

مطالعه آزمایشگاهی اثر خاک درشت‌دانه اطراف ژئوگرید بر روی ظرفیت باربری پی حلقوی واقع بر خاک ماسه‌ای مسلح

علی عباسزاده

جعفر بلوری بزاز
دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
bolouri@um.ac.ir

کارشناس ارشد ژئوتکنیک، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
Engaab2001@gmail.com

مجید کاظمی

استادیار، گروه عمران، دانشگاه صنعتی قوچان، ایران
Kazemi-majid@qiet.ac.ir

چکیده

در عملیات اجرایی خاک مسلح و برای کاهش هزینه‌های اقتصادی می‌توان با به‌کارگیری مصالح خاگریز باکیفیت پایین، از یک‌لایه نازک مصالح درشت‌دانه‌تر (اصطکاکی) پیرامون مسلح‌کننده استفاده نمود. تحقیقات قبلی حاکی از بهبود ظرفیت کششی ژئوگرید مستقر در خاک‌های ضعیف احاطه شده با یک‌لایه نازک مصالح مرغوب است. در پژوهش حاضر با انجام ۲۵ آزمایش بارگذاری بزرگ مقیاس، اثر هم‌زمان کاربرد تسلیح و استفاده از تکنیک ساندویچی بر روی ظرفیت باربری پی حلقوی واقع بر خاک ماسه‌ای بررسی شده است. بدین‌منظور مصالح اطراف مسلح‌کننده با خاک ماسه‌ای درشت‌دانه اصطکاکی دارای سه نوع دانه‌بندی متفاوت بهسازی شده است. نتایج حاکی از این بود که استفاده از ژئوگرید و مصالح اصلاحی اطراف آن موجب افزایش ظرفیت باربری شالوده حلقوی تا حدود ۲/۲ برابر حالت غیرمسلح می‌گردد. از طرفی دانه‌بندی مصالح اصلاحی با اندازه ذرات بین ۲/۳۶ میلی‌متر تا ۴/۷۵ میلی‌متر بیشترین تأثیر را بر روی افزایش ظرفیت باربری دارد. همچنین استفاده از مصالح اصلاحی باعث بهبود در عملکرد نشست پی شده است. در این پژوهش یک رابطه نیز به‌منظور پیش‌بینی مقدار ظرفیت باربری نهایی پی‌های حلقوی مستقر بر خاک مسلح با مصالح اصلاحی پیرامون مسلح‌کننده پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: پی حلقوی، ژئوگرید، ظرفیت باربری، تکنیک ساندویچی، مصالح اصلاحی

Experimental Investigation of Ring foundation bearing capacity based on Encapsulated Geogrid-Sand System

Abbaszadeh Ali, Jafar Bolouri Bazaz, Kazemi Majid*

ABSTRACT

The acute shortage or lack of frictional fill in some parts of the world has led to the use of in-situ inferior soils in reinforced soil structures. A potential solution for making use of marginal soils is consisting of encapsulating the reinforcement in thin granular layers. Previous studies revealed that encapsulating geogrid in thin layers of sand under pullout conditions enhances the pull out resistance of reinforced soil. This paper presents the results of 25 large scale load tests aimed at studying the interaction of soils reinforced with geogrid embedded in thin layers of granular soil of different grain sizes and its effect on the bearing capacity of ring foundation. The results of examinations have been shown that modification of material and soil reinforcing increase bearing capacity of ring Foundation about 2 times more than unreinforced. On the other hand, the modified materials whit particle size between 2.36 to 4.75 have performed the most effect on increasing bearing capacity. Additionally, a novel relation has been proposed for predicting the ultimate load capacity of the ring foundation resting on reinforced soil.

KEYWORDS

Ring Foundation, Geogrid, Bearing Capacity, Sandwich Model, Granular Material.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۴

تاریخ آخرین اصلاحات: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۱

افزایش ظرفیت باربری خاک زیر پی همواره مورد توجه محققین علم ژئوتکنیک بوده و روش‌های مختلفی برای حل مشکل پی‌سازی در زمین‌های سست با شرایط ژئوتکنیکی نامناسب نظیر جابه‌جایی مصالح و جایگزین کردن آنها، تحکیم و تراکم، اشباع شیمیایی و ... پیشنهاد شده است. لیکن به دلیل هزینه‌های بالای این روش‌ها، بهسازی و تسلیح خاک با استفاده از ژئوسنتتیک‌ها برای جبران ضعف کششی خاک بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از زمینه‌های اصلی کاربرد ژئوسنتتیک در تقویت خاکریزها و شیب‌های احداث شده با مصالح دانه‌ای است. اما کمبود یا عدم وجود خاک‌های دانه‌ای با دانه‌بندی و مشخصات مناسب در برخی از نقاط جهان، منجر به استفاده از خاک‌های نامناسب محلی می‌گردد [۵-۱۱]. در این نوع خاک‌ها، مقاومت سطح تماس پایین بوده و در نتیجه گسیختگی در سطح تماس قبل از رسیدن مقاومت کششی مسلح کننده به حد نهایی به وقوع می‌پیوندد [۶، ۷]. بنابراین درصد زیادی از مقاومت کششی مسلح کننده در زمان گسیختگی بسیج نشده و مورد بهره برداری قرار نمی‌گیرد [۸].

تنش برشی در اطراف مسلح کننده بالا بوده و با دور شدن از سطح به سرعت کاهش می‌یابند؛ بنابراین در سازه‌های خاک مسلح با مصالح خاکریز فاقد کیفیت مناسب این امکان وجود دارد که یک لایه نازک از مصالح دانه‌ای مقاوم، در اطراف مسلح کننده برای مقابله با تنش‌های برشی بالا در نزدیکی مسلح کننده و در سطح تماس مورد استفاده قرار گیرد. بدین ترتیب می‌توان مقاومت برشی بین المان تسلیح و خاک را تا حد مقاومت بیرون کشیدگی در حالتی که تمام مصالح اطراف آن از نوع دانه‌ای باشد بهبود بخشید [۹]. این روش اجرا به تکنیک ساندویچی معروف است.

تاکنون اثر استفاده از تکنیک ساندویچی بر بهبود مقاومت برشی و پارامترهای تغییرشکل پذیری رس مسلح با کمک آزمایش برش مستقیم [۱]، آزمایش بیرون کشیدگی مسلح کننده [۱۰-۱۲] و آزمایش سه محوری [۱۳] مطالعه شده است.

همچنین این نتایج حاکی از این بود که با افزایش تدریجی ضخامت ماسه اطراف ژئوگرید، مقاومت برشی به تدریج افزایش خواهد یافت تا به یک مقدار بهینه برسد. با افزایش بیشتر از ضخامت بهینه ماسه، در مقاومت برشی تغییر چندانی ایجاد نگردید [۸، ۱۱، ۱۳]. دامنه ضخامت بهینه لایه ماسه از ۸ تا ۱۵ میلیمتر در آزمایش‌های سه‌محوری و برش مستقیم و مقدار ۸ سانتی‌متر در آزمایش بیرون کشیدگی بزرگ مقیاس گزارش شده است [۱۴]. زبری سطح مسلح کننده، مقاومت برشی دانه های مصالح اصطکاکی، شکل و اندازه المان مهمترین عوامل در تعیین ضخامت مورد نیاز برای مصالح دانه‌ای معرفی شده اند [۱۲].

اندازه ذرات ماسه دربرگیرنده ژئوگرید نقش بسیار مهمی در اندرکنش خاک - ژئوسنتتیک دارد. البته این موضوع به مشخصات فیزیکی ژئوگرید، اندازه نسبی ذرات خاک به چشمه‌های ژئوگرید و ضخامت ژئوگرید هم وابسته است [۱۵، ۱۶]. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در یک محدوده دانه‌بندی، تاثیر اندازه ذرات در افزایش مقاومت برشی تا یک مقدار بهینه بوده و با افزایش بیش از آن دیگر تاثیری در مقاومت برشی ندارد [۹].

از طرفی مطالعات فراوانی بر روی رفتار ژئوتکنیکی انواع پی‌های واقع بر خاک مسلح شده به لایه‌های ژئوگرید انجام شده است [۲۰-۱۷]. بیلدیز و همکاران (Yildiz et al.) یک سری آزمایش بر روی ظرفیت باربری پی حلقوی انجام دادند. آنها تخمین زدند در حالت غیرمسلح و مسلح زمانی که نسبت شعاع داخلی پی حلقوی به شعاع خارجی بین ۰ تا ۰/۳ باشد بیشترین مقدار ظرفیت باربری حاصل می‌شود [۲۱].

باتوجه به اینکه تحقیقات انجام شده قبلی بیشتر بر روی خاک‌های رسی و به صورت آزمایش‌های برشی با استفاده از جعبه برش مستقیم انجام شده می‌توان تأثیر استفاده از تکنیک ساندویچی را در خاک ماسه بدانه بندی شده و در شرایط بارگذاری استاتیکی بر روی پی واقع بر خاک مسلح شده نیز بررسی نمود. بدین ترتیب می‌توان با استفاده از هر نوع مصالح محلی در خاکریزها، کاهش هزینه‌ها و جلوگیری از استفاده بیش از حد از مصالح دانه‌ای در خاکریزها از اثرات ناشی از فعالیت‌های عمرانی بر محیط زیست کاست؛ بنابراین در این پژوهشی سعی بر آن بوده تا تأثیر همزمان استفاده از یک سیستم چندلایه‌ای مسلح کننده به همراه اصلاح خاک پیرامون آن با قراردادن یک لایه نازک مصالح اصطکاکی بر روی ظرفیت باربری پی‌های دایره‌ای و حلقوی مورد بررسی قرار گیرد.

۲- مدل سازی آزمایشگاهی

مقیاس نمونه در کارهای آزمایشگاهی همواره یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر نتایج است. کاملاً واضح است که باتوجه به اثرات مقیاس و ماهیت خاک، خاک نمی‌تواند در مدل آزمایشگاهی و نمونه واقعی رفتار یکسانی داشته باشد. این تفاوت‌ها در درجه اول به دلیل اختلاف در سطح تنش بین مدل و شرایط واقعی است، به طوری که سطح تنش در مدل کوچک مقیاس بسیار کوچک‌تر از تنش در زیر پی‌های بزرگ مقیاس است. در خاک‌های دانه‌ای زاویه اصطکاک داخلی با سطح تنش ارتباط معکوس دارد؛ بنابراین متوسط مقاومت برشی بسیج شده در طول خطوط لغزش در زیر پی با افزایش عرض پی کاهش می‌یابد [۲۲].

