نشریه علمی
پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران
جلد ۲، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۴، صص ۸۹ الی ۹۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۲/۱۹
تاریخ تصویب مقاله: ۱۳۹۴/۶/۳۰
پایگاه نشریه: http://jerce.srttu.edu

بررسی آزمایشگاهی سختی و نشست بستر ماسه‌ای مسلح شده با شرایط پاکت نرم تحت پی مستطیلی

رسول افشون[۱*]، شیوا حیدری[۲] و سید مهدی ابطحی[۳]
[۱] **کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک**، دانشگاه صنعتی اصفهان
[۲] **دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران**، دانشگاه علمی کاربردی میبد
[۳] **دانشیار، دانشکده مهندسی عمران**، دانشگاه صنعتی اصفهان
r.afshon@cc.iut.ac.ir

چکیده: هدف از این تحقیق بررسی نشست و سختی بستر ماسه‌ای شامل پاکت نرم، تحت پی مدل مستطیلی می‌باشد. در این تحقیق ابتدا آزمایش‌ها روی پی مدل مستقر بر بستر ماسه‌ای انجام گرفت. سپس جهت ایجاد شرایط پاکت نرم، المان فوم در موقعیت از پیش تعیین شده قرار گرفت. موقعیت فوم از کف‌پی و ابعاد فوم به عنوان متغیر مورد بررسی واقع شدند. نتایج نشان داد که برای ایجاد شرایط پاکت نرم، فوم به عرض B (Bمعرف عرض پی) در عمق ۲B از کف پی، شرایط را ایفا می‌کند و همچنین وجود پاکت نرم باعث افزایش نشست پی و کاهش سختی و ظرفیت باربری پی می‌شود. در ادامه، ابتدا المان فوم در بستر گنجانده شد و سپس المان‌های تسلیح در بالای موقعیت فوم قرار گرفتند و بارگذاری پی انجام شد. از منحنی‌های بار-نشست بدست آمده، ظرفیت باربری، سختی و نشست بستر استخراج شدند. مقادیر بهینه المان‌های تسلیح جهت رسیدن به بیشینه ظرفیت بدست آمدند. نتایج نشان دادند که افزودن المان‌های تسلیح، باعث افزایش ظرفیت باربری و سختی و باعث کاهش نشست پی می‌شود.

کلمات کلیدی: ظرفیت باربری، سختی خاک، نشست پی، بستر مسلح، پاکت نرم، فوم.

Stiffness and Settlement Experimental Study of Reinforced Sand Bed Including Soft Pocket under Rectangular Model Footing

R. Afshoon, SH. Heidari and S.M. Abtahi

Abstract: The aim of this study is to investigate the settlement and stiffness of reinforced sand bed including soft pocket under rectangular model footing. The experiment initially was conducted on the model footing rested on sand bed. Then foam element was inserted in preset position for providing soft pocket condition. The foam distance from footing beneath, and the foam dimensions were examined as variable parameters. Results show that foam with B width create soft pocket condition at 2B distance of footing base and existence of soft pocket increase the footing settlement and decrease the stiffness and bearing capacity of foundation. By progressing the tests, the foam element was initially positioned in the sand bed and then the reinforcing elements were rested at the top of foam continued by loading the model footing. The bearing capacity, stiffness and settlement of sand bed were extracted from the load-settlement curves. The optimum values of reinforcing elements were obtained for reaching the ultimate bearing capacity. Results revealed that adding of reinforcement increased the bearing capacity and stiffness and decreased the settlement of foundation.

Keywords: *B*earing Capacity, Stiffness, Settlement, Reinforced bed, Soft Pocket, Foam.

۱ - مقدمه

از زمان گذشته تا به حال محققین به دنبال راهکارهایی جهت بهبود باربری خاک بوده‌اند. به مرور از محصولات ژئوسنتتیکی، از جمله ژئوگریدها به عنوان مصالحی برای تسلیح خاک استفاده شد. مندال و ساه [۱]، دس و خینگ [۲]، شین و دس [۳] و داس و ماجی [۴]ظرفیت باربری پی سطحی واقع بر بستر مسلح به ژئوگرید را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که پی مستقر بر بستر مسلح می‌تواند بار بیشتری نسبت به حالت مسلح نشده تحمل کند. مشابه همین کارها که روی خاک لایه ای انجام شد می‌توان به مطالعات انجام شده توسط خینگ و همکاران [۵]، الاواجی و همکاران [۶]، کومار و والیا [۷] و کومار و همکاران [۸] اشاره کرد. نتایج آنها نشان داد که بعد از جایگزینی لایه بالایی خاک با ماسه خوب دانه بندی شده برای بسیج مقاومت اصطکاکی خاک مسلح کننده، افزایش قابل ملاحظه‌ای در ظرفیت باربری حاصل شد. پاترا و همکاران [۹] و ساداقلو و همکاران [۱۰] اثر خروج از مرکزیت بار روی ظرفیت باربری پی سطحی واقع بر بستر مسلح را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که مشارکت مسلح کننده با افزایش خروج از مرکزیت بار کاهش می‌یابد. سیریش و همکاران [۱۱] و محمد [۱۲] ظرفیت باربری پی سطحی واقع بر خاک لایه‌ای حفره‌دار را بررسی کردند. آنها دریافتند که وجود پاکت نرم اثر مهمی در کاهش باربری خاک در مقابل بارهای سطحی دارد و گسیختگی بستر ماسه شل مسلح شامل پاکت نرم عمدتا بخاطر گسیختگی برش موضعی می‌باشد. در تحقیقات انجام شده روی ظرفیت باربری پی واقع بر بستر مسلح، از عناصر تسلیح مختلف از جمله ژئوسل، الیاف بافته شده، ژئوتکستایل و لاستیک فرسوده نیز برای تسلیح بستر استفاده شده است. از جمله مطالعات انجام شده روی ظرفیت باربری پی واقع بر بستر مسلح به ژئوسل، مندال و گوپتا [۱۳]، داش و همکاران [۱۴]، کومار و همکاران [۱۵]، سیتهارام و همکاران [۱۶]، پخارل و همکاران [۱۷] و تفرشی و داوسون [۱۸] می‌باشد، نتایج این تحقیقات نشان دهنده بهبود بیشتر ظرفیت باربری پی در برابر سایر مسلح کننده ها می‌باشد. در سال‌های اخیر ظرفیت باربری پی واقع بر بستر مسلح تحت بار دوره‌ای نیز مورد بررسی واقع شده است که مطالعات انجام شده توسط الصواف و نظیر [۱۹]، الصواف و همکاران [۲۰] در این زمینه می‌باشد، در این تحقیقات برای تعداد سیکل های مشابه بار، با افزایش سطح بار استاتیک اولیه نشست پی افزایش می‌یابد و نشست تجمعی با افزایش تعداد دوره‌های بار به صورت نرخ کاهشی تدریجی، افزایش می‌یابد. تاکنون توجه کمی به خاک‌هایی شده است که تغییرات محلی در شرایط سطحی، منجر به بوجود آمدن پاکت نرم (ناحیه نرم) یا حفره شده است. این شرایط در نتیجه فعالیت‌های طبیعی یا فعالیت‌های دستکاری شده بشر به وجود می‌آیند و اغلب در محل‌های ساخت و اجرا رخ می‌دهند. نمونه‌هایی از فعالیت‌های بشر، نظارت و اجرای ضعیف مهندسی در پر کردن حفره‌ها و ترانشه‌ها و همچنین متغیر بودن تراکم لایه‌های خاکریزی شده، می‌باشد. فعالیت‌های طبیعی بوجود آورنده شرایط پاکت نرم، می‌تواند در خاک‌های دست نخورده در قالب شاخه (توپی) خاک رس نرم گذرنده از کمربند پر پیچ و خم شنی باشد. همچنین در مناطق گرمسیری، شسته شدن و رسوب ذرات رس به علت تراوش آب نیز از موارد دیگر ایجاد پاکت نرم می‌باشد. در این تحقیق از ژئوگرید (توری پلیمری) به عنوان تسلیح و از فوم جهت شبیه سازی پاکت نرم استفاده گردید. هدف از این تحقیق بهبود شرایط بستر شامل پاکت نرم، افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست می‌باشد.

