

بررسی آزمایشگاهی اثر آرایش قرار گیری ژئوتکستایل در ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح

احد اوریا^{۱*}، الیار حیدرلی^۲

۱- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

* aouria@uma.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۹/۶/۲۶

تاریخ دریافت: ۹۹/۲/۱۷

چکیده

در این پژوهش، اثر چگونگی قرارگیری ژئوتکستایل در زیر پی در ظرفیت باربری آن به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها، خاک زیر پی در یک جعبه فولادی به ابعاد $90 \times 25 \times 30$ سانتی‌متر و پی نواری به صورت یک ورق فولادی به ابعاد $25 \times 7/5 \times 2$ سانتی‌متر شبیه‌سازی شده است. تأثیر قرارگیری مسلح‌کننده‌ها در ظرفیت باربری پی با نه چینش مختلف به صورت تک لایه، دو لایه و سه لایه به صورت پیوسته و غیرپیوسته در بعد سوم، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد استفاده از مسلح‌کننده‌ها به صورت نوارهای منقطع که به صورت مناسبی در فضای سه‌بعدی توزیع شده باشند، باعث افزایش بازده تسلیح می‌شود. در تسلیح چند لایه، استفاده از نوارهای گسسته مسلح‌کننده‌ها به گونه‌ای که نواری واقع در اعماق لایه‌های مجاور زیر یکدیگر قرار نگیرند، باعث افزایش چشمگیر بازده تسلیح خواهد شد.

واژه های کلیدی: خاک مسلح، ژئوتکستایل، ظرفیت باربری، آرایش مسلح‌کننده.

۱- مقدمه

ساخت و ساز شود [2-8]. برای تسلیح خاک با مسلح‌کننده‌ها چندین روش متفاوت وجود دارد که هرکدام از روش‌ها براساس نوع پروژه و شرایط آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. مسلح کردن خاک می‌تواند با استفاده از المان‌های صفحه‌ای مانند ژئوتکستایل، المان‌های رشته‌ای مانند الیاف شیشه یا کربن و المانهای سه‌بعدی مانند ژئوسل‌ها صورت گیرد. استفاده از مسلح‌کننده‌های صفحه‌ای مانند ژئوتکستایل‌ها به دلیل سهولت تولید و استفاده متداول‌تر است [9]. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های عددی و آزمایشگاهی زیادی برای تعیین ظرفیت

در بسیاری از پروژه‌های عمرانی تثبیت و تقویت خاک محل پروژه اجتناب‌ناپذیر می‌شود. روش‌های مختلفی برای بهبود عملکرد خاک زیر فونداسیون وجود دارد که تسلیح خاک یکی از این روش‌ها است. استفاده از کاه برای مسلح کردن ملات گل در ساختمان‌های باستانی ایران دارای قدمت تاریخی است [1]. در دهه‌های اخیر نیز استفاده از انواع مسلح‌کننده‌ها در سازه‌های خاکی بسیار متداول شده است. استفاده از مسلح‌کننده می‌تواند باعث افزایش ضریب ایمنی، بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌های

تسلیح در افزایش ظرفیت باربری خاک‌ها را ارائه داده‌اند، اما برخی پارامترهای تأثیرگذار در ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح مورد توجه کافی نبوده‌اند. یکی از پارامترهای بسیار تأثیرگذار در مقاومت خاک و ظرفیت باربری پی‌های واقع بر آن، شرایط تنش در توده خاک است. مقاومت برشی توده خاک به عنوان یک مصالح دانه‌ای، تابع شرایط تنش در محل تماس ذرات جامد است. همچنین عملکرد سیستم خاک مسلح نیز از تأثیرگذاری المان‌های مسلح‌کننده بر شرایط تنش بین ذرات جامد و افزایش محصورکنندگی تأمین می‌شود. با توجه به این نکات، هر عاملی که باعث تغییر در شرایط تنش در توده خاک شود، در ظرفیت باربری پی واقع بر آن نیز تأثیرگذار خواهد بود. محل قرارگیری مسلح‌کننده‌ها و موقعیت نسبی آنها، تأثیر زیادی در شرایط توزیع تنش در توده خاک دارد.

در سال‌های اخیر، با توجه آثار زیست محیطی مصالح مصنوعی مورد استفاده در خاک مسلح، استفاده بهینه از مصالح مصنوعی در خاک مسلح و تأمین بیشترین پایداری و ظرفیت باربری با کمترین مسلح‌کننده مورد توجه قرار گرفته است [30]. از طرفی گرچه هزینه مسلح‌کننده‌های مورد استفاده در سازه‌های خاک مسلح زیاد نیست، ولی حجم عملیات خاکی شامل خاک‌برداری، خاکریزی و کوبیدن خاکریز متناسب با طول و تعداد لایه‌های مسلح‌کننده بوده و هزینه عملیات خاکی بیشتر از هزینه مسلح‌کننده‌ها است [2]. از این رو، استفاده بهینه از مسلح‌کننده‌های مورد استفاده در سازه‌های خاک مسلح دارای اهمیت زیست محیطی و اقتصادی هست. در این پژوهش، تأثیر چگونگی قرارگیری سه‌بعدی نوارهای مسلح‌کننده در ظرفیت باربری پی نواری واقع بر آن به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. هدف انجام این پژوهش بررسی شرایطی بود که بتوان با استفاده از کمترین مسلح‌کننده، بیشترین افزایش ظرفیت باربری پی را روی خاک مسلح بدست آورد. برای دستیابی به این منظور، نوارهای مسلح‌کننده به صورت پیوسته و گسسته در یک تا سه لایه و در موقعیت‌های مکانی سه‌بعدی متفاوت در داخل توده خاک قرار داده شده و ظرفیت باربری پی نواری روی خاک مسلح‌شده با این حالت‌ها بررسی شده است. تغییر موقعیت‌های

باربری پی، روی خاک‌های مسلح‌شده با انواع مسلح‌کننده‌ها صورت گرفته است. نتایج این پژوهش‌ها نشان‌دهنده تأثیر نوع، طول، تعداد لایه‌ها، فاصله بین لایه‌ها، عمق قرارگیری مسلح‌کننده، دانه‌بندی خاک، فشار همه‌جانبه و نیز نسبت سختی‌های خاک و مسلح‌کننده در افزایش ظرفیت باربری پی بوده است [10-17]. میزان افزایش ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح‌شده با دو نوع، ژئوتکستایل بافته‌شده و بافته‌نشده برای استفاده در بستر راه مورد ارزیابی قرار گرفته که نتایج نشان می‌دهد تأثیر ژئوتکستایل بافته‌شده بر افزایش ظرفیت باربری خاک بیشتر از تأثیر ژئوتکستایل‌های بافته‌نشده بوده است [18]. [19] طول مسلح‌کننده‌ای که در خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد، عامل بسیار مهم و تعیین‌کننده‌ای در افزایش ظرفیت باربری پی است. با افزایش طول مسلح‌کننده، ظرفیت باربری پی نیز تا حد مشخصی افزایش یافته و بعد از آن تقریباً ثابت می‌ماند. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد طول بهینه مسلح‌کننده در حدود ۲/۵ تا ۷ برابر عرض پی است. تأثیر افزایش طول مسلح‌کننده بر ظرفیت باربری پی، در نشست‌های بزرگتر اتفاق می‌افتد. پس افزایش طول مسلح‌کننده برای دستیابی به ظرفیت باربری بیشتر در بسیاری از موارد، روش مناسبی نیست [20]. مهارکردن انتهای آزاد مسلح‌کننده‌ها می‌تواند به عنوان روشی برای افزایش بهره‌وری مسلح‌کننده‌ها مورد استفاده قرار گیرد [21]. اوریا و محمودی [22] و اوریا و همکاران [23] تقویت مشخصات مکانیکی محل تماس مسلح‌کننده و خاک با استفاده از سیمان را روشی برای کاهش طول بهینه مسلح‌کننده پیشنهاد داده‌اند. توفیق و همکاران [24] استفاده از رزین اپوکسی را برای تقویت مقاومت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده‌های الیاف کربنی را پیشنهاد داده‌اند. یکی دیگر از پارامترهای مهم تأثیرگذار در ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح، عمق قرارگیری مسلح‌کننده است [25]. با افزایش عمق قرارگیری مسلح‌کننده تا حد مشخصی، ظرفیت باربری پی نیز افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که عمق بهینه قرارگیری مسلح‌کننده‌ها تابعی از عرض پی است [26-29].

