تأثیر لایهٔ ماسه‌ای مسلح و غیرمسلح با و بدون ستون‌های ماسه‌ای بر رفتار ظرفیت باربری- نشست رس نرم

محمود رضا عبدی*، مهدی صفدری سه‌گنبد، هوشمند تیراندازی

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکدهٔ مهندسی عمران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۵

چکیده

ستون‌های ماسه‌ای/سنگی به دلیل اجرای ساده و کم هزینه بودن دارای کاربردهای متنوع در مهندس ژئوتکنیک می‌باشند. این روش باعث مسلح نمودن خاک به منظور افزایش ظرفیت باربری، کنترل نرخ نشست، کاهش نشست‌های نامتقارن و کل، پایداری سطوح شیبدار و مقاومت در برابر روانگرایی می‌شود. خاک‌های رسی نرم که در زمره خاک‌های مشکل‌ساز قرار می‌گیرند از ظرفیت باربری کم و پتانسل نشست بالایی برخوردار بوده و از این رو نیاز به بهسازی دارند. در مقالهٔ حاضر تأثیر لایهٔ سطحی ماسه‌ای به صورت مسلح و غیرمسلح همراه با و بدون تک و گروه ستون‌های ماسه‌ای بر رفتار ظرفیت باربری- نشست رس نرم بررسی شده است. بدین منظور رفتار نمونه‌های رس نرم، رس + لایه‌ی سطحی ماسه‌ای مسلح و غیرمسلح، رس + تک/گروه ستون‌های ماسه‌ای و رس + لایهٔ سطحی ماسهٔ مسلح/ غیرمسلح + تک / گروه ستون‌های ماسه‌ای بررسی و نتایج در مقاله حاضر ارائه گردیده است. از ژئوگرید به عنوان عامل تسلیح لایه‌ی ماسه‌ای، از دستگاه سی. بی. آر. به منظور سیستم بارگذاری و از صفحهٔ فلزی به قطر ۵ سانتیمتر به عنوان سطح بارگذاری در آزمایش‌ها استفاده شده است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که به کارگیری لایهٔ سطحی ماسهٔ غیرمسلح و مسلح شده با یک لایهٔ ژئوگرید در نسبت نشست ۵٪ باعث افزایش ظرفیت باربری بین ٤ تا ۷ برابر نسبت به رس نرم به تنهایی شده و استفاده از تک یا گروه ستون‌های ماسه‌ای نیز بهبود ظرفیت باربری رس نرم را باعث شده است. به کارگیری لایهٔ سطحی ماسهٔ مسلح و غیرمسلح توام با تک یا گروه ستون‌های ماسه‌ای نیز ظرفیت‌های باربری را ۷ تا ۹ برابر نسبت به رس نرم افزایش داده که بهبود ۷۰۰ تا ۹۰۰ درصدی است. با افزایش قطر ستون‌های ماسه‌ای ظرفیت باربری نهایی افزایش یافته به گونه‌ای که به کارگیری گروه ستون ماسه‌ای به قطر ۸ سانتیمتر بیشترین تأثیر را بر رفتار ظرفیت باربری- نشست نمونه‌های رس + ستون‌های ماسه‌ای داشته است. همچنین نتایج گواه آن است که به کارگیری لایهٔ ماسهٔ سطحی به صورت مسلح یا غیرمسلح همراه با گروه ستون ماسه‌ای مؤثرتر از تک ستون ماسه‌ای هم حجم است.

واژه‌های کلیدی: ظرفیت باربری، رس نرم، ستون ماسه‌ای، تسلیح، ژئوگرید.

* نویسندهٔ مسئول abdi@kntu.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]

۱- مقدمه

رس‌های نرم با قابلیت نشـــست‌پذیری بالا و ظرفیت باربری کم در مناطق گســـترده‌ای از جهان موجود بوده و از روش‌های مختلفی مانند جایگزینی، تثبیت شیمیایی با آهک و سیمان و یا تسلیح با ژئوسنتتیک‌ها به منظور بهسازی آنها استفاده می شود. ظرفیت باربری فوندا سیون‌های مستقر روی رس‌های نرم را می‌توان با به کارگیری ژئو سنتتیک‌ها یا لایه‌های در شت‌دانهٔ سطحی می‌توان بهبود بخشید. ضخامت لایهٔ در شت‌دانه بستگی به ظرفیت باربری مورد نظر و نشـــست مجاز دارد. به کارگیری لایه ســطحی ماســه‌ای با ضــخامت ۳۰ ســانتیمتر یا بیشــتر باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های ناشی از بارهای سازه‌ای و بنابراین نشست می‌شود [۱، ۲، ۳، ٤، ٥، ٦، ۷، ۸ و ۹]. نتایج تحقیقات Rethaliya و Verma در سال ۲۰۰۹ و Ibrahim در سال ۲۰۱٤ نیز نشان داده که تأمین لایهٔ در شت‌دانه بر روی لایهٔ رس نرم باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود [۱۰ و ۱۱]. با مطالعهٔ تأثیر ماسه روی لایهٔ رس توسط Ramadan و Hussein در سال ۲۰۱٥ مشاهده شده که ظرفیت باربری نهایی با افزایش نسبت ضخامت (H/B) و دانسیتهٔ نسبی ماسه افزایش و گسیختگی پانچ در لایهٔ رس و موضعی در لایهٔ ماسه رخ می‌دهد [۱۲].

Al-Awaji در سال ۲۰۰۱ رفتار ظرفیت باربری-نشست ماسهٔ مسلح شده با یک لایهٔ ژئوگرید که بر روی خاک ضعیف قرار گرفته را مطالعه و عمق بهینهٔ قرارگیری عامل تسلیح برای حصول حداکثر ظرفیت باربری را حدوداً ۱D (D قطر پی) تعیین کرده است [۱۳]. نتایج تحقیقات Basudhar و Santanu در سال ۲۰۰۷ روی رفتار پی دایره‌ای واقع بر ماســه‌ی مســلح شــده با ژئوتکســتایل نشــان داده که با افزایش تعداد لایه‌های تســلیح ظرفیت باربری افزایش، نشست کاهش، و با افزایش تراکم نسبی ماسه، گسیختگی در نشست‌های بالاتر اتفاق می‌افتد [۱٤]. بررسی رفتار پی‌های مستقر بر خاک مسلح شده با ژئوگرید توسط Sharma و همکاران در سال ۲۰۰۹ نشان داده که عمق استقرار لایهٔ اول مسلح‌کننده و فاصلهٔ عمودی بین آنها باید در محدودهٔ ۰/۲B تا ۰/٥B (B عرض پی)، بیشترین عمق لایه‌های تســلیح بین ۱B تا ۲B و طول مؤثر مســلح‌کننده‌ها ۲B تا ۸B باشــد [۱٥]. Latha و Somwanshi در ســال ۲۰۰۹ نیز رفتار پی دایره‌ای شکل مستقر بر ماسهٔ مسلح به انواع ژئوگرید و ژئونت را مطالعه و نشان داده‌اند که عمق تأثیر حدود دو برابر قطر پی (۲D) بوده و قرارگیری عامل تسلیح در عمق‌های بیشتر تأثیر چندانی بر بهبود ظرفیت باربری نداشته و عرض مؤثر نیز حدوداً ٤ برابر قطر پی (٤D) می‌باشــد [۱٦]. Nazir و Azzam در ســال ۲۰۱۰ با بررســی رفتار پی مستطیل شکل واقع بر لایهٔ ماسه‌ای مسلح شده با ژئوگرید نشان دادند که به کارگیری سه لایه ژئوگرید حالت بهینه بوده و تعداد بیشــتر لایه‌ها، تأثیر ناچیزی بر بهبود ظرفیت باربری داشــته و با افزایش تراکم خاک تأثیر تعداد لایه‌های ژئوگرید مشهودتر می‌شود [٤].