۱- مواد و مصالح

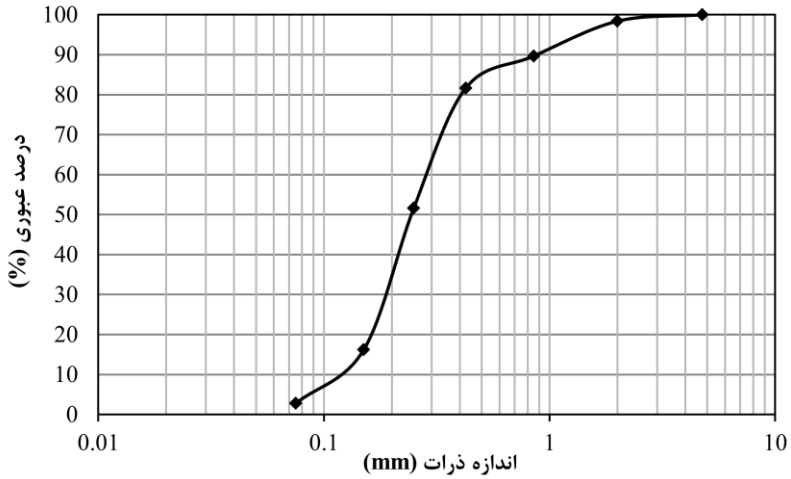
۱-۱- ماسه

مشخصات ماسه استفاده شده در این تحقیق بر اساس استانداردهایASTM در آزمایشگاه تعیین و در جدول ۱ خلاصه گردید. طبق سیستم طبقه‌بندی متحد، چون درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ کمتر از ۵۰٪، پس خاک درشت دانه می‌باشد و چون درصد عبوری از الک شماره ۴ بیش از ۵۰٪ است، خاک از نوع ماسه‌ای است. همچنین درصد رد شده از الک ۲۰۰ کمتر از ۵٪ و $C_u < 6$ است، بر اساس طبقه بندی USCS از نوع SP می‌باشد. منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱: پی مدل مستطیلی

جدول ۱: مشخصات ماسه

نوع خاک	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_C	C_u	G_s	$\gamma_{d(max)}(gr/cm^3)$	$\gamma_{d(min)}(gr/cm^3)$
SP	۰/۲۸	۰/۳	۰/۴	۰/۸	۱/۴۳	۲/۶۹	۱/۸۲	۱/۵۵



شکل ۱: منحنی دانه بندی ماسه

۱-۲- پی مدل

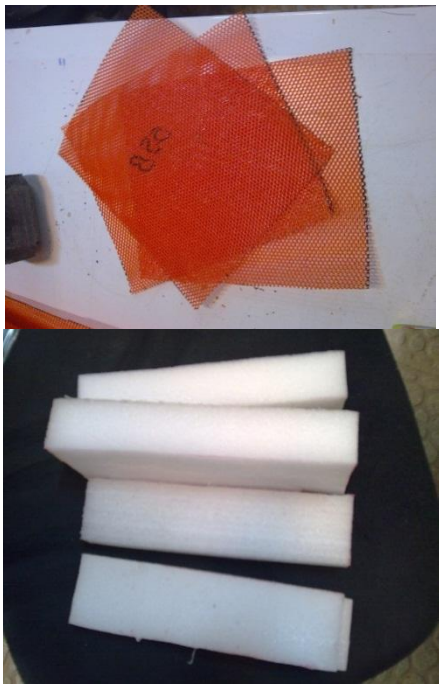
پی مدل فیزیکی به کار رفته در تست‌های مدل، از نوع مستطیلی و از جنس فولاد به ابعاد ۲/۵×۵×۲۵ سانتیمتر بود. کف پی برای ایجاد اصطکاک و جلوگیری از لغزش بین خاک و پی در حین آزمایش، چسب کاری و در ماسه غلتانده شد. برای ایجاد شرایط بار قائم متمرکز، حفره‌ای به شکل نیم‌کره در مرکز پی ایجاد گردید. یک ساچمه در حفره‌ی ایجاد شده قرار گرفت، سپس بار از طریق محور دستگاه که مقطع آن دایره ای به قطر ۵ سانتی متر بود به ساچمه و از ساچمه به پی انتقال یافت.

