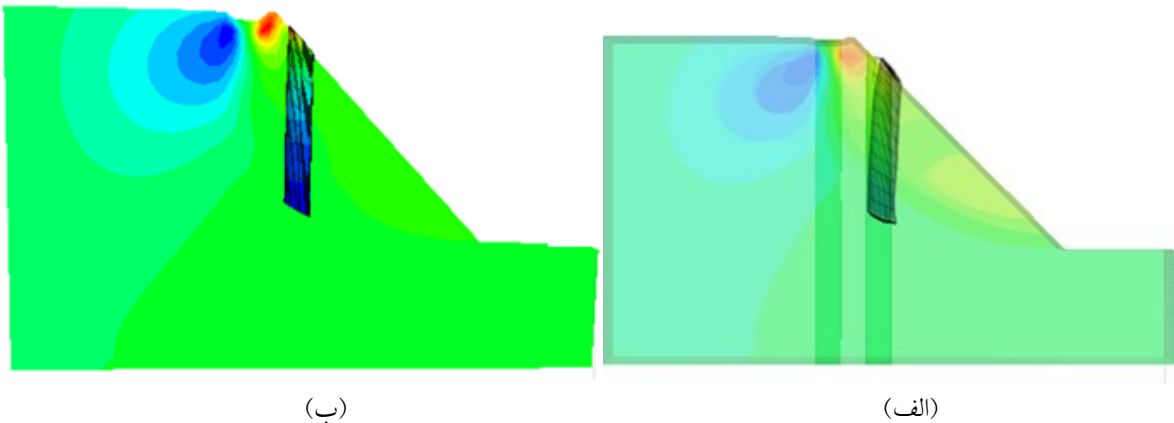
در قیاس با ستون‌های معمولی بیشتر بوده و لذا ظرفیت باربری افزایش قابل توجهی یافته است. لازم به ذکر است که ظرفیت باربری ستون‌های سنگی وابسته به احاطه کردن خاک نرم در یک سلول محیطی است. از این رو، یکی از روش‌های مورد نیاز برای افزایش تنش دورگیر در ستون‌های سنگی استفاده از روکش‌های ژئوگرید است. در شکل ۸، تغییرشکل جانبی ستون در حالتی که یک ستون زیر پی قرار گرفته نشان داده شده است. شکم‌دادگی ستون در این شکل در قسمت‌های فوقانی ستون به خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۸. کانتور تغییرشکل جانبی ستون و ناحیه شکم‌دادگی در مدل C1-S0-BC

توجهی در ناحیه بالایی ستون اتفاق می‌افتد که دلیل کاهش اثر ستون بر ظرفیت باربری پی نیز از همین امر ناشی می‌شود. پدیده تغییرشکل جانبی در ستون‌های مسلح نیز مشاهده گردید. اما به دلیل استفاده از دورپیچ قائم ژئوگرید، تا حد زیادی از این تغییرشکل جانبی کاسته شده است (شکل ۹-ب).

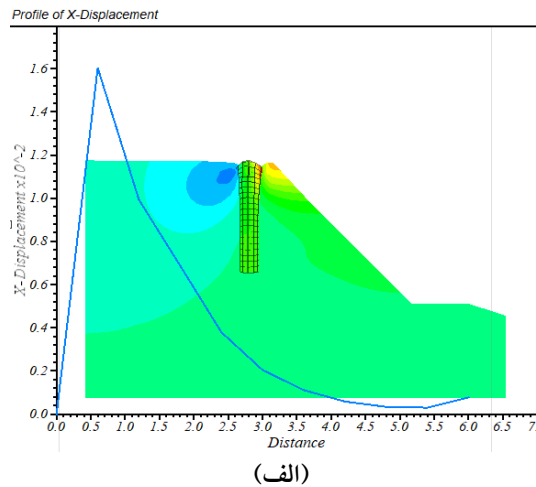
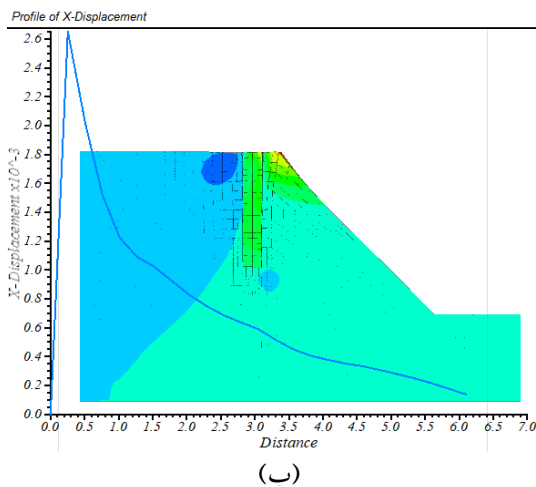
برای مدل‌هایی که ستون در زیر پی قرار ندارد نیز تغییرات شکل جانبی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۹ کانتور تغییرشکل‌های جانبی را برای حالتی که ستون خارج از پی با نسبت $s/d=2$ قرار گرفته نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ستون‌هایی که در زیر پی قرار ندارند دچار شکم‌دادگی نمی‌شوند. اما تغییرشکل جانبی قابل

