



بررسی تاثیر مشخصات ظاهری المانهای تسلیح کننده خاک ریزدانه در کارایی تسلیح

حسین غیاثیان^۱، ایمان نوری دلاور^۲

۱- دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده عمران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده عمران

Email: i_nouri@civileng.iust.ac.ir

خلاصه

المانهای مسلح کننده خاک در شکل‌های ظاهری مختلف موجود می‌باشند مانند المانها صفحه‌ای، شبکه‌ای، نواری، میله‌ای و ... با توجه به مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک، کارایی هر یک متفاوت خواهد بود. در این تحقیق تعدادی مدل آزمایشگاهی پی با المانهای مسلح کننده صفحه ای متفاوت در شکل ظاهری، ساخته شد و میزان افزایش باربری پی در اثر قرار دادن المانهای مختلف بررسی گردید. نتایج نشان داد که استفاده از المانهای صفحه‌ای مانند ژئوتکستایل‌ها نسبت به المانهای مشبک همانند ژئوگریدها در تسلیح خاکهای ریزدانه کارایی بیشتری خواهند داشت.

کلمات کلیدی: خاک مسلح، مصالح ریزدانه، المانهای تسلیح، باربری

مقدمه

خاک مصالحی است که به خوبی در برابر فشار و برش مقاومت می‌کند اما قادر نیست در برابر نیروهای کششی مقاومت چندانی از خود نشان دهد. از زمان‌های کهن نیز به طور تجربی دیده شد که ریشه‌های درخت یا گیاهان در تقویت توده خاک موثر است. انسانها از زمان‌های دور خانه‌های خود را با ترکیبی از گل و گاه می‌ساختند که در این مخلوط گاه نقش تسلیح دارد و به صورت یک المان کششی عمل می‌کند. خاک مسلح در واقع مصالح ساختمانی مرکبی است که در آن عناصر دارای مقاومت کششی به عنوان عامل تسلیح در توده خاک قرار می‌گیرند. امروزه تسلیح خاک به عنوان روشی موثر و اقتصادی برای افزایش مقاومت و پایداری توده‌های خاکی به کار گرفته می‌شود. مفهوم خاک مسلح اولین بار توسط یک مهندس فرانسوی به نام Henry Vidal در سال ۱۹۹۶ معرفی، و از نوارهای فلزی پهن در بین لایه‌های خاک متراکم جهت ساخت دیوار حائل استفاده گردید. با شناختی که از عملکرد مسلح کننده‌ها در دیوارهای نگهبان، شیب‌ها، خاکریزها و راه‌ها بدست آمد توجه محققین به این نکته جلب شد که می‌توان خاک زیر پی‌های سطحی را با استفاده از مسلح کننده‌ها تقویت کرد. بینکوئت و لی (۱۹۷۵) اولین گزارش کنندگان یک مطالعه سیستماتیک بر روی ظرفیت باربری پی‌های سطحی واقع بر بسترهای خاک مسلح بودند. آنها از نوارهای فلزی برای تسلیح خاک ماسه‌ای زیر پی استفاده کردند. بر پایه نتایج بدست آمده از این تحقیق آزمایشگاهی، این دو محقق یک روش تحلیلی برای بررسی رفتار پی‌های خاک مسلح ارائه کردند که در نهایت منجر به یک روش طراحی کلاسیک برای پی‌های نواری متکی بر خاک مسلح شده با نوارهای فلزی شد. با توجه به نقش مهم اصطکاک بین المان تسلیح و خاک در انتقال نیروی برشی و بسیج نیروی کششی، طبیعتاً خاک‌های دانه‌ای راندمان بیشتری در استفاده از ایده تسلیح از خود نشان می‌دهند و لذا عمده تحقیقات بر روی این خاکها متمرکز می‌باشد ولی مطالعات محدودی درباره رس مسلح توسط اینگولد و میلر (۱۹۸۲)، میلیگان و لادو (۱۹۸۴)، داوسن و لی (۱۹۸۸)، گیدو و همکاران (۱۹۸۶) و داس (۱۹۸۹) گزارش شده است. ساه (۱۹۹۰)، مندول و ساه (۱۹۹۲) و شین و همکاران (۱۹۹۳) ظرفیت باربری پی‌های سطحی واقع بر رس اشباع مسلح شده با ژئوگرید را در آزمایش‌ها مورد بررسی قرار دادند و تاثیر پارامترهای نسبت عمق اولین لایه ژئوگرید (u/B)، نسبت عمق کلی تسلیح (d/B)، تعداد لایه های ژئوگرید (N) و نسبت عرض لایه های ژئوگرید (b/B) مورد مطالعه قرار گرفتند. اینکه نوع المان صفحه ای (ژئوتکستایل یا ژئوگرید) به چه نحو در تسلیح تاثیرگذار است تابع نوع خاک می باشد و نمی توان یک نظر کلی داد. البته ژئوگریدها که دارای شبکه های باز می باشند به علت تاثیر درگیری ذرات خاک (Inter locking) در داخل سوراخهای شبکه و بسیج مقاومت پسیو راندمان بهتری در خاک‌های دانه‌ای دارند و در مقابل برای المانهای ژئوتکستایل چون سطح تماس بیشتری با

