



بررسی رفتار ستونهای سنگی محصور شده با ژئوگرید

محمد جمالی مقدم

دانشجوی دکتری خاک و پی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

E.jamali.m@gmail.com

البرز حاجیان نیا

استادیار بخش مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

Alborzhn@yahoo.com

حسین مویدی

استادیار بخش مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی کرمانشاه

Hossein.moayedi@gmail.com

رامین ناظم

دانشجوی دکتری خاک و پی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

Ramin.nazem@yahoo.com

چکیده

از ستونهای سنگی می توان برای بهسازی بستر ضعیف قرار گرفته در زیر ساختمانهای کوتاه مرتبه و یا سازه هایی نظیر مخازن ذخیره مایعات، پایه های پل ها، و همچنین مرمت پی های کارخانه ها و خاکریزها، به منظور کاهش مقدار قابل ملاحظه نشست استفاده نمود. روش مذکور در واقع یک شیوه مقرون به صرفه جهت بهسازی خاکهای ریزدانه و خاکهای تراکم پذیر را ارائه می دهد. از طرف دیگر ستونهای سنگی اغلب به دلیل سازگاری با محیط زیست، هزینه کم، کارائی و سهولت اجرا در خاکهای ضعیف مدت های زیادی است که در سراسر جهان مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از بزرگترین معایب استفاده از ستون های سنگی در خاکهای مسئله دار و دارای مقاومت پایین آنست که چنانچه خاک مورد نظر بسیار سست باشد به دلیل غالب شدن فشار وارده از پیرامون محل متورم شدن به خاک احاطه کننده، ستون سنگی دچار گسیختگی می گردد. در سال های اخیر به منظور افزایش کارایی ستون های سنگی، از ژئوگریدها به عنوان پوشش تقویت کننده مناسب برای ستونها استفاده می گردد، زیرا این مصالح دارای مقاومت کششی بالا و قفل شدگی قابل توجهی در ساختار شبکه ای خود با مصالح ستون های سنگی هستند. عملکرد این پوشش ها به این گونه است که مصالح درشت دانه در بین شبکه های ژئوگرید محصور می شوند و با توجه به بالا بودن مقاومت کششی ژئوگریدها از گسیختگی و کمایش بیش از اندازه ستون سنگی جلوگیری به عمل می آید. مقاله حاضر به بررسی و معرفی ستون های سنگی محصور شده با ژئوگرید، مزایا، معایب، کاربردها، روش های نصب و روش های مدل سازی این تکنولوژی می پردازد.

کلمات کلیدی: ستون سنگی، ژئوگرید، خاک مسلح، ظرفیت باربری، تورم جانبی.

مقدمه

در خاکهای نرم، ساخت سازه هایی مانند ساختمان، مخازن ذخیره، انبار و موارد مشابه آن روی خاکهای ضعیف معمولاً منجر به نشست بیش از اندازه و یا مسائل پایداری خواهد شد. به منظور کاهش و یا رفع مشکلات ناشی از نشست و یا ظرفیت باربری، بهسازی خاک با ستون های سنگی ممکن است مورد توجه قرار گیرد. به علاوه به علت نفوذپذیری بسیار زیاد مصالح ستون های سنگی، نرخ تحکیم در رس های نرم افزایش می یابد. برای اولین بار در فرانسه در سال ۱۸۳۰ میلادی از ستون سنگی جهت اصلاح خاک استفاده شد. آمریکایی ها از ستون سنگی نخستین بار در سال ۱۹۷۲ در چندین پروژه به صورت محدود استفاده کردند. در اروپا از سال ۱۹۵۰ به طور وسیعی از ستون های سنگی جهت اصلاح خاک استفاده شد. به دلیل مشخص شدن ضعف عملکرد ستون سنگی غیر مسلح به دلیل رخداد انبساط جانبی ستون سنگی در خاک های نرم، از اوایل دهه ۹۰ میلادی مسلح سازی ستون سنگی توسط پوشش ژئوسنتتیکی به عنوان یکی از روشهای بهسازی مورد توجه قرار گرفت.

۱. ستون های سنگی معمولی

ابزارهای ویبره ای جهت تراکم مصالح دانه ای در میانه دهه ۱۹۳۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از این تکنیک، نسبت تخلخل مصالح دانه ای توسط ابزار ویبره کننده ای که در بازه های زمانی از پیش تعیین شده به درون زمین فرو می رود، کاهش می یابد، زیرا ویبره زدن موجب آرایش یافتن مجدد دانه ها به صورت ترکیب متراکم تر و نزدیک تر می شود. اغلب حفرات استوانه ای که پس از تراکم باقی می ماند، با مصالح دانه ای جهت سختی کردن بیشتر توده خاک، پر می شود. خصوصیات خاکهای چسبنده موجب شده که تراکم با استفاده ویبره تنها برای خاکهای این چسبندگی مناسب نباشد. به هر حال، در حین دهه ۱۹۵۰ میلادی مشخص گردید که با اضافه کردن مصالح دانه ای به حفره باقیمانده ناشی از ویبره مصالح چسبنده، یک توده خاکی سخت تر می تواند بدست آید. توده خاک ترکیبی در مقایسه با خاک بهسازی نشده دارای سختی، پایداری و رفتار نشست-زمان بهتری می باشد. برخلاف شمع های اتکایی، که بارهای وارده را از میان لایه های خاکی سست به لایه خاکی فونداسیونی صلب تری منتقل می کنند، ستون های سنگی معمولی، خصوصیات خاک سست را بهبود می بخشند. هنگامی که یک توده خاک ترکیبی بارگذاری می شود، ستون ها به علت مبادله بار بین دو نوع مصالح با توجه به سختی نسبی آنها، فاصله ستونها و اندازه ستونها، با خاک پیرامونی اندرکنش خواهند داشت. ستون های سنگی معمولی، عموماً با استفاده از شن های درشت دانه و سنگ های خرد شده که با دانسیته های مختلف متراکم می شوند، با توجه به شرایط سایت و روش نصب، ساخته می شوند. توده خاکی ترکیبی معمولاً جهت حمل بارهای نسبتاً سبک و متوسط مانند خاکریزها مناسب است.

هوگز و ویتز (۱۹۷۴) گزارش کردند که ستونهای سنگی اولین بار در سال ۱۸۳۰ توسط مهندسین ارتش فرانسه در بایون فرانسه (Bayonne) مورد استفاده قرار گرفت. ستونها روی انباشته های لجنی نرم جهت نگهداشت فونداسیون های ذوب آهن های سنگین ساخته شدند. طول ستونها ۲ متر و قطر آنها ۰٫۲ متر بوده که هر کدام ۱۰ کیلونیوتن بار را تحمل می کرده اند و با فرو بردن تیرکهایی درون زمین و پس از آن برداشتن تیرکها و پر کردن سوراخ های ایجاد شده با سنگ آهک های خرد شده، ایجاد شده اند. این تکنولوژی تا حدود سال ۱۹۳۵ هنگامی که ابزار لرزاننده (ویبره) جهت متراکم کردن مصالح دانه ای

ساخته شد، توسعه چندانی پیدا نکرد. توسعه یافتن این ابزار به جان کلر و سرزی استومان آلمانی (بارکسدال و باچوس ۱۹۸۳) نسبت داده می شود. تکنیکهای مدرن برای ساخت ستون های سنگی متراکم شده در خاکهای چسبده نرم در آلمان در دهه آخر ۱۹۵۰ و همزمان با آن در ژاپن توسعه پیدا کرد (میشل ۱۹۸۱). از آن به بعد، ستون های سنگی بصورت گسترده ای در سراسر جهان مورد استفاده قرار می گیرد.

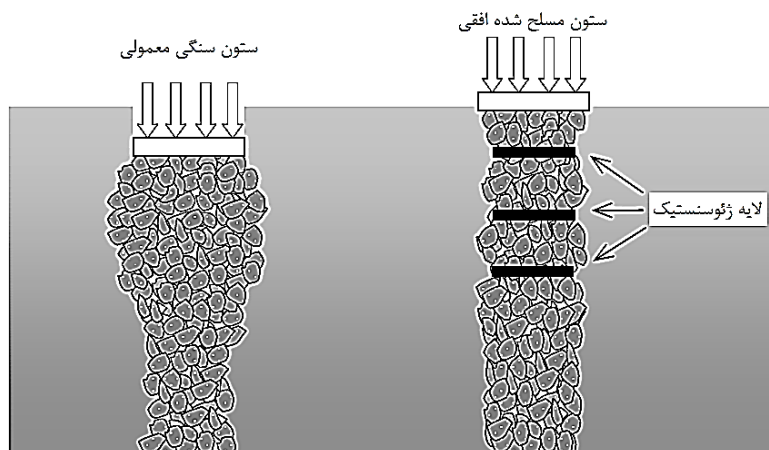
۲. روش های تسلیح کردن ستون های سنگی

تحقیق در زمینه مسلح کننده های ژئوسنسیتیک معمولا در یکی از سه زمینه زیر انجام می شود:

- مسلح کننده های ژئوسنسیتیکی ستون های سنگی با استفاده از لایه های افقی ژئوگرید قرار گرفته در بخش بالایی ستون جهت کاهش تورم
- ستون های محصور شده ژئوتکستایلی (GEC): محصورشدگی محیطی اغلب در ستون های ماسه ای با استفاده از پوشش ژئوتکستایلی
- ستونهای سنگی محصور شده با ژئوگرید: محصورشدگی محیطی ستون های سنگی با استفاده از پوشش ژئوگرید.

۳. تسلیح با استفاده از ژئوسنسیتیک در لایه های افقی

ستون های سنگی هنگامی که بارگذاری می شوند، تمایل دارند که بصورت جانبی منبسط شوند. بزرگی و موقعیت این گسترش شعاعی علاوه بر آنکه به خصوصیات فیزیکی ستون و خاک پیرامون آن بستگی دارد، با توجه به اینکه ستون سنگی بصورت مجزا عمل می کند و یا اینکه در گروه قرار دارد، مشخص می شود. اگرچه انبساط شعاعی می تواند به محصورشدگی جانبی ستون های مجاور نسبت داده شود، انبساط بیش از حد (تورم یا Bulging) می تواند به گسیختگی ستون منجر شود. آزمایش های که روی ستون های مجزا انجام شده است، نشان داده که تورم معمولا در بخش بالایی ستون، یعنی جایی که محصورشدگی جانبی کم است، اتفاق می افتد. براساس این موضوع، تحقیقاتی بر روی مصالح ژئوسنسیتیک قرار گرفته در لایه های افقی در میان بخش تورمی ستون سنگی که جهت افزایش مقاومت در برابر تغییرشکل جانبی ایجاد شده است، انجام گردیده است. این مقاومت با اندرکنش و قفل شدگی میانی بین مصالح سنگی ستون و مصالح مسلح کننده فراهم می شود. این مفهوم در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- مسلح کردن افقی ستون های سنگی.

