

مروری بر ژئوستتیک ستون‌های سنگی

مقاله علمی - پژوهشی

واحد قیاسی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ایران

ایلیا زکوی، دانش‌آموخته کارشناسی، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: v.ghiasi@malayeru.ac

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۶

صفحه ۱۷۰-۱۴۳

چکیده

در دهه‌های اخیر رشد زیرساخت‌ها در مناطق شهری و کلان‌شهرها منجر به افزایش چشمگیر ارزش زمین و فقدان مکان‌های مناسب برای توسعه شده است. این عوامل موجب می‌شود که صنعت ساختمان‌سازی به دنبال زمین‌های ارزان برای احداث ساختمان باشد؛ در نتیجه ساختمان بر خلاف تمایل قبلی بر روی زمین سست اجرا می‌شود یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر در نهشته‌های سست و خاک‌های ریزدانه مورد استفاده قرار گرفته است ستون‌های سنگی می‌باشد که به صورت گسترده در کاهش نشست و افزایش ظرفیت باربری خاک زیر سازه‌هایی مانند مخازن ذخیره‌سازی مایعات، خاکریزها، پی‌های گسترده و سازه‌های سبک مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از ستون‌های سنگی به عنوان یک روش بهسازی خاک در طول بیش از ۴۰ سال گذشته موضوع تحقیق بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. روش‌های تحلیلی، آنالیزهای عددی و آزمون‌های آزمایشگاهی زیادی برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف خاک و ستون سنگی در ظرفیت باربری و نشست ستون‌های سنگی انجام گرفته است. یکی از مهمترین دستاوردهای تحقیقات در این زمینه، ایده مسلح سازی ستون‌های سنگی با پوشش ژئوستتیک می‌باشد که بیش از ۲۵ سال پیش مطرح و در طول این مدت روابطی برای طراحی این ستون‌های سنگی مسلح و در نظر گرفتن اثر پوشش ژئوستتیک ارائه شده است. در این مقاله نتایج تحقیقات پژوهشگران در مورد تاثیر پارامترهای مختلف در ظرفیت باربری و نشست ستون‌های سنگی ارائه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: ستون سنگی مسلح، پوشش ژئوستتیک، ظرفیت باربری، نشست

۱-مقدمه

موجب زهکشی شده و از به وجود آمدن اضافه فشار آب حفرهای جلوگیری می‌کنند. همچنین در طی اجرای آن‌ها، توده خاک به وسیلهی تأثیر لرزش و جابه‌جایی متراکم می‌شود و در نهایت پروسه‌ی اجرای ستون‌های سنگی تنش‌های جانبی را در خاکی که آن‌ها را احاطه کرده، افزایش می‌دهد (Ambily and gandhi,2004).

از سال ۱۹۷۰ که Greenwood یکی از اولین مطالعات در مورد نحوه اجرای ستون‌های سنگی و چگونگی اصلاح زمین‌های سست ماسه‌ای با استفاده از این روش پرداخت (Greenwood,1970) تاکنون مطالعات زیادی با استفاده از روش‌های عددی، تحلیلی و آزمایشگاهی در مورد ستون‌های سنگی انجام شده است. علاوه بر پارامترهای مختلف موثر در

استفاده از ستون‌های سنگی به عنوان یک روش اصلاح خاک برای افزایش ظرفیت باربری یا تقلیل نشست خاک زیر پی سازه‌ها در حال گسترش می‌باشد. این روش مبتنی بر تعویض ۱۵ الی ۳۵ درصد حجم خاک نامرغوب به وسیلهی حفر چاه‌هایی با قطر و عمق و فاصله‌ی معین از یکدیگر و پر کردن چاه‌ها به وسیلهی ماسه یا شن یا سنگ ریزه و متراکم نمودن به صورت ستون‌های عمودی میباشد. این روش برای اولین بار در فرانسه در سال ۱۸۳۰ جهت اصلاح خاک سست استفاده شد (Van Impe,1983). ستون‌های سنگی با چهار مکانیزم موجب بهبود مقاومت خاک می‌شوند. ابتدا آن‌ها عملکرد توده‌ی خاک را بوسیله‌ی تراکم بالا، مقاومت و سختی خود بهبود می‌بخشند (خاک را مسلح می‌کنند). در درجه دوم آن‌ها

که در طراحی، بار هر ستون سنگی ۲۰ الی ۵۰ تن در نظر گرفته شود. یکی دیگر از کاربردهای مؤثر ستون‌های سنگی برای افزایش پایداری شیروانی‌های طبیعی و شیروانی‌های خاکریزها می‌باشد.

ب- کاهش نشست پذیری خاک: با استفاده از ستون سنگی، به طور معمول ۳۰ الی ۵۰ درصد نشست پذیری کاهش می‌یابد. ج- نفوذپذیری زیاد مصالح ستون‌های سنگی باعث می‌شود که ستون سنگی به عنوان زهکش قائم عمل کرده و موجب کاهش زمان تحکیم می‌شود. هم چنین در هنگام بروز زلزله موجب زایل شدن سریع فشار آب حفرهای ایجاد شده در خاک شده و احتمال روانگرایی در خاک‌های مستعد روانگرایی را کاهش می‌دهد.

د- استفاده از ستون سنگی در خاک‌های سیلنی و رسی موجب افزایش مقاومت برشی این خاک‌ها می‌شود (Muir Wood and Nash, 2000).

۴- انواع روش‌های اجرای ستون سنگی

طبق استاندارد آلمان، استفاده از ستون‌های سنگی عموماً به خاک‌های با مقاومت برشی زهکشی‌نشده بین ۱۵ تا ۲۵ کیلوپاسکال محدود می‌شود. در خاک‌های یا مقاومت برشی پایین‌تر، محدودیت جانبی ایجاد شده به وسیله‌ی خاک اطراف به‌منظور جلوگیری از کمانش جانبی ستون، تحت بارهای وارده، ناکافی بوده و در استفاده از ستون‌های سنگی در این نوع خاک‌ها، باید تمهیدات ویژه‌ای در نظر گرفته شود (Gniel and Bouazza, 2009). روش‌های متعدد اجرای ستون‌های سنگی بسته به کاربردپذیری آنها و دسترسی به تجهیزات لازم در محل برای نصب ستون‌های سنگی، در سرتاسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های اصلی اجرا در بخش زیر به اختصار توضیح داده می‌شود.

۴-۱- روش لرزشی جایگزینی (خیس) یا روش

خیس-مصالح ریزی از بالا

از این روش در مکان‌هایی که مشکل کمبود آب و عوامل زیست محیطی نباشد استفاده می‌شود. در این روش نیروی ناشی از فشار آب باعث کنده شدن و تخلیه خاک از درون چاه حفر شده می‌گردد. بعد از رسیدن به عمق مورد نظر، مصالح دانه‌ای با قطر ۱۰ الی ۳۰ میلی‌متر در هر مرحله به ضخامت ۰,۳-۱,۲ متر در چاه ریخته شده و با کمک لرزش

رفتار ستون‌های سنگی از جمله خصوصیات خاک و مصالح ستون سنگی، یکی از جذاب‌ترین مسائل برای محققان در این زمینه، مسلح کردن ستون‌های سنگی با استفاده از ژئوسنتتیک‌ها بوده است. نظری افشار و قضاوی در سال ۲۰۱۳ در تحقیقات آزمایشگاهی (نظری افشار و قضاوی، ۲۰۱۴) در مورد تاثیر مسلح نمودن ستون‌های سنگی با ژئوسنتتیک‌ها و چگونگی استفاده از این مسلح‌کننده‌ها در دو حالت لایه‌های افقی و یا بصورت پوشش قائم ستونها، به مطالعه پرداختند و نتایج آن حاکی از عملکرد مؤثر مسلح‌کنندگی پوشش قائم ستونها و لایه‌های افقی در افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی می‌باشد. همچنین آنها در سال ۲۰۱۴ (نظری افشار و قضاوی، ۲۰۱۴) روش محاسباتی ساده‌ای تنها با داشتن پارامترهای مقاومت برشی موهر کولمب برای محاسبه ظرفیت باربری ستون سنگی غیر مسلح ارائه نمودند. در این مقاله به تفکیک نتایج تاثیر پارامترهای مختلف مؤثر در ظرفیت باربری و نشست ستون‌های سنگی (شامل پارامترهای مختلف و مشخصات مصالح ستون سنگی و مسلح‌کننده) حاصل از تحقیقات محققان قبلی بیان می‌گردد.

۲-تعریف ستون سنگی

ستون سنگی، ستونی است از جنس سنگ که از طریق ایجاد یک حفره‌ی استوانه‌ای توخالی در خاک رس نرم و سپس پر کردن آن توسط سنگ خرد شده یا شن ایجاد می‌گردد. بدین روش، آرایشی از ستون‌های سنگی در زیر شالوده ایجاد می‌گردد. این ستون‌ها به علت مقاومت و سختی بالا، عمده‌ی بار را در مقایسه با خاک پیرامونی تحمل می‌کنند. برای اولین بار در فرانسه در سال ۱۸۳۰ از ستون سنگی جهت اصلاح خاک استفاده شد و در آمریکا از ستون سنگی نخستین بار در سال ۱۹۷۲ در چندین پروژه به صورت محدود استفاده شد؛ اما در اروپا از سال ۱۹۵۰ به طور وسیعی از ستون‌های سنگی جهت اصلاح خاک استفاده شده است (نظری افشار و قضاوی، ۱۳۹۱).

۳-دلایل استفاده از ستون‌های سنگی

از جمله دلایل استفاده از ستون‌های سنگی به عنوان گزینه‌ای جهت اصلاح خاک عبارت است از:

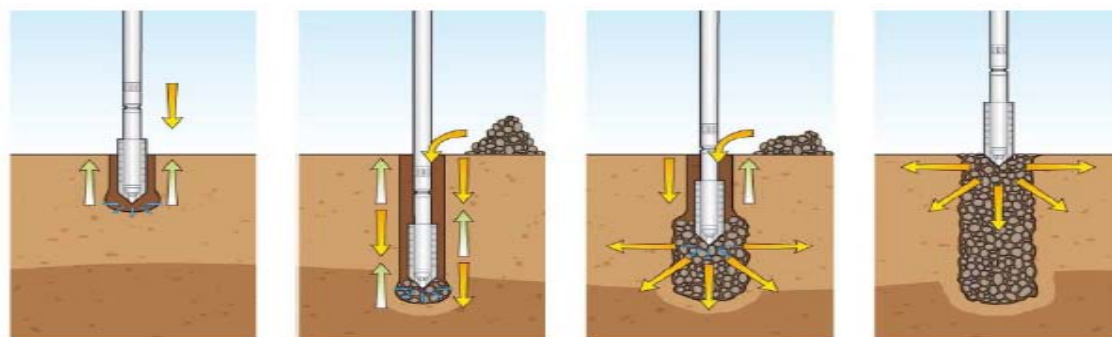
الف- افزایش ظرفیت باربری و پایداری: ظرفیت باربری قابل ملاحظه‌ای که ستون‌های سنگی دارند موجب استفاده روزافزون آنها در زیر سازه‌های مورد نظر شده است. توصیه شده است

استفاده می‌شود. در این شرایط جریان آب موجب پایداری دیواره چاه نیز می‌گردد. به طور معمول در هر ساعت ۲۰۰۰ الی ۴۰۰۰ گالن آب مورد نیاز است.

مزایای روش فوق عبارت است از: قابلیت استفاده از مصالح سنگی تا قطر ۱۳۰ میلی‌متر، کاهش هزینه نسبت به روش خشک، ایجاد ستون سنگی با طول بلند و رسیدن به بستر مناسب‌تر (Babu and Shivashankar, 2013).

دستگاه مخصوص، متراکم شده و دستگاه به آرامی از چاه بیرون کشیده می‌شود. این کار تا پر شدن کامل چاه حفر شده ادامه می‌یابد (شکل ۱).

معمولاً پس از احداث ستون‌های سنگی یک لایه ماسه‌ای به عنوان پتو در ناحیه‌ای که ستون‌های سنگی در آن اجرا شده است به صورت افقی بر سطح زمین پخش و متراکم می‌شود. از روش لرزشی جایگزینی، بیشتر در مناطقی که خاک خیلی نرم تا کمی سفت یا هنگامی که سطح تراز آب زیرزمینی بالا و یا احتمال ناپایداری دیواره چاه وجود دارد؛



شکل ۱. ستون سنگی لرزشی جایگزینی، مصالح ریزی از بالا (Babu and Shivashankar, 2013)

اجرای سریع، تمیز و باکیفیت در هنگام ساخت و کاهش هزینه ساخت می‌باشد. مراحل اجرای این روش به شرح زیر می‌باشد: -راندن لوله در داخل زمین تا عمق مورد نظر: برای فرو بردن لوله در زمین، یک سیستم چرخنده در سر لوله نصب شده که با نیروی چرخشی خاک را به طور شعاعی کنار زده و باعث فرو رفتن لوله در زمین می‌شود. البته در کنار این نیروی چرخشی از نیروی ناشی از جک های قائم و نیروی لرزشی برای تسهیل در راندن لوله به درون زمین نیز استفاده می‌شود.

-پر کردن لوله با مصالح

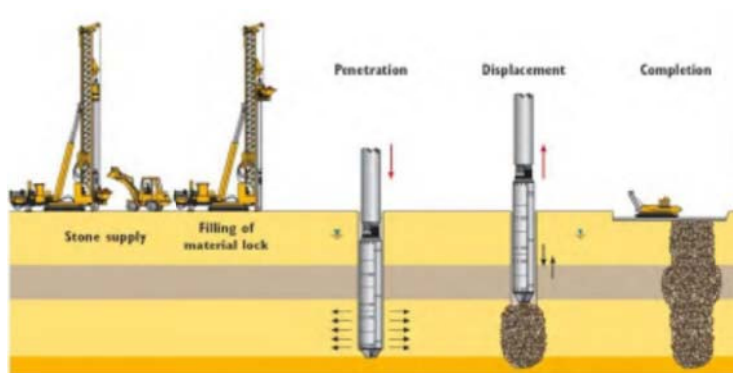
-ایجاد ستون سنگی: با کمک سیستم چرخنده که در انتهای دستگاه قرار دارد این سیستم شروع به چرخش می‌کند و مصالح را با فشار بطور افقی پخش می‌کند. فشار در دستگاه آنقدر ادامه پیدا می‌کند که ستون سنگی به قطر مورد نظر برسد. سپس به آرامی بالا کشیده شده و مصالح با نیروی لرزش و فشار هوا متراکم می‌شوند. با خالی شدن لوله از مصالح، دوباره مصالح به درون لوله ریخته شده و کار مانند مرحله قبل ادامه می‌یابد تا ارتفاع ستون سنگی به سطح زمین برسد (شکل ۳) (قضاوی و نظری افشار، ۱۳۸۸).