^۱ عضو هیئت علمی دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران



خاک خواهند داشت در خاکهای ریزدانه اشباع که غالباً در شرایط بارگذاری زهکشی نشده ($\phi=0$) قرار می‌گیرند، عملکرد بهتری را نشان می‌دهند و مقاومت پسیو در این حالت ناچیز و قابل صرفنظر کردن می‌باشد.

عمل تسلیج به روش‌های گوناگون هم از نظر شکل یعنی به صورت نوار، صفحه، شبکه، میله یا رشته و هم از نظر زبری یعنی به صورت زبر یا صاف و هم از نظر سختی نسبی یعنی با سختی بالا مثل فولاد یا سختی نسبی پایین مثل پارچه‌های پلیمری (Geosynthetics) صورت می‌گیرد. با توجه به مشخصات خاک و عامل انتقال تنش کششی به المانها، در یک نوع خاک کارایی هر یک از اشکال المانها متفاوت خواهد بود. در این تحقیق بر اساس یک سری آزمایشات مدل فیزیکی پی دایره‌ای در مقیاس کوچک که بر روی خاک رسی اشباع قرار گرفته است تاثیر ۴ نوع المان صفحه‌ای تسلیج را که دارای خصوصیات متفاوت می‌باشند مورد بررسی قرار داده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

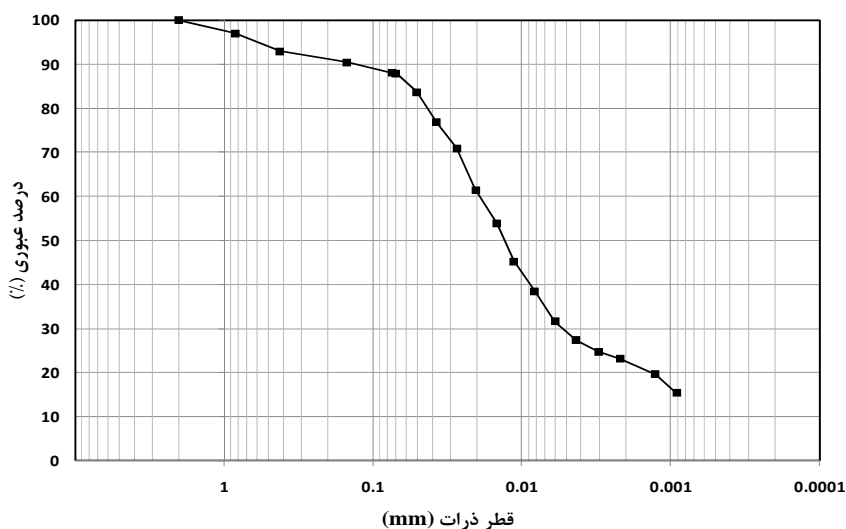
مشخصات مصالح

خاک رس :

جهت انجام این تحقیق از یک نوع خاک رس با پلاستیسیته پایین (CL) برای ساخت مدل‌های آزمایشگاهی پی استفاده گردید. درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ در این خاک ۸۹٪ می‌باشد. سایر مشخصات این خاک به شرح زیر است :

$$LL=36\% \quad PI=17\% \quad G_s=2.68$$

منحنی دانه بندی مصالح ریزدانه با انجام آزمایشات دانه بندی مکانیکی و هیدرومتری مطابق شکل-۱ تعیین گردید.