اگرچه مطالعات پیشین، نتایج ارزشمندی در خصوص تأثیر

جدول ۱. ویژگیهای خاک مصرفی

Parameter	Value	Standard
D ₁₀ (mm)	0.3	ASTM D 2487
D ₃₀ (mm)	0.53	ASTM D 2487
D ₆₀ (mm)	0.92	ASTM D 2487
C _u	3.067	ASTM D 2487
C _c	1.017	ASTM D 2487
ω	2%	ASTM D 2216
φ	35°	ASTM D 3080
γ	16.1kN/m ³	ASTM C 127
e	0.61	ASTM C 127
e _{min}	0.55	ASTM C 127

Table.1. Basic properties of the sand

جدول ۲. ویژگیهای ژئوتکستایل مصرفی

Parameter	Value	Standard
Axial load capacity (kN/m)	5.29	ASTM D4595
Extension at failure (%)	74	ASTM D4595
Elastic modulus (kN/m ²)	7.59	ASTM D4595
Unit mass (kN/m ²)	0.3	ASTM D5261
Interface friction angle (°)	25	ASTM D5321
Interface adhesion (kPa)	5	ASTM D5321

Table.2. Mechanical parameters of the geotextile

۲-۳ مدل آزمایشگاهی

برای مدل‌سازی خاک زیر پی نواری روی خاک مسلح، از ماسه داخل یک جعبه فولادی به طول ۹۰ سانتی‌متر، عرض ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر به عنوان خاک بستر استفاده شده است. پی نواری با یک صفحه فولادی به ابعاد ۲۵×۷/۵×۲ سانتی‌متر شبیه‌سازی شده است. ابعاد مدل آزمایشگاهی براساس نتایج پژوهش‌های قبلی و محدودیت‌های آزمایشگاهی انتخاب شد [22]. جعبه از ورق فولادی به ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته شده که یکی از دیواره‌های آن از ورق شفاف تهیه شده است. دو تقویت‌کننده فولادی در وسط جعبه سختی جانبی آن را تأمین می‌کند. از جک دستگاه آزمایش CBR برای بارگذاری و ثبت نشست‌های مدل پی استفاده شده است. دیواره‌های داخلی جعبه کاملاً صاف شده تا اثر اصطکاک دیواره‌ها به حداقل برسد. در شکل (۲)، سیستم استفاده شده در این آزمایش نشان داده شده است.

مکانی مسلح‌کننده‌ها در داخل توده خاک در زیر پی باعث تغییر سازوکار انتقال تنش بین مسلح‌کننده و خاک شده و بر توزیع تنش در توده خاک و رفتار تنش-کرنش و گسیختگی آن و در نهایت بر ظرفیت باربری پی واقع بر آن تأثیر می‌گذارد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ ماسه

ماسه استفاده شده در این آزمایش از شمال اردبیل جمع‌آوری شده است که طبق استاندارد ASTM D2487-11 [31]، براساس سیستم متحد، از نوع ماسه بدانه‌بندی شده (SP) بوده است. زاویه اصطکاک داخلی خاک بر اساس استاندارد ASTM D3080-04 [32]، رطوبت و وزن مخصوص بر اساس استانداردهای ASTM D2216-05 [33]، ASTM C127-07 [34]، تعیین شده است. ویژگی‌های ماسه مورد استفاده در این پژوهش در شکل (۱) و جدول (۱)، آورده شده است.

۲-۲ ژئوتکستایل

ژئوتکستایل استفاده شده در این پژوهش از نوع ژئوتکستایل بافته شده است. ظرفیت باربری محوری و مدول الاستیک ژئوتکستایل مطابق با استاندارد ASTM D4595-11 [35]، در آزمایشگاه تعیین شده است. ویژگی‌های ژئوتکستایل مورد استفاده در این آزمایش‌ها، در جدول (۲)، نشان داده شده است [36,37].

شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک مورد استفاده

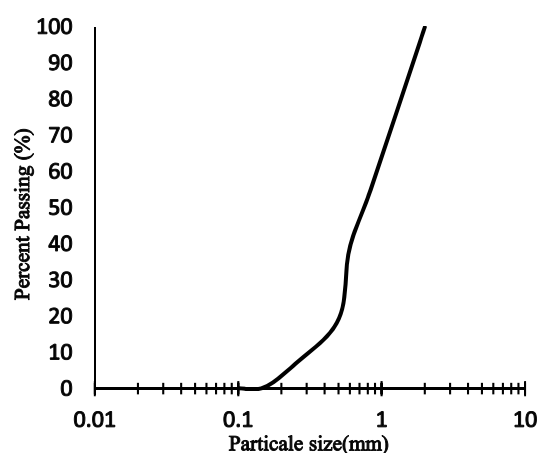


Fig. 1. Grain size distribution curve for sand grain diameter

شکل ۳. آرایش‌های قرارگیری نوارهای ژئوتکستایل در خاک

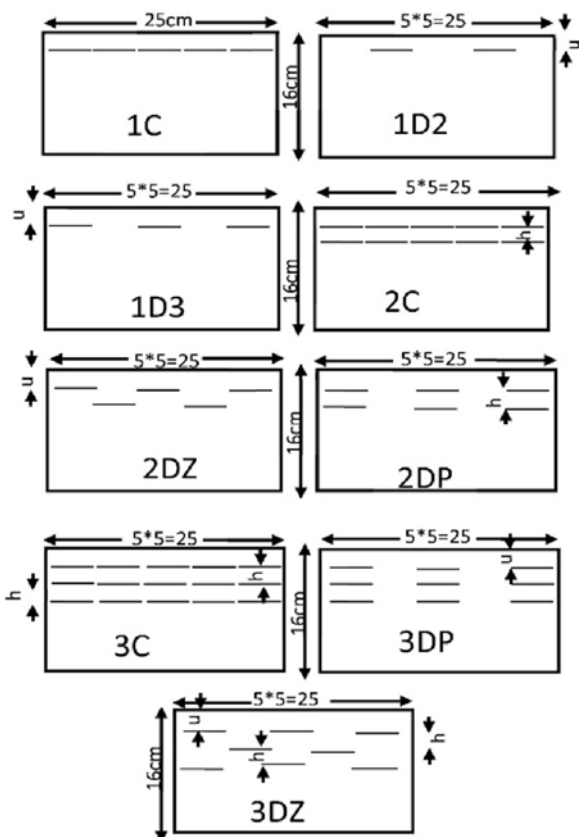


Fig. 3. Arrangements of geotextile strips in the sand

۲-۵ آماده‌سازی مدل‌ها

مهم‌ترین پارامتر در یک مطالعه آزمایشگاهی، توانایی تولید نمونه‌های مشابه است. در خلال آزمایش‌های انجام شده تلاش شده است که نمونه‌های ساخته شده کاملاً مشابه یکدیگر بوده و دارای شرایط ضخامت و تراکم یکسانی باشند. وزن واحد ماسه استفاده شده در جعبه ۱۶/۱ کیلونیوتن بر مترمکعب است. برای دستیابی به وزن مخصوص مشابه در تمامی آزمایش‌ها، برای هر آزمایش ۶۴/۴ کیلوگرم ماسه استفاده شده است. ماسه در ۴ لایه به صورت بارشی در باکس آزمایش قرار داده شده است. ضخامت لایه‌های اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۵، ۵، ۳ و ۳ سانتی‌متر بوده است. وزن لایه‌های ماسه موجود در لایه‌های اول و دوم ۲۰/۱ کیلوگرم و برای لایه‌های سوم و چهارم ۱۲/۱ کیلوگرم می‌باشد. هر لایه با استفاده از وزنه فولادی مربعی شکل به ابعاد ۱۴×۱۴ سانتی‌متر، به وزن ۳/۸ کیلوگرم تراکم داده شده است. برای تراکم هر لایه، وزنه مذکور ۵۰ بار از ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر

