دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده: **عمران و محیط زیست**

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته تحصیلی: **خاک و پی**

عنوان

تحلیل عددی رفتار مکانیکی زمین‌های تقویت شده با ستون‌های سنگی

استاد راهنما

عباس سروش

دانشجو

سعیده تبرساز

بسمه تعالی

فرم اطلاعات پایان‌نامه

کارشناسی ارشد و دکترا

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

معاونت پژوهشی

تاریخ:.....

پیوست:.....

نام و نام‌خانوادگی: سعیده تبرساز **دانشجوی:** آزاد (■) بورسیه (□) معادل (□)

شماره دانشجویی: ۸۴۱۲۴۰۲۳ **دانشکده:** عمران و محیط‌زیست **رشته تحصیلی:** خاک و پی

نام و نام‌خانوادگی استاد راهنما: عباس سروش

عنوان پایان‌نامه به فارسی: تحلیل عددی رفتار مکانیکی زمین‌های تقویت شده با ستون‌های سنگی

عنوان پایان‌نامه به انگلیسی:

Numerical Analyses of Mechanical Behavior of Reinforced soils with Stone Columns

نوع پروژه: کارشناسی ارشد (■) کاربردی (■) بنیادی (□) توسعه‌ای (□) نظری (□)

دکتـــــــرا (□)

تاریخ شروع: ۸۵/۷/۱ **تاریخ خاتمه:** ۸۷/۱/۲۴ **تعداد واحد:** ۶

سازمان تأمین کننده اعتبار:

واژه‌های کلیدی به فارسی:

گروه ستون سنگی، ستون سنگی منفرد، تحلیل عددی، بهسازی زمین‌های سست، نشست، ظرفیت باربری

واژه‌های کلیدی به انگلیسی:

Stone column group, single stone column, numerical analyses, improvement of soft ground, settlement, bearing capacity

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه:

استاد راهنما:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما: **تاریخ:**

نسخه ۱: معاونت پژوهشی

نسخه ۲: کتابخانه و به انضمام دو جلد پایان‌نامه به منظور تسویه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

چکیده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان :

تحلیل عددی رفتار مکانیکی زمین‌های تقویت شده با ستون‌های سنگی

ارائه شده توسط سعیده تبرسلز **شماره دانشجویی** ۸۴۱۲۴۰۲۳ **گرایش** خاک و پی

استاد راهنما : عباس سروش **تاریخ تحویل :** ۱۳۸۷/۱/۲۴

یکی از روش‌های بهسازی زمین ساخت ستون‌های سنگی در زمین‌های سست است که روشی مؤثر و سازگار با محیط‌زیست می‌باشد که امروزه به‌طور گسترده به منظور افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست‌های کلی و تفاضلی، کاهش پتانسیل روانگرایی و افزایش سرعت تحکیم، مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا شناخت هرچه بیشتر نحوه عملکرد و تأثیرات ستون‌های سنگی با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی و یا با استفاده از روش‌های تحلیل عددی حائز اهمیت می‌باشد.

در این پایان‌نامه با استفاده از مدلسازی عددی به بررسی رفتار ستون سنگی منفرد و گروه ستون‌های سنگی به صورت دوبعدی و کرنش صفحه‌ای، و تأثیر آن بر نشست زمین تقویت‌شده با ستون‌های سنگی پرداخته شده است. ابتدا رفتار ستون سنگی منفرد به صورت الاستیک و سپس رفتار الاستوپلاستیک زمین مسلح شده با ستون سنگی منفرد بررسی شده و اثر پارامترهای متعدد همچون قطر ستون، طول ستون، نسبت مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی به مدول الاستیسیته خاک اطراف، ضریب پواسون خاک و بعد پی بر رفتار آن، مورد مطالعه قرار گرفته است. در بررسی رفتار الاستوپلاستیک، مدل مور-کولمب برای مصالح ستون سنگی و خاک اطراف آن انتخاب شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که افزایش قطر ستون سنگی به علت جایگزینی بیشتر خاک سست با مصالح سنگی نامناسب، افزایش اندازه پی به علت تحمل بخشی از بار اعمال شده توسط خاک، افزایش نسبت مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی نسبت به مدول الاستیسیته خاک در صورتی که مدول الاستیسیته خاک ثابت باشد و افزایش طول ستون سنگی می‌تواند منجر به کاهش نشست زمین مسلح شده با ستون سنگی منفرد با رفتار الاستوپلاستیک شود. همچنین با افزایش ضریب پواسون خاک به علت عدم بالازدگی خاک در سطح و ثابت بودن حجم خاک، تنش‌های خاک افزایش می‌یابد که افزایش تنش‌های خاک منجر به کاهش تغییرشکل‌های ستون شده و نشست آن کاهش می‌یابد. در تحلیل‌های بخش الاستیک نیز نتایج مشابهی حاصل شده است هرچند میزان نشست‌ها به طور کلی بسیار کمتر از حالت الاستوپلاستیک بوده و با افزایش قطر ستون و اندازه پی افزایش نشست مشاهده شده است.