۴-۲- روش لرزشی جابجایی یا روش خشک مصالح ریزی از پایین

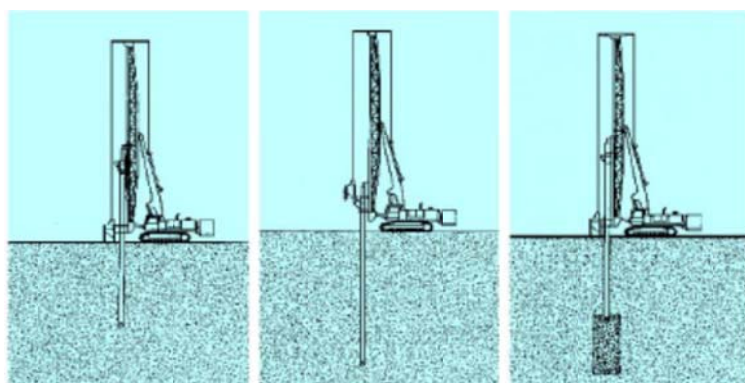
در این روش دستگاه بوسیله لرزش و تحت اثر وزن خود به داخل زمین فرو می‌رود. سپس توسط قیف بالای دستگاه و لوله هادی، مصالح به عمق مورد نظر هدایت شده و بوسیله لرزش و نیروی جانبی گریز از مرکز دستگاه، مصالح متراکم شده و دستگاه به آرامی با ریختن مصالح و متراکم کردن بیرون کشیده می‌شود و بدین ترتیب ستون سنگی احداث می‌شود. از مزایای این روش اندازه‌گیری حجم دقیق مصالح مصرفی، کاهش هدر رفت مصالح، نداشتن اثر زیان بار زیست محیطی نسبت به روش لرزشی جایگزینی بدلیل عدم استفاده از آب و امکان ایجاد ستون سنگی تا طول ۲۴ متر می‌باشد (شکل ۲) (Babu and Shivashankar, 2013).

۴-۳- روش چرخشی جابجایی

این روش احداث ستون سنگی تحت نظر دکتر رابرت گانگور، از پیشگامان روش ستون‌های سنگی، ابداع شده است و به اختصار روتوکالم نامیده می‌شود. از مزایای این روش



شکل ۲. ستون سنگی لرزشی جابجایی، مصالح ریزی از پایین (Babu and Shivashankar, 2013)



شکل ۳. ستون سنگی چرخشی جابجایی (قضاوی و نظری افشار، ۱۳۸۸)

۴-۴- روش سنگی کوبشی

احداث ستون‌های سنگی معمولی می‌باشد، زیرا قیمت اضافه شدن سیمان با توجه به سریعتر اجرا شدن ستون سنگی صلب قابل توجه است. در این روش، هنگام ساخت ستون، از مصالح چسباننده نظیر آهک و سیمان، برای ایجاد چسبندگی بین دانه‌ها استفاده شده و ستون تحت بارهای اعمالی، بدون نیاز به محصوریت خاک اطراف، در برابر کماتش جانبی مقاومت می‌کند (شکل ۵) (ملک‌پور و توفیق، ۱۳۸۶).

در مورد این ستون‌ها نکات زیر قابل توجه است:

- مقاومت این نوع ستون‌ها حساسیت کمتری نسبت به نیروی جانبی نگهدارنده اطراف ستون سنگی ناشی از خاک دارد، لذا از این روش در خاک‌های بسیار نرم می‌توان استفاده کرد.
- ستون‌های صلب نشست‌های کمتر و باربری بیشتری نسبت به ستون‌های سنگی معمولی دارند.

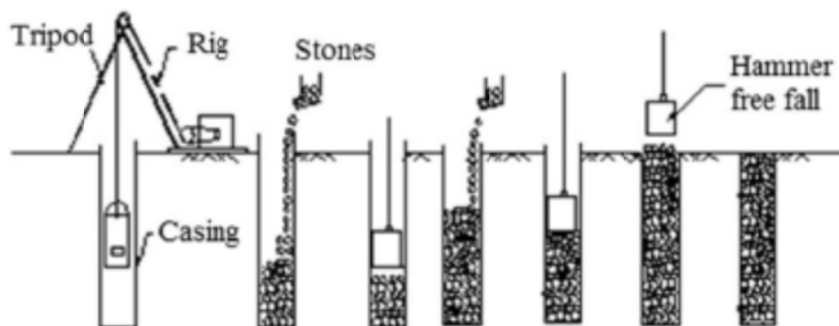
در این روش ابتدا یک لوله ته باز یا بسته در زمین کوبیده شده یا یک چاه حفر می‌گردد. سپس مصالح دانه‌ای در چاه ریخته شده و با رها ساختن وزنه‌های سنگین (۱۵۰۰ الی ۲۰۰۰ کیلو گرم) از ارتفاع ۱ الی ۱٫۵ متری، مصالح متراکم می‌شود. وقتی که نصف ارتفاع ستون تکمیل شد لوله از چاه بیرون کشیده شده و بقیه کار ادامه پیدا می‌کند (شکل ۴) (Babu and Shivashankar, 2013).

۴-۵- ستون سنگی صلب

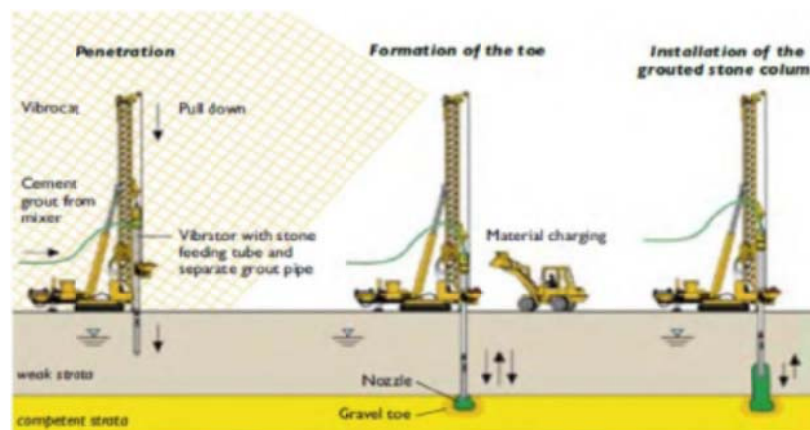
در طول مدت ۱۰ سال در اروپا هنگام ساخت ستون سنگی، به مصالح ستون سنگی سیمان نیز اضافه می‌شد. این سیمان باعث ایجاد ستون سنگی صلب‌تری نسبت به حالت بدون سیمان می‌شد. از لحاظ قیمت تمام شده این روش مانند

-منحنی بار- نشست این نوع ستون‌ها شبیه شمع‌های بتنی است و مقدار باربری واقعی و طراحی این ستون‌ها تطابق قابل قبولی با هم دارند. اجرای این نوع ستون سنگی با استفاده از روش لرزشی- جایجایی (خشک) انجام می‌شود (قضاوی و نظری افشار، ۱۳۸۸)

-در زمین‌های بسیار نرم که احتمال انبساط جانبی برای ستون سنگی وجود دارد افزودن سیمان باعث افزایش استحکام ستون سنگی شده و احتمال کماتش جانبی در ستون سنگی را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. نتیجتاً ستون سنگی بهتر می‌تواند بارها را به لایه‌های مقاوم‌تر منتقل کند.



شکل ۴. ستون سنگی کوبشی (Babu and Shivashankar, 2013)



شکل ۵. نحوه اجرای ستون سنگی صلب (ملک پور و توفیق، ۱۳۸۶)

۴-۶- روش ستون سنگی دریایی

دو قفله اختراع شد که نصب ستون‌های سنگی در زیر آب و با همان کیفیتی که در زمین اجرا می‌شود را میسر ساخت. در (شکل ۶) اجزای تشکیل دهنده روش پمپ شنی دریایی دو قفله برای اجرای ستون سنگی دریایی نشان داده شده است که به معرفی این اجزا می‌پردازیم. ۱- مخزن ضربه ۲- شلنگ حمل و نقل شن ۳- مخزن دریافت کننده ۴ و ۵- قفل‌ها ۶- شلنگ ایشنویکل ۷- نول ارتعاشگر ۸- کمپرسور فشار قوی ۹- مخزن فشار

در گذشته روش‌های نصب و اجرای ستون سنگی در دریا روش پتو و روش تک دسته تغذیه از پایین بود که هر دو روش دارای ضعف‌هایی مثل عدم توانایی اندازه‌گیری حجم سنگ و عدم بررسی مقدار سنگ اضافی از عمق مورد نظر ستون سنگی بودند. در این روش‌ها به هیچ عنوان امکان کنترل کافی وجود نداشت. سپس با تکنولوژی جدید پمپ شنی دریایی مشکل نصب ستون‌های سنگی با کیفیت بالا حل شد و روش منحصر به فردی به نام روش پمپ شنی دریایی

ستون و دسته سنگ‌ها با دو قفل پایینی، تغذیه چه روندی دارد (بابازاده، ۱۳۸۹).

در پروژه (Gerbang Selatan Bersepadu) با احداث گذرگاهی بین مالزی و سنگاپور این دو کشور به هم متصل گردید و جالب است بدانید که از روش ستون سنگی دریایی برای احداث این پل استفاده شده است (شکل ۷).

عملیات حمل و نقل سنگ و سیستم تخلیه در چند مرحله به صورت تمام اتوماتیک انجام می‌شود و توسط دستگاه ضبط کننده کیفیت دیجیتال، کیفیت آن کنترل می‌گردد. خروجی‌ها به عنوان تابعی از زمان و عمق داده می‌شود. با چنین مجموعه‌ای مهندس می‌تواند تشخیص دهد در چه عمقی از



شکل ۶. نحوه اجرای ستون سنگی دریایی (بابازاده، ۱۳۸۹)



An artist's impression of the new bridge

شکل ۷. احداث پل به روش ستون سنگی دریایی بین مالزی و سنگاپور (بابازاده، ۱۳۸۹)

مرور تحقیقات انجام شده بر روی ستون‌های سنگی مسلح شده با ژئوستتیک

در خاک‌های ضعیف ایجاد تنش‌های محصورکننده‌ی مورد نیاز در ستون سنگی مستلزم تغییر شکل شعاعی ستون‌های سنگی است و این مسئله ممکن است منجر به گسیختگی ستون سنگی شود (Keykhosropur and Imam, 2012). به‌منظور فراهم کردن محصوریت جانبی مورد نیاز برای ستون سنگی و افزایش ظرفیت باربری آن در خاک‌های نرم، ستون‌های سنگی را

ستون‌های سنگی عمده‌ی مقاومت و سختی خود را از تنش‌های محصورکننده‌ای که خاک پیرامونی آن‌ها فراهم می‌کند، کسب می‌کنند.

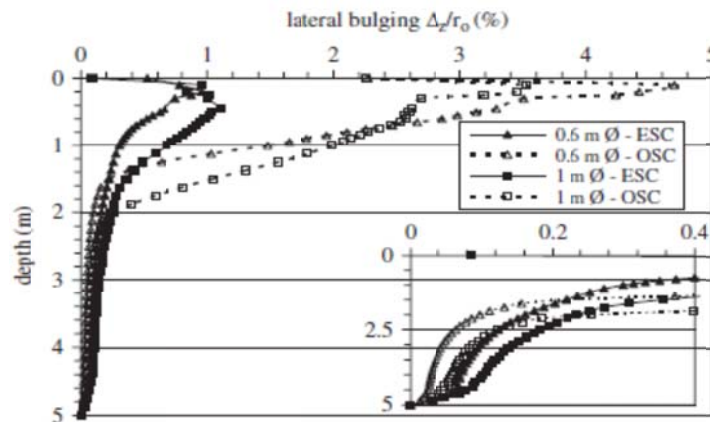
البته، در خاک‌های خیلی نرم $cu < 15 \text{ kpa}$ ، ممکن است تنش‌های محصورکننده کافی نباشند و اگرچه تحت بارهای وارده تا حدودی محصوریت جانبی فراهم می‌شود،

تحقیق انجام شده توسط مورگسان و راجاگوپال (۲۰۰۶)

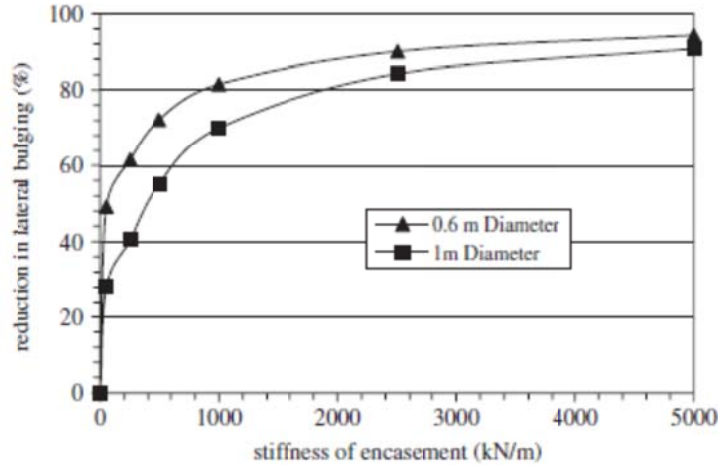
و (۲۰۱۰)

مورگسان و راجاگوپال (۲۰۰۶) (Murugesan and Rajagopal, 2006) با استفاده از برنامه‌ی المان محدود GEOFEM به بررسی عددی رفتار ستون‌های سنگی مسلح شده‌ی قائم منفرد با مدل سازی تقارن محوری پرداختند. رفتار ستون سنگی و خاک نرم اطراف با استفاده از حالت الاستیک غیرخطی هذلولی و رابطه دانکن-چانگ ۱۹۷۰ مدل شده است. در این مطالعه تأثیر پارامترهایی نظیر قطر ستون سنگی، سختی مسلح کننده، طول مسلح سازی ستون سنگی و چسبندگی خاک رسی بررسی شده است. در ادامه‌ی این تحقیق به مقایسه‌ی رفتار ستون سنگی معمولی یا غیرمسلح با ستون سنگی مسلح در خاک چسبنده پرداخته شده است. نتایج تحلیل‌های عددی حاکی از آن است که مسلح نمودن ستون سنگی موجب کاهش چشم‌گیر شکم دادگی شده است. شکم دادگی (انبساط) جانبی ستون سنگی (بر اساس درصدی از شعاع ستون سنگی) برای دو قطر ۰٫۶ متر و ۱ متر مسلح و غیرمسلح در (شکل ۸) ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج پیداست در ستون سنگی معمولی شکم دادگی شدیدی از نزدیکی سطح زمین تا عمق دو برابر قطر ستون نسبت به ستون‌های مسلح وجود دارد. در (شکل ۹) کاهش مقدار شکم دادگی (انبساط جانبی) ستون سنگی (نزدیکی سطح زمین) برای مسلح کننده‌ها با قطرهای ۰٫۶ و ۱ متر نشان داده شده است.