به دلیل ارتباط مستقیم میزان بار وارده با عرض پی‌های مدل و نیاز به ایجاد یک سیستم عکس‌العمل بزرگ، تعداد زیادی از آزمایش‌های انجام شده تاکنون برای بررسی رفتار پی‌های سطحی به صورت کوچک مقیاس است. بررسی اثر مقیاس در تمامی آزمایش‌ها با مدل کوچک مقیاس به ویژه در خاک ماسه‌ای، امری ضروری است. چند عامل مهم وجود دارد که نتایج مدل‌های کوچک مقیاس در محیط خاک ماسه-ای و شرایط آزمایش شتاب جاذبه را با چالش روبرو می‌نماید. تحقیق پیش‌رو بر روی مدل فیزیکی کوچک مقیاس انجام خواهد شد؛ لذا برای چنین مدلی باید تأثیر برخی از پارامترهای مهم شامل اندازه ذرات خاک، روش ساخت، شرایط مرزی و ... بر نتایج، مورد مطالعه بیشتر قرار گیرد. در این پژوهش مجموعه‌ای آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد تا امکان اعمال نیرو به پی حلقوی روی خاک دانه‌ای با تراکم معین فراهم شود. چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایشگاه شامل مخزن خاک، دستگاه تهیه نمونه ماسه با تراکم مورد نظر، پی، قاب عکس‌العملی صلب و جک هیدرولیکی، نیروسنج، تغییر مکان‌سنج و دستگاه ثبت اطلاعات است. انتخاب صحیح این اجزا بر عملکرد مناسب مجموعه نیز

۲-۲- خاک مصرفی و آماده‌سازی نمونه

باتوجه به پیچیدگی در رفتار خاک، به‌منظور تسهیل تفسیر نتایج، تمرکز مطالعات بر روی رفتار مدل و دستیابی به سرعت و تکرارپذیری بالا در ساخت نمونه از ماسه خشک و فاقد ریزدانه با دانه‌بندی یکنواخت استفاده شد. باتوجه به روش ساخت نمونه ماسه‌ای (بارش در هوا) استفاده از این نوع ماسه احتمال جداشدن ذرات در حین فرایند آماده‌سازی نمونه را به حداقل می‌رساند. همچنین قبل از استفاده به‌خوبی پردازش شده، رفتار آن و پارامترهای مؤثر بر نتایج آزمایش کنترل می‌گردد. این مصالح از سنگ سیلیس طبیعی معدن فیروزکوه به‌دست‌آمده و ذرات آن گرد گوشه می‌باشند. قطر دانه‌های این ماسه کوچک‌تر از ۱ میلی‌متر بوده و در سیستم طبقه‌بندی متحد به‌عنوان ماسه بد دانه‌بندی شده شناخته می‌شود. خاک مورد استفاده در این پژوهش از نوع ماسه متوسط دانه-بندی شده (SP) می‌باشد. همچنین سایر پارامترهای فیزیکی خاک و استاندارد مورد استفاده در آزمایشگاه جهت تعیین آن پارامتر در جدول ۱ ارائه شده است.

کاساکابه (Kusakabe) در سال ۱۹۹۵ با تحلیل داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که تأثیر اندازه ذرات بر روی ظرفیت باربری پی کم است. این تأثیر با نسبت D_{50}/B یا کمتر از ۰/۰۱ قابل تعریف است. اعظم و نصر (Azzam and Nasr) در مطالعات خود بر روی نمونه با عرض ۱۵۰ میلی‌متر، مقدار تأثیر اندازه ذرات را ۰/۰۰۹۲ گزارش نمودند [۲۵]. در این تحقیق این نسبت برابر ۰/۰۰۲ است.

جدول (۱): مشخصات فیزیکی ماسه

مقدار	استاندارد ASTM	مشخصات خاک
0.45	D422	اندازه موثر (D ₁₀ (mm))
0.67	D422	اندازه موثر (D ₆₀ (mm))
1.58	D2487	ضریب یکنواختی (C _u)
1.13	D2487	ضریب انحنای (C _c)
2.71	D854	چگالی ویژه خاک (G _s)
15.95	D4253	وزن واحد خشک بیشینه (kN/m ³)
13.12	D4254	وزن واحد خشک کمینه (kN/m ³)
14.86	D7263	وزن واحد خشک میانگین (kN/m ³)
67	D4254	دانسیته نسبی (Dr (%))
0	D3080	چسبندگی خاک (kPa)
35	D3080	زاویه اصطکاک داخلی (degrees)
SP	D2487	رده خاک در سیستم یونیفاید

۲-۳- مصالح اصلاحی

در این پژوهش برای اصلاح دانه‌بندی خاک بالا و پایین مسلح‌کننده از ماسه با دانه‌های بزرگ‌تر نسبت به خاک اصلی مخزن استفاده شده است. برای درک بهتر میزان تأثیر این نوع مصالح، سه نوع دانه‌بندی مختلف از مصالح درشت‌دانه که در ساخت بتن یا آسفالت مورد استفاده قرار می‌گیرد، انتخاب گردید. این مصالح (شکل ۲) حاصل جداسازی و تفکیک دانه‌ها با الک‌های نمره ۴، ۸، ۱/۴ و ۳/۸ است.

مصالح تفکیک شده حاصل جداسازی با این الک‌ها در سه نوع مختلف بوده که اندازه دانه‌های آن در نوع A بین مقادیر ۲/۳۶ میلی‌متر

کمک خواهد نمود. در طول آزمایش مقدار بار اعمال شده و نشست متناظر پی اندازه‌گیری و ثبت شده است. اینک به تشریح هر یک از قسمت‌ها پرداخته می‌شود.

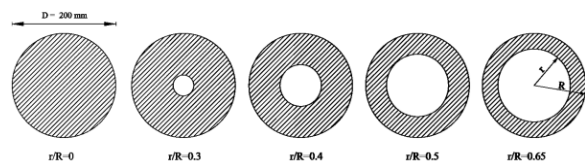
۲-۱- مخزن خاک و پی

مخزن خاک باید به‌گونه‌ای باشد که علاوه بر نگهداری نمونه خاک، شرایط موردنظر در مدل‌سازی را ایجاد نماید. مخزن باید صلب و دیواره‌های آن دارای کمترین میزان اصطکاک باشد. باتوجه به وجود تقارن در پی‌های مدل‌سازی شده، از یک مخزن استوانه‌ای به‌عنوان مخزن خاک استفاده شده است تا در هنگام آزمایش محور تقارن پی و مخزن در یک راستا قرار گیرد. ابعاد مخزن باتوجه به تحلیل اجزای محدود با در نظر گرفتن بعد پی و مشاهده حوزه تأثیر تنش‌ها، برای جلوگیری از وارد شدن اثر دیواره‌ها در مقدار ظرفیت باربری حاصل می‌گردد. برای جلوگیری از وارد شدن اثر دیواره‌ها در مقدار ظرفیت باربری نهایی، باید از مخزنی با حداقل قطر پنج برابر قطر پی استفاده نمود. همچنین در صورتی که عمق لایه صلب از کف پی بیش از دو تا سه برابر عرض پی باشد، ارتفاع مخزن تأثیری روی ظرفیت باربری ندارد [۲۳، ۲۱]. در این پژوهش دیواره‌های داخلی مخزن به منظور کاهش هرگونه اصطکاک با ماسه تا حد امکان صاف و هموار شد. با توجه به ابعاد مدل، مخزن استوانه‌ای به قطر ۱۴۰۰ و ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متر ساخته شد.

برای انجام آزمایشات در این پژوهش، پنج پی صلب حلقوی با قطر خارجی ۲۰۰ میلی‌متر و نسبت قطر داخلی به قطر خارجی متفاوت مورد استفاده قرار گرفت. در مطالعه رفتار خاک زیر پی‌های سطحی در آزمایشگاه، لازم است به‌منظور حذف تغییر شکل‌های سازه‌ای احتمالی پی تا زمان گسیختگی خاک، از نمونه‌های کاملاً صلب استفاده شود [۲۳]. برای تامین صلبیت کافی، پی‌ها از صفحات فولادی به ضخامت ۲۵ میلی‌متر ساخته شد. به منظور کنترل میزان سختی پی حاضر از رابطه زیر استفاده شده است [۲۴].

$$K_F = \frac{E_F}{E_S} \left[\frac{t}{r_0} \right]^3 (1 - n^2)^{-1.5} \quad (1)$$

در این رابطه K_F درجه سختی (صلبیت) پی، E_F مدل الاستیته مصالح شالوده، E_S مدول الاستیته زیر شالوده به عمق دو برابر شعاع شالوده، t ضخامت شالوده، r_0 شعاع خارجی شالوده و n نسبت شعاع داخلی به خارجی می‌باشد. در صورتیکه درجه سختی بزرگتر از ۱۰ باشد، شالوده به صورت کاملاً صلب رفتار می‌کند [۲۴]. برای مدل پی مورد استفاده در این تحقیق درجه سختی مقدار ۳۵ به دست آمده است. تصویر شماتیک پی‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است.