اولین تحقیقات انجام شده بر روی مصالح دانه ای مسلح شده با ژئوسنتیک را می توان به گری و الرفائی (۱۹۸۶) نسبت داد. کارهای آنها روی مقایسه پاسخ تغییرشکل-تنش ماسه مسلح شده با لایه های پارچه و الیافهای بی نظم، متمرکز شده بود. اگرچه تحقیق آنها روی ستون های سنگی متمرکز نشده است، اما نتیجه گرفتند که مسلح کردن یک چاله سنگدانه ای در رس نرم با الیاف، می تواند ظرفیت باربری را تا حد زیادی افزایش دهد. مدهو و همکاران (۱۹۹۴) گزارش کردند که عملکرد یک ستون سنگی مجزا شده با مسلح کردن بخش بالایی ستون با لایه های افقی ژئوگرید، می تواند بهبود پیدا کند. یک سری از تست های کوچک مقیاس جهت نشان دادن افزایش ظرفیت و سختی یک ستون با افزایش تعداد لایه های مسلح کننده، انجام شد. محققین گزارش کردند که سختی ستون با بسیج شدن تنش های برشی که در سطح مشترک مصالح مسلح کننده و سنگدانه ها ایجاد می شود، افزایش می یابد. نشان داده شد که مصالح با مقاومت اصطحاک بالتر، تنش های برشی بزرگتر را ایجاد می کنند و بنابراین مقاومت بیشتری در برابر تورم فراهم می نمایند. نهایتاً این محققین یک روش تحلیلی برای ارزیابی ظرفیت باربری یک ستون مسلح شده بر اساس دیدگاه هوگز و ویتز (۱۹۷۴) را ارائه کردند.

کای و لی (۱۹۹۴) آزمایش هایی را در سلول سه محوری بزرگ (با قطر ۳۰۰ میلیمتر) با استفاده از تسلیح افقی مورد بررسی قرار دادند. یک ستون ماسه ای با قطر ۴۲٫۵ میلیمتر درون سلول سه محوری با استفاده از مش های فلزی جهت شبیه سازی تسلیح با ژئوگرید، نصب شد. ستون ماسه ای با استفاده از یک ورق دایره با نرخ ثابت جابجایی تحت بارگذاری قرار گرفت. آزمایش ها به گونه ای طراحی شده بود که سه پارامتر را مورد بررسی قرار دهد، (۱) عمق زیر پایه ورق بارگذاری تا اولین لایه از ژئوگرید (۲) فواصل قائم ژئوگرید (۳) تعداد لایه های ژئوگرید.

نتایج این تحقیق نشان داد که حداکثر ظرفیت ستون هنگامی ایجاد می شود که:

$$\frac{u_f}{(d_f - d_p)} = 0.5$$

که در آن u_f عمق زیر ورق بارگذاری تا اولین لایه از ژئوگرید، d_f قطر صفحه بارگذاری، و d_p قطر ستون است.

فاصله لایه های ژئوگرید، Δz ، هنگامی به مقدار بهینه می رسد که :

$$\frac{\Delta z}{d_p} = 0.5$$

آزمایش ها نشان داد که تعداد بهینه لایه های ژئوگرید حدود ۴ عدد بوده، که بالاتر از آن افزایش اندکی در ظرفیت ستون دیده می شود. این نتایج تطابق خوبی با آنالیزهای دیگری که با روش های عددی انجام شده بود داشتند. شرما (۱۹۹۸) یک مطالعه پارامتری از ستون های سنگی مسلح شده با ژئوگرید با استفاده از مدل المان محدود ارائه کرد که در ابتدا در مقابل آزمایش صحرایی که روی ستون سنگی مجزا انجام شده بود، صحت سنجی شد.

پس از آن لایه های افقی ژئوگرید در میان ستون مدل گردیدند. دامنه ای از مدول ژئوگرید، تعداد لایه ها و فاصله بین آنها در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفتند. بر اساس این تحقیق، شرما نتیجه گرفت که وجود لایه های ژئوگرید، انتقال موثرتر تنش های جانبی به خاک پیرامونی را تسهیل می کند. این موضوع با توزیع مجدد تغییرشکل جانبی (Redistributing) در بخش بالایی ستون قرار گرفته روی یک عمق بیشتر، تورم موضعی را محدود کرده و ظرفیت ستون را افزایش می دهد. شرما دریافت هنگامی که لایه های ژئوگرید در فواصل کمتر از حدود نصف قطر ستون قرار گیرند، ظرفیت باربری اندکی بیشتر افزایش می یابد.

شرما و همکاران (۲۰۰۴) تلاش کردند تا مدل سازی های عددی قبلی را با انجام تست های آزمایشگاهی روی ستون های سنگی تسلیح شده با لایه های افقی ژئوگرید، مورد تأیید قرار دهند. چهارده تست بارگذاری بر روی ستون های ماسه ای که با قطر ۶۰ میلیمتر در یک بستر ضخیم لایه رسی به ضخامت ۳۰۰ میلیمتر بصورت کامل نفوذ کرده اند، انجام شد. تعداد لایه های ژئوگرید و فواصل آنها در هر یک از مدل ها متفاوت بود. نتایج بررسی آزمایشگاهی بهبود ظرفیت باربری ستون های سنگی و کاهش تورم جانبی را با استفاده از لایه های ژئوگرید تأیید کرد. اگرچه مدل سازی عددی و آزمایشی مسلح سازی ژئوسنسیتیکی افقی نشاندهنده افزایش زیادی در ظرفیت ستون است، ممکن است تطابق این تکنیک با عملیات نصب در محل، مشکل باشد. این موضوع می تواند توضیحی بر کمبود اطلاعات منتشر شده در مورد استفاده از این مصالح برای پروژه های بهسازی خاک باشد.

۴. ستون های محصور شده با ژئوتکستایل (Geotextile encased columns (GECs)

ستونهای محصور شده با ژئوسنسیتیک یک نوآوری جدید می باشد، که جهت استفاده در سایتهای با خاکهای بسیار سست توسعه پیدا کرد که مقاومت های برشی زهکشی نشده کمتر از ۵ کیلوپاسکال دارند. در گذشته، شمع زنی و یا اشکال دیگری از فونداسیون های صلب جهت عبور از خاکهای اینچینی مورد استفاده قرار می گرفته است. به هر حال در بسیاری از حالتها، ستون های محصور شده با ژئوتکستایل اکنون یک راه حل اقتصادی و مفیدتر را برای نگهداشتن سازه های با بارگذاری متوسط

و سبک، فراهم کرده است. با توجه به سختی بیشتر نسبت به ستون های سنگی معمولی، ستونهای محصور شده نیازمند آن هستند که روی یک لایه صلب تر ساخته شوند و ممکن است حتی نیازمند یک لایه ژئوتکستایل مسلح شده روی سطح باشند. با بارگذاری ستون های محصور شده، تورم شعاعی موجب ایجاد نیروهایی روی ژئوتکستایل می شود. وجود محصورشدگی برای ستون های سنگی موجب افزایش سختی ستون و کاهش نشست های توده خاک ترکیبی (ترکیب ژئوتکستایل محصورکننده و ستون سنگی و خاک پیرامونی) می گردد. تاکنون این تکنیک روی تعداد از پروژه ها به منظور کاهش نشست، کاهش زمان تحکیم و افزایش پایداری مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه مفهوم این ستونها در سال ۱۹۸۰ فرمول بندی شد، اما تا این تکنیک تا حدود سال ۱۹۹۰ توسعه پیدا نکرد (هوسکر و سینستیک GmbH). این روش شامل محصور کردن یک ستون از سنگ دانه ها با پوششی ساخته شده از ژئوتکستایل می شود، که به منظور محصور کردن ستون همانند حلقه محصور کننده در آزمایش تحکیم عمل می نماید (آلکسیو و همکاران ۲۰۰۳). در حینی که ستون تحت بارگذاری قائم قرار می گیرد، بصورت شعاعی متورم شده و نیروهای محیطی کششی در میان ژئوتکستایل بسیج می شود. کرنش های محیطی در محدوده ۱ تا ۴ درصد معمولاً جهت بسیج شدن این فاکتورها مورد نیاز است (آلکسیو و همکاران ۲۰۰۵). گسترش شعاعی ژئوتکستایل و تراکم ستونها موجب مقداری نشست قائم خواهد شد. این ستونها همانند شمع هایی عمل می کنند که بار سطحی را به یک لایه صلب زیرین منتقل می نمایند. با این حال به علت گسترش شعاعی و تراکم ستون در حین بارگذاری، کوتاه شدگی محوری قابل توجهی در ستون به وقوع می پیوندد. این موضوع موجب نشست و ایجاد مقاومت ثانویه در خاک پیرامونی خواهد شد. به علاوه، خاک پیرامونی فشاری محصور کننده ای را فراهم می کند که در جهت افزایش ظرفیت ستون عمل خواهد کرد. این روش می تواند به عنوان یک تکنیک بهسازی زمین مورد توجه قرار گیرد، اگرچه خاک پیرامونی در ستونهای سنگی معمولی به این روش بهسازی نخواهد شد.

مقاومت طراحی و رفتار کرنشی وابسته به زمان ژئوتکستایل جهت طراحی فونداسیون مهم می باشد. افت ناگهانی نگهدارنده شعاعی به علت گسیختگی محصورکننده می تواند منجر به ایجاد تنش اضافی نسبت به خاک، نشست بیشتر و احتمال شرایط سرویس پذیری بیش از اندازه گردد.

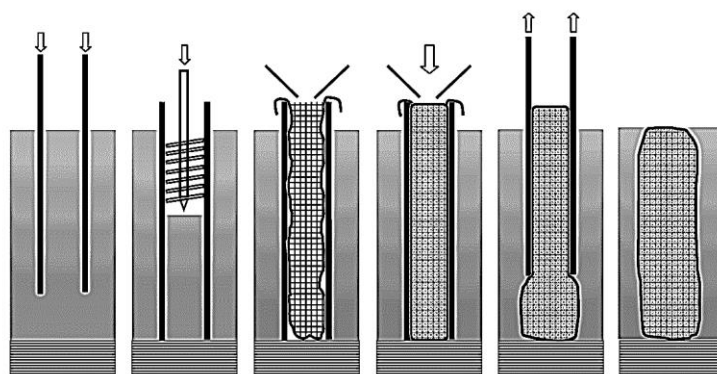
۵. روشهای نصب

تکنیک جابجایی و یا جایگزینی ممکن است جهت نصب ستون های سنگی محصور شده با ژئوتکستایل در خاکهای خیلی نرم و یا بشدت نرم می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۱.۵. روش جایگزینی

یک لوله فولادی با ضخامت جداره نازک با نوک باز (غلاف) که از نظر قطری برابر با پوشش ژئوتکستایل می باشد، از سطح زمین تا لایه فونداسیون زیرین فرو برده می شود. خاک میانی غلاف با استفاده از یک مته به بیرون استخراج می شود. سپس پوشش ژئوتکستایل داخل غلاف قرار داده شده و از سطح معمولاً ترکیبی از شن ریزدانه و ماسه حفره میانی را پر می کنند.

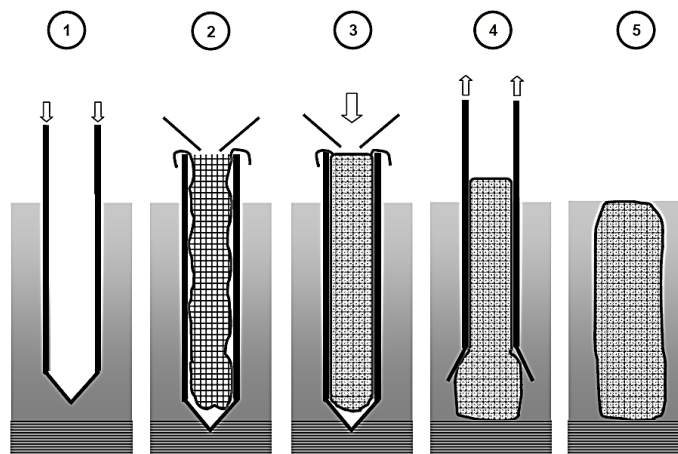
پس از آنکه حفره میانی ژئوتکستایل پر شد، غلاف فولادی از اطراف ستون محصور شده بیرون کشیده می شود. ممکن است ستون محصور شده تراکم اندکی را با لرزش غلاف در حین بیرون کشیدن تجربه کند. به محض بارگذاری، تنش های ستونی جانبی که منجر به گسترش شعاعی و کرنش ژئوتکستایل می شوند، باعث محصور شدگی ستون می گردند. روش نصب در شکل (۲) نشان داده شده است:



شکل ۲- نصب ستون های محصور شده ژئوتکستایل با استفاده از روش جایگزینی. (۱). غلاف به درون خاک نرم فرو برده می شود، تا روی لایه خاک صلب برسد. ۲. مته مارپیچ برای برای بیرون آوردن خاک نرم درون غلاف بکار برده می شود. ۳. پوشش ژئوتکستایل درون غلاف توخالی جایگذاری می شود. ۴. پوشش ژئوتکستایل با ماسه از طریق یک قیف پر می شود. ۵. غلاف فولادی از کناره های ستون ماسه ای بیرون کشیده می شود. ۶. ستون ماسه ای محصور شده ای ژئوتکستایل تکمیل شده است.)