سپس گروه ستون‌های سنگی با رفتار الاستوپلاستیک مورد مطالعه قرار گرفته و اثر پارامترهای مختلف بر آن بررسی شده است. مدل مور-کولمب انتخاب شده برای مصالح ستون‌های سنگی و خاک اطراف آن، نتایج قابل قبولی را با مقایسه با نتایج آزمایش‌های انجام شده، نشان می‌دهد. نتایج حاصل حاکی از آن است که افزایش نسبت مدول الاستیسیته مصالح سنگی به

مدول الاستیسیته خاک اطراف آن در صورتی که مدول الاستیسیته خاک ثابت باشد، افزایش قطر ستون، افزایش طول ستون و افزایش عرض پی می‌تواند باعث کاهش نشست زمین‌های تقویت‌شده با ستون‌های سنگی شود. در مورد گروه ستون‌های سنگی علاوه بر عوامل فوق، کاهش فاصله ستون‌ها تا حد امکان و افزایش تعداد ستون‌های سنگی نیز می‌تواند در کاهش نشست زمین‌های تقویت‌شده با ستون‌های سنگی مؤثر باشد. افزایش ضریب پواسون خاک و مصالح ستون سنگی نیز در کاهش نشست مؤثر می‌باشند هرچند تأثیر ضریب پواسون ستون سنگی اندک است. در بررسی اثرات تغییر طول ستون‌ها بر نشست زمین مسلح شده با ستون‌های سنگی، نتایج حاکی از آن است که افزایش طول ستون از بیش از ۶ متر تأثیر اندکی در کاهش نشست دارد که این مسأله می‌تواند منجر به ایجاد گروه ستون‌های سنگی با طول‌های نابرابر شود تا علاوه بر صرفه اقتصادی، هدف از ساخت ستون‌های سنگی را در کاهش نشست زمین تأمین نماید.

کلمات کلیدی : گروه ستون سنگی، ستون سنگی منفرد، تحلیل عددی، بهسازی زمین‌های سست، نشست، ظرفیت باربری

فهرست مطالب

فصل اول 4
کلیات 4
1-1- مقدمه 4
1-2- ضرورت تحقیق 5
1-3- سابقه تحقیق 5
1-4- اهداف تحقیق 6
1-5- ساختار پایان نامه 6
فصل دوم 7
ستون سنگی 7
2-1- مقدمه 7
2-2- ستونهای سنگی 8
2-3- ساخت ستونهای سنگی 9
2-4-کنترل کیفیت ساخت ستون های سنگی 12
2-5- مکانیزم اجرا 14
2-6- کاربردهای ستونهای سنگی 17
فصل سوم 22
تحلیل و طراحی ستون های سنگی با نگاهی به کارهای گذشته 22
3-1- الگوی ساخت ستون های سنگی 22
3-2- مدلسازی ستونهای سنگی 23
3-2-1- روش سلول واحد 23
الف- مفهوم سلول واحد 23
ب- سلول واحد تعمیم یافته 26
پ- سلول واحد ایده آل 26
3-2-2- تکنیکهای یکنواخت سازی 27
3-3- مکانیزمهای گسیختگی 27
3-4- توزیع تنش در زمینهای مسلح شده با ستونهای سنگی 35
3-4-1- تعریف توزیع تنش 35
3-4-2- ستون منفرد 35
3-4-3- گروه ستون های سنگی (با اندازه محدود) 37
3-5- تحلیل ستونهای سنگی 37
3-5-1-ستون سنگی بلند 37
الف- تئوری انبساط حفره 39
ب- تئوری استوانه منبسط شونده وسیک 40
3-5-2- ستون سنگی کوتاه 44
3-5-3- گروه ستون های سنگی 45
3-6- محاسبات نشست 49

3-6-1- روشهای تقریبی 49
الف- روش تعادل 49
ب- روش Priebe 53
پ- روش Greenwood 53
پ-روش افزایشی 54
3-6-2- روش اجزاء محدود 55
3-6-3- محاسبات نشست تحکیمی 59
الف- تحکیم اولیه 59
ب- تراکم ثانویه 61
3-7- تحلیل پایداری شیبها 61
3-7-1- روش پروفیل 62
3-7-2- روش مقاومت برشی میانگین 62
3-7-3- روش ممان نقطه ای 63
فصل چهارم 64
معرفی و کنترل نرم افزار ABAQUS 64
4-1- مقدمه 64
4-2- تحلیل الاستیک خطی تیر طره 65
4-3- کنترل گزینه حذف و ایجاد المان 68
4-3-1- مدل ساده 69
4-3-2- سد خاکی 72
فصل پنجم 76
تحلیل ستون سنگی منفرد 76
5-1- مقدمه 76
5-2- تحلیل الاستیک ستون سنگی منفرد 77
5-2-1- اثرات ساخت ستون سنگی در زمین سست 77
5-2-2- اثرات نسبت مدول الاستیسیته ستون سنگی به مدول الاستیسیته خاک اطراف 80
5-2-3- اثرات طول ستون 87
5-2-4- اثرات اندازه پی 89
5-2-5- اثرات ضریب پواسون خاک (n_C) 91
5-3- تحلیل الاستو-پلاستیک ستون سنگی منفرد 93
5-3-1- اثرات ساخت ستون سنگی 93
5-3-2- تغییرشکل ستون سنگی منفرد 94
5-3-3- اثرات طول ستون 97
5-3-4- اثرات نسبت مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی به مدول الاستیسیته خاک 99
5-3-5- اثرات قطر ستون 104
5-3-6- اثرات اندازه پی 107
5-4- بررسی نتایج حاصل از تحلیل الاستیک و الاستوپلاستیک 111

فصل ششم 113
تحلیل گروه ستونهای سنگی 113
6-1- مقدمه 113
6-2- اثرات ساخت ستون سنگی 117
6-3- اثرات نسبت مدول الاستیسیته ستون سنگی به مدول الاستیسیته خاک 119
6-4- اثرات فاصله ستونهای سنگی 124
6-5- اثرات تعداد ستونهای سنگی 126
6-6- اثرات ضریب پواسون 128
6-7- اثرات اندازه پی 131
6-8- اثرات طول ستون 133
6-9- بررسی نتایج 140
فصل هفتم 144
نتیجه گیری و پیشنهادات 144
7-1- نتیجه گیری 144
7-2- پیشنهادات 146
منابع و مراجع 147
پیوست 1 152
نتایج تحلیل ستون سنگی منفرد 152
پیوست 2 163
نتایج تحلیل گروه ستونهای سنگی 163