شکل ۱- منحنی دانه بندی خاک رس

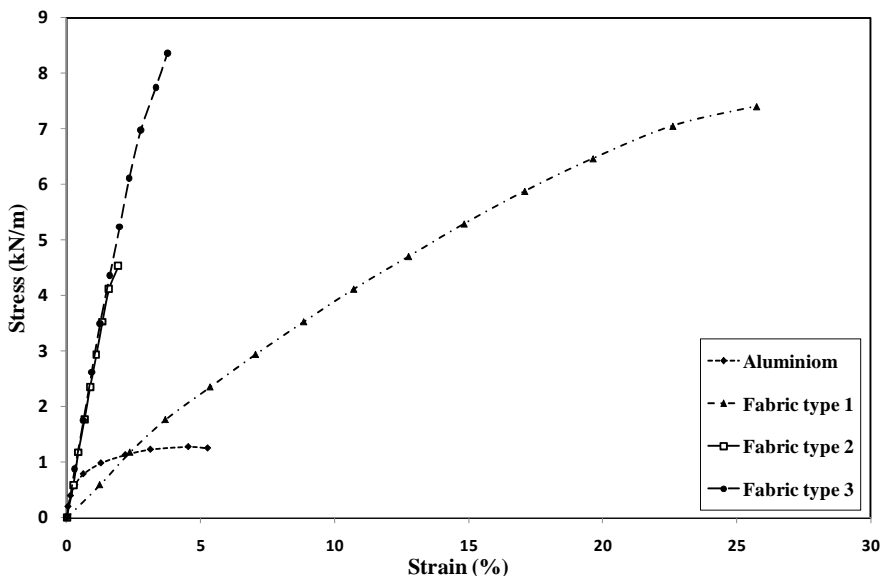
المانهای تسلیج:

جهت تسلیج مدل‌های آزمایشگاهی از چهار نوع المان متفاوت استفاده شده است که مشخصات آنها در جدول-۱ و منحنی‌های تنش-کرنش آنها در شکل-۲ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات المانهای مسلح کننده خاک

جنس	شکل ظاهری	مدول الاستیسیته (kN/m)	مقاومت کششی (kN/m)	نسبت سطح	نوع المان تسلیج
آلومینیوم	صفحه ای براق	۲۷۰	۱/۳۵	۱	فلزی
پلیمر	صفحه ای زبر	۳۲/۳	۷/۶	۱	فابریک نوع ۱
الیاف شیشه	شبکه ای ۲×۲ میلیمتر	۲۶۳	۴/۶	۰/۷۵	فابریک نوع ۲
الیاف شیشه	شبکه ای ۴×۴ میلیمتر	۲۷۴	۷/۸	۰/۵۶	فابریک نوع ۳

در جدول فوق نسبت سطح اینگونه تعریف می‌گردد : نسبت سطحی که توسط المان پوشانده می‌شود به سطح کل تسلیج.



شکل ۲- منحنی های تنش- کرنش المانهای تسلیح در آزمایش کشش عرضی

مطالعات آزمایشگاهی

آزمایشات ظرفیت باربری شامل دو بخش می باشند. بخش اول آزمایشات جهت تعیین عمق بهینه المانها و بخش دوم جهت تعیین شکل ظاهری بهینه المانهای تسلیح انجام شدند که این آزمایشات هدف اصلی این تحقیق محسوب می گردند. آزمایشات بخش دوم با قرار دادن المانهای تسلیح در عمق بهینه انجام شدند.

آزمایشات بر روی نمونه های خاک در داخل قالب استوانه ای به قطر ۱۵ سانتی متر و ارتفاع ۱۵ سانتی متر که توسط صفحه صلب دایره ای به قطر ۳/۷ سانتی متر تحت بار قرار می گیرد، انجام شده است. ابعاد قالب و صفحه بارگذاری به گونه ای انتخاب شده است که قطر و ارتفاع نمونه ها طبق نتایج آزمایشات شین و همکاران (۱۹۹۳) حداقل ۴ برابر بعد پی گردد تا اینکه از تاثیر شرایط مرزی تا حد ممکن کاسته شود. نمونه های خاک در درصد رطوبت ۲۴٪ ساخته می شوند. که این رطوبت بالاتر از حد خمیری مصالح (PL=19%) می باشد. آزمایشات در حالت کنترل کرنش و با نرخ ۱/۵ میلی متر بر دقیقه انجام شدند. با توجه به شرایط فوق می توان آزمایشات را در حالت زهکشی نشده فرض نمود.