۱-۳- ژئوگرید و فوم

با توجه به اثرات مقیاس از توری به ابعاد چشمه ۳mm×۳mm و مقاومت کششی نهایی ۴kN/m در کرنش گسیختگی نهایی ۵۵٪ به عنوان ژئوگرید برای تسلیح بستر ماسه ای استفاده شد. برای ایجاد شرایط پاکت نرم از فوم پلی اتیلن EPE با استحکام کششی ۰/۲ Mpa و دانسیته ۲۵kg/cm^3 استفاده گردید (شکل ۳). جدول ۲ مشخصات فوم را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات فوم پلی‌اتیلن

مشخصات	واحد	فوم EPE
دانسیته	kg/m^3	۲۵
میزان جذب آب	kg/m^2	۰/۱۰۷
استحکام کششی	Mpa	۰/۲
افزایش طول	%	۷۵



شکل ۲۱: فوم پلی اتیلن و ژئوگرید مدل به کار رفته در آزمایش‌ها

۱-۴- جعبه آزمایش و سیستم بارگذاری

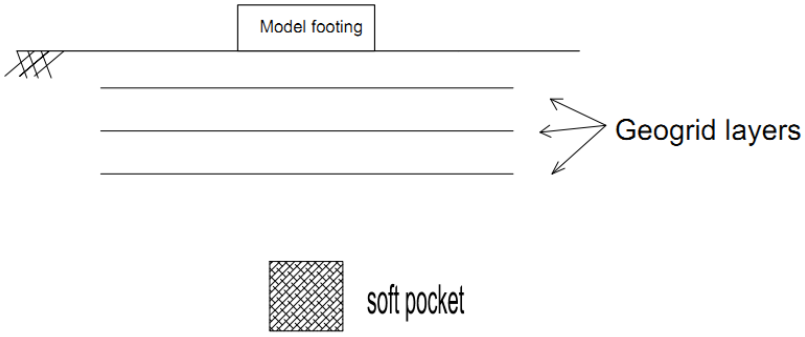
جعبه آزمایش داری ابعاد داخلی ۲۵×۳۰×۴۰ سانتیمتر بود. چهارچوب جعبه از یک سری نبشی و تسمه‌های فولادی به هم جوش خورده جهت ایجاد استحکام کافی تشکیل شده بود. دیواره ها به منظور مشاهده تغییرات ایجاد شده در بستر، از جنس شیشه انتخاب شدند. بارگذاری پی توسط جک هیدرولیکی یک طرفه مربوط به آزمایش CBR (نسبت باربری کالیفرنیا) انجام گرفت. این دستگاه شامل یک قاب فلزی متشکل از دو ستون و یک دیسک متحرک می‌باشد. با روشن نمودن دستگاه، دیسک فلزی از پایین به بالا حرکت می‌کند. نیرو توسط دستگاه دیجیتال واقع در بالای قاب فلزی اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۴ نحوه استقرار جعبه آزمایش بر دستگاه بارگذاری را نشان می‌دهد.

۲- نحوه ساخت مدل و انجام آزمایش

سه سری تست آزمایشگاهی جهت بدست آوردن ظرفیت باربری بیشینه انجام شد. در سری اول پی بر بستر ماسه‌ای بدون فوم و ژئوگرید استقرار یافت.

شکل ۱۲: جعبه آزمایش و دستگاه CBR

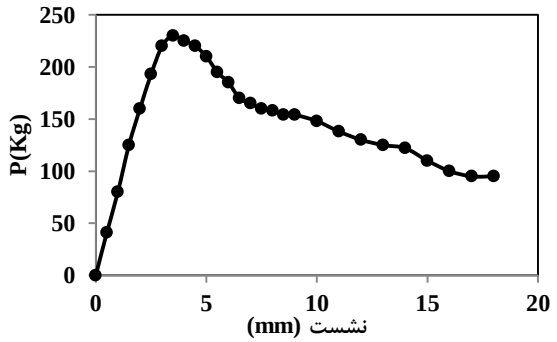
در سری دوم پی بر بستر ماسه‌ای که فقط شامل فوم بود مستقر گردید و در سری سوم بر بستر ماسه‌ای که شامل فوم و ژئوگرید بود، مستقر شد. ظرفیت باربری بدست آمده در سری اول به عنوان مبنای ظرفیت باربری جهت مقایسه با نتایج بدست آمده در تست‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت. با بدست آوردن شیب قسمت اول (ناحیه خطی) منحنی بار-نشست، سختی بستر محاسبه گردید. جهت ساخت نمونه آزمایش، ابتدا ماسه به روش بارانی در جعبه ریخته شد و برای رسیدن به دانسیته مورد نظر تحت کوبش قرار گرفت. زمانی که در لایه مورد نظر فوم قرار داشت ابتدا فوم بر سطح لایه مستقر گردید و سپس خاک در اطراف و روی فوم ریخته شد و تحت کوبش قرار گرفت. بعد از کوبش چند لایه و رسیدن به لایه‌ای که می‌بایست مسلح شود، ژئوگرید بر سطح لایه قرار داده شد و روی آن توسط خاک پوشانده و متراکم گردید. در نهایت پی مدل بر سطح خاک مستقر و آماده بارگذاری گردید. شکل ۵ نحوه قرارگیری المان های تسلیح و فوم در بستر ماسه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۵: نحوه قرارگیری فوم و المان‌های تسلیح در بستر