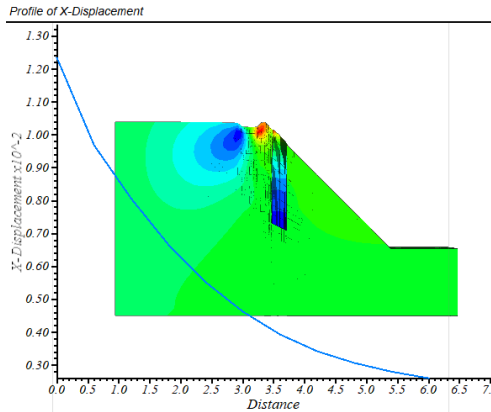


شکل ۹. کانتور تغییرشکل جانبی ستون در: الف) مدل C1-S2-BC و ب) مدل CRI-S2-BC

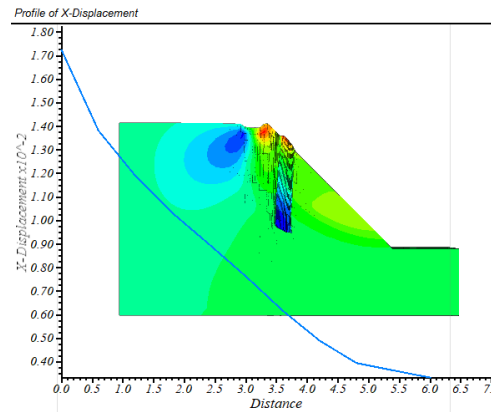
در شکل ۱۰، پروفیل‌های جابجایی افقی ستون‌های سنگی زیر پی و خارج از پی در حالت مسلح و غیرمسلح نشان داده شده است. مطابق این شکل، به طور کلی دو نوع مکانیزم گسیختگی در ستون‌های سنگی قابل مشاهده است. در ستون‌های زیر پی، شکم‌دادگی ستون در ناحیه بالای آن باعث کاهش ظرفیت باربری پی می‌شود (شکل ۱۰-ه). همچنین، برای ستون‌هایی که در زیر پی قرار ندارند، پدیده تغییرشکل جانبی در ناحیه بالای آن باعث کاهش اثر ستون بر ظرفیت باربری پی می‌شود (شکل ۱۰-و). علت این امر آن است که ستونی که در زیر پی

نباشد متحمل تنش برشی به مراتب بیشتری از تنش نرمال شده و لذا مُد شکست غالب از نوع تغییرشکل جانبی است. استفاده از دورپیچ ژئوگرید در هر دو حالت فوق، از میزان شکم و جابجایی جانبی ستون کاسته و افزایش ظرفیت باربری پی را به دنبال دارد. راعی و همکاران (۲۰۱۹) به نتیجه مشابهی دست یافتند. آنها در تحقیق خود پس از بررسی انواع روکش ستون و نیز ستون بتنی، دلیل این امر را سختی بیشتر ستون روکش شده و مقاومت برشی و خمشی بیشتر آن می‌دانند.

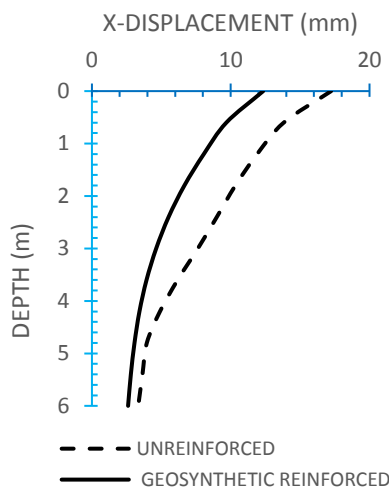




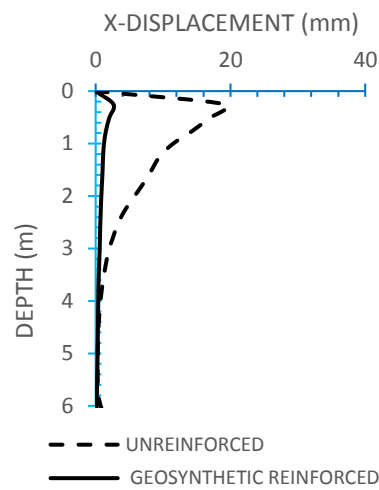
(د)



(ح)



(و)

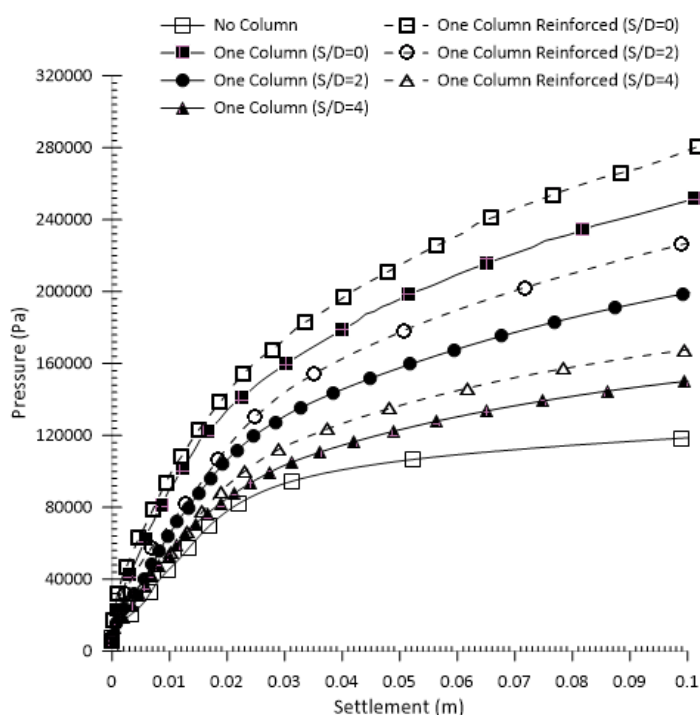


(ه)