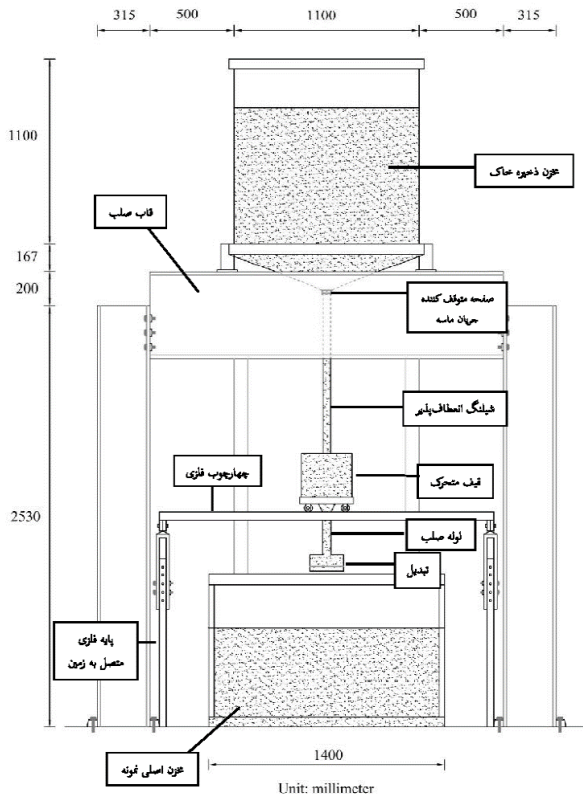


شکل (۱): تصویر شماتیک پی‌های مورد استفاده در این تحقیق

۲-۵- سیستم بارش خاک در مخزن

آماده‌سازی لایه‌های ماسه به‌صورت یکنواخت و تکرارپذیر با وزن مخصوص موردنیاز، قطعاً پیش‌نیاز انجام آزمایش‌های قابل‌اعتماد بر روی نمونه‌های بازسازی‌شده ماسه در آزمایشگاه است. در این تحقیق از سیستم متحرک بارش پرده‌ای برای بازسازی نمونه‌های بزرگ در مطالعات آزمایشگاهی استفاده شده است [۲۶]. این دستگاه یک سیستم ساده و کم‌هزینه است که عملکرد آن بر مبنای بارش ماسه در هوا بوده و با کنترل سرعت حرکت پرده، ارتفاع بارش و ضخامت پرده، توانایی تولید نمونه‌هایی با دامنه وسیعی از تراکم نسبی و یکنواختی بالا را دارد. این دستگاه شامل اجزا انتقال‌دهنده ماسه از قیف اصلی تا نمونه است که به‌وسیله یک روزنه مستطیلی در انتهای آن نرخ بارش کنترل می‌گردد. (شکل ۴).

با استفاده از مطالعات کالیبراسیون سیستم می‌توان برای تهیه یک نمونه با تراکم نسبی دلخواه، ترکیبات متفاوت ارتفاع بارش و عرض پرده در سرعت ثابت حرکت پرده را رسم نمود (شکل ۵). بهتر است این شکل که شامل خط‌هایی با تراکم نسبی یکسان است، قبل از شروع هر مدل سازی آزمایشگاهی و به‌منظور سهولت در تصمیم‌گیری جهت کاهش زمان بازسازی نمونه، مطابق با سیستم بارش و خاک مصرفی تهیه گردد.



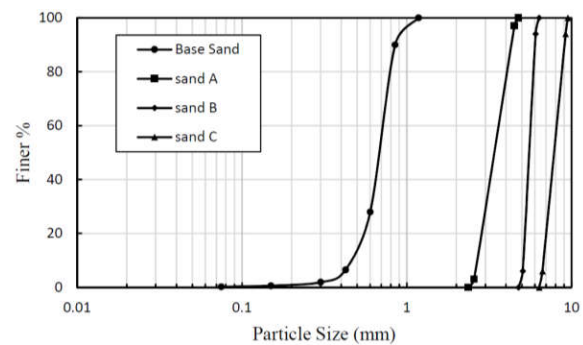
شکل (۴): جزئیات اجرایی دستگاه سیستم متحرک پرده‌ای

مطالعات انجام شده در این تحقیق در حالت ماسه متراکم با تراکم نسبی به ترتیب ۶۸ درصد است؛ بنابراین برای بازسازی یک نمونه با تراکم ۶۸ درصد، از پرده با عرض پرده ۳/۵ میلی‌متر و ارتفاع بارش ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد. این تراکم‌ها در حالتی در نظر گرفته شده که

و ۴/۷۵ میلی‌متر، در نوع B بین مقادیر ۴/۷۵ میلی‌متر و ۶/۳۵ میلی‌متر و در نوع C بین مقادیر ۶/۳۵ میلی‌متر و ۹/۵۰ میلی‌متر است. در مرجع شماره [۹] درخصوص اثر ضخامت مصالح اصلاحی بر روی نتایج آزمایش برش مستقیم بحث شده است. در این تحقیق، مصالح اصلاحی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر در اطراف مسلح‌کننده (ژئوگرید) پخش شده و برای هر یک از مدل‌های پی ساخته شده، در آزمون‌های مختلف، تاثیر سه نوع دانه‌بندی بر روی ظرفیت باربری بررسی شده است. منحنی دانه‌بندی خاک اصلی و مصالح اصلاحی مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل (۲): تصویر مصالح اصلاحی مورد استفاده در این تحقیق



شکل (۳): نمودار دانه‌بندی مصالح مصرفی

۲-۴- مشخصات مسلح‌کننده خاک (ژئوگرید)

ژئوگریدها گروهی از خانواده ژئوسنتیک‌ها می‌باشند که از فیبر پلی-استر و پلی‌اتیلن و یا ترکیبی از این موارد و سایر موارد مشابه بوده و در ضخامت، سایز و ابعاد مختلف به‌صورت ورق‌های مشبک تولید می‌شوند. ژئوگریدها به‌عنوان تقویت‌کننده‌های مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرند زیرا آنها دارای مقاومت کششی بالا و قفل‌شدگی قابل‌توجهی با خاک هستند. مشخصات ژئوگرید مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است.

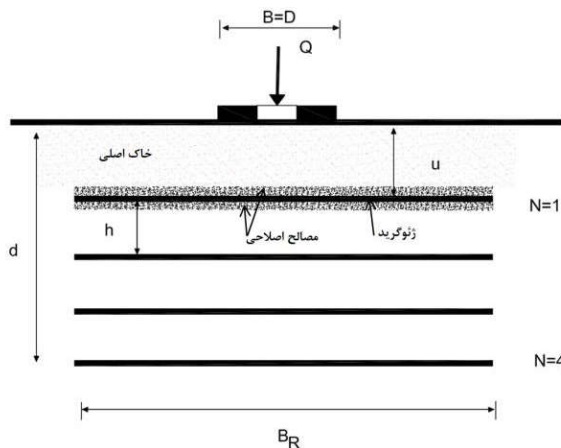
جدول (۲): مشخصات فیزیکی ژئوگرید

مشخصات	واحد	پارامتر	ردیف
HDPE	-	نوع پلیمر	۱
صفحه ای	-	شکل	۲
مشکی	-	رنگ	۳
13*13	mm	اندازه چشمه ها	۴
3.3	mm	ضخامت مش	۵
730	gr/m ²	وزن هر متر مربع	۶
7.68	kN/m	مقاومت کششی	۷

قطرهای داخلی و خارجی هر پی قبل و بعد از آزمایش مشاهده نگردید؛ بنابراین نتیجه گرفته شد که برای مدل با ابعاد مورد استفاده، فشار زیر پی هیچ اثری بر سازه پی نداشته و امکان استفاده مجدد آن در آزمایش-های بعدی وجود دارد. کلیه آزمایش‌ها در چهار گروه صحت سنجی سیستم بارگذاری، بررسی اثر نسبت شعاعی، بررسی اثر مسلح کننده و بررسی استفاده از مصالح اصلاحی اطراف ژئوگرید بر رفتار پی حلقوی قابل تفکیک می‌باشند.

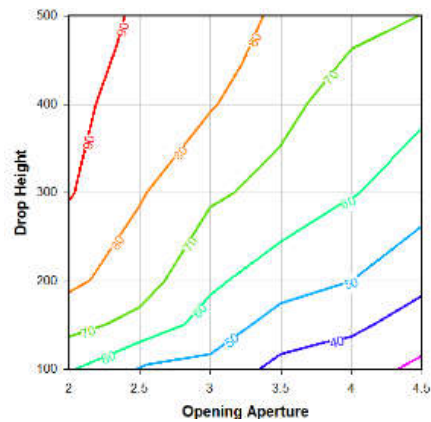
یکی از پارامترهای مهمی که بر روی ظرفیت باربری پی‌های حلقوی مؤثر می‌باشد نسبت شعاعی (H) می‌باشد. باتوجه به اینکه هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر تسلیح خاک و هم‌زمان استفاده از لایه درشت‌دانه اصطکاکی (لایه ساندویچی) بر روی ظرفیت باربری پی حلقوی است بنابراین برنامه‌ریزی برای انجام آزمایش‌ها بایستی به گونه‌ای باشد که تأثیر تغییر در نسبت شعاعی و شرایط خاک زیر پی مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور طبق مطالعات انجام شده توسط سایر پژوهشگران، پارامترهای مؤثر در عملیات تسلیح به صورت بهینه انتخاب می‌گردد.

نسبت بیشترین فاصله بین اولین مسلح کننده تا کف پی به عرض پی ($\frac{u}{B}$) طبق توصیه مراجع [۲۱، ۲۳] برابر 0.3 در نظر گرفته شده است. همچنین نسبت فاصله بین مسلح کننده‌ها به عرض پی ($\frac{h}{B}$) برابر 0.3 و تعداد لایه مناسب جهت تسلیح ۴ لایه پیشنهاد شده است [۱۷، ۲۱]. در این راستا طول بهینه مسلح کننده بر اساس نتایج مطالعه بر روی پی‌های مستقر بر خاک مسلح، بین ۶ تا ۸ برابر عرض پی پیشنهاد شده است [۲۷]. بنابراین با توجه به اینکه قطر همه پی‌ها برابر ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد، فاصله اولین لایه تسلیح و فاصله بین دو مسلح کننده برابر ۶۰ میلی‌متر انتخاب شد. همچنین برای هر آزمایش خاک مسلح، تعداد ۴ لایه ژئوگرید در فواصل مساوی داخل خاک قرار داده شد. در این تحقیق نیز طول هر مسلح کننده ۶ برابر عرض پی و معادل ۱۲۰۰ میلی‌متر انتخاب شده است. در آزمایش‌هایی که پی بر روی خاک مسلح به همراه مصالح اصلاحی پیرامون مسلح کننده است، بالا و پایین مسلح کننده به مقدار ۱۰ میلی‌متر از مصالح اصلاحی پخش شده است. شکل ۶ نمای شماتیک از مخزن آزمایش در حالتی که خاک دارای مسلح کننده و مصالح اصلاحی (تکنیک ساندویچی) است را نشان می‌دهد.