شکل ۲. الف) پلان مدل آزمایشگاهی، ب) مقطع مدل آزمایشگاهی، ج) تصویر مدل آزمایشگاهی و سیستم بارگذاری

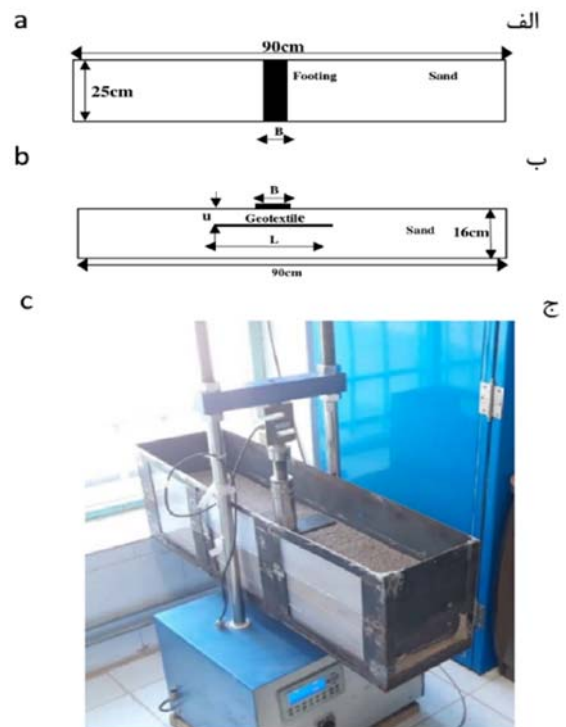


Fig. 2. a) Schematic plane view, b) section, and c) photograph of the experimental model

۲-۴ نحوه قرارگیری مسلح‌کننده‌ها

در این پژوهش تأثیر حالت‌های مختلف قرارگیری مسلح‌کننده در داخل خاک در افزایش ظرفیت باربری پی روی آن بررسی شده است. این آزمایش‌ها با بررسی ۹ حالت مختلف قرارگیری مسلح‌کننده انجام یافته است. در شکل (۳) آرایش‌های قرارگیری مسلح‌کننده در خاک نشان داده شده است. فاصله قائم مسلح‌کننده‌ها به اندازه‌ای در نظر گرفته شده که محدوده مسلح شده از عمق بهینه بیشتر نباشد.

در شکل (۴) نیز روش ساخت مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است. این تصاویر، مقطع عرضی از سیستم خاک مسلح را نشان می‌دهند. طول نوارهای مسلح‌کننده در آرایش یک لایه پیوسته ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ و در سایر آرایش‌ها، ۶۰ سانتی‌متر بوده است.

از زیر پی، δ ، زاویه اصطکاک ظاهری بین خاک و مسلح کننده و L ، طول مسلح کننده است.

در صورتی که مد گسیختگی خاک مسلح به صورت گسیختگی کششی مسلح کننده‌ها نباشد، می توان ظرفیت باربری پی را به صورت تابع بدون بعد زیر بیان کرد [39]:

$$q_u/B\gamma = f(\phi, D/B, t/B, \gamma, a/B, u/B, \delta, L/B) \quad (2)$$

با توجه به وابستگی رفتار تنش- کرنش و گسیختگی خاک‌ها به سطح تنش، صرف نظر کردن از این واقعیت باعث ایجاد تفاوت بزرگی بین نتایج مدل آزمایشگاهی و واقعیت می شود. برای رفع این مشکل و همسان سازی سطح تنش در مدل آزمایشگاهی و واقعی، استفاده از دستگاه های گریز از مرکز (با اعمال شتاب وزن بیشتر) یا اعمال گرادیان هیدرولیکی رو به پایین (با استفاده از جریان سیال در نمونه) توصیه شده است [40]. با توجه به هزینه زیاد، پیچیدگی و در دسترس نبودن دستگاه های سانتریفیوژ، روش هایی برای تعمیم نتایج مدل های آزمایشگاهی در شرایط $1g$ به مقیاس واقعی ارائه شده است. در این پژوهش کلیه محاسبات و نتیجه گیری ها با استفاده از پارامترهای بدون بعد در شرایط $1g$ انجام شده است. در نهایت با استفاده از روش التابی و فلنیوس [40]، نتایج بدست آمده از مدل به مقیاس واقعی تعمیم داده شده و محدوده اعتبار نتایج مدل آزمایشگاهی بررسی شده است.

۳- نتایج

ابتدا عملکرد و ظرفیت باربری پی روی ماسه غیرمسلح بررسی شده است. برای این منظور تعدادی آزمایش روی خاک غیرمسلح صورت گرفت، که نتایج آزمایش های انجام شده در شکل (۵) نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، نتایج تکرار آزمایش ها هماهنگی مناسبی با یکدیگر داشته و می توان نتیجه گرفت که روش تهیه نمونه ها مشابه بوده و می توان نتایج آنها را با یکدیگر مقایسه نمود. در این آزمایش ها مقدار نشست در مرکز پی اندازه گیری شده است. با توجه به صلبیت پی و تقارن آن، نشست پی به صورت یکنواخت است.

رها شده است. نیروی وارد بر پی با نرخ ۱ میلی متر بر دقیقه اعمال شده است. از جک دستگاه CBR برای اعمال بارگذاری استفاده شده است. نشست پی در مرکز آن اندازه گیری شده است. برای اطمینان یافتن از درستی نتایج آزمایش ها، هریک از آزمایش ها حداقل ۳ بار تکرار شده و میانگین سه آزمایش به عنوان نتیجه نهایی در نظر گرفته شده است.

شکل ۴. جایگذاری نوارهای مسلح کننده در خاک



Fig. 4. Placement of the geotextile strips in the model

۶-۲ آنالیز ابعادی

با استفاده از آنالیز ابعادی می توان نتایج مدل آزمایشگاهی با مقیاس کوچک را به شرایط واقعی تعمیم داد. با توجه به قضیه پی-بوکینگهام، اگر در یک مدل فیزیکی تعداد m متغیر تأثیر داشته باشند که از نظر ابعادی دارای n بعد باشند، کلیه متغیرهای حاکم بر آن مدل را می توان در $(m-n)$ متغیر بدون بعد خلاصه کرد. متغیرهای تأثیرگذار در ظرفیت باربری پی نواری روی ماسه مسلح شده در رابطه (۱) نشان داده شده است [38].

$$q_u = f(\phi, B, D, \gamma, t, a, u, \delta, L) \quad (1)$$

که در آن: ϕ ، زاویه اصطکاک داخلی خاک، B ، عرض پی، D ، عمق مدفون پی، γ ، وزن مخصوص خاک، t ، مقاومت کششی مسلح کننده، a ، عرض مقطع مسلح کننده، u ، فاصله مسلح کننده

شکل ۶. نتایج تغییرات تنش باربری- نشست بر اساس تغییرات طول ژئوتکستایل (آرایش قرارگیری تقویت کننده در خاک، آرایش 1C است)

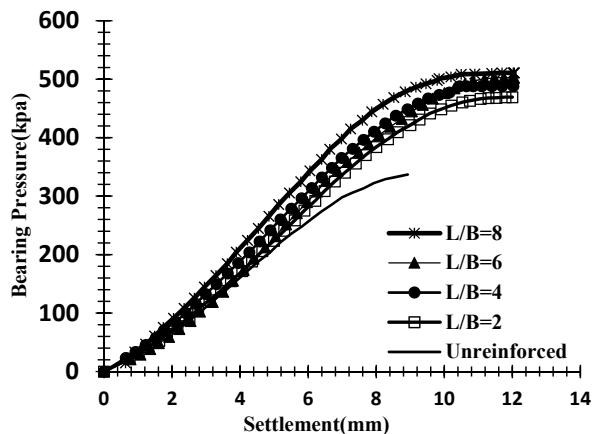


Fig. 6. Results of tests on unreinforced and reinforced models with different reinforcement lengths for 1C arrangement