با ژئوستنتیک‌های با سختی بالا و مقاوم در برابر خزش محصور می‌کنند که در نتیجه‌ی آن ستون‌های مسلح شده با ژئوستنتیک ایجاد می‌شوند. مزیت اصلی این ستون‌ها در مقایسه با ستون‌های عادی این است که تنش محصورکننده‌ی اندکی که در خاک نرم ایجاد می‌شود توسط ژئوستنتیک‌ها جبران می‌شود. هم‌چنین پوشش ژئوستنتیکی از فرورفتن مصالح ستون سنگی به درون خاک تحت بار زیاد جلوگیری می‌کنند. این مسئله نصب ستون‌های سنگی را تسریع می‌بخشد؛ زیرا از گم شدن سنگدانه‌ها در خاک جلوگیری می‌کند. ایده‌ی مسلح سازی ستون سنگی توسط دورپیچ اولین بار در سال ۱۹۸۵ توسط ون ایمپ مطرح شد. علاوه بر دورپیچ، به مسلح سازی ستون‌های سنگی توسط ورقه‌های لایه‌ای نیز در تعدادی از پژوهش‌ها اشاره شده است. برای مسلح سازی ستون‌های سنگی توسط دورپیچ در پژوهش‌های مختلف، معمولاً روش اجرا به این صورت است که دورپیچ را به دور لوله‌ای به قطر مشخص قرار داده و این مجموعه را درون مخزنی قرار داده و سپس درون لوله را با مصالح شنی پر کرده و متراکم می‌کنند، یا این که لوله‌ای را درن خاک بستر فرو کرده و خاک درون آن را خارج کرده، سپس دورپیچ را درون آن قرار داده و درون آن را با مصالح شنی پر کرده و متراکم می‌کنند سپس لوله را خارج می‌کنند. برای اجرای ستون‌های سنگی توسط ورقه‌های افقی نیز مصالح شنی در لایه‌های مشخص ریخته شده و متراکم می‌شود و لایه مسلح کننده قرار داده می‌شود و همین روند تا اجرای کامل ستون سنگی ادامه می‌یابد.



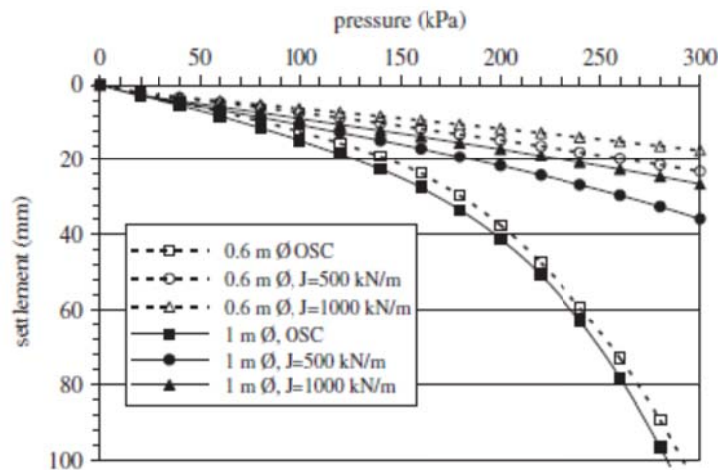
شکل ۸. شکم دادگی جانبی ستون سنگی مسلح و غیرمسلح (Murugesan and Rajagopal, 2006)



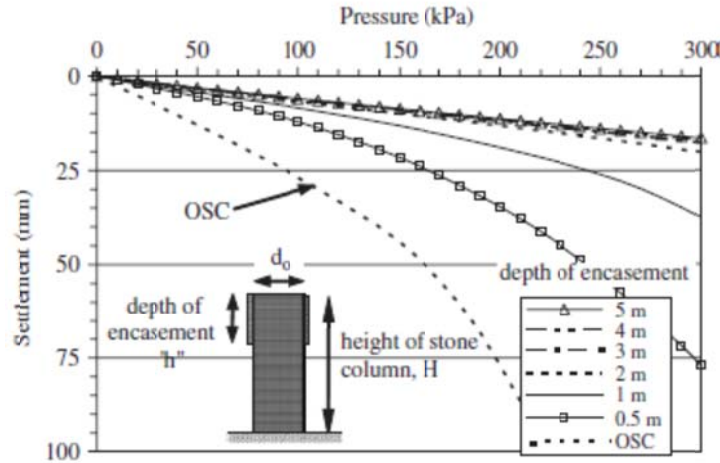
شکل ۹. تأثیر سختی غلاف روی ماکزیمم شکم دادگی جانبی (Murugesan and Rajagopal, 2006)

بیانگر آن است که طول مسلح سازی کم تر از دو برابر قطر ستون سنگی منجر به بهبود عملکرد ستون نمی شود و بایستی عمق مسلح سازی بیش از دو برابر قطر ستون سنگی باشد. در ادامه تأثیر چسبندگی خاک محل با مقدار ۱۰ و ۲۰ کیلو پاسکال برای قطرهای ۰٫۶ و ۱ متر مسلح کننده با سختی ۲۵۰ و ۵۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر انجام شد. نتایج نشان دهنده آن است که ظرفیت باربری ستون معمولی وابستگی بسیار زیادی به چسبندگی خاک رسی اطراف دارد. اما تأثیر چسبندگی خاک اطراف بر روی ظرفیت باربری ستون مسلح شده با افزایش سختی ژئوستتیک به تدریج کاهش پیدا می کند.

مشاهده می شود که افزایش سختی غلاف موجب کاهش مقدار شکم دادگی شده است، اما به نظر می رسد که افزایش بیش از حد سختی مسلح کننده (بیش از ۳۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر) تأثیر خاصی در مقدار شکم دادگی ندارد. برای بررسی تأثیر قطر ستون سنگی، تحلیل ستون سنگی با قطر ۰٫۶ و ۱ متر با اعمال بار فشاری روی سطح ستون سنگی انجام شده است. همان طور که در (شکل ۱۰) دیده می شود. عملکرد ستون سنگی مسلح با قطر ۰٫۶ متر بهتر از ستون های با قطر ۱ متر است. تغییر کاهش نشست ستون سنگی مسلح با تغییر طول مسلح سازی، برای ستون سنگی با قطر ۰٫۶ و ۱ متر در (شکل ۱۱) ارائه شده است. نتایج حاصل از تحلیل عددی (شکل ۱۱)



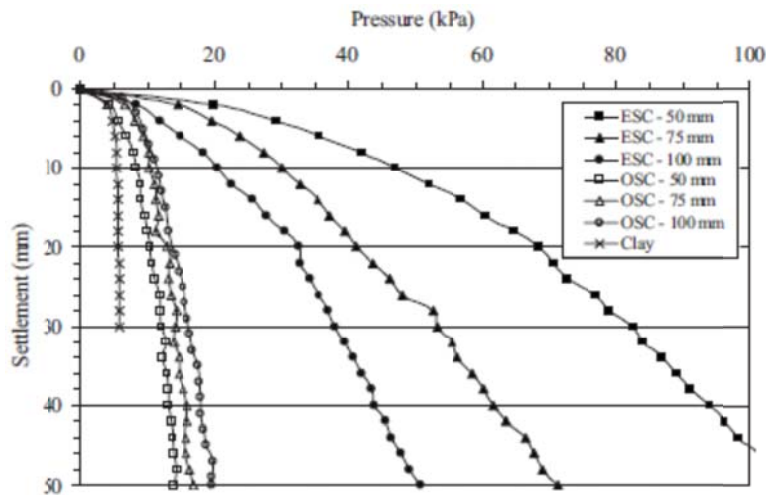
شکل ۱۰. تأثیر قطر ستون سنگی بر پاسخ فشار- نشست (Murugesan and Rajagopal, 2006)



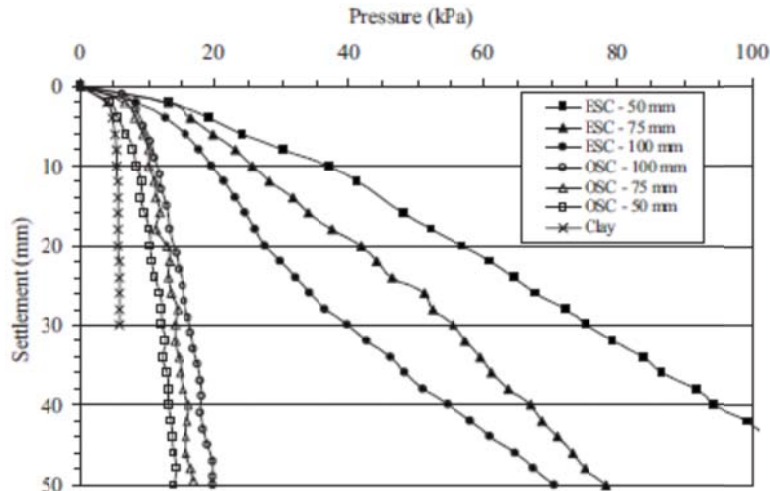
شکل ۱۱. اثر عمق غلاف در پاسخ برای ستون سنگی با قطر ۰٫۶ متر (Murugesan and Rajagopal, 2006)

سانتی‌متر) ریخته و با تنش سربار ۱۰ کیلو پاسکال در طی ۸ تا ۱۰ روز تحکیم شده است. بارگذاری به صورت کنترل جابه‌جایی با سرعت ۱٫۲ میلی متر در دقیقه و قطر صفحه بارگذاری در تمام آزمایش‌ها ۲ برابر قطر ستون سنگی در نظر گرفته شده بود. در (شکل ۱۲ و ۱۳) نتایج نیرو-نشست ستون‌های سنگی مسلح شده و غیرمسلح به ترتیب برای مصالح مسلح کننده، بافته نشده و بافته شده ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج پیداست عملکرد ستون سنگی مسلح شده در جهت قائم به مراتب بهتر از ستون سنگی غیرمسلح است.

مورگسان و راجاگوپال در سال ۲۰۱۰ به صورت آزمایشگاهی نیز به بررسی اثر مسلح سازی قائم ستون سنگی پرداخته‌اند. برای ساخت ستون سنگی از شن با دانه‌بندی بد (GP) با انداز دانه بندی ۲-۱۰ میلی متر، زاویه اصطکاک داخلی ۴۱٫۵ درجه و وزن مخصوص ۱۶ کیلو نیوتن بر مترمکعب و برای ساخت خاک بستر از خاک رس با خاصیت خمیری کم (CL) با حد روانی و خمیری ۴۹٪ و ۱۷٪ با مقاومت برشی زهکشی نشده ۲٫۵ کیلو پاسکال استفاده شده است. در این تحقیق برای احداث بستر رسی، به خاک رس تا ۱٫۵ برابر حد روانی آب اضافه شده و داخل مخزن (به ابعاد ۱۲۰×۱۲۰ به عمق ۶۰



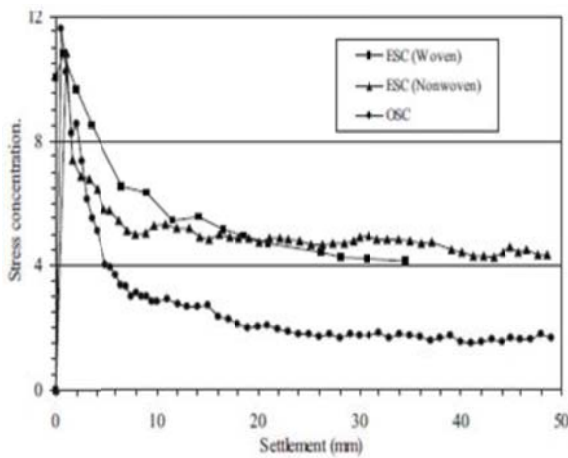
شکل ۱۲. نمودار نیرو-نشست ستون سنگی معمولی و مسلح شده با مصالح بافته نشده (Murugesan and Rajagopal, 2010)



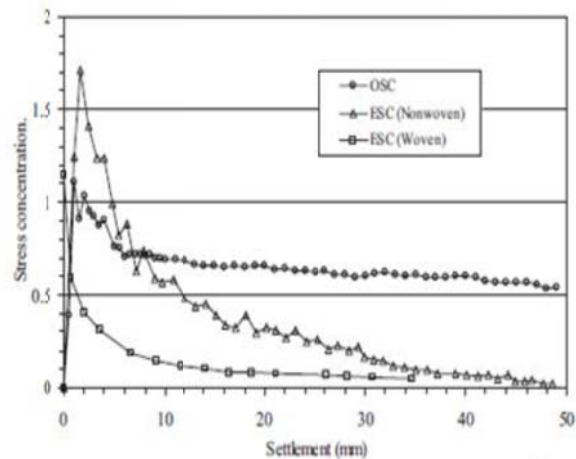
شکل ۱۳. نمودار نیرو- نشست ستون سنگی معمولی و مسلح شده با مصالح بافته شده (Murugesan and Rajagopal, 2010)

۱۴-الف پیداست نسبت تمرکز تنش در نشست ۵۰ میلی متر در ستون سنگی مسلح برابر ۵ و در ستون سنگی غیرمسلح برابر ۲ می‌باشد. از طرفی مطابق شکل ۱۴-ب با مسلح سازی ستون سنگی نسبت تمرکز تنش در خاک رس کاهش می‌یابد. به عبارتی با مسلح سازی ستون سنگی مقدار بار وارده بر خاک رس کاهش یافته است.

