طراحی و ساخت مدل فیزیکی جدید جهت مطالعه رفتار پی‌های نواری واقع بر خاک مسلح تحت بارگذاری‌های سیکلی

سعید ابریشمی[۱]؛ سید مجدالدین میر محمد حسینی[۲]

چکیده

طراحی سازه‌های مهندسی نیازمند دانشی است که از طریق مدل‌سازی بدست می‌آید. مدل‌سازی فیزیکی، به عنوان بهترین نوع مدل‌سازی، اطلاعات کمی و کیفی درباره رفتار سازه‌های مهندسی در اختیار می‌گذارد که می‌تواند جهت بررسی درستی و تصحیح و ریزسنجی فرضیات و مدلهای تئوریک و عددی بکار رود. مسأله مدل‌سازی فیزیکی به ویژه در مسائل ژئوتکنیکی بدلیل پیچیدگی‌های رفتاری و تأثیر پارامترهای فراوان از اهمیت خاصی برخوردار بوده، می‌تواند شناخت و اطلاعات مهمی را در اختیار قرار دهد.

در این مقاله، چگونگی طراحی و ساخت سیستمی جدید، برای مدل‌سازی آزمایشگاهی مسأله بارگذاری و ظرفیت باربری استاتیکی و سیکلی پی‌های نواری به تفصیل، تشریح گردیده است. چگونگی طراحی، مبنای انتخاب و عملکرد مورد انتظار قسمت‌های مختلف این سیستم بیان گردیده است. در ادامه، برخی نتایج بدست آمده از این مدل برای اثبات توانائی‌های آن آورده شده است. سیستم گسترش یافته توانائی مدل‌سازی و مطالعه خصوصیات و ظرفیت باربری پی‌های نواری در حالت کرنش مسطح، تحت بارگذاریهای استاتیکی و سیکلی را دارا است. ابزار دقیق مورد استفاده در این مدل، امکان ثبت و پایش رفتار جهت تحلیل نتایج را در شرایط مختلف فراهم می‌سازد.

کلمات کلیدي

سیستم آزمایشگاهی، مدل‌سازی فیزیکی، ظرفیت باربری، بارگذاری سیکلی، نشست‌های ماندگار

Design and Development of a New Physical Model of Strip Footings on Reinforced Soil Media under Cyclic Loadings

S. Abrishami; S. M. Mir Mohammad Hosseini

ABSTRACT

To design the engineering structures properly, some relevant information is required main part of which can only be obtained from modeling them. Physical modeling, if carried out carefully, can present such valuable information in connection with structural behaviors that may implement to calibrate the numerical modeling or to verify the designing assumptions. In geotechnical problems however, the physical modeling, due to their inherent complexity and dependency to many factors, are of great importance and may submit very useful and crucial data.

In this paper, a new physical model capable for studying the behavior of strip footings on reinforced soil under monotonic and cyclic loadings is presented. The design criteria and specification of different parts of the model are explained and discussed. In order to control the ability and accuracy of the model, regarding the responses of strip footings subjected to different static and cyclic loadings, the results of

[۱] دانشجوی دکتری رشته مهندسی خاک و پی دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر ، Email:saeedabrishami@yahoo.com

[۲] دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر ، Email: mirh53@yahoo.com

some tests have been compared with other empirical and theoretical data. The consistency between the results shows the reliability of the developed model.

KEYWORDS

Physical Modeling, Bearing capacity, Strip Footing, Cyclic Loading, Permanent Settlement

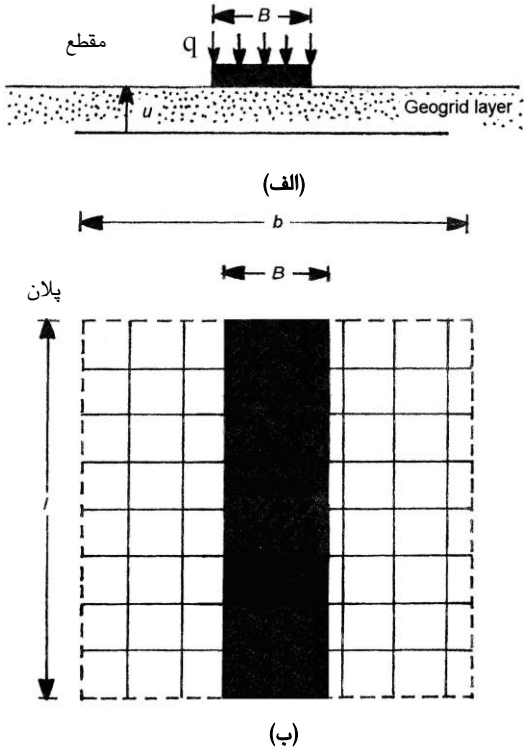
۱- مقدمه

طراحی سازه‌های مهندسی بدون شناخت رفتار آنها امکان پذیر نمی‌باشد. هدف از مدل‌سازی، تخمین رفتار سازه قبل از (یا حین) ساخت آن است. مدل‌سازی می‌تواند به صورت تحلیلی (ریاضی)، عددی و یا فیزیکی باشد. مدل‌سازی فیزیکی به لحاظ فراهم ساختن شرایط مشاهده در یک فضای حقیقی، اطمینان بیشتری به طراح می‌دهد. ضمن اینکه، تأیید عملکرد مدلهای ریاضی و عددی در گرو تطبیق نتایج آنها با مدل‌سازی‌های فیزیکی است.

تا کنون محققان بسیاری به مطالعه رفتار شالوده‌ها پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به [۴]، [۵]، [۶]، [۷] و [۸] اشاره نمود. ایشان با توسعه سیستمی آزمایشگاهی، تأثیر پارامترهای مختلف روی ظرفیت باربری شالوده‌ها را مطالعه نموده‌اند. اما سیستم‌های آزمایشگاهی که تا کنون توسعه یافته‌اند، از کاستی‌هائی رنج می‌برند که مهمترین آنها عبارتند از [۱]: ۱- ابزاربندی ناقص و نبودن اطلاع از شرایط داخل خاک و مرزها، ۲- استفاده از ابزار دقیق بدون توانائی قرائت و ثبت مداوم داده‌ها در بارگذاری‌های غیر استاتیکی و سیکلی، ۳- نداشتن امکان بارگذاری سیکلی (آزمایش‌های استاتیکی صرف)، به ویژه نبودن امکان اعمال همزمان بارگذاری استاتیکی و سیکلی (مشابه واقعیت)، ۴- نداشتن کنترل روی چگونگی و شکل اعمال بار و نداشتن دسترسی به فرکانس‌های بالای بارگذاری (بیش از ۱ Hz)، ۵- امکان دوران پی حین بارگذاری قائم، ۶- دست خوردگی سطح خاک بدلیل نیروهای اولیه ناشی از نصب مدل پی و ۷- نداشتن امکان تسطیح خاک متناسب با کف پی و در نتیجه بروز توزیع غیر یکنواخت تنش در مدل.