شکل (۶): نمای شماتیک از مخزن خاک و جایگذاری ژئوگریدها و پخش مصالح اصلاحی (تکنیک ساندویچی)

ضخامت لایه خاک در هر مرحله بارش ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. پارامترهای مقاومتی ماسه با آزمایش برش مستقیم به دست آمده است. با تراکم ۶۸ درصد مقدار زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه و وزن مخصوص $14/86$ کیلونیوتن بر مترمکعب می‌باشد.



شکل (۵): خطوط تراکم نسبی یکسان با ترکیبات مختلف ارتفاع بارش و عرض پرده [۲۶] (همه واحدها بر حسب میلی‌متر است)

۲-۶- سیستم بارگذاری و اعمال نیرو

برای اعمال نیرو به پی از یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰ تن استفاده شده است. از مزایای سیستم‌های هیدرولیکی نسبت به سیستم‌های مکانیکی یا الکتریکی تولید و اعمال نیرو، طراحی ساده و نصب آسان قطعات، هزینه پایین، دقت بالا و امکان تولید و انتقال نیروهای بزرگ (بیش از چند تن)، عمر بالای قطعات، کاهش میزان فرسایش، امکان دسترسی به نیرو، فشار، گشتاور و سرعت‌های غیر پله‌ای می‌باشد. بخش الکتریکی شامل تابلو برق، کارت A/D، کامپیوتر و نرم افزار است.

به دلیل انجام بارگذاری بر روی پی‌های ساخته شده، اندازه‌گیری میزان بار وارده و تغییر مکان با نشست پی در اثر اعمال بار الزامی می‌باشد. ابزار دقیق مورد استفاده شامل یک نیروسنج با ظرفیت ۵ تن و دقت یک کیلوگرم جهت اندازه‌گیری نیروی وارده بر شالوده و یک LVDT با دامنه تغییرات ۱۵ سانتی‌متر و دقت 0.01 میلی‌متر برای اندازه‌گیری نشست پی می‌باشد. کامپیوتر، نرم افزار و کارت A/D به عنوان رابط میان ابزار و کامپیوتر اجزای دیگر سیستم ثبت داده‌ها می‌باشند. کارت موجود قادر است ۱۰۰ داده را در هر ثانیه از هر کانال قرائت نماید. سیگنال‌های خروجی به صورت پیوسته از میدل‌های مختلف (ابزار دقیق) دریافت و به سیگنال‌های غیر پیوسته توسط کارت A/D تبدیل شده و نرم افزار به کمک کامپیوتر و با توجه به ضرایب کالیبراسیون سیگنال‌های غیر پیوسته را به داده‌های معنادار (عدد) مبدل و در سیستم رایانه ثبت می‌نماید.

۳- برنامه آزمایش‌ها و نحوه انجام آنها

در هر آزمایش، سیستم فونداسیون به آرامی تا گسیختگی خاک بارگذاری می‌شود. در انتهای هر آزمایش، همه خاک موجود در مخزن تخلیه و مجدداً به کمک سیستم بارش نمونه آماده آزمایش بعدی می‌شود. کنترل‌های لازم بعد از هر آزمایش به منظور بررسی هرگونه تغییر در جداره پی انجام شد و هیچ‌گونه ترک و تغییر قابل توجه در ابعاد

۴- نتایج و تحلیل

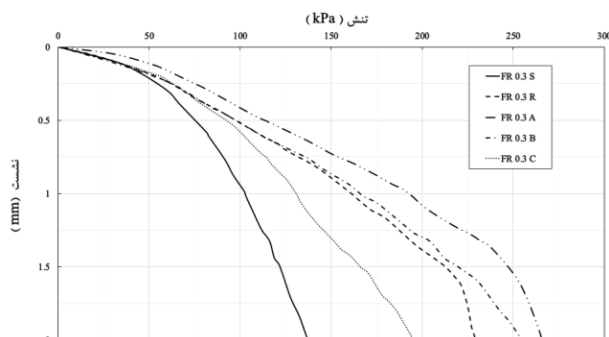
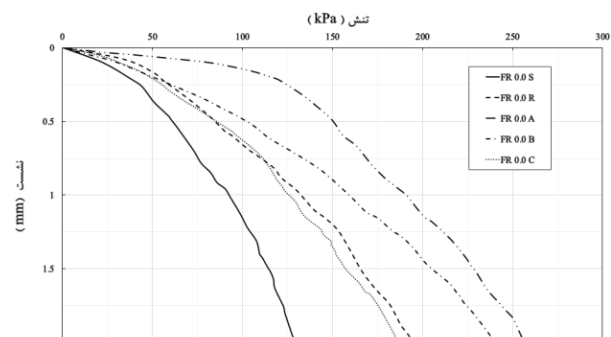
به منظور برآورد قابل اطمینان از رفتار فونداسیون در بارهای اعمالی باید به بررسی هم‌زمان نحوه تغییر شکل خاک زیر پی و نیروی متناظر با آن در هر لحظه از بارگذاری و تعیین نیروی گسیختگی یا نهایی خاک پرداخت. بدین منظور در حین انجام آزمایشات، داده‌های بار - نشست به‌دقت ثبت و برای هر آزمایش نمودار آن در شکل ۷ ارائه شده است. برای به‌دست آوردن ظرفیت باربری نهایی از روی نمودار بار - نشست، روش‌های متعددی وجود دارد. با توجه به شرایط بارگذاری و تراکم خاک، در کلیه آزمایش‌ها بعد از گسیختگی، کاهش تنش وارده بر پی با افزایش تغییر مکان مشاهده نگردید. این نوع گسیختگی به نام «گسیختگی برشی موضعی یا سوراخ کننده» مشهور است [۲۸]. مشاهدات آزمایشگاهی نیز این نوع گسیختگی را تایید نمود. زیرا مقدار کمی از خاک اطراف پی به سمت بالا حرکت کرده و پی صرفاً به داخل خاک نفوذ نموده است. در حالتی که گسیختگی برش موضعی یا سوراخ کننده اتفاق می‌افتد، روش‌های متفاوتی برای تعیین ظرفیت باربری وجود دارد [۲۹]. یکی از روش‌های رایج، بدست آوردن تنش متناظر با یک نشست نسبی برابر ۰/۱ عرض پی می‌باشد که در این تحقیق از آن استفاده شده است. از نمودارهای شکل ۷ می‌توان مقادیر ظرفیت باربری نهایی متناظر با نسبت نشست (S/D) برابر ۰/۱ برای پی با نسبت‌های شعاعی ۰، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶۵ و در شرایط مختلف خاک زیر پی را استخراج نمود (جدول ۴).

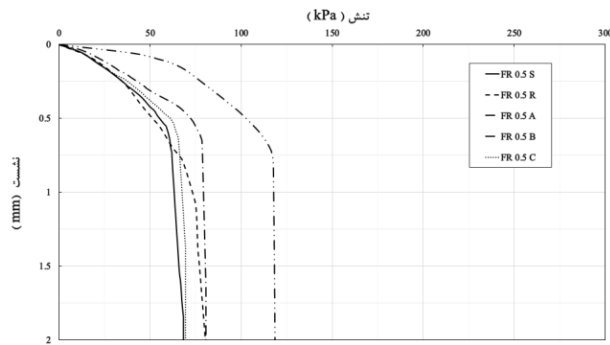
در این مطالعه به‌طور کلی تعداد ۲۵ آزمایش بارگذاری صحیح روی پی دایره‌ای و حلقوی انجام شده است. با انجام دوباره سه آزمون تکرارپذیری سیستم در این تحقیق مورد بررسی قرار گردید. در کلیه آزمایش‌های صورت گرفته، بارگذاری به‌صورت کنترل نیرو (تنش) با نرخ 1 kPa/s و تا نشست بدون بعد $S/D = 0.33$ مدل شالوده اعمال شده است. ماهیت کلی آزمایش‌ها به‌گونه‌ای است که با تغییر در پارامتر نسبت قطر داخلی به خارجی پی، استقرار آنها بر روی خاک ی با تراکم متوسط و ایجاد شرایط مختلف برای خاک زیر پی همچون تسلیح و اصلاح مصالح زیر و روی مسلح کننده‌ها با استفاده از سنگدانه‌ها با دانه بندی مختلف می‌توان رفتار ژئوتکنیکی و اثر خاک درشت‌دانه اطراف ژئوگرید بر روی ظرفیت باربری پی حلقوی واقع بر خاک ماسه‌ای مسلح را بررسی نمود. برای انجام مطالعات در این پژوهش به هر آزمایش یک کد اختصاری معنادار اختصاص یافته است. نحوه نام‌گذاری به شکلی است که عبارت FR نشان‌دهنده پی و عدد پس از آن n نسبت عرض حلقه را مشخص می‌کند. حروف بعدی نیز بیانگر شرایط خاک زیر پی می‌باشند. در این راستا حرف S نشان‌دهنده خاک در شرایط فاقد مسلح کننده، R بیانگر وجود مسلح کننده و حروف A, B, C معرف وجود مصالح اصلاحی و اندازه سنگدانه پیرامون مسلح کننده می‌باشد. برای هر پی به نسبت قطر داخلی به خارجی همچنین پی دایره‌ای پنج آزمایش در حالت کلی و بر اساس شرایط مختلف خاک زیر آن انجام شده است. خلاصه‌ای از تعداد آزمایش‌ها و نحوه نام‌گذاری در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول (۳): مشخصات آزمایش‌های انجام شده