برای ساخت نمونه های مدل پی ابتدا در یک ظرف با حجم مشخص مقداری مصالح ریزدانه اشباع که رطوبت آن $W=24\%$ است، قرار داده و با فشردن خاک چسبنده لایه های نازک مصالح را به گونه ای پخش می کنیم که تا حد ممکن حباب های هوا از مصالح خارج گردد. در نهایت پس از پر شدن ظرف با توزین مصالح، وزن مخصوص اشباع آنرا محاسبه می نماییم. این وزن مخصوصی است که تمامی نمونه ها بر اساس آن ساخته شده اند و مقدار آن برابر با ۱/۹۱ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. برای ساخت نمونه ها با توجه به وزن مخصوص تعیین شده وزن مصالح مورد نظر برای پر کردن قالب آزمایش را محاسبه نموده و آن را به سه قسمت مساوی تقسیم می نماییم. با قرار دادن هر قسمت از مصالح درون جعبه آزمایش آنرا زیر دستگاه پرس قرار می دهیم تا اینکه ضخامت مصالح یک سوم ارتفاع سیلندر (۵ سانتی متر) گردد. این کار تا پر شدن سیلندر آزمایش ادامه می یابد. به این ترتیب نمونه ها با درصد تراکم یکسان ساخته می شوند.

در این تحقیق تمام نمونه ها بوسیله یک لایه المان مسلح کننده به عرض ۴ برابر عرض شالوده ساخته می شوند که این مقدار عرض مسلح کننده ها براساس آزمایشات شین و همکاران (۱۹۹۳) عرض بهینه مسلح کنند ها جهت تسلیح خاک های چسبنده در زیر پی ها می باشد.

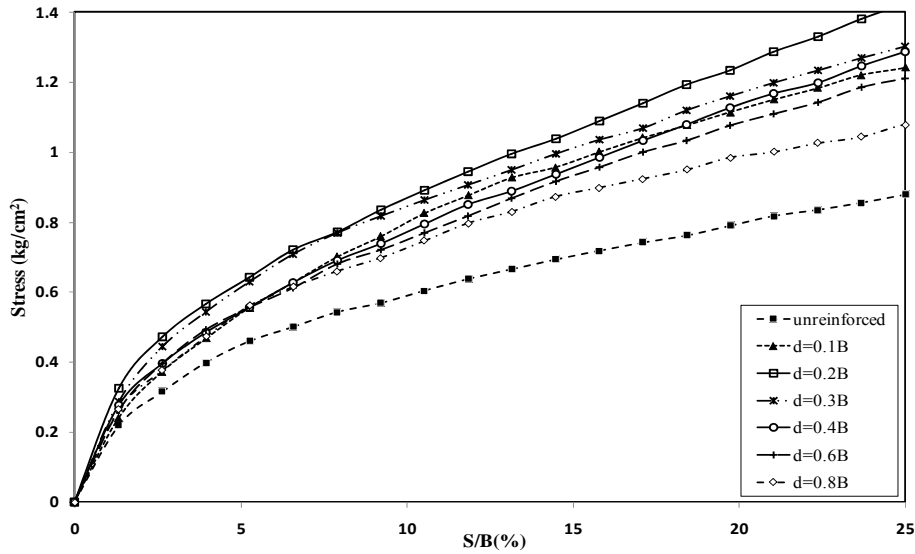
- بخش اول آزمایشات:

همانطور که قبلا گفته شد بخش اول آزمایشات جهت تعیین عمق بهینه قرارگیری المانهای تسلیح انجام شدند. این آزمایشات شامل هفت سری آزمایش ظرفیت باربری پی های مدل می باشد بر روی پی های مسلح با فابریک نوع ۱ انجام شدند. جزئیات این آزمایشات در جدول ۲- آورده شده است.