شکل ۱۰. پروفیل جابجایی افقی ستون سنگی: الف) ستون سنگی غیرمسلح زیر پی، ب) ستون سنگی مسلح زیر پی، ج) ستون سنگی غیرمسلح خارج از پی، د) ستون سنگی مسلح خارج از پی، ه) مقایسه پروفیل جابجایی ستون سنگی مسلح و غیرمسلح زیر پی و و) مقایسه پروفیل جابجایی ستون سنگی مسلح و غیرمسلح خارج از پی

همچنین، واضح است که مسلح سازی ستون باعث افزایش بیشتر ظرفیت باربری نسبت به حالت غیرمسلح می شود که علت آن جلوگیری از شکم دادگی ستون سنگی برای ستون های واقع در زیر پی و جلوگیری از تغییر شکل جانبی برای ستون هایی واقع در خارج از مرکز پی به دلیل استفاده از دورپیچ ژئوگرید می باشد. این نتایج با کارهای تحقیقاتی پیشین کاملاً منطبق است.

در شکل ۱۱، منحنی بار-جابجایی پی برای شیب رسی تقویت نشده و تقویت شده با ستون سنگی مسلح و غیرمسلح در حالت های مختلف نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش فاصله مرکز پی و مرکز ستون سنگی، از میزان تأثیر ستون بر ظرفیت باربری کاسته می شود. به طوری که برای ستون های معمولی در فاصله بیش از چهار برابر قطر، کاهش قابل توجهی در میزان تأثیر ستون سنگی بر ظرفیت باربری پی مشاهده می شود.



شکل ۱۱. منحنی بار-جابجایی پی برای شیب رسی ساده و تقویت شده با ستون‌های منفرد مسلح و غیرمسلح

به منظور مقایسه اثر ستون سنگی بر حالت‌های مختلف، از نسبت ظرفیت باربری (BCR)^۱ (رابطه ۴) استفاده گردید.

$$\text{ظرفیت باربری پی نواری واقع بر شیب تقویت شده با ستون سنگی} \quad (۴)$$

$$\text{نسبت ظرفیت باربری (BCR)} = \frac{\text{ظرفیت باربری پی نواری واقع بر شیب تقویت نشده}}{\text{ظرفیت باربری پی نواری واقع بر شیب تقویت شده با ستون سنگی}}$$

اظهار می‌دارند که برای S/D بیشتر از $۳/۵$ ، افزایش خیلی محدود در ظرفیت باربری شیب رسی مجهز به ستون سنگی مشاهده می‌شود. همین‌طور، فاصله‌داری بیشتر منجر به تأثیر کمتر قطر ستون‌ها بر ضریب اطمینان خاکریز می‌شود. نکته دیگر آن‌که با افزایش فاصله ستون از پی، از تأثیر سودمند روکش ژئوگرید نیز کاسته می‌شود. به طوری که افزایش ۱۷ درصدی BCR در $S/D=۰$ به ۹ درصد در $S/D=۴$ تنزل می‌یابد. راعی و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیق خود به کاهش شدید باربری پی تقویت شده با ستون مسلح در نسبت‌های S/D بیشتر از ۶، به دلیل اثر قوس، اشاره می‌کنند.

جدول ۴، مقادیر نسبت ظرفیت باربری برای فواصل مختلف قرارگیری ستون منفرد، بدون حضور و با حضور دورپیچ قائم، را نشان می‌دهد. مطابق این جدول، مشاهده می‌شود که تقویت شیب با استفاده از ستون‌های سنگی باعث افزایش ظرفیت باربری پی خواهد شد. همچنین، با افزایش فاصله مرکز به مرکز ستون با پی، نسبت ظرفیت باربری کاسته می‌شود. به طوری که در فاصله‌ی چهار برابر قطر، این نسبت به یک نزدیک شده و می‌توان گفت که در فواصل بیشتر، تقریباً وضعیت بدون ستون حاکم است. نتیجه مشابهی توسط نادری و همکاران (۲۰۱۸) ارائه شده است. همچنین، وکلی و همکاران (۲۰۱۲)