سیستم حاضر، با هدف مدلسازی مسائل بارگذاری و باربری شالوده‌ها تحت بار سیکلی (شکل ۱) و فراهم ساختن اطلاعاتی دقیق جهت بررسی درستی فرضیات و مدل‌های تحلیلی، عددی و رفتاری، ضمن رفع نقائص و نقاط ضعف عمده سیستم‌های پیشین، از تجارب و امکانات به میزان وسیع برای مطالعه رفتار کمی و کیفی بهره می‌جوید.

در این مقاله، اجزاء مختلف سیستم یاد شده، مبنای انتخاب و چگونگی عملکرد آنها توضیح داده شده است. سپس، ضمن ارائه نتایج بدست آمده، با مقایسه نتایج حاصل از مدل با سایر مدلهای آزمایشگاهی و تحلیلی صحت عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. برای اطلاع از جزئیات بیشتر دستگاه، می‌توان به مرجع [۱] مراجعه نمود.



شکل (۱): بررسی ظرفیت باربری خاک مسلح (الف) مقطع پی با عرض B **واقع بر خاک مسلح به تک لایه ژئوگرید در عمق** u **، تحت فشار** q **، (ب) پلان پی نواری با طول** l **واقع بر لایه ژئوگرید با طول** l **و عرض** b

۲- مدل پي و مصالح

مجموعه پی، مصالح خاکی و مصالح مسلح کننده، بخش اصلی مدل فیزیکی را تشکیل می‌دهند. انتخاب صحیح آنها، به انتخاب صحیح سایر اجزاء و عملکرد مناسب مجموعه نیز کمک خواهد نمود. اینک به تشریح هر یک از این قسمتها پرداخته می‌شود.

۲-۱- مدل پي

مدل مورد استفاده جهت پی باید دارای سختی کافی به منظور برآوردن شرایط کرنش مسطح باشد. باید خمش طولی پی را تا میزان ممکن محدود نمود. از طرفی، مدل پی باید سبک باشد تا قرار گرفتن آن روی خاک، تنش اولیه ناچیزی ایجاد نماید و کار کردن با آن راحت باشد. بدین منظور از آلومینیوم برای ساخت آن استفاده شده است که مدول الاستیسیته

مناسب و چگالی کمی دارد. ابعاد متعارف برای مدل پی بین ۵ تا ۱۵ سانتیمتر می‌باشد [۱]. سه مدل پی با عرض‌های ۵ ، ۷/۵ و ۱۰ سانتیمتر ساخته شده است. ارتفاع این مدل‌ها با استفاده از نتایج تحلیل‌های اجزاء محدود با نرم‌افزار ABAQUS و با توجه به نیروی گسیختگی خاک که از روابط تئوری بدست می‌آید، بگونه‌ای انتخاب گردیده که ممان اینرسی و در نتیجه سختی خمشی طولی مناسبی ایجاد نماید.

با توجه به اینکه اغلب مطالعات تئوریک بر اساس کف زبر می‌باشد و شرایط عملی نیز چنین است، کف پی با چسباندن یک لایه بسیار نازک مصالح ماسه‌ای به کمک چسب اپوکسی زبر گردیده است.

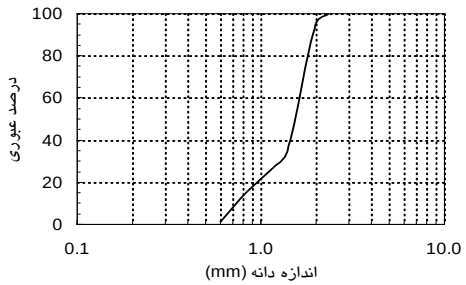
طول مدل پی ۳۴ cm و نزدیک عرض محفظه خاک می‌باشد. اختلاف ۲ میلیمتری موجود، برای آسانی قرارگیری پی در محفظه خاک و جلوگیری از درگیری مکانیکی بین مدل و محفظه حین آزمایش در نظر گرفته شده است. در قسمت بالای مدل پی قطعه‌ای قرار گرفته که جهت نصب ابزار دقیق اندازه‌گیری نیرو، اتصال به سیستم بارگذاری و جلوگیری از دوران پی حین بارگذاری می‌باشد.

شکل (۲): مدل پی، Loadcell و اجزای مربوطه

۲-۲- مصالح خاکی

برای آسانی تحلیل نتایج بدست آمده و کنترل دقیق پارامترهای مؤثر بر نتایج آزمایش، شتاب در عملیات آماده‌سازی و تکرار پذیری آن، از مصالح ماسه‌ای خشک با دانه‌بندی یکنواخت در این سیستم استفاده می‌گردد. البته امکان ساخت نمونه با خاک مخلوط، خاک خوب دانه‌بندی شده، خاک شنی یا خاک چسبنده (رسی) نیز وجود دارد.

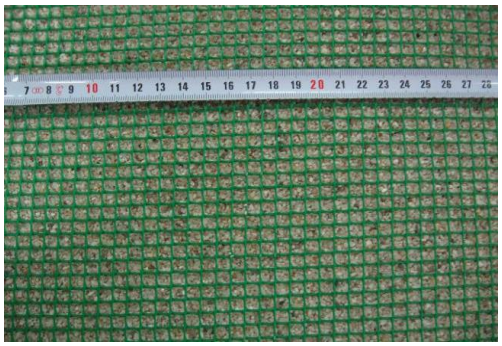
بر اساس آزمایش‌های سه محوری صورت گرفته، زاویه اصطکاک داخلی خاک مورد نظر نزدیک ۴۵ درجه می‌باشد.



شکل (۳): دانه‌بندی مصالح خاکی

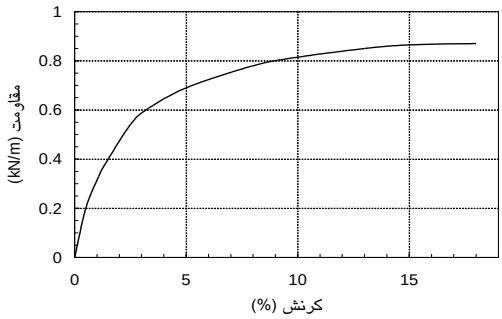
۲-۳- مصالح مسلح کننده

با توجه به گسترش روز افزون استفاده از مصالح پلیمری، به ویژه ژئوگرید در مسلح‌سازی شالوده‌ها، از این مصالح برای تسلیح خاک استفاده شده است. به منظور کاهش اثر مقیاس [۶] ، ضعیف‌ترین ژئوگریدهای موجود در بازار مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ژئوگرید منتخب و مورد استفاده (شکل ۴)، محصول شرکت مش ایران، با ابعاد مش ۴/۵ mm (متناسب با ابعاد متوسط دانه‌های خاک) می‌باشد.



شکل (۴): مصالح مسلح‌کننده واقع بر سطح خاک

مشخصات مکانیکی و مقاومتی این ژئوگرید، با استفاده از تعدادی آزمون آزمایشگاهی کششی (شکل ۵) بدست آمده است. ملاحظه می‌گردد که مقاومت آن بسیار ناچیز و نزدیک به ٪۲/۵ مقاومت ژئوگریدهای واقعی است. عرض لایه مسلح‌کننده به میزانی برابر با عرض محفظه انتخاب می‌گردد ولی طول آن می‌تواند متفاوت باشد.