به علاوه در این تحقیق ۳ آزمایش بارگذاری گروه ستون سنگی بر روی گروه ۳ تایی ستون سنگی انجام شده است. در شکل ۸ نتایج نسبت تمرکز تنش در ستون سنگی و خاک رس در بارگذاری گروه ستون سنگی ارائه شده است. لازم به ذکر است که منظور از نسبت تمرکز تنش در این تحقیق عبارت است از نسبت تنش در خاک یا ستون سنگی به تنش کلی اعمالی در صفحه بارگذاری. از نتایج شکل



الف



ب

شکل ۱۴. نسبت تمرکز تنش الف) ستون سنگی (گروه ستون سنگی با قطر ۷۵ میلی متر) ب) خاک رس (گروه ستون سنگی با قطر ۷۵ میلی متر) (Murugesan and Rajagopal, 2010)

تحقیق انجام شده توسط گنایل و بوازا (۲۰۰۹ و ۲۰۱۰)

از نصب در بستر رسی منجمد شد. سپس بعد از آن که ستون منجمد شده حداقل به مدت ۳ روز در دمای اتاق نگهداری شد تا کاملاً ذوب شود، تحت بارگذاری قرار گرفت. نمونه‌ها تحت بارگذاری در کل سطح و هم چنین در سطح ستون قرار گرفتند. از این آنالیز نتیجه گرفته شد که پوشش ژئوگرید جهت مسلح کردن ستون‌های سنگی، سختی ستون سنگی را افزایش داده و کرنش آن را کاهش می‌دهد. برای یکی از ستون‌های گروه سنگی که به طور کامل مسلح شده است، کرنش می‌تواند تا بیش از ۸۰ درصد کاهش یابد. به علاوه، برای ستون ایزوله شده که در سطح خود تحت بارگذاری قرار دارد، ظرفیت باربری با افزایش طول پوشش افزایش می‌یابد؛ اگرچه کرنش حد گسیختگی کاملاً ثابت می‌ماند. برای ستونی که به طور کامل با پوشش ژئوگرید مسلح شده بود، پدیده‌ی انبساط جانبی در پای پوشش مشاهده شد. برای ستون‌های مسلح نشده پدیده‌ی انبساط جانبی در تمام طول ستون و برای ستون‌هایی که تا قسمتی از طول خود مسلح شده‌اند، انبساط جانبی در طولی در حدود دو برابر قطر ستون مشاهده شد. اگرچه در این آنالیز، ستون سنگی با استفاده از روش انجماد تهیه شده که نمی‌تواند فرآیند واقعی ساخت را شبیه سازی کند.

گنایل و بوازا در سال ۲۰۰۹ به منظور بررسی طول پوشش ژئوگرید بر کاهش کرنش و جلوگیری از انبساط جانبی، تعدادی آزمون آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های کوچک مقیاس انجام دادند. آزمون‌های آزمایشگاهی با استفاده از یک دستگاه اودومتر توسعه یافته با قطر داخلی ۱۴۳ میلی‌متر که بر مبنای مفهوم ایده‌آل سازی سلول واحد طراحی شده بود، انجام شدند. دستگاه اودومتر توسعه یافته در (شکل ۱۵) قابل مشاهده است. خاک بستر از خاک رسی نرم با مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی ۵ کیلو پاسکال توسط تحکیم رس کائولین با درصد رطوبت ۱۱۵ درصد از ارتفاع ۴۸۰ میلی‌متر تا ارتفاع ۳۱۰ میلی‌متر در دستگاه اودومتر با اعمال فشار ۵۰ کیلو پاسکال تهیه شد. از یک ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده با اندازه‌ی ذرات ۶/۱ میلی‌متر به عنوان مصالح ستون سنگی استفاده شد. به منظور مدل کردن نمونه‌های کوچک مقیاس ژئوگرید از شبکه‌ی مشبک ساخته شده از پوشش فایبرگلاس و آلومینیم تجاری استفاده شده است. شبکه‌ی مذکور به صورت یک پوشش استوانه‌ای با قطر ۵/۵۰ میلی‌متر با رویهم افتادگی ۱۰ میلی‌متر که توسط چسب رزین به هم متصل شده بودند، تشکیل شد. سپس پوشش مشبک قبل از ریختن ماسه به داخل آن در یک قالب با قطر ۵۱ میلی‌متر قرار داده شد. در مرحله‌ی بعد ستون ماسه‌ای قبل



شکل ۱۵. سلول تحکیم توسعه داده شده در حین عمل تحکیم (Gniel and Bouazza, 2009)

دومحوره مناسب است. همچنین برای دستیابی به پایداری مناسب، بهتر است ستون‌ها با رویهم افتادگی ۱۰۰٪ محیط ساخته شوند.

تحقیق انجام شده توسط کیخسروپور و همکاران (۲۰۱۲)

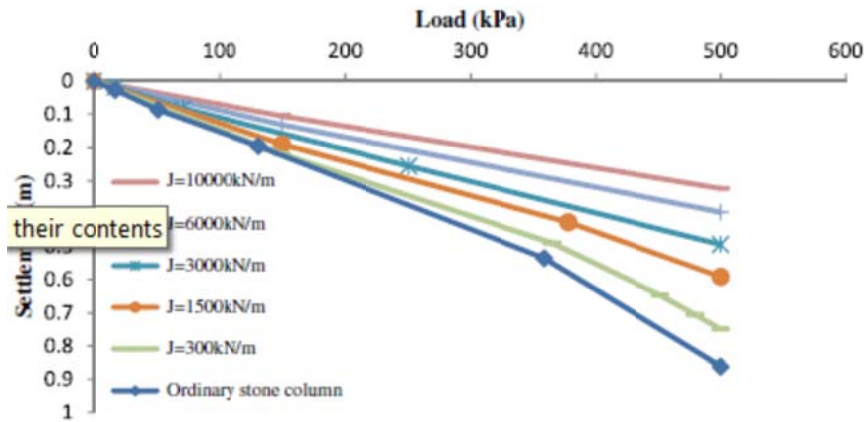
در زمینه ی بررسی گروه ستون‌های سنگی مسلح شده با مقیاس واقعی، یکی از بهترین و کامل ترین پژوهش‌ها، پژوهش انجام شده توسط کیخسروپور و همکاران (Keykhosropur and Imam, 2012) در سال (۲۰۱۲) است که به صورت سه بعدی به بررسی گروه ستون سنگی مسلح شده با دورپیچ ژئوتکستایل پرداختند.

کیخسروپور و همکاران (Keykhosropur and Imam, 2012) با استفاده از نرم افزار آباکوس به آنالیز ۳ بعدی ستون‌های مسلح شده با ژئوستتیک به صورت عددی پرداختند. در این مقاله به اثر تغییر طول ژئوستتیک‌های تعدادی از ستون‌های گروه ستون سنگی بر روی رفتار گروه ستون سنگی پرداخته شده و نتایج آن به لحاظ نشست و انبساط جانبی با گروهی از ستون‌های سنگی که ستون‌های آن به طور کامل با ژئوستتیک پوشیده شده است، مقایسه شده است. هم چنین مطالعات پارامتری به منظور مطالعه‌ی فاکتورهایی مانند سختی پوشش ژئوستتیک، قطر ستون سنگی، مدول الاستیسیته و زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح ستون سنگی پرداخته شده است. به منظور صحت سنجی روندی که در تحلیل عددی این آزمایش انجام گرفته است از مدل کردن بهسازی زمینی که در هامبورگ آلمان استفاده شده و توسط کمپفرت و ریزل (۲۰۰۲) گزارش شده، استفاده شده است. در این زمین، که مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده ی آن در بازه‌ی ۰٫۴ تا ۱۰ کیلوپاسکال است، از ۶۰۰۰۰ ستون سنگی مسلح شده با دورپیچ ژئوتکستایل به قطر ۸۰ سانتی متر برای مسلح سازی استفاده شده است. در مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار آباکوس رفتار مصالح ستون سنگی توسط مدل دراگر پراگر و رفتار خاک پیرامونی توسط مدل کم کلی تعریف شده است. پوشش ژئوتکستایل به صورت المان‌های غشایی مثالی سه نقطه‌ای و با سختی ۲۰۰۰ کیلونیوتن بر متر در نظر گرفته شده است. شکل‌های (۱۶ و ۱۷) به ترتیب نشست ستون ۱۳ و تغییر شکل جانبی ستون ۲۵ را که از آنالیزها به دست آمده‌اند، نشان می‌دهند.

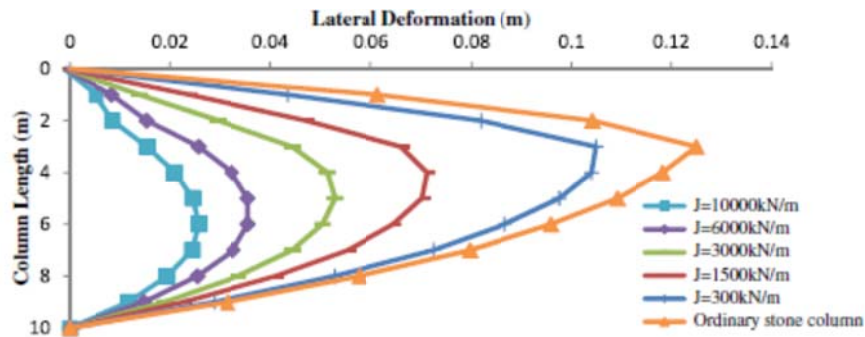
گنایل و بوازا در سال ۲۰۱۰ تعدادی آزمایش کوچک مقیاس و با اندازه‌ی متوسط به منظور بررسی روش ساخت پوشش ژئوگرید که به روش رویم رفتگی موسوم است، انجام دادند. علاوه بر آن، تأثیر مشخصات ژئوگرید و اندازه‌ی مصالح ستون سنگی بر عملکرد ستون سنگی مسلح شده مورد بررسی قرار گرفت. بستر رسی و ستون سنگی مشابه آزمایشی که در سال ۲۰۰۹ بر روی نمونه‌های متصل شده مانند شکل انجام شده بود، اجرا شدند. برای نمونه‌های کوچک مقیاس، دو آزمایش بر روی گروه ستون سنگی و یک آزمایش بر روی ستون سنگی ایزوله شده مانند شکل که تمامی طول ستون سنگی با استفاده از شبکه‌ی فایبرگلاس پوشیده شده بود، انجام شد. برای گروه اول مورد آزمایش، مقدار پوشش رویهم رفته توسط نخ پنبه‌ای در فواصل تقریباً ۳۰ میلی متر در طول پوشش، دوخته شد اما شبکه‌ی حاصل در حین خارج کردن ستون از قالب گسیخته شد. در نتیجه برای گروه بعدی و برای آزمایش ستون ایزوله شده مقدار عرض رویهم افتادگی دوخته نشد. پوشش رویهم رفته برای گروه ستون سنگی و ستون ایزوله شده که با رویهم افتادگی پوشش ژئوگرید به اندازه‌ی نصف محیط ستون سنگی انجام شده بود، درست به اندازه‌ی پوشش متصل شده پایداری از خود نشان دادند. برای پوشش‌های رویهم افتاده‌ی دوخته شده، تعیین تنش ستون در لحظه‌ی گسیختگی کار مشکلی بود چراکه در مرحله ی دوم، بارگذاری نسبتاً بزرگی انجام شد و بارگذاری پس از گسیختگی شبکه ادامه یافت تا ستون به گسیختگی برسد. مشاهده می‌شود که در قسمت دوخته شده تمرکز تنش صورت گرفته و باعث گسیختگی قسمت هم پوشانی شده است.

بر اساس یافته‌های نمونه‌های کوچک مقیاس، نمونه‌های متوسط مقیاس مانند شکل به منظور بررسی امکان پذیری استفاده از روش رویهم افتادگی در موارد بزرگ مقیاس انجام شده است. آزمایش‌های متوسط مقیاس بر روی ستونی با قطر ۰٫۲۴ و ارتفاع ۰٫۸۶ متر انجام شدند. ژئوگریدهایی که به عنوان پوشش انتخاب شدند، از ۴ ژئوگرید دومحوره با دهانه‌های مربعی و دو ژئوگرید تک محوره با دهانه‌های مستطیلی تشکیل شدند. مصالح مورد استفاده در ستون سنگی شامل دو نوع سنگ شکسته شده بود که از سنگ خورد شده و شن تشکیل شدند. سپس ستون در شرایط محصور نشده مانند شکل با یک نرخ ثابت جابه جایی بارگذاری شد.