جدول ۲- جزئیات آزمایشات بخش اول

شماره آزمایش	۱-۱	۲-۱	۳-۱	۴-۱	۵-۱	۶-۱	۷-۱
عمق قرارگیری المانها (d/B)	غیر مسلح	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۶	۰/۸

نتیجه آزمایشات انجام شده در این بخش به صورت منحنی های تنش-نشست پی مدل در شکل-۳ آورده شده است.

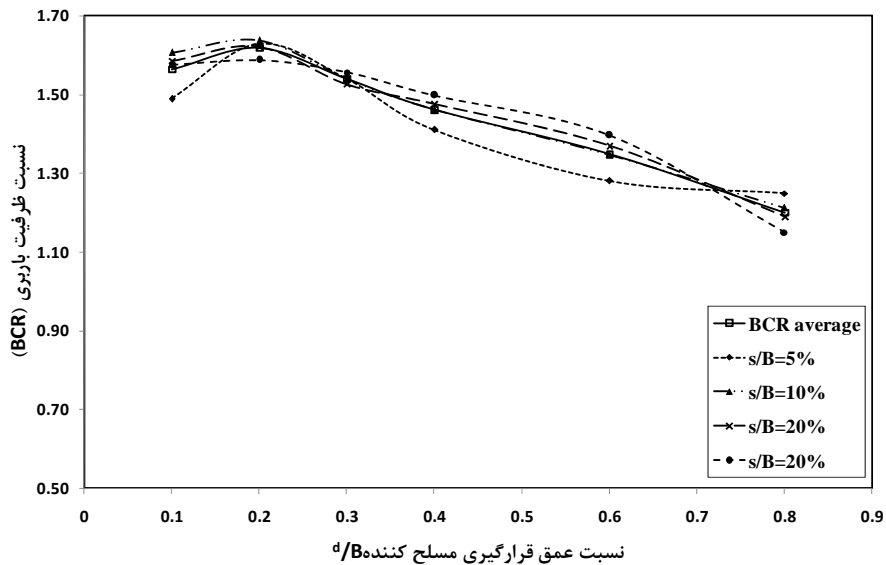


شکل ۳- تغییرات باربری خاک رس مسلح شده با فابریک ۱ بر حسب نسبت نشست برای مقادیر مختلف نسبت عمق قرارگیری المان

بعد از انجام هر آزمایش، یک نمونه دست نخورده جهت آزمایش تک محوری از انتهای قالب گرفته شد. در نهایت بهبود حاصل شده در اثر تسلیح بوسیله پارامتر بدون بعد نسبت ظرفیت باربری (BCR) بیان گردید که این پارامتر به صورت زیر تعریف می گردد:

$$BCR = \frac{\text{ظرفیت باربری پی مدل در حالت مسلح}}{\text{ظرفیت باربری پی مدل در حالت غیر مسلح}} \quad (1)$$

در این بخش جهت نشان دادن بهبود حاصل شده در ظرفیت باربری پی های مدل مقدار BCR در نشست های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد بعد پی را محاسبه نموده و در نمودار ترسیم می گردند، مطابق شکل-۴ عمق بهینه قرارگیری المان تعیین می گردد. همانطور که در شکل-۴ مشاهده می شود با افزایش عمق المان ظرفیت باربری افزوده می گردد تا اینکه به عمق بهینه می رسد. سپس با افزایش عمق اثر تسلیح کاهش می یابد.



