

# ستونهای سنگی روکش شده با ژئوسنتتیک

پژوهش و نگارش:

سید قاسم احسانی

کارشناس ارشد عمران ژئوتکنیک

**Ghasem.ehsani@yahoo.com**

**<http://civilgeotech.blog.ir>**

آموزش نرم افزارهای مهندسی عمران ژئوتکنیک

مناطق وسیع، به ویژه در امتداد ساحل، با نهشته های دریایی خاک رس نرم ضخیم دارای مقاومت برشی بسیار پایین و تراکم پذیری بالا پوشانده شده است. نظر به توسعه صنعتی در نواحی ساحلی در سالهای اخیر، بنادر، صنایع، و دیگر تسهیلات زیربنایی در حال ساخت می باشد. این مساله استفاده از زمین را با اقشار ضعیف ایجاب می کند، که در آن طراحان را با وجود نهشته های خاک رس نرم ضخیم به چالش کشیده شده است. اگر چه استفاده از شالوده شمعی می تواند تمام الزامات طراحی را تامین کند، نیروی کششی منفی و طول زیادی شمع اغلب به هزینه های سنگین منجر شود. از اینرو، دیگر روش های بهبود زمین به طور معمول برای ملاحظات اقتصادی ترجیح داده می شود (Ambily, Gandhi 2007).

برای سازه های انعطاف پذیر و به آرامی بارگذاری شده ستون های سنگی فرم ایده آل بهبود زمین است. ستون های سنگی برای خاک رس نرم، رسوبات آلی و چسبنده و خاک های سیلتی مناسب ترین هستند. ستون سنگی (شمع دانه ای نامیده می شود) چیزی جز یک عنصر ستون عمودی تشکیل شده در زیر سطح زمین را با تکه های مترکم شده و غیر سیمانی سنگی یا سنگریزه نیست. هنگامی که ستون سنگی تحت بارگذاری عمودی قرار می گیرد، فشردگی قابل توجه عمودی ناشی از کرنش جانبی یا انبساط جانبی را در سنگدانه ها تحمل می کند. هنگامیکه ستون به طور همزمان برآمده و به سمت پایین جابجا می شود، فشار مصاح دانه ای در خاک نرم اطراف بوجود آمده و انتقال تنش به خاک از طریق برش صورت می گیرد. این انبساط جانبی، به نوبه خود، باعث افزایش تنش جانبی در داخل رس می شود که محدودیت اضافی برای سنگ فراهم می کند. یک حالت تعادل در نتیجه کاهش جابجایی عمودی در مقایسه با زمانی که خاک بهبود نیافته در نهایت می رسد. این روش بهبود زمین با موفقیت برای افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست برای پی سازه های که در آن نشست نسبتاً بزرگ است، همانند مخازن ذخیره مایع، سدهای خاکی، شالوده های رادیه، و غیره بکار می رود. استفاده از ستون سنگی همچنین نرخ تحکیم در خاک رس نرم را افزایش می دهد (Han & Ye 1992).

ستون های سنگی نخستین بار در سال ۱۸۳۰ توسط مهندسین ارتش فرانسه مورد استفاده قرار گرفت. این روش تا سال ۱۹۳۳ به فراموشی سپرده شد، تا زمانی که Steuerman Serzey و یوهان کلر در آلمان یک دستگاه

ارتعاشی اساسی برای غوطه ور شدن زمین اختراع کرد. اولین کار واقعی ارتعاشی شناوری به سبک امروزه توسط کلر در برلین در سال ۱۹۳۷ برای تراکم ماسه شل در عمق ۷.۵ متر بوسیله ارتعاش در محل انجام شد. ستون های سنگی در کشورهای اروپایی در اوایل ۱۹۶۰ پذیرفته شد و پس از آن با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است. در ایران این روش برای نخستین بار با استفاده از روش کوبیدنی<sup>۱</sup> اجرا و از سال ۱۳۸۳ تکنیکهای ارتعاشی ساخت ستونهای سنگی به ایران وارد شد.

ستون های سنگی تحت بارهای فشاری، مدهای گسیختگی از قبیل انبساط جانبی (Hughes, 1975)، گسیختگی برشی عمومی (Madhav,1978) و لغزش (Aboshi,1979) را تجربه می کنند. اگر چه در خاک نرم متداولترین مد گسیختگی برای ستون سنگی، انبساط جانبی است (Madhav,1994).

یکی از محدودیت های روش ستون سنگی این است که به خاک رس اطراف برای بسیج ظرفیت حمل بار بستگی دارد. ظرفیت باربری نمی تواند به بیش از ۲۵ برابر مقاومت در رس نرم بهبود یابد (Chummar, 2000). علاوه بر این، در رس نرم نصب ستون سنگی به خودی خود ممکن است با از دست دادن سنگدانه ها، به دلیل محدودیت کم رس نرم اطراف مشکل ساز باشد و با آلودگی مصالح سنگی به علت نفوذ خاک های رس نرم، مقاومت اصطکاکی مصالح دانه ای کاهش یافته و مانع از عملکرد زهکشی ستون می شود (McKenna et al.1975).

در خاک بسیار نرم، به دلیل عدم فشار جانبی مورد نیاز، استفاده از ستون های سنگی می تواند مشکل ساز باشد. در این شرایط، برای اینکه فشار محدود جانبی مورد نیاز فراهم شود و به منظور افزایش ظرفیت باربری، ستون های سنگی با یک ژئوسنتتیک مناسب روکش می شود (Khabbazian, 2010).

سیستم پی سازی با استفاده از ستون های سنگی روکش شده با ژئوسنتتیک ها<sup>۱</sup>، یک روش جدید (GEC) بهسازی خاک های بسیار نرم با مقاومت زهکشی نشده کمتر از 15kpa است که از سال ۱۹۹۶ ارزش خود را در جاده ها و بسیاری از پروژه های راه آهن در آلمان، هلند و سوئد به اثبات رساند (Khabbazian, 2011). در این روش، ستون ها توسط ژئوسنتتیک های با مقاومت بالای کششی روکش می شوند و برخلاف ستون های سنگی روکش نشده که محصورشدگی افقی تنها توسط خاک نرم اطراف ستون تأمین می شود با استفاده از ستونهای سنگی روکش شده، محصورکنندگی ناشی از خاک نرم می تواند بسیار کمتر باشد و این امر ناشی از

اثر محصورکنندگی شعاعی روکش ژئوستتیک می باشد. محصورکنندگی افقی همچنین به فشار قائم وارد بر خاک اطراف ستون بستگی دارد که با روکش کردن ستون سنگی و افزایش تمرکز تنش در بالای ستون، این فشار قائم بسیار کاهش یافته و در نتیجه علاوه بر کاهش تنشهای افقی در خاک نرم اطراف، میزان نشست نیز بسیار کاهش می یابد.

بستر خاک دانه ای از ماسه و یا شن، به ضخامت ۰.۳ متر یا بیشتر، معمولا بر روی خاک نرم بهبود یافته با ستون سنگی به منظور ارائه یک مسیر زهکشی و توزیع تنش های آتی به واسطه رو سازه، قرار داده می شود. انتخاب سختی مناسب، فاصله و قطر ستون سنگی برای بهبود خاک نرم موجود بسیار مهم است.

### موارد کاربرد ستون های سنگی:

تکنیک بهسازی زمین توسط ستون های سنگی در موارد زیر بسیار موثر عمل کرده است:

کاهش نشست کلی و نشست غیر همسان

افزایش ظرفیت باربری زمین نرم

کاهش زمان مورد نیاز برای نشست تحکیمی

افزایش مقاومت برشی مصالح چسبنده بهبود پایداری شیب خاکریزها و شیب های طبیعی

تراکم مصالح غیر چسبنده و کاهش پتانسیل روانگرایی ماسه تحت بار زلزله

با این حال، این روش برای تمام سایت ها، عموما کاربرد ندارد. این است که به برخی از شرایط زمین و دیگر جزئیات ساخت و ساز محدود است. با توجه به تجربیات پیمانکاران متخصص و مهندسان در اروپا و ایالات متحده آمریکا، به طور معمول برای خاک های زیرسطحی که مقاومت برشی در محدوده ۱۰ تا ۵۰ کیلو پاسکال قرار دارند، در نظر گرفته شود.

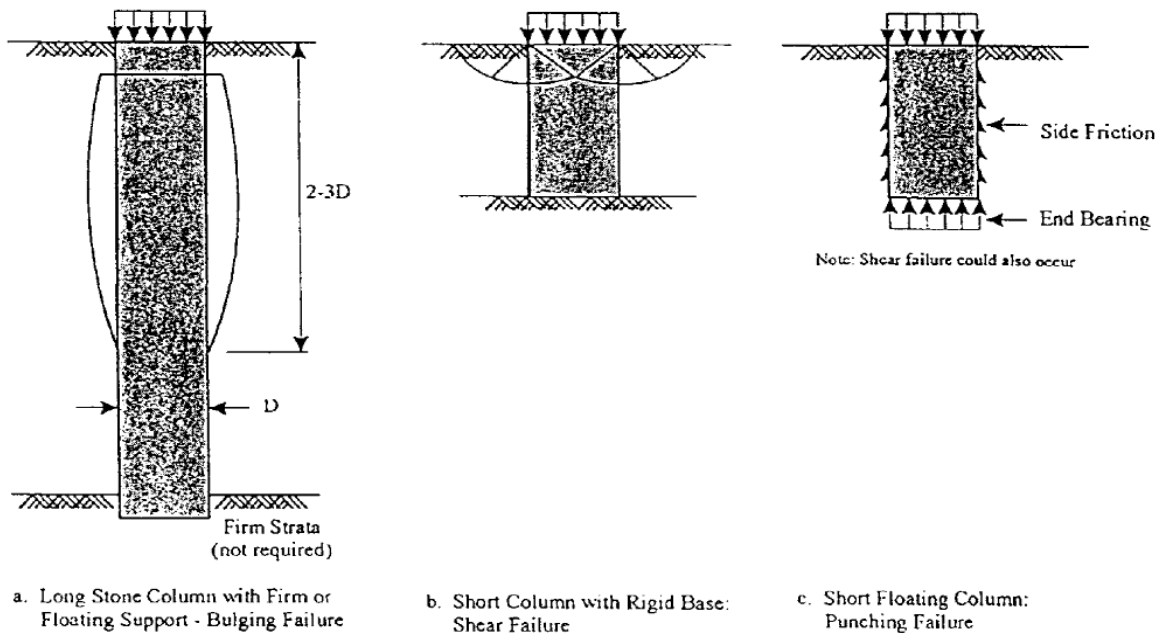
## نحوه گسیختگی ستون سنگی:

ستون های سنگی ممکن است بصورت تکی یا گروهی دچار گسیختگی شوند. در شکل ۱ نحوه گسیختگی ستون های سنگی تکی را در حالات ممکن در خاک نرم همگن ارائه شده است. ستون های سنگی تحت بارهای فشاری، مدهای گسیختگی از قبیل شکم دادگی (Hughes,1975)، گسیختگی برشی عمومی (Madhav,1978) و لغزش (Aboshi,1979) را تجربه می کنند. اگر چه در خاک نرم متداولترین مد گسیختگی برای ستون سنگی، شکم دادگی است (Madhav,1994).

