مقدمه

مناطق بسیاری در سراسر جهان به خصوص در کنار رودخانه‌ها و دریاها پوشیده از لایه‌های ضخیم رس آبرفتی می‌باشد. همراه با افزایش توسعه این مناطق، ساختمان‌ها و سازه‌های صنعتی بسیاری نیز در این مناطق ساخته می‌شوند. ساخت و ساز بر روی خاک سست طبیعی به دلیل مقاومت برشی پایین و تراکم پذیری بالای این خاک‌ها موجب پدید آمدن مشکلات عمده شده و به عنوان یک ریسک برای مهندسان ژئوتکنیک شناخته می‌شود. برای غلبه بر این مشکل راه‌های متفاوتی وجود دارد:

- خاکبرداری خاک نامناسب از محل و جایگزینی آن با خاک مناسب
- استفاده از شالوده‌های عمیق که از خاک نامناسب عبور کند
- و بهسازی خاک که از روش های بهسازی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
  - تثبیت خاک شامل روش‌های اختلاط و تزریق
  - تراکم خاک شامل روش‌های پیش بارگذاری، تراکم دینامیکی، سقوط وزنه
  - تسلیح خاک شامل استفاده از انواع ریز شمع‌ها، ژئوسنتتیک‌ها و ستون سنگی[1]

استفاده از ستون سنگی به دلیل مزایایی که در کاهش نشست و تسریع کردن فرآیند تحکیم دارد و نیز سادگی در ساخت آن یکی از مناسب‌ترین و موثرترین روش‌ها در بهسازی خاک‌های سست می باشد. اساس این روش بر پایه جایگزینی ۱۰ تا ۳۵ درصد از خاک سست محل با مصالح درشت دانه‌ای مثل سنگ به صورت ستون می‌باشد.

ستون‌های سنگی به عنوان روشی برای بهسازی خاک سست تا کنون در سراسر دنیا با موفقیت به کار رفته است. این روش به صورت کاملا ابتدائی توسط مهندسان ارتش فرانسه برای تقویت پی‌های سنگین انبار توپخانه‌های فلزی در سال ۱۸۳۰ استفاده شد (Hughes and Withers, 1974).

استفاده از این روش به شیوه کنونی از سال ۱۹۳۷ در کشور آلمان و بعد در آمریکا آغاز شد. و در سال ۱۹۳۹ شرکتی در آلمان ادعا کرد که با استفاده از این روش ظرفیت باربری خاک محل پروژه‌ای را تا دو برابر

[1] - Stone Column

بهبود بخشیده است. ستون‌های سنگی از سال ۱۹۵۰ در اروپا و از سال ۱۹۷۲ در آمریکای شمالی به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفت (Greenwood, 1976).

تا کنون مطالعات بسیاری در مورد ستون‌های سنگی اعم از بررسی تاثیرات اجرای ستون‌های سنگی بر خاک اطراف، بررسی ظرفیت باربری و نشست زمین‌های مسلح شده با ستون سنگی صورت گرفته است. اما مطالعات چندانی در تحلیل ستون‌های سنگی تحت بارهای لرزه‌ای صورت نگرفته است.

از آنجایی که استفاده از ستون‌های سنگی برای تقویت زمین‌های سست یک روشی دائمی برای زمین‌های مورد اجرا می‌باشد، بنابراین تحلیل رفتار این زمین‌ها تحت نیروهای زلزله ضروری می‌باشد. در این پایان‌نامه تحلیل دینامیکی به روش تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی توسط مدلسازی عددی در نرم‌افزار FLAC 2D برای بررسی نشست خاک‌های مسلح شده با ستون سنگی، صورت گرفته است. همچنین یک رابطه شبه استاتیکی برای نشست ستون‌های سنگی پیشنهاد شده است . و تحلیل نشست در حالت لرزه‌ای با استفاده از این روش شبه استاتیکی نیز انجام شده است. سپس مقادیر به دست آمده برای نشست از طریق توسط دو روش فوق برای مقادیر مختلف شتاب مربوط به زلزله‌های مختلف در یک نمودار نهایی آورده شده است و برای تصحیح اختلاف مقادیر حاصل شده از رابطه شبه استاتیکی پیشنهادی و تحلیل عددی نرم افزار؛ با استفاده از خط رگرسیون معادله خطی برای تصحیح رابطه شبه استاتیکی نیز ارائه شده است تا مقادیر به دست آمده از این رابطه همخوانی هرچه بیشتری با مقادیر تحلیل عددی پیدا کند.

ساختار کلی پایان‌نامه

این پایان‌نامه در ۵ فصل تنظیم گردیده است. در فصل اول پیشینه تحقیقات انجام گرفته بر روی خاک‌های مسلح شده با ستون سنگی پرداخته می‌شود. در فصل دوم به مواد و روش‌های تحقیق اعم از معرفی روند تحلیل دینامیکی در نرم‌افزار FLAC 2D پرداخته می‌شود. در فصل سوم مدلسازی‌های انجام گرفته بیان خواهد شد و در فصل چهارم نتایج مدلسازی‌ها بیان شده و رابطه‌ای شبه استاتیکی نیز برای مسئله تعریف می‌شود. فصل پنجم نیز نتیجه گیری‌های نهایی و ارائه پیشنهادات برای مطالعات آتی می‌باشد.

فصل اول

پیشینه تحقیق

۱-۱- مقدمه

مناطق زیادی از رسوبات نرم و لایه‌هایی پوشیده شده‌اند که دارای مقاومت برشی پایین و قابلیت فشردگی بالایی می‌باشند که با توجه به افزایش روز افزون ساخت و ساز استفاده از این نواحی ضروری می باشد و نیاز به استقرار پی‌ها بر روی خاکهای ضعیف و یا مسئله‌دار با احداث ابنیه فنی متنوع بیش از پیش نمود یافته است. اگرچه استفاده از پی‌های نیمه‌عمیق و عمیق متداول است، ولی راه حلی پرهزینه و وقت‌گیر می‌باشد. به عنوان یک جایگزین مناسب در عمل می‌توان با استفاده از روشهای بهسازی خاک تا حد زیادی از مشکلات پیش رو را کنار زد. ستون سنگی روش مطلوب و مناسبی برای بهسازی خاک است که می توان از آن در رس های نرم، سیلت ها و همچنین ماسه های سیلتی نرم بهره گرفت. استفاده از ستون‌های سنگی به علت در دسترس بودن مصالح مورد نیاز با هزینه بسیارکم، ساخت آسان وکارایی مناسب می تواند راه حلی اقتصادی و مناسب باشد.

در این فصل ابتدا به توضیح کاربردهای ستون سنگی، روش‌های اجرای ستون سنگی و تجهیزات مورد استفاده برای اجرای آن‌ها پرداخته می‌شود. در ادامه به مفاهیم مورد استفاده در تحلیل‌های ستون سنگی از جمله مفهوم سلول واحد و فاکتور تمرکز تنش پرداخته می‌شود و با استفاده از این مفاهیم، مکانیزم عملکرد ستون سنگی بر اساس مطالعات تجربی، آزمایشگاهی و عددی که توسط محققین صورت گرفته است؛ بیان می‌شود. در نهایت روابط مختلف ارائه شده توسط محققین برای ظرفیت باربری و نشست زمین‌های مسلح شده با ستون سنگی بیان می‌شود.