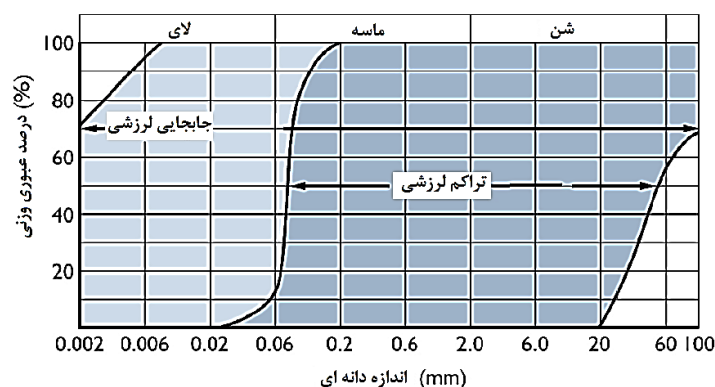
۲.۵. روش جابجایی

غلاف فولادی تا لایه فونداسیونی به سمت پایین و بره می شود. این غلاف دارای دو درپوش مکانیزه در انتهای خود است که در حین فرو رفتن درون زمین بسته نگه داشته می شود و موجب جابجایی خاک نرم پیرامونی می گردد. سپس ژئوتکستایل درون غلاف مشابه روش جایگزینی، قرار داده شده و پر می شود. در حینی که غلاف بالا کشیده می شود، درپوش انتهایی با فشار باز شده و به درپوش اجازه بالا آمدن از اطراف ستون محصور شده داده می شود. این روش نصب در شکل (۳) نشان داده شده است. روش جابجایی معمول ترین روش استفاده شده برای ساخت بوده و برای خاکهای بسیار نرم ترجیح داده می شود.



شکل ۳- نصب ستون محصور شده با ژئوتکستایل با روش جابجایی. (۱. غلاف به درون خاک نرم با درپوش بسته در نوک آن، فرو برده شده و باعث جابجایی خاک می شود. ۲. فرو بردن نوک غلاف روی لایه صلب، قرار دادن پوشش ژئوتکستایل درون غلاف توخالی. ۳. پوشش ژئوتکستایل با استفاده از یک قیف و یا روش دیگری با ماسه پر می شود. ۴. درپوش مکانیکی باز شده و غلاف از کناره های ستون بیرون کشیده می شود. ۵. ستون ماسه ای محصور شده با ژئوتکستایل تکمیل می شود).

این روش موجب ایجاد ستون های سنگی می شود که با خاک پیرامونی دارای قفل شدگی داخلی هستند. برخی از ستون های سنگی به راحتی تا ۱۵ متر با جابجایی ۱۰ تا ۳۵ درصد از خاک در محل، ایجاد می شوند (مک کلوی و همکاران ۲۰۰۴). شکل (۴) نشاندهنده آنست که چگونه تکنیک جابجایی لرزشی دامنه وسیعی از انواع خاک را در بر می گیرد.

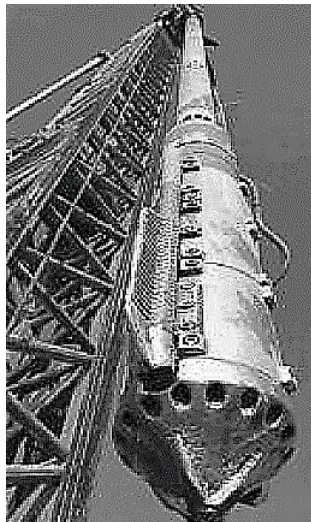


شکل ۴- دامنه انواع خاک های قابل بهسازی با تکنیک های تراکم لرزشی و جابجایی لرزشی.

۶. تجهیزات نصب

ستون تشکیل شده از سنگدانه ها با استفاده از یک ابزار لرزشی به نام ویبروفلوت (Vibroflot) (و یا در برخی مراجع پوکر و یا ویبروکت) ایجاد می شود. ویبروفلوت معمولاً به شکل اژدر می باشد که دارای قطرهایی از ۳۰۰ تا ۴۶۰ میلیمتر می باشد (بارکسداله و باچوس ۱۹۸۳، گرین وود و کیریش ۱۹۸۳) و طولی بین ۲ تا ۵ متر دارد (باومن و باثور ۱۹۷۴، مک کلوی و

سیواکومار (۲۰۰۰). تصویری از ویبروفلوت در شکل (۵) نشان داده شده است. وزنه های نصب شد در مرکز غلاف ویبروفلوت بصورت الکتریکی و یا هیدرولیکی عمل می کنند و لرزش جانبی و نیروی قائم را ایجاد می کنند.



شکل ۵- ویبروفلوت معمول.

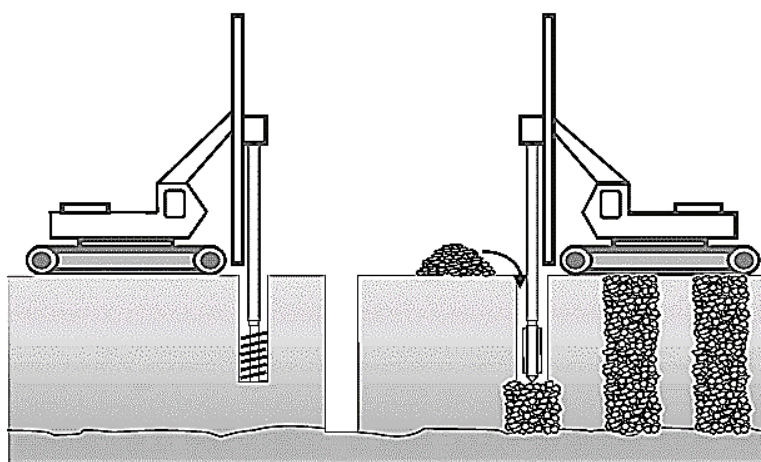
باله های نصب شده روی جداره های ویبروفلوت از چرخش در حین استفاده جلوگیری می نمایند. ویبروفلوت معمولاً از یک جرثقیل و یا ابزار طراحی شده خاص به این منظور، آویزان می شود. لوله های در بالای محور ویبروفلوت نصب می شوند تا جهت عمق های بیشتر مورد استفاده قرار گیرند.

ویبروفلوت معمولاً با فشار، نیروی جت آب و یا لرزش به درون لایه خاک نرم فشار داده می شود و یک گودال با قطر کمی بزرگتر از ویبروفلوت ایجاد می نمایند. سپس گودال ایجاد شده با دانه های سنگی پر می شود. تراکم با استفاده از ویبروفلوت در لایه های بین ۰,۳ تا ۱,۲ متر انجام می شود (بارکسدال و باچوس ۱۹۸۳). هنگامی که فشار جت آب همراه با ویبروفلوت مورد استفاده قرار می گیرد تا خاک را از میان گودال خارج نماید، این روند جایگزینی لرزشی (vibro-replacement) نامیده می شود. هنگامی که آب مورد استفاده قرار نمی گیرد، این روش به نام جابجایی لرزشی (vibro-displacement) نامیده می شود.

۷. جایگزینی لرزشی

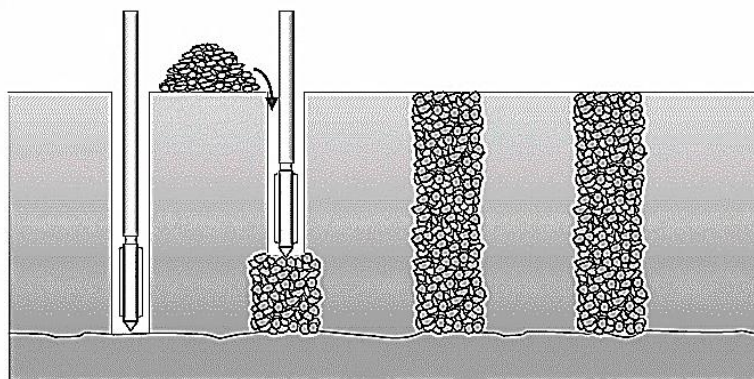
جایگزینی لرزشی و یا روش تر، شامل ایجاد یک گودال با استفاده از نیروی آب درون زمین با استفاده از ویبروفلوت تا عمق مورد نظر ستون می باشد. معمولاً جت در نوک مخروطی ویبروفلوت و در راستای طول آن قرار می گیرد. پس از رسیدن به عمق مورد نیاز، گودال ایجاد شده با ویبروفلوت تحت فشار جت آب قرار گرفته و سپس با سنگ دانه ها در لایه های مختلف پر می شود. روش جایگزینی لرزشی بهترین گزینه برای سایتهایی است که از خاکهای نرم تا سخت و با مقاومت برشی زهکشی

نشده بین ۱۵ تا ۵۰ کیلوپاسکال تشکیل شده اند و در آنها تراز آب زیرزمینی بالاست (مونفاخ و همکاران ۱۹۸۷). برای خاکهای نرم معمولا ویبروفلوت به منظور ایجاد پایداری در سراسر مراحل نصب همراه با فشار آب در پیرامون آن، درون گودال قرار می گیرد. فشار آب جهت شستن دانه های ریز در حینی که ویبروفلوت به جلو رانده می شود نیز عمل می کند. پس از آن مصالح سنگی از روی سطح به درون گودال ریخته شده و با بالا و پایین بردن ویبروفلوت در لایه های مختلف متراکم می شود. ستونهایی با قطرهای بین ۰.۵ تا ۱ متر به این ترتیب ایجاد می شوند (میشل ۱۹۸۱، مک کلوی و سیواکومار ۲۰۰۰). تکنیک های جایگزینی می تواند در سایتهای خشک نیز مورد استفاده قرار گیرد، که در این سایتهای ممکن است مته حفاری جهت حفاری گودال های ستون قبل از ویبروفلوت همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۶- روش ویبروفلوت جایگزینی.

عیب اصلی روش "تر" ایجاد حجم زیادی آب اضافه تولید شده است که ممکن است بر محیط زیست پیرامونی تاثیر داشته باشد. قوانین محیط زیستی و شرایط سایت ممکن است دفع آبی که از گودال ها بالا می آید و محتوی مقادیر زیادی خاک معلق می باشد را ممنوع نماید. حوضچه های ته نشینی، گودال ها و زهکشی روی سایت معمولا جهت کنترل جریان آب سطحی اضافی و بدست آوردن سطح لازم جهت حمل و نقل مصالح در دوره ساخت، مورد استفاده قرار می گیرد. جابجایی لرزشی و یا روش خشک معمولا از هوای فشرده از میان نوک مخروطی شکل ویبروفلوت جهت تسهیل نفوذ استفاده می نماید. این روش تمیزتر از روش جابجایی لرزشی می باشد. هنگامی که ویبروفلوت به عمق مورد نظر رسید، ویبروفلوت برداشته شده و مصالح دانه ای درون گودال ریخته شده و با پایین بردن مجدد ویبروفلوت همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده، متراکم می شود.