➤ انبساط جانبی: این نوع گسیختگی به علت عدم حمایت نیروی جانبی کافی خاک اطراف از ستون سنگی می باشد؛ بطور معمول در عمق 2D الی 3D اتفاق می افتد. برای ستون سنگی با طول بیشتر از 4 الی 6 برابر قطر ستون سنگی، معمولاً نحوه خرابی بصورت انبساط جانبی است.

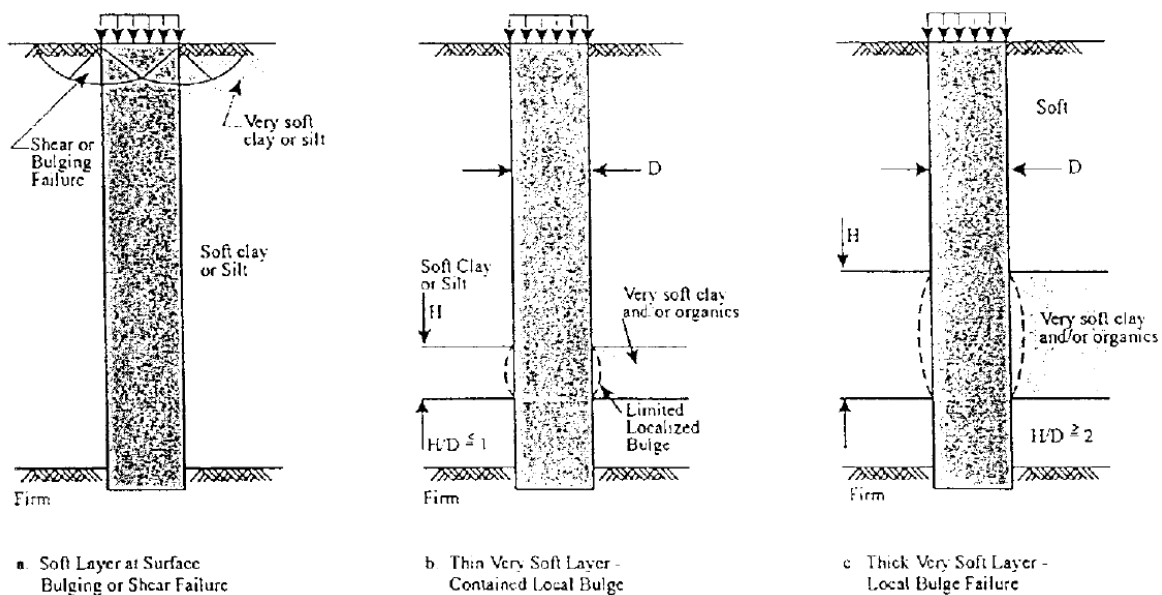
➤ برش کلی: در ستون های کوتاه که بر بستر محکمی تکیه دارند اتفاق می افتد.

➤ لغزش: در ستون های کوتاه که در خاک نرم احداث شده است اتفاق می افتد.

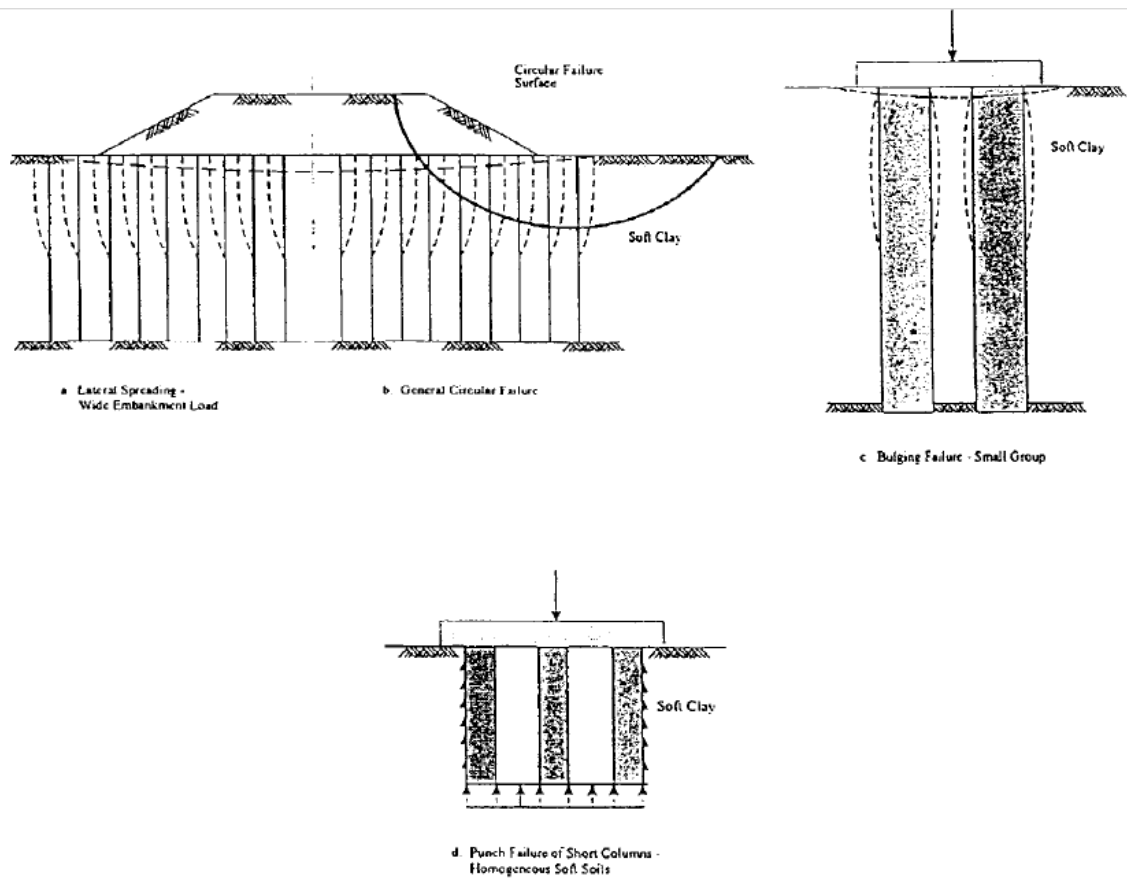


شکل ۱- نحوه خرابی ستون سنگی منفرد

در صورتیکه خاک از نوع لایه ای چسبنده و غیر همگن باشد، انواع گسیختگی ها در شکل ۲ نشان داده شده است. اگر یک لایه خاک ضعیف (به ضخامت ۱-۳ متر) در سطح زمین باشد گسیختگی از نوع برش کلی یا انبساط جانبی خواهد بود. این لایه سطحی باعث افزایش نشست پذیری ستون سنگی و کاهش باربری خواهد شد. اگر یک لایه خاک ضعیف با ضخامت بیش از 1D باشد، خطری برای ستون پیش نمی آید.



شکل ۲- مدهای گسیختگی ستون سنگی منفرد در خاک چسبنده غیر همگن



شکل ۳- مد های گسیختگی گروه ستون های سنگی

## روش های اجرای ستون سنگی

نوع ابزار و روشی که برای ساخت ستونهای سنگی استفاده می شود تأثیر مستقیمی بر ظرفیت باربری آن دارد . بدین جهت ستون های سنگی را بر حسب نوع ابزار به کار رفته و روش منتخب برای احداث، می توان به دو دسته تقسیم نمود:

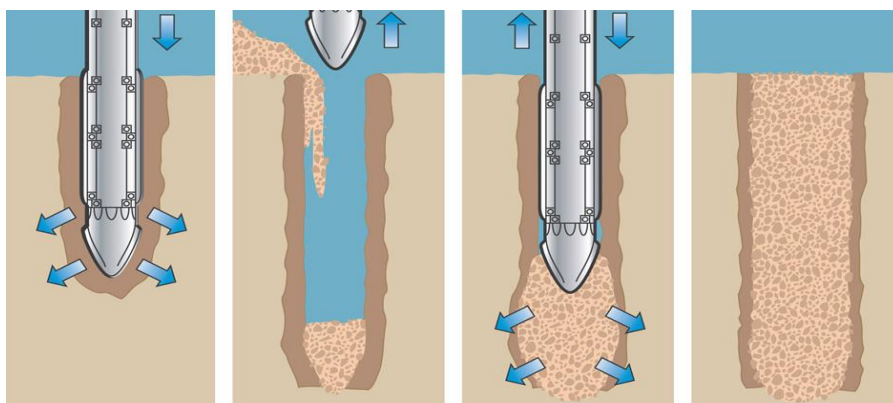
### روش لرزشی - جایگزینی (تر)

✓ این روش در مکان هایی که مشکل کمبود آب و عوامل زیست محیطی نباشد استفاده می شود. در این روش نیروی ناشی از فشار آب (جت آب) باعث کنده شدن و تخلیه خاک از درون چاه حفر شده می

شود. بعد از رسیدن به عمق مورد نظر مصالح دانه ای به صورت مرحله ای در چاه ریخته شده و به کمک لرزش دستگاه مخصوص متراکم شده و دستگاه کم کم به بیرون چاه کشیده می شود.