ستون‌های ماسه‌ای و یا سنگی نیز یک روش کاربردی، ساده از لحاظ اجرایی و اقتصادی به منظور افزایش ظرفیت باربری، سرعت تحکیم و کاهش نشست‌های نسبی رس‌های نرم و پتانسیل روانگرایی ماسه‌ها است. این روش مبتنی بر جایگزینی ۱٥ الی ۳٥ درصد حجم خاک نامرغوب و استفاده از مقاومت برشی زیاد مصالح شن و ماسه‌ای و تأمین قید جانبی توسط خاک طبیعی و انتقال بار سازه به لایه‌های مقاوم‌تر است [۱۷ و ۱۸]. Ambily و Gandhi در سال ۲۰۰۷ با انجام یک سری آزمایش در مقیاس بزرگ نشان دادند که با افزایش تنش برشی، میزان تنش محوری بیش‌تری برای رسیدن به یک نشست ثابت لازم بوده و تنش محوری مستقل از مقاومت برشی خاک اطراف می‌باشد [۱۹]. Rajput و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]

همکاران در سال ۲۰۱۶ رفتار بار–نشست رس نرم مسلح شده با شمع‌های ماسه‌ای را مورد مطالعه قرار داده و گزارش نموده‌اند که ظرفیت باربری افزایش، نسبت طول به قطر معادل ۵، طول بهینه و بهترین فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها ۲/۵D (D، قطر شمع) است [۷]. Teena و Hari نیز در سال ۲۰۱۶ با مطالعهٔ تاثیر ستون‌های ماسه‌ای بر ظرفیت باربری رس نرم نشان داده‌اند که خصوصیات بار–نشست این خاک‌ها به طور فزآینده‌ای بهبود یافته و ظرفیت باربری نهایی رس + ستون ماسه‌ای ۱/۵ برابر رس به تنهایی شده و ظرفیت باربری با افزایش قطر ستون ماسه‌ای افزایش می‌یابد [۲۰]. Ong و همکاران در سال ۲۰۱۸ عملکرد ستون‌های سنگی شناور در رس نرم را به صورت میدانی و عددی بررسی و شناسایی کردند که چسبندگی، زاویهٔ اصطکاک، زاویه اتساع و همچنین مکانیزم اندرکنش خاک–سازه به شدت عملکرد بار–نشست این ستون‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۲۱]. Shehata و Sorour (۲۰۱۸) گزارش کرده‌اند که اجرای ستون سنگی به دلیل جابه‌جایی افقی خاک بطور فاحشی بر خصوصیات و بنابراین عملکرد خاک اصلاح شده تاثیرگذار است [۲۲].

Gniel و Bouazza در سال ۲۰۰۹ گزارش نمودند که محصور نمودن ستون سنگی باعث کاهش کرنش‌های جانبی شده و در حالت محصور شدگی کامل، گسیختگی شبکهٔ محصورکننده در تنش‌های پایین‌تری نسبت به بقیه حالات رخ می‌دهد که ناشی از تنش‌های شعاعی بالا ذکر شده است [۲۳]. Murugesan و Rajagopal نیز در سال ۲۰۰۹ رفتار ستون‌های سنگی محصور شده را مورد مطالعه قرار داده و نتایج بیانگر آن بوده که اثر محصور شدگی با افزایش قطر ستون به دلیل بیشتر بسیج شدن نیروهای محصور کنندگی در قطرهای پایین‌تر کاهش و با افزایش مدول الاستیک ژئوسنتتیک، سختی و ظرفیت باربری ستون افزایش می‌یابد [۲۴]. Deb و همکاران نیز در سال ۲۰۱۱ نشان دادند که به کارگیری لایه‌های افقی ژئوگرید باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش شکم‌دادگی ستون سنگی می شود [۲۵]. Nayak و همکاران در سال ۲۰۱۹ نشان دادند که استفاده از ژئوگرید برای در برگرفتن ستون سنگی میزان شکم دادگی را ۳۸٪ کاهش داده و در صورت استفاده همزمان از یک لایهٔ تسلیح در قاعده ستون سنگی میزان شکم دادگی تا ۸۲٪ کاهش می‌یابد [۲۶]. Hamzeh و همکاران در سال ۲۰۱۹ با بررسی تاثیر شکل هندسی ستون سنگی بر ظرفیت باربری، مقرون به صرفه‌ترین شکل ستون سنگی را با نسبت قطر نیمه فوقانی به قطر نیمه تحتانی ۲ به ۱ و نسبت طول ۳ به ۷ تعیین کرده‌اند [۲۷]. Nasiri و Hajiazizi نیز در سال ۲۰۱۹ به صورت آزمایشگاهی و عددی نشان داده‌اند که به کارگیری ستون‌های سنگی دورپیچ شده توسط ژئوتکستایل روشی موثر برای تثبیت سطوح شیبدار و افزایش ضریب اطمینان در برابر لغزش می‌باشد [۲۸].

مطالب فوق نشان می‌دهد که مطالعات متعددی در خصوص تأثیر لایهٔ سطحی مسلح یا غیرمسلح و یا به کارگیری ستون‌های سنگی مسلح یا غیرمسلح بر رفتار ظرفیت باربری–نشست خاک‌های ضعیف انجام گردیده، لیکن تأثیر ترکیب آنها به صورت توام بررسی نشده است. از آن‌جایی‌که دور پیچ کردن و علی‌الخصوص استفاده از لایه‌های افقی ژئوگرید به منظور مسلح نمودن ستون‌های ماسه‌ای (سنگی) وقت‌گیر و ساده نیست، به کارگیری همزمان لایهٔ ماسهٔ سطحی مسلح و ستون‌های سنگی غیرمسلح هم سریع‌تر و از لحاظ اجرایی نیز بسیار ساده‌تر است. لایهٔ درشت‌دانه غیرمسلح یا مسلح باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها، کاهش نشست، جلوگیری از تمرکز تنش در بخش فوقانی ستون سنگی و شکم‌دادگی، کاهش طول و قطر ستون‌های سنگی، کاهش زمان اجرا و بنابراین صرفه اقتصادی خواهد شد. بر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]

این اساس، در تحقیق حاضر تأثیر به کارگیری لایهٔ ماسهٔ سطحی با ضخامت‌های متفاوت به صورت غیرمسلح و مسلح شده با یک لایه ژئوگرید بدون و توام با تک و یا گروه ستون‌های ماسه‌ای با حجم معادل تک ستون‌ها، بر رفتار ظرفیت باربری- نشست رس‌های نرم مورد تحقیق قرار گرفته است.

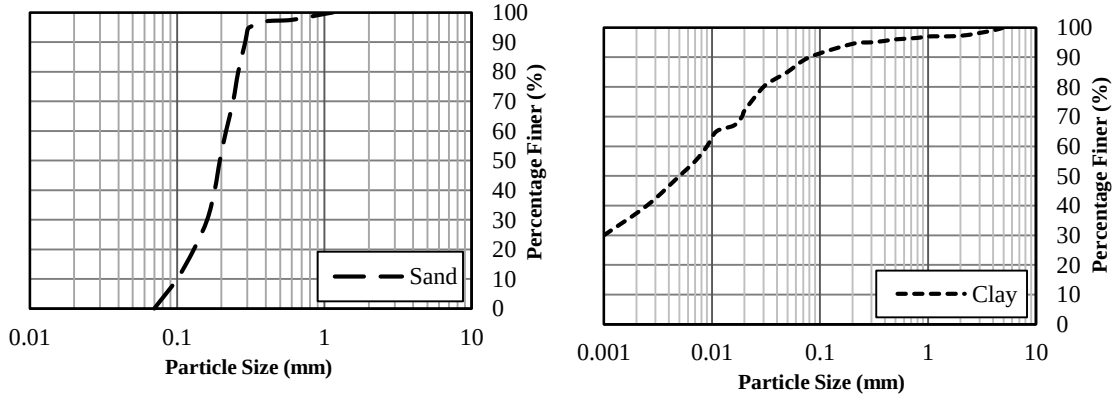
۲- مصالح

۲-۱- رس و ماسه

در این تحقیق از رس و ماسهٔ طبیعی استفاده و خلاصهٔ خصوصیات آنها که بر اساس آزمایش‌های استاندارد ASTM تعیین شده در جدول ۱ ارائه شده است. توزیع دانه‌بندی خاک‌ها در شکل ۱ نشان داده شده و بر اساس سیستم طبقه‌بندی یونیفاید (USCS) رس در رده‌ی CL و ماسه در ردهٔ SP قرار گرفته‌اند.

جدول ۱. مشخصات رس و ماسه.

خصوصیات رس	مقدار	خصوصیات ماسه	مقدار
حد روانی (٪)	۳۲	ضریب یکنواختی	۲
حد خمیری (٪)	۱۹	ضریب انحناء	۱/۳
شاخص خمیری (٪)	۱۳	دانسیتهٔ خشک حداکثر (kg/m^3)	۱۹۲۰
دانسیتهٔ خشک حداکثر (kg/m^3)	۱۶۵۰	دانسیته‌ی خشک حداقل (kg/m^3)	۱۴۴۰
رطوبت بهینه (٪)	۱۸	زاویه‌ی اصطکاک	۳۷°
چگالی	۲/۷۰	چسبندگی	صفر
مقاومت فشاری تک محوری (kN/m^2)	۳۰	چگالی	۲/۶۵



شکل ۱. توزیع دانه‌بندی ماسه و رس.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]

۲-۲- ژئوگرید

به منظور تسلیح لایهٔ سطحی ماسه‌ای از ژئوگرید با نام تجاری CE۱۵۱ تولید شرکت مشیران استفاده و مشخصات و شکل ظاهری آن به ترتیب در جدول ۲ و شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور تأثیر حداکثری ژئوگرید بر رفتار ظرفیت باربری و نشست‌پذیری رس نرم، با توجه به نتایج تحقیقات Basudhar و همکاران در سال ۲۰۰۷ و Sharma و همکاران در سال ۲۰۰۹ محل قرارگیری عامل تسلیح در مرز رس نرم و لایه‌ی ماسه مد نظر قرار گرفته است [۱۴ و ۱۵].

جدول ۲. مشخصات ژئوگرید [۲۹].

نام ژئوگرید	CE۱۵۱
مقاومت کششی	۷/۶ (kN/m)
اندازه چشمه	۱۰ (mm)
نوع ژئوگرید	دو طرفه



شکل۲. ژئوگرید CE۱۵۱.