فصل اول

کلیات

1-1- مقدمه

پس از آنکه زمین‌های مناسب برای ساخت سازه‌های مختلف کاهش یافت و استفاده از زمین‌های سست به عنوان تکیه‌گاه پی انواع سازه‌ها و خاکریزها مطرح شد، بهسازی خواص خاک نامناسب به منظور اطمینان از پایداری در مقابل انواع حفاری‌ها و افزایش مقاومت آن در مقابل بارهای زلزله و یا هر نوع بار دیگری لازم گردید. بنابراین تکنیک‌های بهسازی خاک با سرعت زیادی در چندین سال اخیر گسترش و توسعه یافت. تعدادی از این روش‌ها برای بهسازی خاک عبارتند از: تراکم، تحکیم، تزریق، مسلح کردن و ساخت ستون‌های سنگی که در واقع نوعی مسلح سازی خاک ضعیف می‌باشد. توانایی هرکدام از این روش‌ها در اصلاح خصوصیات خاک بستگی به عوامل متعددی از جمله نوع خاک، درجه اشباع، سطح آب زیرزمینی، دانسیته نسبی اولیه، تنش‌های اولیه برجا، ساختار اولیه خاک و از همه مهمتر ویژگی‌های روش مورد استفاده برای اصلاح خاک دارد.

در اکثر مواقع هدف از بهسازی خاک افزایش مقاومت برشی و ظرفیت باربری، افزایش پایداری و کنترل نشست می‌باشد. ستون‌های سنگی یکی از روش‌هایی است که به منظور اصلاح خاک‌های سست و ریزدانه استفاده می‌شود. ساخت ستون‌های سنگی در خاک‌های سست سبب افزایش مقاومت و ظرفیت باربری این نوع خاک‌ها همچنین کاهش نشست‌های آنها می‌شود.

همچنین ستون‌های سنگی در خاک‌های رسی اشباع همانند یک سیستم زهکشی عمل می‌کنند و سبب کاهش زمان تحکیم این نوع خاک‌ها می‌شوند. این نوع ستون‌ها در خاک‌های سست و اشباع غیرچسبنده نیز به صورت سیستم زهکشی عمل می‌کنند که با کاهش مسیر زهکشی، سبب کاهش احتمال وقوع روانگرایی می‌شوند.
ستون‌های سنگی در خاک‌های تراکم‌پذیر و سست تا حدی شبیه شمع‌ها عمل می‌کنند با این تفاوت که سر شمع، اتصالات سازه‌ای و همچنین نفوذ عمیق تا رسیدن به لایه مستحکم را نیاز ندارند و البته که نسبت به شمع‌ها، سازگارتر با محیط زیست و انعطاف‌پذیرترند.

1-2- ضرورت تحقیق

یکی از این روش‌های اصلاح زمین‌های نامناسب که امروزه بسیار پرکاربرد می‌باشد، ساخت ستون‌های سنگی است و چندین سال است که در ایران تکنیک‌های ارتعاشی ساخت این نوع ستون‌ها، اجرا شده و سرعت کار را تا حد مطلوبی افزایش داده است. لذا شناخت دقیق عملکرد این نوع ستون‌ها و تأثیر پارامترهای مؤثر بر رفتار زمین‌های مسلح شده با ستون‌های سنگی حائز اهمیت می‌باشد. تحلیل عددی زمین تقویت شده با ستون‌های سنگی، دید کلی در مورد نحوه عملکرد آنها ارائه می‌دهد.

1-3- سابقه تحقیق

با توجه به اینکه بهسازی زمین با استفاده از ستون‌های سنگی روشی اقتصادی، سازگار با محیط‌زیست و مؤثر می‌باشد، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه رفتار ستون‌های سنگی انجام شده است. تحقیق حاضر در زمینه بررسی رفتار مکانیکی زمین‌های مسلح شده با ستون‌های سنگی و به طور خاص اثر ساخت این ستون‌ها در نشست زمین و تأثیر پارامترهای مختلف بر آن با استفاده از تحلیل عددی انجام گردیده است.

1-4- اهداف تحقیق

هدف از انجام این پایان‌نامه مطالعه رفتار زمین‌های مسلح شده با ستون‌های سنگی با استفاده از تحلیل عددی می‌باشد که ابتدا رفتار الاستیک و الاستوپلاستیک ستون سنگی منفرد مورد بررسی قرار گرفته و سپس رفتار الاستوپلاستیک گروهی از ستون‌های سنگی بررسی می‌شود. در هر کدام از بخش‌های فوق اثر پارامترهای مختلف مثل نسبت مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی به مدول الاستیسیته خاک اطراف آن، طول ستون، قطر ستون، بعد پی و ضریب پواسون خاک نیز مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در بخش تحلیل گروه ستون علاوه بر پارامترهای فوق اثر تعداد ستون‌های سنگی، فاصله آنها از یکدیگر و ضریب پواسون مصالح ستون سنگی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