شکل (۵): نتایج آزمایش‌های کشش ژئوگرید

۳- مخزن خاک (محفظه آزمایش) و ملحقات آن

مخزن خاک باید بگونه‌ای طراحی و ساخته شود که علاوه بر نگهداری نمونه خاک، شرایط مورد نظر در مدل‌سازی را ایجاد نماید. شکل و ابعاد مخزن باید متناسب با شکل و ابعاد مدل پی باشد. مخزن باید صلب و دیواره‌های آن دارای کمترین میزان اصطکاک باشد.

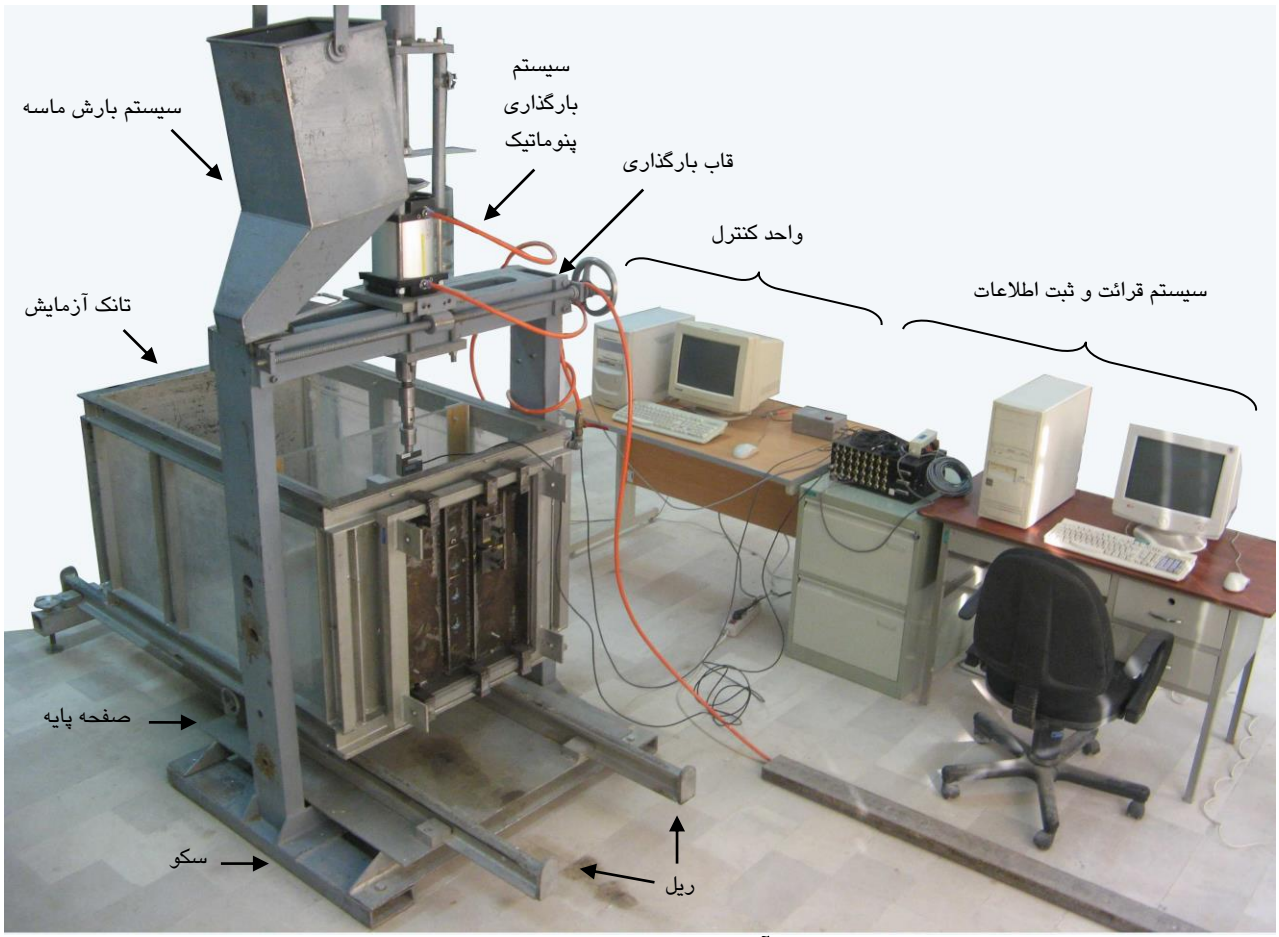
با توجه به شرایط کرنش مسطح و پی نواری مورد نظر، شکل مخزن به صورت مکعب مستطیل انتخاب شده است.

ارتفاع مخزن باید بگونه‌ای انتخاب گردد که کف صلب تأثیر چندانی روی نتایج نگذارد. بر اساس مطالعات انجام شده [۷] روی شالوده‌های غیر مسلح، در صورتیکه عمق لایه صلب از کف پی بیش از ۲B باشد، تأثیری روی ظرفیت باربری ندارد. با این وجود، برای کاهش اثرات آن روی نشست، ارتفاع ۵۶ cm برای توده خاک و ارتفاع ۷۵ cm برای مخزن انتخاب شده است.

برای بدست آمدن شرایط کرنش مسطح، عرض جعبه باید برابر طول مدل پی باشد. برخی محققین از عرض‌های بزرگ (نسبت به عرض شالوده)، مانند ۵۰ cm و برخی از عرض‌های کوچک استفاده کرده‌اند. هر چه عرض بیشتر باشد، تأثیر اصطکاک دیواره‌ها بر روی نتایج کمتر خواهد شد ولی در عوض، بدلیل سختی محدود مدل پی و اعمال نقطه‌ای بار، خمش طولی و خیز آن افزایش می‌یابد که با شرایط کرنش مسطح در تناقض است. با توجه به تحلیل‌های اجزاء محدود صورت گرفته، عرض جعبه برابر ۳۴/۲ cm انتخاب گردیده است.

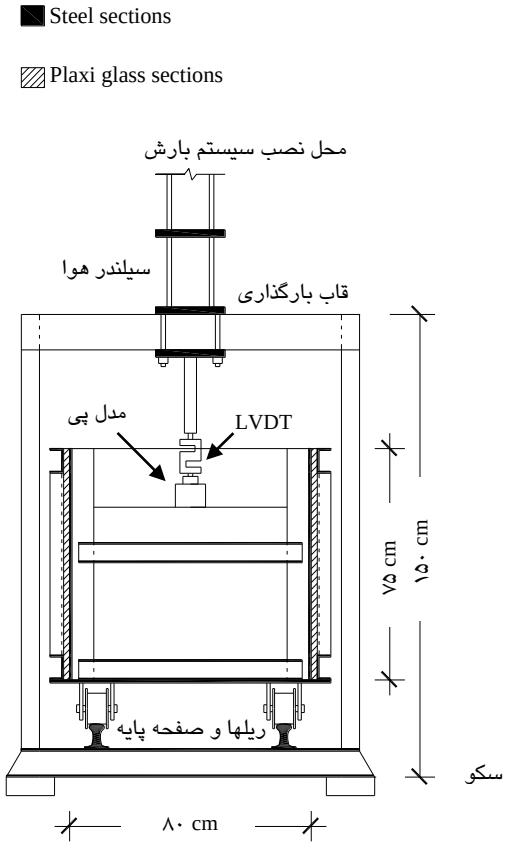
طول مخزن خاک باید متناسب با عرض مدل پی بگونه‌ای انتخاب گردد که گوه‌های لغزش ناشی از بارگذاری شالوده با دیواره‌های مخزن برخورد نداشته باشد و تأثیر اثر جداره‌ها روی نتایج مدل‌سازی به کمترین میزان برسد. کمترین عرض مورد نیاز با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته با نرم‌افزار FLAC و با استناد به نوشته‌های فنی [۱]، [۲] و [۴]، ۵B می‌باشد. با این وجود، برای کاهش اثر دیواره‌ها در افزایش فشار جانبی، طول ۸۰ cm برای مخزن انتخاب گردیده است.