۳- سیستم بارگذاری

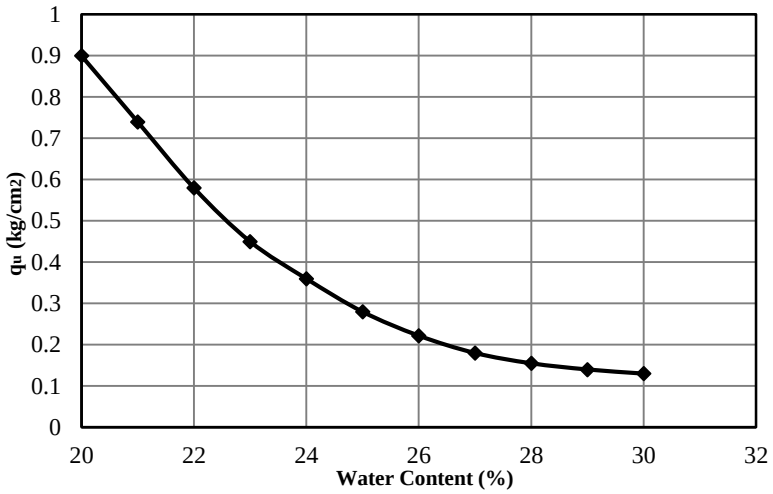
از دستگاه CBR جهت بارگذاری استفاده شده که با توجه به محدودیت‌های ابعادی آن و برای جلوگیری از تأثیر شرایط مرزی بر نتایج، نمونه‌ها در جعبه‌ای با طول، عرض و عمق به ترتیب ۳۵۰، ۳۲۰ و ۳۰۰ میلی‌متر آماده‌سازی و از صفحه‌ی فلزی دایره‌ای شکل به قطر ۵۰ و ضخامت ۲۵ میلی‌متر استفاده گردیده است. بر اساس تئوری بوزینسک و با در نظر گرفتن صفحه‌ی بارگذاری در مرکز سطح نمونه، اطمینان حاصل گردیده که دیوارهای جعبه خارج از محدوده توزیع تنش‌ها و شکل‌گیری گوه‌های احتمالی گسیختگی قرار گرفته و تأثیری بر رفتار نمونه‌ها نداشته است.

۴- نحوهٔ آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور فراهم نمودن رس نرم ابتدا خاک رس را با درصدهای مختلف رطوبت مخلوط و سپس نمونه‌های سیلندری شکل تهیه و تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفته‌اند. تغییرات مقاومت‌های فشاری نسبت به در صدهای رطوبت در شکل ۳ نشان داده شده است. نمونهٔ رس حاوی ۲۵ در صد رطوبت که مقاومت فشاری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]

حدوداً ۰/۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع به دست داده، طبق طبقه‌بندی Fang و Daniels در سال ۲۰۱۷ در رده رس‌های نرم طبقه‌بندی شده و از آن برای تهیهٔ لایه رس نرم استفاده شده است [۳۰].



شکل۳. تغییرات مقاومت فشاری تک محوری-درصد رطوبت رس.

ضخامت لایهٔ رس نرم در جعبهٔ آزمایش ۲۰ سانتی‌متر بوده که در چهار لایهٔ ۵ سانتیمتری اجراء و سپس ماسه با ضخامت‌های متفاوت ۱، ۲/۵ و ۵/۰ سانتیمتر روی آن ریخته و متراکم شده است. ستون‌های ماسه نیز به روش جایگزینی خشک و با به کارگیری لوله‌های پلیکا با قطرهای ٤، ٦ و ۸ سانتیمتر اجراء شده است. بدین منظور لوله‌ها داخل لایهٔ رس رانده شده و پس از تخلیه خاک درون آن‌ها توسط ماسه طی چهار مرحله ۵ سانتیمری پر و متراکم شده و پس از هر مرحله، لوله قدری بالا کشیده شده است. به منظور تسهیل در بیرون کشیده شدن لوله‌ها و برای کاهش چسبندگی بین رس و جدارهٔ خارجی و اصطکاک بین ماسه و جدارهٔ داخلی، این سطوح با لایه‌ای نازک از روغن پوشانیده شدند. با توجه به نتایج دیگر محققان و به منظور اثربخشی حداکثری عامل تسلیح، در نمونه‌های مسلح از لایهٔ ژئوگرید در مرز رس نرم و لایهٔ ماسه استفاده شده است. نرخ بارگذاری ۱/۲۷ میلی‌متر بر دقیقه و حداکثر نشست سطح بارگذاری ۵۰ میلیمتر و فشار متناظر با آن به عنوان ظرفیت باربری نهایی لحاظ شده است. شایان ذکر است که تحت شرایط واقعی چنین نشست‌هایی امکان‌پذیر نبوده و ادامه آزمایش‌ها تا این مرحله صرفاً به منظور مطالعهٔ تأثیر لایهٔ ماسه، تک ستون یا گروه ستون‌های ماسه‌ای و ژئوگرید و ترکیب آنها تحت تغییر شکل‌های نسبتا بزرگ که احتمالاً در لایه‌های رس خیلی نرم و زمین‌های باتلاقی رخ می‌دهد، بوده است. جعبهٔ آزمایش همراه با محل قرارگیری ژئوگرید و تک ستون و آرایش گروه ستون‌های ماسه‌ای به صورت شماتیک در شکل ٤ و حالت‌های مختلف بررسی شده در شکل ۵ نشان داده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]



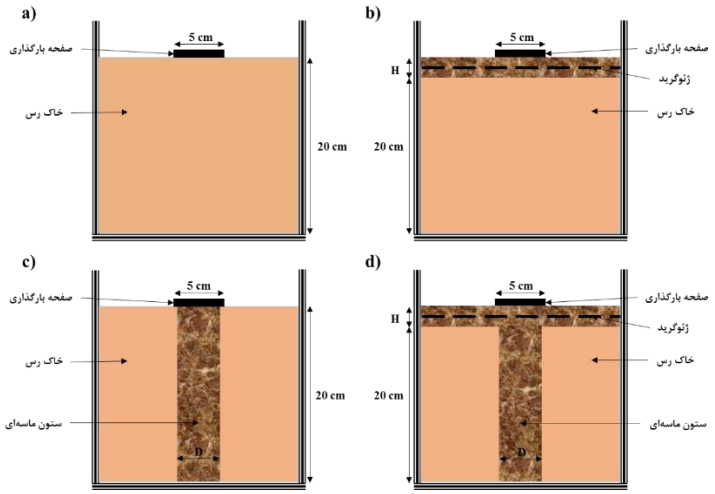
شکل ٤. شکل شماتیک جعبه و نمونهٔ آزمایش.

٥- نتایج و تفسیر

به منظور مطالعه و مقایسهٔ تأثیر لایهٔ ماسهٔ غیر مسلح و مسلح شده با ژئوگرید در ترکیب با و بدون ستون‌های ماسه‌ای بر ظرفیت باربری و نشست‌پذیری رس‌های نرم، موارد ذیل بررسی شده‌اند:

- نمونه‌های رس و ماسه
- نمونه‌های رس + لایهٔ سطحی ماسهٔ مسلح و غیرمسلح
- نمونه‌های رس + ستون‌های ماسه‌ای با قطرهای ٤، ٦ و ٨ سانتیمتر
- نمونه‌های رس + تک و گروه ستون‌های ماسه‌ای + لایهٔ ماسه سطحی غیر مسلح
- نمونه‌های رس + تک و گروه ستون‌های ماسه‌ای + لایهٔ ماسه سطحی مسلح

نتایج حاصل از آزمایش‌ها به صورت نمودارهای ظرفیت باربری-نسبت نشست (δ/B) و همچنین نسبت ظرفیت باربری-نسبت نشست ارائه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.