✓ از این روش بیشتر در مناطقی که خاک خیلی نرم تا کمی سفت یا اینکه سطح تراز آب زیر زمینی بالا یا احتمال ناپایداری دیواره چاه وجود دارد استفاده می شود. در این روش جریان آب موجب پایداری دیواره چاه نیز می گردد.

✓ از مزایای این روش ایجاد ستون سنگی با طول بلند و رسیدن به بستر مناسبتر



شکل ۴- نحوه اجرای روش لرزشی - جایگزینی (تر)

#### روش لرزشی - جایگزینی (خشک)

✓ در این روش دستگاه توسط لرزش و تحت اثر وزن خود به داخل زمین فرو می رود، 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 آرام آرام با ریختن مصالح و متراکم کردن بیرون کشیده می شود.

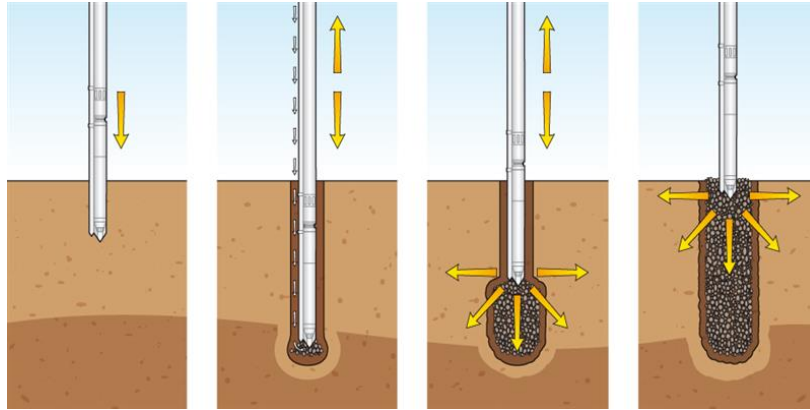
مزایای این روش عبارتست از:

✓ اندازه گیری دقیق حجم مصالح مصرفی



✓ نداشتن اثر زیان بار زیست محیطی نسبت به روش لرزشی - جایگزینی (خیس)

✓ با این روش امکان احداث ستون سنگی تا عمق ۲۴ متر نیز امکان دارد.

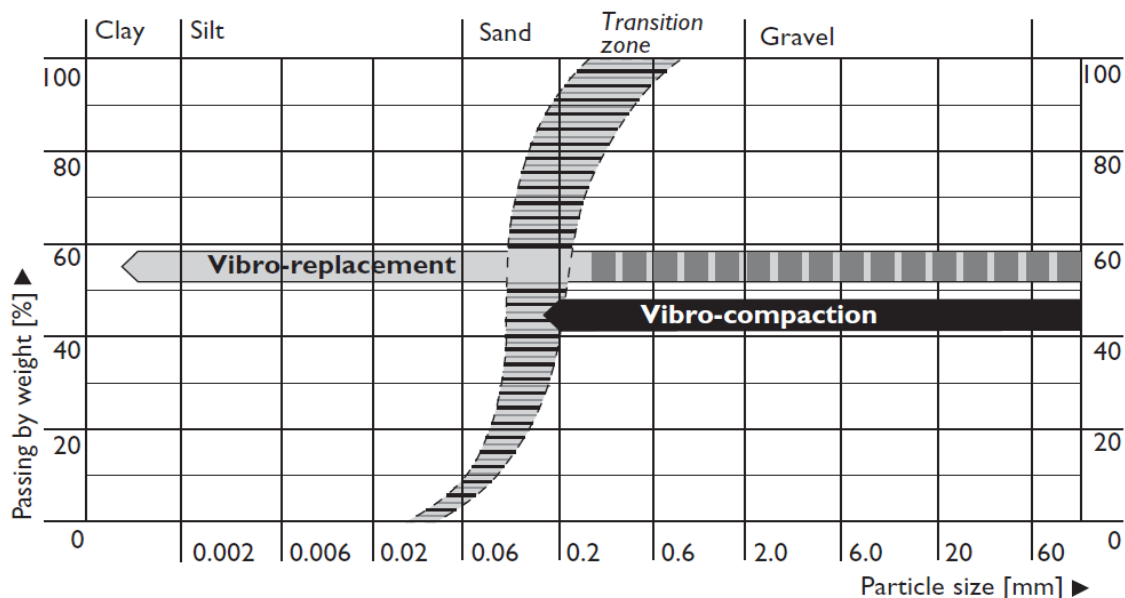


شکل ۵- نحوه اجرای روش لرزشی - جایگزینی (خشک)

محدوده انواع خاک قابل بهسازی توسط تراکم ارتعاشی و جایگزینی ارتعاشی جهت ساخت ستون سنگی در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است.

روش ارتعاشی - جایگزینی به طور معمول برای سایت های با سطح آب زیر زمینی بالا استفاده می شود. گرین وود (۱۹۸۳) پیشنهاد کرد که روش ارتعاشی - جابجایی را می توان در پایدار خاک های چسبنده حساس که مقاومت برشی آنها در محدوده ۳۰ تا ۶۰ کیلو پاسکال با سطح آب زیر زمینی نسبتا پایین قرار گرفته، استفاده کرد. بیشترین توصیه عمق بهسازی در محدوده ۶ تا ۱۵ متر می باشد اگر چه ستون به عمق بیش از ۳۰ متر ساخته شده اند.

امکان پذیری روش ها به طور عمده به توزیع اندازه دانه های خاک بستگی دارد. محدوده انواع خاک قابل بهسازی بوسیله ی تراکم ارتعاشی و جایگزینی ارتعاشی در شکل ۱ نشان داده شده است. درجه بهسازی به بسیاری از عوامل از جمله شرایط خاک، نوع تجهیزات ، روش پذیرفته و مهارت های کارکنان سایت بستگی دارد.



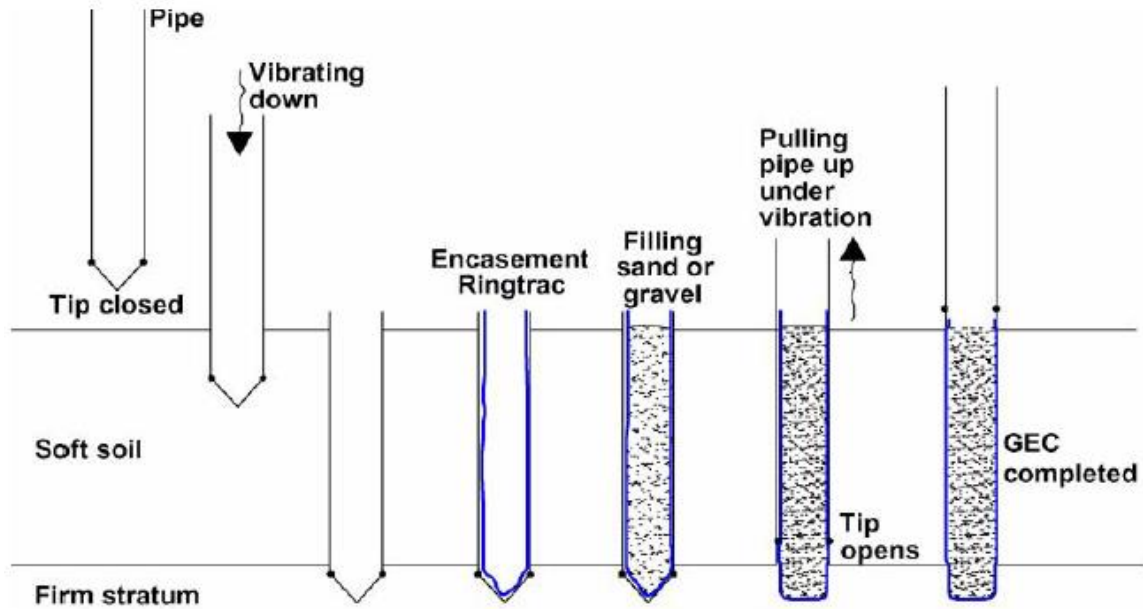
شکل ۶- محدوده انواع خاک قابل بهسازی توسط تراکم ارتعاشی و جایگزینی ارتعاشی (ستون های سنگی).

## روش های اجرای ستون سنگی روکش شده

دو روش جهت نصب ستون سنگی روکش شده با ژئوستتیک امکان پذیر است که در ادامه توضیح داده شده است.