۳- بستر ماسه‌ای در حالت طبیعی

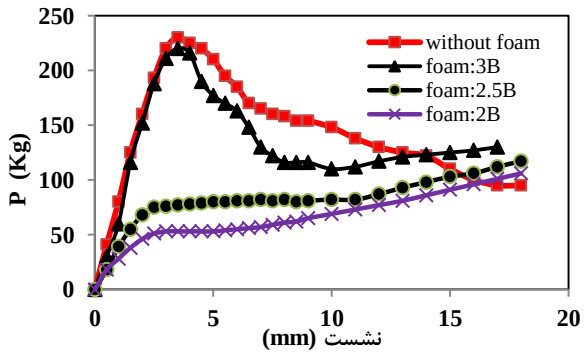
در این سری در واقع یک تست ظرفیت باربری در ترکم ۷۰٪ با سه تکرار انجام شد و متوسط سه نتیجه به صورت منحنی ارائه گردید. به دلیل اینکه نتیجه این آزمایش به عنوان مبنای مقایسه تست های دیگر مورد استفاده واقع می‌شود، به عنوان سری اول آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. شکل۶ منحنی بار-نشست پی واقع بر بستر ماسه‌ای را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می شود بیشینه بار قابل تحمل برای بستر مورد نظر ۲۳۰kg می‌باشد یا به عبارت دیگر ظرفیت باربری بیشینه۱۸۴kPa (با تقسیم بار بر سطح پی) می‌باشد. با توجه به شیب خطی قسمت اول منحنی، با تقسیم بار بر نشست مربوطه سختی خاک (مدول مماسیE) بدست می‌آید. مقدارسختی خاک ۷۵۲۰kPa می‌باشد که به عنوان سختی پایه در حالت مسلح نشده در نظر گرفته شد و با سختی به دست آمده در حالات مسلح مقایسه گردید.



شکل ۶: منحنی بار-نشست پی مدل نواری

۴- بررسی اثر فوم

در این سری برای ایجاد شرایط پاکت نرم در بستر، از فوم با ابعاد متغیر استفاده شد. ابعاد اولیه فوم برابر با عرض پی (B=۵cm) در نظر گرفته شد(فوم به ابعاد ۵cm×۵cm) و در فواصل مختلف از کف پی قرار گرفت. منحنی بار-نشست بدست آمده از این آزمایش ها در شکل۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل، زمانی که فوم در فاصله ۳B از کف پی قرار دارد، منحنی بار-نشست مربوطه ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. در نتیجه گسیختگی پی از نوع گسیختگی برش کلی می‌باشد. زمانی که فاصله فوم کاهش داده می‌شود و به ۲/۵B و ۲B می‌رسد، رفتار منحنی تغییر می‌کند و هیچ بیشینه باری در منحنی مشاهده نمی‌گردد. در نتیجه گسیختگی پی در این دو حالت از نوع گسیختگی برش پانچ می‌باشد. برای ایجاد شرایط پاکت نرم، باید گسیختگی بستر از نوع برش پانچ باشد. به دلیل اینکه در فاصله ۲B، گسیختگی بستر از نوع برش پانچ بوده و در یک نشست معین کمترین مقدار بار در این منحنی مشاهده می‌گردد، فاصله فوم از کف پی جهت ایجاد شرایط پاکت نرم ۲B در نظر گرفته شد.

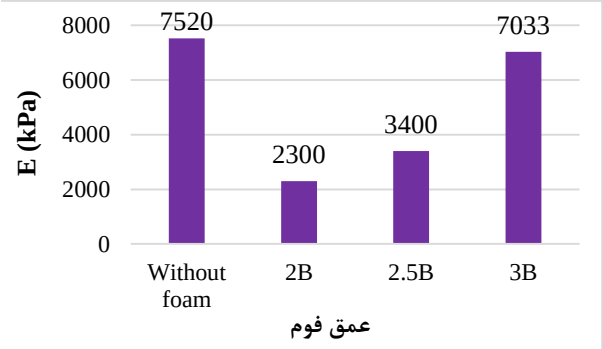


شکل ۷: فوم به عرضB در اعماق مختلف از کف پی

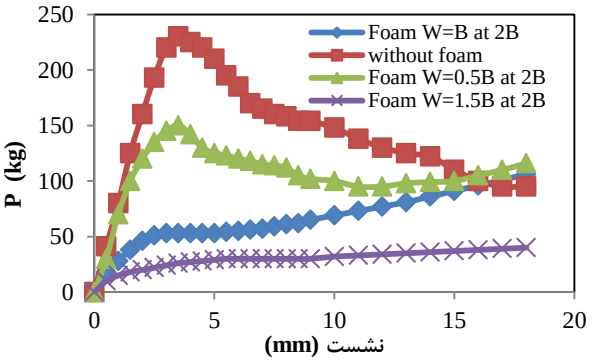
شیب قسمت خطی منحنی‌های بار- نشست مربوط به شکل ۷ محاسبه گردید و به صورت نمودار میله‌ای در شکل ۸ نشان داده شد. شیب قسمت خطی منحنی‌ها به عنوان سختی خاک در نظر گرفته شد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین سختی خاک مربوط به زمانی است که در بستر فوم وجود ندارد. با قرار گیری فوم در فواصل مختلف، سختی خاک کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله فوم از کف پی، اثر فوم از بین رفته و سختی خاک افزایش می‌یابد، در نتیجه اثر وجود پاکت نرم کم می‌شود. بنابراین برای ایجاد شرایط پاکت نرم، فاصله ۲B از کف پی به عنوان بهترین حالت ایجاد شرایط پاکت نرم در نظر گرفته شد.

در مرحله بعد با در نظر گرفتن ۲B به عنوان فاصله فوم از کف پی، عرض فوم از مقدار ۰/۵ تا ۱/۵ برابر عرض پی متغیر بود(شکل۹). با توجه به شکل، زمانی که عرض فوم ۰/۵B می‌باشد، گسیختگی بستر از نوع گسیختگی برش کلی بوده و برای ایجاد شرایط پاکت نرم مناسب نمی‌باشد. با افزایش ابعاد فوم به ۱B و ۱/۵B رفتار منحنی تغییر کرده و گسیختگی بستر از نوع برش پانچ می‌باشد. در نتیجه برای ایجاد شرایط پاکت نرم، مقدار متوسط سه منحنی، یعنی مقدار ۱B(فوم به ابعاد ۱B×۱B) برای ادامه آزمایش‌ها در نظر گرفته شد.