برای کاهش اصطکاک بین مصالح و جداره‌ها [۱]، از ورق Plaxi Glass در وجوه داخلی کلیه دیواره‌ها استفاده شده است. ورق‌های شفاف مزبور امکان دیدن نشست پی، تشکیل گوه‌های گسیختگی و در پایان، گسیخته شدن خاک را فراهم می‌سازد.

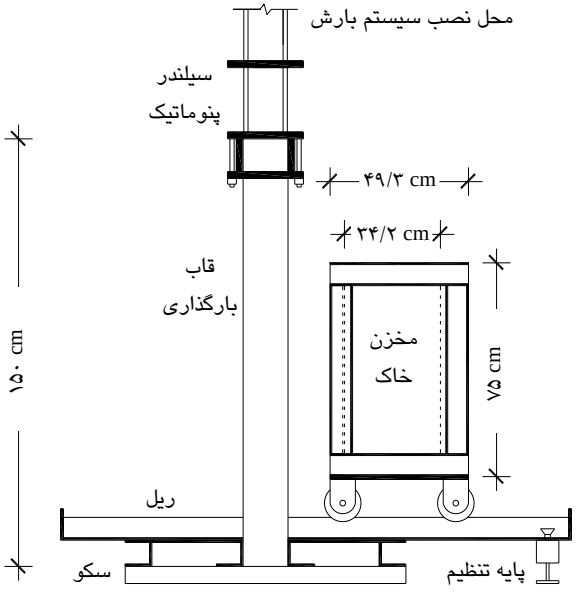


شکل (۶): مجموعه کامل سیستم آزمایشگاهی مطالعه رفتار پی‌های نواری واقع بر خاک مسلح

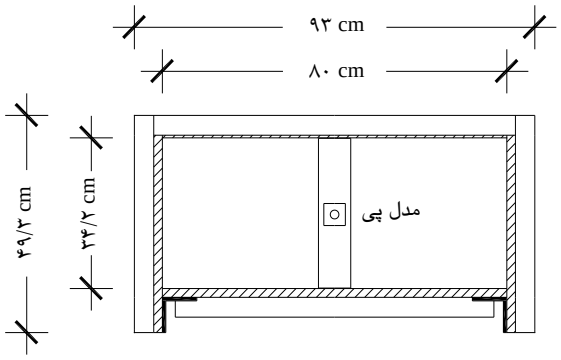
کف تانک از ورقه فلزی ضخیمی ساخته شده است. یکی از دیواره‌ها (وجه طولی) که محل نصب ابزار می‌باشد نیز فلزی است. سایر دیواره‌ها نیز برای صلب بودن مخزن خاک، بوسیله مجموعه پروفیل‌های فولادی (UNP ۸۰ و L ۸۰×۸۰) چنان مهار گردیده‌اند که از هر نوع تغییرشکل در آنها جلوگیری شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۷): مخزن خاک بر روی ریل و صفحه پایه در کنار قاب بارگذاری (الف) نمای مقابل، (ب) نمای جانبی و (ج) پلان مخزن خاک

برای ایجاد امکان جابجائی مخزن، ریل، سکو و صفحه پایه (اشکال ۶ و ۷) پیش‌بینی شده است. بدین ترتیب می‌توان مخزن را برای عملیات بارش و تخلیه، به محل مناسب هدایت و پس از آماده سازی نمونه به محل بارگذاری منتقل نمود. برای ثابت نگهداشتن مخزن و جلوگیری از حرکت آن در حین بارگذاری و مطالعه رفتار پی، از سیستم قفل و ترمز مکانیکی استفاده شده است.

٤- سیستم بارش

یکی از مراحل مهم در مطالعات آزمایشگاهی، چگونگی آماده‌سازی نمونه می‌باشد. روش‌های مختلفی برای آماده سازی نمونه‌ها متناسب با جنس خاک پیشنهاد شده است. از جمله روش‌های مناسب برای خاک‌های ماسه‌ای خشک می‌توان به بارش، ارتعاش و تراکم اشاره نمود.

برای بدست آمدن چگالی مشخص (تراکم نسبی و تخلخل معلوم) برای مصالح و تکرار پذیری شرایط آزمایشگاهی ([۱]، [۲] و [۳])، روش بارش انتخاب گردیده است. در مطالعات مورد نظر، به لحاظ استفاده از مصالح با دانه‌بندی یکنواخت، این روش از آسانی، سرعت و دقت بیشتری نسبت به سایر روشها برخوردار است.

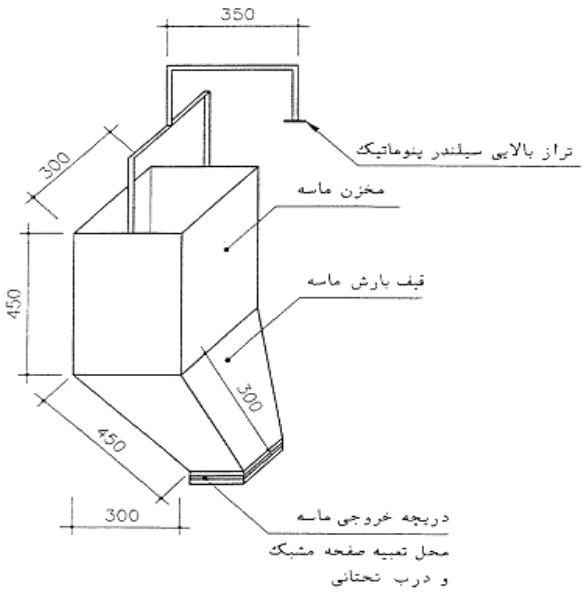
ماسه از ارتفاعی معین و با سرعتی ثابت (که با کاهش حجم ماسه و حذف اثر سربار تا حدودی کاهش می‌یابد) داخل مخزن خاک ریخته می‌شود. ارتفاع بارش، سرعت بارش و مشخصات مصالح بر دانسیته لایه ریخته شده مؤثرند. به همین دلیل برای یک نوع ماسه خاص، با استفاده از صفحات مشبک (با سوراخ‌های متفاوت) و انتخاب ارتفاعات بارش گوناگون، دستگاه بارش برای مصالح مورد نظر پیشتر کالیبره می‌گردد.