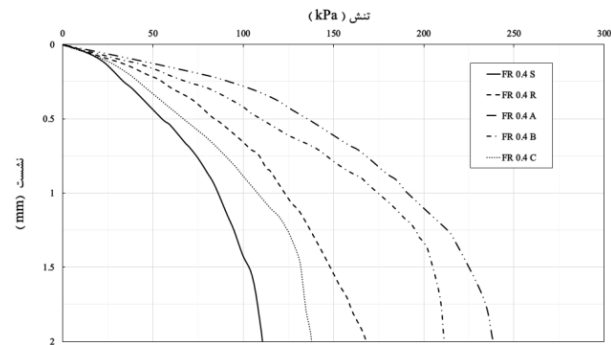
شرایط خاک زیر پی	علامت اختصاری	
	آزمایش	شماره آزمایش
خاک فاقد مسلح کننده	FR*S	۱ تا ۵
خاک دارای چهار لایه مسلح کننده	FR*R	۶ تا ۱۰
خاک دارای چهار لایه مسلح کننده و مصالح اصلاحی نوع A	FR*RA	۱۱ تا ۱۵
خاک دارای چهار لایه مسلح کننده و مصالح اصلاحی نوع B	FR*RB	۱۶ تا ۲۰
خاک دارای چهار لایه مسلح کننده و مصالح اصلاحی نوع C	FR*RC	۲۱ تا ۲۵

* نسبت قطر داخلی به خارجی

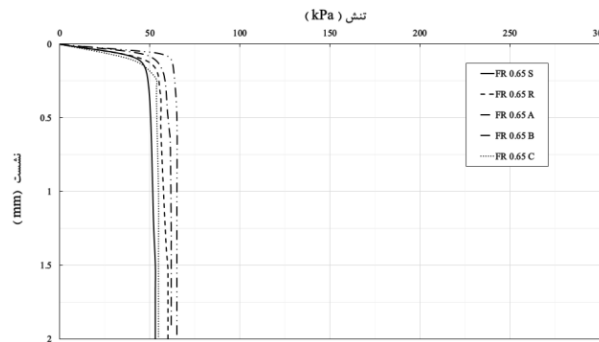
b) $n=0.3$ a) $n=0$



d) n=0.5



c) n=0.4



e) n=0.65

شکل (۷): نمودارهای بار - نشست پی حلقوی در نسبت شعاعی مختلف

جدول (۴): مقادیر ظرفیت باربری نهایی (kPa) متناظر با نسبت نشست (S/D) برابر ۰/۱ برای پی در شرایط مختلف خاک زیر آن

نوع پی	نسبت n (*)	علامت اختصاری هر آزمایش و شرایط خاک زیر پی				
		FR*S	FR*R	FR*RA	FR*RB	FR*RC
دایره‌ای	۰,۰	۱۳۰	۱۹۵	۲۵۵	۲۴۰	۱۸۵
حلقوی	۰,۳	۱۳۷	۲۲۹	۲۶۹	۲۵۶	۱۹۶
حلقوی	۰,۴	۱۱۲	۱۶۸	۲۳۹	۲۱۱	۱۳۸
حلقوی	۰,۵	۶۸	۸۰	۱۱۸	۸۰	۶۹
حلقوی	۰,۶۵	۵۳	۶۱	۶۵	۶۲	۵۵

(*) جای خالی، یکی از اعداد ۰,۰ تا ۰/۶۵ و بیانگر مقدار n (نسبت قطر داخلی به خارجی) است.

پیشنهادی دارای فرضیات متفاوت و محدودیت‌هایی است. به‌منظور ارزیابی روش‌های پیشنهادی مختلف، نتایج ظرفیت باربری نهایی پی حلقوی در این تحقیق با مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از روابط تئوری [۳۱]، روش تحلیل خطوط مشخصه [۳۲] و روش تحلیل تفاضل محدود [۳۳، ۳۴] در جدول ۵ ارائه شده است. در این مطالعات رفتار محل تماس پی با خاک به دو صورت صاف و زبر در نظر گرفته شده است. در شکل ۸ ضمن مقایسه روش‌های مختلف برآورد ظرفیت باربری پی حلقوی مشاهده می‌شود با توجه به اینکه فرضیات هر یک از روش‌ها با یکدیگر متفاوت است، بنابراین پراکندگی بین آن‌ها نسبتاً زیاد است. ظرفیت باربری نهایی پی حلقوی در این تحقیق، همگرایی خوبی با سه روش پیشنهادی در مراجع [۳۲-۳۴] در شرایط رفتار زبر کف پی دارد.

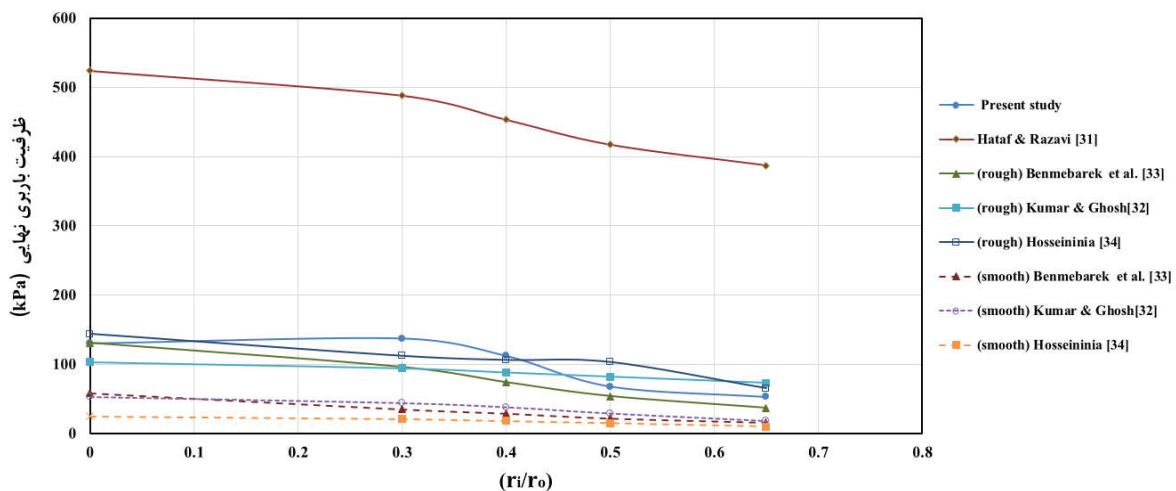
۴-۱- صحت سنجی سیستم بارگذاری

به‌منظور بررسی تکرارپذیری و یکنواختی نتایج، یک آزمایش در هر گروه از دسته‌بندی موجود در جدول ۳ حداقل دو بار تکرار شده است. روند نمودار بار - نشست در دو آزمایش تکراری مشابه و اختلاف ظرفیت باربری نهایی کمتر از ۳ درصد به دست آمد که حاکی از دقت و صحت روش آزمایش است. شایان‌ذکر است بیشترین اختلاف بین سه آزمایش مشابه در تحقیقات مرجع [۳۰] تا ۱۰ درصد گزارش شده است.

از آنجاکه مطالعات انجام شده بر روی پی‌های حلقوی بسیار محدود است، راه‌حل مستقیم و واضحی در مطالعات قبلی برای تعیین ظرفیت باربری و نشست این پی‌های ارائه نشده است و هر یک از روابط

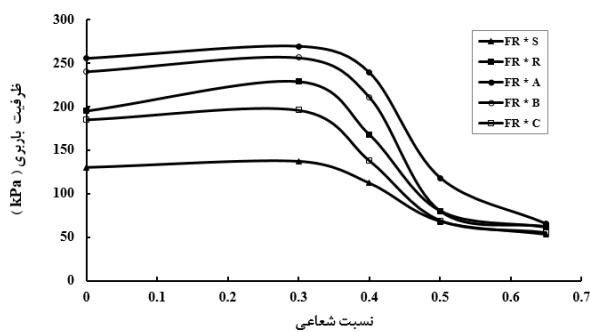
جدول (۵): نتایج ظرفیت باربری پی حلقوی در این تحقیق و سایر مطالعات

r_i/r_o	مدلسازی آزمایشگاهی		پی با کف زبر			پی با کف صاف		
	روش خطوط مشخصه		مدلسازی عددی			روش خطوط مشخصه		
	تحقیق حاضر	Hataf & Razavi	Kumar & Ghosh	Benmebarek et al.	Hosseinia	Kumar & Ghosh	Benmebarek et al.	Hosseinia
0.0	130	524	103	131	144	53	58	25
0.3	137	488	94	96	112	44	35	21
0.4	112	453	88	74	106	38	29	18
0.5	68	417	82	54	103	29	22	15
0.65	53	387	73	37	65	18	16	10



شکل (۸): مقایسه نتایج ظرفیت باربری پی حلقوی در این تحقیق و سایر مطالعات

این ضریب را با افزایش نسبت شعاع داخلی به خارجی می‌توان به ایجاد یک منطقه در تله افتاده صلب میانی (Entrapped Rigid Zone) و افزایش مجازی تنش‌ها در زیر پی که منجر به افزایش N_f در مقادیر پایین نسبت شعاعی می‌گردد مرتبط دانست. همچنین کاهش تنش‌های شعاعی و مماسی ناشی از هندسه مسائل تقارن محوری با افزایش بیشتر شعاع داخلی و از بین رفتن تدریجی منطقه در تله افتاده میانی منجر به کاهش ضریب N_f با افزایش بیشتر نسبت شعاعی می‌شود [۲۱، ۲۲].



شکل (۹): اثر تغییرات نسبت شعاعی و نحوه تسلیح و اصلاح خاک بر ظرفیت باربری پی حلقوی

۲-۴- بررسی اثر نسبت شعاعی بر ظرفیت باربری

با استفاده از نتایج و به منظور بررسی تأثیر نسبت شعاعی پی حلقوی بر روی رفتار ژئوتکنیکی مجموعه و تعیین نسبت بهینه آن، تغییرات ظرفیت باربری در همه حالت‌های آزمایش در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌گردد مقدار ظرفیت باربری نهایی در بازه نسبت شعاعی ۰ تا ۰/۳ ثابت باقی مانده و سپس در بازه ۰/۳ تا ۰/۶۵ به سرعت کاهش می‌یابد. مقدار نسبت شعاعی ۰/۳ را می‌توان به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفت. این موضوع با یافته‌های سایر محققان هم‌خوانی دارد [۲۱، ۳۱]. این روند در حالت‌های خاک مسلح و خاک مسلح محصور شده با مصالح اصلاحی نیز قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به شکل ۹ می‌توان نتیجه گرفت در کلیه شرایط متفاوت ایجاد شده برای خاک، ابتدا ظرفیت باربری نهایی پی‌ها از نسبت قطر داخلی به خارجی برابر صفر (پی دایره ای) تا پی حلقوی با $(n=0.3)$ افزایش یافته و پس از آن کاهش مقادیر ظرفیت باربری را بدنبال خواهد داشت. برای بررسی دلیل افت مقدار ظرفیت باربری در نسبت شعاعی بیش از ۰/۳، بایستی مکانیزم گسیختگی در زیر پی حلقوی را در برابر تغییرات نسبت شعاعی مورد بررسی قرارداد. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، مقدار N_f در پی‌های حلقوی روندی افزایشی با نسبت شعاعی را نشان می‌دهد که این روند پس از مقادیر مشخصی از نسبت شعاعی به یکروند کاهش یابنده تغییر می‌یابد. علت این افزایش اولیه و سپس کاهش در

$$F_{\delta} = \frac{\delta_{ur} - \delta_{uc}}{\delta_{ur}} \times 100 \quad (3)$$

که در آن:

δ_{ur} : مقدار نشست متناظر با ۰/۱ عرض پی در حالت غیر مسلح

δ_{uc} : مقدار نشست پی در حالت مسلح در بار متناظر با نشست δ_{ur} در حالت غیر مسلح

مقادیر نسبت راندمان ظرفیت باربری و نسبت راندمان نشست در هر یک از پی‌ها در جدول ۶ و جدول ۷ ارائه شده است.