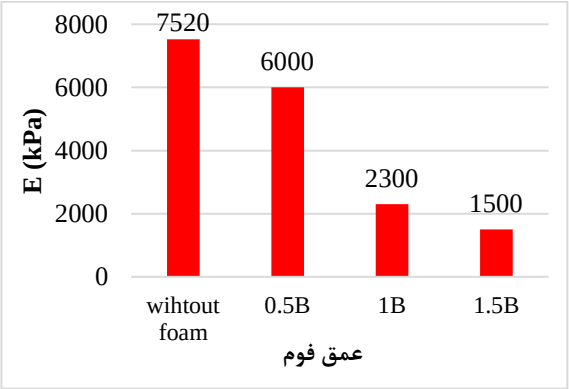
شیب قسمت خطی منحنی‌های بار- نشست مربوط به شکل ۹ محاسبه گردید و به صورت نمودار میله‌ای در شکل ۱۰ نشان داده شد. همانطور که از شکل۱۰ دیده می‌شود، با تغییر عرض فوم از B به ۰/۵B، مقدار سختی خاک افزایش یافته و اثر فوم ناچیز می‌شود. با تغییر عرض فوم به اندازه ۱/۵B، مقدار سختی خاک کاهش می‌یابد که بیانگر وجود فوم و اثر آن می‌باشد. در نتیجه جهت بررسی شرایط وجود پاکت نرم، مقدار متوسط یعنی ۱B انتخاب گردید و فوم با عرض B در فاصله ۲B برای ادامه آزمایش‌ها در نظر گرفته شد.



شکل ۸: سختی بستر ماسه‌ای با وجود فوم به عرضB در اعماق مختلف از کف پی



شکل ۹: فوم با عرض متغیر در عمق ۲B از کف پی



شکل ۱۰: سختی بستر ماسه ای با وجود فوم با عرض متغیر در عمق۲B از کف پی

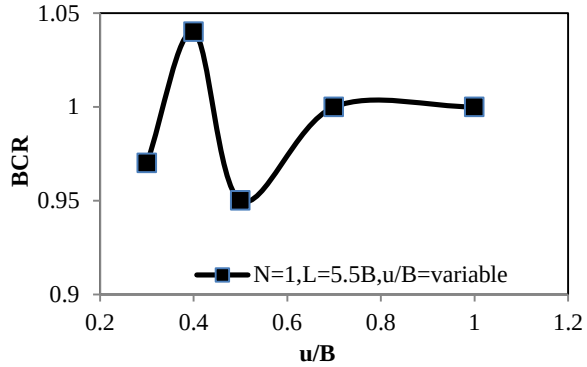
۵- بررسی پارامترهای تسلیح

۵-۱- نسبت فاصله اولین لایه ژئوگرید از کف پی (u/B)

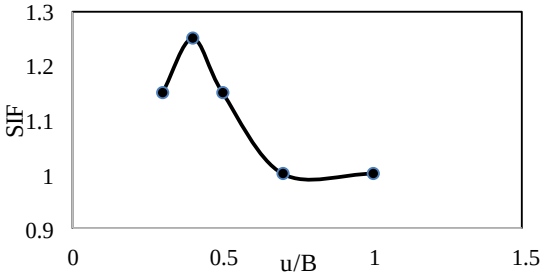
بعد از قرار گیری فوم به ابعادB×B که در فاصله ۲B از کف پی قرار دارد، یک لایه ژئوگرید به طول L=۵/۵B در فواصل مختلف از کف پی و در بالای فوم قرار گرفت. طول اولیه مربوط به یک لایه ژئوگرید با توجه به کارهای گذشتگان (یو و همکاران ۲۰۰۱) L=۵/۵B در نظر گرفته شد. برای فهم بهتر، نتایج به صورت منحنیBCR (BCR: نسبت ظرفیت باربری) در برابر u/B رسم گرید(شکل۱۱). همانطورکه دیده می‌شود بیشترین مقدار ظرفیت باربری در u/B=۰/۴ بدست آمده است.

شکل۱۲ منحنی SIF در برابر u/B های مختلف را نشان می‌دهد. SIF ضریب بهبود سختی می‌باشد که به صورت $SIF=K_{reinforced}/K_{unreinforced}$ تعریف می‌شود که در آن $K_{reinforced}$: سختی بستر ماسه‌ای در حالت مسلح شده و $K_{unreinforced}$: سختی بستر ماسه‌ای در حالت مسلح نشده می‌باشد. با توجه به شکل، ملاحظه می‌شود که با قرارگیری یک لایه ژئوگرید بر بستر ماسه‌ای فوم‌دار، سختی خاک افزایش می‌یابد. با افزایش u/B از ۰/۳ به ۰/۴ مقدار سختی افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته و پس از آن کاهش می‌یابد و در نهایت با افزایش ناچیزی ثابت می‌ماند. بنابراین بیشترین سختی خاک در u/B=۰/۴ مشاهده می‌شود.