شکل ٥. آرایش‌های مختلف بررسی شده.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]

۱-۵- نمونه‌های رس و ماسه

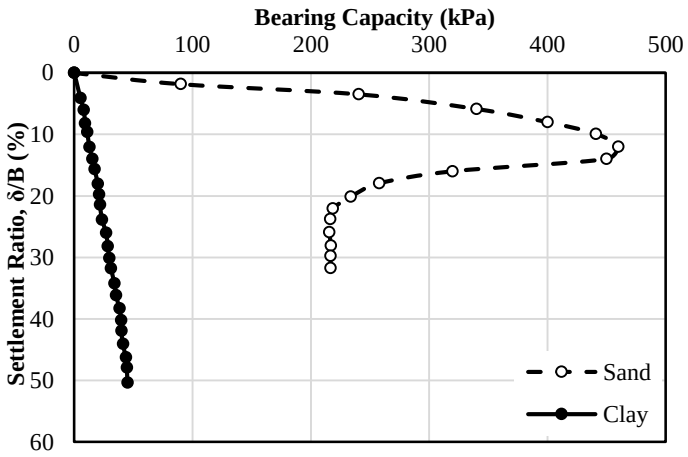
تغییرات ظرفیت باربری-نسبت نشست برای نمونه‌های رس و ماسه به تنهایی که نتایج آن‌ها به عنوان مبنای مقایسه مورد استفاده قرار گرفته در شکل ٦ نشان داده شده و تفاوت فاحش بین رفتار این مصالح به وضوح مشهود است. ظرفیت باربری رس نرم با افزایش نسبت نشست به صورت خیلی تدریجی تا حداکثر δ/B=٪۵۰ افزایش نشان می‌دهد در حالی که در لایهٔ ماسه نسبت نشست ابتدا به شدت افزایش یافته به طوری که تحت δ/B=٪۱۲ به حداکثر ٤٦۰ kPa بالغ شده و با افزایش نشست، ظرفیت باربری شدیداً به ۲۰۰ kPa کاهش و به شرایط ثابت و پایدار رسیده است. نتایج نشان می‌دهد که رفتار رس نرم کاملاً سخت شونده و رفتار ماسه ابتدا سخت شونده و سپس نرم شونده بوده که دقیقاً همانند رفتار این مصالح تحت شرایط آزمایش‌های مقاومتی برش مستقیم و سه‌محوری است. در شکل ۷ تغییرات سطح نمونه‌های رس و ماسه پس از بارگذاری و حداکثر نشست نشان داده شده است. شبکهٔ گستردهٔ ترک‌های ناشی از تغییر شکل‌های زیاد کاملاً قابل روئیت بوده و گسیختگی در رس نرم از نوع پانچ و در لایهٔ ماسه از نوع موضعی بوده که همسو با مشاهدات Ramadan و Hussein در سال ۲۰۱۵ است [۱۲].

۲-۵- نمونه‌های رس + لایهٔ سطحی ماسه‌ی مسلح و غیرمسلح

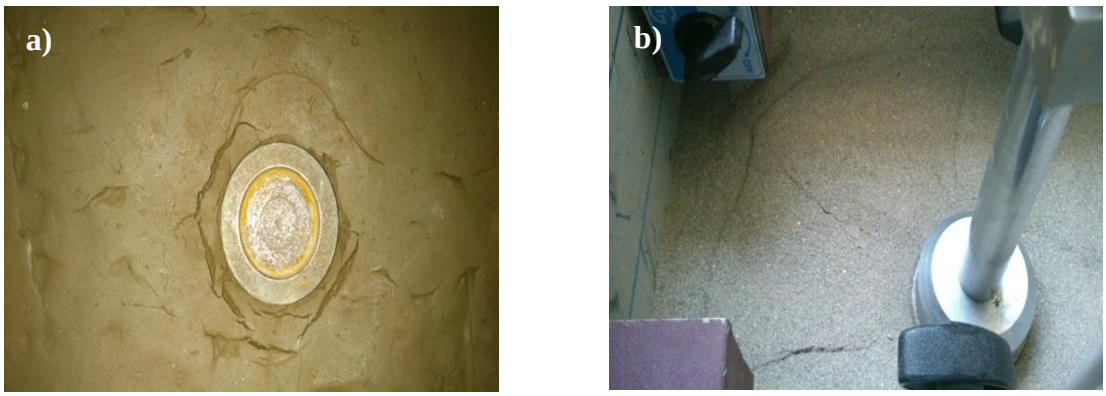
نتایج بارگذاری نمونه‌های رس نرم پوشانیده شده توسط لایه‌های نازک ماسه‌ی غیرمسلح و مسلح شده با ژئوگرید در شکل ۸ نشان داده شده است. ضخامت لایه‌های ماسه ۱، ۲/۵ و ۵/۰ سانتی‌متر بوده است. تسلیح نمونه‌ی رس+ لایهٔ سطحی ماسه به ضخامت ۱/۰ سانتیمتر امکان‌پذیر نبوده و در نمونه‌های پوشانیده شده توسط لایه‌های سطحی ماسه به ضخامت‌های ۲/۵ و ۵/۰ سانتی‌متر نیز تنها از یک لایه ژئوگرید در مرز مشترک رس نرم و ماسه استفاده شده است. مشاهده می شود که استفاده از قشر ماسه روی رس نرم موجب افزایش ظرفیت باربری شده به طوری که حتی وجود یک لایه ۱/۰ سانتیمتری و غیر مسلح از این مصالح تحت S/B=٪۵ باعث افزایش تقریبا ٤ برابری ظرفیت باربری نسبت به رس تنها گردیده است. همچنین قشرهای ماسه‌ای به ضخامت‌های ۲/۵ و ۵/۰ سانتی‌متر نیز تحت S/B=٪۵ ظرفیت‌های باربری را در مقایسه با رس نرم به میزان ٦ تا ۷ برابر بهبود بخشیده‌اند. نکته قابل توجه اینکه تا S/B=٪۵ افزایش ضخامت قشر ماسه از ۲/۵ به ۵/۰ سانتی‌متر موجب تفاوت آنچنانی در ظرفیت باربری نمونه‌ها نگردیده است. با افزایش نسبت نشست، در نمونه‌های رس نرم پوشانیده شده توسط قشر ۵/۰ سانتی‌متری ماسه با افزایش نسبت نشست ظرفیت باربری‌های بزرگ‌تری تحت یک S/B ثابت حاصل می‌گردد که بیانگر آن است که قشر ماسه‌ای به صورت یک لایه صلب رفتار نموده و عمده افزایش تنش‌های ناشی از بارگذاری را جذب و از انتقال به لایه‌ی رس نرم جلوگیری به عمل آمده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]



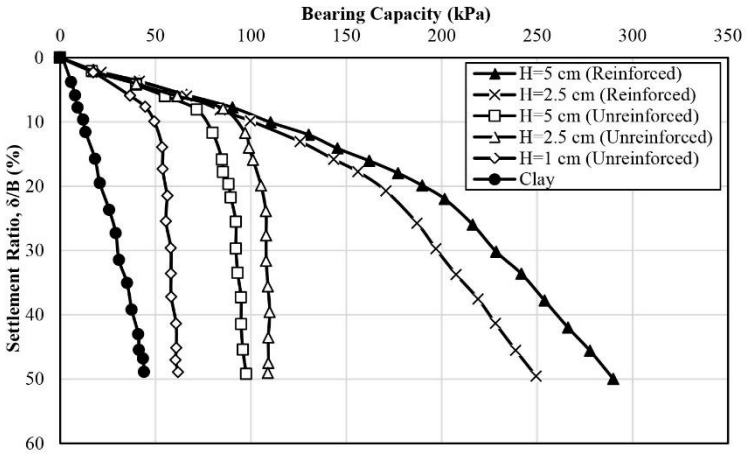
شکل ٦. تغییرات ظرفیت باربری-نسبت نشست رس و ماسه.



شکل ۷. تغییرات سطح نمونه‌ها پس از بارگذاری: a) رس و b) ماسه.

به کارگیری یک لایه ژئوگرید در مرز مشترک رس نرم-ماسه به ضخامت‌های ۲/۵ و ۵/۰ سانتی‌متر باعث افزایش قابل توجه ظرفیت‌های باربری علی‌الخصوص پس از S/B>٪۱۰ شده است. به عنوان مثال ظرفیت باربری رس + ماسه با ضخامت ۲/۵ سانتیمتر در حالت‌های غیرمسلح و مسلح به ترتیب از ۷۵ به ۱۰٤ kPa و از ۸۰ به ۱۲۵ kPa تحت δ/B=٪۱۰بالغ شده است. جالب توجه این که تا δ/B=٪۵ تفاوت آنچنانی بین ظرفیت‌های باربری نمونه‌های مذکور مشاهده نمی‌شود و رفتار نمونه‌های غیرمسلح پس از δ/B≈٪۱۰ تقریبا ثابت شده در صورتی که در نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید حتی پس از δ/B=٪۵۰ نیز روند افزایشی است. این رفتارها بیانگر آن است که در نسبت نشست‌های کم، عمده تنش‌های ناشی از بارگذاری توسط قشر ماسه جذب شده و پس از تغییر شکل‌های قابل‌ملاحظه است که ژئوگرید شروع به ایفای نقش نموده و مقاومت کششی آن تدریجاً بسیج می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]



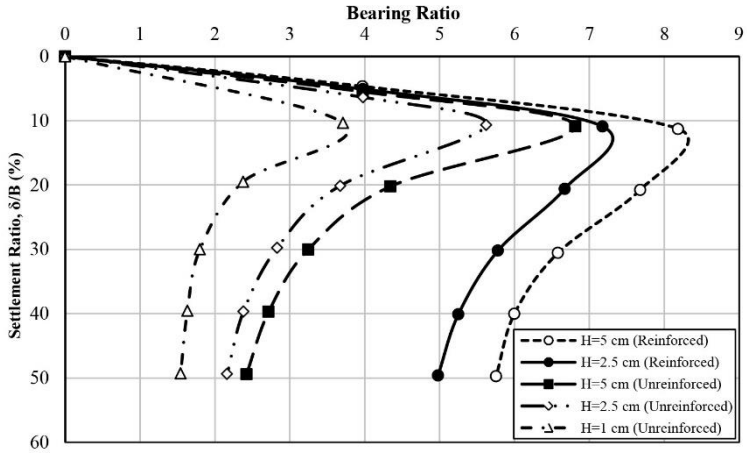
شکل ۸. تغییرات ظرفیت باربری-نسبت نشست نمونه‌های رس نرم + ماسه‌ی سطحی مسلح و غیرمسلح.