### روش جابجایی جهت ساخت ستون سنگی روکش شده

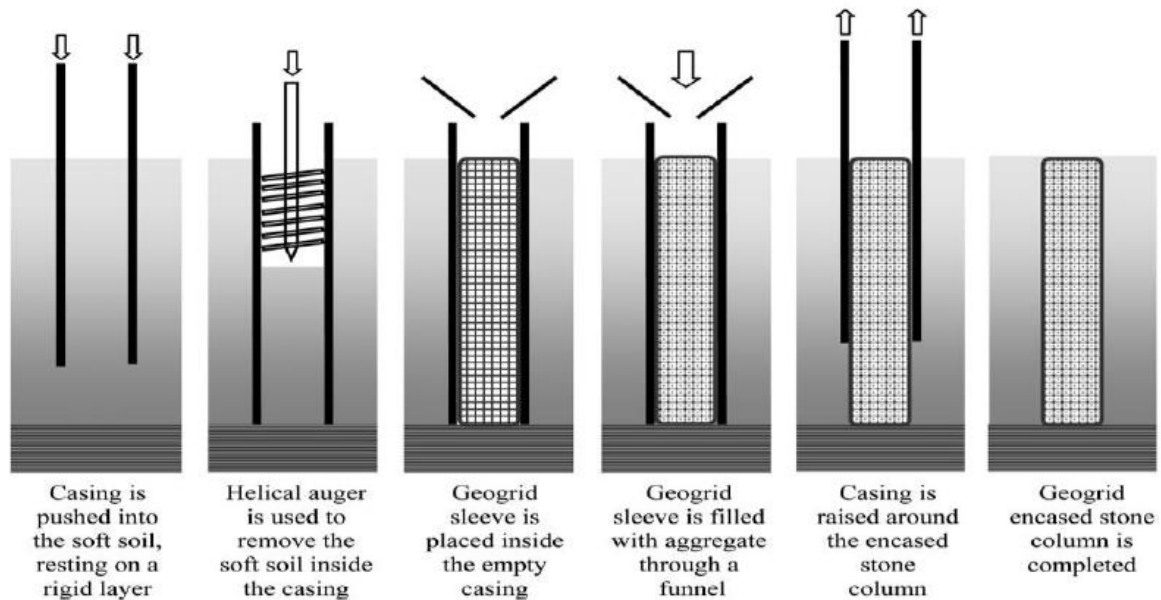
همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده، در این روش یک لوله فولادی با انتهای بسته به دنبال تعبیه بافت مدور ژئوتکستایل درون خاک نرم هدایت شده و با ماسه یا شن پر می شود. نوک لوله باز شده، لوله به سمت بالا تحت ارتعاش بهینه طراحی شده به منظور متراکم نمودن ستون کشیده می شود. روش جابه جایی به طور معمول برای خاک های بسیار نرم استفاده می شود.



شکل ۷- روش جایجایی جهت ساخت (Alexiew, 2005)

### روش جایگزینی جهت ساخت ستون سنگی روکش شده

در روش جایگزینی لوله استوانه ای فولادی با انتهای باز به عمق لایه تحمل کننده هدایت می شود و خاک درون استوانه توسط گمانه زنی با مته تخلیه می شود. که این مراحل به صورت شماتیک در شکل ۸ نشان داده شده است. روش جایگزینی برای خاک های با مقاومت نفوذ نسبتا بالا ترجیح داده می شود یا هنگامیکه اثرات لرزش روی ساختمان های مجاور و نصب جاده باید حداقل باشد.



شکل ۸- روش جایگزینی جهت ساخت (Gniel and Bouazza, 2010)

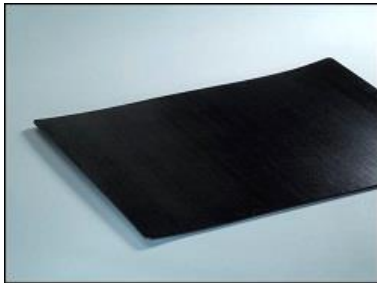
### معرفی کلی ژئوسنتتیک ها و انواع مورد استفاده در مسلح سازی ستون های سنگی

ژئوسنتتیک ها با استفاده از انواع مختلف پلیمرها ساخته می شوند، عنوانی فراگیر برای توصیف صفحات نازک و انعطاف پذیری است که امروزه به طور گسترده در مهندسی ژئوتکنیک و محیط زیست مورد استفاده قرار می گیرند و شامل ژئوتکتستایل ها، ژئوممبرین ها، ژئوگریدها، ژئوفوم ها، ژئونت ها، ژئوکامپوزیت ها می شود.

ژئوتکتستایل ها و ژئوگرید ها دو نوع از ژئوسنتتیک هستند که برای مسلح سازی به کار می روند که در زیر به اختصار توضیح داده می شود:

الف) ژئوتکتستایل: یکی از اولین و پر استفاده ترین انواع ژئوسنتتیک ها، ژئوتکتستایل ها می باشد، دارای دو نوع بافته و نبافته می باشد. مساله مهم در انتخاب ژئوتکتستایل ها این است که انواع بافته شده عموماً مقاومت کششی بالاتر و افزایش طول کمتری دارند و در مقابل انواع نبافته نشده، نفوذپذیری و افزایش طول بیشتری دارند. استفاده از ژئوتکتستایل به عنوان مسلح کننده نیازمند طراحی خوب، انتخاب ژئوتکتستایل مناسب، ساخت دقیق و نیز بازرسی با کیفیت و دقیق توسط کارشناسان و یا مهندسان با تجربه می باشد.

ب) ژئوگریدها: ژئوگرید مصالح وری شکل سخت و پلیمری می باشد که از مجموعه ای از شیارهای طولی و عرضی تشکیل شده است و دارای ساختاری بزرگ و شبکه ای است. بازشدگی ژئوگرید ها روزنه نامیده می شود و معمولا ابعادی بین ۱ تا ۱۰ سانتیمتر دارند. ژئوگرید به به علت داشتن مقاومت کششی بالا، مدول الاستیسیته زیاد و خزش بسیار کم، بهترین مصالح برای مسلح سازی است. برای انجام عملیات ساخت با ژئوگریدها، ابتدا آنها را ر تویی هایی با عرض ۳۰ تا ۳۰۰ سانتیمتر به محل پروژه حمل می کنند. بعد از خارج کردن آنها از انبار باید به سرعت نصب پوشانده شوند.



ژئوممبرین



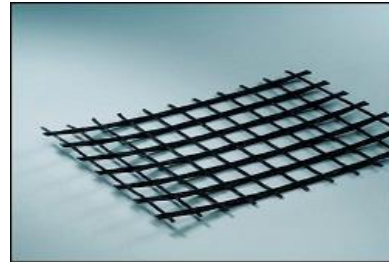
ژئوکامپوزیت



ژئونت



ژئوتکستایل



ژئوگرید

شکل ۹- ژئوسنتتیک های رایج مورد استفاده برای تقویت خاک

## چگونگی انتخاب ژئوسنتتیک مناسب برای روکش ستون سنگی

الف- مدول کششی  $\text{Kn/M}^2$  (۲۰۰۰-۴۰۰۰) تا در مقایسه با خاک ها کرنش های بوجود آمده در روکش بسیار کم باشد.

ب- داشتن مقاومت کششی بالا  $\text{Kn/M}$  (۱۰۰-۴۰۰) در دراز مدت (عدم تمایل به خزش)

ج- نفوذپذیری بالا

د- خرابی بسیار کم تحت فرآیند نصب و متراکم سازی ستون های سنگی

ه- مقاومت شیمیایی و بیولوژیکی بالا

در صورت استفاده از ژئوتکستایل ها، این مصالح نباید درز و ترک داشته باشند. این امر از شکل گیری محدوده ای ضعیف در روکش جلوگیری کرده و سختی کششی یکنواختی را در کل طول روکش ایجاد می کند. به منظور جلوگیری از آسیب دیدن روکش ساخته شده از ژئوتکستایل باید از به کار بردن سنگدانه های درشت در داخل ستون سنگی اجتناب کرد و همچنین از ارتعاش زیاد غلاف به هنگام خروج که به منظور متراکم سازی مصالح ستون سنگی بکار می رود جلوگیری نمود.

در صورت استفاده از ژئوگرید ها بع عنوان روکش می بایست باجوش دادن (welding) مرز باریکی به اندازه ۳۰ سانتیمتر روکش را ایجاد کرد و یا طبق یافته ها (Guniel2011) کل محیط روکش را همپوشانی کرده تا از باز شدن روکش ژئوگرید جلوگیری کند. لازم به ذکر است که روش دوم کم هزینه تر بوده ولی از نظر کارایی مانند روش اول می باشد. ژئوگرید در مقایسه با ژئوتکستایل دارای سختی بیشتری بوده و در نتیجه با استفاده از ژئوگریدها به عنوان روکش ستونهای سنگی می توان مصالح ستون های سنگی را از سنگدانه های درشت تری انتخاب کرد و همچنین به هنگام نصب از تراکم بیشتری بهره برد (Guniel 2010)

در انتخاب قطر ژئوتکستایل و یا ژئوگرید به کاررفته به عنوان روکش ستون های سنگی دو رویکرد وجود دارد. رویکرد اول اینست که قطر ژئوسنتتیک را مقداری بیشتر از قطر غلاف فولادی که به آن اشاره شد در نظر گرفت. مزیت این رویکرد انتقال بهتر فشار خاک بعد از خارج کردن غلاف فولادی می باشد اما ایراد آن نشست

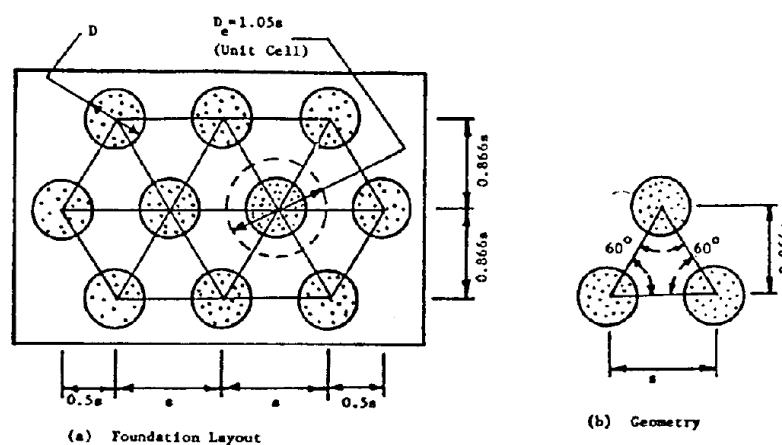
بیشتر ستون سنگی به علت تغییر شکل شعاعی بیشتر می باشد. رویکرد دوم، انتخاب قطر ژئوسنتتیک مساوی با قطر لوله می باشد. مزیت این رویکرد بسیج سریعتر نیروی حلقوی روکش و نشست کمتر خاک می باشد. امروزه بیشتر از رویکرد دوم استفاده می شود (Alexie2005)