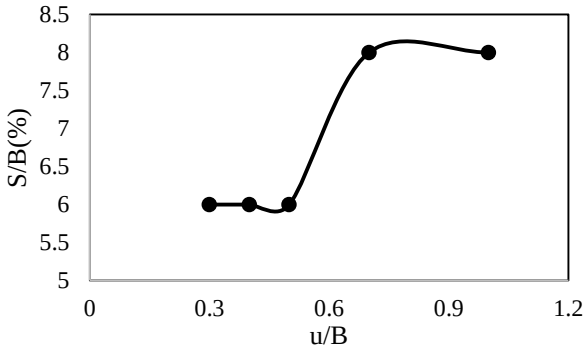
با قرارگیری یک لایه ژئوگرید در بالای فوم، منحنی بار-نشست پی تغییر می‌کند و گسیختگی پی از گسیختگی برش پانچ به سمت گسیختگی برش کلی می‌رود. در نتیجه هر کدام از منحنی‌ها دارای یک مقدار بیشینه بار می‌باشند. مقدار نشست مربوط به بیشترین بار بدست آمده در هر کدام از منحنی ها یادداشت و به عرض پی تقسیم گردید و نسبت نشست بدست آمد. شکل ۱۳ نسبت نشست(S/B) پی را در u/B های مختلف نشان می‌دهد. زمانی که فاصله اولین لایه ژئوگرید از کف پی ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ می‌باشد، مقادیر نشست تقریبا برابر می‌باشد. با افزایش فاصله اولین لایه ژئوگرید از ۰/۵ به ۰/۷ مقدار نشست افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱: منحنی BCR در برابر u/B



شکل ۱۲: منحنی SIF در برابر u/B



شکل ۱۳: منحنی نسبت نشست در برابر u/B

۵-۲-نسبت طول لایه ژئوگرید (L/B)

در این قسمت تست‌ها بر روی خاک ماسه‌ای فوم دار که با یک لایه ژئوگرید مسلح شده بود انجام شدند. موقعیت و اندازه فوم که از تست‌های سری دوم بدست آمد ثابت در نظر گرفته شد و یک لایه ژئوگرید در بالای فوم و در فاصله u=۰/۴B از کف پی قرار گرفت. طول ژئوگرید به عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته شد و از مقدار L/B=۱ تا مقدار L/B=۵/۵ متغیر بود. با افزایش طول لایه ژئوگرید تا مقدار L/B=۴ ظرفیت باربری افزایش یافته و پس از آن افزایش ناچیزی در ظرفیت باربری مشاهده می‌شود. در L/B=۴ مقدار BCR=۱ بدست آمد. در نتیجه با وجود یک لایه

ژئوگرید به طول ۴B (شکل۱۴) ظرفیت باربری بستر ماسه‌ای فوم‌دار به ظرفیت باربری بستر ماسه‌ای بدون فوم رسید.

شکل ۱۵ تغییرات ضریب بهبود سختی را در برابر تغییرات نسبت طول نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سختی بستر با افزایش طول لایه ژئوگرید افزایش می‌یابد و این افزایش تا L/B=۵ همچنان ادامه دارد.

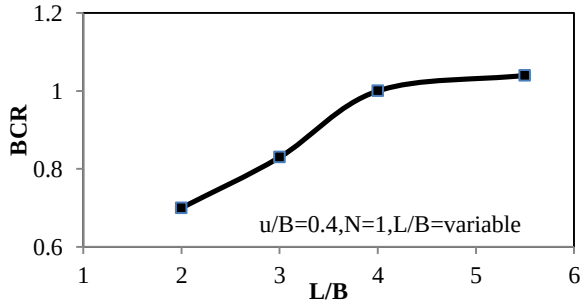
شکل ۱۶ مقدار بار تحمل شده توسط پی مدل واقع بر بستر ماسه‌ای فوم‌دار مسلح شده به یک لایه ژئوگرید با طول‌های مختلف در نسبت نشست ۵٪ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش طول تسلیح، باربری پی همچنان افزایش می‌یابد.

۵-۳- نسبت فاصله بین لایه‌های تسلیح (h/B)

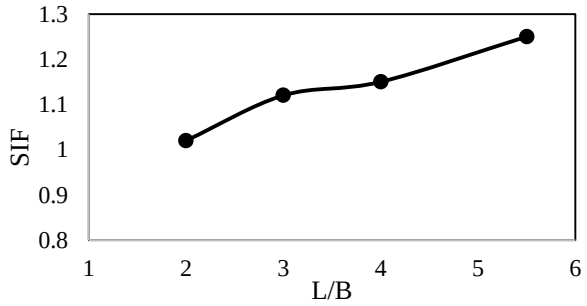
در این قسمت از آزمایش‌ها، بعد از قرارگیری فوم در بستر، دو لایه ژئوگرید با طول مشخص L=۴B در بالای فوم و در زیر پی مستقر شدند. لایه اول در فاصله u/B=۰/۴ از کف پی قرار گرفت و لایه دوم در فواصل مختلف (h/B=۰/۳ تا h/B=۰/۶) از لایه اول قرار گرفت. شکل ۱۷نتایج این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. با افزایش فاصله بین لایه‌ها مقدار ظرفیت باربری کاهش یافت. بیشترین نسبت ظرفیت باربری در h/B=۰/۳ مشاهده گردید، بنابراین بهینه فاصله بین لایه ها ۰/۳B در نظر گرفته شد. نکته قابل توجه این است که با وجود پاکت نرم، دو لایه ژئوگرید باعث بهبود ظرفیت باربری تا مقدار BCR=۱/۵ شد.

با افزایش دو لایه ژئوگرید در بستر فوم دار، سختی خاک افزایش پیدا می‌کند. شکل ۱۸ تغییرات نسبت سختی بستر را در برابر تغییرات فواصل بین دو لایه ژئوگرید را نشان می دهد. با توجه به منحنی مشاهده می‌شود که بیشترین سختی بستر در h/B=۰/۳ حاصل شده است. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فاصله دو لایه، میزان قفل و بست و درگیری خاک بین دو لایه کاهش می یابد و نتیجه آن کاهش سختی خاک می‌باشد.

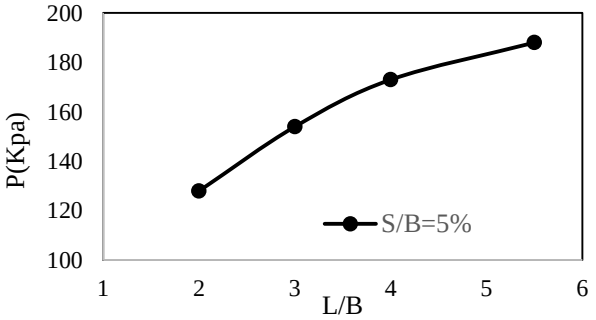
شکل۱۹ نسبت نشست بستر ماسه‌ای فوم دار در برابر h/B های مختلف، در یک بار مشخص را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در یک بار مشخص، کمترین نشست بستر در h/B=۰/۳ رخ می‌دهد. می توان نتیجه گرفت که با افزایش فاصله بین لایه‌ها، سختی خاک کاهش پیدا می‌کند که این کاهش سختی منجر به افزایش نشست بستر ماسه‌ای می‌شود.