۳-۲ تأثیر تعداد نوارهای استفاده در آرایش تک لایه‌ای بر ظرفیت باربری پی

کاربرد ژئوتکستایل‌ها در تسلیح خاک بیشتر به صورت لایه‌های پیوسته است. در اکثر روش‌های محاسباتی، تأثیر تسمه‌ها و نوارهای ناپیوسته در مقاومت خاک مسلح به ویژه در دیوارهای خاک مسلح، به صورت تعداد در عرض واحد نشان داده شده است که نشان‌دهنده انتظار تأثیر خطی افزایش عرض مسلح‌کننده، در ظرفیت باربری مقاومت خاک مسلح است. در این پژوهش تأثیر استفاده از نوارهای مسلح‌کننده یک در میان، در ظرفیت باربری پی بررسی شده است. برای این منظور تأثیر قرارگیری مسلح‌کننده مطابق آرایش‌های 1D2 و 1D3 در ظرفیت باربری پی بررسی شده است. در این آزمایش‌ها طول مسلح‌کننده ۶۰ سانتی‌متر ($L/B=8$) است. نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۷)، نشان داده شده است. برای مقایسه بهتر، ظرفیت باربری نهایی پی روی خاک غیرمسلح نیز در این شکل نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار ظرفیت باربری پی، برای مدل مسلح‌شده با یک لایه ژئوتکستایل پیوسته بدست آمده است. با در نظر گرفتن مقدار مسلح‌کننده استفاده شده در این سه حالت، بیشترین افزایش ظرفیت باربری به نسبت مقدار مسلح‌کننده در حالت 1D2 بوده است. نسبت افزایش ظرفیت باربری پی برای حالت پیوسته ۳۹٪، آرایش 1D2، ۲۱٪ و برای آرایش 1D3 حدود ۲۹٪ بوده است.

شکل ۵. تغییرات تنش باربری- نشست برای نمونه بدون مسلح‌کننده

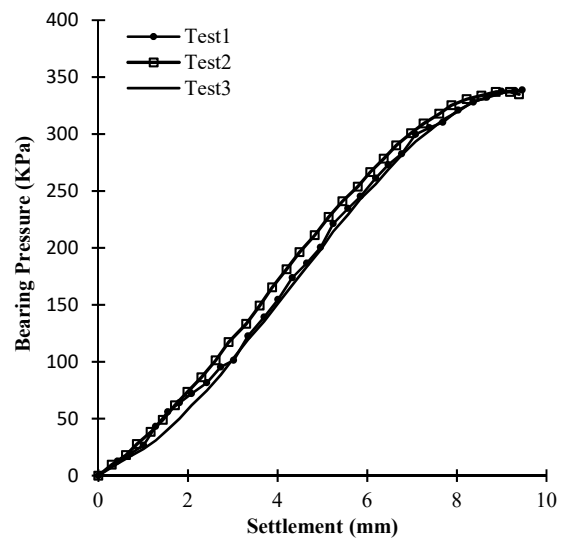


Fig.5. Results of bearing pressure-settlement for unreinforced models

۳-۱ تأثیر طول ژئوتکستایل تک لایه در ظرفیت باربری پی

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذاری در ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح، طول مسلح‌کننده است. برای بررسی این موضوع مدل‌هایی با مسلح‌کننده‌هایی به طول‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ سانتی‌متر (نسبت طول مسلح‌کننده به عرض پی نواری ۲، ۴، ۶ و ۸) با آرایش 1C مطالعه شد. شکل (۶)، نتایج آزمایش‌های انجام شده روی مدل‌هایی که با یک لایه پیوسته از مسلح‌کننده با طول‌های مختلف مسلح‌شده‌اند را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۶)، مشاهده می‌شود، با افزایش طول مسلح‌کننده، ظرفیت باربری نهایی پی نیز افزایش یافته ولی نرخ افزایش ظرفیت باربری با افزایش طول مسلح‌کننده کاهش یافته است. با توجه به نتایج این آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط این مدل‌ها که افزایش طول مسلح‌کننده بعد از طول ۴۵ سانتی‌متر ($L/B=6$) تقریباً بی‌اثر بوده و با افزایش طول مسلح‌کننده، نمی‌توان افزایش چشمگیری در ظرفیت باربری پی انتظار داشت. با توجه به اینکه ظرفیت باربری مدل‌های مسلح‌شده با نوارهای ۶۰ سانتی‌متری بسیار نزدیک به نتایج مدل‌های مسلح‌شده با نوارهای ۴۵ سانتی‌متری بود، می‌توان نتیجه گرفت که حد نهایی طول مسلح‌کننده باید به ۶۰ سانتی‌متر محدود شود. به توجه به این نتیجه، طول ۶۰ سانتی‌متر ($L/B=8$) برای مسلح‌کننده‌ها در سایر آرایش‌ها استفاده شده است.

شکل ۸. نتایج تغییرات تنش باربری- نشست برای آرایش‌های مختلف

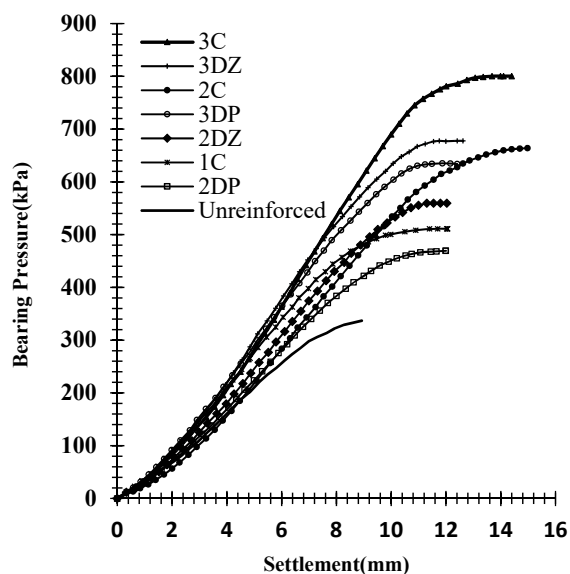


Fig. 8. Results of bearing pressure- settlement for different geotextile arrangements

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۸ و ۹)، استفاده از مسلح‌کننده‌ها در آرایش‌های ۱، ۲ و ۳ لایه پیوسته مطابق آرایش‌های 1C، 2C و 3C بیشترین افزایش در نسبت ظرفیت باربری پی را نتیجه می‌دهد. ولی توجه به این نکته ضروری است که مقدار مسلح‌کننده استفاده شده در این حالت‌ها نیز بیشترین مقادیر با توجه به تعداد لایه‌های مسلح‌کننده نیز بوده است. نکته بسیار قابل توجه اینکه مقایسه ظرفیت باربری نهایی در آرایش‌های 2DZ و 2DP نشان می‌دهد گرچه نسبت مساحت مسلح‌کننده مورد استفاده در آرایش 2DZ از نسبت مساحت مسلح‌کننده استفاده شده در آرایش 2DP کمتر است، ولی ظرفیت باربری نسبی پی در حالت 2DZ از ظرفیت باربری نسبی پی در حالت 2DP بیشتر است. مشابه همین حالت در مقایسه آرایش‌های 3DP و 3DZ نیز مشاهده می‌شود. در شکل (۱۰)، نسبت ظرفیت باربری پی واقع بر خاک مسلح‌شده با آرایش‌های مختلف به ظرفیت باربری پی روی خاک غیرمسلح در نسبت نشست‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، روند افزایش ظرفیت باربری در نسبت نشست‌های کم نیز مشابه افزایش نسبت ظرفیت باربری نهایی است. با توجه به نمودارهای نشان داده شده در این شکل می‌توان نتیجه گرفت که آرایش‌های 2DZ و 3DZ حتی در نشست‌های کم نیز با وجود سطح مسلح‌کننده کمتر، عملکرد بهتری در مقایسه با آرایش‌های 2DP و 3DP داشته‌اند.