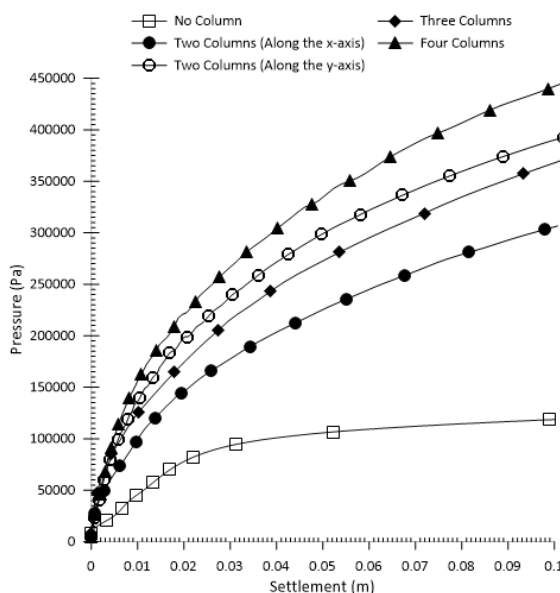
^۱- Bearing capacity ratio

جدول ۴. مقادیر نسبت ظرفیت باربری برای حالت‌های مختلف شیب

شماره مدل	ظرفیت باربری پی بر اساس روش مماسی	BCR	ظرفیت باربری پی بر اساس نشست ۲۵ mm	BCR	ظرفیت باربری پی بر اساس نشست ۵۰ mm	BCR
C0-S0-BC	۱۰۵	۱	۸۷/۲	۱	۱۰۵	۱
C11-S0-BC	۱۷۷	۱/۶۹	۱۴۷	۱/۶۹	۱۹۵	۱/۸۶
C11-S2-BC	۱۴۵	۱/۳۸	۱۲۰/۵	۱/۳۸	۱۵۷/۷	۱/۵۰
C11-S4-BC	۱۱۸	۱/۱۲	۹۵/۴	۱/۰۹	۱۲۳	۱/۱۷
CR11-S0-BC	۲۰۷	۱/۸۵	۱۷۶	۱/۸۵	۲۳۲	۲/۰۵
CR11-S2-BC	۱۶۰	۱/۵۲	۱۳۱	۱/۵۰	۱۷۷	۱/۶۹
CR11-S4-BC	۱۲۹	۱/۲۳	۱۰۴	۱/۱۹	۱۳۶	۱/۲۹

توسط ستون سنگی جایگزین شده است. چنانچه سطح جایگزین شده خاک توسط ستون سنگی را سطح جایگزین (A_p) و سطحی از خاک زیر پی را که توسط ستون سنگی جایگزین شده است سطح مؤثر جایگزین (A_f) بنامیم، مشاهده می‌شود که با افزایش سطح جایگزین، ظرفیت‌های باربری افزایش یافته است. بنابراین، در مدل‌های C12-S0-BC و C22-S2-BC، به دلیل افزایش سطح مؤثر جایگزین نسبت به سایر مدل‌ها، شاهد ظرفیت باربری بیشتری هستیم که مقادیر افزایش در ظرفیت باربری در قالب ضریب BCR در جدول ۵ ارائه شده است.

۴-۵. شیب رسی تقویت شده با گروه ستون‌های سنگی به منظور مقایسه بهتر، منحنی بار-جابجایی برای آرایش‌های مختلف گروه سنگی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با آرایش دو ستونی در امتداد طول پی، گروه ستون سنگی ظرفیت باربری بهتری نسبت به آرایش نظیر در راستای شیب به دست می‌دهد زیرا در این حالت فاصله مرکز به مرکز پی و گروه ستون سنگی کمتر است. علاوه بر آن، همان‌طور که اشاره شد، نوع گسیختگی نیز در دو حالت متفاوت خواهد بود. پارامتر مهم دیگری که در افزایش ظرفیت باربری توسط گروه ستون سنگی نقش دارد سطحی از خاک است که



شکل ۱۲. منحنی بار-جابجایی برای آرایش‌های مختلف گروه سنگی

هستند ظرفیت باربری بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها به دست می‌دهند. فتاح و همکاران (۲۰۱۷) پس از انجام یک سری محاسبات تحلیلی، فرمولی برای محاسبه ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر ستون‌های سنگی ارائه نموده و با تأیید موارد فوق، عامل کلیدی کنترل کننده ظرفیت باربری پی‌ها را سطح مؤثر جایگزین دانسته‌اند.

در جدول ۵، مقادیر نسبت ظرفیت باربری برای حالت‌های مختلف شیب مسلح با استفاده از گروه ستون سنگی محاسبه شده است. مشاهده می‌شود که به طور کلی استفاده از گروه ستون سنگی، ظرفیت باربری پی را نسبت به ستون‌های منفرد افزایش می‌دهد. استفاده از گروه چهارتایی و یا آرایش‌های عرضی ستون سنگی که دارای سطح مؤثر جایگزین بیشتر و فاصله از پی کمتر

جدول ۵. مقادیر نسبت ظرفیت باربری برای آرایش‌های مختلف گروه ستون سنگی

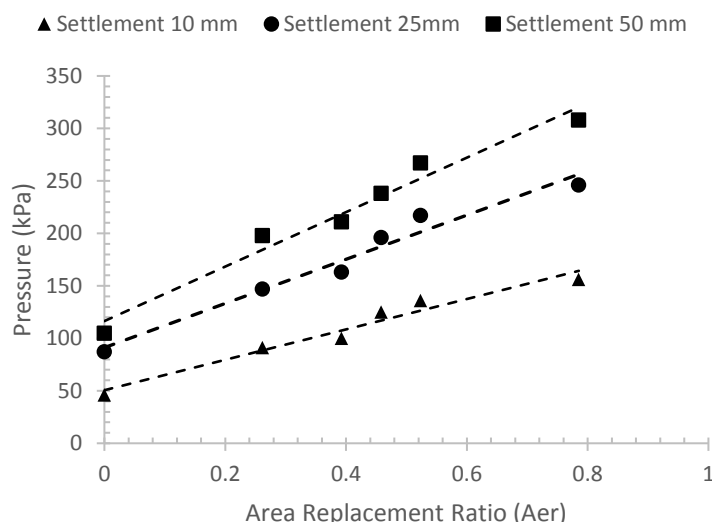
شماره مدل	ظرفیت باربری پی بر اساس روش مماسی	BCR	ظرفیت باربری پی بر اساس نشست ۲۵ mm	BCR	ظرفیت باربری پی بر اساس نشست ۵۰ mm	BCR
C0-BC	۱۰۵	۱	۸۷/۲	۱	۱۰۵	۱
C21-S2-BC	۲۱۱	۲	۱۶۳	۱/۸۷	۲۲۸	۲/۱۷
C31-S2-BC	۲۳۸	۲/۲۷	۱۹۶	۲/۲۴	۲۷۳	۲/۶۰
C12-S0-BC	۲۶۷	۲/۵۴	۲۱۷	۲/۴۹	۲۹۹	۲/۸۵
C22-S2-BC	۳۰۸	۲/۹۳	۲۴۶	۲/۸۲	۳۳۵	۳/۱۹