## مبانی تحلیل و طراحی ستون های سنگی

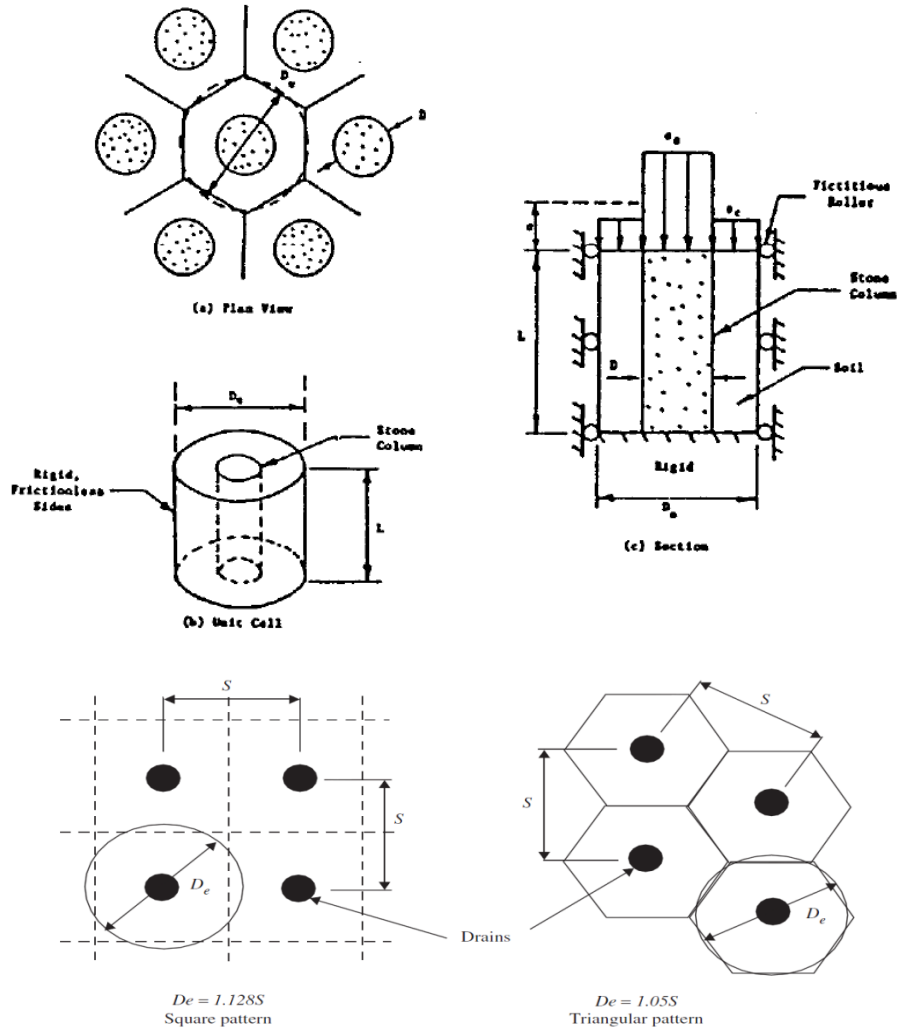
### مبانی و فرضیات

نحوه آرایش ستون های سنگی به صورت مثلث متوازی الاضلاع می باشد، ولی از آرایش مربعی هم می توان استفاده کرد. Priebe (۱۹۹۵) یک روش به منظور برآورد نشست و ظرفیت باربری، شالوده واقع بر روی شبکه نامحدود ستون های سنگی را بر اساس مفهوم سلول واحد پیشنهاد کرد. مطابق شکل ۵، در این حالت هر ستون سنگی و خاک اطراف آن مانند یک سلول واحد فرض می شوند.

نظر به اینکه همه ستون ها به طور همزمان بارگذاری می شود، فرض می شود که تغییر شکل جانبی در خاک در مرز سلول واحد، صفر است.



شکل ۱۰- نحوه آرایش ستون های سنگی به صورت مثلث متوازی الاضلاع



شکل ۱۱- فرض ستون سنگی و خاک اطراف به عنوان ستون واحد

مطابق شکل ۱۱، هنگامیکه از آرایش مثلثی استفاده می شود، خاک اطراف تحت تاثیر هر ستون سنگی را بصورت یک شش ضلعی منتظم است با دقت خوبی می توان با دایره هم مساحت آن تقریب زد.

✓ برای آرایش مثلثی متساوی الاضلاع قطر دایره موثر برابر است با :

$$D_e = 1.05S$$

✓ برای آرایش مربعی ستون ها سنگی :

$$D_e = 1.13S$$



□ حجم خاک جایگزین شده با مصالح ستون سنگی اثر بسیار مهمی در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پذیری خاک دارد. بدین منظور، نسبتی به نام نسبت ناحیه اصلاح شده تعریف می شود:

$$a_s = \frac{A_s}{A_s + A_c}$$

□ نسبت ناحیه اصلاح شده را می توان به صورت زیر نوشت:

$$a_s = C_1 \left( \frac{D}{s} \right)^2$$

$C_1$ : ضریبی است که به نوع آرایش ستون های سنگی بستگی دارد و برای آرایش مربعی  $C_1 = \pi/4$  و برای آرایش مثلث متساوی الاضلاع  $C_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{3}}$  است.

براساس مطالعات و تجربه مشاهده شده است زمانیکه که بار در سطح زمین وارد می شود تمرکز تنش در ستون سنگی نسبت به خاک اطراف بیشتر است. این پدیده را می توان اینطور توجیه کرد که چون نشست ستون سنگی و خاک اطراف یکسان است، پس بار به نسبت سختی توضیح خواهد شد. پس تنش های قائم موجود در ستون سنگی را می توان با ضریبی بدون بعد به نام ضریب تمرکز تنش ( $n$ ) نشان داد.

$$n = \frac{\sigma_s}{\sigma_c}$$

✓ تنش میانگین اعمالی بر مساحت سلول واحد:

$$\bar{\sigma} = a_s \sigma_s + \sigma_c (1 - a_s)$$

✓ رابطه مقدار تنش موجود در ستون سنگی و تنش خاک را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\sigma_s = \frac{n \bar{\sigma}}{[1 + (n-1) a_s]} \quad \sigma_c = \frac{\bar{\sigma}}{[1 + (n-1) a_s]}$$

## ظرفیت باربری ستون سنگی منفرد

□ نظریه انبساط جانبی وسیک

تنش نهایی قابل تحمل توسط خاک اطراف ستون سنگی:

$$\sigma_3 = cF'_c + qF'_q$$

C: چسبندگی خاک اطراف ستون سنگی

q: متوسط تنشهای اصلی اعمالی در عمق خرابی ناشی از وزن خاک و سربار اعمالی

$$q = \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right)$$

$F'_c, F'_q$ : ضریب انبساط چاه ستون سنگی است و مقدار این ضریب تابعی از زاویه اصطکاک داخلی خاک اطراف ستون سنگی و شاخص صلیبت ( $I_r$ ) می باشد.

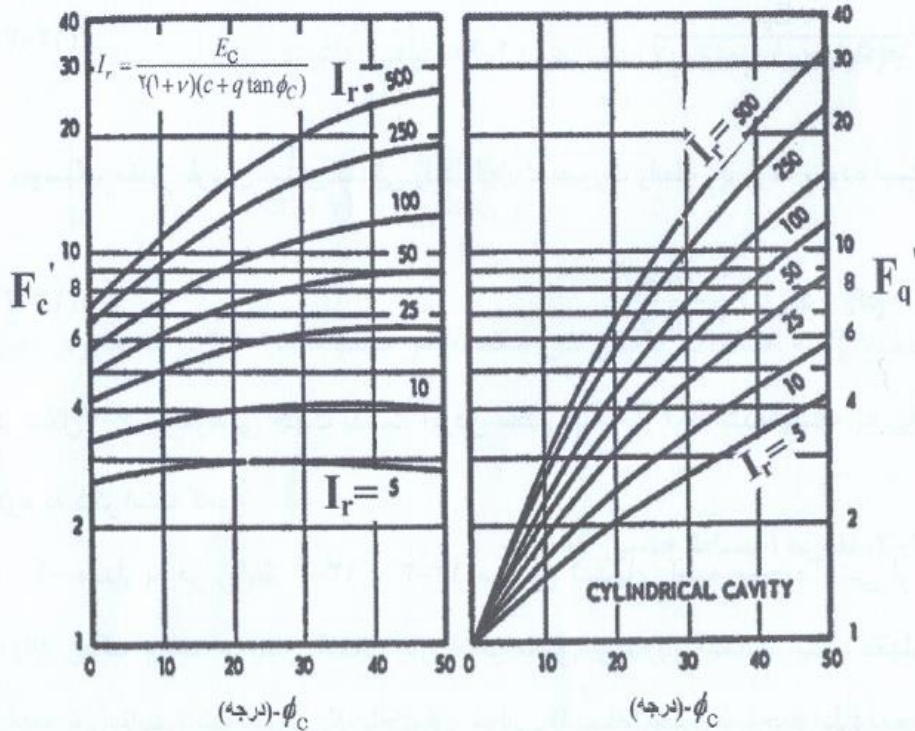
➤ شاخص صلیبت ( $I_r$ ) مطابق رابطه زیر تعریف می شود:

$$I_r = \frac{E_c}{2(1+\nu)(c + q \tan \phi_c)}$$

➤ وسیک مقدار باربری ستون سنگی را در نهایت بصورت رابطه زیر ارائه نمود:

$$Q_{ult} = [cF'_c + qF'_q] \times \left( \frac{1 + \sin \phi_s}{1 + \sin \phi_c} \right)$$

توجه: حالت  $\phi_c=0$  ←  $F_c' = \ln I_r + 1$



شکل ۱۴- نمودارهای محاسبه  $F_c', F_q'$  روش و سیک

### ظرفیت باربری گروه ستون های سنگی:

طبق نظر بارکسدل و باچوس در خاکاهی نرم و خیلی چسبنده برای تخمین باربری گروه ستون های سنگی، می توان باربری یک تک ستون سنگی را حساب کرد و درز تعداد ستون های سنگی ضرب کرد. بدین منظور برای محاسبه باربری ستون سنگی منفرد رابطه ی زیر را پیشنهاد کردند :

$$q_{ult} = c N'_c$$

$N'_c$  : ضریب ظرفیت باربری ستون سنگی می باشد که در محدوده ۱۸ تا ۲۲ متغیر است.