1-5- ساختار پایان نامه

پس از فصل فعلی، در فصل دوم خلاصه‌ای در مورد ستون‌های سنگی و روش‌های ساخت آنها به منظور آشنایی خوانندگان با این روش بهسازی زمین، توضیح داده می‌شود. در فصل سوم تحلیل و طراحی ستون‌های سنگی، با توجه به مطالعات و تحقیقات پیشین ارائه می‌شود. در فصل چهارم نرم افزار ABAQUS معرفی و صحت عملکرد آن با استفاده از مثال‌های مختلف بررسی می‌شود. فصل پنجم به بررسی رفتار الاستیک و الاستوپلاستیک زمین مسلح شده با یک ستون سنگی منفرد و اثر پارامترهای مختلف بر آن، اختصاص دارد. در فصل ششم رفتار الاستوپلاستیک زمین مسلح شده با گروه ستون‌های سنگی مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر پارامترهای مختلف بر آن مطالعه می‌شود و نهایتاً نتایج به‌دست آمده از این پایان‌نامه در فصل هفتم، جمع‌بندی و ارائه می‌شود.

فصل دوم

ستون سنگی

2-1- مقدمه

خاک طبیعی موجود در محل عملیات ساختمانی، همواره برای تحمل سازه موردنظر به طور کامل مناسب نمی‌باشد. به عنوان مثال در نهشته‌های دانه‌ای، خاک طبیعی ممکن است خیلی شل باشد و نشست زیادی از خود نشان دهد. در چنین حالتی لازم است قبل از احداث سازه، خاک متراکم شود تا وزن مخصوص و در نتیجه مقاومت برشی آن افزایش یابد.

گاهی مواقع لایه فوقانی خاک نامطلوب است و باید برداشته شده و با خاکی با کیفیت بهتر، که قادر است بار شالوده را تحمل نماید، عوض گردد. خاکی که از آن به عنوان خاکریز استفاده می‌شود، برای رسیدن به استحکام کافی، باید متراکم شود. همچنین در مناطق پست برای افزایش ارتفاع زمین، خاکریزی و تراکم لازم می‌گردد.

گاهی مواقع در اعماق کم، به لایه‌های نرم و اشباع رس برخورد می‌شود که بر حسب بار پی و ضخامت لایه رسی، ممکن است نشست‌های قابل توجهی در سازه بوجود آید. برای جلوگیری از چنین نشست‌هایی، لازم است تکنیک‌های خاصی برای بهبود وضعیت خاک به‌کار گرفته شود.

همه موارد فوق که به نوعی شامل بهسازی زمین می‌شوند، به علت کاهش زمین‌های مناسب، افزایش پیوسته ارزش زمین، گسترش ساخت و ساز در زمین‌های ساحلی، افزایش قیمت اجرای فونداسیون‌های رایج در زمین‌های سست و

محدودیت‌های متعدد محیط‌زیستی می‌باشد. به این دلایل و سایر عوامل دیگر، تکنیک‌های مختلف بهسازی زمین، که از نظر عملی، اقتصادی و محیط‌زیستی قابل قبول می‌باشند، گسترش یافته و مورد استفاده قرار می‌گیرند.

این تکنیک‌ها عبارتند از:

تراکم دینامیکی

پیش‌بارگذاری

زهکش‌های قائم

تکنیک‌های ارتعاشی (ستون‌های سنگی)

ستون‌های بتنی ارتعاشی

تزریق

اختلاط عمیق خاک

استفاده از ژئوسینتتیک‌ها

که مشخصات، مزایا و معایب هر کدام از این روش‌ها در جدول 1-2 آورده شده‌اند.

از بین روش‌های فوق، با توجه به هدف تحقیق حاضر، در مورد ستون‌های سنگی بیشتر توضیح داده می‌شود.

2-2- ستون‌های سنگی

استفاده از ستون‌های سنگی روشی اقتصادی، مؤثر و سازگار با محیط‌زیست می‌باشد که سال‌هاست از آن به منظور بهسازی زمین‌های رسی و سیلتی نرم، همچنین زمین‌های ماسه‌ای سیلت‌دار سست استفاده می‌شود. این روش اولین بار در فرانسه در سال 1830 به منظور اصلاح خاک طبیعی به کار گرفته شد. از سال 1972 در امریکا هم به طور محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد، در اروپا از قبل از 1950 به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. در ایران اولین بار در پروژه دانشکده مهندسی کشتی‌سازی بندرعباس به روش کوبیدنی (ramming method) اجرا شد[1] و از سال 1383 تجهیزات ارتعاشی برای اولین بار وارد ایران شده و هم‌اینک پروژه‌هایی با استفاده از این روش در حال اجرا می‌باشند.

[1] مجله راسخ، شماره 12، زمستان 1383

2-3- ساخت ستون‌های سنگی

بیش از 50 سال است که لرزاننده‌های عمیق برای بهبود ظرفیت باربری و خصوصیات نشست خاک‌های ضعیف مورد استفاده قرار می‌گیرند. از سال 1938 روشها و تجهیزاتی توسعه یافته‌اند که تراکم خاک‌های غیرچسبنده را جهت اجرا در اعماق بیش از 18 متر (60 فوت) با نتایج عالی فراهم می‌آورند. این روش ابتکاری در حال حاضر تراکم ارتعاشی نام دارد که به طور موفقیت‌آمیزی در نقاط مختلف دنیا به‌کار برده شده است.