جدول (۶): مقادیر نسبت راندمان ظرفیت باربری (η) برای پی‌ها در نشست نهایی

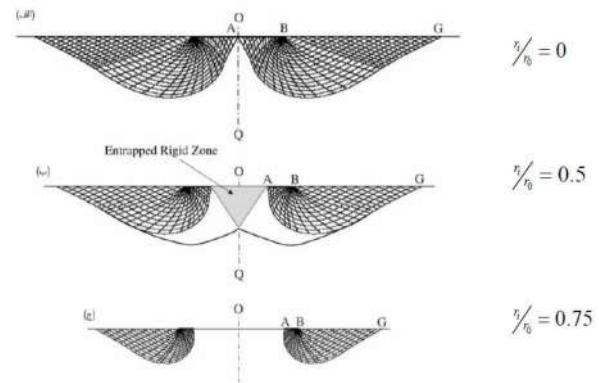
نوع پی	نسبت (*) η	علامت اختصاری هر آزمایش و شرایط خاک زیر				
		پی FR* <i>S</i>	پی FR* <i>R</i>	پی FR* <i>RA</i>	پی FR* <i>RB</i>	پی FR* <i>RC</i>
دایره‌ای	۰/۰	۱	۱,۵	۱,۹۶	۱,۸۵	۱,۴۲
حلقوی	۰/۳	۱	۱,۶۷	۱,۹۶	۱,۸۷	۱,۴۳
حلقوی	۰/۴	۱	۱,۵	۲,۱۳	۱,۸۸	۱,۲۳
حلقوی	۰/۵	۱	۱,۱۸	۱,۷۴	۱,۱۸	۱,۰۱
حلقوی	۰/۶۵	۱	۱,۱۵	۱,۲۳	۱,۱۷	۱,۰۴

جدول (۷): مقادیر نسبت راندمان نشست (F_{δ}) برای پی‌ها در نشست نهایی

نوع پی	نسبت (*) η	علامت اختصاری هر آزمایش و شرایط خاک زیر				
		پی FR* <i>S</i>	پی FR* <i>R</i>	پی FR* <i>RA</i>	پی FR* <i>RB</i>	پی FR* <i>RC</i>
دایره‌ای	۰/۰	۰	۴۱	۸۸	۵۸	۴۵
حلقوی	۰/۳	۰	۴۶	۵۸	۴۶	۳۸
حلقوی	۰/۴	۰	۴۸	۷۷	۶۷	۳۰
حلقوی	۰/۵	۰	۳۰	۸۸	۶۰	۴۶
حلقوی	۰/۶۵	۰	۸۵	۹۴	۹۰	۸۰

شکل ۱۱ میزان تغییرات مقادیر نسبت راندمان ظرفیت باربری مصالح اصلاحی را در برابر تغییرات نسبت شعاعی نشان می‌دهد. این نمودار برای بررسی و مقایسه میزان تاثیر هر کدام از شرایط تسلیح در نظر گرفته شده برای خاک زیر پی و المان تسلیح در افزایش مقدار ظرفیت باربری ترسیم شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد استفاده از مسلح کننده در تمام نسبت های شعاعی با افزایش نسبت راندمان ظرفیت باربری همراه است. بنابراین وجود مسلح کننده در پی حلقوی باعث بهبود و تقویت ظرفیت باربری نهایی می‌گردد. این موضوع با یافته‌های سایر محققان هم‌خوانی دارد [۲۱، ۲۲]. مطابق شکل استفاده از مصالح اصلاحی در اطراف ژئوگرید با افزایش یا کاهش نسبت راندمان ظرفیت باربری همراه خواهد بود. این تغییرات به نوع دانه‌بندی مصالح اصلاحی وابسته است. در حالتی که خاک مسلح و مصالح پیرامون مسلح-کننده‌ها از نوع A یعنی مصالح اصلاحی ریزدانه‌تر باشد، نسبت راندمان به بیشترین مقدار خود می‌رسد. بیشترین نسبت راندمان پی با عدد ۲/۱۳

این موضوع در شکل ۱۰ که نمایانگر تغییر از حالت پی دایروی به پی حلقوی و در نهایت به یک پی نواری است، کاملاً مشهود است [۳۲]. حال با توجه به آنکه در اغلب روش‌های تعیین ظرفیت باربری، ابتدا مکانیزم گسیختگی فرض می‌شود و سپس بار حدی تعیین می‌گردد، این برهم‌کنش منطقه در تله افتاده میانی با بخش اصلی زیر پی عملاً قابل تشخیص نیست و به این علت افزایش اولیه ضریب N_f قابل تعیین نیست. بنابراین مشاهدات آزمایشگاهی با نتایج کارهای تئوریک کمی متفاوت خواهد بود.



شکل (۱۰): مکانیزم گسیختگی در زیر پی حلقوی با نسبت شعاعی مختلف [۳۲]

۳-۴- بررسی اثر مصالح اصلاحی بر رفتار ژئوتکنیکی پی حلقوی

یکی از روش‌های مقایسه و تحلیل داده‌ها، استفاده از پارامترهای بدون بعد است تا بتوان تأثیر موارد مختلف را به صورت کلی بررسی نمود. در این تحقیق برای بررسی اثر مصالح اصلاحی بر رفتار ژئوتکنیکی پی حلقوی از دو پارامتر η و F_{δ} استفاده گردیده است. افزایش بار نهایی یک پی مسلح در مقایسه با پی غیرمسلح نظیر آن بوسیله نسبت راندمان ظرفیت باربری (Bearing Capacity efficiency) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این پارامتر (η) مطابق رابطه (۲) به صورت نسبت بارهای نهایی پی حلقوی مسلح به بار نهایی پی حلقوی غیرمسلح تعریف می‌شود [۳۵].

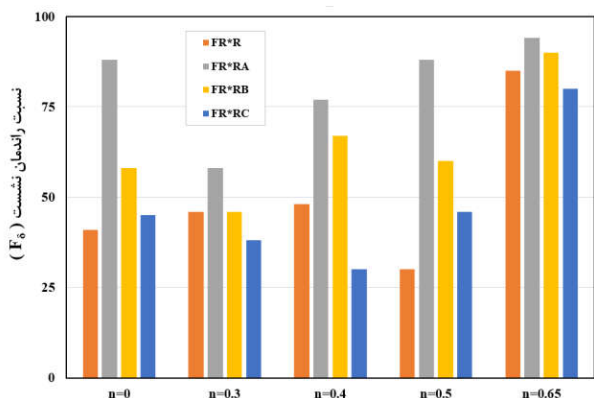
$$\eta = \frac{Q_{uc}}{Q_{ur}} \quad (2)$$

که در آن:

Q_{uc} : بار نهایی پی حلقوی مسلح با مصالح اصلاحی
 Q_{ur} : بار نهایی پی حلقوی غیرمسلح

همچنین به منظور بررسی نشست پی حلقوی در شرایط بکارگیری مصالح اصلاحی در اطراف ژئوگرید، از پارامتر بدون بعد نسبت راندمان نشست (Settlement factor) استفاده می‌گردد. نسبت نشست در رابطه (۳) تعریف شده است. شایان ذکر است که مقادیر بیشتر این فاکتور، بیان‌کننده رفتار نشست بهتری است.

شعاعی ۰/۴ با مصالح اصلاحی نوع C، حدود ۱۸ درصد کاهش عملکرد مشاهده شده است.



شکل (۱۲): تغییرات مقادیر نسبت راندمان نشست در برابر تغییرات نسبت شعاعی

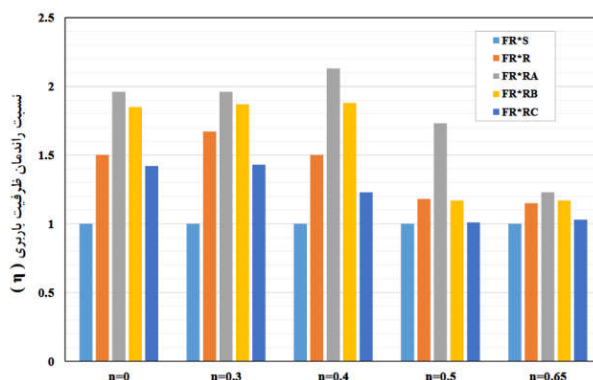
۴-۴- بررسی اثر اندازه دانه های مصالح اصلاحی بر ظرفیت باربری

جهت بررسی میزان تأثیر اندازه دانه های مصالح اصلاحی بر مقدار ظرفیت باربری پی حلقوی از نسبت D_{50} (بعد دانه های خاک در صورتی که ۵۰ درصد از حجم کل خاک دارای اندازه ذراتی کمتر از این مقدار باشد) به اندازه بعد چشمه ژئوگرید (D_A) استفاده شده است. این نسبت برای چهار نوع خاک مورد استفاده در این تحقیق مطابق داده های شکل ۳ برای خاک اصلی، خاک A، خاک B، خاک C به ترتیب ۰/۲۸، ۰/۴۶ و ۰/۶۵ است. خاک اصلی مخزن در آزمایشهای ۶ تا ۱۰، نقش مصالح اصلاحی را دارد. به عبارت دیگر در این شرایط ابعاد مصالح اصلاحی با ابعاد مصالح خاک اصلی یکسان است.