در نتیجه می‌توان تراکم‌های مختلف را بطور مناسب بدست آورد. بدین ترتیب نمونه‌های آماده شده هم از نظر یکنواختی قابل قبول بوده و هم قابلیت تکرار دوباره را خواهند داشت. بر خلاف آن، تعدادی ظرف صلب، حین بارش داخل محفظه جاگذاری می‌شود تا بتوان با تعیین وزن و حجم خاک از چگالی نمونه ساخته شده، اطمینان حاصل نمود.

قسمتهای مختلف سیستم بارش عبارتند از: ۱- تکیه‌گاه، ۲- بالابر، ۳- مخزن متحرک و ۴- دریچه (سوراخ‌دار).

تکیه‌گاه سیستم حاضر، قاب بارگذاری است (شکل ۶). سیستم بالابر، مجموعه کابل و قرقره است که به صورت دستی و مکانیکی عمل نموده، می‌تواند باعث جابجائی قائم مخزن گردد و در ارتفاع مناسب، ثابت گردد. بازوی قابل چرخش و انعطاف پذیری کابل، امکان جابجائی در صفحه افقی با حرکت دستی مخزن را تا نزدیک ۴۰ cm در هر جهت میسر می‌سازد (البته بدلیل جابجائی افقی اندکی تغییر ارتفاع رخ می‌دهد).

برای انجام عملیات بارش، محفظه‌ای مطابق شکل (۸) طراحی شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، قسمت شیب‌دار انتهائی اثر وزن ماسه بالای دریچه را بر سرعت خروج مصالح می‌کاهد. محفظه توسط کابلی فلزی از طریق دستک متصل به قاب معلق بوده، ارتفاع آن با دقت ۵ میلیمتر قابل تنظیم است. در انتهای تحتانی محفظه، دریچه‌ای قرار گرفته است. این دریچه توسط صفحه فلزی که به صورت کشوئی عمل می‌کند، در هنگام پر کردن محفظه از ماسه، بسته می‌گردد. زیر صفحه باز و بست، صفحه‌ای مشبک قرار می‌گیرد. این صفحه به صورت کشوئی جاگذاری می‌شود و تعویض پذیر است.



شکل (۸): سیستم بارش برای آماده‌سازی خاک

با بررسی صفحات مشبک با قطر سوراخ‌های مختلف و فواصل مرکز به مرکز متفاوت، سوراخ‌هائی با قطر ۵ ، ۸/۵ و ۱۰ میلیمتر و با فواصل برابر قطر در هر مورد، انتخاب گردیدند.

۵- سیستم بارگذاری

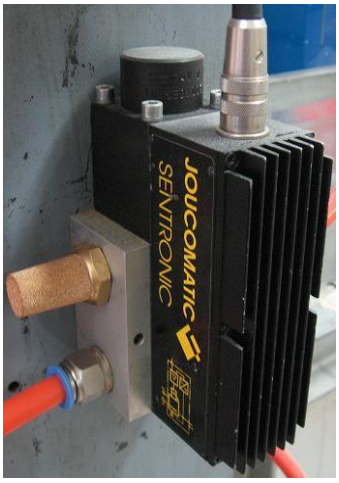
برای وارد نمودن بارهای استاتیکی و سیکلی مورد نظر از سیستم بارگذاری هوای فشرده (پنوماتیکی) استفاده شده است. برتری آن، هزینه کمتر، تجهیزات کمتر و ارزانتر، کنترل راحت‌تر و کاربری آسانتر بوده، نیاز به دانش خاصی ندارد. این سیستم که به کمک هوای فشرده عمل می‌کند، از اجزاء مختلفی تشکیل گردیده که عبارتند از: ۱- کمپرسور و مخزن هوا، ۲- مجموعه رگلاتور، واحد تصفیه و روغنکاری، ۳- شیر متناسب ساز برقی EP ، ۴- سیلندر (جک) دو سر شفت دو طرفه و ۵- واحد کنترل شیر.

کمپرسور و مخزن هوا باید بگونه‌ای انتخاب گردند که بتوانند دبی هوای مورد نیاز، به ویژه در آزمایش‌های سیکلی را تأمین نمایند. فشار هوا در آزمایشگاه محدود به ۱۰ bar می‌باشد.

ابعاد سیلندر بارگذاری باید متناسب با ابعاد پی و مشخصات خاک بگونه‌ای باشد که بتواند بار گسیختگی مورد نظر را اعمال نماید. همچنین برای کنترل و عملکرد مطلوب سیلندر، به ویژه در بارگذاری‌های سیکلی، باید نیروی اصطکاک آن اندک باشد. در مدل حاضر با توجه به نکات یاد شده از سیلندر با قطر ۱۶۰ mm با ظرفیت بارگذاری ۲ ton استفاده شده است. سیلندر دو سر شافت امکان اندازه‌گیری نشست‌ها را

با توجه به حرکت سیلندر می‌دهد. جابجائی (کورس) سیلندر برابر $8/5^{cm}$ امکان نصب مدل پی، قرارگیری آن روی خاک و گسیختگی کامل خاک را فراهم می‌سازد.

شیر EP مورد استفاده (شکل ۹)، فشار هوای داخل سیلندر را کنترل می‌کند. این شیر توسط واحد کنترل هدایت می‌گردد. شیر موجود در هر ثانیه تنها ۱۰ بار، داده سنسور فشار را قرائت می‌کند و توانائی اعمال بار با شکل مورد نظر با فرکانس بیش از ۳ Hz را ندارد.



شکل (۹): شیر EP و اجزای آن

۵-۱- واحد کنترل

واحد کنترل برای اعمال بارگذاری مورد نظر تدارک دیده شده است. شیر EP به کمک کابلی به منبع تغذیه و سیستم کامپیوتری نصب می‌گردد. کارت A/D موجود در سیستم، اطلاعات آنالوگ را قرائت و به دیجیتال تبدیل و برای کاربر معنی دار می‌سازد. نرم‌افزار توسعه یافته، ضمن قرائت اطلاعات، امکان دادن دستور مورد نظر را فراهم ساخته است. بر این اساس، می‌توان بار استاتیکی را تا میزان معین و با سرعت مورد نظر به صورت خطی اعمال نمود. سپس می‌توان بسته به شرایط، بار سیکلی را با فرکانس (بین صفر تا ۱ هرتز) و دامنه مشخص، با تأخیر زمانی دلخواه نسبت به بار استاتیکی، اعمال نمود. حلقه بسته‌ای که بین کامپیوتر و سنسور فشار داخل شیر تشکیل می‌گردد، با تنظیم فشار سیلندر در هر لحظه، دستور مورد نظر را اعمال می‌نماید.

بدلیل تراکم پذیری هوا و اصطکاک سیلندر، اعمال بار با دامنه و شکل دلخواه در فرکانس‌های بالا دشوار است ولی می‌توان با ارتقاء سنسور فشار و تعداد قرائت‌های آن، بار با فرکانس‌های تا ۵ Hz نیز اعمال نمود.