۱-۲- کاربرد ستون‌های سنگی

هرکدام از روش‌های بهسازی خاک برای هدف خاصی در ساخت و سازها استفاده می‌گردند. ستون‌های سنگی اغلب برای اهداف زیر بکار برده می‌شوند:

۱- کاهش نشست زمین‌های چسبنده سست ناشی از اعمال بار

۲- کاهش زمان لازم برای نشست و تحکیم

۳- افزایش ظرفیت باربری خاک‌های سست

۴- افزایش مقاومت برشی مصالح چسبنده و کاهش پتانسیل ناپایدار شیروانی‌ها

۵- تراکم خاک‌های دانه‌ای (ماسه‌ها) و محافظت از آنها در برابر پتانسیل روانگرایی تحت بارهای لرزه‌ای

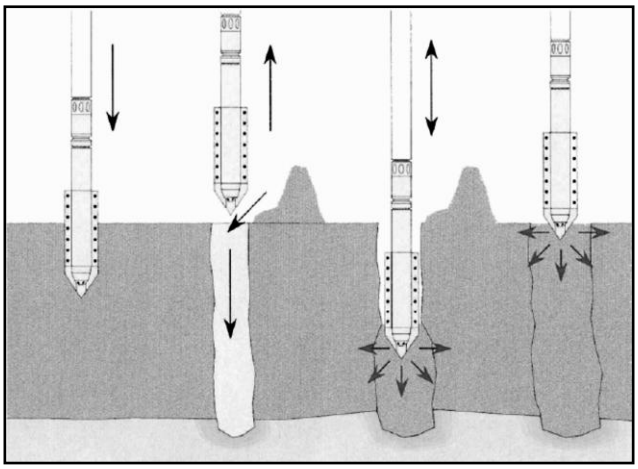
هرچند این روش بصورت کلی برای تمامی خاک‌ها قابل اجرا نمی‌باشد و به شرایط خاصی محدود می‌شود. با توجه به نتایج تجربی بدست آمده از اجرای ستون‌ها سنگی، خاک‌هایی که دارای مقاومت برشی بین ۱۰kPa الی ۵۰kPa می‌باشند، خاک‌های مناسب برای اجرای ستون سنگی هستند. برای مثال روش ارتعاشی- جایگزینی برای خاک‌های چسبنده غیر حساس با مقاومت برشی بین ۳۰kPa الی ۶۰kPa و سطح آب زیرزمینی نسبتا پایین مناسب می‌باشد (Greenwood and Kirisch, 1983).

ستون سنگی برای بهبود خاک محل استفاده می‌شود و تاثیر آن به عنوان فونداسیون یک سازه ناچیز می‌باشد. عمق‌های متدوال ستون‌های سنگی بین ۶m الی ۱۵m می‌باشد و اصولا قسمت انتهایی ستون سنگی بر روی خاک‌های نسبتا سخت و یا بسترهای سنگی قرار داده می‌شود. برای توزیع مناسب تنش بین خاک و ستون سنگی و همچنین اعمال زهکشی مناسب از یک لایه مصالح سنگی به عمق ۳۰cm واقع بر روی گروه ستون‌های سنگی استفاده می‌شود (Barksdale *et al.*, 1983).

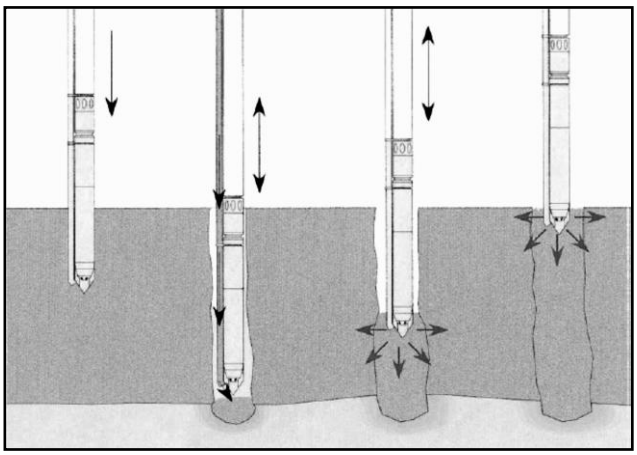
۱-۳- اجرای ستون سنگی

اجرای ستون‌های سنگی متداول به دو روش کلی ارتعاشی-جابجایی[1] (روش خشک) و ارتعاشی-جایگزینی[2] (روش تر) بسته به شرایط محل می‌باشد. شکل‌های ۱-۱ و ۱-۲ به صورت شماتیک روند اجرای این دو روش را نشان می‌دهند.

[1] - Vibro-Displacement
[2] - Vibro-Riplacement



شکل ۱- ۱- اجرای ستون سنگی به روش ارتعاشی- جایگزینی (Taube and Herridge, 2002)



شکل ۱- ۲- اجرای ستون سنگی به روش ارتعاشی- جابجایی (Taube and Herridge, 2002)

در روش اتعاشی- جایگرینی، نفوذ با استفاده از جت آب با فشار کم و به کمک وزن دستگاه انجام می‌گیرد. خاک با استفاده از جت آب جابجا شده و بوسیله جریان آب به سطح زمین انتقال می‌یابد. با رسیدن به عمق دلخواه، در حالی که فشار آب هنوز قطع نشده است، لوله چندین بار بالا و پایین برده می‌شود. با این کار دیواره‌های گودال برای اجرای ستون سنگی آماده شده و فشار آب به پایداری دیواره‌ها کمک می‌کند. سپس مصالح سنگی به فضای حلقوی مابین لوله و گودال ریخته شده و متراکم می‌شود. در این حین لوله مرتعش به آهستگی و گام به گام از گودال بیرون کشیده می‌شود. تراکم سنگ‌ها با نفوذ دوباره لوله در داخل مصالح سنگی پس از هر گام بیرون‌کشی انجام می‌پذیرد. با این عمل سنگ‌ها بصورت عمودی و

افقی متراکم می‌شوند. قطر تمام شده ستون سنگی بسته به سختی خاک محل در حدود ۰/۸m الی ۱m می‌باشد.

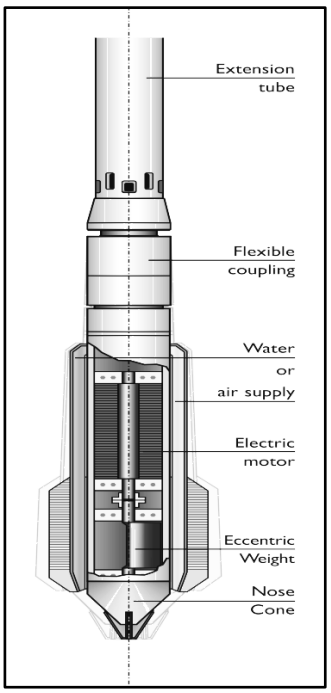
در روش ارتعاشی- جابجایی، با استفاده از فشار هوا وزن لوله حفار و ضربه‌های متوالی توسط لوله حفار، گودال حفر می‌شود. در این روش خاک حفر شده به صورت جانبی به کناره‌ها فشرده می‌گردد. قطر حفره ایجاد شده در انتهای حفاری حدود ۰/۶m می‌باشد. برای ایجاد پایداری در خاک‌های سست و بیرون نکشیدن لوله حفار، سیستم تغذیه تحتانی برای فرستادن مصالح سنگی بداخل حفره استفاده می‌شود. در این روش مصالح ستون سنگی از قسمت انتهایی لوله حفار به داخل حفره فرستاده شده و متراکم می‌شود.