شکل ۷- روش جابجایی لرزشی.

این روش به علت آنکه در آن گودال حفر شده بدون حفاظ جانبی باقی می ماند و نیازمند آنست که در حین تراکم پایدار باقی بماند، بایستی در خاکهای سخت تر و با سطح آب زیرزمینی پایین مورد استفاده قرار گیرد. این روش جهت خاکهای سخت با مقاومت های زهکش نشده بین ۳۰ تا ۶۰ کیلوپاسکال مناسب است (گرین وود و کیریش ۱۹۸۳، مونفاخ و همکاران ۱۹۸۷). از آنجا که این روش یک روش جابجایی است، قطرهای ستون معمولاً کوچکتر از روش جایگزینی لرزشی بوده و قطر در حدود ۰,۴ تا ۰,۸ متر معمول می باشد (مک کلوی و سیواکومار ۲۰۰۰).

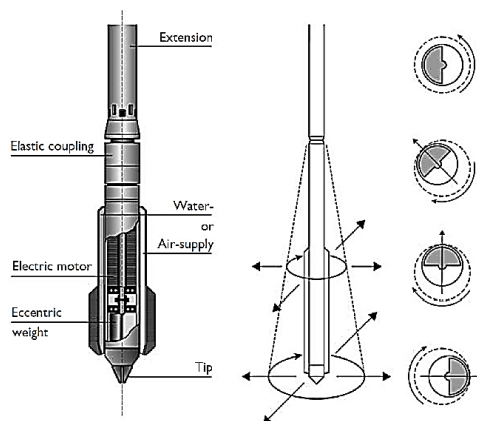
۸. پوکر

پوکرها لرزشی برای سیستم های تغذیه از پایین و بالا مورد استفاده قرار می گیرند، در واقع ویبراتوره های معلق شده از جرثقیل هستند که در بالا به آنها اشاره شد. پوکرها لرزشی قطری برابر با ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلیمتر و ارتفاع هایی از ۲ تا ۵ متر دارند. این طول می تواند با اضافه کردن لوله های گسترش تا عمق ۲۶ متری افزایش پیدا کند (سوندرمن و ویر ۲۰۰۴). این پوکرها از یک پوسته فولادی استوانه ای تشکیل شده اند که نیروهای لرزشی افقی را همانند ویبروفلوت های اشاره شده در بخش بالایی توسط یک وزنه در مرکز و بخش پایینی آن ایجاد می کنند. یک بخش انعطاف پذیر متصل شده در قسمت اتصال پوکر به لوله های گسترشی جهت جلوگیری از انتقال نیروهای لرزشی به این لوله ها مورد استفاده قرار می گیرد.

۹. سیستم خشک تغذیه از بالا

پوکر به داخل زمین فرو برده می شود، به نحوی که خاک را بصورت جانبی جابجا می کند. هوای فشرده در حین بیرون کشیدن پوکر از زمین به منظور جلوگیری از ریزش حفره ایجاد شده مورد استفاده قرار می گیرد. حجم کنترل شده ای از سنگ خردشده از روی سطح به داخل حفره ریخته می شود و پس از آن با پایین بردن مجدد پوکر، متراکم می شود. این روند

تا هنگام ایجاد یک ستون سنگی، که با خاک پیرامونی دارای قفل شدگی محکمی شود، تا سطح زمین ادامه پیدا می کند. این روش ساخت به خاکهایی که می توان در آنها یک حفره باز ایجاد کرد، محدود می شوند. شکل (۸) نشاندهنده بخش های مختلف پوکر می باشد.



شکل ۸- ویبراتور عمقی و بخش های پوکر تراکم لرزشی (ساندرمن و ویر ۲۰۰۴).

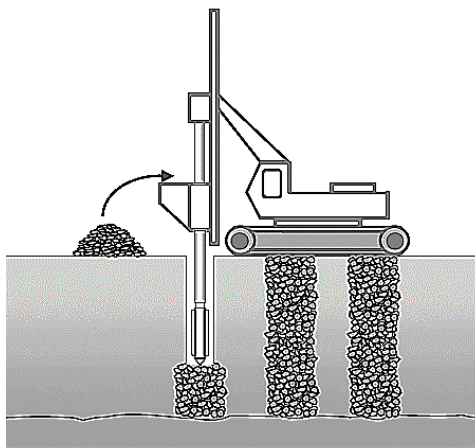
۱۰. سیستم تغذیه از بالای مرطوب

نفوذ پوکر در سیستم تغذیه از بالای مرطوب با استفاده از نیروی جت آب در نوک پوکر ایجاد می شود. نیروی جت آب دیواره حفره را نگهداشته و در حین نفوذ مصالح سست را از جای خود بیرون می آورد. مصالح بیرون رانده شده با فشار آب، از طریق فضای اطراف پوکر به بالا انتقال داده شده و درون حوضچه های ته نشینی انباشته می شوند. تجربیات صحرایی نشان می دهد که هنگامی که حجم بالایی آب برای نفوذ مورد استفاده قرار می گیرد، نسبت به فشار بالاتر نفوذ موثرتری ایجاد می شود (ساندرمن و ویر ۲۰۰۴). هنگامی که پوکر به عمق طراحی رسید، پوکر به آرامی بالا آورده شده و سنگ خرد شده از طریق مجاری اطراف پوکر به پایین ریخته می شود. سپس پوکر دوباره به پایین فرستاده می شود تا سنگها را متراکم نماید. این عمل تا هنگامی که ستون سنگی تا سطح زمین برسد، ادامه می یابد.

۱۱. روش های تغذیه از پایین

در سالهای اخیر، استفاده از روش تغذیه از پایین مرسوم شده است. لوله هایی در مجاورت و یا درون ویبروفلوت (و یا در برخی از مراجع از ویبروکت نامبرده شده که در واقع ویبروکت ماشینی توسعه یافته مخصوص است که برای سیستم تغذیه از پایین مورد استفاده قرار می گیرد) نصب می شوند که اجازه تغذیه دانه های سنگی از سطح زمین را تا نوک ویبروفلوت و در جایی که

می تواند متراکم شود می دهند. این موضوع به ویبرو فلوٹ این اجازه را می دهد که در حین نصب ستون درون گودال باقی بماند و همانطور که در شکل (۹) نشان داده شده، از ریزش جداره گودال جلوگیری شود.



شکل ۹- روش تغذیه از پایین

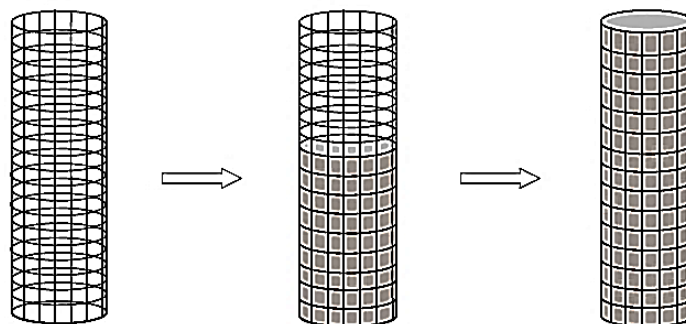
به علت آنکه نگهداری جداره در حین نصب تامین می شود، روش تغذیه از پایین می تواند در سایتهای با خاکهای بسیار نرم و با سطح آب زیرزمینی بالا مورد استفاده قرار گیرد. این تکنیک بیشتر در اروپا مورد استفاده قرار می گیرد.

۱۲. ستون های سنگی محصور شده با ژئوگرید

استفاده از ژئوتکستایل به مصالح ستونی و روش های نصب مشخصی، محدود می شود. ماسه و شن ریزدانه معمولا به عنوان مصالح پرکننده قفسه های محصور کننده انتخاب می شوند، زیرا سنگ دانه های درشت تر موجب آسیب رسیدن به ژئوتکستایل می گردند. به علاوه، به منظور کاهش پتانسیل آسیب رسیدن به محصورکننده ژئوتکستایلی، تنها تراکم اندکی در حین نصب به ستون ها اعمال می شود. نهایتا جهت بسیج شدن نیروهای پیرامونی در محصورکننده، کرنشهای پیرامونی از ۱ تا ۴ درصد مورد نیاز می باشد، که این کرنش های اولیه منجر به تورم شعاعی زیادی در حین بارگذاری ستون خواهد شد. فاکتورهای ترکیبی ذکر شده می تواند منجر به نشست های بیشتر از مقدار مطلوب در برخی از پروژه ها گردد. تحقیقاتی اخیرا به منظور مطالعه ژئوسنسیتیک های دیگری مانند ژئوگرید برای استفاده به عنوان مصالح محصور کننده انجام شده است. اگرچه ژئوگرید ممکن است مقاومت کمتری نسبت به ژئوتکستایل در برخی حالتها داشته باشد، اما ژئوگرید معمولا قوی تر بوده و ممکن است این توانایی را به ستون ها بدهد که نسبت به ژئوتکستایل، تا حد بیشتری متراکم شود. علاوه بر این، ژئوگرید معمولا نیازمند کرنش های کششی کوچکتری جهت بسیج شدن نیروهای کششی نسبت به ژئوتکستایل است که این موضوع سختی اولیه بزرگتری را فراهم می کند. این خصوصیات می تواند ساخت یک ستون با سختی افزایش یافته (هنگامی که با محصورشدگی ژئوتکستایل مقایسه می شود) را به دنبال داشته باشد. استفاده از ژئوگرید محصورکننده می تواند با سنگ دانه های درشت تر مانند سنگ خرد شده سازگار بوده و به عنوان جایگزین برای مصالحی مانند ماسه و شن ریز، به حساب آید. در سال های اخیر به منظور افزایش کارایی ستون های سنگی، از ژئوگریدها به عنوان پوشش تقویت کننده مناسب برای ستونها استفاده می گردد، زیرا این مصالح دارای مقاومت کششی بالا و قفل شدگی قابل توجهی در ساختار شبکه ای خود با مصالح

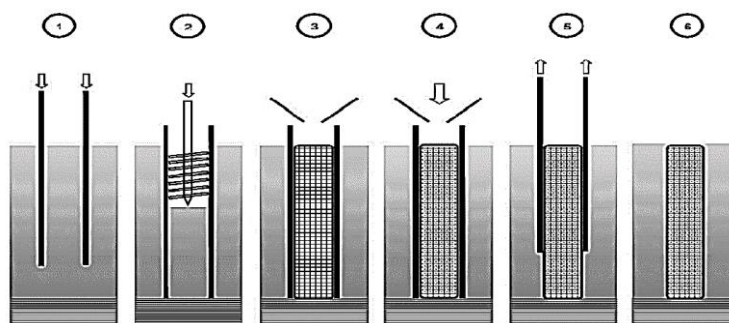
ستون های سنگی هستند. عملکرد این پوشش ها به این گونه است که مصالح درشت دانه در بین شبکه های ژئوگرید محصور می شوند و با توجه به بالا بودن مقاومت کششی ژئوگریدها از گسیختگی و کمایش بیش از اندازه ستون سنگی جلوگیری به عمل می آید.

تحقیقات استفاده از ستون های سنگی محصور شده با ژئوگرید در میانه دهه ۱۹۹۰ آغاز گردید و توسط شرکت آلمانی NAUE GmbH مورد استفاده قرار گرفت (هیرتن و ایورت ۲۰۰۴، هیرتن و همکاران ۲۰۰۴). این روش همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده، از محصور کردن یک ستون سنگی در غلافی از ژئوگرید تشکیل می شود. این روش شبیه ستون های محصور شده در ژئوتکستایل می باشد، با این تفاوت که بجای ژئوتکستایل از ژئوگرید به علت مقاوم تر بودن آن استفاده می گردد و در نتیجه آن سنگ دانه های ستون سنگی معمول می تواند به عنوان مصالح پرکننده بجای ماسه مورد استفاده قرار گیرد. برعکس ستون های سنگی محصور شده با ژئوتکستایل، ستون های سنگی محصور شده با ژئوگرید هنوز در مراحل اولیه توسعه قرار دارند، زیرا تاکنون تحقیقات کمی بر روی آنها انجام شده است.