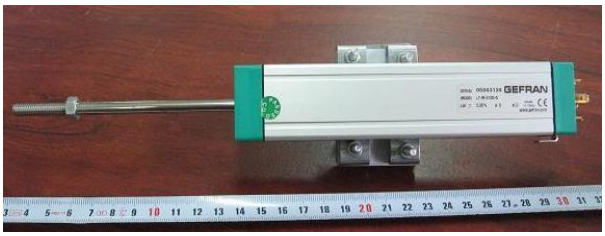
شیر EP شیر تنظیم فشار بوده، فشار پشت سیلندر را با توجه به محاسبات نرم‌افزار توسعه یافته چنان تنظیم می‌کند که دستور کاربر اعمال گردیده، بار سیکلی با مشخصات مورد نظر تولید گردد.

۶- سیستم قرائت و ثبت اطلاعات

مهمترین مرحله در هر آزمایش، قرائت صحیح کلیه اطلاعات مورد نیاز و ثبت آن برای تحلیل رفتار و رخدادها می‌باشد. در مطالعه حاضر، پارامترهای مورد نظر ۱- بار، ۲- نشست پی و ۳- فشار خاک می‌باشند.

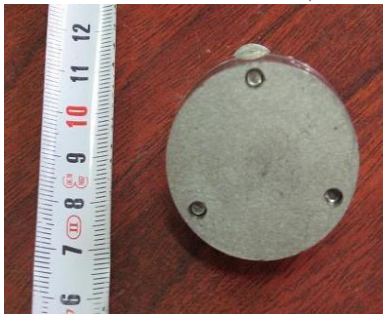
از Loadcell با شکل S (شکل ۲) با ظرفیت ۲/۵ ton برای اندازه‌گیری بار محوری اعمالی استفاده شده است. نتایج کالیبراسیون و تأییدیه آن بیانگر کیفیت و دقت مناسب این سنسور برای آزمایش‌های سیکلی می‌باشد.

از LVDT (شکل ۱۰) با دقت ۰/۰۵ mm و دامنه جابجائی ۱۰cm جهت اندازه‌گیری تغییرمکان استفاده شده است. در مدل حاضر تغییرمکان محور سیلندر بیانگر میزان نشست مدل پی است. این سنسور نیز بدلیل قابلیت حرکت با سرعت‌هائی تا ۱۰m/s برای مدلسازی سیکلی مناسب می‌باشد.



شکل (۱۰): سنسور اندازه‌گیری تغییرمکان (LVDT)

یک عدد سنسور اندازه‌گیری فشار نرمال در کف، جهت اندازه‌گیری فشار قائم و ۴ عدد سنسور فشار در دیواره مخزن با فواصل ۱۰ cm، جهت مطالعه فشار جانبی نصب گردیده‌اند. طراحی و ساخت این سنسورها برای آزمایش‌های سیکلی، بگونه‌ای صورت گرفته که بتواند اندازه‌گیری و ثبت تغییرات سریع فشار را انجام دهد.



شکل (۱۱): سنسور فشار برای اندازه‌گیری تنش‌ها در مرز مدل

اطلاعات سنسورها به صورت آنالوگ توسط Data Logger ۳۲ کاناله موجود که توانائی قرائت ۵۰ داده از هر کانال در هر ثانیه را داراست، قرائت گردیده، به دیجیتال تبدیل می‌گردد. نرم‌افزار Logger که جهت قرائت، ثبت و نمایش اطلاعات ابزار دقیق توسعه یافته، پس از اعمال ضرائب کالیبراسیون، اطلاعات مورد نظر را در فایل‌های مربوطه ثبت می‌نماید.

۷- مدل‌سازي فيزيكي بارگذاري پي

مراحل انجام مطالعات آزمایشگاهی با سیستم یاد شده عبارتند از:

۱- استقرار محفظه زیر سیستم بارش و انجام عملیات بارش ماسه.

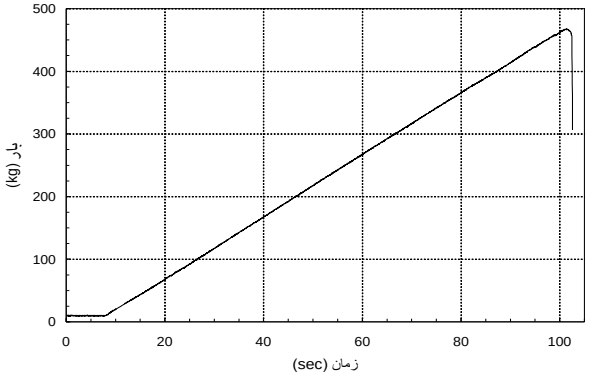
۲- عملیات تسطیح سطح تمام شده جهت استقرار مدل پی و استقرار محفظه زیر سیستم بارگذاری.

۳- نصب مدل پی و مستقر ساختن آن روی سطح خاک.

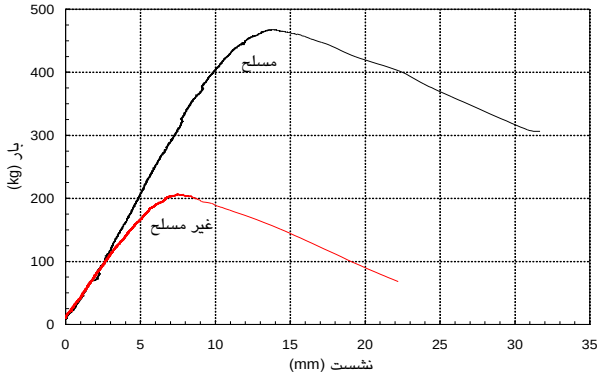
۴- اعمال بارگذاری مورد نظر (به صورت کنترل نیرو) توسط برنامه نوشته شده.

۵- قرائت و ثبت اطلاعات.

نتایج ثبت شده در ادامه مورد تحلیل قرار می‌گیرند. شکل (۱۲) بارگذاری استاتیکی وارده به پی را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، نیرو به صورت خطی نسبت به زمان افزایش می‌یابد. با افزایش نیرو، مدل پی در توده خاک فرو رفته، نشست آن ثبت می‌گردد. با توجه به جنس مصالح، نمودار بار- نشست در غالب قسمت خود به صورت خطی می‌باشد. با نزدیک شدن به لحظه گسیختگی، بدلیل تشکیل کامل گوه‌های لغزش، حرکت آنی و سریع در خاک زیر پی رخ می‌دهد. بر خلاف ورود حجم بالای هوا به داخل سیلندر، سرعت حرکت پی به میزانی است که نیرو کاهش یافته و فرورفتن ناگهانی پی در خاک رخ می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل (۱۲): نتایج بارگذاری استاتیکی (الف) نمودار بار- زمان بر پی مسلح (u/B=۰/۵)، (ب) مقایسه نمودار بار- نشست پی‌های مسلح و غیر مسلح

بر اساس تئوری‌های موجود، می‌توان ظرفیت باربری برای پی نواری سطحی واقع بر خاک غیر چسبنده، غیر مسلح را از رابطه ۱ محاسبه نمود [۱]:

$$q_u = 0.5\gamma B N_\gamma \qquad (۱)$$

که درآن q_u ظرفیت باربری پایانی (به صورت فشار)، $\gamma = ۱۵/۸ kN/m^۳$ وزن مخصوص مصالح و N_γ ضریب ظرفیت باربری برای مصالح و تابع زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد. با توجه به نتایج بارگذاری استاتیکی، بار نهائی $Q_u = ۴۶۷/۸ kg$ و در نتیجه $q_u = ۱/۲۱ bar$ بدست می‌آید. از رابطه (۱) مقدار $N_\gamma = ۳۰۷/۶$ بدست می‌آید که با مقادیر گفته شده در کتابهای مهندسی پی برای خاکی با زاویه اصطکاک داخلی نزدیک ۴۵ درجه، برابری دارد.