فرق اساسی بین روش تر و خشک نحوه ایجاد حفره می‌باشد. در روش تر خاک حفره به بیرون منتقل شده و مصالح سنگی در داخل و پیرامون حفره متراکم می‌شوند در نتیجه در روش تر، تنش برشی اولیه ناشی از حفاری و تراکم مصالح سنگی کمتر می‌باشد در حالیکه در روش خشک، بدلیل فشرده شدن خاک حفاری شده به اطراف و علاوه بر آن تراکم مصالح سنگی، تنش برشی اولیه (با فرض عدم ریزش دیواره‌ها حین اجرا) بالاتر بوده و تغییر شکل‌های دائمی پلاستیک در خاک اطراف ایجاد می‌گردد.

روش‌های دیگری نیز برای اجرای ستون‌های سنگی استفاده می‌شود که بصورت کلی مشابه روش‌های تر و خشک می‌باشند. برای مثال در بلژیک پس از ایجاد حفره، مصالح سنگی با استفاده از تراکم بوسیله وزنه‌های سنگین در داخل زمین نصب می‌شوند. در فرانسه از روش توام تراکم دینامیکی و ستون سنگی برای حفر و اجرای ستون سنگی استفاده می‌گردد. از مزیت‌های این روش تراکم و بهبود وضعیت خاک در عمق‌های پایین‌تر از اجرای ستون سنگی می‌باشد.

۱-۴- تجهیزات و وسایل جهت اجرای ستون سنگی

از تجهیزات اصلی برای اجرای ستون سنگی یک ویبراتور لوله‌ای[1] مانند شکل ۱-۳، با قطر حدودی ۳۰۰mm الی ۴۰۰mm و طول ۲m الی ۳/۵m می‌باشد. وزن این لوله در حدود ۲ton الی ۴ton بسته به ابعاد متغیر است. ویبراتور دارای یک وزنه خارج از محور[2] در نزدیکی نوک می‌باشد و از این رو هنگام کارکرد ویبراتور، نیروی ارتعاشی افقی ایجاد می‌شود. همچنین در نوک این لوله منفذهای جت با فشار بالا قرار دارد. همچنین انتهای لوله می‌تواند به لوله‌های دیگری برای افزایش طول ویبراتور متصل گردد. شلنگ‌ها و شیرهای لازم از داخل لوله اصلی به موتور وصل می‌شود. کل واحد بوسیله جرثقیل نگه داشته می‌شود. از این رو سیستم می‌تواند یک سیستم متحرک باشد. قدرت استفاده شده در این سیستم در حدود ۳۵kW الی ۱۰۰kW می‌باشد. تجهیزات جدید می‌تواند قدرتی تا ۱۶۰kW ایجاد نمایند. فرکانس این دستگاه نیز می‌تواند بین ۳۰Hz الی ۵۰Hz متغیر باشد. سرعت نفوذ لوله حدود ۱m/min الی ۲m/min و سرعت خروج و تراکم مصالح حدود ۰/۳m/min می‌باشد.



شکل ۱- ۳- نمونه‌ای از ویبراتورهای متداول (publication of Keller Group plc, 2010)

[1] - Poker Vibrator
[2] - Eccentric Weight

۱-۵- تاثیرات اجرای ستون سنگی بر خاک مجاور

شرایط گسیختگی در هر ستون سنگی به شرایط اولیه تنش در ستون و خاک اطراف وابسته می‌باشد و این شرایط تنش شدیدا به نحوه اجرای ستون سنگی وابسته است (Wood *et al.*, 2000).

اجرای ستون سنگی بویژه به روش جابجایی ویژگی‌های خاک‌های نرم را به شدت تغییر می‌دهد. خاک‌های مجاور ستون سنگی دچار جابجایی شده و در نتیجه تنش افقی، وضعیت تنش و سختی خاک تا محدوده ۴ الی ۸ برابر قطر ستون سنگی تغییر پیدا می‌کند. همچنین فشار آب حفره‌ای و ضریب فشار جانبی در خاک نرم نیز تغییر می‌یابد. با زائل شدن فشار آب حفره‌ای اضافی، خاک نرم تحکیم یافته و مقاومت آن افزایش می‌یابد. مقادیر ضریب فشار جانبی خاک، ۱/۱ الی ۲/۵ برابر افزایش می‌یابد. افزایش مقدار ضریب فشار جانبی عمدتا به فاصله بین ستون‌های سنگی، ماشین آلات اجرای ستون سنگی، نوع خاک و نوع اجرای ستون سنگی بستگی دارد. تغییرات ویژیگی‌های رس در اطراف ستون‌های سنگی اتفاق می‌افتد. علاوه بر تراکم و دانسیته بالای رس در اطراف ستون سنگی، نفوذپذیری کاهش یافته و توانایی زهکشی در خاک پایین می‌آید

(Elshazly *et al.*, 2008; Satibi, 2009; Xu *et al.*, 2006).

اجرای ستون سنگی در زمین با استفاده از تئوری اتساع گودال استوانه‌ای [1] مدل می‌شود که در این تئوری، مرزهای گودال استوانه‌ای تحت جابجایی شعاعی قرار می‌گیرند تا بوسیله آن ستون سنگی مدل شود. با توجه به اینکه اجرای ستون سنگی با سرعت زیادی انجام می‌پذیرد، استفاده از آزمایش اتساع گودال به صورت زهکشی نشده قابل قبول می‌باشد.

محققین در سال ۲۰۰۷ مطالعه موردی پروژه دامیته[2] را با استفاده از روش اتساع گودال مدل‌سازی نموده‌اند. در این مدل برای مدلسازی مصالح داخل ستون سنگی از مدول یانگ پایین ۲۰kPa استفاده کرده‌اند. شعاع اولیه گودال ۰/۲۵m بود که بعد از اعمال جابجایی شعاعی در درون گودال، شعاع این حفره به ۰/۵۵m افزایش پیدا کرد (Guetif *et al.*, 2007).