شکل ۷. نتایج تغییرات باربری- نشست برای حالت‌های تک لایه‌ای ناپیوسته

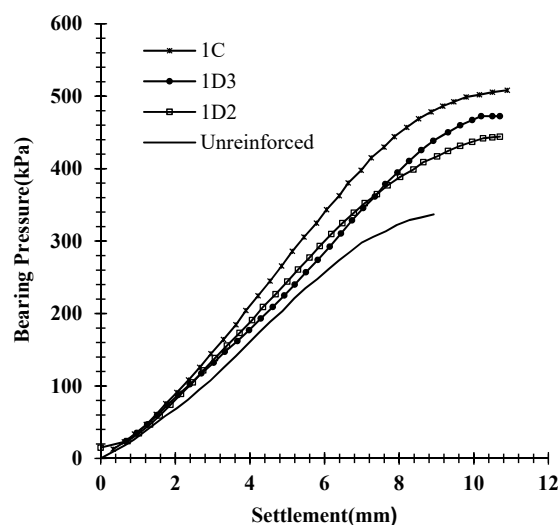


Fig. 7. Results of bearing pressure-settlement changes for discontinuous planer-layer models

با توجه به اینکه نسبت عرض مسلح‌کننده استفاده شده در حالت 1C به عرض پی، $\frac{3}{33}$ و در آرایش‌های 1D3، 1D2 به ترتیب ۲ و $\frac{1}{33}$ است، می‌توان نتیجه گرفت، گرچه ظرفیت باربری پی در حالت پیوسته بیشتر بوده است ولی افزایش ظرفیت باربری پی نسبت به سطح مسلح‌کننده استفاده شده در حالت 1D2 بیشترین مقدار بوده است.

۳-۳ بررسی اثر آرایش‌های مختلف ژئوتکستایل در آرایش‌های چند لایه‌ای در ظرفیت باربری پی

با توجه به اینکه ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح تابع چگونگی توزیع تنش بین مسلح‌کننده و خاک هست، به نظر می‌رسد با تغییر شکل جایگذاری مسلح‌کننده در داخل خاک به واسطه تغییر توزیع تنش بین خاک و مسلح‌کننده، بتوان تغییراتی در رفتار و ظرفیت باربری پی ایجاد نمود. برای این منظور حالت مختلف قرارگیری مسلح‌کننده در خاک که در شکل (۳) نشان داده شده بود، بررسی شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است. در شکل (۹) نیز ظرفیت باربری نسبی نهایی پی برای آرایش‌های مختلف نشان داده شده است. در شکل (۹)، UBPR معرف نسبت ظرفیت باربری نهایی هر آرایش به ظرفیت باربری نهایی خاک غیر مسلح است.

جدول ۳. تأثیر آرایش مسلح کننده در بازده تسلیح

Arrangement	q_u (kPa)	$\frac{a}{B}$	$\frac{q_u}{B\gamma}$	$\frac{q_u}{B\gamma} \frac{a}{B}$
Ur	337	0	279	-
1D2	444	1.33	368	276
1D3	472	2	391	196
1C	510	3.33	422	132
2C	664	6.67	550	82.5
3C	800	10	663	66.3
2DZ	559	3.33	463	139
2DP	469	4	388	97
3DP	634	6	525	87.5
3DZ	678	5.33	561	105

Table 3. Effect of the arrangement on reinforcement efficiency

در حالت استفاده از مسلح کننده تک لایه، بیشترین ظرفیت باربری پی برای آرایش پیوسته (1C) بدست آمده، که با در نظر گرفتن مساحت مسلح کننده، راندمان این حالت کمتر از آرایش های 1D2 و 1D3 است. در حالت تک لایه، بیشترین نسبت افزایش ظرفیت باربری به سطح مسلح کننده در حالت 1D2 بدست آمده است. در آرایش های دو لایه و سه لایه، با افزایش تعداد لایه ها، ظرفیت باربری پی نیز افزایش یافته ولی نرخ افزایش آن به صورت کاهشی بود. کمترین بازدهی مربوط به آرایش 3C است. در آرایش 3C گرچه بیشترین مقدار ظرفیت باربری حاصل شده، ولی مقدار مسلح کننده مورد استفاده در این حالت نیز بیشترین مقدار بوده است.

۴- بحث

خلاصه نتایج تمامی آزمایش های انجام شده در این پژوهش در جدول شماره (۳) بیان شده است. نکته بسیار مهمی که در این نتایج مشاهده می شود، در همه آرایش ها به غیر از دو آرایش، با افزایش تعداد لایه ها و تعداد نوارها، بهره وری مسلح کننده ها کاهش یافته است. مقایسه آرایش 2DZ با 2DP و آرایش 3DZ با 3DP نشان می دهد گرچه در آرایش های DZ مساحت مسلح کننده کمتر از مساحت مسلح کننده در آرایش های DP است، ولی ظرفیت باربری پی در آرایش های DZ بیشتر از ظرفیت باربری پی در آرایش های DP است. علت این پدیده را می توان با استفاده از شکل (۱۱) توضیح داد. در شکل (۱۱) الف، سطح

شکل ۹. ظرفیت باربری نهایی پی روی خاک مسلح با آرایش های مختلف

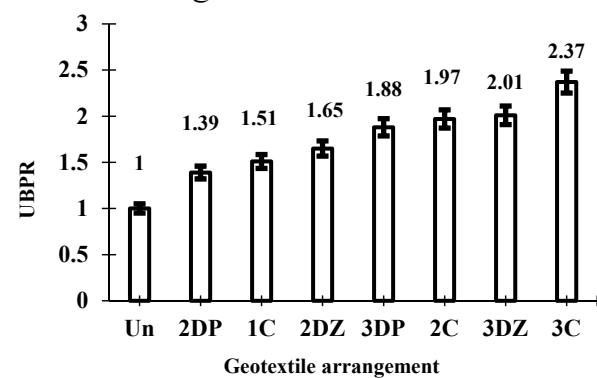


Fig. 9. Ultimate bearing capacity ratio of footing models for different geotextile arrangements

شکل ۱۰. نسبت ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح با آرایش های مختلف

به خاک غیر مسلح

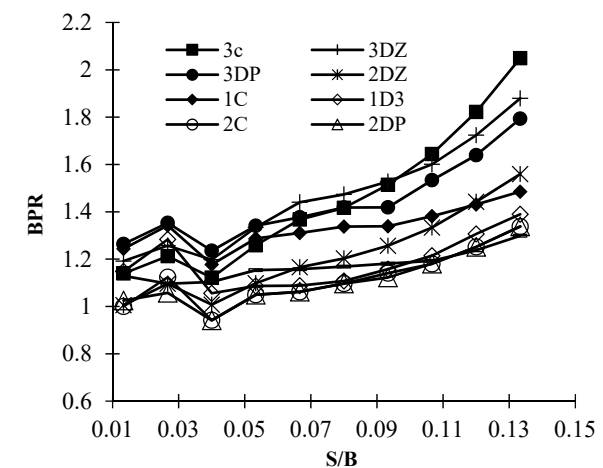


Fig. 10. The ratio of the bearing capacity of foundation on reinforced soil to unreinforced soil for different arrangements

نتایج ظرفیت باربری نهایی کلیه آرایش ها به صورت پارامترهای بدون بعد در جدول (۳) نشان داده شده است. در این جدول، نسبت ظرفیت باربری نسبی نهایی به نسبت عرض مسلح کننده به عرض پی نشان داده شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول (۳) می توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد لایه های مسلح کننده، ظرفیت باربری پی نیز افزایش می یابد ولی با افزایش تعداد لایه ها، نسبت افزایش ظرفیت باربری به نسبت سطح مسلح کننده استفاده شده کاهش می یابد. یعنی بازدهی مسلح کننده ها در افزایش ظرفیت باربری کم شده است.