شکل ۴- تغییرات نسبت ظرفیت باربری بر حسب نسبت عمق قرارگیری المان تسلیح



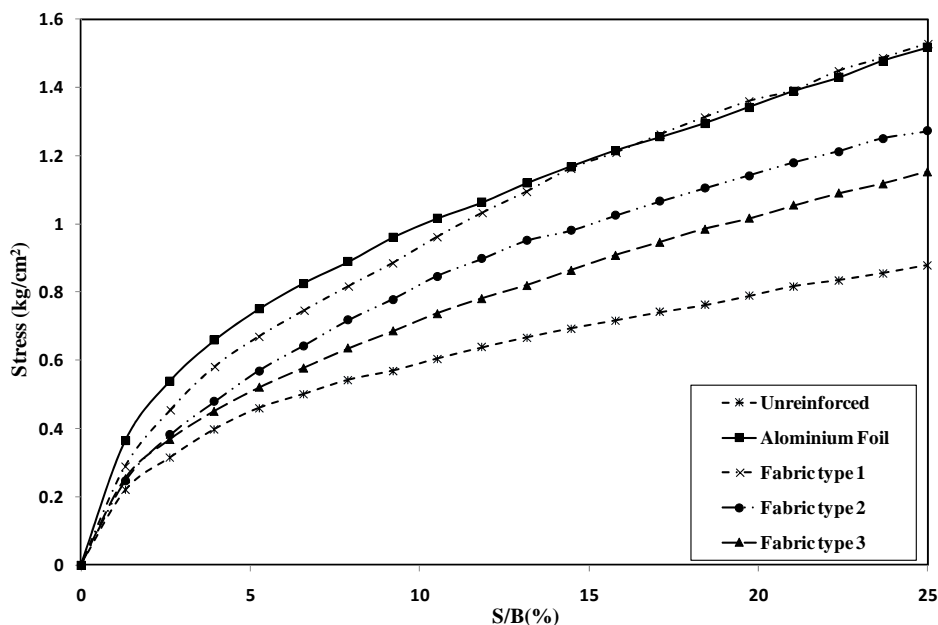
بخش دوم آزمایشات:

بخش دوم آزمایشات این تحقیق شامل ۵ سری آزمایش ظرفیت باربری نمونه‌های پی مدل می‌باشد. در این قسمت المانهای تسلیح مختلف در عمق ثابت ۰/۲ بعد پی بر اساس نتایج بخش قبل قرار گرفته و میزان بهبود حاصل شده در ظرفیت باربری برای المانهای مختلف تسلیح تعیین گردید. جزئیات آزمایشات انجام شده در این بخش در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- جزئیات آزمایشات بخش دوم

شماره آزمایش	۱-۲	۲-۲	۳-۲	۴-۲	۵-۲
نوع المان تسلیح	---	فلزی	فابریک ۱	فابریک ۲	فابریک ۳

نتایج آزمایشات انجام شده در این بخش بصورت منحنی های ظرفیت باربری-نشست پی مدل در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵- تغییرات باربری خاک رس مسلح شده با المانهای متفاوت بر حسب نسبت نشست خاک

در نهایت مقدار نسبت ظرفیت باربری همانگونه که در بخش قبل توضیح داده شد برای هر یک از المانهای تسلیح محاسبه شده و در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- مقدار بهبود حاصل شده در ظرفیت باربری پی مسلح با المانهای مختلف برای نسبت نشست خاک از ۵٪ الی ۲۰٪

میانگین	BCR				نوع المان تسلیح
	$s/B=20\%$	$s/B=15\%$	$s/B=10\%$	$s/B=5\%$	
۱/۶۸	۱/۷۱	۱/۶۹	۱/۶۹	۱/۶۲	فلزی
۱/۶۲	۱/۷۳	۱/۶۹	۱/۵۸	۱/۴۷	فابریک نوع ۱
۱/۳۷	۱/۴۶	۱/۴۳	۱/۳۷	۱/۲۲	فابریک نوع ۲
۱/۲۳	۱/۲۹	۱/۲۶	۱/۲۲	۱/۱۳	فابریک نوع ۳

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌گردد المانهای تسلیح با سطح صاف و یکدست همانند المان فلزی ورق آلومینیومی نسبت به المانهای دیگر بیشترین تاثیر را در تسلیح نشان داده است. همانطور که می‌دانیم در خاک رس در حالت زهکشی نشده زاویه اصطکاک تقریباً صفر است و مقاومت برشی در این حالت با چسبندگی (S_u) تامین می‌گردد. پس سطح تماس خاک و المان تسلیح عامل مهمی در بسیج مقاومت لغزشی خواهد بود. از



جدول ۱- مشاهده می‌گردد که نسبت سطح هر دوی المان‌های فلزی و فابریک نوع ۱ برابر یک است اما سختی آلومینیوم بیشتر از فابریک نوع ۱ می‌باشد به همین دلیل آلومینیوم مطابق شکل ۵- و جدول ۴- در سطوح اولیه نشست بهبود بیشتری در باربری ایجاد نموده است چراکه المان در این سطوح نشست هنوز به لغزش نیافتاده است و سختی المان یک عامل تعیین کننده خواهد بود اما در نشست زیاد پی که هر دو المان آلومینیوم و فابریک نوع ۱ به لغزش می‌افتند تاثیر فابریک نوع ۱ بیشتر خواهد شد چون سطح زبرتری دارد.