از طرفی، نتایج استاتیکی صورت گرفته توسط سایر محققین نیز ([۴]، [۵] و [۶]) نسبت دو تا سه برابری ظرفیت باربری در حالت مسلح به غیرمسلح را در شرایطی مشابه با این مدلسازی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۱۲- ب) ملاحظه می‌گردد، با افزودن یک لایه مسلح‌کننده به خاک، ظرفیت باربری آن تا ۲/۵ برابر حالت غیر مسلح افزایش می‌یابد که با نتایج سایر محققین همخوانی دارد.

می‌توان نسبت ظرفیت باربری نهائی (BCR_u) و نسبت نشست نهائی (SR_u) را به صورت رابطه ۲ و ۳ تعریف نمود:

$$BCR_u = (q_u)_R / (q_u)_{UR} \qquad (۲)$$

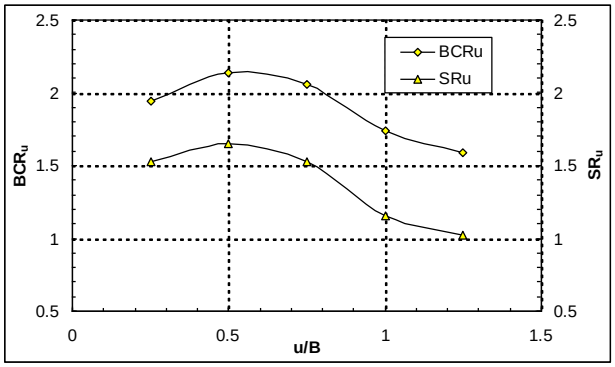
$$SR_u = (S_u)_R / (S_u)_{UR} \qquad (۳)$$

که $(q_u)_R$ و $(q_u)_{UR}$ ظرفیت باربری نهائی حالت مسلح و غیر مسلح و $(S_u)_R$ و $(S_u)_{UR}$ به ترتیب نشست نهائی حالت مسلح و غیر مسلح می‌باشند. نتایج آزمایش‌های صورت گرفته برای تعیین اثر عمق اولین لایه ژئوگرید (u) روی ظرفیت باربری

خاک‌های ماسه‌ای و مقایسه این نتایج با نتیجه آزمایش خاک غیر مسلح برای بررسی اثر تسلیح را می‌توان مطابق شکل (۱۳) جمع‌بندی نمود.

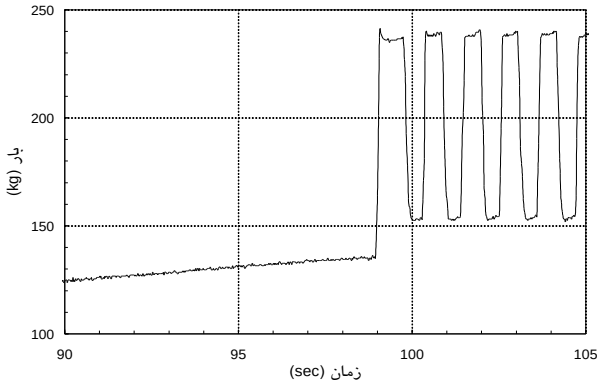
همانطور که ملاحظه می‌گردد، با افزایش عمق اولین لایه مسلح‌کننده، ظرفیت باربری ابتدا تا نسبت بهینه u/B که نزدیک به ۰/۵۵می‌باشد، افزایش و سپس کاهش می‌یابد. روند دیده شده و نسبت بهینه حاصله نیز با نتایج سایر مطالعات ([۴]، [۵] و [۶]) همخوانی دارد.

تغییرات نشست نهائی نیز با تغییرات ظرفیت باربری هم‌خوانی دارد ولی مقدار افزایش نشست نسبت به حالت غیر مسلح کمتر از مقدار افزایش ظرفیت باربری است که نشان‌دهنده افزایش سختی خاک می‌باشد (شکل ۱۳).

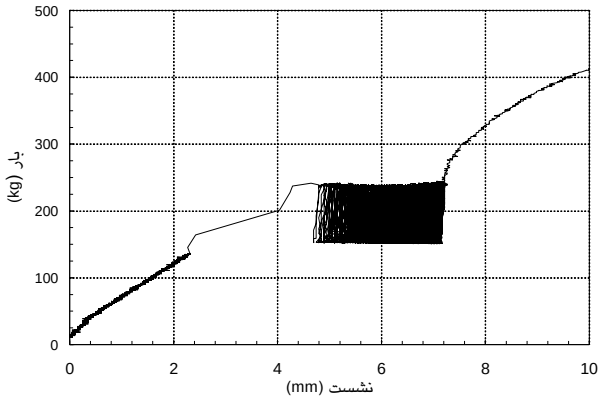


شکل (۱۳): بررسی تأثیر عمق لایه مسلح‌کننده بر روی ظرفیت باربری خاک مسلح

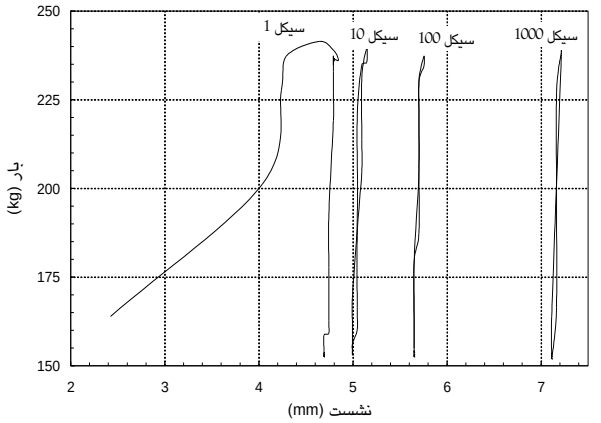
شکل (۱۴- الف) نمونه‌ای از بارگذاری توأم استاتیکی و سیکلی اعمال شده بر پی مسلح توسط این سیستم را نشان می‌دهد. ابتدا بار به صورت استاتیکی افزایش می‌یابد و به میزان مورد نظر می‌رسد. سپس سیستم، بار سیکلی را با دامنه و فرکانس مورد نظر اعمال می‌نماید. مقدار سربار سیکلی باید به گونه‌ای انتخاب گردد که برآیند نیروی وارده به پی به صورت فشاری باشد و جدائی پی از خاک رخ ندهد. همانطور که در شکل (۱۴- ب) ملاحظه می‌گردد، سربار استاتیکی ۱۵۲ kg (تقریبا برابر $q_u/3$) و سربار سیکلی ۸۷ kg (برابر $q_u/5$) انتخاب گردیده‌اند.