به منظور مشاهدهٔ بهتر تأثیر قشر ماسه با ضخامت‌های مختلف به صورت مسلح و غیرمسلح نتایج به صورت نمودارهای نسبت ظرفیت باربری-نسبت نشست در شکل ۹ نشان داده شده است. نسبت ظرفیت باربری از تقسیم "*ظرفیت باربری رس با و بدون ستون ماسه‌ای و یا لایهٔ ماسه‌ی سطحی مسلح و غیرمسلح به ظرفیت باربری رس نرم*" در نسبت نشست‌های یکسان حاصل شده است. نتایج به خوبی نشان می‌دهد که در تمامی نمونه‌های رس + ماسهٔ سطحی مسلح یا غیرمسلح تا δ/B=٪۱۰ نسبت ظرفیت باربری افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد و در نسبت نشست‌های بزرگ‌تر تدریجاً به شرایط ثابت و پایدار میل می‌کنند. کاهش در نسبت ظرفیت باربری نمونه‌های رس+ ماسه سطحی مسلح کمتر از نمونه‌های رس + ماسه‌ی سطحی غیرمسلح بوده که احتمالاً به دلیل گسیختگی قشر سطحی غیرمسلح پس از نسبت نشست‌های ۱۰ الی ۱۵٪ و نفوذ گوه‌های گسیختگی به لایهٔ رس نرم زیرین بوده است. در نمونه‌های رس + ماسهٔ سطحی مسلح، ژئوگرید بخش قابل ملاحظه‌ای از تنش‌های وارده را جذب و با محدود کردن قابلیت جابه‌جایی جانبی ذرات ماسه و بسیج مقاومت مقاوم خاک در جلوی المان‌های عرضی ژئوگرید از کاهش نسبت ظرفیت باربری جلوگیری به عمل آورده است. این رفتارها با نتایج تحقیقات Abdi و Asadi در سال ۲۰۱۳ همسو بوده و نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داده که با افزایش ضخامت قشر ماسه به بیش از 1B بهبود آن‌چنانی در ظرفیت باربری حاصل نمی‌شود [۳۱].

۳-۵- نمونه‌های رس + تک و گروه ستون‌های ماسه‌ای

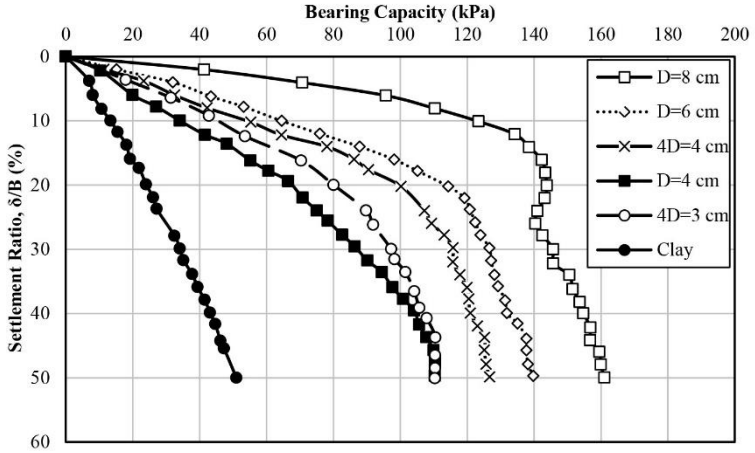
به منظور بررسی و مطالعهٔ تأثیر تک و گروه ستون‌های ماسه‌ای هم حجم بر رفتار ظرفیت باربری-نشست رس نرم ابتداء تک ستون‌های ماسه‌ای به قطرهای ٤، ٦ و ٨ سانتی‌متر در قشر رس نرم و در زیر سطح بارگذاری اجراء و سپس با ثابت نگهداشتن حجم کل، تک ستون‌های ماسه‌ای با قطرهای ٦ و ٨ سانتیمتر به ترتیب به گروه ستون‌های به قطرهای ۳ و ٤ سانتیمتر تبدیل و تأثیر آن‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است (شکل٤). با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که به کارگیری تک ستون‌های ماسه‌ای با قطرهای متفاوت در رس نرم به طور فزآینده‌ای ظرفیت باربری را افزایش داده است. به عنوان مثال تحت δ/B=٪۱۰، ظرفیت باربری رس و رس + تک ستون‌های ماسه‌ای به قطرهای ٤، ٦ و ٨ سانتیمتر به ترتیب ۱۳، ۳۳، ٦٤ و ۱۲۲ کیلوپا سکال به دست آمده که افزایش ۲/٦، ٤/۹ و حداکثر ۹/۵ برابری نسبت به رس نرم را نشان می‌دهند که با نتایج تحقیقات Murugesan و Rajagopal در سال ۲۰۰۹ و Teena و Hari در سال ۲۰۱٦ همسو است [۲۰ و ۲٤].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]



شکل۹. تغییرات نسبت ظرفیت باربری-نسبت نشست نمونه‌های رس+ ماسهٔ سطحی مسلح و غیرمسلح.

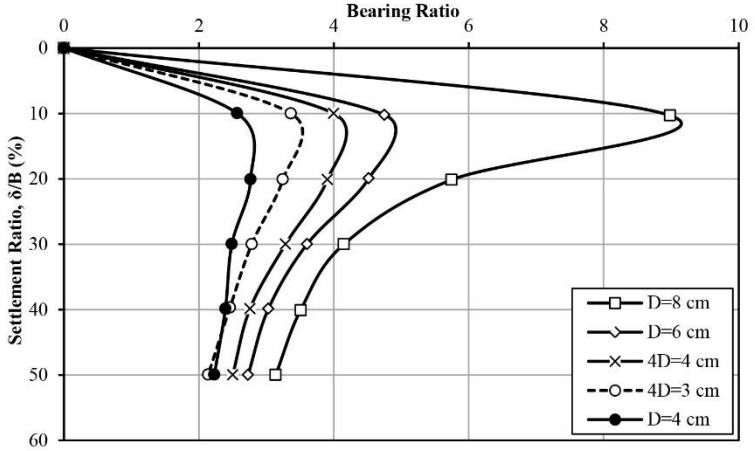
نمونهٔ رس + تک ستون ماسه‌ای به قطر ۸ سانتی‌متر رفتاری کاملاً همانند لایهٔ ماسه به نمایش گذاشته که این امر به دلیل بزرگ‌تر بودن قطر ستون ماسه‌ای از قطر سطح بارگذاری بوده و لذا این ستون ماسه‌ای تنش‌های ناشی از بارگذاری را کاملاً جذب و از گسترش و از نفوذ تنش‌های عمودی و افقی به رس نرم جلوگیری به عمل آورده است. با جایگزین نمودن تک ستون‌های ماسه‌ای با گروه ستون‌های ماسه‌ای هم حجم، مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری گروه نسبت به تک ستون‌ها کمتر بوده است. به عنوان مثال، در نسبت نشست ۱۰٪، جایگزین نمودن تک ستون‌های ماسه‌ای با قطرهای ٦ و ۸ سانتیمتر به ٤ ستون به قطرهای به ترتیب ۳ و ٤ سانتی‌متری باعث کاهش ظرفیت‌های باربری به میزان ۲۵ و ۵۵ درصد شده است. این تغییرات ناشی از استقرار سطح بارگذاری به صورت نسبی روی گروه ستون‌های ماسه‌ای و رس نرم بوده است. بر این اساس تنش‌های وارده به بخش رسی زیر سطح بارگذاری که از ظرفیت باربری کمتر و نشست‌پذیری بیشتری نسبت به ماسه برخوردار بوده باعث شده که برآیند عملکرد این نمونه‌ها از نمونه‌های رس نرم + تک ستون‌های ماسه کمتر باشد.



شکل۱۰. تغییرات ظرفیت باربری-نسبت نشست نمونه‌های رس+ تک/گروه ستون‌های ماسه‌ای.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]

نسبت ظرفیت باربری نمونه‌های رس + تک ستون‌های ماسه‌ای به قطرهای ٤ ، ٦ و ٨ سانتیمتر و رس + گروه ستون‌های ماسه‌ای با قطرهای ۳ (هم حجم با تک ستون به قطر ٦ سانتیمتر) و ٤ سانتیمتری (هم حجم با تک ستون به قطر ٨ سانتیمتر) در S/B=٪۱۰ به ترتیب ۲/۲، ۵، ۹، ۳/۵ و ٤ می‌باشد (شکل ۱۱). مشاهده می‌شود که نسبت ظرفیت باربری نمونه‌های رس با ستون‌های ماسه‌ای تا نسبت نشست ۱۰٪ به حداکثر مقدار خود رسیده و پس از آن به شدت کاهش یافته که در نمونه‌های رس+ ستون ماسه‌ای به قطر ٨ سانتی‌متر از تمامی موارد فاحش‌تر بوده و جالب این که با افزایش نسبت نشست (تغییر شکل) رفتار تمامی نمونه‌ها در حال همگرا شدن می‌باشند. این تغییرات همانند رفتار خاک‌های شن و ماسه‌ای تحت آزمایش‌های مقاومتی برش مستقیم و سه محوری بوده و بیانگر رسیدن ستون‌های ماسه‌ای به شرایط نهایی پس از تغییر شکل‌های بسیار قابل ملاحظه است.