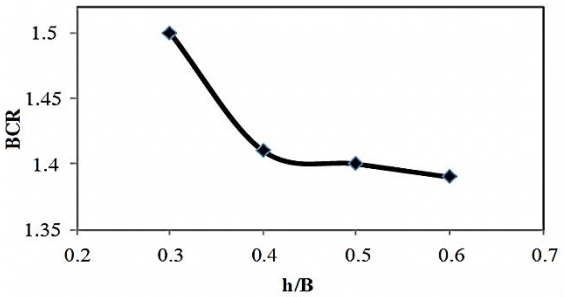
شکل ۱۴: منحنی BCR در برابر L/Bهای مختلف



شکل ۱۵: منحنیSIF در برابر L/B



شکل ۱۶:مقدار ظرفیت باربری پی در نسبت نشست ۵٪ در طول‌های مختلف تسلیح

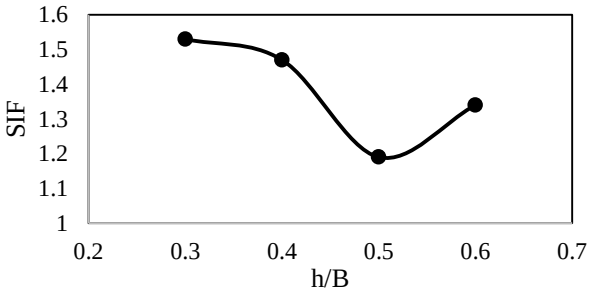


شکل ۱۷: تغییرات نسبت ظرفیت باربری در برابر تغییرات h/B

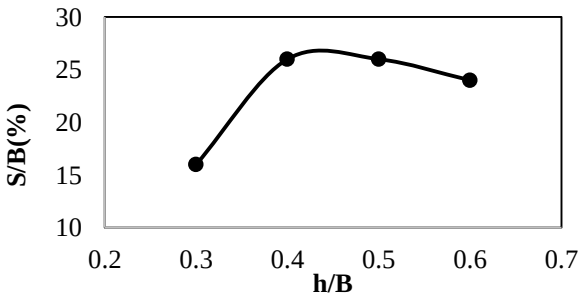
۵-۴- تعداد لایه های ژئوگرید(N)

آخرین آزمایش‌ها با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید انجام شدند. طول لایه‌ها، فاصله اولین لایه و فاصله بین لایه‌ها از تست‌های قبل بدست آمده و ثابت در نظر گرفته شدند. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۲۰ نشان داده شده‌اند. با مراجعه به شکل مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد لایه‌ها تا ۳ لایه، ظرفیت باربری افزایش می‌یابد و پس از آن مقدار افزایش ناچیز می‌باشد. در نتیجه به صورت حدی و در نتیجه اقتصادی شدن طرح، مقدار N=۳ به عنوان تعداد لایه‌های تسلیح که باید در بالای فوم قرار بگیرند در نظر گرفته شد.

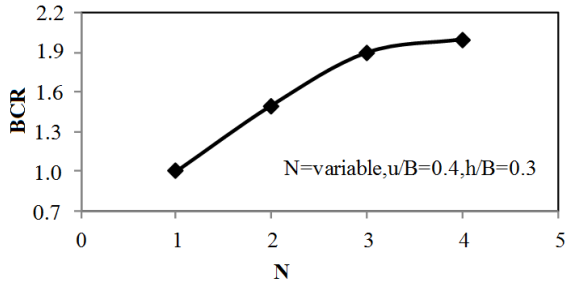
شکل ۲۱ تغییرات سختی بستر ماسه‌ای فوم دار مسلح در برابر تغییر تعداد لایه‌های ژئوگرید را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد لایه‌های تسلیح، سختی بستر افزایش می‌یاد. و این افزایش تا تعداد ۴ لایه نیز ادامه دارد. با توجه به شکل۲۲، با افزایش تعداد لایه‌های تسلیح در یک نشست برابر(S/B=٪۷) مقدار ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. در N=۴ و N=۳ مقدار سختی بستر تقریبا برابر می‌باشد.



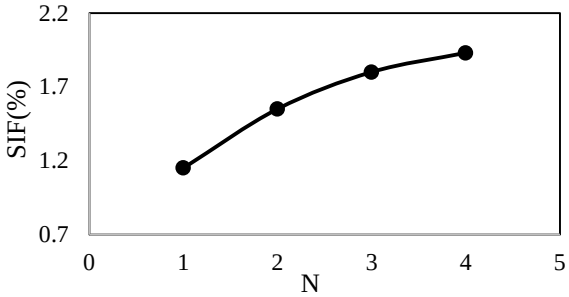
شکل ۱۸: تغییرات سختی بستر با تغییر فواصل بین دو لایه ژئوگرید



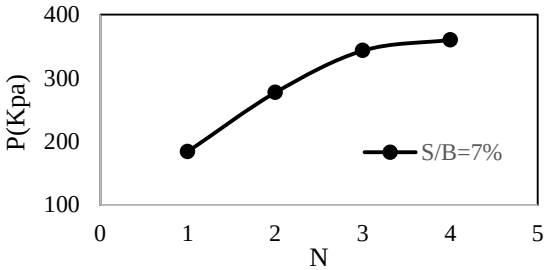
شکل ۱۹: منحنی تغیرات نسبت نشست بستر در برابر h/B های مختلف



شکل ۲۰: تغییرات نسبت ظرفیت باربری بستر مسلح با تعداد لایه‌های متغیر



شکل ۲۱: تغییرات سختی بستر در برابر تغییر تعداد لایه‌های ژئوگرید



شکل ۲۲: ظرفیت باربری بستر ماسه‌ای فوم‌دار مسلح شده با تعداد لایه‌های مختلف ژئوگرید

۶- نتیجه گیری

۱- زمانی که در بستر فوم وجود ندارد، منحنی بار-نشست مربوطه دارای یک بیشینه بار بوده و سپس بار کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه گسیختگی پی از نوع گسیختگی برش کلی می‌باشد. زمانی که در بستر فوم قرار داده شود، رفتار منحنی تغییر کرده و هیچ بیشینه باری در منحنی مشاهده نمی‌گردد در نتیجه گسیختگی بستر ماسه‌ای فوم‌دار از نوع گسیختگی برش پانچ می‌باشد.