ستون‌های گروهی تنها وقتی نسبت سطح جایگزینی کمتر از ۱۰٪ است رخ می‌دهد. در این تحقیق، نسبت سطح مؤثر جایگزین (A_f) به صورت رابطه (۵) تعریف گردید.

$$A_f = \frac{1}{B \times L} \left(A_r + \sum_{i=1}^n \frac{1}{s_i} A_i \right) \quad (5)$$

که B عرض فونداسیون (که در این تحقیق یک متر است)، L طول فونداسیون (که در این تحقیق سه متر است)، A_r سطح جایگزین ستون‌های سنگی زیر پی که به صورت مساحت ستون‌های سنگی واقع در زیر فونداسیون تعریف می‌شود، A_i سطح مقطع ستون سنگی خارج از پی و s_i فاصله مرکز ستون سنگی خارج از پی تا مرکز پی است. در شکل ۱۳، اثر نسبت سطح مؤثر جایگزین بر تغییرات فشار زیر پی برای آرایش‌های مختلف ستون سنگی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سطح مؤثر جایگزین، ظرفیت باربری به طور خطی افزایش می‌یابد.

اهمیت آرایش ستون‌ها از اینجا درک می‌شود که ظرفیت باربری پی در آرایش دو ستونی در راستای طول پی حتی از مقدار آن در آرایش سه ستونی در راستای شیب نیز بیشتر است. بنابراین، آرایش دو ستونی از این لحاظ کاملاً ارجح است. خاطر نشان می‌شود که سطح مؤثر جایگزین به تنهایی ملاک ارزیابی نیست. سیواکومار و بلک (۲۰۰۷) اشاره می‌نمایند که نشست، با به کارگیری ستون‌های کوتاه و نسبت جایگزینی سطح بالا و یا ستون‌های بلند با نسبت جایگزینی سطح کم، می‌تواند به طور یکسان کنترل شود. همین‌طور، یک مقدار بهینه نسبت جایگزینی سطح ۴۰-۳۰ درصد برای این امر وجود دارد. برای مثال، نسبت سطح مؤثر (A_{eff}) برای تک ستون و دو ستون زیر پی (آرایش طولی) در مطالعه حاضر به ترتیب ۲۶ و ۳۹ درصد است. هوگس و ویترز (۱۹۷۴) اذعان دارند که شکست ناشی از انبساط جانبی برای



شکل ۱۳. اثر نسبت سطح مؤثر جایگزین بر تغییرات فشار زیر پی برای آرایش‌های مختلف ستون سنگی

با آرایش عرضی استفاده شده است ضریب کارایی ۰/۷۵ و برای گروه ستون سنگی که از چهار ستون با آرایش مستطیلی استفاده شده است این ضریب ۰/۴۸ به دست آمد. مقادیر فوق نشان می‌دهد که آرایش مستطیلی اگرچه ظرفیت باربری پی را تا حد زیادی بهبود می‌دهد لیکن به لحاظ تعداد ستون به کار رفته در آن، کارایی چندانی ندارد. بیشترین ضریب کارایی برای حالتی است که از آرایش در راستای محور y (طول پی) استفاده می‌شود و لذا این حالت به لحاظ اقتصادی احتمالاً مقرون به صرفه‌ترین آرایش ستون‌های سنگی است. از مجموع مطالب فوق این‌گونه استنباط می‌شود که اگرچه با افزایش تعداد ستون، ظرفیت باربری گروه سنگی افزایش می‌یابد، اما مکان‌یابی ستون‌ها به لحاظ بهینه‌ترین موقعیت نصب و استقرار باید در اولویت برنامه‌های طراحی و بهسازی خاک باشد.

۵-۵. اثر ستون‌ها بر ضریب اطمینان پایداری

شیب

یکی از روش‌های محبوب برای انجام آنالیز پایداری شیب، روش کاهش مقاومت برشی است. در روش

در این پژوهش، از تعریف ضریب کارایی گروه ستون‌های سنگی، همان‌گونه که نادری و همکاران (۲۰۱۸) در کار تحقیقاتی خود استفاده کرده‌اند، برای تعیین بهترین آرایش گروه ستون سنگی استفاده گردید. بنا بر تعریف، ضریب کارایی گروه ستون سنگی (η) به صورت رابطه (۶) حاصل می‌شود.

$$\eta = \frac{Q_g(u)}{\sum Q_u} \quad (6)$$

که در آن، $Q_g(u)$ ظرفیت باربری پی در حالت گروه ستون سنگی و Q_u ظرفیت باربری پی بدون در نظر گرفتن اثر گروه ستون سنگی است. مطابق تعریف، برای گروه ستون سنگی که از دو ستون با آرایش طولی استفاده شده است، ضریب کارایی ۰/۶۶ برای گروه ستون سنگی متشکل از سه ستون با آرایش طولی ۰/۵۴ به دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اگرچه در آرایش در راستای شیب گروه ستون دارای سه ستون نسبت به دو ستون از ظرفیت باربری بیشتری برخوردار است، اما ضریب کارایی گروه ستون سنگی دو تایی ۰/۶۶ است که از ضریب کارایی گروه ستون سنگی سه تایی (۰/۵۴) بیشتر است و لذا به لحاظ اقتصادی ممکن است مقرون به صرفه‌تر باشد. برای گروه ستون سنگی که از دو ستون

ظرفیت باربری پایداری خود را حفظ خواهد کرد یا خیر. در این بخش از پژوهش، پایداری شیب رسی نرم در حالت عادی و تقویت شده با آرایش های مختلف ستون سنگی تحت اثر سربار مورد بررسی قرار می گیرد. سرباری که برای هر مدل در نظر گرفته شده بار معادل نشست ۲۵ میلی متر بوده است زیرا ضریب اطمینان پایداری شیب رسی نرم در حالت عادی کم بوده و کنترل نشست به میزان مجاز احتمالاً مانع ایجاد لغزش های موضعی و ناپایداری شیب خواهد شد. در جدول ۶، مدل های مورد مطالعه جهت ضریب اطمینان پایداری شیب و بار وارده به هر یک نشان داده شده است.