توسعه روش‌ها و تکنیک‌های ساخت ستون‌های سنگی متراکم در اواخر دهه 1950، دامنه وسیعی از خاک‌های ضعیف و مصالح پرکننده مصنوعی را قادر به اصلاح و بهسازی کرده است. تکنیک ساخت ستون سنگی یا جایگزینی ارتعاشی، به طور وسیعی در اروپا برای بهسازی زمین ضعیف مورد استفاده قرار می‌گیرد، و ساخت ایمن و اقتصادی پروژه‌های خانه‌سازی، مخازن و انبارها، ساختمان‌های صنعتی کوچک و ساختمان‌های مشابه را فراهم می‌سازد. ساخت ساختمان‌های اصلی متعددی در آمریکا و اروپا با استفاده از این تکنیک‌ها، بر ارزششان درترویج فونداسیون‌های اقتصادی و ایمن در محدوده وسیعی از ساختمان‌ها و شرایط خاکی صحه می‌گذارد.

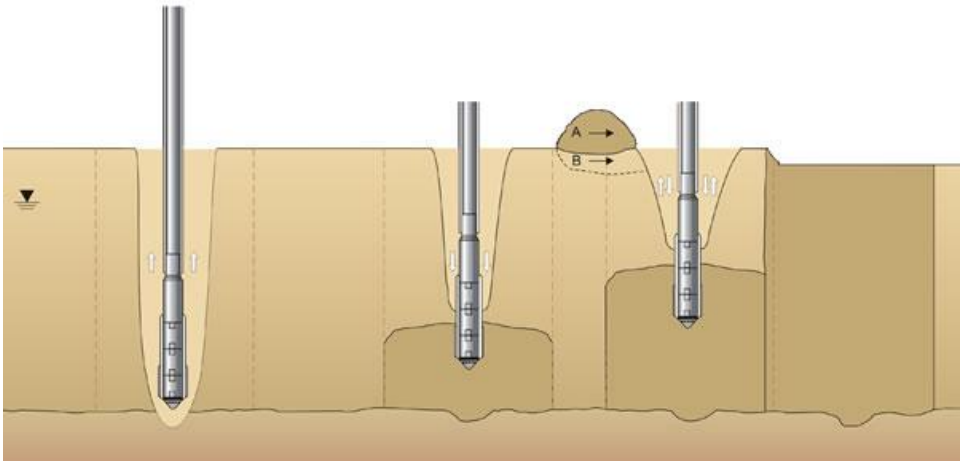
امروزه ساخت ستون‌های سنگی به دو روش عمده صورت می‌گیرد که به عنوان تکنیک‌های ارتعاشی معرفی می‌شوند. این روش‌ها شامل تراکم ارتعاشی (vibro compaction) و جایگزینی ارتعاشی (vibro replacement) می‌باشند.

این روش‌ها در خاک‌های غیرچسبنده شامل متراکم کردن خاک با استفاده از ویبراتورهای عمیق می‌باشد که به منظور کاهش نیروهای بین‌دانه‌ای می‌توان از جت آب نیز استفاده کرد و به دلیل اینکه شکل متراکم شده خاک شبیه یک ستون می‌باشد، به آن ستون سنگی می‌گویند. این روش تراکم ارتعاشی نامیده می‌شود. مراحل اجرای آن در شکل 2-1 نشان داده شده است.

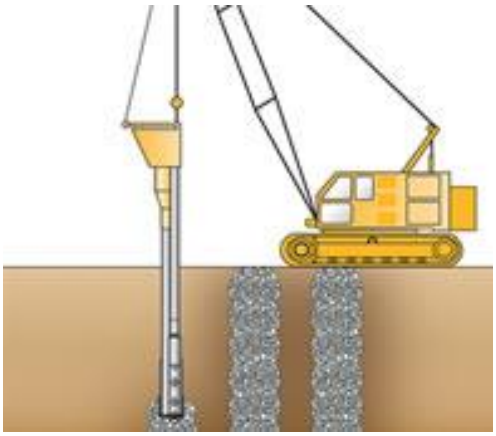
ساخت ستون‌های سنگی در خاک‌های چسبنده شامل جایگزینی بخشی از خاک نامناسب با ستونی از مصالح سنگی متراکم و مناسب می‌باشد. در این روش به وسیله نفوذ یک ویبراتور عمیق گمانه‌ای حفر شده و سپس همزمان با خروج ویبراتور از گمانه، مصالح سنگی مناسب به داخل گمانه ریخته شده و متراکم می‌شوند. در خاک‌های اشباع، از جت آب برای نفوذ ویبراتور استفاده می‌شود و ویبراتور به طور کامل یا جزئی از گمانه خارج شده و مصالح به داخل آن ریخته شده و متراکم می‌شوند. این روش به نام روش تر (wet top feed) معروف می‌باشد. در خاک‌های نیمه‌اشباع و ریزشی از جت آب استفاده نمی‌شود و گاهی از جت هوا به منظور تسریع نفوذ استفاده می‌شود و

همزمان با خروج ویبراتور از گمانه مصالح سنگی از طریق لوله متصل به ویبراتور به داخل گمانه ریخته شده و متراکم می‌شوند و این روش به عنوان روش خشک (dry bottom feed) معروف می‌باشد. این تکنیک‌ها از سال 1950 برای ساخت ستون‌های سنگی در خاک‌های ساحلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.شکل‌های 2-2 و 2-3 مراحل اجرای آنها را نشان می‌دهند.