حالت حرکت نسبی مسلح‌کننده و گسیختگی برشی در فصل مشترک که باعث بیرون کشیدگی مسلح‌کننده از خاک می‌شود، قابل تصور است. در حالی که در آرایش 2DP دو حالت گسیختگی ناشی از بیرون کشیدگی مسلح‌کننده از خاک امکان‌پذیر است. اگر ضخامت لایه خاک بین دو مسلح‌کننده (h) به اندازه کافی زیاد باشد، دو لایه مسلح‌کننده که تحت نیروهای T1 و T2 قرار دارند، از داخل خاک بیرون کشیده شده ولی لایه خاک بین این دو مسلح‌کننده در محل خود ثابت می‌ماند. این حالت در شکل (۱۱ ب) نشان داده شده است. در این حالت عملکرد مسلح‌کننده از نظر بیرون‌کشیدگی در دو آرایش 2DZ و 2DP یکسان است. در این حالت، مقاومت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده‌ها از جمع تنش‌های برشی فصل مشترک در بالا و پایین هر دو لایه مسلح‌کننده تأمین می‌شود. در حالت دوم که در شکل (۱۱ ج) نشان داده شده است، اگر ضخامت لایه خاک بین مسلح‌کننده‌ها، کم باشد، ممکن است در اثر کشش مسلح‌کننده‌های بالا و پایین لایه خاک، مقاومت برشی در وجوه جانبی لایه محصورشده خاک کفایت نکرده و لایه خاک محصورشده با مسلح‌کننده‌ها نیز با آنها جابه‌جا شود. در این حالت، لایه خاک محصور بین دو مسلح‌کننده توانایی ایجاد تنش‌های اصطکاکی در فصل مشترک خود با مسلح‌کننده‌ها را نداشته و مقاومت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده‌ها از جمع تنش‌های برشی فصل مشترک در سطح روی مسلح‌کننده فوقانی و سطح زیرین مسلح‌کننده تحتانی تأمین می‌شود. در این حالت مقاومت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده‌ها کاهش قابل توجهی خواهد داشت. با توجه به اینکه مقاومت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده نقش تعیین‌کننده‌ای در ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح دارد، می‌توان نتیجه گرفت که ظرفیت باربری بالاتر پی در آرایش 2DZ نسبت به آرایش 2DP با وجود مقدار مسلح‌کننده کمتر، ناشی از این پدیده باشد. با روش مشابهی نیز می‌توان دلیل ظرفیت باربری بالاتر آرایش 3DZ نسبت به 3DP را نیز بیان کرد. همچنین باید اشاره کرد که اگر فاصله عمودی دولا به مسلح‌کننده از حد مشخصی فراتر رود، گرچه امکان بیرون کشیدگی لایه خاک محصورشده بین دو لایه مسلح‌کننده با حرکت مسلح‌کننده‌ها کمتر می‌شود، ولی ممکن است با خروج مسلح‌کننده لایه تحتانی

مقطع طولی و عرضی خاک مسلح و در شکل (۱۱ ب، و ۱۱ ج)، سازوکار انتقال نیرو بین مسلح‌کننده‌ها و خاک نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، در آرایش 2DP بین هر دو لایه مسلح‌کننده یک لایه خاک وجود دارد در حالی که در آرایش 2DZ لایه خاکی بین مسلح‌کننده‌ها محصور نشده است.

شکل ۱۱. الف) سطح مقطع طولی و عرضی خاک مسلح ب و ج) نیروهای وارد بر مسلح‌کننده و خاک در دو آرایش 2DZ و 2DP

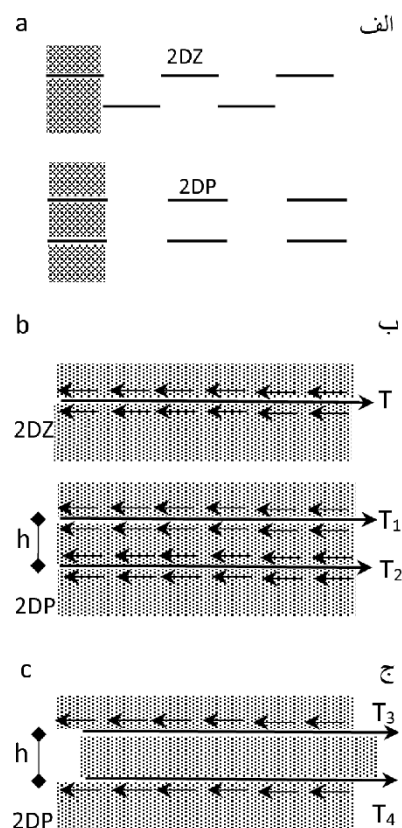


Fig. 11. a) Cross and longitudinal sections of reinforced soil, b and C) pull-out forces in reinforcements and stress distribution in soil in 2DP and 2DZ configurations.

نیروی کششی مسلح‌کننده‌ها به صورت تنش برشی در فصل مشترک خاک و مسلح‌کننده به توده خاک منتقل می‌شود. در آرایش 2DZ هر لایه خاک فقط از یک طرف با مسلح‌کننده در تماس هست ولی در آرایش 2DP لایه میانی خاک که با ضخامت h مشخص شده، بین دولا به مسلح‌کننده، محصور شده است. جدا از گسیختگی کششی مسلح‌کننده، در آرایش 2DZ برای گسیختگی فصل مشترک خاک و مسلح‌کننده، فقط یک

از محدوده گسیختگی زیر پی، تأثیر چندانی در افزایش ظرفیت باربری پی نداشته باشد.

۵- تعمیم نتایج آزمایشگاهی به مقیاس واقعی

التایی و فلنیوس [40] با در نظر گرفتن این نکته که نسبت تخلخل خاک وابسته به سطح تنش بوده و در رفتار تنش- کرنش و گسیختگی خاک تأثیرگذار است، روشی برای تعمیم نتایج مدل‌های فیزیکی کوچک مقیاس به نتایج مقیاس بزرگ ارائه کرده است. در این روش، نسبت تخلخل نهایی خاک پس از گسیختگی کامل در سه آزمایش مقاومت برشی در سه سطح تنش مختلف تعیین می‌شود. با استفاده از این نتایج، منحنی تخلخل- تنش در شرایط پس از گسیختگی برای ماسه مشخص می‌شود. برای تمام ماسه‌ها، این منحنی در مقیاس نیمه لگاریتمی به صورت خطی بوده و برای هر ماسه منحصر به فرد است. در واقع این منحنی، مانند منحنی حالت بحرانی در رس است. بین و جفریس [41] این منحنی را منحنی حالت ماندگار نامیده‌اند. اختلاف تخلخل خاک از منحنی حالت ماندگار، پارامتر اپسیلون نامیده شده است [40]. روسکو و پورشاسب [42] نیز مفهوم مشابهی ارائه کرده بودند. فلنیوس با جمع‌آوری داده‌های مختلف نشان داد که رفتار نمونه‌های مختلف مدل‌های فیزیکی کوچک مقیاس را می‌توان با استفاده از منحنی حالت ماندگار و پارامتر اپسیلون به رفتار مدل واقعی با مقیاس بزرگ تعمیم داد. طبق یافته فلنیوس، تمامی مدل‌هایی که شرایط تنش-تخلخل اولیه آنها روی منحنی‌هایی به موازات منحنی حالت ماندگار آن خاک قرار داشته باشند، رفتار مشابهی داشته و می‌توان نتایج بدست آمده از این مدل‌ها را به یکدیگر تعمیم داد. در جدول شماره (۴) ضرایب تبدیل مقیاس مدل با استفاده از روش فلنیوس نشان داده شده است. ضرایب ارائه شده در این جدول، بعد از اعمال مفهوم حالت ماندگار در آنالیز ابعادی براساس قضیه پی-بوکینگهام استخراج شده است [40]. برای تعمیم نتایج مدل فیزیکی بررسی شده در این پژوهش نیز از روش التایی و فلنیوس استفاده شده است.