با مقایسه بهبود حاصل شده در ظرفیت باربری پی‌های مسلح شده با فابریک های نوع ۲ و ۳ مشاهده می‌گردد که در فابریک نوع ۱ با وجود سختی کمتر، در مقایسه با سایر فابریک‌ها بهبود ظرفیت باربری بیشتری حاصل شده است که این امر نشان دهنده این مطلب است که به دلیل لغزش المانها در کرنش‌های پایین سختی المانها در این آزمایشات سهم تعیین کننده‌ای ندارد و هرچه نسبت سطح افزایش یابد به دلیل ذکر شده در بند فوق تاثیر تسلیح بیشتر خواهد شد.

نتیجه گیری

در این مطالعه تعدادی آزمایشات ظرفیت باربری بر روی پی های مدل سیلندری که توسط مصالح ریزدانه رسی اشباع ساخته و توسط المانهای مختلف تسلیح شده بودند، انجام گردید. بارگذاری در این آزمایشات توسط یک صفحه صلب دایره ای و در حالت زهکشی نشده انجام شد. نتایج آزمایشات انجام شده نشان می‌دهد که:

الف) با افزایش عمق قرارگیری المان تا عمق ۰/۲ بعد پی ظرفیت باربری پی مدل افزایش یافته و در اعماق بیشتر ظرفیت باربری کاهش می‌یابد.
ب) به منظور تسلیح خاک چسبنده هر چه نسبت سطح المان تسلیح بیشتر باشد کارایی بیشتری حاصل می‌شود به همین دلیل بهترین نوع المان تسلیح برای خاکهای چسبنده، مسلح کننده های صفحه‌ای شکل مانند ژئوتکستایل‌ها هستند و المانهای تسلیح شبکه‌ای، مانند ژئوگریدها کارایی کمتری دارند.

ج) در خاکهای چسبنده در حالتی که نسبت سطح دو المان تسلیح با هم برابر باشد، المانی که سختی بیشتری دارد در سطوح نشست کم، و المانی که سطح زبرتری دارد در سطوح نشست بالای پی کارایی بیشتری خواهد داشت.

مراجع

1. Ingold T. S., Miller K. S. (1982) "Analytical and laboratory investigations of reinforced clay", *Proc. of the Second Int. Conf. on Geotextiles*, Las Vegas, **3**, 587-592.
2. Milligan G. W. E., Love J. P. (1984) "Model testing of geogrids under an arrogate layer on soft ground", *Proc. Sym. on polymer grid reinforcement in civil Eng.*, Netlon, London, Paper No. 42.
3. Dawson A., Lee R. (1988) "Full scale foundation trials on grid reinforced clay", *Geotech. Special Publication No. 18*, ASCE, New York, 127-147.
4. Guido V. A., Dong K. G., Sweeny A. (1986) "Comparison of geogrid and geotextile reinforced earth slabs", *Can. Jour. of Geotech. Engrg.* **23**(1), 435-440.
5. Das B. M. (1989) "Foundatin on sand underlain by soft clay with geotextile at sand-clay interface", *Geosynthetic 89th conf.*, San diego, **1**, 203-213.
6. Sah S. H. (1990) "Experimental studies on bearing capacity of geosynthetics reinforced saturated clay", *M. Technology Dissertation*, Bomby.
7. Mandel J. N., Sah S. H. (1992) "Bearing capacity tests on Geogrid-reinforced clay", *Jour. of geotextiles and geomembranes*, **11**, 327-333.
8. Shin E. C., Das B. M., Puri V. K., Cook E. E., Yen S. C. (1993) "Bearing capacity of strip foundation on geogrid reinforced clay", *Geotech. Testing Journal*, ASTM, **16** (4), 534-541.