از نتایج این آزمایش چنین استنباط می‌شود که روش رویهم افتادگی یک روش ساده برای استفاده در محل و جایگزین مناسبی برای روش اتصال ژئوگرید است که برای ژئوگریدهای



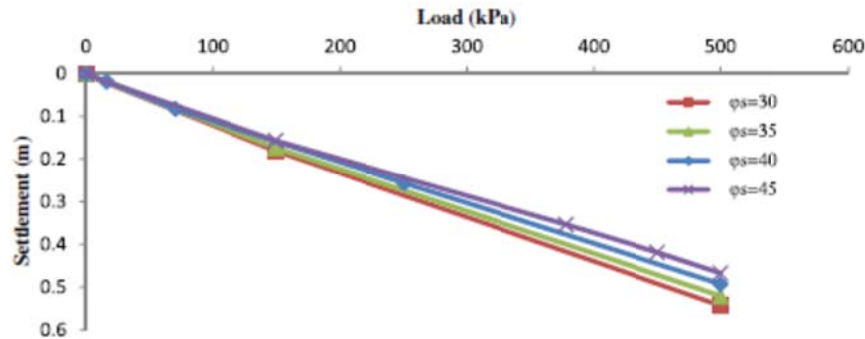
شکل ۱۶. نشست ستون ۱۳ برگرفته از مدل‌ها با سختی‌های متفاوت پوشش (Keykhosropur and Imam,2012)



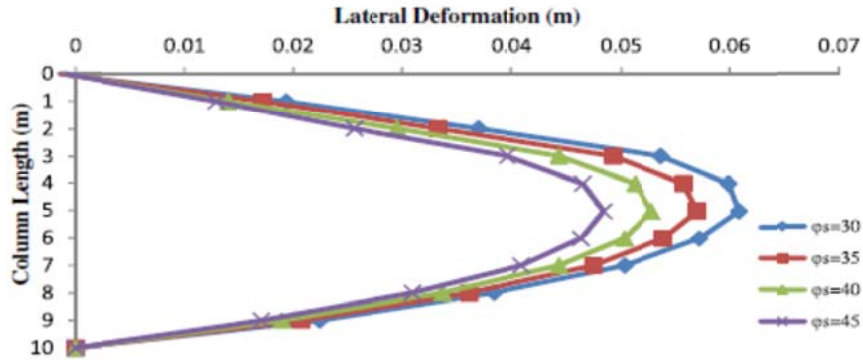
شکل ۱۷. تغییر شکل جانبی ستون ۲۵ برگرفته از مدل‌ها با سختی‌های متفاوت پوشش (Keykhosropur and Imam,2012)

زاویه ی اصطکاک داخلی بین ۳۰ و ۴۵ درجه نشست ستون ۱۳ و تغییر شکل جانبی ستون ۲۵ در شکل‌های (۱۸ و ۱۹) ترسیم شده‌اند.

همانطور که از شکل مشخص است، افزایش سختی پوشش ژئوسنتتیک منجر به سختی کلی ستون سنگی شده و در نتیجه تغییر شکل جانبی و نشست ستون‌ها کاهش می‌یابند. با تغییر



شکل ۱۸. نشست ستون ۱۳ برگرفته از مدل آنالیز شده با ϕ_s های مختلف (Keykhosropur and Imam,2012)



شکل ۱۹. تغییر شکل جانبی ستون ۲۵ از آنالیز با ϕ_s های مختلف (Keykhosropur and Imam, 2012)

سنگی می‌گردد. افزایش قطر ستون سنگی اثر پوشش ژئوستتیک را کاهش می‌دهد زیرا باعث افزایش تغییر شکل جانبی می‌گردد، اما افزایش قطر ستون سنگی در یک گروه ستون سنگی هنگامی که فاصله ی مرکز به مرکز ستون‌ها ثابت باشد به معنی افزایش نسبت جایگزینی سطح بوده و افزایش این نسبت اثر عملکردی بهتری بر روی رفتار گروه ستون سنگی دارد در نتیجه به طور کلی افزایش قطر موثر است و عملکرد گروه را بهبود می‌بخشد.

از آنالیزهای عددی این مطالعه نتایج زیر حاصل شده است: بررسی نتایج عددی نشان می‌دهد که در یک گروه ستون سنگی مسلح شده، زمانی که نشست تغییر شکل جانبی مورد توجه است، کافی است تنها تعدادی از ستون‌های سنگی مسلح شوند که محل این تون‌های انتخابی بستگی به سختی سیستم پی و توزیع بار دارد.

افزایش سختی دورپیچ ژئوستتیک از آن‌جا که باعث افزایش در تنش حلقوی بسیج شده و محصوریت بیش‌تر ستون سنگی می‌شود باعث افزایش قابل توجهی در عملکرد گروه ستون

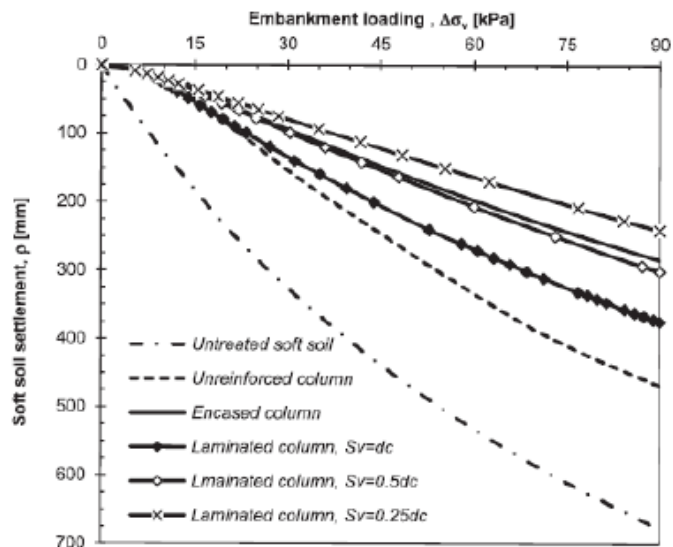
تحقیق انجام شده توسط حسین پور و همکاران (۲۰۱۴)

باربری بستگی به تعداد ورقه‌های مسلح کننده، فاصله ی بین لایه‌های تقویت کننده و زاویه ی مقاومت برشی مصالح ستون سنگی دارد. در این پروژه از برنامه‌ی اجزاء محدود *plaxis* برای مدل کردن سلول واحد استفاده شده است. از آنالیز دراز مدت (محاسبات زهکشی شده) به منظور دستیابی به ماکزیمم مقادیر نشست و تنش استفاده شده است.

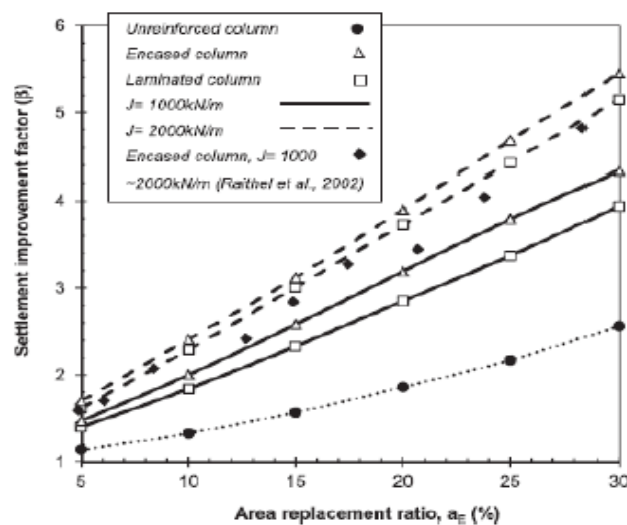
تسلیح ستون سنگی به وسیله‌ی ورق‌های لایه‌ای یا دورپیچ ژئوستتیک منجر به افزایش ظرفیت باربری و نشست می‌شود. هنگام استفاده از یک ژئوستتیک با سختی ثابت و ارتفاع مشخص خاکریز، تأثیر ورق‌های ژئوستتیک در کاهش نشست با کاهش فاصله‌ی آن‌ها در طول ستون افزایش می‌یابد. افزایش سختی کششی ژئوستتیک‌ها منجر به افزایش سختی ستون‌ها، نیروی کششی حلقوی بسیج شده در پوشش و محصوریت ستون سنگی می‌شود که همگی منجر به افزایش بهبود عملکرد ستون‌های سنگی می‌شود.

تقویت ستون‌های سنگی اغلب توسط دورپیچی از ژئوستتیک‌ها انجام می‌گیرد؛ اما می‌توان از ورق‌های لایه‌ای نیز استفاده نمود. در تحقیق انجام شده توسط حسین پور و همکاران (حسین پور و همکاران، ۲۰۱۴) در سال ۲۰۱۴ تأثیر این دو نوع مسلح سازی ستون‌های سنگی بر روی رفتار ستون‌های سنگی با توجه به مفهوم سلول واحد با هم مقایسه شده است. ابتدا نتایج آزمایشگاهی توسط داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی تأیید شده و سپس مطالعات پارامتری صورت گرفته است. مطالعات پارامتری به منظور بررسی تأثیر تغییر فاصله‌ی ورق‌های ژئوستتیک، سختی محوری آن‌ها و تغییر طول قسمت مسلح شده ستون انجام گرفته است.

هنگامی که ژئوستتیک‌ها به صورت ورق‌های لایه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، انبساط جانبی ستون سنگی توسط بسیج شدن اصطکاک روی سطح ژئوستتیک به صورت موضعی محدود می‌شود. مقدار کاهش انبساط جانبی و افزایش ظرفیت



شکل ۲۰. نشست خاک نرم در مقابل بار وارده بر خاکریز برای خاک نرم مسلح نشده و مسلح شده (حسین پور و همکاران، ۲۰۱۴)



شکل ۲۱. فاکتور بهبود نشست در مقابل نسبت جایگزینی سطح (حسین پور و همکاران، ۲۰۱۴)

تنش روی خاک پیرامونی را کاهش می‌دهد. این رفتار با افزایش سختی ژئوستتیک یا استفاده از ورقه‌های نزدیک به هم بهبود می‌یابد. نتایج آنالیز اجزا محدود نشان می‌دهد که افزایش قطر سلول واحد با وجود ثابت نگه داشتن قطر ستون، عملکرد ستون سنگی در بهبود نشست را کاهش می‌دهد و استفاده از یک ستون سنگی با قطر کوچک‌تر تمرکز تنش قائم بسیج شده روی ستون را افزایش می‌دهد.

فاصله‌ی بهینه‌ی بین ورق‌های ژئوستتیک برای به دست آوردن نتایج مشابه با دورپیچ، بستگی به سختی ژئوستتیک و طول مسلح شده‌ی ستون سنگی دارد. زمانی که ستون به طور کامل توسط ورقه‌های ژئوستتیک با $J = 2000 \text{ kN/m}$ فواصل $S_v = 0.25d_c$ مسلح شد، نشست به دست آمده با ستون مسلح شده با دورپیچ یکسان شد، در صورتی که به اندازه‌ی نصف آن از ژئوستتیک استفاده شده بود. استفاده از ژئوستتیک تنش قائم بسیج شده روی ستون را افزایش داد و

تحقیق انجام شده توسط چن و همکاران (۲۰۱۵)

چن و همکاران (چن و همکاران، ۲۰۱۵) در سال ۲۰۱۵ مکینیم گسیختگی ستون های سنگی در خاک نرم در زیر یک خاکریز را مورد بررسی قرار دادند. به منظور نیل به این هدف علاوه بر انجام آزمون های آزمایشگاهی، با استفاده از آنالیز عددی سه بعدی و دو بعدی توسط نرم افزار Z-soil که توسط مرکز تحقیقات فدرال سوییس ارائه شده است، به بررسی این موضوع پرداخته شده است.

به منظور آماده سازی بستر رسی از کائولین استفاده شده است. از ماسه ی خوب دانه بندی شده با اندازه ی دانه بندی متوسط ۰،۰۳۴ میلی متر و ضریب یکنواختی ۱،۵۴۲ با دانسیته ی ۱۵،۳ کیلونیوتن بر متر مکعب به ضخامت ۵۰ میلی متر به عنوان لایه ای میان بستر رسی و خاکریز استفاده شده است. برای مصالح ستون سنگی از رس سیلیسی با اندازه ی ذرات از ۲ تا ۴ میلی متر و ضریب یکنواختی ۱،۸۶ و زاویه ی اصطکاک داخلی ۳۶،۷ درجه استفاده شده است. برای مسلح سازی ستون های سنگی از ژئوتکستایل یافته نشده با سختی ۴ کیلونیوتن بر متر استفاده شده است. ستون های سنگی به قطر ۳۲ میلی متر و طول ۴۰۰ میلی متر در نظر گرفته شده اند. سپس مدل سازی سه بعدی با استفاده از نرم افزار Z-soil انجام شد. در آنالیز عددی، ستون های سنگی به قطر ۰،۸ متر و طول ۱۰ متر در زیر خاکریز در نظر گرفته شدند. آرایش ستون های سنگی به صورت مربعی با فاصله ی ۲،۵ متر در نظر گرفته شده اند. برای مدل سازی خاک از مدل موهر-کولمب استفاده شده است. در آنالیز دو بعدی، قسمت مسلح شده ی خاک توسط دیوار خاک معادل با استفاده از روش مقاومت خمشی معادل و مقاومت برشی معادل، مدل شد. بر اساس یافته های حاصل از مد فیزیکی و مدل سازی های عددی نتایج و توصیه های زیر ارائه می شود.

گسیختگی خمشی مد اصلی خرابی در ستون های سنگی مسلح شده در زیر خاکریز بارگذاری شده است. خمش ستون ها توسط لغزش خاکریز و بار جانبی نامتعادل وارد بر ستون ها ایجاد می شود.