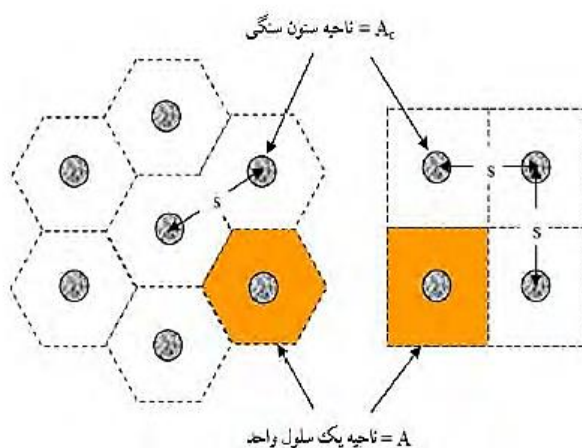
شکل ۱۰- نصب ستون محصور شده با ژئوگرید (مرحله اول غلاف ژئوگرید پیش ساخته، مرحله دوم ژئوگرید با مقداری سنگ در حین نصب پر می شود، مرحله سوم ستون سنگی محصور شده با ژئوگرید بصورت کامل).

اصول رفتاری ستون محصور شده ژئوگرید و ژئوتکستایل بسیار مشابه می باشند. هر دو سیستم از نیروهای پیرامونی تولید شده در میان مصالح ژئوسنسیتیک جهت ایجاد محصورشدگی ستون علاوه بر مقداری محصورشدگی که توسط خاک پیرامونی فراهم می شود، بهره می گیرند. به هر حال، ژئوگرید بصورت کلی سخت تر از ژئوتکستایل (به خصوص در حین بارگذاری اولیه) می باشد که موجب ایجاد پاسخ صلب تر می شود. ژئوگرید می تواند همراه با مصالح شنی و سنگی خرد شده درشت دانه، بجای ماسه مورد استفاده قرار گیرد. از طرف دیگر، به علت مقاومت بالای ژئوگرید، استفاده از نیروی تراکم بیشتر در حین نصب ممکن می شود که می تواند به یک ستون متراکم تر منجر شود (شکل ۱۱ را ببینید). در مقایسه با ستونهای محصورشده با ژئوتکستایل، تحت بارگذاری این فاکتورها ممکن است پاسخ ستونی سخت تری داشته باشد و به تکنیک منحصر به فردی برای کاربردهای آن منجر شود.



شکل ۱۱- مراحل اجرای ستون های سنگی مسلح شده با ژئوگرید.

ستون های سنگی معمولاً در پلانهای مربعی و یا مثلثی در کارگاه نصب می شوند. برای طراحی و تجزیه و تحلیل آنها، یک سلول استوانه ای از خاک ناحیه تحت تاثیر شامل ستون سنگی و خاک منطقه نفوذ مانند شکل ۱۲ در نظر گرفته می شود. مناطق تحت تاثیر برای ستون های نصب شده در پلان های مربعی و مثلثی به ترتیب به صورت ناحیه ای چهارضلعی و شش ضلعی مانند شکل ۱۲ محاسبه می شود. شعاع ناحیه تحت تاثیر مدور به ترتیب برای پلان های مربع و مثلث $0.564S$ و $0.525S$ می باشد که S در آن، فاصله مرکز به مرکز ستون های سنگی می باشد.



شکل ۱۲- طریقه نصب ستون های سنگی در پلان مربعی و مثلثی

باور و جولانی (۱۹۹۴) رفتار ستونهای سنگی غلاف دار به وسیله آزمون فشار تک محوری و سه محوری مورد مطالعه قرار دادند. ایادات و هانا (۲۰۰۵) مزایای ستونهای سنگی محصور در خاکهای فروریزشی را بررسی کردند. سپس مورگنسترن و راهاگوپال (۲۰۰۶) کارائی ستونهای سنگی معمولی و جداردار را با تحلیل های عددی مقایسه کردند. در همین تحقیق مورگنسترن و راهاگوپال (۲۰۰۶) افزایش ظرفیت بار را با استفاده از روش اجزاء محدود در تحلیل عددی ستونهای سنگی محصور شده مشاهده کرد. با توجه به شرایط اجرا روش ستون سنگی بیشتر بعنوان یک روش تجربی شناخته شده است و نیاز

به تحقیقات گسترده تر جهت پیش بینی مقاومت نهایی خاک تقویت شده با این روش، ضروری به نظر می رسد. وئو و هانگ (۲۰۰۸) رفتار تنش-کرنش محوری ستون سنگی جاسازی شده در محفظه های مهار شده انعطاف پذیر از یک روش تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند. تاندال و همکاران (۲۰۱۲)، افزایش ظرفیت بار را با حضور ژئوسنتتیک اطراف ستون سنگی و نیز تاثیر مدول الاستیسیته ژئوگریدها در رفتار مکانیکی ستون سنگی و نیز عملکرد مطلوب ستونها با قطر کمتر و نیز کاهش اضافه فشار حفره ای در خاک را بررسی نمودند. در این تحقیق با انجام آزمایش های گوناگون از نظر قطر و ارتفاع بروی نمونه های ستون ماسه متراکم و ستون سنگی دانه ای بهبود مشخصات مطلوب در زهکشی و کاهش اضافه فشار منفذی را در ستون سنگی مشاهده نمود. در این روش مطالعات تکمیلی نیز بر روی رفتار لرزه ای بصورت محدود بر روی ستونهای سنگی صورت گرفت و تغییر خصوصیات رفتار مکانیکی نیز در رفتار لرزه ای مورد بررسی قرار گرفت. قطر نمونه ها در کلیه آزمایشات ۵،۷۵ و ۱۰ سانتیمتر بودند. در تمام مراحل آزمایش استاتیکی و دینامیکی تاثیر مقاومت کششی ژئوتکستایل ها به وضوح مشاهده شد. کمپفرت (۲۰۰۳) تاثیر ژئوگرید بر افزایش ظرفیت باربری و نیز عملکرد ستونهای سنگی بعنوان زهکش های قائم مورد مطالعه قرار داد. در این تحقیق از روش جایگزینی مصالح دانه ای به روش لرزان استفاده شده و نمونه ها تحت تاثیر بار جانبی مورد آزمایش قرار گرفت و در نهایت نسبت ضریب β که معرف نسبت نشست ستون اصلاح نشده به ستون اصلاح شده میباشد را معرفی کرد. همچنین در خصوص اصلاح خاکهای آلی براساس تحقیقات خود پیشنهاد اصلاح خاک به روش تزریق چسب (دوغاب) و مصالح سنگی را داد و نتایج بسیار خوبی از افزایش مقاومت برشی خاک بدست آورد. و همچنین در خاکهای بسیار نرم بهترین پیشنهاد را معطوف به استقرار ستون سنگی مسلح شده با ژئوگرید دانست و نشان داد که رفتار ستونها در این حالت نزدیک به رفتار الاستیک خطی است. کاسترو و همکاران مطالعاتی در خصوص نشست و طول بحرانی ستون سنگی انجام دادند. در این تحقیق نمونه های مختلفی از ستون های سنگی از قطر و ارتفاع گوناگون تحت آزمایش فشار محوری قرار گرفت و تاثیر ستون سنگی در بهبود خواص مکانیکی و همچنین انقباض خاک اطراف ژئوگریدها در هنگام بارگذاری و نیز تاثیر مطلوبت محصور بودن ستون در قطر کمتر را مورد بررسی قرار دادند. Hasan Arman و همکاران (۲۰۰۹) یک مطالعه موردی در شهر Adapazari ترکیه جهت اصلاح خاک زیر یک بنای ساخته شده انجام دادند در این منطق از ترکیه به دلیل لرزه خیزی و معیار کاهش زمان وهزینه بهترین گزینه از بین تزریق شیمیایی و شمع های کوتاه، ایجاد ستون های سنگی بهترین گزینه شناخته شده است. در واقع تاثیر زهکش بودن این المان و همزمان بالا بردن خواص مقاومت برشی مطلوب ترین گزینه میباشد. و همزمان برتری این روش در استقرار آن در ساختمانهای موجود بدون صعوبت استقرار قفسه آرماتور گذاری و بتن ریزی در سایر روشهای دیگر میباشد و تنها نیاز به یک مته با بوم کوتاه در حد ارتفاع یک طبقه میباشد. سیداک و همکاران (۲۰۰۴) گزارش می کنند که ستون های محصور شده با ژئوتکستایل در از اوایل سال ۱۹۹۲ توسط شرکت پیمانکار بهسازی زمین کلر گروندبائو GmbH (Keller Grundbau GmbH) مورد استفاده قرار گرفته است. به هر حال، ستون های محصور شده جهت نگهداشتن بارگذاری قائم مورد استفاده قرار نگرفته بودند، بلکه به عنوان زهکش و جهت محافظت در برابر سیل بکار برده شده اند. تخمین زده می شود که اولین کاربرد سیستم رینگتراک (Ringtrac System) جهت بهسازی زمین در حدود سال ۱۹۹۵ بوده است که بیش از ۱۵ پروژه در سراسر آلمان، سوئد و هلند با استفاده از این تکنیک تکمیل شده است (آلکسیو و همکاران ۲۰۰۵، رایتل و همکاران ۲۰۰۵). به علاوه دی میلو و همکاران (۲۰۰۸) اولین استفاده از ستون های سنگی محصور شده را در آمریکای جنوبی گزارش کرده اند. آلکسیو و همکاران (۲۰۰۳) قطر معمول ستون های سنگی محصور شده را حدود ۰،۸ متر گزارش کرده است. ستون ها معمولاً در شبکه های مثلثی و با فاصله محوری بین ۱،۷ متر و ۲،۴ متر

نصب می شوند، که با نسبت جایگزینی بین ۱۰ تا ۲۰ درصد معادل است. رایتل و کمپفرت (۲۰۰۲) استفاده از ستونهای محصور شده با ژئوتکستایل (GEC) را برای فونداسیون یک بند خاکی قرار گرفته روی گل و لای رودخانه در رودخانه الب (Elbe) هامبورگ آلمان در سال ۲۰۰۱ را گزارش کرده است. این بند خاکی به طول ۲,۴ کیلومتر به عنوان بخشی از پروژه احیای ۱۴۰ هکتار زمین برای سایت یک کارخانه تعمیرات هواپیما، ساخته شده است. این سایت از گل و لای رودخانه ای آلوده شده با مقاومت برشی زهکشی نشده متغیر از ۰,۴ تا ۱۰ کیلوپاسکال تشکیل شده که روی یک لایه باربر به عمق ۴ تا ۱۴ متر زیر تراز سطح قرار گرفته است. حدود شصت هزار GEC با استفاده از روش جابجایی لرزشی به منظور انتقال بار به لایه باربر نصب شد. عملیات با استفاده از اسکله های دریایی شناور که مستقیماً روی خاک نرم قرار گرفته اند، انجام شد. ستونها با نسبتهای جایگزینی متغیر بین ۱۰ و ۲۰ درصد نصب شدند. ارتفاع بند خاکی تا حداکثر ۷ متر در یک دوره نه ماه انجام شد. حداکثر نشست در زیر بند خاکی حدود ۱,۲ متر بوده که با نسبت بهسازی بین ۲,۵ و ۴ متناظر است. مشاهده شد که این تکنیک تا حد زیادی مقاومت برشی زهکشی نشده گل و لای رودخانه را افزایش داد. نودز (۲۰۰۲) استفاده از GEC ها را برای محدود کردن نشست در طول مقطعی از خاکریز بخشی از راه آهن پرسرعت آنتورپ به آمستردام را گزارش کرده است.