## نشست شالوده های احداث شده روی ستون های سنگی

بر پایه توصیه های گرین وود، و تامپسون (۱۹۸۴) یک نمودار تجربی برای تخمین نشست نشان داده شده است. به منظور استفاده از نمودار زیر لازم است روش گام به گام زیر اجرا شود:

گام ۱. سطح مقطع ستون سنگی را تعیین نمایید.

گام ۲. مساحت متوسط شالوده های ستون را تعیین نمایید.

گام ۳. نسبت  $A_f/A_s$  را تعیین نمایید.

گام ۴. نشست محتمل شالوده را با فرض بدون استفاده از ستون سنگی ساخته شده، تعیین نمایید.

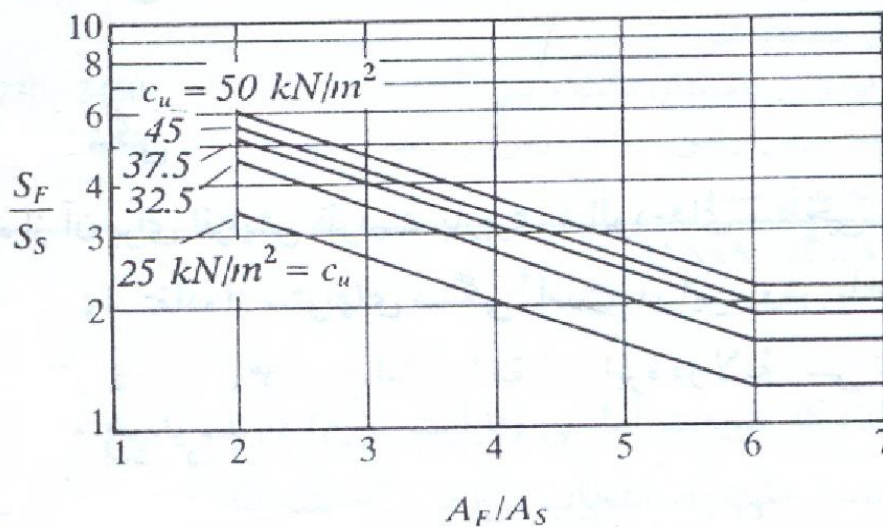
گام ۵. با مقادیر  $A_f/A_s$  و  $c_u$ ، نسبت  $S_f/S_s$  را از نمودار بدست آورید.

$A_f$  مساحت متوسط شالوده های ستون

$A_s$  سطح مقطع ستون سنگی

$S_f$  نشست شالوده بدون استفاده از ستون سنگی

$S_s$  نشست شالوده با استفاده از ستون سنگی



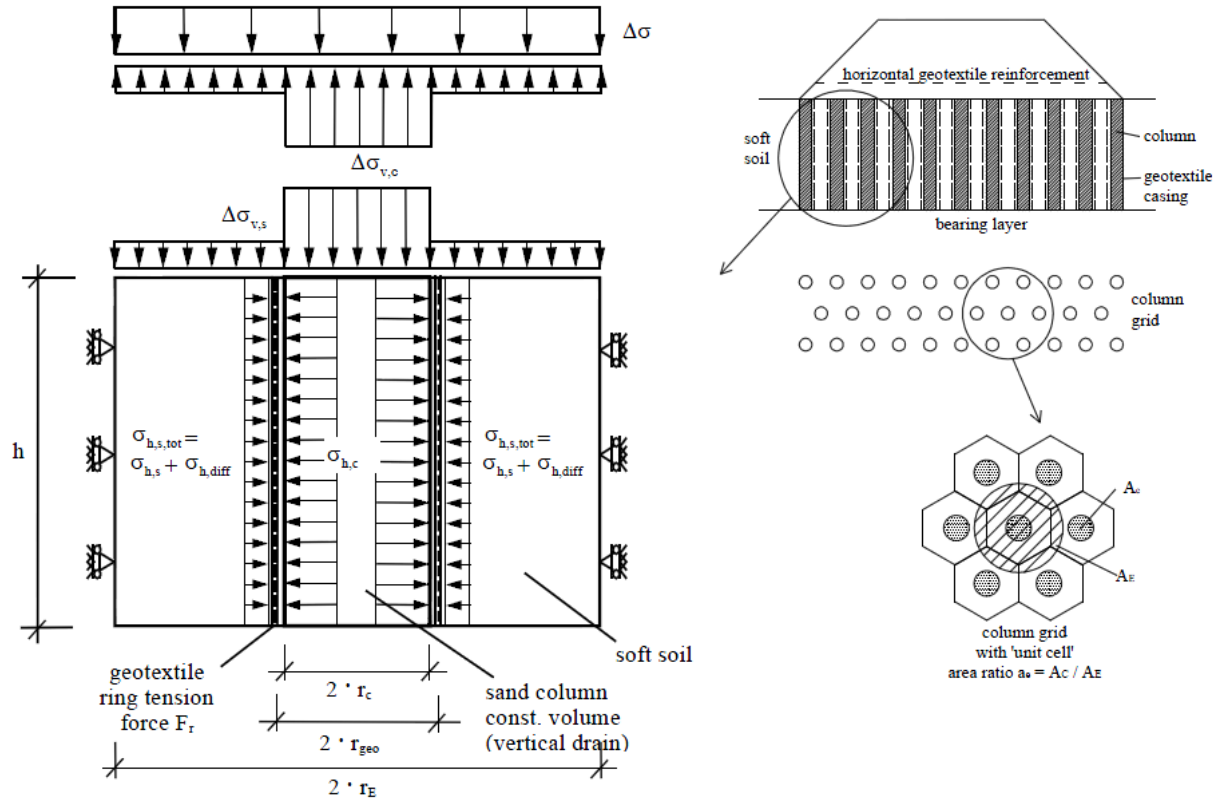
شکل ۱۲- دیاگرام طراحی ستون سنگی

## طراحی ستون سنگی روکش شده با ژئوسنتتیک

(Raithel & kempfort, 2000) بر پایه روش طراحی ستون سنگی ارائه شده توسط (priebe, 1995)، روش تحلیلی را پیشنهاد نمودند که در آن نیروی محصور کننده ایجاد شده در ژئوسنتتیک علاوه بر مقاومت کششی به هنگام گسیختگی، به رفتار کامل تنش کرنش روکش نیز مرتبط می شود و در نتیجه از کرنش شعاعی محاسبه شده، میزان شکم دادگی ستون سنگی روکش شده با ژئوسنتتیک ها و در نهایت میزان نشست کل سیستم محاسبه می شود. مدل تحلیلی مورد استفاده که بر اساس فرضیه سلول واحد شکل گرفته است همراه با شرایط مرزی و بارگذاری در شکل ۱۳ نشان داده شده است (kempfort, 2006). در کنار شرایط مرزی یک سری فرضیات در تحلیل ستون سنگی روکش شده با ژئوسنتتیک به کار می روند که عبارتند از:

- ۱- نشست ها در بالای ستون و خاک نرم با هم برابر هستند.
- ۲- نشست لایه باربر در زیر ستون ها را می توان صرف نظر کرد.
- ۳- در ستون ضریب فشار محرک زمین  $K_{a,c}$  اعمال می شود.
- ۴- رفتار روکش ژئوسنتتیک به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته می شود (ل سختی).
- ۵- برای طراحی پی شرایط زهکشی شده فرض می شود، زیرا به نشست ها و نیروهای کشش حلقه ای حداکثر دست می یابد.

این مدل بر اساس مدل های محاسباتی مرسوم مورد استفاده برای ستون های سنگی ارائه شده توسط (priebe, 1995) بسط یافته است، تنها معادلات به گونه ای گسترش یافته اند که اثر روکش ژئوسنتتیک دیده شود.



شکل ۱۳- مدل محاسباتی ستون سنگی روکش شده با ژئوتکستایل

همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، به سبب تنش های عمودی اعمالی  $\Delta\sigma_{v,c}$  روی سر ستون یک تنش های افقی اعمالی در ستون  $\Delta\sigma_{h,c}$  وجود دارد. نظر به تعادل بین بارگذاری اعمال شده  $\Delta\sigma$  و تنش عمودی متناظر بر روی ستون  $\Delta\sigma_{v,c}$  و خاک نرم  $\Delta\sigma_{v,s}$ ، می توان بیان کرد:

$$\Delta\sigma \cdot A_E = \Delta\sigma_{v,c} \cdot A_c + \Delta\sigma_{v,s} \cdot (A_E - A_c)$$

تنش های عمودی به سبب بارگذاری و وزن های خاک مختلف، و با فرض  $\sigma_{v,0,s}$  و  $\sigma_{v,0,c}$  تنش های عمودی اولیه ستون و خاک، تنش های افقی به صورت زیر حاصل خواهد شد (اگر روش خاکبردای استفاده شود،  $K_{0,s}$  باید جایگزین  $K_{0,s}$  شود):

$$\sigma_{h,c} = \Delta\sigma_{v,c} \cdot K_{a,c} + \sigma_{v,0,c} \cdot K_{a,c}$$

$$\sigma_{h,s} = \Delta\sigma_{v,s} \cdot K_{0,s} + \sigma_{v,0,s} \cdot K_{0,s}^*$$