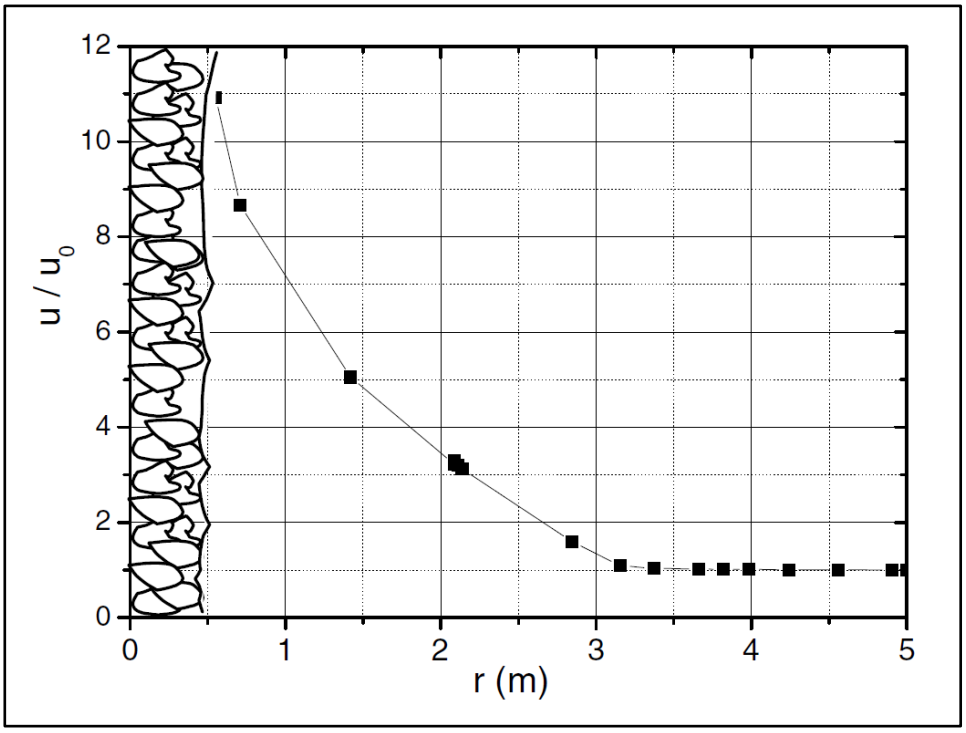
---

[1] - Cylindrical Cavity Expansion

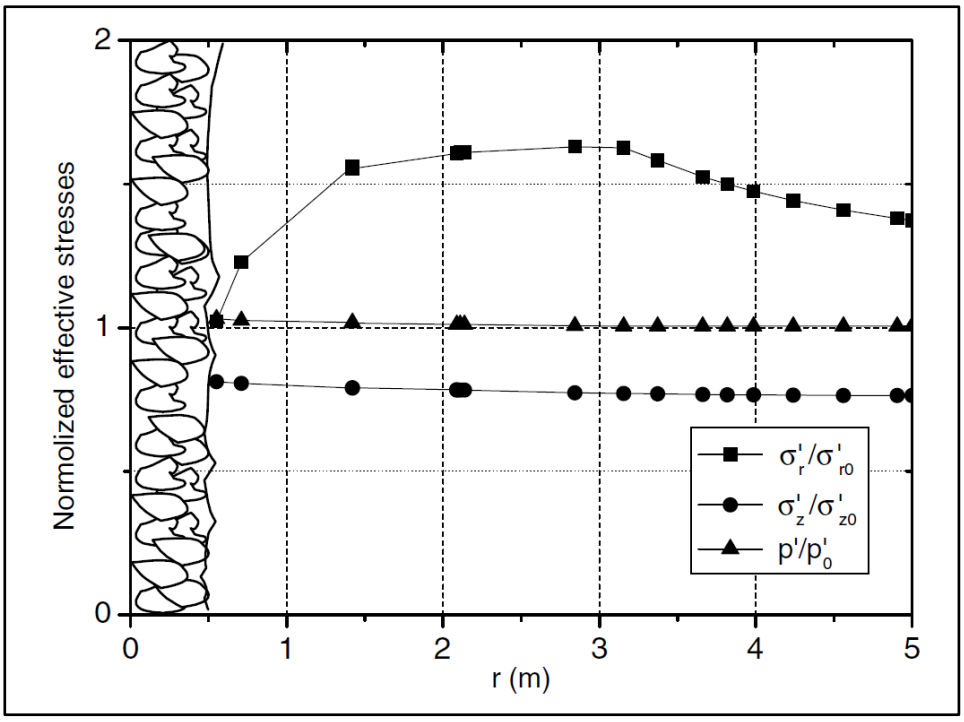
[2] - Damiette

نتیجه گیری‌های اساسی در این بررسی، با استفاده از مدل موهر کولمب برای خاک رس و مصالح سنگی را می توان به صورت زیر بیان نمود:

۱) دقیقا بعد از اجرای ستون سنگی، فشار حفره‌ای اضافی بالای Δu در درون خاک رس بوجود آمد و مقدار تنش موثر بدون تغییر باقی ماند (شکل ۱-۴ و شکل ۱-۵). در طول اجرای ستون سنگی، تنش موثر قائم (σ'_v) کمی کاسته شده در حالی که تنش شعاعی موثر (σ'_r) افزایش یافت. هرچند درون مصالح ستون سنگی، تنش موثر میانی ۴ برابر بیشتر از تخمین اولیه بود.



شکل ۱- ۴- تغییرات فشار آب حفره‌ای نرمالیزه شده قبل از تحکیم نسبت به فاصله از ستون سنگی (Guetif et al., 2007)



شکل ۱- ۵- تغییرات تنش موثر نرمالیزه شده قبل از تحکیم نسبت به فاصله از ستون سنگی(Guetif et al., 2007)

۲) در طول دوره ۱۱ ماهه، که طی آن نشست اولیه صورت می‌پذیرد، تخمین‌ها به صورت زیر می باشد:

- کاهش فشار آب حفره‌ای اضافی بصورت کامل و افزایش چشمگیر تنش موثر میانی و تنش موثر شعاعی
- ثابت ماندن تنش موثر قائم به صورت تقریبی و افزایش ضریب فشار جانبی خاک
- بهبود وضعیت خاک در محدوده ۶ برابر شعاع ستون سنگی

در صورتی که حین اجرای ستون سنگی دقت کافی بعمل نیاید، پس از اجرای ستون سنگی (بخصوص در ناحیه محصور بین ستون‌های سنگی) امکان تورم خاک وجود دارد. این تورم تابعی از اندازه ستون سنگی، فاصله بین ستون‌ها و روش اجرا می باشد.

اجرای ستون‌های سنگی به صورت تکی، ردیفی و یا در گروه‌هایی با تعداد کم باعث تورم کمتر نسبت به اجرای گروهی با مش بندی متراکم می‌شود. همچنین به نظر می‌رسد که در یک تعداد معین ستون سنگی با کمتر شدن فاصله بین ستون‌ها تورم خاک بیشتر می‌گردد.