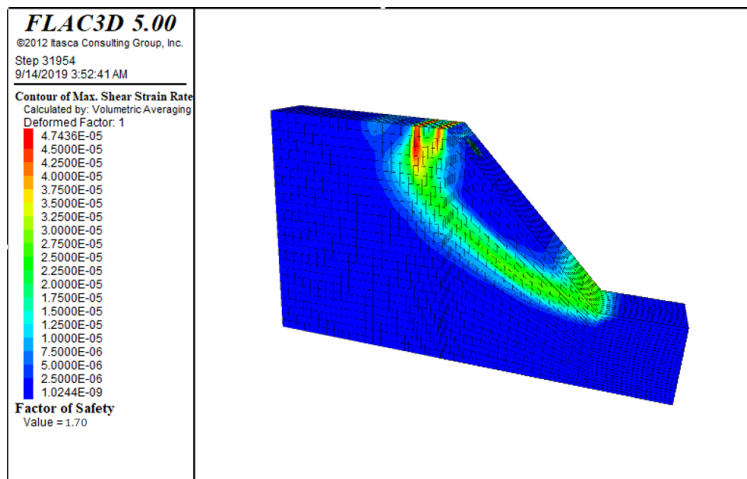
کاهش مقاومت برشی، مطابق یک الگوریتم، مقاومت برشی مصالح با استفاده از یک ضریب اطمینان کاهش داده شده و محاسبات مدل تفاضل محدود تا زمانی که تغییر شکل ها به طرز غیرقابل قبولی بزرگاند و یا مسئله به همگرایی نرسیده باشد ادامه داده می شود. به عبارتی، روش کاهش مقاومت برشی برای آنالیز پایداری دامنه، شامل استفاده سیستماتیک از تجزیه و تحلیل تفاضل محدود برای تعیین فاکتور کاهش تنش یا ضریب اطمینان است که یک شیب را در آستانه شکست نشان می دهد. نکته ای که در تحقیقات مشابه به آن توجه کمتری شده این است که آیا شیب تقویت شده تحت سربار معادل،

جدول ۶. مدل های مورد مطالعه جهت ضریب اطمینان پایداری شیب

شماره مدل	تعداد ستون سنگی	بار وارده (کیلو پاسکال)
C0-FS	۰	۸۷/۲
C11-S0-FS	۱	۱۴۷
C11-S2-FS	۱	۱۲۰/۵
C11-S4-FS	۱	۹۵/۴
C21-S2-FS	۲	۱۶۳
C31-S2-FS	۳	۱۹۶
C12-S0-FS	۲	۲۱۷
C22-S2-FS	۴	۲۴۶

۲۵ میلی متر نشان داده شده است. مشاهده می شود که در این حالت، ضریب اطمینان ۱/۲ می باشد. نتایج ضریب اطمینان در جدول ۷ ارائه شده است.

در شکل ۱۴، کانتور نرخ کرنش برشی و ضریب اطمینان برای مدل C11-S2-FS (دو ستون سنگی در امتداد پی) تحت اثر سربار معادل ظرفیت باربری متناظر با نشست



شکل ۱۴. کانتورهای نرخ کرنش برشی برای مدل C11-S2-FS تحت اثر بار معادل ظرفیت باربری

جدول ۷. نتایج تحلیل پایداری شیب رسی

شماره مدل	بار وارده (کیلوپاسکال)	ضریب اطمینان پایداری
C0-FS	۸۷/۲	۱/۰۹
C11-S0-FS	۱۴۷	۱/۶۴
C11-S2-FS	۱۲۰/۵	۱/۷۰
C11-S4-FS	۹۵/۴	۱/۸۱
C21-S2-FS	۱۶۳	۱/۹۵
C31-S2-FS	۱۹۶	۲/۰۱
C12-S0-FS	۲۱۷	۱/۸۸
C22-S2-FS	۲۴۶	۱/۹۷

افزایش ظرفیت باربری و بیشترین ضریب اطمینان پایداری را در حالت سربار به دست دهد. بدین منظور، ضریب بهبود (IF)^۲ به صورت رابطه (۸) تعریف شده است.

$$(IF) = \frac{\text{نسبت ظرفیت باربری } (BCR)}{\text{نسبت فاکتور پایداری } (SFR)} \times \text{ضریب کارایی } (\eta) \quad (8)$$

در جدول ۸، ضرایب بهبود عملکرد شیب رسی تقویت شده با آرایش های مختلف ستون سنگی نشان داده شده است.