جدول ۴. ضرایب مقیاس برای مدل براساس مفهوم حالت ماندگار [40]

parameter	prototype scale factor	model scale factor
length	1	n
area	1	n ²
volume	1	n ³
acceleration	1	1
stress	1	N
strain	1	1
displacement	1	n
force	1	Nn ²
Void ratio	e _p	e _m =e _p +λln(N)

Table 4. Scale factors for models based on steady-state concept

در شکل (۱۲) تخلخل نهایی در سه آزمایش برش در محدوده تنش ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در فضای نیمه لگاریتمی تنش-تخلخل نشان داده شده است.

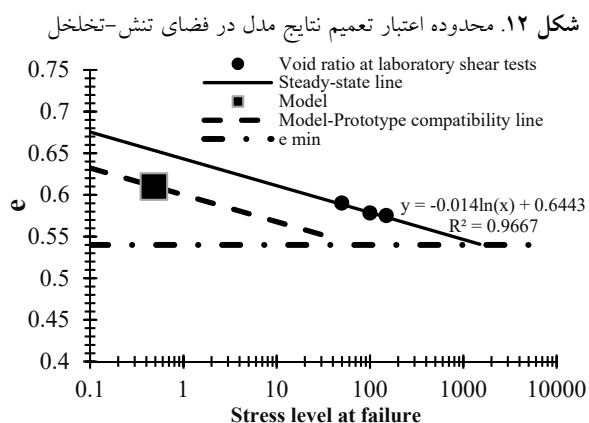


Fig. 12. Extension of the model results to prototype in stress-void ratio space

خط عبوری از این سه نقطه نشان‌گر خط حالت ماندگار است. تنش در عمق لایه وسط مسلح‌کننده (عمق ۳ سانتی متری زیر پی) و تخلخل اولیه مدل با نقطه مربع توپر در این شکل نشان داده شده است (۰/۴۸۳ کیلوپاسکال). این نقطه، به عنوان تنش و تخلخل مبنای مدل آزمایشگاهی است. در مدل غیرمسلح این نقطه در وسط گوه صلب زیر پی قرار گرفته و در مدل‌های مسلح در محل تماس خاک و مسلح‌کننده و در محدوده وقوع گسیختگی قرار گرفته است. خطی که به موازات خط حالت ماندگار و از نقطه مبنای تنش-تخلخل مدل عبور می‌کند، رابطه‌ای بین سطح تنش و تخلخل را مشخص می‌کند که نتایج مدل در آن محدوده معتبر می‌باشد. این رابطه به صورت خط نقطه‌چین

منتقل شده از مسلح‌کننده‌ها در توده خاک است.

۷- اعلام تعارض منافع

نویسندگان مقاله اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

۸- منابع

- [1] Toufigh, V., F. Saeid, V. Toufigh, A. Ouria, C. S. Desai, and H. Saadatmanesh, 2014 Laboratory study of soil-CFRP interaction using pull-out test Geomech. Geoenviron. 9(3): 208-214. doi: 10.1080/17486025.2013.813650.
- [2] Ouria, A., V. Toufigh, C. Desai, V. Toufigh, and H. Saadatmanesh, 2016 Finite element analysis of a CFRP reinforced retaining wall Geomech. Eng. 10(6): 757-774. doi: 10.12989/gae.2016.10.6.757.
- [3] Fan, K., S. H. Liu, Y. P. Cheng, and Y. Wang, (2019) Sliding stability analysis of a retaining wall constructed by soilbags Géotechnique Lett. 9(3): 211-217. doi: 10.1680/jgele.19.00002.
- [4] Broda, J. et al., 2019 Reclamation of abandoned open mines with innovative meandricly arranged geotextiles Geotext. Geomembranes (November): 0-1. doi: 10.1016/j.geotextmem.2019.11.003.
- [5] Lee, S. L., M. A. Mannan, and W. H. Wan Ibrahim, (2019) Shear strength evaluation of composite pavement with geotextile as reinforcement at the interface Geotext. Geomembranes (October): 0-1. doi: 10.1016/j.geotextmem.2019.11.002.
- [6] Sommers, A. N., & Viswanadham, B. V. S. 2009. Centrifuge model tests on the behavior of strip footing on geotextile-reinforced slopes. Geotextiles and Geomembranes, 27(6), 497-505.
- [7] Goodarzi, S., and Shahnazari, H. 2019. Strength enhancement of geotextile-reinforced carbonate sand. Geotextiles and Geomembranes, 47(2), 128-139.
- [8] Naeini, S. A., and Gholampoor, N. 2014. Cyclic behaviour of dry silty sand reinforced with a geotextile. Geotextiles and Geomembranes, 42(6), 611-619.
- [9] Latha, G.M., and Somwanshi, A., 2009. Effect of reinforcement form on the bearing capacity of square footings on sand. Geotextiles and Geomembranes, 27(6), pp. 409-422.
- [10] Hugher, J.M.O., and Withers, N.J., 1974. Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns. Ground engineering, 7(3), pp. 42-49.

در شکل (۱۲) نشان داده شده است. برای نمونه اگر در مقیاس واقعی، عرض پی نواری برابر ۱/۵ متر باشد، نسبت ابعاد پی به مدل برابر ۲۰ خواهد بود. در این شرایط تنش در عمق ۰/۶ متری زیر پی برابر ۹/۶۶ کیلوپاسکال خواهد بود. از روی خط عبوری از نقطه تنش-تخلخل مبنای مدل به موازات خط حالت ماندگار، (روی خط نقطه چین) با شرایط تنش ۹/۶۶ کیلوپاسکال نسبت تخلخل ۰/۵۶۸ تعیین می‌شود. پس نتایج مدل آزمایشگاهی برای مدل واقعی با اندازه‌های ۲۰ برابر، در شرایطی قابل استفاده خواهد شد که تنش قائم و تخلخل مدل واقعی در عمق ۰/۶ متری زیر پی به ترتیب برابر ۹/۶۶ کیلوپاسکال و ۰/۵۶۸ باشد. با توجه به جدول (۱)، کترین تخلخل ماسه استفاده شده در این مدل ۰/۵۵ است. با توجه به نمودار شکل (۱۲)، تنش در عمق ۰/۴ عرض پی، برابر ۳۵ کیلوپاسکال خواهد بود که حدود ۷۲ برابر تنش مینا در مدل آزمایشگاهی است. پس نتایج این مدل را می‌توان حداکثر تا ابعاد ۷۲ برابر مدل آزمایشگاهی (حداکثر عرض پی ۵/۴ متر) و با رعایت نسبت‌های ارائه شده در جدول (۴) تعمیم داد.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر چگونگی قرارگیری مسلح‌کننده در خاک، در ظرفیت باربری پی نواری در آزمایشگاه بررسی شد. آزمایش‌های مختلفی با آرایش‌های مختلف مسلح‌کننده با حداقل سه تکرار صورت گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که علاوه بر طول و تعداد لایه‌های مسلح‌کننده، چگونگی قرارگیری آنها نیز تأثیر زیادی در ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح دارد. مهم‌ترین نتیجه این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از مسلح‌کننده‌ها به صورت نوارهای منقطع ممکن است باعث افزایش راندمان و بهره‌وری آنها شود به شکلی که با استفاده از مسلح‌کننده کمتر، ظرفیت باربری بیشتری بدست آید. در صورتی که نوارهای مسلح‌کننده به صورت منقطع در اعماق مختلف به صورتی جایگذاری شود که نوارهای دو لایه مجاور در زیر یکدیگر قرار نگیرند، بهترین حالت از نظر بهره‌وری خواهد بود. دلیل این افزایش ظرفیت باربری، ناشی از چگونگی توزیع تنش