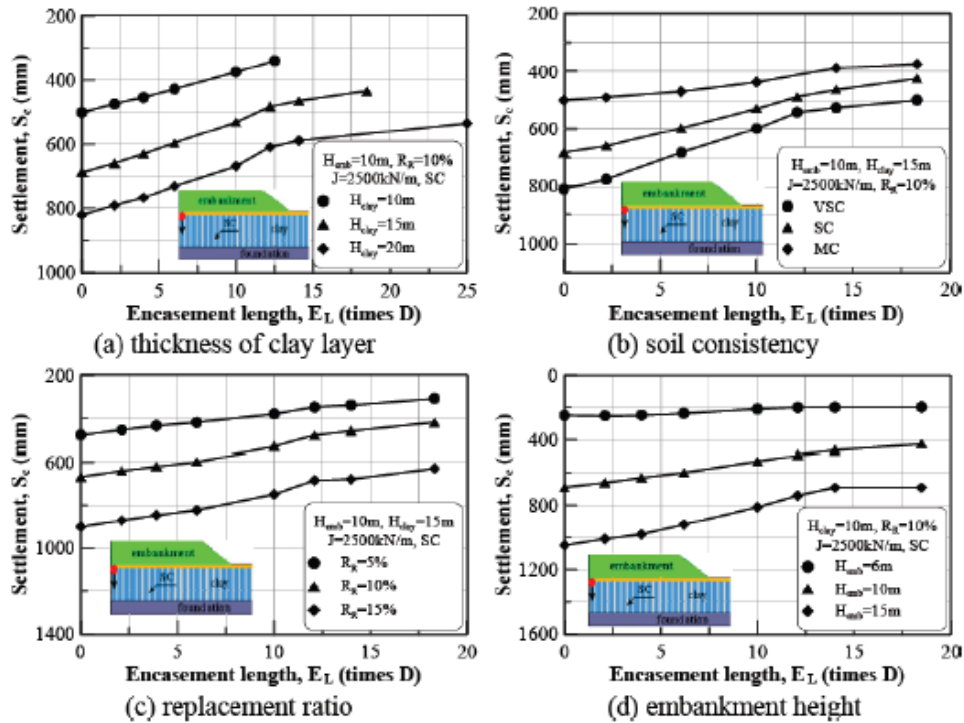
- آنالیز اجزا محدود سه بعدی نشان می دهد که بار جانبی خالص وارد بر ستون ها بالای مفصل پلاستیک آن گونه که پیش تر توسط کیتازوم و همکاران (۲۰۰۰) و برومز (۲۰۰۱) فرض شده بود، به صورت مثلثی یا یکنواخت نیست. تنش های جانبی از سر ستون ها تا نقطه مفصلی که تنش در آن صفر است کاهش می یابند و در نقطه مفصل پلاستیک که ممان خمشی بیشینه است، به ماکزیمم مقدار خود می رسند. تنش های جانبی بالای مفصل پلاستیک به احتمال زیاد در اطراف نقطه مفصلی مقارن هستند.

- نمودارهای ممان خمشی و نیروی برشی در ستون ها نشان می دهند که به دلیل مقاومت جانبی حداقل در ستون ها، گسیختگی از ستون های واقع در حاشیه ی شیب شروع می شوند. از این نقطه نظر، یک ردیف اضافی از ستون ها در خارج از شیب برای افزایش مقاومت جانبی خاک در جلوی پنجره ی خاکریز لازم است.

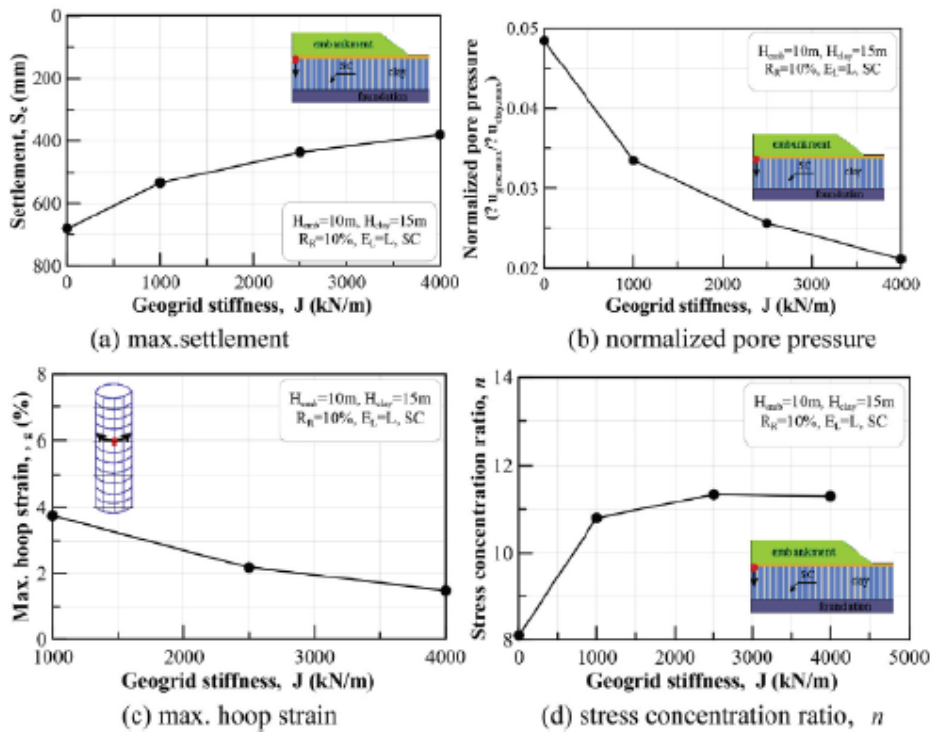
- در آنالیز اجزا محدود دو بعدی با استفاده از روش دیوار خاکی معادل، ضریب اطمینان با توجه به روشی که برای پردازش ستون سنگی انتخاب می شود، متفاوت است. نتایج به دست آمده با روش مقاومت خمشی معادل به مقادیر به دست آمده از آنالیز سه بعدی نزدیک تر هستند.

تحقیق انجام شده توسط یو در سال ۲۰۱۵

علی رغم مطالعات گسترده ای که بر روی ستون های سنگی صورت گرفته است، اثرات دراز مدت پارامترهایی از جمله طول و سختی پوشش ژئوستنتیکی، قوام خاک رسی، ارتفاع خاکریز و نسبت جایگزینی سطح بر روی رفتار و نشست زمین مسلح شده با ستون سنگی بسیار کم مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق انجام شده توسط یو در سال ۲۰۱۵ تاثیر چنین عواملی با استفاده از مدل اجزا محدود سه بعدی با استفاده از نرم افزار آباکوس بررسی شده است. برای مثال در (شکل ۲۲) نمودار تغییرات نشست با طول پوشش برای پارامترهای مختلف طراحی آورده شده است. همچنین در (شکل ۲۳) تاثیرات سختی پوشش بر نشست و انتقال بار آمده است.



شکل ۲۲. تغییرات نشست با طول پوشش برای پارامترهای طراحی مختلف (Yoo,2015)

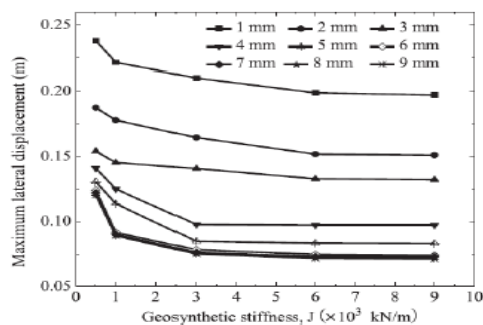


شکل ۲۳. تاثیر سختی پوشش بر نشست و انتقال بار (Yoo,2015)

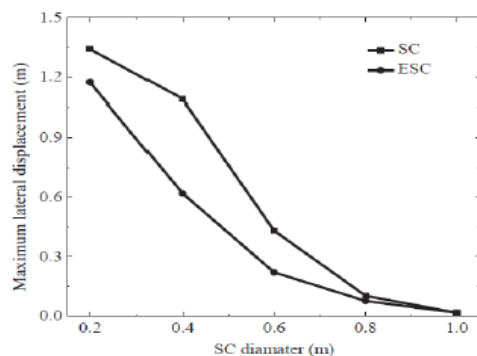
تحقیق انجام شده توسط تانگ و همکاران (۲۰۱۵)

تانگ و همکاران (تانگ و همکاران، ۲۰۱۵) در سال ۲۰۱۵ برای نخستین بار به بررسی عملکرد گروه سنگی مسلح شده و نشده بر کاهش پدیده‌ی روانگرایی در یک شیب ملایم از جنس ماسه اشباع پرداختند. در این مطالعه از تحلیل اجزا محدود غیر خطی توسط نرم افزار سه بعدی OpenSees برای مدل سازی عددی استفاده شده است. در هنگام مطالعه‌ی گروه ستون سنگی مسلح شده اثر پوشش در کاهش پدیده‌ی روانگرایی مورد بررسی قرار گرفته است. هم چنین پارامترهای طراحی مهمی که در کاهش تغییر شکل جانبی زمین تاثیر گذارند از جمله، ضخامت، سختی کششی و نفوذپذیری ژئوسنتتیک‌ها، قطر ستون سنگی مسلح و بار توزیع شده در سطح ستون‌های سنگی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و برای هر یک نمودارهایی ارائه شده است، که به عنوان نمونه دو مورد از این نمودارها در ادامه ارائه می‌شود.

به طور کلی این پژوهش تاثیر مثبت استفاده از مسلح‌کننده‌ها در کاهش نشست را به دلیل ترکیب توام کاهش فشار آب حفره ای و افزایش سختی ستون نشان می‌دهد. هم چنین آن گونه که به نظر می‌رسد طول پوشش بحرانی تنها برای زمانی که ضخامت لایه رس بیش از ۱۰ متر باشد، معنا دار است. به عبارت دیگر برای ضخامت محدود، مسلح کردن تمام طول ستون سنگی به منظور حداقل کردن نشست، لازم است. این مطلب یافته‌ی یو (۲۰۱۰) را که به این نکته اشاره داشت که طول بحرانی پوشش برای زیر سطح خاکریز قابل کاربرد نیست، تایید می‌کند. نتیجه‌ی دیگر به دست آمده از آنالیز سه بعدی این است که مقدار کاهش نشست با افزایش طول و سختی زمانی آشکارتر است که ضخامت لایه‌ی رسی زیادتر، قوام آن کم‌تر، نسبت جایگزینی سطح کوچک‌تر و بارگذاری خاکریز بیش تر باشد.



شکل ۲۴. تاثیر سختی ژئوسنتتیک بر روی ماکزیمم تغییرات جانبی سطح زمین (تانگ و همکاران، ۲۰۱۵)



شکل ۲۵. تاثیر قطر ستون سنگی بر روی ماکزیمم تغییرات جانبی سطح زمین (تانگ و همکاران، ۲۰۱۵)

از این پژوهش نتایج زیر استخراج شده است:

نفوذپذیری به بیش از ۱ متر بر ثانیه تغییر شکل جانبی را کاهش می‌دهد.

۴. افزایش قطر ستون‌های سنگی غیرمسلح به طور قابل توجهی تغییر شکل جانبی لایه ماسه‌ای را کاهش داد، حتی هنگامی که قطر ستون‌ها سنگی ۱ متر در نظر گرفته شده بود. اما، استفاده از ستون‌های غیر مسلح با نسبت جایگزینی سطح پایین و حدود ۲۰ درصد نتایج خوبی نشان داد و استفاده از ستون‌های مسلح در این شرایط نتایج مطلوب‌تری می‌دهد.

۵. مطالعات بیشتر به خصوص بر روی خاک‌های لایه‌ای، با ضخامت‌های مختلف لایه‌ها، طول‌های مختلف از مسلح کننده‌ها و فواصل مختلف بین ستون‌های سنگی لازم است.

۱. به طور کلی هر دو ستون‌های سنگی مسلح و غیر مسلح در کاهش تغییر شکل جانبی لایه‌ی ماسه‌ای موثر بوده‌اند. در مجموع، ستون‌های مسلح شده با ژئوستتیک‌ها سطح سخت‌تری را در زمین ایجاد می‌کنند و به دلیل این که تمام طول آن‌ها توسط ژئوستتیک‌ها پوشانده شده موج‌های زلزله را در سطح زمین و لایه‌های بالایی تقویت می‌کنند، جابه‌جایی کم‌تری نسبت به ستون‌های غیرمسلح ایجاد می‌کنند.

۲. در یک لایه‌ی ماسه‌ای مشخص، استفاده از ژئوستتیک‌ی با ضخامت و سختی محوری بیشتر، تغییر شکل جانبی زمین را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

۳. ملاحظه شد که ژئوستتیک‌ی با نفوذپذیری کم‌تر از ۰٫۱ متر بر ثانیه به تغییر شکل دائمی غیرحساس است. به علاوه، افزایش

تحقیق انجام شده توسط قضاوی و نظری افشار (۲۰۱۴-۲۰۱۲)

چند آزمایش بر روی ستون‌های سنگی تکی که تنها نیمی از طول آن‌ها محصور شده بودند انجام شد و برای مقایسه، چند آزمایش هم بر روی ستون‌های سنگی که تمام طول آن‌ها مسلح شده بود انجام گرفت. مصالح ستون سنگی از شن بدانه بندی شده (GP) با اندازه ی ۲ تا ۱۰ میلی‌متر و مصالح بستر از خاک رسی با مقاومت برشی زهکشی نشده ۱۵ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. به منظور مطالعه‌ی اثر هم‌جواری ستون‌ها، آزمایش بارگذاری بر روی ۱۲ ستون سنگی که همگی قطر ۶۰ میلی‌متر و فاصله‌ی مرکز به مرکز ۱۵۰ میلی‌متر داشتند، انجام شد. پس از اتمام آزمایش‌ها، شکل تغییر شکل یافته ی ستون سنگی تکی و گروه ستون سنگی مسلح شده و نشده با استفاده از ماده ی گچ دندان پزشکی یا پاریس پلاستر ۱ قالب‌گیری شده است (شکل ۲۶) مشاهده می‌شود که در تمام آزمایش‌ها مد اصلی خرابی، انبساط جانبی است. خرابی انبساط جانبی در عمقی در فاصله‌ی D تا 2D از سر ستون اتفاق می‌افتد. در تمام ستون‌های VESC تکی، خرابی از نوع انبساط جانبی رخ داده اما اندازه‌ی خرابی کم‌تر از ستون‌های OSC است. مد خرابی مشاهده شده در گروه ستون سنگی ترکیبی از انبساط جانبی و خمش در ستون سنگی به سمت بیرون صفحه‌ی بارگذاری است.