جدول ۸. ضریب بهبود ظرفیت باربری و پایداری شیب رسی تقویت شده با ستون سنگی

شماره مدل	بار وارده (کیلوپاسکال)	FS	BCR	SFR	η	IF
C0-FS	۸۷/۲	۱/۰۹	۱	۱	۱	۱
C11-S0-FS	۱۴۷	۱/۶۴	۱/۶۹	۱/۵۰	۱	۲/۵۴
C11-S2-FS	۱۲۰/۵	۱/۷۰	۱/۳۸	۱/۵۶	۱	۲/۱۵
C11-S4-FS	۹۵/۴	۱/۸۱	۱/۰۹	۱/۶۶	۱	۱/۸۹
C21-S2-FS	۱۶۳	۱/۹۵	۱/۸۷	۱/۷۹	۰/۶۶	۲/۲۱
C31-S2-FS	۱۹۶	۲/۰۱	۲/۲۴	۱/۸۴	۰/۵۴	۲/۲۲
C12-S0-FS	۲۱۷	۱/۸۸	۲/۴۹	۱/۷۲	۰/۷۵	۳/۲۲
C22-S2-FS	۲۴۶	۱/۹۷	۲/۸۲	۱/۸۱	۰/۴۸	۲/۴۴

بهبود عملکرد، بهترین آرایش موجود، گروه دوتایی ستون های سنگی در زیر پی می باشد که دلایل آن پیشتر ذکر شد. ترکیب تک ستون زیر پی (S/D=0) و تک ستون

با توجه به اینکه حداقل ضریب اطمینان ۱/۲۵ در آیین نامه طراحی ژئوتکنیک وزارت حمل و نقل ایالت واشنگتن (۲۰۱۰) به عنوان سطح شکست بیان شده است، مشاهده می شود که ستون سنگی باعث افزایش پایداری شیب های رسی می شود. برای درک بهتر اثر ستون سنگی بر ضریب اطمینان پایداری، نسبت فاکتور پایداری (SFR)^۱ به صورت رابطه (۷) تعریف شده است.

$$(SFR) = \frac{\text{نسبت فاکتور پایداری } (SFR)}{\text{ضریب اطمینان پایداری شیب رسی بهسازی شده با ستون}} = \frac{\text{ضریب اطمینان پایداری شیب رسی}}{\text{ضریب اطمینان پایداری شیب رسی}} \quad (7)$$

بهترین آرایش ستون سنگی آرایشی است که بیشترین

مشاهده می شود که با در نظر گرفتن میزان افزایش ظرفیت باربری و ضریب اطمینان پایداری و نیز کارایی گروه ستون سنگی به صورت توأمان به عنوان معیارهای

^۲- Improvement factor

^۱- Stability factor ratio

کارآمدترین ترکیب شناخته شد. این ترکیب همچنین دارای بهینه‌ترین نسبت سطح جایگزین نیز می‌باشد. در مورد آرایش‌های در راستای شیب، با نگاهی کوتاه به ارقام و تحلیل‌ها، واضح است که ترکیب دو ستون و سه ستون کارایی مشابه دارند. ولی آرایش دو ستونی به دلیل استفاده کمتر از ستون‌های سنگی بر آرایش سه ستون ترجیح دارد.

۴- استفاده از روکش ژئوگرید می‌تواند رفتار و عملکرد ستون‌های سنگی را تا حدی بهبود بخشد. به طوری که مسلح‌سازی ستون‌ها با روکش ژئوگرید، افزایش ۹ تا ۱۷ درصدی باربری پی را برای $S/D=0-4$ در بر دارد. دلیل این موضوع، سختی و صلبیت بیشتر و مقاومت بیشتر ستون در مقابل برش و خمش و جلوگیری از وقوع پدیده شکم‌دادگی برای ستون‌های واقع در زیر پی و کاهش جابجایی جانبی برای ستون‌های خارج از ناحیه پی می‌باشد.

۵- در این تحقیق، دو نوع مکانیسم گسیختگی برای ستون‌های سنگی مشاهده شد. برای ستون‌های سنگی واقع در زیر پی، شکم‌دادگی ناحیه بالایی ستون باعث گسیختگی ستون می‌شود. اما برای ستون‌های خارج از ناحیه پی، مکانیسم گسیختگی به صورت جابجایی جانبی بیش از حد در ناحیه بالایی ستون می‌باشد. اضافه کردن دورپیچ ژئوگرید به عنوان روکش‌کننده باعث کاهش شکم‌دادگی در ستون‌های زیر پی و کاهش جابجایی جانبی در ستون‌های دور از پی می‌گردد که به تبع آن، ظرفیت پی تقویت می‌شود.

۶- پایان‌بخش مطالعات پارامتریک، به مطالعه تأثیر ستون سنگی بر ضریب اطمینان پایداری شیب اختصاص یافت. برای این منظور، شاخص بی‌بعدی به نام ضریب بهبود تعریف شد که اثر هر دو عامل ظرفیت باربری پی و پایداری شیب را در نظر می‌گیرد.

خارج از پی ($S/D=2$) در اولویت‌های انتخابی بعدی قرار می‌گیرند.

۶. نتیجه‌گیری

۱- طول ستون سنگی اگرچه ظرفیت باربری پی نواری را افزایش می‌دهد، اما این طول باید به گونه‌ای باشد که تا زیر سطح لغزش احتمالی ادامه یافته و پایداری شیب را نیز تأمین نماید. بر این مبنای، در این پژوهش، طول بهینه ستون سنگی شش برابر قطر ستون تشخیص داده شده است.