با فرض رفتار الاستیک خطی برای روکش ژئوتکتستایل (با شعاع  $r_{gro}$ )، نیروی کشش حلقوی در روکش به صورت تابعی از کرنش جانبی و سختی ژئوتکتستایل ( $J$ )، از رابطه ی زیر محاسبه کرد:

$$F_R = J \cdot \Delta r_{geo} / r_{geo} \quad ; \quad J = E_{geo} \cdot t$$

$E_{geo}$  مدول الاستیسیته روکش و  $t$  ضخامت آن می باشد. نیروی کشش حلقوی  $F_R$  را می توان به تنش افقی  $\sigma_{h,geo}$  که به ژئوتکتستایل اختصاص یافته، تبدیل کرد:

$$\sigma_{h,geo} = F_R / r_{geo}$$

با استفاده از تنش های افقی مستقل می توان یک تنش دیفرانسیلی افقی تعریف کرد، که مستقیماً بر خاک اطراف وارد شده و منجر به تغییر شکل های افقی و در نهایت فشار مقاوم در خاک می شود، که این تنش از رابطه زیر بدست می آید:

$$\sigma_{h,diff} = \sigma_{h,c} - (\sigma_{h,s} + \sigma_{h,geo})$$

تفاضل تنش منجر به انبساط ستون می شود. تغییر شکل جانبی  $\Delta r_c$  و نشست خاک نرم اطراف ستون سنگی  $S_s$  بر طبق یافته های (Ghionna & Jamiolkowski, 1981) محاسبه می شوند. با فرض نشست برابر ستون و خاک نرم، می توان مقادیر  $\Delta \sigma_{v,s}$  و  $\Delta r_c$  را بدست آورد:

$$\left\{ \frac{\Delta \sigma_{v,s}}{E_{oed,s}} - \frac{2}{E^*} \cdot \frac{v_s}{1-v_s} \left[ K_{a,c} \cdot \left( \frac{1}{a_E} \cdot \Delta \sigma - \frac{1-a_E}{a_E} \cdot \Delta \sigma_{v,s} + \sigma_{v,0,c} \right) - K_{0,s} \cdot \Delta \sigma_{v,s} - K_{0,s}^* \cdot \sigma_{v,0,s} + \frac{(r_{geo} - r_c) \cdot J}{r_{geo}^2} - \frac{\Delta r_c \cdot J}{r_{geo}^2} \right] \right\} \cdot h = \left[ 1 - \frac{r_c^2}{(r_c + \Delta r_c)^2} \right] \cdot h$$

$$\Delta r_c = \frac{K_{a,c} \cdot \left( \frac{1}{a_E} \cdot \Delta \sigma - \frac{1-a_E}{a_E} \cdot \Delta \sigma_{v,s} + \sigma_{v,0,c} \right) - K_{0,s} \cdot \Delta \sigma_{v,s} - K_{0,s}^* \cdot \sigma_{v,0,s} + \frac{(r_{geo} - r_c) \cdot J}{r_{geo}^2}}{\frac{E^*}{(1/a_E - 1) \cdot r_c} + \frac{J}{r_{geo}^2}}$$

$$E^* = \left( \frac{1}{1-v_s} + \frac{1}{1+v_s} \cdot \frac{1}{a_E} \right) \cdot \frac{(1+v_s) \cdot (1-2v_s)}{(1-v_s)} \cdot E_{\text{oed},s}$$

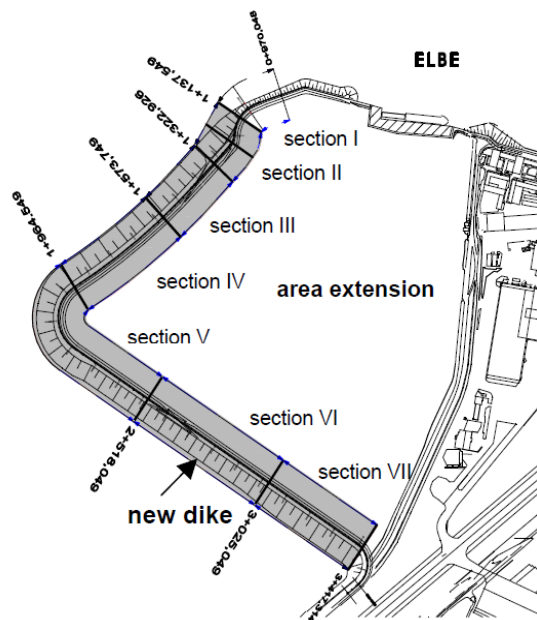
استفاده از ستون سنگی در تقویت باربری زمین - یک مطالعه موردی

پروژه و شرایط خاک

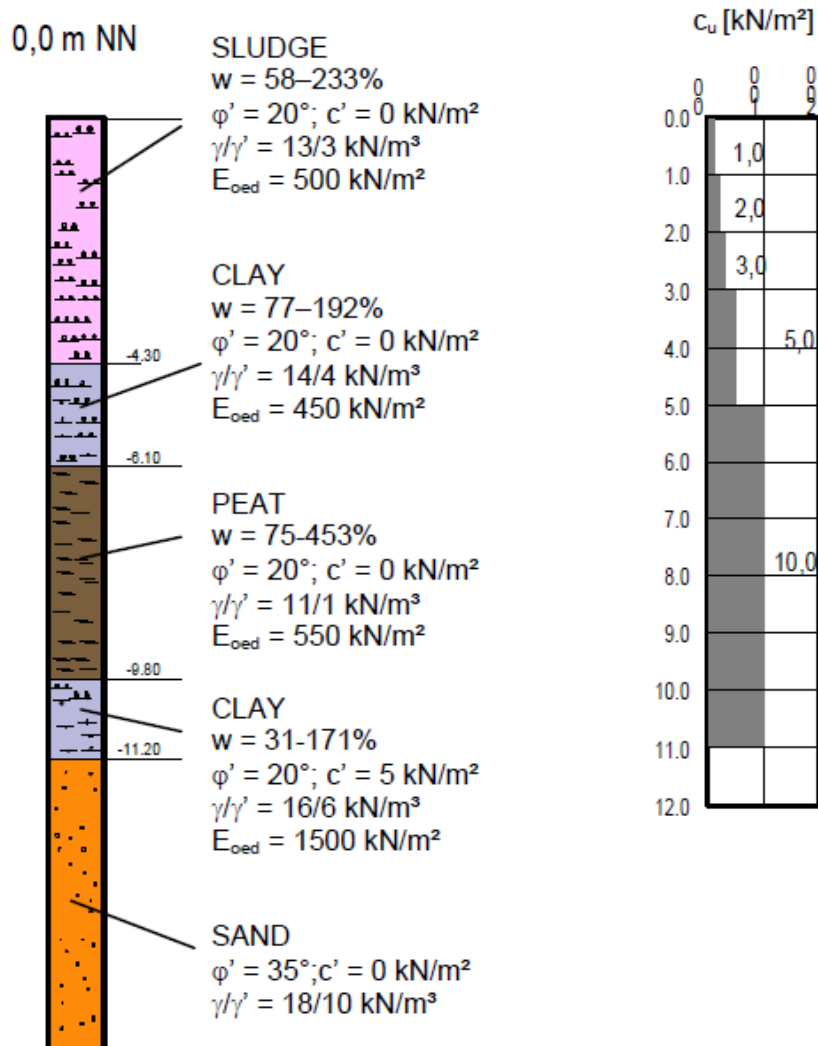
- ✓ یک سیستم پی جدید "ستون روکش شده با ژئوتکستایل" برای پی یک خاکریز بر روی رسوب گل و لای ضخیم (لجن) بسیار نرم برای احیای زمین نزدیک رودخانه البه در هامبورگ، آلمان اجرا شد.
- ✓ مقاومت برشی زهکشی نشده خاک نرم ( $c_u$ ) بین ۰.۴ تا ۱۰  $\text{kN/m}^2$  است. به این دلیل بهبود زمین با شمع های جابجایی لرزشی یا شمع دانه ای ممکن نیست.



راه کار برای اصلاح زمین به وسیله ساخت خاکریز



شکل ۱۴- پروفیل مقاومت برشی زهکشی نشده خاک نرم و نوع ترکیبات خاک در این پروژه را نشان می دهد.

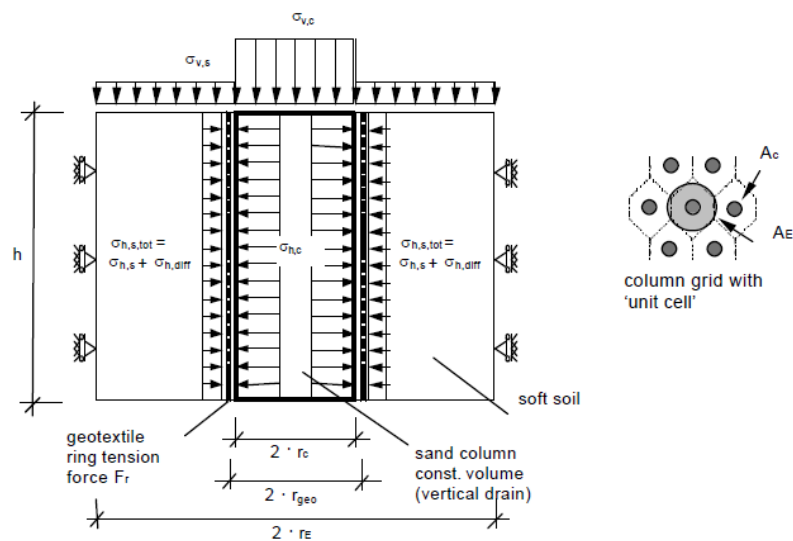


## طراحی

به طور کلی، مدل تحلیلی، محوری متقارن (با توجه به مفهوم سلول واحد، شکل ۱۵) برای محاسبه و طراحی شالوده ستون روکش شده با ژئوتکستایل استفاده شده است. با فرض نشست برابر ستون و خاک نرم به معادله زیر می توان دست یافت. تغییر شکل افقی  $\Delta r_c$  و نشست خاک نرم بر اساس Jamiolkowski و Ghionna محاسبه شده اند.

$$\Delta r_c = \frac{K_{a,c} \cdot \left( \frac{1}{a_E} \cdot \Delta \sigma - \frac{1-a_E}{a_E} \cdot \Delta \sigma_{v,s} + \sigma_{v,0,c} \right) - K_{0,s} \cdot \Delta \sigma_{v,s} - K_{0,s}^* \cdot \sigma_{v,0,s} + \frac{(r_{geo} - r_c) \cdot J}{r_{geo}^2}}{\frac{E^*}{(1/a_E - 1) \cdot r_c} + \frac{J}{r_{geo}^2}}$$