در شکل ۱۳ تغییرات نسبت راندمان ظرفیت باربری در برابر نسبت اندازه ذرات مصالح اصلاحی به اندازه چشمه ژئوگرید در حالت های متفاوت نسبت شعاعی رسم شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می گردد روند نمودار به گونه ای است که مقدار ظرفیت باربری از حالت وجود فقط ذرات ماسه داخل مخزن در اطراف مسلح کننده (ریزترین ذره خاک) تا مصالح اصلاحی با اندازه $D_{50} = 3.4 \text{ mm}$ به صورت صعودی و سپس با افزایش قطر دانه ها کاهش می یابد. به عبارت دیگر مقدار نسبت قطر مربوط به درصد عبوری ۵۰ درصد خاک در روی منحنی دانه بندی بر نسبت ابعاد چشمه ژئوگرید در تمام نسبت های شعاعی برابر با ۰/۲۵ به عنوان مناسب ترین گزینه خواهد بود یعنی در صورت انتخاب ژئوگریدی با ابعاد حدود ۴ برابر ذرات مصالح اصلاحی مقادیر ظرفیت باربری بالاتری نسبت به سایر گزینه ها خواهد بود.

نتایج آزمایش ها نشان می دهد که در یک محدوده دانه بندی تأثیر اندازه ذرات در افزایش ظرفیت باربری تا مقدار بهینه بوده و با افزایش بیش از آن دیگر تأثیری در ظرفیت باربری ندارد. مطالعات سایر محققان [۱، ۶، ۱۰] با استفاده از آزمایش برش مستقیم نیز حاکی از این بود که استفاده از ماسه با دانه بندی یکنواخت در اطراف ژئوگرید با دانه بندی بیش از بازه ۲ تا ۴ میلیمتر با کاهش مقاومت برشی همراه است.

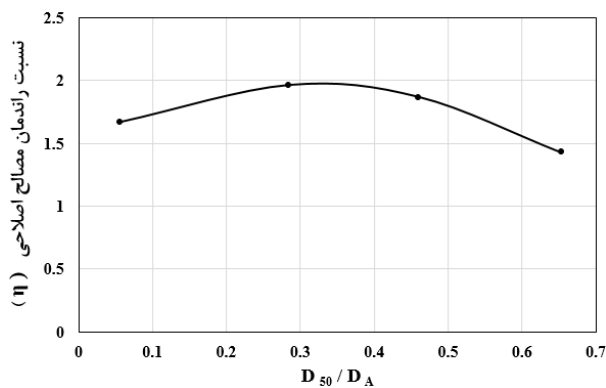
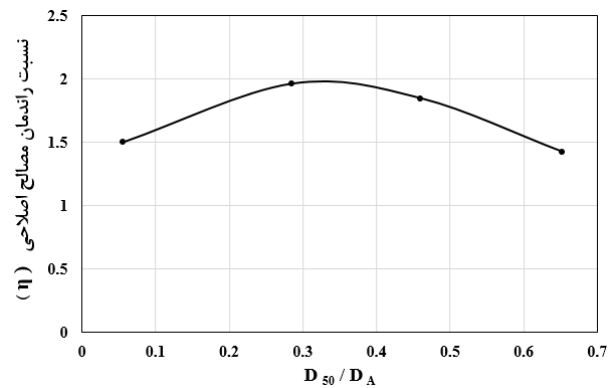
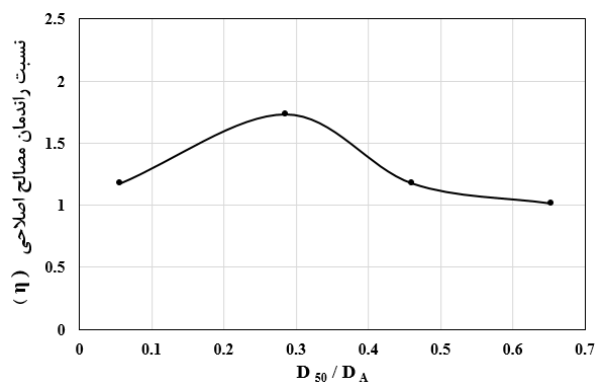
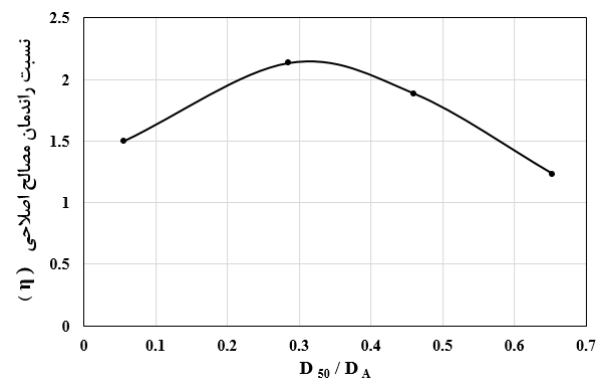
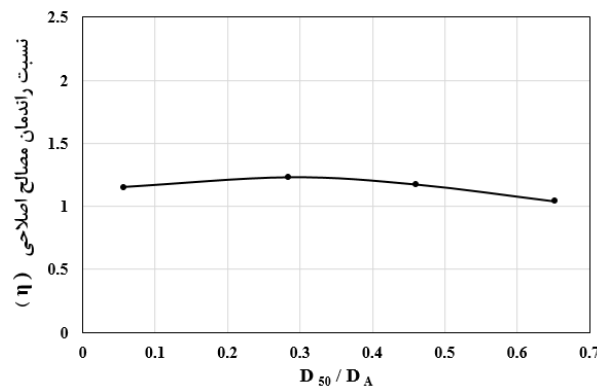
مربوط به پی حلقوی با نسبت شعاعی ۰/۴ به همراه مصالح اصلاحی نوع A در اطراف مسلح کننده است. به عبارت دیگر در این حالت ظرفیت باربری پی در حالت مسلح اصلاح شده نسبت به حالت غیرمسلح حدود ۲۱۳ درصد افزایش یافته است. در همین شرایط و با مصالح اصلاحی نوع C، مشاهده می گردد عملکرد پی حتی کمتر از حالت پی مسلح بدون مصالح اصلاحی است. کمترین نسبت راندمان پی مربوط به پی حلقوی مسلح به همراه مصالح اصلاحی نوع C با نسبت شعاعی ۰/۶۵ است که تقریباً معادل با ظرفیت باربری پی در حالت غیرمسلح است. در مجموع می توان گفت فراهم آوردن یک لایه ماسه در اطراف ژئوگرید باعث بالا رفتن اتصال در سطح تماس شده و در نتیجه مقاومت



شکل (۱۱): تغییرات مقادیر نسبت راندمان ظرفیت باربری در برابر تغییرات نسبت شعاعی در نشست نهایی

در حالت کلی با تغییر دانه بندی مصالح اصلاحی از خاک A به خاک C مقدار نسبت راندمان کاهش خواهد یافت که حاکی از رفتار مطلوب تر دانه بندی خاک A به عنوان مصالح اصلاحی است و بهبود چشمگیر در ظرفیت باربری پی را نسبت به حالت غیرمسلح و مسلح بدون مصالح اصلاحی دارد. در همه حالت ها مقادیر نسبت راندمان ظرفیت باربری از نسبت قطر داخلی به خارجی برابر ۰/۴ به سمت نسبت های بالاتر سیر نزولی دارد. این موضوع نشان می دهد، تسلیح و استفاده از مصالح اصلاحی روی پی های با نسبت قطر داخلی به خارجی بیش از ۰/۴ اثر کمتری دارد. پخش مصالح اصلاحی نوع C پیرامون مسلح کننده ها در حالتی که پی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۵ و ۰/۶۵ مورد آزمون قرار می گیرد تأثیری در افزایش ظرفیت باربری ندارد.

شکل ۱۲ میزان تغییرات مقادیر نسبت راندمان نشست را در برابر تغییرات نسبت شعاعی نشان می دهد. این نمودار برای بررسی و مقایسه میزان تأثیر هر کدام از شرایط تسلیح در نظر گرفته شده برای خاک زیر پی در نسبت راندمان نشست ترسیم شده است. استفاده از مصالح اصلاحی نوع A و B با بهبود عملکرد نشست پی نسبت به حالت مسلح در تمام نسبت های شعاعی همراه است، در حالیکه در صورت استفاده از مصالح اصلاحی نوع C، عملکرد نشست در برخی از نسبت های شعاعی کاهش و در برخی افزایش یافته است. در حالت پی مسلح حلقوی با نسبت شعاعی ۰/۵ با مصالح اصلاحی نوع A، عملکرد نشست پی حدود ۵۸ درصد بهبود داشته است. همچنین در حالت پی مسلح حلقوی با نسبت

b) $n=0.3$ a) $n=0$ d) $n=0.5$ c) $n=0.4$ e) $n=0.65$

شکل (۱۳): تغییرات مقادیر ظرفیت باربری نهایی متناظر با اندازه ذرات مصالح دانه‌ای اطراف مسلح کننده

$$\eta = C_1 \left(\frac{D_{50}}{D_A} \right)^2 + C_2 \left(\frac{D_{50}}{D_A} \right) + C_3 \quad (4)$$

که در آن:

C_1 ، C_2 ، C_3 پارامترهایی هستند که در جدول ۸ مشخص شده

است.

باتوجه به اینکه رفتار تغییرات نسبت راندمان ظرفیت باربری و نسبت قطر مربوط به درصد عبوری ۵۰ درصد خاک در روی منحنی دانه‌بندی بر نسبت ابعاد چشمه ژئوگرید در نسبت‌های متفاوت شعاعی پی حلقوی تقریباً یکسان است، بنابراین می‌توان یک رابطه برای پیش‌بینی ظرفیت باربری پی‌های پوسته‌ای حلقوی با مصالح اصلاحی متفاوت پیشنهاد نمود.