- [23] Ouria, A., Emami, S., and Karamzadegan, S. Laboratory Investigation of the Effect of the Cement Treatment of Interface on the Pullout Capacity of Reinforcements, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Articles in Press, Accepted Manuscript, Available Online from 23 October 2019, doi: 10.22060/CEEJ.2019.16191.6149 (In Persian).
- [24] Toufigh, V., A. Ouria, C. S. Desai, N. Javid, V. Toufigh, and H. Saadatmanesh, 2016 Interface behavior between carbon-fiber polymer and sand *J. Test. Eval.* 44(1) doi: 10.1520/JTE20140153.
- [25] Yetimoglu, T., Jonathan, T.H.Wu., and Saglamer, A., 1994. Bearing capacity of rectangular footings on geogrid-reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(12), pp. 2083-2099.
- [26] Singh, P., and Gill, K., 2012. CBR improvement of clayey soil with Geogrid Reinforcement. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(6), pp. 456-462.
- [27] Strahler, A. W., Walters, J. J., and Stuedlein, A. W., 2016. Frictional resistance of closely spaced steel reinforcement strips used in MSE walls', *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(2), p. 04016030.
- [28] Broda, J., Franitzka, P., Herrmann, U., Helbig, R., Große, A., Grzybowska-Pietras, J., and Rom, M., 2019. Reclamation of abandoned open mines with innovative meandricly arranged geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*. (November), pp. 0-1. dio: 10.1016/j.geotextmem.2019.11.003.
- [29] Fan, K., Liu, S. H., Cheng, Y. P., and Wang, Y., 2019. Sliding stability analysis of a retaining wall constructed by soilbags. *Géotechnique Letters*, 9(3), pp. 211-217. doi: 10.1680/jgele.19.00002.
- [30] Dixon, N., G. Fowmes, and M. Frost, (2017) Global challenges, geosynthetic solutions and counting carbon *Geosynth. Int.* 24(5) :451-464. doi: 10.1680/jgein.17.00014.
- [31] ASTM D 2487-11. 2011 Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). American society for testing materials.
- [32] ASTM D 3080-04. 2004 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, American society for testing materials.
- [33] ASTM D 2216-05. 2005 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. American society for testing material.
- [11] Kourner, M., 2005. *Designing with Geosynthetics* (th ed), Prentice-Hall, New Jersey.
- [12] Huang, C.C., and Tatsuoka, F., 1990. Bearing capacity of reinforced horizontal sandy ground. *Geotextiles and Geomembranes*, 9(1), pp. 51-82.
- [13] Adams, M.T., and Collin, J.G., 1997. Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(1), pp. 66-72.
- [14] Alawaji, H.A., 2001. Settlement and bearing capacity of geogrid-reinforced sand over collapsible soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 19(2), pp.75-88.
- [15] Ghosh, A., Ghosh, A., and Bera, A.K., 2005. Bearing capacity of square footing on pond ash reinforced with jute-geotextile, *Geotextiles and Geomembranes*, 23(2), pp. 144-173.
- [16] Oliaci, M., and Kouzegaran, S., 2017. Efficiency of cellular geosynthetics for foundation reinforcement. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(2), pp. 11-22. doi: 10.1016/j.geotextmem.2016.11.001.
- [17] Davarifard, S., and Tafreshi, S. N. M., 2015. Plate Load Tests of Multi-Layered Geocell Reinforced Bed Considering Embedment Depth of Footing. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, pp. 105-110. doi: 10.1016/j.proeps.2015.08.027.
- [18] Kumar, P., and Rajkumar, R., 2012. Effect of geotextile on CBR strength of unpaved road with soft subgrade. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17(1), pp. 1355-1363.
- [19] Chen, Q., Hanandeh, S., Abu-Farsakh, M., and Mohammad, L., 2015. Performance evaluation of full-scale geosynthetic reinforced flexible pavement. *Geosynthetics International*, 25(1), pp. 26-36.
- [20] Cicek, E., E. Guler, and T. Yetimoglu, 2015 Effect of reinforcement length for different geosynthetic reinforcements on strip footing on sand soil *Soils Found.* 55(4) :661-677. doi: 10.1016/j.sandf.2015.06.001.
- [21] Mosallanezhad, M., Hataf N., and Ghahramani, A., 2008. Experimental study of bearing capacity of granular soils, reinforced with innovative grid-anchor system. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(3), pp. 299-312.
- [22] Ouria, A., and Mahmoudi, A., 2018. Laboratory and numerical modeling of strip footing on geotextile-reinforced sand with cement-treated interface. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(1), pp. 29-39

- [39] R.K. Dixit, J.N. Mandal, Dimensional analysis and modelling laws for bearing capacity of reinforced and unreinforced soil, *Constr. Build. Mater.* 7 (1993) 203–205.
- [40] Altaee, A., and , Fellenius, B. Physical modeling in sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(3): 420-431, <https://doi.org/10.1139/t94-049>.
- [41] Been, K., and Jefferies, M.G. 1985. A state parameter for sands. *Geotechnique*, 35: 99-112.
- [42] Roscoe, K.H, and, Poorooshasb, H. 1963 fundamental principle of similarity in model test for earth pressure problems. In *Proceedings of the 2nd Asian Regional Conference on Soil Mechanics*, Bangkok, Thailand. Vol. 1. pp. 134-140 31(3): 420-431.
- [34] ASTM C 127-07. 2007 Standard test method for Density, Relative Density (specific gravity), and absorption of Coarse Aggregate, American society for testing materials.
- [35] ASTM D4595-11. 2011 Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method, American society for testing materials.
- [36] ASTM D5321, Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear, ASTM International, West Conshohocken, PA,
- [37] ASTM D5261-10(2018), Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018
- [38] Muir Wood, D. 2009. *Geotechnical Modelling*.

Laboratory Investigation of the Effect of the Geotextile Pattern on the Bearing Capacity of Footing on Reinforced Sand

A. Ouria^{1*}, E. Heydarli²

1. Associate Professor, Civil Engineering Department, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

2. Graduated Student, Civil Engineering Department, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

* aouria@uma.ac.ir

Abstract

Shear strength of the soil as a granular material depends on the stress level, confinement, cohesion, and the friction between its solid particles. Geosynthetics are widely used to improve the mechanical properties of the soil. Inclusion of geosynthetics as reinforcement elements increases the confinement and the shear strength of the soil. The bearing capacity of foundation on reinforced soil depends on the type, length, depth, and mechanical properties of the reinforcements and their interface with the soil. Since the placement pattern of the reinforcements has a great impact on the stress distribution within the soil mass, therefore, it could be an important parameter on the bearing capacity of the foundations on the reinforced soil. Proper placement of the reinforcements within the soil mass could be employed to increase the effectiveness of the reinforcements on the bearing capacity improvement of the foundation on the reinforced soil. This paper presents the results of an experimental study on the effect of the pattern of reinforcement placement in reinforced soil on the bearing capacity of a strip foundation. A steel box filled with sand with the dimensions of 100×25×30 cm (Length, width, and height) was used as the test base. The strip footing was simulated by a steel plate with dimensions of 25×7.5×2 cm. The sand used in this study was a poorly graded sand (SP) according to the unified soil classification system. A woven type geotextile was used as reinforcement. The effect of the reinforcement's placement pattern on the bearing capacity of the foundation was investigated with nine different layouts including single, double, and three-layered reinforcement layouts. All the specimens prepared with a similar initial unit weight and void ratio. The tests conducted using a displacement-controlled loading device. The loading was applied with a rate of 1 mm/second. All the tests repeated at least three times to assure the accuracy and the repeatability of the results. The results of these tests indicated that the bearing capacity of the foundation increases as the length of the reinforcement increases but up to a certain limit and then remains constant. Although increasing the number of reinforcement layers increased the bearing capacity of the foundation, however, the effectiveness of the geotextile in the improvement of the bearing capacity decreased. Placement of the reinforcements in a discrete pattern improves the effectiveness of the reinforcement on the bearing capacity improvement. In multi-layer reinforcement layouts, using discrete strips of reinforcements in each elevation without overlapping with upper- and lower-layers of reinforcements, resulted in the maximum efficiency of reinforcement influence in the improvement of the bearing capacity of the foundation. In the recent case, for a specific cross-sectional area of the reinforcement, the bearing capacity of the foundation could be increased by 20% using 17% less reinforcement. The results of this study indicate that the layout of the reinforcement pattern is a very important factor in the bearing capacity of foundations on reinforced soil. With a proper placement of reinforcements, the maximum bearing capacity of the foundation could be achieved with a minimum amount of reinforcement material.

Keywords: Reinforced soil, Geotextile, Bearing capacity, Reinforcement Layout.