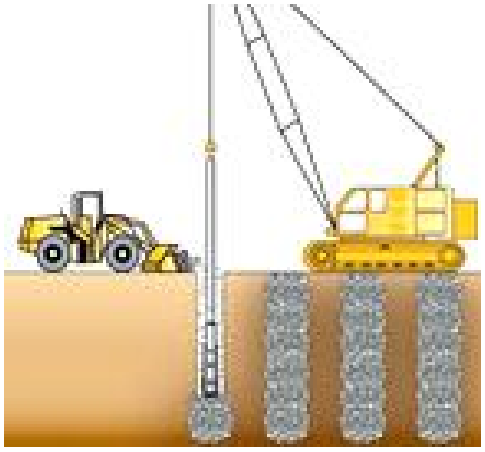
مصالح سنگی با استفاده از یک ویبراتور ارتعاشی که در سال 1935 برای تراکم خاک‌های غیرچسبنده دانه‌ای ایجاد شد، متراکم می‌شود [Steuerman, 1939]. چرخش وزنه‌های خارج از مرکز در درون ویبراتور به کمک نیروهای الکتریکی یا هیدرولیکی منجر به ارتعاشات جانبی ویبراتور می‌شود که این امر موجب نفوذ جانبی مصالح سنگی به داخل خاک می‌شود.



شکل 2-1 – روش تراکم ارتعاشی [HaywayBaker.com]



شکل2-2- روش خشک [HaywayBaker.com]

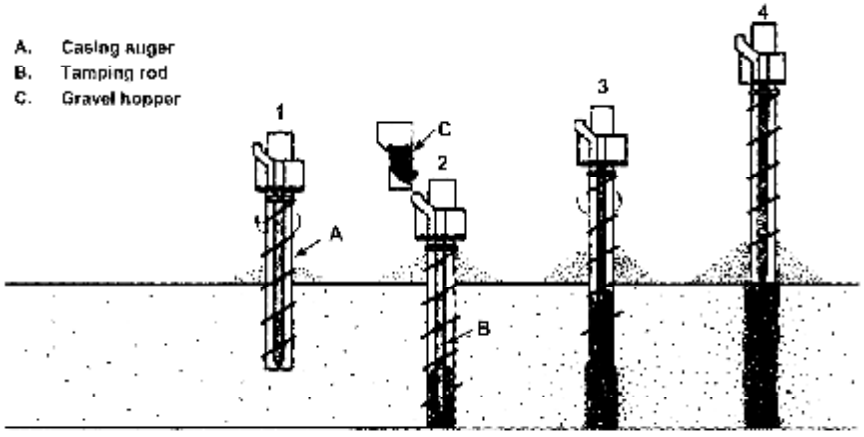


شکل 2-3- روش تر [HaywayBaker.com]

روش دیگر ساخت ستون‌های سنگی، استفاده از سیستم اوگر می‌باشد. این روش می‌تواند همراه با اندکی تراکم و یا بدون تراکم باشد. سیستم اوگری که در حال حاضر در ژاپن استفاده می‌شود، شامل یک میله داخلی جهت انتقال شن (و یا سنگ شکسته) به انتهای حفره ایجاد شده و میله تراکم می‌باشد. شیوه کار، همانطور که در شکل 2-4 آمده است، بدین صورت است که حفر گمانه توسط اوگر تا عمق موردنظر انجام می‌شود. همزمان با خروج اوگر از زمین، شن از طریق لوله داخلی به انتهای گمانه ایجاد شده توسط اوگر، انتقال یافته و به‌وسیله میله تراکم تا حدی متراکم می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان ستون سنگی با طول 20 متر را در کمتر از یک ساعت اجرا کرد.

یکی دیگر از روش‌های ساخت ستون سنگی که امروزه کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش کوبیدنی می‌باشد. در این روش با توجه به نوع خاک و شرایط زمین گمانه‌ای به صورت دستی و یا غیردستی حفر می‌شود. در روش غیر دستی، یک غلاف فولادی با انتهای باز یا بسته، تا عمق موردنظر کوبیده می‌شود. همزمان با خروج تدریجی غلاف از زمین به وسیله ارتعاش، مخلوط سنگ و ماسه بتدریج داخل گمانه ریخته شده و در هر مرحله به وسیله وزنه‌های سقوط‌کننده سنگین کوبیده می‌شوند. در روش دستی هم مراحل مشابه فوق می‌باشد با این تفاوت که در خاک‌های غیرریزشی، گمانه به صورت دستی حفر و سپس مخلوط سنگ و ماسه در طی چند مرحله به داخل گمانه ریخته شده و در هر مرحله کوبیده می‌شود.

با توجه به دست‌خوردگی خاک‌های حساس در اثر عمل کوبیدن و پیشرفت سایر تجهیزات ساخت ستون‌های سنگی، استفاده از این روش در دنیا محدود شده و امروزه کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل 2-4- ساخت ستون‌های شنی با استفاده از سیستم اوگر با میله داخلی انتقال سنگ و میله تراکم [Youd,1991]

2-4-کنترل کیفیت ساخت ستون های سنگی

امکان ساخت انواع ستونهای سنگی عمدتاً به توزیع اندازه دانه‌های خاک بستگی دارد. حدود انواع خاک قابل اصلاح توسط تراکم ارتعاشی و جایگزینی ارتعاشی در شکل 2-5 داده شده است. درجه بهسازی به عوامل و فاکتورهای زیادی بستگی دارد از جمله شرایط خاک، نوع تجهیزات، روش‌های اتخاذ شده و مهارت‌های پرسنل محل. این چنین متغیرهایی اجازه یک طراحی بهینه را از قبل نمی‌دهند و نیاز به تجربه عملی بیشتر و داوری و قضاوت درست و دقیق می‌باشد.

نتیجه فنی تراکم ارتعاشی به‌وسیله سطح تراکم حاصله در مقایسه با یک هدف معین اندازه‌گیری می‌شود. تراکم می‌تواند به‌راحتی و به‌سرعت با استفاده از آزمایشات نفوذ استاندارد (SPT) یا نفوذ مخروط (CPT) کنترل شود. مقایسه می‌تواند بین آزمایش‌های قبل و بعد از تراکم صورت گیرد، و باید اطمینان حاصل کرد که روش آزمایش در هر دو حالت یکسان می‌باشد.