۲- برای تمام موارد بهسازی شیب با ستون سنگی، مقدار نشست سطح زمین کاهش یافته و از معیار ۱۰٪/ عرض پی (۱۰ cm) تجاوز نکرده که این به معنای افزایش ظرفیت باربری نهایی پی است. در هر صورت، با افزایش فاصله مرکز به مرکز ستون و پی، از تأثیر سودمند آن کاسته می‌شود. به طوری که در فاصله‌ای بیش از $4D$ (قطر ستون) اثر قابل ملاحظه‌ای بر ظرفیت باربری پی ندارد. دلیل این موضوع آن است که تمرکز تنش در ستون تقلیل یافته و بخش زیادی از بار پی مستقیماً به خاک وارد می‌شود. همچنین، نشست مجاز در این پژوهش براساس مقررات ملی ساختمان ایران در وضعیت غیریکنواخت و یکنواخت به ترتیب ۲۵ و ۵۰ میلی‌متر و حداکثر نشست نهایی ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

۳- انواع آرایش ستون‌ها به لحاظ کارایی مورد بررسی قرار گرفت. با اضافه شدن تعداد ستون‌ها به یک، دو و سه ستون نسبت به شیب رسی فاقد ستون، ظرفیت باربری پی به روش مماسی در مطالعه حاضر به ترتیب ۶۷، ۱۰۰ و ۱۲۷ درصد نسبت به حالت بدون ستون افزایش یافت. برای بررسی اثر گروه ستون سنگی، پارامتری به نام ضریب کارایی تعریف شد و بر اساس آن، آرایش دو ستونی در راستای محور y (طول پی)،

۷. مراجع

- حاجی عزیزی، م. و نصیری، م. ۱۳۹۹. "مطالعه عددی سه بعدی پایداری شیب ماسه‌ای مسلح با ستون سنگی مسلح با ژئوگرید". نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۲(۳): ۵۵۰-۵۳۱.
- لاجوردی، س. ح.، انعامی، س.، شمسی، ح. ر. و حمیدی، م. ۱۳۹۷. "مطالعه آزمایشگاهی ستون‌های سنگی منفرد و گروهی محصور شده با ژئوتکستایل". نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۰(۶): ۱۰۶۰-۱۰۵۳.
- مقررات ملی ساختمان. ۱۳۹۲. "مبحث هفتم، پی و پی‌سازی". ویرایش ۱۳۹۲، صفحه ۲۸.
- Al-Shukur, A. K. 2015. "Stability analysis of side slope by using stone column and tieback support". *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 5(9): 1837-1844.
- Ambily, A. P. and Gandhi, S. R. 2007. "Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis". *Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, 133(4): 405-415.
- Andreou, P. and Papadopoulos, V. 2006. "Modelling stone columns in soft clay". *Numer. Meth. Geotech. Eng.*, 32(4): 82-93.
- Balaam, N. P. and Booker, J. R. 1985. "Effect of stone column yield on settlement of rigid foundations in stabilized clay". *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 9(4): 331-351.
- Castro, J. 2017. "Groups of encased stone columns: Influence of column length and arrangement". *Geotext. Geomembranes*, 45(2): 68-80.
- Deb, K., Samadhiya N. K. and Namdeo, J. B. 2011. "Laboratory model studies on unreinforced and geogrid-reinforced sand bed over stone column-improved soft clay". *Geotext. Geomembranes*, 29(2): 190-196.
- Fattah, M. Y., Al-Neami, M. A. and Al-Suhaily, A. S. 2017. "Estimation of bearing capacity of floating group of stone columns". *Eng. Sci. Technol.*, 20(3): 1166-1172.
- Geotechnical Design Manual. 2010. M 46-03.03, Chapter 7, p. 4, Washington State Department of Transportation.
- Ghazavi, M. and Nazari Afshar, J. 2013. "Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns". *Geotext. Geomembranes*, 38(1): 26-36.
- Haji Azizi, M. and Nasiri, M. 2019. "Experimental and numerical investigation on stability of sandy slope reinforced by using geotextile reinforced stone column". *J. Ferdowsi Civ. Eng.*, 52(1): 85-100.
- Hughes, J. M. O. and Withers, N. J. 1974. "Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns". *Ground Eng.*, 7(3): 42-49.
- Kadhim, S., Parsons, R. L. and Han, J. 2015. "Stability analysis of embankments supported by geosynthetic encased stone columns". *Geotech. Special Pub.*, 3(1): 2318-2327.
- Lajevardi, S. H., Enami, S., Shamsi, H. R. and Hamidi, M. 2019. "Experimental study of single and groups of stone columns encased by geotextile". *Amir Kabir J. Civ. Eng.*, 50(6): 337-346.
- Murugesan, S. and Rajagopal, K. 2010. "Studies on the behavior of single and group of geosynthetic encased stone columns". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 136(1): 129-139.
- Naderi, E., Asakerah, A. and Dehghani, M. 2018. "Bearing capacity of strip footing on clay slope reinforced with stone columns". *Arab. J. Sci. Eng.*, 43(10): 5559-5572.
- Raee, E., Hataf, N., Barkhordari, K. and Ghahramani, A. 2019. "The effect of rigidity of reinforced stone columns on bearing capacity of strip footings on the stabilized slopes". *Int. J. Civ. Eng.*, 17(6): 673-685.
- Sivakumar, V. and Black, J. A. 2007. "A laboratory model study of the performance of vibrated stone columns in soft clay". In: *Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid*, pp. 1053-1062.
- Vekli, M., Aytakin, M., Banu İkişler, S. and Çalik, Ü. 2012. "Experimental and numerical investigation of slope stabilization by stone columns". *Nat. Hazards*, 64(1): 797-820.
- Wei, W. B. and Cheng, Y. M. 2009. "Strength reduction analysis for slope reinforced with one row of piles". *Comp. Geotech.*, 36(1): 1176-1185.