اغلب مطالعات انجام گرفته در زمینه‌ی بررسی مسلح سازی ستون‌های سنگی در دستگاه سه محوری انجام شده که به دلیل کوچک بودن مدل سازی صورت گرفته، در عمل نتایج چندان قابل اعتماد نیستند. در تحقیق انجام شده توسط قضاوی و نظری افشار (قضاوی و نظری افشار، ۲۰۱۳) در سال ۲۰۱۳ تعدادی آزمایش با مقیاس بزرگ‌تر از دستگاه سه محوری بر روی ستون‌های سنگی انجام شده است.

در این مقاله ستون‌های مسلح شده و نشده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای مسلح سازی ستون‌ها از دورپیچ ژئوتکستایل استفاده شده و مسلح سازی در جهت قائم (VESC) صورت گرفته است. هدف اصلی این پژوهش، مقایسه‌ی تأثیر مسلح سازی ستون‌های سنگی در جهت قائم و در شرایط مشابه برای ستون‌های با قطرهای ۸۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی‌متر است. علاوه بر آن تعدادی آزمایش بر روی گروه ستون سنگی با قطر ۶۰ میلی‌متر انجام شد تا اثر هم‌جواری ستون‌های یک گروه بر روی یک ستون تحت بارگذاری ارزیابی شود.

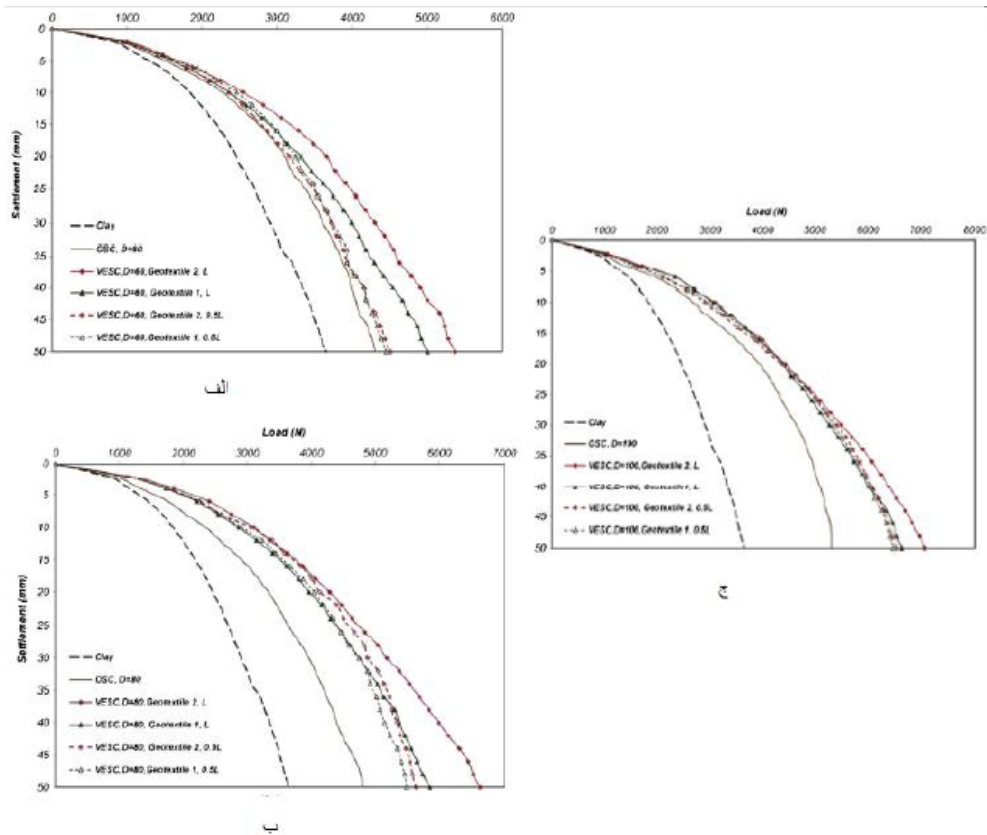
گفته می‌شود که ماکزیمم شکم دادگی ستون سنگی در زیر بار معمولاً در عمقی حدود ۱٫۵ تا ۲ برابر قطر ستون سنگی از سر آن اتفاق می‌افتد؛ بنابراین تنها قسمت بالایی ستون نیاز به محصوریت بالایی دارد. به منظور تحقیق این مسئله،



شکل ۲۶. شکل تغییر شکل یافته ی ستون سنگی الف) ستون سنگی تک ب) گروه ستون سنگی (قضاوی و نظری افشار، ۲۰۱۳)

بار- نشست ستون‌های سنگی مسلح شده و نشده با قطرهای ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر ترسیم شده‌اند.

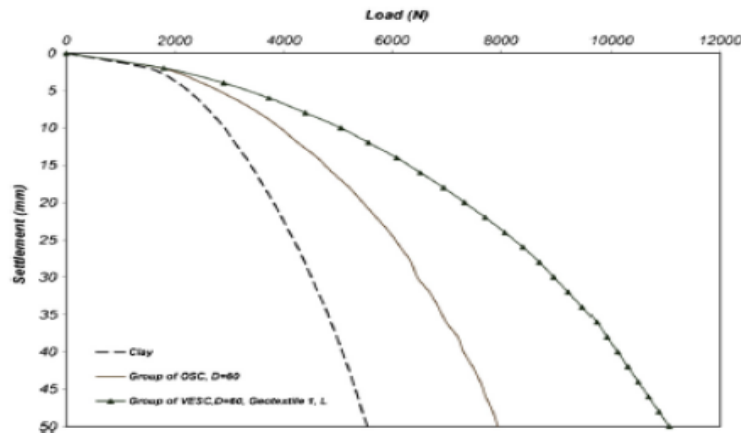
هم چنین در ادامه ی این مقاله به بررسی رفتار بار- نشست ستون‌های سنگی پرداخته شد و مطابق (شکل ۲۷) نمودارهای



شکل ۲۷. تغییرات نیرو- نشست ستون‌های سنگی تک با قطرهای الف) ۶۰ میلی‌متر ب) ۸۰ میلی‌متر ج) ۱۰۰ میلی‌متر

(قضاوی و نظری افشار، ۲۰۱۳)

تغییرات بار- نشست گروه ستون سنگی با قطر ۶۰ میلی متر نیز به صورت (شکل ۲۸) است.



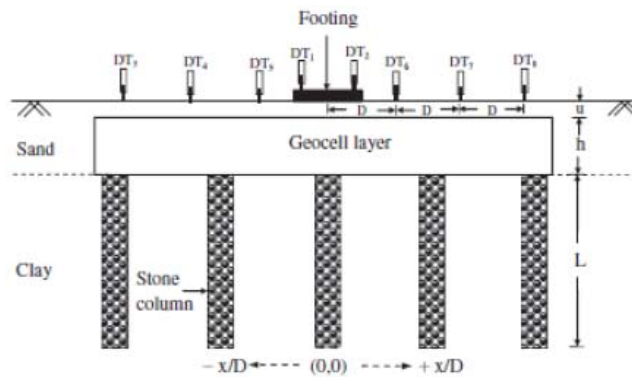
شکل ۲۸. تغییرات بار- نشست گروه ستون سنگی با قطر ۶۰ میلی متر (قضاوی و نظری افشار، ۲۰۱۳)

تحقیق انجام شده توسط دش و برا (۲۰۱۳)

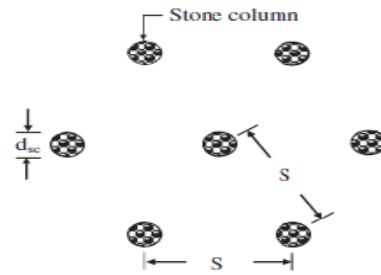
سنگی روش‌های مؤثری در بهبود عملکرد خاک رس نرم هستند، اما ترکیب آن‌ها برای بهبود عملکرد پی بررسی نشده است. با توجه به تحقیقاتی که تاکنون انجام شده است، مشخص شده است که استفاده از ستون‌های سنگی با طول، قطر و فاصله‌ی مناسب، ظرفیت باربری را تا حدود ۳ برابر افزایش می‌یابد. درحالی که با استفاده از لایه ی ماسه‌ای مسلح شده با ژئوگرید ظرفیت باربری حدود ۷ برابر افزایش می‌یابد. اما در تحقیق انجام شده توسط دش و برا در سال ۲۰۱۳ نشان داده شده است که استفاده از ترکیب این دو می‌تواند ظرفیت باربری را تا حدود ۱۰ برابر افزایش دهد. شکل شماتیکی از آزمایش در (شکل ۲۹) نشان داده شده است.

ژئوسل‌ها یکی از جدیدترین دستاوردهای خانوادگی ژئوسنتتیک‌ها هستند. ژئوسل، ساختاری سه بعدی، پلیمری و مشابه شانه عسل دارد که از سلول‌های متصل به هم تشکیل شده و نحوه‌ی تسلیح آن توسط محصوریت همه جانبه‌ی خاک انجام می‌شود.

علاوه بر آن ژئوسل‌ها مانع از رسیدن صفحات گسیختگی به پتانسیل نهایی خود شده و صلبیتشان آن‌ها را تا عمق بیشتری به درون خاک زیر پی فرو می‌برد. این مسئله باعث وارد شدن سربار بیشتری به صفحه‌ی گسیختگی شده و ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد. مرور ادبیات موضوع نشان می‌دهد استفاده از لایه‌ی ماسه‌ای مسلح شده با ژئوسل و ستون



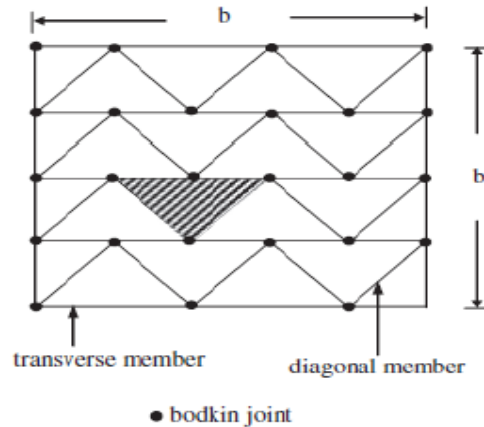
شکل ۲۹. نمای کلی از آزمایش (Dash and Bora, 2013)



شکل ۳۰. طرح کلی آرایش ستون‌ها (Dash and Bora, 2013)

همانند شکل با الگوی شورون ساخته شدند. این الگو عملکرد بهتری از الگوی قطری دارد. قطر ژئوسل‌ها به اندازه‌ی $0.8D$ در نظر گرفته شده است. لایه‌های ماسه ای در عمق ثابت $Du=0/1$ در زیر پی قرار گرفتند. این عمق، عمق بهینه‌ای است که حداکثر بهبود عملکرد را می‌دهد. در مجموع ۱۲ سری آزمایش بر روی نمونه‌ها انجام شد. نمایی از بستر آماده شده همراه با ژئوسل و ستون سنگی در (شکل ۳۲) مشاهده می‌شود.

ستون‌های سنگی به صورت شناور در خاک رس بستر قرار داده شده‌اند. این مسئله به دلیل شبیه سازی شرایطی که غالباً در مناطق ساحلی وجود دارد انجام شده است. در این مناطق معمولاً ضخامت خاک رس آن قدر زیاد است که تمام طول ستون سنگی در آن قرار می‌گیرد. ستون‌ها در یک الگوی مثلثی در فواصل منظم S قرار گرفته‌اند. در تمام آزمایش‌ها قطر ستون‌های سنگی ثابت و برابر ۱۰۰ میلی‌متر است. ژئوسل‌ها



شکل ۳۱. سیستم ژئوسل در الگوی شورون (Dash and Bora, 2013)



شکل ۳۲. بستر آماده شده همراه با ژئوسل و ستون سنگی (Dash and Bora, 2013)

مرور و مقایسه‌ای بر پژوهش‌های انجام شده

موثر بر رفتار بار-نشست ستون سنگی که در قسمت اثر مقیاس معرفی شده‌اند با مطالعه ی جدول زیر به دست آمده‌اند. تمامی ستون‌های سنگی در جدول زیر با رعایت نسبت طول به قطر، دارای مکانیزم خرابی از نوع انبساط جانبی هستند. در هیچ یک از پژوهش‌های اشاره شده در این جدول هیچ توضیحی نسبت به انتخاب ابعاد یا مصالح خاک بستر از دید اثر مقیاس داده نشده است و تنها به سختی مسلح کننده‌ها اشاره شده است.