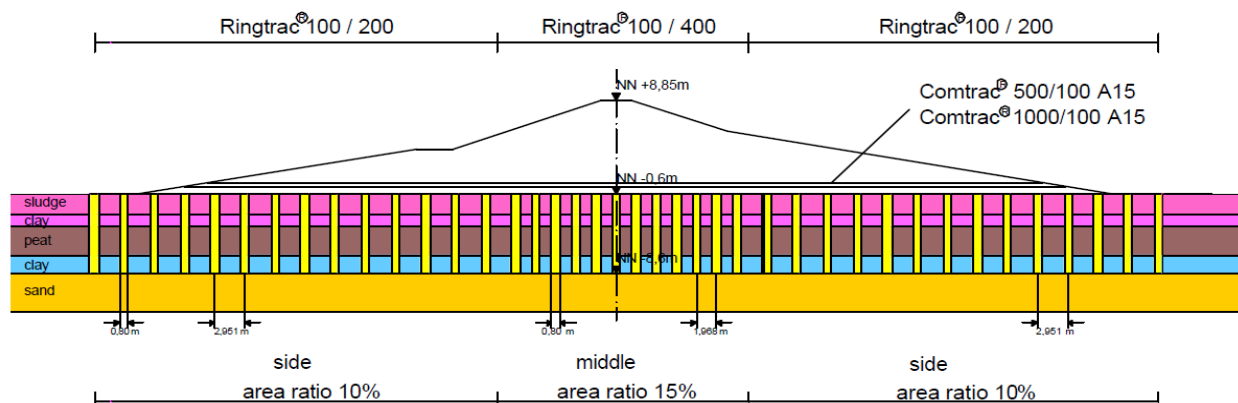
$$\text{with } E^* = \left( \frac{1}{1-\nu_s} + \frac{1}{1+\nu_s} \cdot \frac{1}{a_E} \right) \cdot \frac{(1+\nu_s) \cdot (1-2\nu_s)}{(1-\nu_s)} \cdot E_{oed,s}$$



شکل ۱۵- مدل محاسباتی ستون ماسه ای روکشی با ژئوتکستایل

### نتایج طراحی

- ✓ حدود ۶۰۰۰۰ ستون ماسه ای روکش شده با ژئوتکستایل با قطر ۸۰ cm استفاده شد.
- ✓ طول ستون ها بسته به عمق خاک نرم در طول خاکریز بین ۴ و ۱۴ متر می باشد.
- ✓ از سختی روکش ژئوتکستایل بین ۱۷۰۰ تا ۲۸۰۰ kN/m بود.
- ✓ حداکثر نیروی کششی بالا ژئوتکستایل بین ۱۰۰ و ۴۰۰ kN/m در طول مقطع خاکریز تغییر می کند.
- ✓ در این پروژه نسبت سطح ستون Ac به سطح موثر Ae بین ۱۰ تا ۲۰ درصد می باشد.



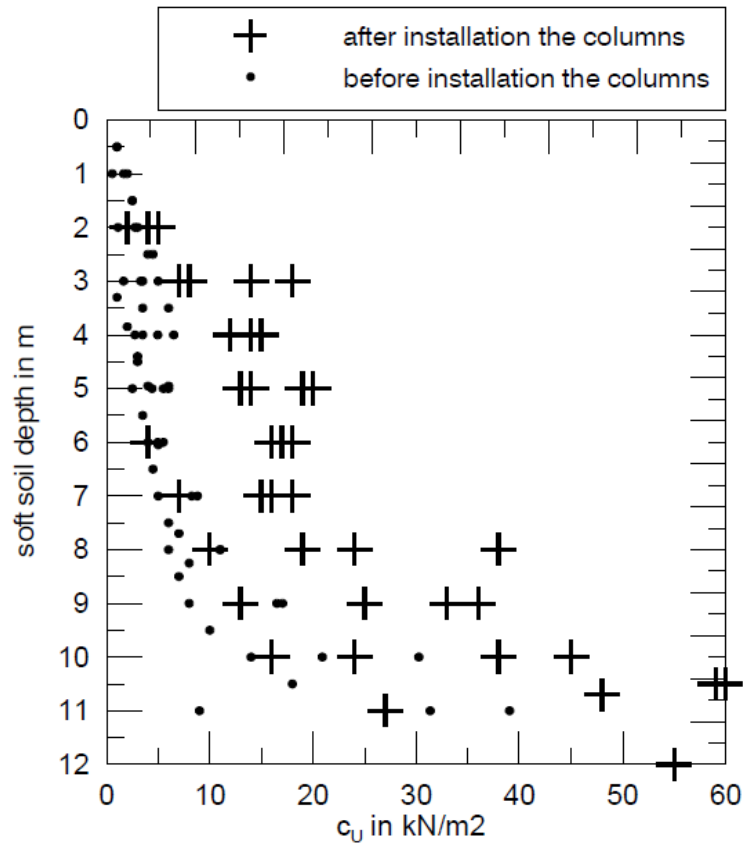
شکل ۱۶- مقطع عرضی ( برای مثال در نیمرخ ۵)



شکل ۱۷- نصب و راه اندازی به روش جابجایی ارتعاشی بواسطه اسکله شناور دور از ساحل

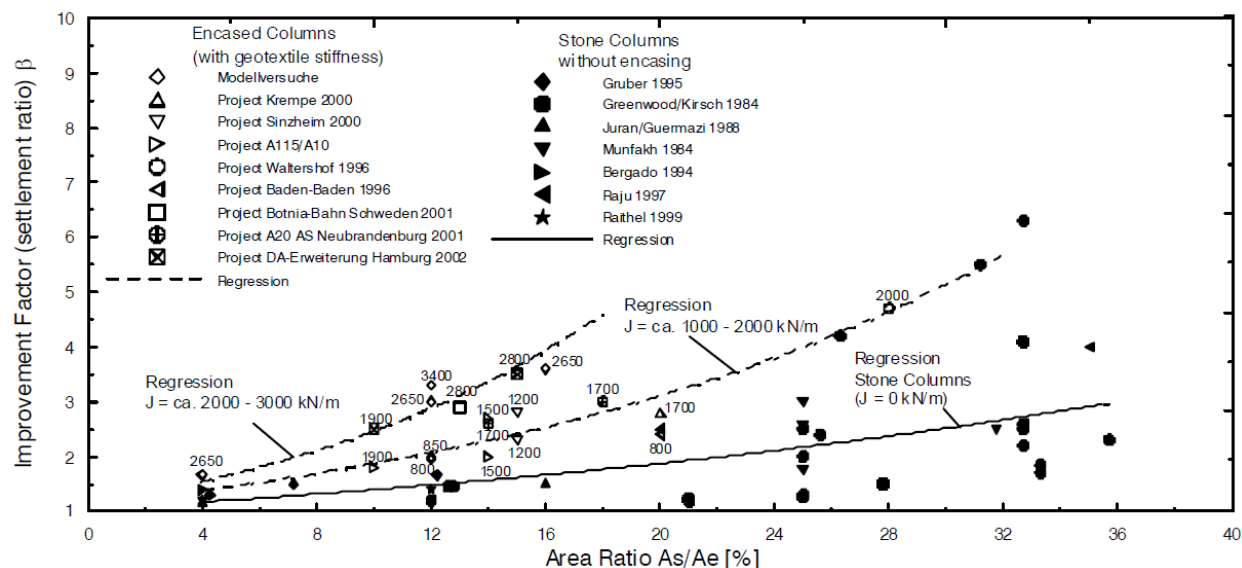


شکل ۱۸- ستون نصب شده پس از کشیدن لوله های فولادی تحت ارتعاش



شکل ۱۹- افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده در خاک نرم در بین ستون ها در مقایسه با قبل و پس از نصب ستون

برای ارزیابی اثربخشی از ستون ها روکشی در ارتباط با پایه های ستون مرسوم، نتایج آزمون های (Raithel ۱۹۹۹) و پروژه ها اجرا شده در مقایسه با نتایج منتشر شده از پایه های ستون سنگی در شکل ۲۲ نشان داده است. فاکتور های بهبود خاک عموماً در بالای منحنی رگرسیون به نمایندگی از ستون های سنگی واقع شده و افزایش قابل توجهی با افزایش سختی روکش نشان می دهد.



شکل ۲۰- عوامل بهبود خاک با توجه به نسبت مساحت جایگزینی

#### منابع و مأخذ:

١ Ground Improvement Technical Summaries, (2001), Vol. 2, by Elias, V., Welsh, J., Warren, J., Lukas, R., FHWA-SA- 98-086R.

٢ Hughes, J.M.O., Withers, N.J., and Greenwood, D.A. (1975) "A field trial of the reinforcing effect of a stone column in soil." *Geotechnique*, 25(1), p 31-44.

٣ McKenna JM, Eyre WA, Wolstenholme DR. (1975) Performance of an embankment supported by stone columns in soft ground. *Geotechnique* 25(1): 51-59

٤ Madhav, M.R., and Vitkar, P.P. (1978) "Strip footing on weak clay stabilized with granular trench." *Canadian Geotechnical Journal*, 15(4), p 605-609.

٥ Aboshi, H., Ichimoto, E., Enoki, M. and Harada, K. (1979) "The composer-a method to improve characteristics of soft clay by inclusion of large diameter sand columns." *Proceedings of the International Conference on Soil Reinforcement* Paris, Vol. 1, p 211-216

٦ Madhav, M.R., and Miura, N. (1994) "Soil improvement Panel report on stone columns." *Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, India, Vol. 5, p 163-164.

٧ Chummar, AV. (2000) Ground improvement using stone columns: problems encountered. *An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering. Geo Eng. Melbourne, Australia*

<sup>^</sup> Alexiew D., Brokemper D. and Lothspeich S (2005), Geotextile Encased Columns (GEC): Load Capacity, Geotextile Selection and Pre-Design Graphs, *GSP 131 Contemporary Issues in Foundation Engineering*, pp 1-14.

<sup>^</sup> Murugesan S. and. Rajagopal K (2006), Geosynthetic-Encased Stone Columns: Numerical evaluation, *Geotextiles and Geomembranes*, 24, pp 349–358.