۱۳. رفتار ستون مجزا

هنگامی که بارگذاری انجام می شود، به ستون سنگی به سمت پایین نیرو وارد می شود، که موجب ایجاد تنش های برشی در سطح بین ستون و خاک طبیعی پیرامون آن می گردد. این موضوع منجر به از بین رفتن بار با افزایش عمق شده و بارهای بزرگتری در بخش بالایی ستون اعمال می گردد. هنگامی که فشار پیرامونی و سختی خاک طبیعی جهت نگهداشت بار کافی نباشد، خاک میانی ستون دچار گسیختگی برشی شده و منجر به برآمدگی و تورم (Bulging) ستون می شود. این تورم می تواند به حالت تعادل پلاستیک رسیده و ضرورتاً منجر به گسیختگی ستون نشود (گوگر ۱۹۸۳).

۱۴. رفتار گروه ستون

با فرض آنکه خاک بهسازی شده با ستون سنگی با استفاده از یک فونداسیون نسبتاً صلب بارگذاری شده و ستونها روی یک لایه صلب قرار گرفته اند، نیروهای بارگذاری روی ستون سنگی و خاک پیرامونی با مقادیر یکسانی اعمال می شوند. از آنجا که سنگ در مقایسه با خاک طبیعی نسبتاً غیرقابل تراکم است، ستون سنگی به علت پاسخ به کوتاه شدگی محوری، بصورت شعاعی در خاک پیرامون توسعه پیدا می کند. همچنین خاک در نتیجه کوتاه شدگی ستون مجبور به تغییر حجم خواهد داد. اگرچه با توسعه یافتن شعاعی ستونهای مجاور، محصورشدگی بیشتری ایجاد می شود، اما این گسترش یافتن ممکن است در بخش بالایی ستون سنگی، جایی که فشار محصورکننده جانبی و سختی خاک پیرامونی کمتر است، بزرگتر باشد. در حین بارگذاری، تنش قائم بصورت پیوسته بین ستون و خاک طبیعی به نسبت سختی نسبی هر یک از مصالح، منتقل می شود. به علت عملکرد تحکیم، محصورشدگی و سختی خاک تا ایجاد تعادل بین ستون و خاک اطراف آن، افزایش می یابد.

مشکل اساسی در ستونهای سنگی گسیختگی این ستونها تحت بارگذاری می باشد. بارکسدل و باچوس (۱۹۸۳) سه نوع گسیختگی را تعریف کردند که ممکن است در ستون سنگی به وقوع بپیوندد که شامل، گسیختگی تورمی، گسیختگی برشی و گسیختگی پانچینگ می باشند. مکانیزم گسیختگی تورمی توسط گرین وود (۱۹۷۰)، وسیک (۱۹۷۲)، هوگز و ویتس (۱۹۷۴)،

داتی و ناگاراچو(۱۹۷۵) و مدهاو و همکاران(۱۹۷۹) توصیف شده است. مکانیزم گسیختگی برشی توسط مدهاو و ویتکار(۱۹۷۸)، ونگ (۱۹۷۵) و بارکسدال و باچوس(۱۹۸۳) توصیف شده است. مکانیزم گسیختگی پانچینگ توسط آبوشی و همکاران(۱۹۷۹) مورد بررسی قرار گرفته است. بواسیدا و همکاران (۱۹۹۵) یک روش طراحی جدید را با استفاده از یک روش مرز پایین از میان چارچوب تئوری طراحی تسلیمی برای تعیین ظرفیت باربری ستون های سنگی با در نظر گرفتن اثرات سه بعدی ستون های سنگی و خاک محل، پیشنهاد کردند. لی و پاند (۱۹۹۸) یک مدلسازی عددی را با استفاده از تکنیک همگن سازی ارائه نمودند. عبدالکریم و بوهان (۲۰۰۷) یک روش جدید برای پیش بینی نشست یک فونداسیون روی ستون سنگی مسلح کننده خاک با استفاده از روش همگن سازی الاستوپلاستیک ارائه کردند. دب(۲۰۰۸) و دب و همکاران (۲۰۰۸) یک مدل مکانیکی برای پیش بینی رفتار خاک مسلح شده با ستون های سنگی را ارائه کردند. در مطالعات آنها، ستونهای سنگی، لایه خاک دانه ای و خاک نرم به ترتیب با استفاده از فنرهای وینکلر، لایه برشی پاسترناک و کلون-وویگت ایده آل سازی شد. دب و همکاران (۲۰۱۱) یک سری تست های آزمایشگاهی را به منظور بررسی تاثیر مسلح کردن بستر ماسه ای قرار گرفته روی ستون های سنگی، انجام دادند. وود و همکاران (۲۰۰۰) یک سری آزمایشهای مدل روی بستر رسی مسلح شده با گروه ستون سنگی به منظور مطالعه تاثیر مسلح کردن بستر رسی بر رفتار تغییرشکلی گروه ستون تحت بارگذاری، انجام دادند. آمبیلی و همکاران (۲۰۰۷) یک سری از آزمایش ها را به منظور مطالعه رفتار گروه ستون سنگی و ستون سنگی تکی انجام دادند. آنها پارامترهایی مانند فاصله بین ستونهای سنگی، مقاومت برشی رس نرم قرار گرفته روی ستون به قطر ۱۰۰ میلیمتر که توسط رس نرم محصور شده است را با مقاومت برشی زهکشی نشده مختلف، مورد بررسی قرار دادند. در خاکهای خیلی نرم، ستون های سنگی غیرمسلح ممکن است بارهای زیادی را به علت محصورکنندگی جانبی پایین، نتواند تحمل نمایند. محصورشدگی، موجب افزایش ظرفیت باربری، افزایش سختی، و کاهش تورم جانبی ستونهای سنگی حتی در خاک خیلی نرم می شود. وان ایمپه (۱۹۸۹) ایده محصور شدن ستون های سنگی را با محصور کردن ستون سنگی با ژئوتکستایل پیشنهاد کرد. موروگسان و راجاگوپال (۲۰۰۶) و لو و همکاران (۲۰۱۰) عملکرد ستونهای سنگی محصور شده قائم با ژئوسنسستیک (Vertical Encased Stone Columns (VESC)) را با استفاده از مدل سازی عددی مورد مطالعه قرار دادند. با استفاده از مفهوم سلول واحد، پالکو و همکاران (۲۰۱۱) یک روش تحلیلی را برای آنالیزهای زمین مسلح شده با ستون های سنگی غیرمسلح و ستونهای سنگی محصور شده قائم، ارائه کردند. موروگسان و راجاگوپال(۲۰۱۰) یک سری آزمایش های بارگذاری روی ستون های سنگی تکی و گروهی که با استفاده از روش جابجایی نصب شده بودند و همراه با محصور شدگی ژئوسنسستیک های مختلف و بدون آن، انجام دادند. نتایج آزمایش های بارگذاری نشان دهنده اثر مثبت محصورشدگی روی افزایش ظرفیت باربری ستون های سنگی محصور شده قائم می باشد. گنیل و بوآزا (۲۰۱۰) تستهای آزمایشگاهی را به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی جدیدی برای ساخت محصورکننده با استفاده از آزمایش فشاری و ژئوگریدهای مختلف و ستون سنگی سنگدانه ای انجام دادند. سیواکومار و همکاران (۲۰۰۴)، کارآمدی محصورشدگی را با انجام یک سری آزمایش های سه محوری روی ستون های ماسه ای مدل در رس با استفاده محصور کننده قائم و بدون آن با نرخ عمق نفوذ مختلف ستون ها درون رس، مورد بررسی قرار دادند. وو و هونگ (۲۰۰۹) یک رابطه برای پیش بینی رفتار تنش-کرنش محوری ستون های دانه ای محصور شده را ارائه کردند و صحت این رابطه را با نتایج آزمایش سه محوری تجربی روی یک نمونه ماسه ای مسلح شده، تأیید کردند. گنیل و بوآزا(۲۰۰۸) و وو و همکاران (۲۰۰۹) تاثیر محصورشدگی را روی ستون های دانه ای با استفاده از انجام آزمایش سه محوری مورد مطالعه قرار دادند و افزایش مقاومت و سختی ستون های دانه ای را به علت افزایش فشار پیرامونی و همه جانبه

به علت تسلیح محصورکنندگی، مشاهده کردند. مطالعات عددی و آزمایشگاهی قابل توجهی در زمینه تاثیر مسلح سازی بی واسطه و قائم ستون های سنگی توسط ژئوسنسستیکها بر عملکرد ستون سنگی از لحاظ ظرفیت باربری، کمانش جانبی، بررسی نشست ستونهای سنگی و همچنین مقایسه با رفتار ستون سنگی غیر مسلح انجام شده است.

در سال ۲۰۰۴ مالارویژی و ایلامپارودی عملکرد خاک بهسازی شده توسط ستون سنگی را با استفاده از نتایج آزمایشات کوچک مقیاس بر روی ستون سنگی مسلح متکی بر ظرفیت باربری انتهایی و ستون سنگی شناور، گزارش کردند. آن ها نشان دادند که مسلح سازی ستون سنگی تا ۳ برابر موجب بهبود بسترهایی می شود که در آنها ستون سنگی غیر مسلح بکار رفته است.

در سال ۲۰۰۷ میلادی مجدداً تحقیقی شامل مدل سازی عددی و آزمایشی کوچک مقیاس توسط مالارویژی و ایلامپارودی انجام شد. که شامل نمونه ۳۰۰ میلیمتری از ستون سنگی تمام مسلحی بود که بارگذاری آن توسط یک پی کوچک بر ستون سنگی منفرد اعمال می گردید. نتایج این آزمایشات نشان داد که نشست ستون سنگی به طور قابل توجهی با افزایش سختی ژئوگرید کاهش می یابد. همچنین مطالعات و آزمایشات موروگسان و راجاگاپول (۲۰۰۶) و (۲۰۰۷) وو و هونگ (۲۰۰۹) و همچنین لو و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که استفاده از پوشش ژئوسنسستیکی موجب کاربرد گسترده ستون های سنگی در شرایط مواجهه با خاک های خیلی نرم می شود. مادهاو و همکاران (۱۹۹۴)، شارما و همکاران (۲۰۰۴) وو و هونگ (۲۰۰۸) (با انجام آزمایشات مختلف به این نتیجه رسیدند که بکارگیری لایه های افقی، مسلح کننده ژئوگریدی، می توانند افزایش ظرفیت باربری و کاهش کمانش جانبی در ستون های سنگی را موجب شوند. رفیعی و آقابرانی (۱۳۹۰) با بررسی اثر تسلیح بهینه رویه ماسه ای توسط ژئوگرید بر رفتار بستر رسی و کمانش جانبی ستون سنگی با انجام آزمایش های سه محوری به این نتیجه رسیدند که بواسطه اجرای رویه ماسه ای بهبود قابل توجهی در ظرفیت باربری مشاهده می شود. به علاوه ضمن آنکه عمق کمانش جانبی ایجاد شده در ستون سنگی افزایش می یابد، از میزان آن در عمق ستون سنگی نیز کاسته می شود. همچنین با حفظ مشخصات مصالح بکار رفته در آزمایش، بهینه ترین حالت عرض ژئوگرید در رویه، سه برابر قطر پی بدست آمده است. از طرف دیگر آنها نتیجه گرفتند که وجود ژئوگرید در رویه موجب افزایش قابل توجه ظرفیت باربری و کاهش نشست ها می گردد تا جایی که در مقایسه با بستر رسی نرم غیرمسلح میزان بهبود مشاهده شده در ظرفیت باربری به ترتیب ۶۹، ۱۴۱ و ۲۳۳ درصد و در نشست معادل ۲۰ درصد قطر پی مشاهده می شود. همچنین بیشترین کمانش جانبی در اعماق ۱،۲، ۲،۲ و ۲،۹ برابر قطر ستون سنگی تکی و به ترتیب در بهسازی خاک توسط ستون سنگی تکی، ترکیب ستون سنگی و رویه ماسه ای غیرمسلح و همچنین ترکیب ستون سنگی و رویه ماسه ای مسلح شده انجام می شود، به وقوع می پیوندد.