۲-با تسلیح بستر ماسه‌ای فوم‌دار توسط یک لایه ژئوگرید، سختی بستر افزایش، میزان نشست کاهش و ظرفیت

باربری افزایش پیدا می‌کند و به مقدار ظرفیت باربری بستر ماسه‌ای بدون فوم و تسلیح می‌رسد.

۳-در بررسی پارامترهای تسلیح، بیشترین سختی بستر که منجر به کاهش نشست می‌شود در بهینه پارامترهای تسلیح رخ می‌دهد. بهینه پارامترهای تسلیح شامل: فاصله اولین لایه تسلیح u/B=۰/۴، طول لایه‌های تسلیح L/B=۴، فاصله بین لایه‌های تسلیح h/B=۰/۳ و تعداد لایه N=۳ می‌باشد.

۴- بیشترین سختی بستر ماسه‌ای فوم دار در تسلیح با سه لایه ژئوگرید اتفاق می‌افتد.

۵-با داشتن بهینه پارامترهای تسلیح، یعنی سه لایه ژئوگرید با فواصل بین لایه‌ای و طول مشخص که در بالای فوم قرار دارند، ظرفیت باربری بستر ماسه ای فوم‌دار تا مقدار ۱/۹ برابر افزایش می‌یابد.

۷- مراجع

[1] Mandal, J.N., Sah, H.S.,"Bearing capacity tests on geogrid-reinforced clay",Geotextile and Geomembranes, Vol. 11, p.p. 327-333, **1992**.

[2] Das, B.M., Khing, K.H., "Foundation on layered soil with geogrid reinforcement effect of a void",Geotextile and Geomembranes, Vol. 13, p.p. 545-553, **1994**.

[3] Das, B.M., Shin, E.C., "Strip foundation on georid-reinforced clay: behavior under cyclic loading" Geotextile and Geomembranes, Vol. 13, p.p. 657-667, **1994**.

[4] Das, B.M. and Maji, A., "Transient loading-related settlement of a square foundation on geogrid-reinforced sand", Geotechnical and Geological Engineering, Vol .12, p.p.241-251, **1994**.

[5] Khing, K.H., Das, B.M., Puri, V.K., Cook, E.E. and Yen, S.C., "The bearing capacity of a strip foundation on geogrid reinforced sand" Geotextile and Geomembranes, Vol. 12, p.p. 351-361, **1993**.

[6] Alawaji, H.A.,"Settlement and bearing capacity of geogrid-reinforced sand over collapsible soil",Geotextile and Geomembranes, Vol. 19, p.p. 75-88, **2001**.

[7] Kumar, A., Walia, B.S.,"Bearing capacity of square footing on reinforced layered soil", Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 24, p.p.1001-1008, **2006**.

[8] Kumar, A., Ohri, M.L., Bansal, R.K., "Bearing capacity tests of strip footings on reinforced soil, Vol. 25, p.p. 139-150", **2007**.

[9] Patra, C.R., Das, B.M., Bhoina, M. and Shin, E.C., "Ecentrically loaded strip foundation on geogrid-reinforced sand" Getextile and Geomembranes**,** Vol. 24, p.p. 254-259, **2006**.

[10] Sadoglu, E., Cure, E., Moroglu, B., Uzuner, B.A.,"Ultimate loads for eccentrically loaded model shallow strip footings on geotextile-reinforced sand", Geotextile and Geomembranes**,** Vol. 27, p.p. 176-182, **2009**.

[11] Sireesh, S., Sitharam, T.G., Dash, S.K.,"Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlying clay bed with void", Geotextile and Geomembranes, Vol. 25, p.p. 89-98, **2009**.

[12] Mohamed, M.H.A.,"Two dimensional experimental study for the behavior of surface footings on unreinforced and reinforced sand beds overlying soft pockets", Geotextile and Geomembranes, Vol. 28, p.p. 589-596, **2010**.

[13] Mandal, J.N., Gupta, P.,"Stability of geocell-reinforced soil "Construction and Building Materials, Vol. 8, No. 1, p.p. 54-62, **1993**.

[14] Dash, S.K., Krishnaswamy, N.R., Rajagopal, S.K.,"Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand", Geotextile and Geomembranes, Vol. 19, p.p. 235-256, **2001**.

[15] Kumar, A., Ohri, M.L., Bansal, R.K., "Bearing capacity tests of strip footings on reinforced soil", **2007,** Vol 25, p.p. 139-150.

[16] Sitharam, G.T., Sireesh, S., Dash, S.K.,"Performance of surface footing on geocell-reinforced soft clay beds", Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 27, p.p. 509-524, **2007**.

[17] Pokhatel, S.K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R.L., Halahmi, I.,"Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading", Geotextile and Geomembranes, Vol. 28, p.p. 570-578, **2010**.

[18] Tafreshi, S.N.M, Dawson, A.R.," Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement", Geotextile and Geomembranes, Vol. 28, p.p. 72-84, **2010**.

[19] Elsawwaf, M., Nazir, A.K., "Behavior of repeatedly loaded rectangular footings resting on reinforced sand", Alexandria Engineering Journal, Vol. 49, p.p. 349-356, **2010**.

[20] Elsawwaf, M.A., Nazir, A.K.,"Cyclic settlement behavior of strip footing resting on reinforced layered sand slope", Journal of Advanced Research, Vol. 13, p.p. 132-142, **2011**.