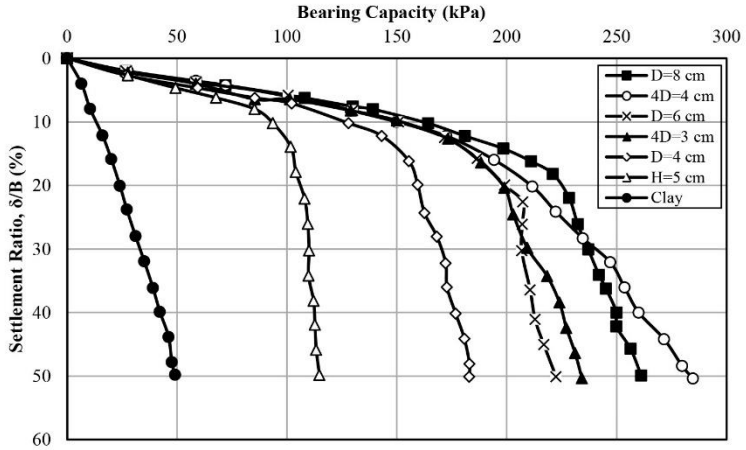
شکل ۱۱. تغییرات نسبت ظرفیت باربری-نسبت نشست نمونه‌های رس + تک/گروه ستون‌های ماسه‌ای.

٤-۵- نمونه‌های رس + تک و گروه ستون‌های ماسه‌ای + لایه‌ی ماسهٔ سطحی غیرمسلح

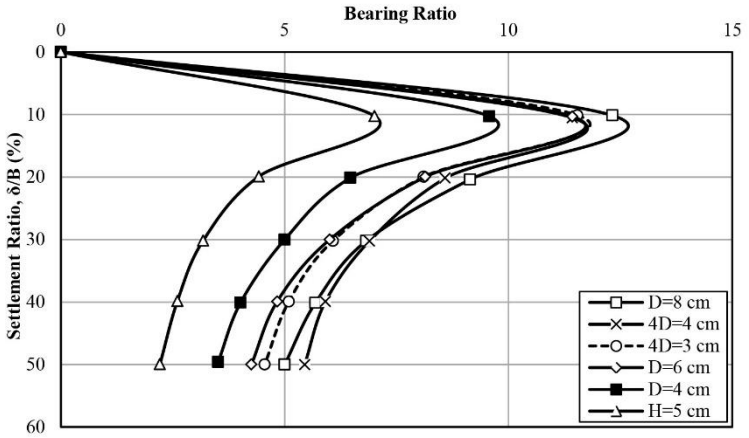
در این بخش تأثیر به کارگیری قشرهای نازک ماسه‌ی غیرمسلح با ضخامت‌های ۱، ۲/۵ و ۵ سانتیمتر بر رفتار ظرفیت باربری-نشست نمونه‌های رس + ستون‌های ماسه‌ای ارائه شده است. به منظور کاهش حجم مقاله و از آن‌جایی که قشر ماسه با ضخامت ۵ سانتیمتر بیشترین تأثیرگذاری را داشته، به ارائه نتایج این نمونه‌ها در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ بسنده شده است. همان‌گونه که از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود به کارگیری قشر ماسه به ضخامت ۵ سانتیمتر به همراه تک و گروه ستون‌های ماسه‌ای با قطرهای مختلف باعث افزایش فزآینده‌تر ظرفیت باربری شده است. حتی پس از δ/B=٪۵۰ روند تغییرات هر چند با نرخ بسیار کمتر ولیکن کماکان افزایشی است. ترکیب رس + ستون ماسه + قشر ماسهٔ سطحی نسبت به نمونه‌های فاقد ستون‌های ماسه‌ای نتایج به مراتب بهتری به دست داده لیکن نمونه‌های حاوی تک ستون و یا گروه ستون‌های با حجم یکسان تا δ/B=٪۱۰ رفتار تقریبا یکسانی نشان داده‌اند. این رفتار به آن معنا است که قشر ماسه‌ای توانسته به طور مؤثر و قابل ملاحظه‌ای از انتقال تنش‌ها به لایه‌های زیرین جلوگیری به عمل آورد که توسط Deb و همکاران در سال ۲۰۱۱ نیز گزارش شده است [۲۵]. بیشترین افزایش در ظرفیت‌های باربری تا ۱۰٪ =δ/Bحاصل شده و از این نسبت نشست به بعد افزایش‌ها نرخ بسیار کمتری نشان می‌دهند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]

با توجه به تغییرات نسبت ظرفیت باربری-نسبت نشست نمونه‌های رس + ستون ماسه‌ای + قشر ماسه‌ی سطحی غیرمسلح که در شکل ۱۳ نشان داده شده می‌توان گفت که روند تغییرات بیانگر حاکم بودن رفتار ماسه چه به صورت قشر نازک سطحی و یا ستون‌های ماسه‌ای است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر نسبت ظرفیت‌های باربری تا نسبت نشست حدوداً ۱۰٪ حاصل شده و تفاوت آنچنانی بین نمونه‌های رس حاوی تک و یا گروه ستون‌های ماسه‌ای به قطرهای ٦ و ۸ سانتی‌متر مشاهده نمی‌گردد. این روند حتی پس از افت نسبت ظرفیت باربری و تا نسبت نشست ۵۰٪ نیز ادامه می‌یابد که بیانگر جذب افزایش تنش‌ها توسط ماسه می‌باشد. تحت δ/B=٪۱۰ نمونه‌های رس + ستون (ستون‌های) ماسه‌ای + قشر ماسه‌ی سطحی در مقایسه با نمونه‌های مشابه بدون قشر ماسه‌ی سطحی (شکل ۱۱) افزایش ظرفیت‌های باربری بین ۱/۳ تا ۳/٦ و در مقایسه با رس نرم بین ٦/۳ تا ۸/۵ برابری را نشان می‌دهند.



شکل ۱۲. تغییرات ظرفیت باربری- نسبت نشست نمونه‌های رس + تک/گروه ستون‌های ماسه‌ای + ماسهٔ غیرمسلح.



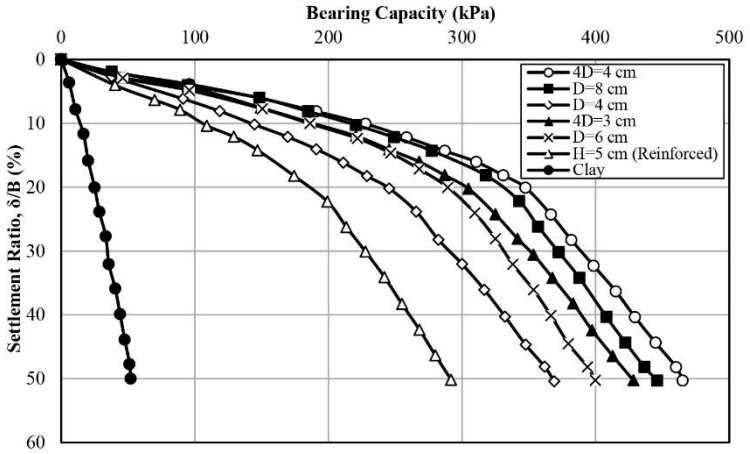
شکل ۱۳. تغییرات نسبت ظرفیت باربری-نسبت نشست نمونه‌های رس + تک/گروه ستون‌های ماسه‌ای + ماسهٔ سطحی غیرمسلح.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]