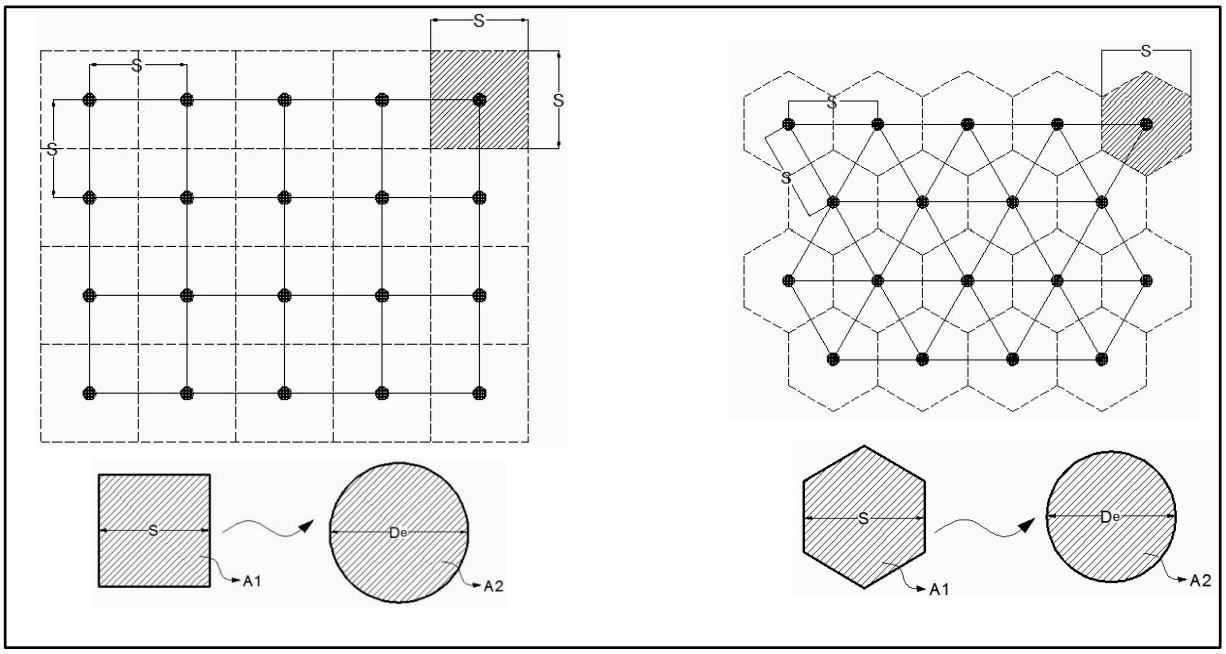
۱-۶- سلول واحد[1]

برای تحلیل ستون سنگی به همراه خاک اطراف آن، از سلول واحد که به شکل استوانه‌ای می‌باشد نیز استفاده شده است. در تمامی روش‌های تحلیل نشست، ستون سنگی‌های مورد بررسی در یک گروه بزرگ ستون سنگی و خاک اطراف آن بصورت سلول واحد در نظر گرفته می‌شود. ناحیه چند ضلعی منتظم اطراف ستون سنگی با استفاده از یک ناحیه دایره‌ای تخمین زده می‌شود. در این حالت یک شعاع معادل برای سلول واحد انتخاب می‌گردد. با توجه به الگوی قرارگیری ستون‌ها ناحیه تاثیر هر ستون برای الگوی مربعی به شکل یک مربع و برای الگوی مثلثی به شکل شش ضلعی منتظم می‌باشد. با مساوی قرار دادن این مساحت‌ها با مساحت یک دایره فرضی ، قطر تاثیر معادل حاصل می شود. برای چینش ستون‌های سنگی بصورت مثلثی، شعاع معادل سلول واحد $D_e = 1.05S$ و برای الگوی چینش ستون سنگی بصورت مربعی شعاع معادل سلول واحد برابر $D_e = 1.13S$ می‌باشد. که S برابر فاصله مرکز تا مرکز ستون‌های سنگی مجاور است. (شکل ۱-۶). در نتیجه نسبت مساحت در این حالت برابر مجذور نسبت قطرهای ستون سنگی به سلول واحد می‌باشد. با استفاده از روش المان محدود، درستی این فرض مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصله نشان می‌دهد که این فرض دارای دقت بالایی می‌باشد (Balaam *et al.*, 1977).

فرضیات اساسی برای مدلسازی ستون‌های سنگی با استفاده از سلول واحد عبارتند از:

- تنش‌های سربار در یک محدوده بزرگ ثابت می‌باشند.
- تنش‌های برشی در مرزهای سلول ناچیز می‌باشند. از این رو می‌توان مرزهای سلول‌ها را بصورت مرزهای بدون اصطکاک در نظر گرفت.
- نشست ستون سنگی و خاک اطراف در سلول واحد برابر می‌باشند.
- تنش‌های اصلی در سلول واحد عبارتند از: تنش‌های قائم، تنش‌های مماسی و تنش‌های شعاعی.
- مرزهای سلول واحد صلب می‌باشند.

[1] - Unit Cell

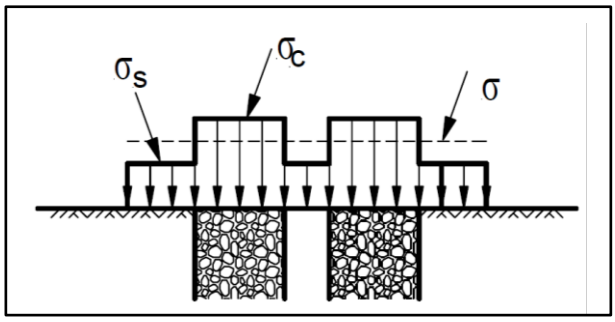


شکل ۱- ۶- قطر تاثیر در الگوهای مثلثی و مربعی جهت استفاده از سلول واحد (Balaam et al., 1977)

۱-۷- تمرکز تنش[1]

نحوه توزیع تنش در ستون (σ_c)، خاک نرم اطراف ستون (σ_s) و تنش میانگین (σ) در شکل ۱-۷ نشان داده شده است. مطالعات نشان داده‌اند که در صورتی که خاک مسلح شده با استفاده از ستون سنگی بارگذاری گردد، تمرکز تنش در ستون سنگی بوجود آمده و از تنش در خاک نرم اطراف ستون کاسته می‌شود. این پدیده به این صورت توضیح داده می‌شود که با توجه به اینکه جابجایی ستون سنگی و خاک اطراف آن تقریبا یکسان می‌باشد، در هنگام بارگذاری این جابجایی باعث تمرکز تنش در ستون سنگی با سختی بالا نسبت به خاک اطراف با سختی پایین می‌گردد.

[1] - Stress Concentration



شکل ۱- ۷- توزیع تنش در ستون سنگی و خاک اطراف (Bergado et al., 1996)

نسبت تمرکز تنش (n) برای بیان نحوه توزیع تنش قائم بین ستون و خاک اطراف استفاده می‌گردد:

$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} \qquad (۱-۱)$$

سختی نسبی بین ستون سنگی و خاک اطراف بر روی مقدار نسبت تمرکز تنش تاثیر می‌گذارد. تنش میانگین در سطح هر سلول واحد به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\sigma = \sigma_c \rho + \sigma_s (1 - \rho) \qquad (۱-۲)$$

تنش در ستون سنگی (σ_c) و در خاک اطراف (σ_s) به این صورت می‌باشد:

$$\sigma_s = \frac{\sigma}{[1+(n-1)\rho]} = \mu_s \sigma \qquad (۱-۳)$$

$$\sigma_c = \frac{n\sigma}{[1+(n-1)\rho]} = \mu_c \sigma \qquad (۱-۴)$$

که در آن μ_s و μ_c به ترتیب برابر است با ضریب تنش در خاک رس و ستون سنگی و σ برابر است با تنش میانگین در یک ناحیه نسبتا بزرگ از خاک مسلح شده. و ρ نسبت مساحت جایگزینی[1] بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود :

$$\rho = \frac{A_c}{A} \qquad (۱-۵)$$

که در آن A_c مساحت مقطع ستون سنگی بوده و A مساحت ناحیه تاثیر می‌باشد.