۸. در حالت کلی می‌توان گفت فراهم آوردن یک‌لایه ماسه در اطراف ژئوگرید باعث بالارفتن اتصال در سطح تماس شده و در نتیجه مقاومت برشی سطح تماس بهبود می‌یابد.
۹. در این تحقیق یک رابطه جهت تعیین ظرفیت باربری پی‌های پوسته‌ای حلقوی با مصالح اصلاحی متفاوت پیشنهاد شده است.
۱۰. نتایج به‌دست‌آمده محدود به یک نوع ماسه و پی حلقوی با مقدار ثابت قطر خارجی است. همچنین مدل با یک نسبت مقیاس کوچک‌تر از مقادیر واقعی است که بی‌شک بر نتایج آزمایشگاهی تأثیرگذار است. کاربرد نتایج آزمایشگاهی برای پیش‌بینی رفتار مدل واقعی منوط به در نظر گرفتن محدودیت‌های ذکر شده است.
۱۱. نتایج این تحقیق زمینه‌های مفیدی برای تحقیقات تکمیلی مدل بزرگ مقیاس، مدل سانتریفیوژ و یا مدل‌سازی عددی فراهم می‌نماید که می‌تواند منجر به افزایش فهم رفتار واقعی و دقیق در طراحی در پی مرکب باشد.

۶- مراجع

- Abdi, M., A. Sadrnejad, and M. Arjomand, Strength enhancement of clay by encapsulating geogrids in thin layers of sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009. **27**(6): p. 447-455.
- Abu-Farsakh, M.Y., I. Almohd, and K. Farrag, Comparison of field and laboratory pullout tests on geosynthetics in marginal soils. *Transportation research record*, 2006. **1975**(1): p. 124-136.
- Bergado, D., et al. Performance of a welded wire wall with poor quality backfills on soft clay. in *Geotechnical Engineering Congress*, 1991, ASCE.
- Sukmak, K., et al., Effect of fine content on the pullout resistance mechanism of bearing reinforcement embedded in cohesive-frictional soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015. **43**(2): p. 107-117.
- Taechakumthorn, C. and R.K. Rowe, Performance of a reinforced embankment on a sensitive Champlain clay deposit. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012. **49**(8): p. 917-927.
- Abdi, M., S. Sadrnejad, and M. Arjomand, Clay reinforcement using geogrid embedded in thin layers of sand. *International Journal of Civil Engineering*, 2009. **7**(4): p. 224-235.
- Milligan, G., R. Earl, and D. Bush. Observations of photo-elastic pullout tests on geotextiles and geogrids. in *Proc., 4th Int. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*. 1990.
- Ghiassian, H., Influence of encapsulated geogrid-sand system on bearing capacity and settlement characteristics of reinforced clay. *International Journal of Civil Engineering*, 2004. **2**(1): p. 45-53.
- Abdi, M., et al., Influence of geogrid type and coarse grain size on pull out behaviour of clays reinforced with geogrids embedded in thin granular layers. *European*

جدول (۸): مقادیر پارامترهای C_1 ، C_2 و C_3 در نسبت‌های شعاعی مختلف

نسبت شعاعی	پارامتر C_1	پارامتر C_2	پارامتر C_3
0	-5.52	3.76	1.31
0.3	-4.59	2.85	1.52
0.4	-8.10	5.24	1.24
0.5	-4.77	2.89	1.08
0.65	-1.33	0.75	1.11

۵- نتیجه‌گیری

- در این پژوهش پس از انجام آزمایش بر روی مدل‌های طراحی شده، نتایج زیر در رابطه با رفتار پی‌های دایره‌ای و حلقوی در خاک ماسه‌ای مسلح همراه اصلاح مصالح اطراف ژئوگرید به‌دست‌آمده است:
- از منظر نوع مکانیزم گسیختگی خاک زیر پی در کلیه آزمایش‌ها پس از گسیختگی خاک با افزایش نشست، تنش وارد بر پی روند کاهشی نبوده که این موضوع طبق مطالعات پیشین حاکی از نوع گسیختگی برشی موضعی یا سوراخ‌کننده است.
 - بار نهایی پی حلقوی حاصل از نتایج این تحقیق همگرایی خوبی با سه روش پیشنهادی در مراجع [۳۲-۳۴] برای پیش‌بینی تعیین مقدار ظرفیت باربری این نوع از پی در شرایط رفتار زبر کف پی دارد.
 - مقدار ظرفیت باربری نهایی پی حلقوی در حالت‌های خاک مسلح و خاک مسلح محصور شده با مصالح اصلاحی در بازه نسبت شعاعی ۰ تا ۰/۳ ثابت باقی‌مانده و سپس در بازه ۰/۳ تا ۰/۶۵ به‌سرعت کاهش می‌یابد. مقدار نسبت شعاعی ۰/۳ را می‌توان به‌عنوان مقدار بهینه در نظر گرفت.
 - باتوجه به نمودار تغییرات نسبت راندمان ظرفیت باربری مصالح اصلاحی در برابر تغییرات نسبت شعاعی پی حلقوی که برای بررسی و مقایسه میزان تأثیر هر کدام از شرایط تسلیح خاک زیر پی در نظر گرفته شده، افزایش نسبت راندمان ظرفیت باربری در تمام نسبت‌های شعاعی پس از استفاده از مسلح‌کننده و مصالح اصلاحی مشاهده می‌گردد.
 - مصالح اصلاحی نوع A که نسبت به دو نوع دیگر از دانه‌بندی ریزتری برخوردار می‌باشد، بیشترین نسبت راندمان ظرفیت باربری را حاصل نموده است. بیشترین نسبت راندمان پی مقدار ۲/۱۳ است که پی حلقوی با نسبت شعاعی ۰/۴ در حالت تسلیح خاک و اصلاح مصالح پیرامون مسلح‌کننده با استفاده از مصالح نوع A کسب نموده است.
 - کمترین نسبت راندمان پی مربوط به پی حلقوی مسلح به همراه مصالح اصلاحی نوع C با نسبت شعاعی ۰/۶۵ است که تقریباً معادل با ظرفیت باربری پی در حالت غیرمسلح است.
 - استفاده از مصالح اصلاحی نوع A و B با بهبود عملکرد نشست پی نسبت به حالت مسلح در تمام نسبت‌های شعاعی همراه است.

23. Naderi, E. and N. Hataf, Model testing and numerical investigation of interference effect of closely spaced ring and circular footings on reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014. **42**(3): p. 191-200.
24. Naseri, M. and E.S. Hosseininia, Elastic settlement of ring foundations. *Soils and Foundations*, 2015. **55**(2): p. 284-295.
25. Azzam, W. and A. Nasr, Bearing capacity of shell strip footing on reinforced sand. *Journal of advanced research*, 2015. **6**(5): p. 727-737.
26. Kazemi, M. and J.B. Bolouri, A curtain traveling pluviator to reconstitute large scale sand specimens. *Geomechanics & engineering*, 2018. **14**(2): p. 131-139.
27. Shin, E., et al., Bearing capacity of strip foundation on geogrid-reinforced sand. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2002. **20**(2): p. 169-180.
28. Das, B.M. and N. Sivakugan, *Principles of Foundation Engineering*. 2018: Cengage Learning.
29. Adams, M.T. and J.G. Collin, Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997. **123**(1): p. 66-72.
30. Tafreshi, S.M. and A. Dawson, A comparison of static and cyclic loading responses of foundations on geocell-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012. **32**: p. 55-68.
31. Hataf, N. and M. Razavi, Model tests and finite element analysis of bearing capacity of ring footings on loose sand. 2003.
32. Kumar, J. and P. Ghosh, Bearing capacity factor N_γ for ring footings using the method of characteristics. *Canadian geotechnical journal*, 2005. **42**(5): p. 1474-1484.
33. Benmebarek, S., et al., Numerical evaluation of the bearing capacity factor N_γ' of ring footings. *Computers and Geotechnics*, 2012. **44**: p. 132-138.
34. Hosseininia, E.S., Bearing capacity factors of ring footings. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2016. **40**(2): p. 121-132.
35. Shukla, S.K., *An Introduction to Geosynthetic Engineering*. 2017 :CRC Press.
- Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019: p. 1-20.
10. Abdi, M. and M. Arjomand, Pullout tests conducted on clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011. **29**(6): p. 588-595.
11. Abdi, M. and A. Zandieh, Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014. **42**(5): p. 494-504.
12. Sridharan, A., et al., Technique for using fine-grained soil in reinforced earth. *Journal of geotechnical engineering*, 1991. **117**(8): p. 1174-1190.
13. Unnikrishnan, N., K. Rajagopal, and N. Krishnaswamy, Behaviour of reinforced clay under monotonic and cyclic loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 2002. **20**(2): p. 117-133.
14. Yang, K.-H., W.M. Yalew, and M.D. Nguyen, Behavior of geotextile-reinforced clay with a coarse material sandwich technique under unconsolidated-undrained triaxial compression. *International Journal of Geomechanics*, 2016. **16**(3): p. 04015083.
15. Lopes, M. and M. Lopes, Soil-geosynthetic interaction-influence of soil particle size and geosynthetic structure. *Geosynthetics International*, 1999. **6**(4): p. 261-282.
16. Saleh Ahmadi, M. and P. Nikbakht Moghadam, Effect of geogrid aperture size and soil particle size on geogrid-soil interaction under pull-out loading. *Journal of textiles and polymers*, 2017. **5**(1): p. 25-30.
17. Boushehrian, J.H. and N. Hataf, Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 2003. **21**(4): p. 241-256.
18. Latha, G.M. and A. Somwanshi, Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009. **27**(4): p. 281-294.
19. Marandi, S. and H. Javdanian. Laboratory studies on bearing capacity of strip interfering shallow foundations supported by geogrid-reinforced sand. in *Advanced Materials Research*. 2012. Trans Tech Publ.
20. Yetimoglu, T., J.T. Wu, and A. Saglamer, Bearing capacity of rectangular footings on geogrid-reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994. **120**(12): p. 2083-2099.
21. Laman, M. and A. Yildiz, Model studies of ring foundations on geogrid-reinforced sand. *Geosynthetics International*, 2003. **10**(5): p. 142-152.
22. El Sawwaf, M. and A. Nazir, Behavior of eccentrically loaded small-scale ring footings resting on reinforced layered soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012. **138**(3): p. 376-384.