۵-۵- نمونه‌های رس + تک و گروه ستون‌های ماسه‌ای + لایهٔ ماسهٔ سطحی مسلح

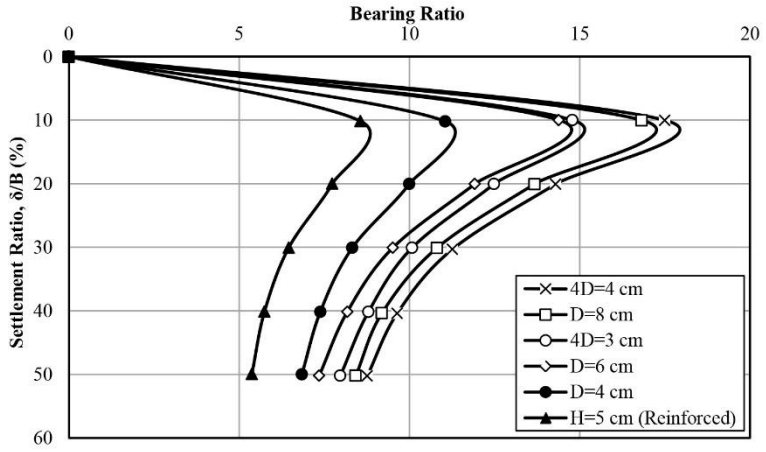
تغییرات ظرفیت باربری- نسبت نشست نمونه‌های رس + تک و گروه ستون‌های ماسه‌ای + قشر ماسهٔ مسلح سطحی همراه با رفتار نمونهٔ رس + قشر ماسه مسلح به ضخامت ۵ سانتیمتر بدون ستون‌های ماسه‌ای به منظور مقایسه در شکل ١٤ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به کارگیری یک لایهٔ ژئوگرید در مرز مشترک رس نرم- ماسه به همراه تک یا گروه ستون‌های ماسه‌ای ظرفیت‌های باربری را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده و رفتار هیچ یک از نمونه‌های بررسی شده حتی پس از نسبت نشست ۵۰٪ نیز به شرایط ثابت و پایدار یعنی ظرفیت باربری نهایی نرسیده و روند تغییرات همچنان افزایشی است. نکته جالب توجه این که نمونه‌های رس حاوی تک ستون‌های ماسه‌ای به قطرهای ٦ و ٨ سانتی‌متر و نمونه‌های رس + گروه ستون‌های ماسه‌ای با حجم معادل نیز تا نسبت نشست ۱۵٪ رفتار تقریبا یکسانی به نمایش گذاشته‌اند و با افزایش نسبت نشست‌ها تدریجاً نمونه‌های رس + گروه ستون‌های ماسه‌ای تحت یک نسبت نشست خاص ظرفیت‌های باربری بزرگ‌تری را به دست داده‌اند. این تغییرات بیانگر آن است که به کارگیری یک لایه تسلیح در مرز مشترک رس نرم-ماسه باعث تامین نسبی محصور شدگی لایه ماسه و توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های ناشی از بارگذاری و بنابراین افزایش بیشتر ظرفیت باربری شده است (شکل ۱۵). مسلح نمودن قشر ماسهٔ سطحی در افزایش نسبت ظرفیت باربری بطور فزآینده‌ای تأثیرگذار بوده ولیکن به کارگیری ستون‌های ماسه‌ای به صورت تک و یا گروه با حجم ثابت تأثیر تقریبا یکسانی داشته‌اند. تحت ۱۰٪=δ/B نسبت ظرفیت باربری نمونه‌های رس + ماسه‌ی مسلح سطحی + تک ستون‌های ماسه‌ای با قطرهای ٤، ٦ و ٨ سانتی‌متر و گروه ستون‌های ماسه‌ای (چهار ستون) با قطرهای ۳ و ٤ سانتیمتر نسبت به نمونهٔ رس + ماسهٔ سطحی مسلح به ترتیب ۱/٤، ۱/۸، ۲/۱، ۱/۸ و ۲/۲ برابر شده که نشان دهندهٔ ٤۰، ۸۰، ۱۱۰، ۸۰ و ۱۲۰٪ افزایش است.



شکل ١٤. تغییرات ظرفیت باربری-نسبت نشست نمونه‌های رس + تک/گروه ستون‌های ماسه‌ای + لایهٔ ماسهٔ مسلح سطحی.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]



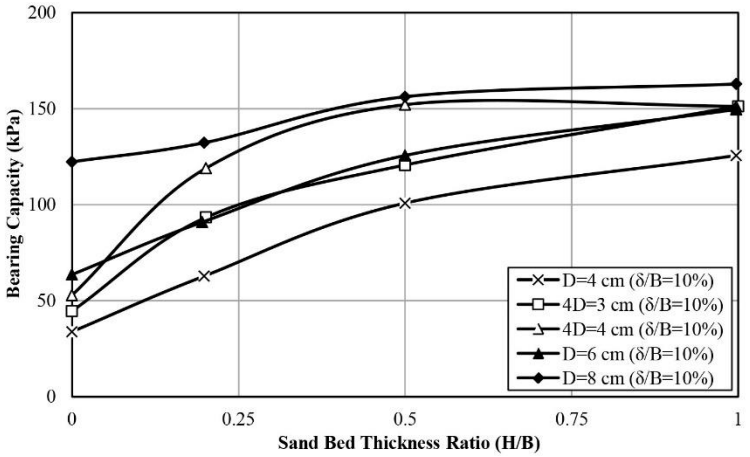
شکل ۱۵. تغییرات نسبت ظرفیت باربری–نسبت نشست نمونه‌های رس + تک/گروه ستون‌های ماسه‌ای + لایهٔ ماسهٔ مسلح سطحی.

٦–٥– مقایسهٔ تأثیر قطر ستون(ها) و ضخامت قشر ماسهٔ سطحی

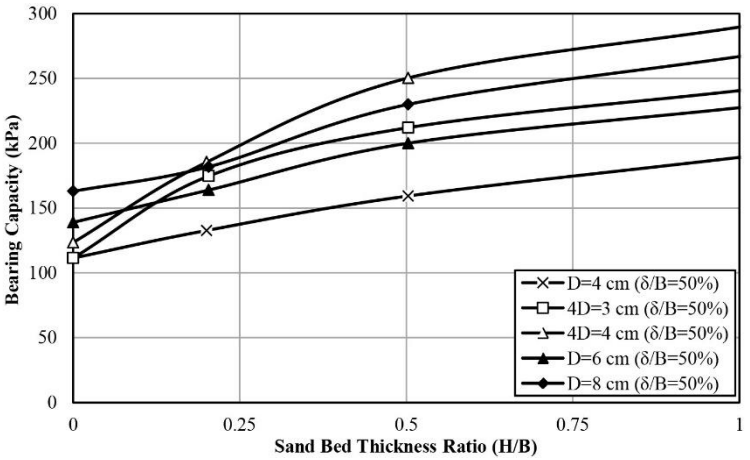
رفتار نمونه‌ها با ثابت نگه داشتن قطر ستون‌های ماسه‌ای (D) درنسبت نشست‌های ۱۰ و ۵۰٪ نسبت به نسبت ضخامت لایهٔ ماسهٔ سطحی به قطر پی (H/B) مورد مقایسه قرار گرفته است. این تغییرات در شکل‌های ١٦ و ١٧ و به صورت ظرفیت باربری– نسبت ضخامت لایهٔ ماسهٔ سطحی برای ستون‌های ماسه‌ای تک به قطرهای ٤، ٦ و ٨ سانتیمتر و گروه ستون‌های ماسه‌ای چهارتایی هم‌حجم به قطرهای ٤×٣ cm و ٤×٤ cm نشان داده شده است. با توجه به شکل ١٦ و برای δ/B=٪١٠، مشاهده می‌شود که برای تک ستون‌های ماسه‌ای به قطر ٤ سانتی‌متر به کارگیری قشر ماسهٔ مسلح سطحی بسیار تأثیرگذارتر بوده و باعث افزایش ظرفیت باربری از حدوداً ۳۵ به ۱۲۵ کیلوپاسکال شده است. افزایش قطر تک ستون ماسه‌ای به ٦ و ٨ سانتیمتر نیز با نرخ کمتری روند افزایش ظرفیت باربری با نسبت ضخامت لایهٔ ماسهٔ سطحی را نشان می‌دهند که این مشاهدات با نتایج تحقیقات Teena و Hari در سال ٢٠١٦ همسو است [٢٠]. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش قطر تک ستون‌های ماسه‌ای تأثیر قشر ماسه نیز کمتر شده است. افزایش H/B از صفر تا ۱ باعث گردیده که ظرفیت باربری نمونه‌های رس حاوی تک ستون‌های ماسه‌ای با قطرهای ٦ و ٨ سانتیمتر به ترتیب ۱۵۰ و ٤٠ درصد، و گروه ستون‌های ماسه‌ای هم حجم ۲۷۵ و ۲۰۰ درصد نسبت به نمونه‌های فاقد لایهٔ ماسهٔ سطحی افزایش یابد. جالب توجه آن که تحت H/B=۱، تفاوت فاحشی بین ظرفیت باربری تک و گروه ستون‌های ماسه‌ای مشاهده نمی‌شود که بیانگر آنست که با افزایش ضخامت لایهٔ ماسهٔ سطحی انتقال افزایش تنش‌ها به ستون‌های ماسه و بنابراین تأثیر آنها در افزایش ظرفیت باربری کمتر شده و بخش اعظم افزایش تنش‌ها توسط این لایه جذب شده است. Chandrawanshi و همکاران در سال ٢٠١٦ گزارش کرده‌اند که ظرفیت باربری بستگی به قطر، زاویه‌ی اصطکاک مصالح و فاصلهٔ بین ستون‌های ماسه دارد [٣٢].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]

با توجه به شکل ۱۷ و برای δ/B=٪۵۰ و با افزایش H/B ها از صفر تا ۱، روند افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها روند منظم‌تری را نشان می‌دهد. میزان افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های رس + تک ستون‌های ماسه‌ای به قطرهای ٦ و ۸ سانتیمتر به ترتیب ٦٤ و ۵۸ درصد و برای نمونه‌های با گروه ستون‌های ماسه‌ای هم‌حجم ۱۱۰ و ۱۳۳ درصد است. نتایج به خوبی نشان می‌دهد که جایگزین نمودن تک ستون با گروه ستون‌های ماسه‌ای هم‌حجم تحت δ/B>٪۱۰ و H/B>۰/۲۵ تأثیرگذارتر بوده و باعث بهبود بیشتر در ظرفیت‌های باربری شده است. جالب آن که بدون توجه به نسبت نشست، در نمونه‌هایی که فاقد لایهٔ سطحی ماسه (H/B=۰) و تنها حاوی تک ستون‌های ماسه‌ای بوده‌اند، ظرفیت‌های باربری بزرگ‌تری حاصل شده و با افزایش H/B روند کاملاً برعکس شده است. نتایج تحقیق Ibrahim در سال ۲۰۱٦ نیز نشان داده که ظرفیت باربری به طور قابل ملاحظه‌ای تا نسبت ضخامت ماسه به قطر فونداسیون ٤ برای فونداسیون‌های سطحی افزایش می‌یابد [۳۳].