[1] - Area Replacement Ratio

در طی یک مدلسازی بر روی گروه ستون‌های سنگی و آزمایش تحکیم K_0 برای ستون سنگی منفرد، گستره تغییرات نسبت تمرکز تنش، n، در حالتی که خاک رس و ستون سنگی به گسیختگی برسند برابر است با:

$$\frac{1+sin\,\phi\prime_c}{1-sin\,\phi\prime_c} \leq n \leq \frac{1+sin\,\phi\prime_c}{1-sin\,\phi\prime_c}.\frac{1+sin\,\phi\prime_s}{1-sin\,\phi\prime_s} \qquad (۶-۱)$$

که در آن n برابر نسبت تمرکز تنش ϕ'_s برابر زاویه اصطکاک داخلی موثر رس و ϕ'_c برابر زاویه اصطکاک داخلی مصالح سنگی می‌باشد (Aboshi *et al.*, 1991).

۱-۷-۱- مطالعات تحلیلی بر روی توزیع تنش

همانطور که قبلا ذکر شد، بار وارده بین ستون سنگی و خاک اطراف به نسبت سختی آنها تقسیم می‌گردد. نسبت مدولی به صورت نسبت مدول الاستیسیته ستون سنگی و مدول الاستیسیته خاک (E_c/E_s) تعریف می‌گردد که به نوعی بیانگر نسبت سختی می‌باشد.

با توجه به این تعریف، نسبت تمرکز تنش نهایی در صورتی که ستون سنگی جابجایی افقی نداشته باشد و بصورت الاستیک رفتار نماید، برابر است با نسبت مدولی گیردار شده. هرچند این تعریف با نتایج واقعی همخوانی ندارد. زیرا نسبت مدولی بین ۱۰ الی ۵۰ بوده در صورتی که نسبت تمرکز تنش بسیار کمتر بوده و مابین مقادیر ۲ الی ۱۰ متغییر می‌باشد. در حقیقت ستون در راستای جانبی گیردار نبوده و جابجایی جانبی از خود نشان می‌دهد. همچنین رفتار ستون سنگی الاستوپلاستیک بوده و در واقع پدیده تورم ستون[1] در قسمت میانی ناشی از گسیختگی ستون می‌باشد.

محققین روش ساده تئوریک برای تحلیل خاک نرم مسلح شده با ستون سنگی با مصالح ناهمگن، با استفاده از مفهوم سلول واحد ارائه دادند که در این مدل، مدول الاستیسیته ستون سنگی با مصالح ناهمگن

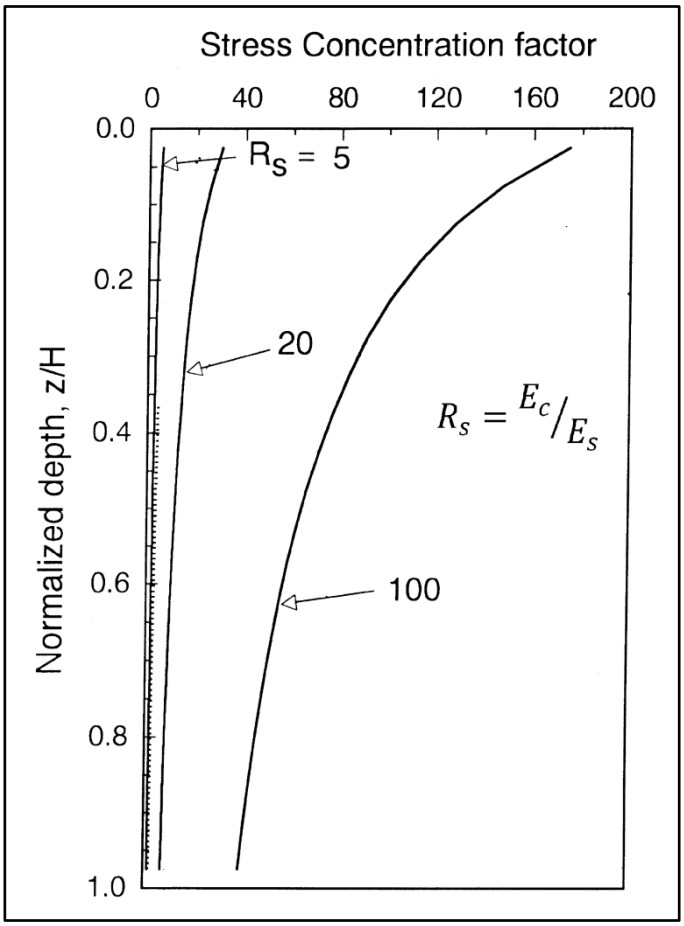
[1] - Bulging

(E_c) با عمق افزایش می‌یابد در حالیکه مدول الاستیسیته ستون سنگی با مصالح همگن در عمق ثابت می‌باشد (Shahu, 2006).