(الف)



(ب)



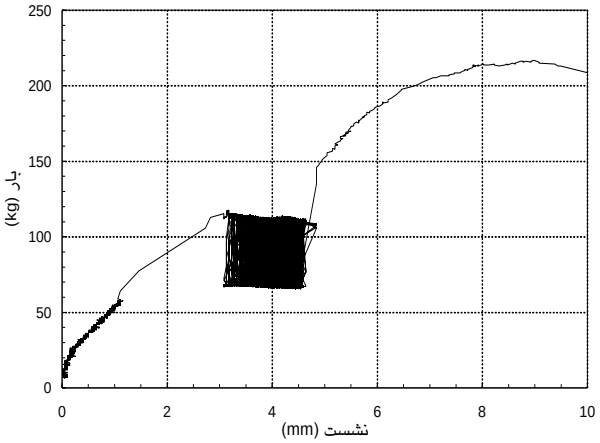
(ج)

شکل (۱۴): نتایج بارگذاری سیکلی بر پی واقع بر خاک مسلح (u/B=۰/۵) (الف) نمودار بار- زمان، (ب) نمودار بار- نشست، (ج) سیکل‌های اول، دهم، صدم و هزارم

در مرحله نخست، نشست‌ها مطابق آزمایش استاتیکی به تدریج افزایش می‌یابد. با اعمال بار سیکلی، نشست‌های رفت و برگشتی در خاک رخ می‌دهد. بخشی از نشست رخ داده الاستیک است و با برداشتن بار حذف می‌گردد. اما بخشی از آن ماندگار است که علت اصلی آن جابجائی دانه‌های خاک

می‌باشد. همانطور که در شکل (۱۴- ب و ج) پیداست، نشست ماندگار در سیکل‌های اولیه (به خصوص سیکل اول) بیشتر است که دلیل آن تراکم پذیری بیشتر خاک در این مرحله می‌باشد ولی مقدار آن برای اغلب سیکلهای بارگذاری در مقایسه با نشست کلی ناچیز است. با اعمال سیکل‌های بیشتر، خاک به تراکم ثابتی رسیده، بارگذاری منجر به شکل گرفتن گوه‌های لغزش می‌گردد.

شکل (۱۵) مربوط به نتایج آزمایش سیکلی روی شالوده غیر مسلح می‌باشد. به صورت مشابه، سربارهای استاتیکی و سیکلی به ترتیب ۶۷ kg (برابر $Q_u/3$) و ۸۷ kg (برابر $q_u/5$) انتخاب گردیده‌اند.



شکل (۱۵): نتایج بارگذاری سیکلی بر پی واقع بر خاک غیر مسلح

مقایسه نشست‌های پایانی سیکل‌های بارگذاری نشان می‌دهد که نشست پی واقع بر خاک مسلح به دلیل سختی بیشتر نسبت به خاک غیر مسلح، از نشست لحظه گسیختگی دورتر است و در نتیجه سیکل‌های بارگذاری بیشتری برای وقوع گسیختگی در خاک مسلح نیاز می‌باشد که با نتایج [۵] مطابقت دارد. باید خاطر نشان کرد که در صورت اعمال سربارهای وارده به شالوده واقع بر خاک مسلح (شکل ۱۴) به شالوده واقع بر خاک غیر مسلح، گسیختگی در اولین سیکل بارگذاری رخ می‌دهد.

جدول (۱): مقایسه نشست‌های شالوده مسلح (S_R) و غیر مسلح (S_{UR}) در سیکل‌های مختلف بارگذاری

شماره سیکل	$S_R/(S_u)_R$ (٪)	$S_{UR}/(S_u)_{UR}$ (٪)	S_R/S_{UR} (٪)
۱	۳۴/۱	۳۹/۱	۸۷/۰
۱۰	۳۶/۳	۴۱/۷	۸۷/۰
۱۰۰	۴۱/۰	۴۶/۸	۸۷/۷
۱۰۰۰	۵۱/۸	۵۹/۲	۸۷/۳

۸- نتیجه

درک رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی و طراحی آنها نیازمند مدلسازی کامل و دقیقی می‌باشد. بدلیل تأثیر پارامترهای مختلف و اندرکنش مصالح و فازهای مختلف موجود در چنین مسائلی، مدلسازی فیزیکی راه بسیار مناسبی برای دستیابی به اطلاعات مورد نظر است.

در مقاله حاضر، جزئیات طراحی و ساخت یک مدل فیزیکی جدید برای مطالعه رفتاری پی‌های نواری واقع بر خاک‌های مسلح تحت بارهای استاتیکی و سیکلی به همراه شرح جزئیات آن، مبنای انتخاب و طراحی بخش‌های مختلف و چگونگی عملکرد هر یک آمده است. کلیه اجزاء این مدل با استفاده از امکانات و روش‌های روز بگونه‌ای طراحی گردیده‌اند که نتایجی کامل و قابل اعتماد به دست دهند.

نتایج بدست آمده، نشان می‌دهد که سیستم یاد شده توانائی اعمال بارگذاری استاتیکی و سیکلی به صورت مجزا و توأم را داراست. مقایسه نتایج بدست آمده با روابط تئوری موجود و نتایج آزمایشگاهی سایر محققین، درستی عملکرد آنرا نشان می‌دهد.

۹- تقدیر و تشکر

مؤلفین این مقاله بر خود لازم می‌دانند تا از زحمات جناب آقای مهندس بهرامی، جناب آقای مهندس رجبی و جناب آقای دکتر شعبانی برای نصب و راه‌اندازی سیستم یاد شده قدردانی و تشکر نمایند.

۱۰- مراجع

[۱] ابریشمی، سعید؛ مطالعه ظرفیت باربری تناوبی خاک-های ماسه‌ای مسلح به ژئوگرید ، پروپوزال دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۵.

[۲] مقدس تفرشی، سید ناصر؛ مطالعه آزمایشگاهی رفتار لوله‌های مدفون تحت شرایط بار سیکلی قائم ؛ پایان‌نامه دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۷۹.

[۳] نیکخواه، محمود؛ مطالعه رانش خاک بر دیوار حائل تحت اثر سربارهای سیکلی ، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۳.

[۴] Chen, Q.; An Experimental Study on Characteristics and Behavior of Reinforced Soil Foundation , PhD Thesis, Louisiana State University, 2007.

[۵] Patra, C. R.; Das, B. M.; Atalar, C.; "Bearing Capacity of Embedded Strip Foundation on Geogrid Reinforced Sand", Geotextiles & Geomembaranes, vol. 23, p.p. 454-462, 2005.

[۶] Patra, C. R.; Das, B. M.; Bhoi, M.; Shin, E.C.; "Eccentrically Loaded Strip Foundation on Geogrid Reinforced Sand", Geotextiles & Geomembaranes, vol. 24, p.p. 254-259, 2006.

[۷] Pfeifle, T. W.; Das, B. M.; "Model Tests for Bearing Capacity in Sand", Journal of Geotechnical Engineering, vol. 105, p.p. 1112-1116, 1979.

[۸] Sitharam, T. G.; Sireesh, S.; "Behavior of Embedded Footings Supported on Geogrid Cell Reinforced Foundation Beds", Geotechnical Testing Journal, ASTM, vol. 28, p.p. 452-463, 2005.