۱-۱-۱۵. کاربرد روش های اجزاء محدود در تحلیل ستون های سنگی

روش های عددی تقریباً قویترین دیدگاه های تئوریکی را جهت مدل سازی زمین های مسلح شده با ستون های سنگی فراهم می کنند، زیرا قابلیت مدل سازی خاک و هندسه آنرا بصورت واقعی بیشتر از بقیه تکنیک ها دارند. روش های عددی می توانند رفتار غیرخطی بودن، مصالح الاستیک-پلاستیک، اندرکنش خاک، هندسه پیچیده و لغزش سطوح مشترک را در نظر بگیرند. به علاوه، با پیشرفتهایی در نرم افزارهای تخصصی مانند پلاکسیس (PLAXIS) و فلک (FLAC) مسائل سه بعدی و دو بعدی، متقارن محوری و کرنش صفحه ای را می توان مدل کرد. اولین کارهای مدل سازی بهسازی زمین با ستون های سنگی با استفاده از روش های اجزای محدود در دانشگاه سیدنی در دهه ۱۹۷۰ انجام شد. بالام و همکاران (۱۹۷۷) با استفاده از روش های اجزای محدود و تفاضل محدود جهت مدل سازی ستون های شناور و با نفوذکامل در زیر یک فونداسیون انعطاف پذیر در

مصالح الاستیک و مصالح الاستوپلاستیک استفاده کردند. این راه حل ها از آنالیزهای سلول واحد ساده سازی شده بجای ارزیابی سه بعدی که کاملاً پیچیده تر می باشد، بدست آمد. آنها نتیجه گرفتند هنگامی که نسبت فاصله ستون به قطر ستون بزرگتر از ۵ باشد، کاهش نشست در مقایسه با زمین بهسازی نشده قابل چشم پوشی است. همچنین در نتایج آنها تفاوت در کاهش نشست بین مدل های الاستیک و پلاستیک کمتر از ۶ درصد بود. این محققین نشان دادند که با کاهش فاصله بین ستون ها، افزایش قابل توجهی در نرخ تحکیم ایجاد می شود. در نهایت یک سری از نمودارهای طراحی برای پیش بینی کاهش نشست و نرخ تحکیم ارائه کردند.

بالام و بوکر (۱۹۸۱) از سلول واحد ایده آل سازی شده برای بررسی بزرگی و نرخ نشست در شبیه سازی گروهی از ستون های سنگی با نفوذ کامل در زیر یک فونداسیون صلب گسترده استفاده کردند. آنها رفتار بار-نشست را از طریق انتقال از حالت زهکشی نشده به حالت زهکشی شده مدل کردند. همچنین این محققین نشان دادند که ساده سازی سلول واحد از سطح پلازی شش گوشه و یا مربعی به سطح دایره ای معادل، خطاهای اندکی را ایجاد می نماید. یک راه حل تحلیلی برای تخمین کاهش نشست ستون سنگی و نیروهای برشی و لنگرهای خمشی عمل کننده روی فونداسیون گسترده صلب توسط ایشان ارائه شد.

بالام و پولوس (۱۹۸۳) نتایج آنالیزهای اجزای محدود الاستیک را با بقیه روش های طراحی موجود در آن زمان، شامل روش گرین وود و پریب، مقایسه کردند. کارهای آنها نشان داد که نتایج بین روش های طراحی تا حد زیادی اختلاف داشته و با هم متفاوت است. با این حال نتایج عددی آنها برای نسبتهای پایین مدولار (قیاسی)، نزدیکی زیادی با روش طراحی تحلیلی توسعه داده شده توسط پریب (۱۹۷۶) داشت. مقایسه نتایج عددی آنها با تست آزمایشگاهی نزدیکی زیادی را نشان داد.

بالام و بوکر (۱۹۸۵) روشی تحلیلی به نام آنالیز اندرکنش، را با استفاده از تئوری قبلی الاستیک خطی توسعه دادند بطوریکه تغییرشکل پلاستیک بالای ستون تحت تنش های بالا را در نظر بگیرد. این روش بر اساس آنالیزهای اجزای محدود الاستو-پلاستیک بود. این روش برای نشان دادن این موضوع استفاده شد که با این روش ستون های سنگی در فاصله ۲٫۵ متری نسبت به نمودارهای تجربی گرین وود برای رس نرم، موثرتر هستند. همچنین این روش نشان داد که تفاوت در خطای بین مدل های الاستیک و پلاستیک هنگامی که فاصله ستون کم بوده و نسبت مدولار بین ستون و خاک بالاست، بسیار زیاد خواهد بود. نتایج آنها بصورت یک سری فاکتورهای تصحیح برای روش های الاستیک موجود با نسبت های مدولار در دامنه بین ۱۰ تا ۴۰، ارائه شد.

هان و یی (۲۰۰۱) از مدل سازی عددی برای تولید یک روش ساده شده برای ارزیابی بهبود نرخ تحکیم ناشی از استفاده ستون های سنگی، استفاده کردند. پالکو و ماجس (۲۰۰۵) کار بالام و بوکر را جهت در نظر گرفتن گسیختگی محصور شده مصالح ستون بر اساس تئوری اتساع، توسعه دادند. کار آنها فاکتورهایی مانند طول ستون و فاصله آنها، حالت تنش اولیه، بار اعمال شده، خصوصیات مصالح را در نظر داشت و نتایج نزدیکی زیادی با آنالیزهای اجزای محدود الاستو پلاستیک داشتند. تان و او (۲۰۰۵) و تان و همکاران (۲۰۰۸) روش هایی را برای تبدیل کردن مدل های اجزای محدود با تقارن محوری به مدل های کرنش صفحه ای را ایجاد کردند. کارهای آنها روی تنش های ستون مدل شده حقیقی، کاهش نشست و نرخ کرنش برای حالت کرنش مسطح متمرکز شده بود و راهنمایی عملی را برای مدل سازی مسائل ستون سنگی معمول فراهم می کرد. بسیاری از

محققین دیگر نتایجی از مدل سازی های عددی که نزدیکی زیادی با نتایج گزارش شده از تست های آزمایشگاهی، تست های بزرگ مقیاس و مطالعات موردی را دارند، ارائه کرده اند. با این حال، مدل سازی عددی می تواند زمانبر بوده و نیازمند یک مهندس با تجربه جهت ارزیابی داشته باشد. حتی با وجود پیشرفتهای در نرم افزار های تخصصی و ساده شده که جهت کاهش در زمان نصب و محاسبات ایجاد شده اند، اکثر پروژه ها تمایلی به استفاده از این روش ها در مرحله طراحی اولیه ندارند. روش های دیگری که جهت تخمین کاهش نشست برای زمین بهسازی شده با ستون سنگی مورد استفاده قرار گرفته شامل روش دی بیر-وان ایمپه (۱۹۸۳) می باشد. گام های اولیه در این تکنیک شبیه روش پریب (۱۹۷۶) می باشد. جهت مدل سازی ستون های سنگی و رفتار الاستیک و تطابق با خاک پیرامون، رفتار پلاستیک صلب مورد استفاده قرار گرفت. مسئله در دو بعد در نظر گرفته شد (کرنش صفحه ای)، بطوریکه ستون های سنگی با یک دیوار سنگی معادل جایگزین شدند. روشی برای آنالیز کاهش نشست با استفاده از یک حلقه خاک پیرامونی پلاستیک در اطراف ستون سنگی، به جای نظریه های الاستیک ساده تر، توسط والایس و همکاران (۱۹۸۳) ارائه گردید. اگرچه این دیدگاه ممکن است یک پاسخ خاکی واقعی تر را، بخصوص برای شرایط تنش بالاتر، در نظر بگیرد. گوگنر و بایوک (۱۹۷۹) و گوگنر (۱۹۸۳) از روش افزایشی جهت فراهم کردن یک راه حل تحلیلی جهت ارزیابی نشست ستون گروهی استفاده کردند. برای این تکنیک، مدل سلول واحد در اتصال با راه حل الاستیک-پلاستیک افزایشی و تکراری با فرضیات مشابه پریب (۱۹۷۶) در نظر گرفته شد. سلول واحد به دو المان افقی کوچک تقسیم شد و کرنش های قائم و تنش های عمل کننده روی هر المان محاسبه گردید. فرض شد که هیچ تنش برشی در طول سطح مشترک بین ستون سنگی و خاک پیرامونی عمل نمی کند، بنابراین تنش های افقی و قائم عمل کننده روی سلول، تنش های اصلی بودند. هر دو پاسخ الاستیک و پلاستیک در نظر گرفته شد. در صورتی که کرنش ها و تنش ها کوچک بودند، سپس ستون سنگی بصورت الاستیک رفتار می کرد. با این حال، برای اکثر حالتها ستون متورم می شد و در بیشتر طول آن بصورت پلاستیک رفتار می کرد. اگرچه محاسبات پیچیده و نیازمند تکرارهای فراوان بود، گوگنر (۱۹۸۳) تعدادی راه برای بهبود چارت های طراحی و ساده سازی آن ارائه کرد.

۱۶. نتیجه گیری

در این مقاله به معرفی ستون های سنگی محصور شده با ژئوگرید، روش های نصب، مزایا، معایب و کاربردهای آنها پرداخته شده است. نتایج حاصل از این بررسی به صورت خلاصه در زیر آورده شده است.

- محصور کردن ستون سنگی با طول محصورشدگی کامل مناسب می تواند ظرفیت باربری خاکهای سست را تا چندین برابر نسبت به ستون سنگی معمولی افزایش دهد.
- محصورشدگی با ژئوگریدهای دارای سختی بالاتر، فشار محصورشدگی بالاتری را نسبت به ستون سنگی به علت ایجاد نیروی کششی حلقه ای بالاتر، ایجاد می کند.
- برای یک محصورشدگی با سختی معین، ظرفیت باربری با افزایش طول محصورشدگی، بهبود می یابد.
- تاثیر سختی محصورکننده هنگامی که طول محصورکننده بسیار کم است، قابل چشم پوشی می باشد. به هر حال، هرچه طول محصورکننده افزایش یابد، محصورشدگی ایجاد شده با سختی بالاتر، نتایج بهتری ایجاد کرده و این موضوع برای طول کامل محصورکننده مشخص تر است.