در ابتدای هر پژوهشی که بر روی اثر مقیاس صورت می‌پذیرد لازم است که مطالعات گذشته مدل‌های فیزیکی قبلی در خصوص موضوع مورد نظر مطالعه شده و با توجه به نتایجی که مولفان برای کارهای خود ذکر کرده‌اند، ارزیابی مناسب از وجود اثر مقیاس در آن کارها صورت گیرد. از این رو برخی از پژوهش‌های تجربی که در موضوع ستون‌های سنگی اتکایی تکی مسلح و غیر مسلح وجود دارد و در ادبیات موضوع گزارش شده‌اند، در (جدول ۱) گردآوری شده است. پارامترهای

جدول ۱. مروری بر پژوهش‌های انجام شده بر روی ستون‌های سنگی

روش انجام پژوهش	مشخصات مسلح کننده	مسلح یا غیر مسلح	نسبت جایگزینی سطح (%)	مشخصات خاک بستر	مشخصات مصالح ستون	ابعاد پی (میلی متر)	ابعاد ستون (میلی متر)	مرجع
مدل فیزیکی	-	غیر مسلح	25	$Y=19 \text{ kN/m}^3$ $C_u=20 \text{ kPa}$	$Y=16 \text{ kN/m}^3$ $\Phi = 38^\circ$	$F=50$	$D=25$ $L/D=9$	رائو و همکاران (۱۹۹۲)
مدل فیزیکی	-	غیر مسلح و مسلح	42	$C_u=6 \text{ kPa}$	$Y=15 \text{ kN/m}^3$ $5\text{mm}<d<10\text{mm}$	$F=70$	$D=30$ $L/D=5,7.5, 9.33$	مالارویزی و ایلامپاروتی (۲۰۰۴)
مدل فیزیکی	$T=7.68 \text{ kN/m}$	غیر مسلح و مسلح	30,100	-	$Y=19 \text{ kN/m}^3$ $\Phi = 38^\circ$	$F=60,200$	$D=60$ $L/D=5$	شارما و همکاران (۲۰۰۴)
سانتریفیوژ	-	غیر مسلح	30,40,50	$C_u=12 \text{ kPa}$	$\Phi = 38.3^\circ, 49.1^\circ$	$F=100^*$ 60	$D=22$ $L/D=6.8$	کیم ولی (۲۰۰۵)
سه محوری	-	غیر مسلح	71	$C_u=35 \text{ kPa}$	-	$F=35$	$D=25$ $L/D=6,10$	بلک و همکاران (۲۰۰۶)
سه محوری	-	غیر مسلح	10,12	$C_u=28 \text{ kPa}$	$Y=18.9 \text{ kN/m}^3$	$F=100$	$D=32$ $L/D=120,200$	بلک و همکاران (۲۰۰۷)
مدل فیزیکی	-	غیر مسلح	5.7,10.1, 22.7	$Y=15.56 \text{ kN/m}^3$ $C_u=7,14,30 \text{ kPa}$	$Y=16 \text{ kN/m}^3$ $\Phi = 43^\circ$ $2\text{mm}<d<10\text{mm}$	$F=175,210, 315$	$D=100$ $L/D=4.5$	امیلی و گاندی (۲۰۰۷)
سه محوری	-	غیر مسلح و مسلح	100	بدون رس	$Y=15.5 \text{ kN/m}^3$ $\Phi = 36.7^\circ$	$F=70$	$D=70$ $L/D=2$	وو و هنگ (۲۰۰۸)
مدل فیزیکی	-	غیر مسلح	23.8	$Y=18.2 \text{ kN/m}^3$ $C_u=3.1 \text{ kPa}$	$Y=16.4 \text{ kN/m}^3$ $\Phi = 43^\circ$	$F=105$	$D=50$ $L/D=5$	اسحق و گیریش (۲۰۰۹)
مدل فیزیکی	$T_{\text{geotextile}}=20 \text{ kN/m}$ $T_{\text{geotextile}}$	غیر مسلح و مسلح	25,75, 100	$C_u=2.5 \text{ kPa}$	$Y=16 \text{ kN/m}^3$ $\Phi = 41.5^\circ$ $2\text{mm}<d<10\text{mm}$	$F=100$	$D=50,75,100$ $L/D=600$	

	2=6.8 kN/m Tgeogrid 1= 2.5 kN/m Tgeogrid 2=1.5kN/m							مورو کسان و راجاگویال (۲۰۱۰)
مدل فیزیکی	T ₁ = 120 kN/m T ₂ = 200 kN/m	غیر مسلح و مسلح	11	Y= 16.2 kN/m ³ C _u =5 kPa	Y= 16.2 kN/m ³ Φ = 35°	F=235	D=51 L/D=6	گنایل و بوازا (۲۰۱۰)
سه محوری	-	غیر مسلح	7,9,17.8	$\bar{\sigma}_3$.3	Y= 16.2 kN/m ³ Φ = 33°	F=75,100, 125	D=20,30 L/D=70.5,105, 140	تجار و همکاران (۲۰۱۰)
استفاده از بالشتک ماسه ای مسلح	-	غیر مسلح	25	Y= 19.8 kN/m ³ C _u =9.5 kPa	Y= 16.5 kN/m ³ Φ = 45°	F=100	D=50 L/D=6	دب و همکاران (۲۰۱۱)
مدل فیزیکی	-	غیر مسلح	5.1,10.2, 15.3,20.4	C _u =6 , 9, 12 kPa	Y= 16.3 kN/m ³	F=80,120,22	D=50 L/D=6,8	فتاح و همکاران (۲۰۱۱)
مدل فیزیکی	-	غیر مسلح	44.4, 69.4,100	C _u =35 kPa	Y= 15.5 kN/m ³	F=60	D=40,50,60 L/D=400	سیواکومار و همکاران (۲۰۱۱)
سه محوری	-	غیر مسلح	17,28,40	C _u =35 kPa	Y= 15.5 kN/m ³	F=60	D=25,32,38	بلک و همکاران (۲۰۱۱)
مدل فیزیکی	-	غیر مسلح	11.11, 6.25	$\bar{\sigma}_3$.3	Y= 16.5 kN/m ³ Φ = 41 – 53°	F=70	D=84.7,63.5 L/D=146	سیمتادا و همکاران (۲۰۱۱)
مدل فیزیکی	k ₁ = 132 kN/m k ₂ = 97.5 kN/m	غیر مسلح و مسلح	25	Y= 18.59 kN/m ³ C _u =6-6.8 kPa	Φ = 45° 1mm<d<4.75mm	F=100	D=50 L/D=11	علی و همکاران (۲۰۱۲)
مدل فیزیکی	k ₁ = 35 kN/m T ₁ = 14 kN/m K ₂ = 16.36 kN/m T ₂ = 9 kN/m	غیر مسلح و مسلح	30,40,50	Y= 19 kN/m ³ C _u =15kPa	Y= 16 kN/m ³ Φ = 46° 2mm<d<10mm	F=200	D=60,80,100 L/D=5	قضاوی و نظری افشار (۲۰۱۳)
مدل فیزیکی	k ₁ = 3.64 kN/m T ₁ = 0.26 kN/m K ₂ = 6.06 kN/m T ₂ =0.75 kN/m K ₃ = 15.13 kN/m T ₃ =7.42 kN/m	غیر مسلح و مسلح	51	C _u =1.25-1.36 kPa	Y= 16.5 kN/m ³ Φ = 36.6°_38.6°	F=70	D=50 L/D=5	هنگ و همکاران (۲۰۱۵)

۵- نتیجه گیری

شرایط واقعی را مدل سازی کنند و نیاز به آزمایش های بزرگ مقیاس احساس می شود. همچنین با توجه به بررسی تحقیقات گذشته که به برخی از آنها در این مطالعه اشاره شد، این نکته مشهود است که مطالعات عددی، آزمایشگاهی و تحلیلی زیاد و خوبی در زمینه ستونهای سنگی انجام شده است، ولی با عنایت به تعدد پارامترهای موثر در ظرفیت باربری و نشست ستونهای سنگی و بویژه در آنالیزهای عددی هنوز مباحث و سئوالات زیادی در این زمینه بدون پاسخ می باشد و تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است. از جمله آنها می توان به تاثیر طول بهینه ستون سنگی در خاکهای لایه ای، بررسی تاثیر قطر ستون سنگی در سختی بهینه ژئوستتیک، مطالعه تاثیر استفاده همزمان از ستون سنگی و بلانکتو مقایسه پارامترهای مصالح خاک و ستون سنگی در ظرفیت باربری و نشست ستونهای سنگی در حالت مسلح و غیر مسلح، بررسی عددی و پارامتری تاثیر ستونهای سنگی در کاهش پتانسیل روانگرایی و ... اشاره داشت.

تحقیقات گسترده ای بر روی ستونهای سنگی مسلح شده و نشده انجام شده است. به دلیل مزایای فراوان ستونهای سنگی مسلح شده، در سالهای اخیر عمده ی تحقیقات بر روی این گروه از ستونهای سنگی صورت گرفته است. اثر طول ستونهای سنگی، قطر آنها، آرایش گروه ستونهای سنگی، زاویه ی اصطکاک و مدول الاستیسیته ی مصالح ستون سنگی، اثر سختی پوشش ژئوستتیک، بررسی عملکرد گروه ستون سنگی که تنها تعدادی از ستونهای گروه مسلح شده، مقایسه ی میان تسلیح ستونهای سنگی با استفاده از دورپیچ ژئوستتیک و استفاده از ورقه های لایه ای از جمله مواردی است که در تحقیقات اخیر به آنها پرداخته شده است. با وجود تحقیقات گسترده اما اثر مقیاس بر رفتار آزمایش ها به ندرت مورد توجه قرار گرفته است و لازم است به طور دقیق تری مورد بررسی قرار گیرد. همچنین بسیاری از آزمایش ها به صورت کوچک مقیاس و سه محوری هستند و نمی توانند

۶- مراجع

- Keykhosropur, L., A. Soroush, and R. Imam. (2012). 3D numerical analyses of geosynthetic encased stone columns. *Geotextiles and Geomembranes* 35. 61-68.
- Keykhosropur, L., A. Soroush, and R. Imam. (2012). 3D numerical analyses of geosynthetic encased stone columns. *Geotextiles and Geomembranes* 35, 61-68.
- Raithel, Marc, and Hans-Georg Kempfert. (2000). Calculation models for dam foundations with geotextile coated sand columns. *ISRM International Symposium. OnePetro*.
- Afshar, Javad Nazari, and Mahmoud Ghazavi. (2014). Experimental studies on bearing capacity of geosynthetic reinforced stone columns." *Arabian Journal for Science and Engineering* 39.3, 1559-1571.
- Ambily, A. P. and S. R. Gandhi. (2004). Experimental and theoretical evaluation of stone column in soft clay. *ICGGE-2004*, 201-206.
- Dash, Sujit Kumar, and Mukul Chandra Bora. (2013). Improved performance of soft clay foundations using stone columns and geocell-sand mattress. *Geotextiles and Geomembranes* 41, 26-35.

- قضاوی، م، نظری افشار، ج. (۱۳۸۸). طراحی و روش های اجرای ستونهای سنگی، انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.
- ملک پور، م، ر، توفیق، م، م. (۱۳۸۶). مطالعه آزمایشگاهی اصلاح خاک های ریز دانه نرم با استفاده از ستونهای سنگی از نوع شفته آهکی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- بابازاده، م، م. (۱۳۸۹). معرفی انواع روشهای اجرایی ستونهای سنگی به عنوان روشی نوین در بهسازی خاک، همایش ملی یافته های نوین در مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.
- قضاوی، محمود و نظری افشار، جواد. (۱۳۹۱). طراحی و روش های اجرای ستونهای سنگی، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

- Babu, MR Dheerendra, Sitaram Nayak, and R. Shivashankar. (2013). A critical review of construction, analysis and behaviour of stone columns. *Geotechnical and Geological Engineering* 31.1, 1-22.

- Murugesan, S. and K. Rajagopal. (2010). Studies on the behavior of single and group of geosynthetic encased stone columns. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136.1.129-139.
- Nazari Afshar, J., and Mahmoud Ghazavi. (2014), A simple analytical method for calculation of bearing capacity of stone-column. *International Journal of Civil Engineering* 12.1, 15-25.
- Tang, Liang, et al. (2015). Numerical study on ground improvement for liquefaction mitigation using stone columns encased with geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes* 43.2. 190-195.
- Tang, Liang, et al. (2015). Numerical study on ground improvement for liquefaction mitigation using stone columns encased with geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes* 43.2.190-195.
- Van Impe, W. (1983). Improvement of settlement behaviour of soft layers by means of stone columns. *Proceedings, 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: Improvement of Ground*. Vol. 1.
- Yoo, Chungsik. (2015). Settlement behavior of embankment on geosynthetic-encased stone column installed soft ground—a numerical investigation. *Geotextiles and Geomembranes* 43.6, 484-492.
- Ghazavi, Mahmoud, and Javad Nazari Afshar. (2013). Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns. *Geotextiles and Geomembranes* 38, 26-36.
- Gniel, Joel, and Abdelmalek Bouazza. (2009). Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns. *Geotextiles and Geomembranes* 27.3, 167-175.
- Gniel, Joel, and Abdelmalek Bouazza. (2009). Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns. *Geotextiles and Geomembranes* 27.3. 167-175.
- Gniel, Joel, and Abdelmalek Bouazza. (2010). Construction of geogrid encased stone columns: A new proposal based on laboratory testing. *Geotextiles and Geomembranes* 28.1, 108-118.
- Greenwood, D. A. (1970). Mechanical improvement of soils below ground surface. *Inst Civil Engineers Proc, London/UK*.
- Hosseinpour, Iman, Mario Riccio, and Marcio SS Almeida. (2014). Numerical evaluation of a granular column reinforced by geosynthetics using encasement and laminated disks. *Geotextiles and Geomembranes* 42.4, 363-373.
- Muir Wood, D., Wenzheng Hu, and David FT Nash. (2000). Group effects in stone column foundations: model tests. *Geotechnique* 50.6, 689-698.
- Murugesan, S., and K. Rajagopal. (2006). Geosynthetic-encased stone columns: numerical evaluation." *Geotextiles and Geomembranes* 24.6, 349-358.

Geosynthetics of Stone Columns- A Review

Vahed Ghiasi, Assistant Professor, Department of Engineering, Faculty of Civil and Architecture Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

Ilia Zakavi, B.Sc., Student, Department of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

E-mail: v.ghiasi@malayeru.ac.ir

Received: June 2023- Accepted: November 2023

ABSTRACT

In recent decades, the growth of infrastructure in urban and metropolitan areas has led to a significant increase in the value of land and the lack of suitable places for development. These factors cause the construction industry to look for cheap land for construction; As a result, the building is run on the loose ground against the previous tendency. One of the methods that have been used in recent years in loose deposits and fine soils is stone columns, which are widely used to reduce subsidence and increase the soil bearing capacity of structures such as fluid storage tanks. Embankments, broad foundations, and light structures are used. The use of rock columns as a soil improvement method has been the subject of research by many researchers for the past 40 years. Numerous analytical methods, numerical analyze, and laboratory tests have been performed to investigate the effect of different soil and rock column parameters on the bearing capacity and subsidence of rock columns. One of the most significant research achievements in this field is the idea of reinforcing stone columns with geosynthetic cover, which was proposed more than 25 years ago. During this period, relations have been provided for designing these reinforced stone columns and considering the effect of geosynthetic cover. This paper presents the results of researchers' research on the effect of various parameters on the bearing capacity and subsidence of stone columns.

Keywords: Reinforced Rock Column, Geosynthetic, Load Capacity, Settlements