$$E_{ci} = E_c\left(1 + \frac{\alpha Z_i}{H}\right) \qquad (۷-۱)$$

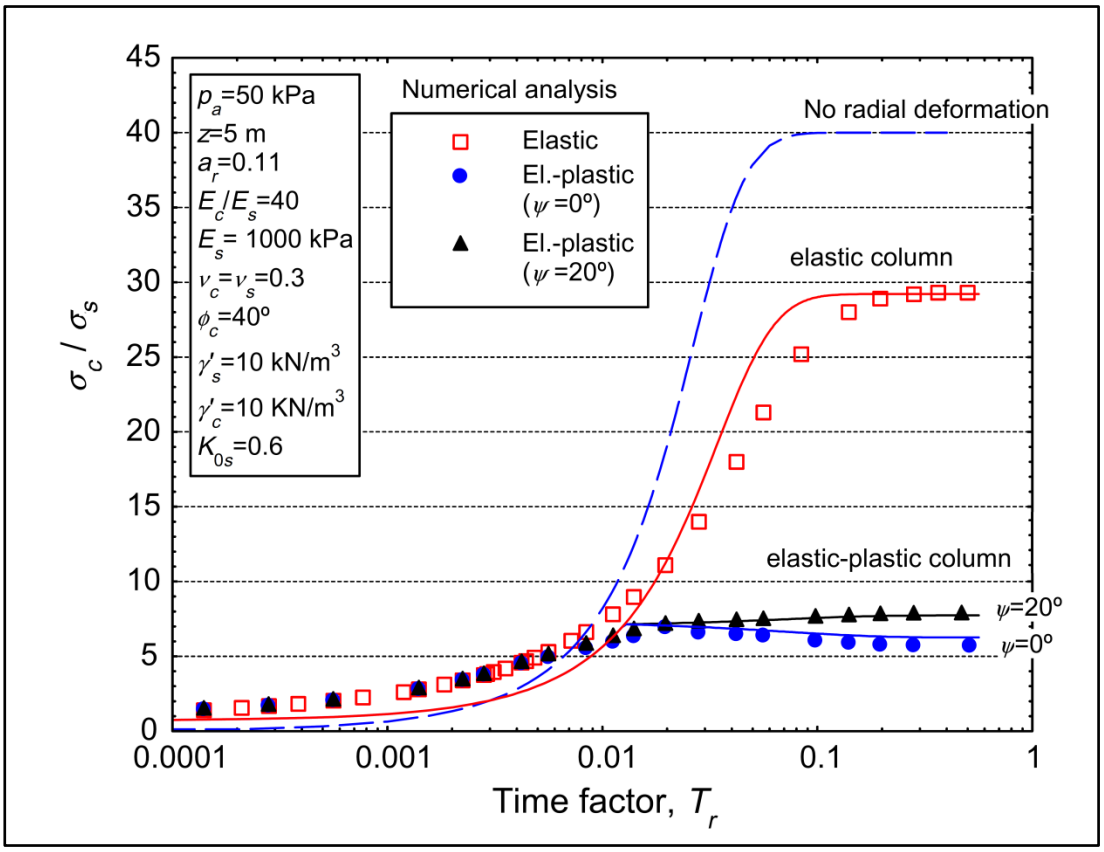
که در آن α نرخ افزایش مدول الاستیسیته در عمق و E_{ci} مدول الاستیسیته ستون سنگی در عمق Z_i می‌باشد.

همچنین مطالعه پارامتری برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر روی خواص خاک مسلح با ستون سنگی انجام گرفته است. نتایج نشان دهنده این موضوع می‌باشند که تغییرات تمرکز تنش با افزایش نرخ تغییرات مدول الاستیسیته به حالت یکنواخت نزدیکتر می‌گردد.



شکل ۱- ۸- تغییرات نسبت تمرکز تنش بر اثر تغییرات نسبت مدولی مصالح ستون سنگی و خاک (Shahu, 2006)

همچنین محققین بررسی‌های تحلیلی در مورد تاثیر تغییر شکل افقی و رفتار پلاستیک ستون سنگی بر روی نحوه توزیع تنش بین سلول و خاک انجام دادند (شکل ۱-۸). با در نظر گرفتن تکیه‌گاه جانبی برای ستون سنگی، فاکتور تمرکز تنش (n) از مقدار صفر شروع شده و مقدار نهایی آن به ضریب مدولی $E_c/E_s = 40$ می‌رسد (Castro and Sagaseta, 2008).

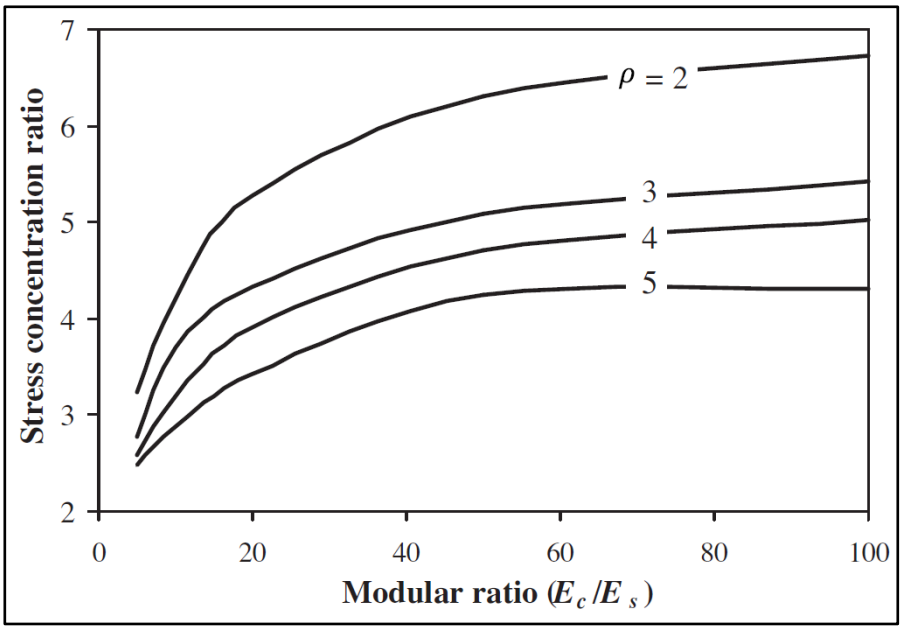


شکل ۱- ۹- تاثیر تغییر شکل‌های جانبی و کرنش‌های پلاستیک بر روی فاکتور تمرکز تنش (Castro and Sagaseta, 2008)

با توجه به واقعی نبودن این شرایط، در صورتی که رفتار ستون سنگی الاستیک و تغییر شکل‌های شعاعی در نظر گرفته شوند، مقدار نهایی n به ۲۵ کاهش می‌یابد. همچنین در صورتی که رفتار ستون سنگی به صورت پلاستیک در نظر گرفته شود، مقدار نهایی n به ۲۰ می‌رسد که محدوده واقعی n می‌باشد.

در بررسی‌های دیگر نیز یک مدل مکانیکی برای خاک سست واقع بر روی بستر سنگی که توسط ستون‌های سنگی بهسازی شده بود، تهیه شد که در این مدل رفتار مصالح خاکی و سنگی به صورت غیر خطی در نظر گرفته شده است. در این مطالعه بار گسترده یکنواختی برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف

بر روی نشست کلی، اختلاف نشست بین ستون سنگی و خاک اطراف و نسبت تمرکز تنش منظور شد که نتایج نشان داده‌اند که با افزایش نسبت مدولی نسبت تمرکز تنش افزایش می‌یابد و با افزایش فاصله بین ستون‌ها، تنش بیشتری از خاک به ستون منتقل می‌شود (Deb, 2008).