مراجع

- Wu, C.S., Hong, Y.S., 2009. Laboratory tests on geosynthetic-encapsulated sand columns.
- Abdelkrim, M., De Buhan, P., 2007. An elastoplastic homogenization procedure for predicting the settlement of a foundation on a soil reinforced by columns. *European Journal of Mechanics A/Solids* 26, 736-757.
- Aboshi, H., Ichimoto, E., Harada, K., Emoki, M., 1979. The composition of a method to improve the characteristics of soft clays by inclusion of large diameter sand
- Abusharar SW, Han J (2011) Two-dimensional deep-seated slope stability analysis of embankments over stone column-improved soft clay. *Engineering Geology* 120(1-4): 103-110. 10.1016/j.enggeo.2011.04.002.
- Adalier K, Elgamal A, Meneses J, Baez IJ (2003). Stone columns as liquefaction
- Alexiew D (2009), foundation of a Coal/Coke Stockyard on Soft Soil with Geotextile Encased Columns and Horizontal Reinforcement, *GEOtechniek – Special 17th ICSMGE*, pp 16-17.
- Alexiew, D., Brokemper, D. and Lothspeich, S. (2005) "Geotextile Encased Columns (GEC): load
- Al-Joulani N (1995) Laboratory and analytical investigation of sleeve reinforced stone columns. *Laboratory and Analytical Investigation of Sleeve Reinforced Stone Columns*.
- Ambily AP, Gandhi SR (2007) Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133(4): 405-415. 10.1061/(asce)1090-0241(2007)133:4(405).
- Ambily, A.P., Gandhi, S.R., 2007. Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE* 133 (4), 405-415.
- Araujo G, Palmeira E, Cunha R (2009) Behaviour of geosynthetic-encased granular columns in porous collapsible soil. *Geosynthetics International* 16(6): 433-451.
- Araujo G., Palmeira M., and Cunha R (2009), behaviour of Geosynthetic-Encased Granular Columns in Porous Collapsible Soil, *Geosynthetics International*, 16(6), pp 433-451.
- Arman H, Ozcan Z, Onalp A, Aydan O (1997). Three dimensional assessment of liquefaction susceptibility of Adapazari region, Turkey. 8th International conference on soil dynamics and earthquake engineering, SDEE'97, extended abstract, held at Istanbul, Turkey, pp. 136-137.
- Ayadat T, Hanna AM (2005) Encapsulated stone columns as a soil improvement technique for collapsible soil. *Ground Improvement* 9(4): 137-147.
- Ayadat, T. and Hanna, A.M., (2005), "Encapsulated stone columns as a soil improvement technique for collapsible soil," *Ground Improvement*. 9 (4), 137-147.
- Balaam, N. P. and Poulos, H. G., (1983), "The behavior of foundation supported by clay stabilized by stone columns Proc," of 85th ECSMFE, 1.
- Barksdale RD, Bachus RC (1983) Design and Construction of Stone Columns Volume I.
- Barksdale, R.D., Bachus, R.C., 1983. Design and Construction of Stone Column. Report No. FHWA/RD-83/026. National Technical Information Service, Springfield, Virginia.
- Bauer GE, Al-Joulani N (1994) Strengthening of marginal soils by confined stone columns. *Proceedings of the 7th International Cold Regions Engineering Specialty Conference*: 97-117.
- Bergado, D. T. and Singh, N. and Sim, S. H. and Panichayatum, B. and Sampaco, C. L. and Balasubramaniam, A. S., (1990), "Improvement of soft Bangkok clay using vertical geotextile band drains compared with granular piles," *Geotextiles and Geomembranes*. 9 (3), 203-231.
- Black JA, Sivakumar V, Bell A (2011) The settlement performance of stone column foundations. *Geotechnique* 61(11): 909-922. 10.1680/geot.9.P.014.
- Bouassida, M., De Buhan, P., Dormieux, L., 1995. Bearing capacity of a foundation resting on a soil reinforced by a group of columns. *Geotechnique* 45 (1), 25-34.



- capacity, geotextile selection and pre-design graphs”, GSP 131 Contemporary Issues in Foundation
- Castro J, Cimentada A, da Costa A, Canizal J, Sagasetta C (2013) Consolidation and deformation around stone columns: Comparison of theoretical and laboratory results. Computers and Geotechnics 49: 326-337. 10.1016/j.compgeo.2012.09.004.
- columns. In: Proceedings of International Conference on Soil Reinforcement, E.N.P.C, 1, Paris, pp. 211e216.
- Cooper MR, Rose AN (1999) Stone column support for an embankment on deep alluvial soils. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering 137(1): 15-25.
- countermeasure in non-plastic silty soils. J. Soil Dyn. Earthquake Eng. 23(7): 571-584.
- Datye, K.R., Nagaraju, S.S., 1975. Installation and testing of rammed stone columns. In: Proceedings of IGS Specialty Session, 5th Asian Regional Conference on Soil
- Deb, K., 2008. Modeling of granular bed-stone column-improved soft soil. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 32, 1267e1288.
- Deb, K., Chandra, S., Basudhar, P.K., 2008. Response of multilayer geosynthetic reinforced bed resting on soft soil with stone columns. Computers and Geotechnics 35, 323e330.
- Deb, K., Samadhiya, N.K., Babasaheb Namdeo, J., 2011. Laboratory model studies on unreinforced and geogrid-reinforced sand bed over stone column-improved soft clay. Geotextiles and Geomembranes 29 (2), 190e196.
- Gniel J, Bouazza A (2008). Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns. Geotextiles Geomembranes. 27: 167-175
- Gniel J, Bouazza A (2009) Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns. Geotextiles and Geomembranes 27(3): 167-175.
- Gniel, J. and Bouazza, A., (2009), “Improvement of soft soils using Geogrid encased stone columns,” Geotextiles and Geomembranes. 27, 167–175.
- Gniel, J., Bouazza, A., 2010. Construction of geogrid encased stone columns: a new proposal based on laboratory testing. Geotextiles and Geomembranes 28, 108e118.
- Greenwood, D.A., 1970. Mechanical improvement of soils below ground surface. In: Proceedings of Ground Improvement Conference. Institute of Civil Engineering, pp. 9e29.
- Guetif Z, Bouassida M, Debats JM (2007) Improved soft clay characteristics due to stone column installation. Computers and Geotechnics 34(2): 104-111. 10.1016/j.compgeo.2006.09.008.
- Hughes, J.M.O., Withers, N.J., 1974. Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns. Ground Engineering 7 (3), 42e49.
- International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced and Other Techniques, pp. 239e333.
- Kazemian S (2011) Stabilization of Peat by Cement-Sodium Silicate Grout Using Injection-Vacuum Technology. PhD Thesis.: University Putra Malaysia.
- Keykhosropur L, Soroush A, Imam R (2012) 3D numerical analyses of geosynthetic encased stone columns. Geotextiles and Geomembranes 35: 61-68.
- Khabazian M, Kaliakin VN, Meehan CL (2010) 3D numerical analyses of geosynthetic encased stone columns. ASCE Conference Proceedings: 201-208.
- Lee, S., Pande, G.N., 1998. Analysis of stone column reinforced foundations. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 22, 1001e1020.
- Lo SR, Zhang R, Mak J (2010) Geosynthetic-encased stone columns in soft clay: A numerical study. Geotextiles and Geomembranes 28(3): 292-302.
- Lo, S.R., Zhang, R., Mak, J., 2010. Geosynthetic-encased stone columns in soft clay: a numerical study. Geotextiles and Geomembranes 28 (3), 292e302.
- Madhav, M.R., Alamgir, M., Muira, N., 1994. Improvement granular column capacity by geogrid reinforcement. In: Int. Proceedings of the 5th international Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, pp. 351-356.
- Madhav, M.R., Iyengar, N.G.R., Vitkar, R.P., Nandia, A., 1979. Increased bearing capacity and reduced settlements due to inclusions in soil. In: Proceedings of
- Madhav, M.R., Vitkar, R.P., 1978. Strip footing on weak clay stabilized with a granular trench or pile. Canadian Geotechnical Journal 15 (4), 605e609.
- Malarvizhi S. N., and Ilamparuthi K (2007), Comparative Study on The Behavior of Encased Stone Column and Conventional Stone Column”, Soils and Foundations, 47(5), pp 873-885.



- Malarvizhi, S.N., Ilamparuthi, K., 2004. Load versus settlement of clay bed stabilized with stone and enforced stone columns. In: Proceedings of GeoAsia-2004, Seoul, Korea, pp. 322-329.
- Mechanic and Foundation Engineering, Bangalore, India, pp. 101e104.
- Mitchel JK, Huber TR (1985). Performance of a stone column foundation. J. Geotech. Eng. ASCE. 111(2): 205-223.
- Mitra S, Chathpadhyay BC (1999). Stone columns and design limitations. Proc. of Indian geotechnical conference, held at Culcutta, India pp. 201-205.
- Murugesan S, Rajagopal K (2006) Geosynthetic-encased stone columns: Numerical evaluation. Geotextiles and Geomembranes 24(6): 349-358. 10.1016/j.geotextmem.2006.05.001.
- Murugesan S, Rajagopal K (2010) Studies on the Behavior of Single and Group of Geosynthetic Encased Stone Columns. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 136(1): 129-139. 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000187.
- Murugesan, S., Rajagopal, K., 2007. Model tests on geosynthetics-encased stone column. Geosynthetics International 14, 346-354.
- Murugesan, S., Rajagopal, K., 2010. Studies on the behavior of single and group of geosynthetic encased stone columns. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 136 (1), 129e139.
- Pulko B, Majes B, Logar J (2011) Geosynthetic-encased stone columns: Analytical calculation model. Geotextiles and Geomembranes 29(1): 29-39. 10.1016/j.geotextmem.2010.06.005.
- Pulko, B., Majes, B., Logar, J., 2011. Geosynthetic-encased stone columns: analytical calculation model. Geotextiles and Geomembranes 29, 29e39.
- Raju VR (2009) Ground Improvement Principles and Applications in Asia. Ground Improvement Technologies and Case Histories 43-66. Singapor.
- Shahu JT, Reddy YR (2011) Clayey Soil Reinforced with Stone Column Group: Model Tests and Analyses. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 137(12): 1265-1274. 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000552.
- Sharma, R.S., Phani Kumar, B.R., Nagendra, G., 2004. Compressive load response of granular piles reinforced with geogrids. Canadian Geotechnical Journal 41, 187-192.
- Sivakumar, V., McKelvey, D., Graham, J., Hughes, D., 2004. Triaxial test on model sand columns in clay. Canadian Geotechnical Journal 41, 299e312.
- Van Impe WF (1989) Soil improvement techniques and their evolution. AA Balkema, Rotterdam BR-3000 Netherlands, p. 131.
- Van Impe, W. and Silence, P., (1986), "Improving of the bearing capacity of weak hydraulic fills by means of Geotextiles," Proceedings of the 3rd International Conference on Geotextiles, Austria, pp. 1411-1416.
- Vesic, A.S., 1972. Expansion of cavities in infinite soil mass. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE 98 (SM3), 265e290.
- Wong, H.Y., 1975. Vibroflotation e its effect on weak cohesive soils. Civil Engineering (London) 82, 44e76.
- Wood, D.M., HU, W., Nash, D.F.T., 2000. Group effects in stone column foundation: model tests. Geotechnique 50 (6), 689e698.
- Wu CS, Hong YS (2008) behavior of a laminated reinforced granular column. Geotextiles and Geomembranes 26(4): 302-316.
- Wu, C.S., Hong, Y.S., 2009. Laboratory tests on geosynthetic encapsulated sand columns. Geotextiles and Geomembranes 27 (2), 107e120.
- Wu, C.S., Hong, Y.S., Lin, H.C., 2009. Axial stress-strain relation of encapsulated granular column. Computers and Geotechnics 36, 226e240.
- Xie K-H, Lu M-M, Liu G-B (2009) Equal strain consolidation for stone columns reinforced foundation. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 33(15): 1721-1735. 10.1002/nag.790.
- Zhang L, Zhao M, Shi C, Zhao H (2013) Settlement Calculation of Composite Foundation Reinforced with Stone Columns. International Journal of Geomechanics 13(3): 248-256. 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000212.