شکل ۱٦. تغییرات ظرفیت باربری-نسبت ضخامت لایه‌ی ماسه‌ی سطحی در δ/B=٪۱۰.



شکل ۱۷. تغییرات ظرفیت باربری-نسبت ضخامت لایه‌ی ماسه‌ی سطحی در δ/B=٪۵۰.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]

٦- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر به کارگیری قشرهای نازک ماسهٔ سطحی به صورت غیرمسلح و مسلح شده با یک لایه ژئوگرید در مرز مشترک رس نرم–ماسه همراه با تک و گروه ستون‌های ماسه‌ای هم حجم بر رفتار ظرفیت باربری- نشست رس نرم تحت بارگذاری یک سطح دایره‌ای شکل مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته و اهم نتیجه‌گیری‌های به عمل آمده به شرح ذیل است:

- به کارگیری لایه‌های نازک ماسه با ضخامت‌های از ۰/۲B تا ۱B به صورت غیرمسلح و یا مسلح شده با ژئوگرید تحت نشست δ/B=٪۱۰ ظرفیت باربری رس نرم را تا حداکثر ۹ برابر افزایش داده است.
- استفاده از تک ستون‌های ماسه‌ای با قطرهای ٤ تا ۸ سانتی‌متر (معادل ۰/۸B تا ۱/٦B) باعث افزایش ظرفیت باربری رس نرم شده و ستون‌های با قطر بزرگ‌تر موثرتر بوده‌اند.
- به کارگیری قشر ماسهٔ سطحی توام با تک یا گروه ستون‌های ماسه‌ای باعث افزایش قابل ملاحظهٔ ظرفیت باربری رس نرم شده است.
- تأثیر جایگزین کردن تک ستون‌های ماسه‌ای با گروه ستون‌های ماسه‌ای هم حجم به مراتب کمتر از افزایش قطر تک ستون‌های ماسه‌ای است.
- ضخامت قشر ماسهٔ سطحی بر رفتار ظرفیت باربری- نشست رس نرم در نسبت نشست‌های کم و قطر ستون‌های ماسه‌ای در نسبت نشست‌های زیاد، تأثیرگزارتر بوده است.
-

۷- منابع

1. Porbaha, A., & Bouassida, M. (2004). Bearing capacity of foundations resting on soft ground improved by soil cement columns. *In International Conference on Geotechnical Engineering*, Sharjah, UAE (pp. 172-179).

2. El Sawwaf, M. A. (2007). Behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand over a softclay slope. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(1), 50-60. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.06.001

3. Singh, V. K., Prasad, A., & Agrawal, R. K. (2007). Effect of soil confinement on ultimate bearing capacity of square footing under eccentric-inclined load. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 12(1), 1-14.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]

4. Nazir, A. K., & Azzam, W. R. (2010). Improving the bearing capacity of footing on soft clay with sand pile with/without skirts. *Alexandria Engineering Journal*, 49(4), 371-377. https://doi.org/10.1016/j.aej.2010.06.002

5. Kumar, U., Tandel, Y.K. and Solanki, C.H. (2013). Effect of geosynthetic encasement on sand column in soft soil, *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 141-146.

6. Kumar, J., & Chakraborty, M. (2015). Bearing capacity of a circular foundation on layered sand–clay media. *Soils and Foundations*, 55(5), 1058-1068. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.008

7. Rajput, D., Kumar, R., Jain, P. K., & Chandrawanshi, S. (2016). Load-Settlement Behaviour of Soft Soil Reinforced with Sand Piles. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(11), 1303-1308.

8. Mehrannia, N., Kalantary, F., & Ganjian, N. (2018). Experimental study on soil improvement with stone columns and granular blankets. *Journal of Central South University*, 25(4), 866-878. https://doi.org/10.1007/s11771-018-3790-z

9. Nazariafshar, J., Mehrannia, N., Kalantary, F., & Ganjian, N. (2019). Bearing capacity of group of stone columns with granular blankets. *International Journal of Civil Engineering*, 17(2), 253-263. https://doi.org/10.1007/s40999-017-0271-y

10. Rethaliya, R.P. and Vrma, A.K. (2009). Strip footing on sand overlying soft clay with geotextile interface. *Indian Geotechnical Journal*, 39 (3), 271-287.

11. Ibrahim, K.M.H.I. (2014). Bearing capacity of circular footing resting on granular soil overlying soft clay. *Housing and Building Research Center*. 12, 71-77. https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.07.004

12. Ramadan, M. I., & Hussein, M. H. (2015). Bearing capacity of sand overlying clay strip footing. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 4(11), 1852-1859.

13. Alawaji, H. A. (2001). Settlement and bearing capacity of geogrid-reinforced sand over collapsible soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 19(2), 75-88. https://doi.org/10.1016/S0266-1144(01)00002-4

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]

14. Basudhar, P. K., Saha, S., & Deb, K. (2007). Circular footings resting on geotextile-reinforced sand bed. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(6), 377-384. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.09.003

15. Sharma, R., Chen, Q., Abu-Farsakh, M., & Yoon, S. (2009). Analytical modeling of geogrid reinforced soil foundation. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(1), 63. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.07.002

16. Latha, G. M., & Somwanshi, A. (2009). Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(4), 281-294. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.02.001

17. Sharma, J. S. (1998). A study on the behaviour of geogrid reinforced stone column. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics*, (pp. 877-882), Atlanta, USA.

18. Raithel, M., & Kempfert, H. G. (2000, November). Calculation models for dam foundations with geotextile coated sand columns. In *ISRM International Symposium*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, (pp. 1-6), Melbourne, Australia.

19. Ambily, A. P., & Gandhi, S. R. (2007). Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 133(4), 405-415. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:4(405)

20. Teena, G. and Hari, G. (2016). Bearing capacity effect of soft clay with sand compaction piles. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5(4), 1132-1135.

21. Ong, D.E.L., Sim, Y.S. and Leung, C.F. (2018). Performance of field and numerical back-analysis of floating stone columns in soft clay considering the influence of dilatancy. International *Journal of Geomechanics*, Vol. 18, Issue 10. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001261

22. Shehata, H.F. and Sorour, T.M. (2018). Effect of stone column installation on soft clay behavior. *International Journal of Geotechnical Engineering*. https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1478245

23. Gniel, J., & Bouazza, A. (2009). Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(3), 167-175. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.11.001

24. Murugesan, S., & Rajagopal, K. (2009). Studies on the behavior of single and group of geosynthetic encased stone columns. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), 129-139. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000187

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]

25. Deb, K., Samadhiya, N. K., & Namdeo, J. B. (2011). Laboratory model studies on unreinforced and geogrid-reinforced sand bed over stone column-improved soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(2), 190-196. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2010.06.004

26. Nayak, S., Vibhoosha, M.P. and Bhasi, A. (2019). Effects of column configuration on the performance of encased stone columns with basal geogrid installed in lithomargic clay. International *Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. https://doi.org/10.1007/s40891-019-0181-y

27. Hamzh, A., Mohamad, H. and Bin Yusof, M.F. (2019). The effect of stone column geometry on soft soil bearing capacity. *International Journal of Geotechnical Engineering*. (Online: 14 Sep 2019). https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1666557

28. Nasiri, M. and Hajiazizi, M. (2019). An experimental and numerical investigation of reinforced slope using geotextile encased stone column. *International Journal of Geotechnical Engineering*. https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1651029

29. http://www.meshiran.com

30. Fang, H. Y., & Daniels, J. L. (2017). *Introductory geotechnical engineering: an environmental perspective*. CRC Press.

31. Abdi, M. R. and Asadi, M. S. (2013). Effects of mixed sand layer with polypropylene fibers on the behavior of soft clay soils, Proceedings of the *7th National Congress on Civil Engineering*, Zahedan, Iran.

32. Chandrawanshi, S., Kumar, R., Rokade, S., & Jain, P. K. (2016). Bearing Pressure and Settlement Analysis of Soft Ground Reinforced with Stone. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21(25), 10081-10094.

33. Ibrahim, K. M. H. (2016). Bearing capacity of circular footing resting on granular soil overlying soft clay. *HBRC journal*, 12(1), 71-77. https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.07.00

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.3.2]