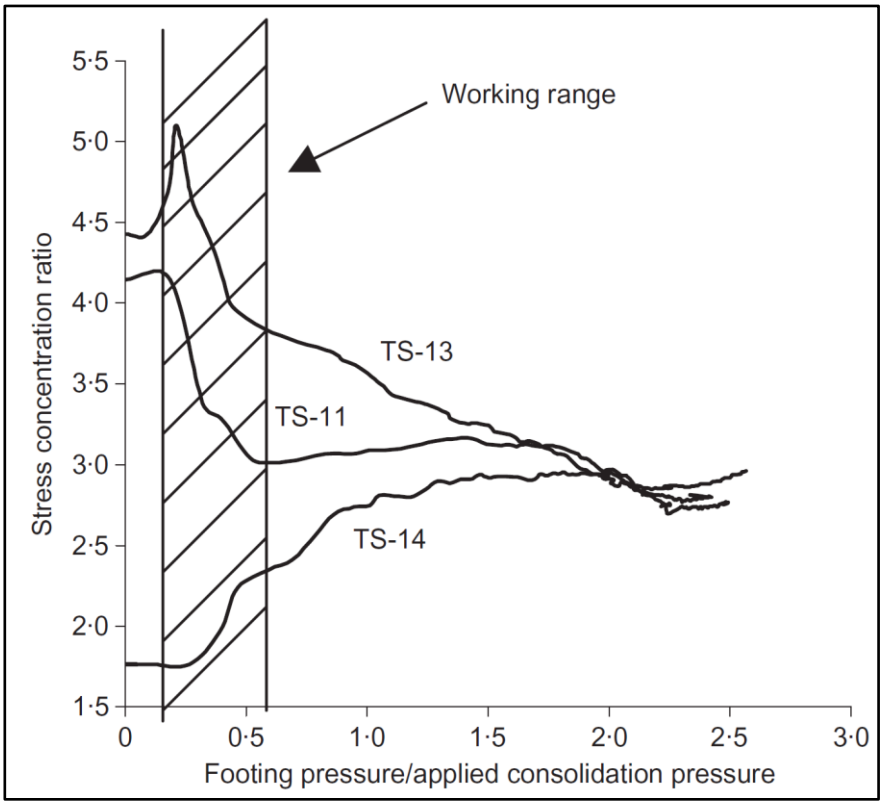
شکل ۱- ۱۰- افزایش نسبت تمرکز تنش با افزایش نسبت مدولی بین مصالح ستون سنگی و خاک (Deb, 2008)

۱-۷-۲- مطالعات آزمایشگاهی در مورد نحوه توزیع تنش

در سال ۱۹۹۴ نیز محققین تعدادی آزمایش سانتریفیوژ برای مطالعه نحوه توزیع بار بین ستون و خاک اطراف تحت بار سطحی ۵۰۰kPa انجام دادند. نتایج مبین این مسئله می‌باشد که بار واقع بر روی خاک اطراف ستون سنگی، توسط ستون که دارای سختی بیشتری می‌باشد تحمل می‌گردد و این مسئله باعث کمتر شدن تنش در خاک و در نتیجه نشست کمتر می‌گردد. نسبت تمرکز تنش ۴ برای آزمایش‌های سانتریفیوژ بدست آمد. بعلاوه آزمایش سلول واحد دورگیر شده نیز بر روی نمونه انجام شد. نتایج نشان دادند که انتقال تنش از خاک رس به ستون سنگی عمدتا وابسته به میزان تحکیم در اطراف ستون می‌باشد. در آزمایش سلول واحد دورگیر شده با افزایش بار نسبت تمرکز تنش نیز افزایش می‌یابد که این مسئله با تحلیل‌های عددی الاستوپلاستیک همخوانی خوبی دارد (Stewart and Fahey, 1994).

همچنین تمرکز تنش به پارمترهای مختلفی از قبیل نوع بارگذاری (صلب یا انعطاف پذیر)، سربار، خواص مصالح ستون سنگی و خاک اطراف و ابعاد هندسی پروژه وابسته می‌باشد (Kirisch and Sondermann, 2003).

Mckelvey و همکاران مکانیسم تقسیم بار را بر روی ستون‌های سنگی، کامپوزیت (رس-سنگ) با استفاده از تحلیل مقدار فشار موجود در زیر پی مربعی صلب مورد بررسی قرار دادند. تغییرات نسبت تمرکز تنش ناشی از افزایش فشار در پی مربعی در شکل ۱-۹ نشان داده شده است. در آزمایش TS-11 و TS-13 (آزمایش بر روی ستون سنگی بلند) به نظر می‌رسد که ستون‌ها سهم بیشتری از تنش را به خود اختصاص می‌دهند ($n \geq 4$). در مقابل مقدار n در ستون‌های سنگی کوتاه کمتر از ۲ بود. ستون‌های سنگی کوتاه (آزمایش TS-14) مقاومت کمتری در مقابل تنش‌های وارده در مقایسه با ستون‌های بلند از خود نشان می‌دهند (McKelvey *et al.*, 2004).



شکل ۱- ۱۱- تغییرات نسبت تمرکز تنش با افزایش نیروی وارده (Mckelvey, 2004)

در عمل ستون‌های سنگی تحت بار گسیختگی قرار نمی‌گیرند و بارهای وارده بر آنها بصورت قابل توجهی کوچکتر از ظرفیت باربری نهایی می‌باشد. در طی آزمایشات با استفاده از بارهای مجاز کـه در شـکل ۱-۹ بـا استفاده از ناحیه هاشورخورده نشان داده شده است، به نظر می‌رسد که توزیع تنش در زیر یک پی صلب واقع بر روی ستون سنگی برای ستون‌های کوتاه و بلند به طور چشمگیری متفاوت می‌باشد. تحت بارهای بالا کـه بسیار بیشتر از بارهای مجاز می‌باشد، نسبت تنش، مستقل از طول ستون، بـه یـک مقـدار ثابـت (حـدودا ۳) نزدیک می‌شود. این مسئله با داده‌های بدست آمده از آزمایشات صحرایی همخوانی دارد.

۱-۸- مکانسیم عملکرد ستون‌های سنگی

وجود ستون سنگی باعث کاهش نشست کلی و افزایش مقاومت برشی نسبت به خاک بدون ستون سنگی می‌گردد. دورگیری و در نتیجه سختی ستون سنگی توسط تنش‌های جانبی موجود در خاک تامین می‌گردد. وقتی بار محوری به ستون سنگی وارد می‌گردد، قطر ستون در زیر خاک افزایش می‌یابد. ایـن مسـئله باعـث افزایش تنش افقی در خاک و در نتیجه موجب دورگیری بیشتر ستون سنگی می‌گردد. با رسیدن بـه حالـت تعادل، جابجایی قائم کلی در خاک نسبت به حالت بدون وجود ستون سنگی کاهش می‌یابد.

۱-۸-۱- مطالعات آزمایشگاهی

برای بررسی تاثیر ستون‌های ماسه‌ای تراکمی (SCP) و ستون‌های شنی تراکمی (GCP) بر روی کـاهش نشست، محققین از آزمایشات سانتریفیوژ استفاده کرده‌اند. همچنین برای مقایسه جواب‌های آزمایشگاهی بـا تحلیل‌های عددی این آزمایشات با استفاده از روش المان محدود مدل شده‌انـد. و نتـایج نشـان دهنـده ایـن موضوع بودند که عملکرد ستون‌های شنی نسبت به ستون‌های ماسه‌ای بهتر می‌باشد (Cho *et al.*, 2005).

مطالعاتی نیز بر روی ستون‌های سنگی منفرد انجام شده است که برای مشاهده تغییر شـکل‌هـای ایجـاد شده در رس اطراف و در خـود سـتون سـنگی کـه بوسـیله دسـتگاهی بارگـذاری شـده بـود از رادیـوگرافی آزمایشگاهی استفاده شده است. که نتایج حاصله نشان دهنده آن بـود کـه اتسـاع سـتون سـنگی در عمقـی