درجه تراکم موردنیاز، نوع ویبراتور مورد استفاده، و سرعت عملیات، همگی روی فاصله پروب‌های تراکم ارتعاشی تاثیر می‌گذارند. سطح اصلاح شده توسط یک پروب معمولا" از 3 تا 10 مترمربع تغییر می‌کند. پیشرفت ویبراتور طی چندین دهه گذشته امکان افزایش قابل‌توجه در محدوده اصلاح شده توسط یک پروب را می‌دهد.

تراکم خاک با استفاده از تراکم ارتعاشی با افزایش مقدار ریزدانه‌های سیلتی و رسی بطور فزاینده‌ای دشوارتر می‌شود. از آنجائیکه مصالح پرکننده به ارسال و انتقال ارتعاشات به خاک کمک خواهد کرد، استفاده از مصالح پرکننده درشت‌دانه، می‌تواند دامنه خاک اصلاح شده را افزایش دهد. براون (1977) یک عدد تناسب (suitability number) برای درجه‌بندی مصالح پرکننده به صورت زیر معرفی کرد:

$$SN = 1.7\sqrt{{}^{3}\!/_{D_{50}{}^{2}} + {}^{1}\!/_{D_{20}{}^{2}} + {}^{1}\!/_{D_{10}{}^{2}}} \qquad (1\text{-}2)$$

که در آن:

SN = عدد تناسب

D_{10} = قطر مؤثر دانه‌ها

D_{20} = اندازه دانه‌ها که 20 درصد ذرات از آن کوچکترند

D_{50} = قطر متوسط دانه‌ها

که درجه‌بندی مصالح به صورت زیر می‌باشد:

SN = 0-10 عالی

10-20 خوب

20-30 متوسط

30- 40 ناچیز

50 ≻ نامناسب

در تراکم ارتعاشی، اگر مصالح پرکننده و خاک طبیعی یکی باشند، این فرمول میتواند برای خاکی که اصلاح می‌شود به کار برده شود.

خاک‌های سست و ضعیف تقویت شده توسط ستون‌های سنگی ساخته شده با استفاده از فرآیند جایگزینی ارتعاشی، بصورت یک محیط مرکب عمل خواهند کرد و با کاهش فاصله بین ستون‌های سنگی، افزایش مساحت مقطع عرضی ستون و افزایش اصطکاک مصالح سنگی مورد استفاده، سختی بیشتری را نشان می‌دهد.

شرایط نهایی خاک اصلاح شده جهت پایداری و رفتار طولانی مدت سازه بسیار مهم است و ضروری است که زمین مورد آزمایش قرار گیرد. تراکم ارتعاشی موجب افزایش تراکم خاک اصلاح شده غیر چسبنده می‌شود، که این مساله می‌تواند به آسانی و به سرعت با استفاده از آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) و آزمایش نفوذ مخروط (CPT) اندازه‌گیری شود. می‌توان آزمایشات انجام شده پس از اصلاح خاک را با آزمایشات زمین قبل از اصلاح مقایسه کرد و میزان اصلاح حاصله و درجه اصلاح را به ازای کارآیی قراردادی مشخص به‌دست آورد. برای مقایسه صحیح، لازم است که آزمایش قبل از اصلاح و بعد از اصلاح با روش یکسانی انجام شود.

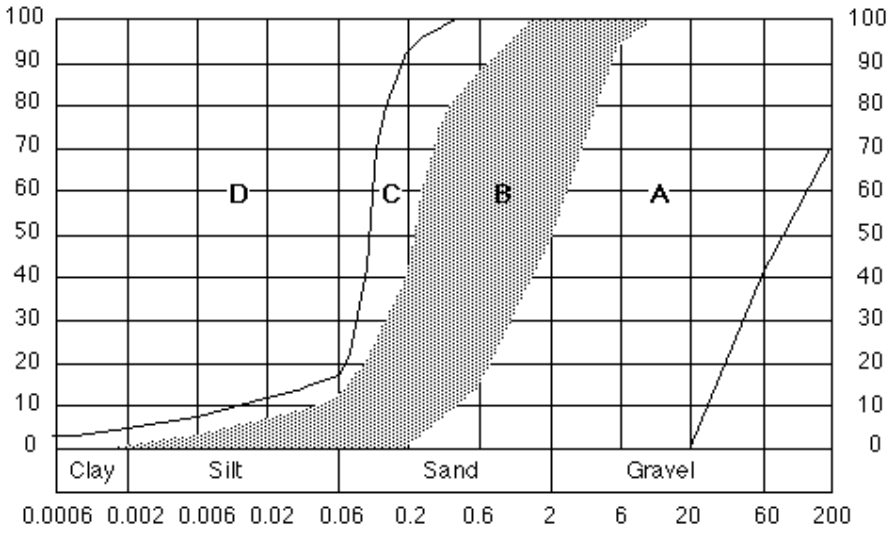
برای زمین اصلاح شده توسط ساخت ستون‌های سنگی با استفاده از فرآیند جایگزینی ارتعاشی، تست بار (Load Test) بر روی زمین اصلاح شده مؤثرترین روش اثبات توانایی زمین جهت نگهداری بارهای طراحی شده در محدوده نشست‌های مجاز می‌باشد. اگرچه آزمایش‌های بارگذاری بزرگ مقیاس در محل‌های کوچک غیراقتصادی می‌باشد، اما می‌توان از انواع دیگر آزمایش‌های بارگذاری و برجا استفاده کرد. جدول 2-2 طبقه‌بندی مناسبی از این آزمایش‌ها را بر مبنای نوع خاک غالب ارائه می‌کند.

علاوه بر آزمایش بر روی زمین اصلاح شده، به جزئیات ثبت شده از مراحل ساخت ستون سنگی توجه زیادی می‌شود. اسلوکوبه و موزلی (1991) اطلاعاتی در مورد سیستم‌های ابزارگذاری مورد استفاده در اروپا ارائه کردند که قادر می‌باشند عمیق ویبراتور، انرژی مصرفی، و وزن سنگ مورد استفاده را در مقابل زمان ثبت کنند تا ثبت دقیقی از مراحل اجرای هر ستون سنگی ارائه دهد. نمونه‌ای از پرینت خروجی ساخت ستون سنگی در شکل 2-6 نشان داده شده است.

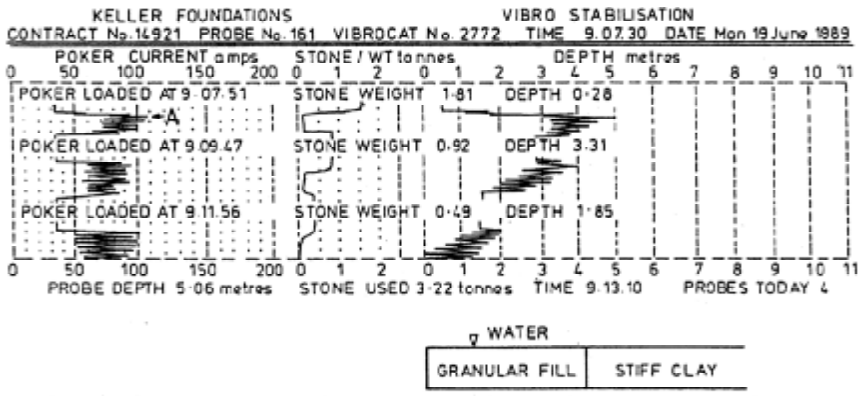
2-5- مکانیزم اجرا

در ساخت ستون‌های سنگی معمولا" 15 تا 35 درصد حجم خاک ضعیف به وسیله سنگ جایگزین می‌شود. بارهای طراحی بر روی هر ستون سنگی بین 20 تا 50 تن تغییر می‌کند. وجود ستون سنگی در خاک سست باعث ایجاد یک محیط مرکب می‌شود که به طور کلی نسبت به خاک طبیعی بدون ستون سنگی، تراکم‌پذیری کمتر و مقاومت برشی

شکل 2-5- محدوده انواع خاکهای قابل اصلاح توسط تراکم ارتعاشی و جایگزینی ارتعاشی (ستونهای سنگی) [vibrofloatation.com]



Zone A	خاکهای این محدوده به خوبی قابل تراکم می‌باشند. سمت راست وپایین خط مرزی نشان داده شده یک محدوده تجربی را نشان می‌دهد که در آن وجود قلوه‌سنگ‌ها و تخته‌سنگ‌ها مانع از نفوذ ویبراتور به عمق موردنظر و در نتیجه مانع از تراکم آن می‌شود.
Zone B	خاک‌های واقع در این محدوده به طور ایده‌آل برای تراکم ارتعاشی مناسب می‌باشند. مقدار ریزدانه آن کمتر از 12% می‌باشد. در طول تراکم خاک برجا از داخل ویبراتور اضافه می‌شود بنابراین نیاز به خاکریز نمی‌باشد، مشروط براینکه نشست‌های زمین قابل قبول باشد. با توجه به دانسیته اولیه وتراکم موردنیاز، میزان نشست خاک اصلاح‌شده با تراکم ارتعاشی بین 2 تا 15 درصد متغیر می‌باشد.
Zone C	این محدوده نیز برای تراکم ارتعاشی مناسب می‌باشد با این تفاوت که زمان تراکم موردنیاز نسبت به محدوده B شدیدا" افزایش می‌یابد که این به علت سرعت کم زهکشی آب باقی مانده در خاک متراکم شده می‌باشد. در این محدوده نیاز به اضافه‌کردن خاک از سطح می‌باشد.
Zone D	خاک‌های موجود در این منطقه قابل تراکم نمی‌باشند. استفاده از روش جایگزینی ارتعاشی می‌تواند راه‌حل مناسبی باشد.



شکل 2-6- پرینت خروجی از ساخت ستون سنگی با استفاده از روش bottom feed [Moseley,1993]

جدول 2-2- آزمایشاتی که برای تایید کیفیت زمین اصلاح شده انجام می‌شوند[Moseley,1993]

Test	Granular	Cohesive	Comments
McIntosh probe	*	*	Before/after essential. Can locate obstructions prior to treatment.
Dynamic cone	**	*	Too insensitive to reveal clay fraction. Can locate dense layers and buried features.
Mechanical cone	***	*	Rarely used.
Electric cone	****	**	Particle size important. Can be affected by lateral earth pressures generated by treatment. Best test for seismic liquefaction evaluation.
Boreholes and SPT	***	**	Efficiency of test important. Recovers samples.
Dilatometer	***	*	Rarely used.
Pressuremeter	***	*	Rarely used.
Small plate	*	*	Does not adequately confine stone column. Affected by pore water pressures.
Large plate	**	**	Better confining action.
Skip	**	**	Can maintain for extended period.
Zone loading	****	****	Best test for realistic comparison with foundations.
Full scale	*****	*****	Rare.

*least suitable
*****most suitable