



## نشست پی‌های نواری واقع بر خاک ماسه‌ای تحت اثر بارگذاری سیکلی

محمود نیکخواه شه‌میرزادی<sup>۱\*</sup>، سید مجدالدین میرمحمد حسینی<sup>۲</sup>، سعید ابریشمی<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران  
۲- گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
۳- دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۶  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۱/۱۹  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۰  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵

### کلمات کلیدی:

تراکم ماسه  
عرض پی  
نشست  
سربار استاتیکی  
سربار سیکلی

**خلاصه:** موارد بسیاری وجود دارد که پی سازه علاوه بر بار استاتیکی، در معرض بارگذاری سیکلی قرار می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به زلزله، بار ناشی از ترافیک و ارتعاش ناشی از ماشین آلات اشاره نمود. در این مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر عرض پی، تراکم خاک ماسه‌ای، تعداد سیکل بارگذاری، شدت سربارهای استاتیکی و سیکلی بر نشست سیکلی پی نواری مورد بررسی قرار گرفته است. مصالح خاکی مورد استفاده در این تحقیق، ماسه متوسط بد دانه‌بندی شده (SP) است. مدل پی دارای عرض ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر و طول آن، ۳۴ سانتی‌متر است. سیستم بارگذاری به صورت هوای فشرده است که قابلیت اعمال بار یکنواخت و سیکلی را دارا است. در خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط و متراکم، مقدار متوسط نشست پی در سیکل اول بارگذاری، به ترتیب حدود ۴۶ و ۵۱ درصد کل نشست سیکلی است. خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط زیر پی، در نشستی معادل ۲۲ تا ۲۷ درصد عرض پی دچار گسیختگی شده است. خاک ماسه‌ای متراکم زیر پی، در نشستی معادل ۳۳ تا ۴۳ درصد عرض پی دچار گسیختگی شده است. هر چه سربار کل وارد به خاک کمتر باشد، خاک تعداد سیکل بارگذاری بیشتری را تحمل می‌کند تا دچار گسیختگی شود؛ یعنی با ازدیاد سربار استاتیکی و سیکلی، خاک در تعداد سیکل کمتری دچار گسیختگی شده است. با توجه به ایجاد نشست ماندگار در پی تحت اثر بارهای سیکلی، در طراحی پی‌ها تحت اثر این نوع بار، مقدار نشست پیش‌بینی شده حتماً بایستی از مقدار مجاز آن کمتر باشد.

### ۱- مقدمه

فصل مشترک بین زمین و سازه، پی نامیده می‌شود. پی‌های نواری به طور گسترده‌ای برای انتقال بار روسازه به خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. بعد از ساخت پی، آن‌ها تحت تاثیر بارهای ثقلی و زنده ناشی از روسازه قرار دارند. در بیشتر ساختمان‌های مسکونی، بار زنده خیلی کمتر از بار ثقلی است. با این حال، در برخی سازه‌ها، مانند مخازن نفتی و سازه‌های مربوط به تعمیر کشتی، بارهای زنده بیشتر از بارهای مرده است و با گذشت زمان تغییر می‌کند، در این حالت، خاک تحت تاثیر بار سیکلی قرار دارد. موارد بسیاری وجود دارد که پی سازه‌ها علاوه بر بارگذاری استاتیکی، در معرض بارگذاری سیکلی قرار می‌گیرند که از آن جمله می‌توان به زلزله، بار ناشی از ترافیک و ارتعاش ناشی از ماشین آلات اشاره نمود. ماهیت متفاوت بارهای دینامیکی، باعث عملکرد متفاوت توده خاک در مقایسه با شرایط استاتیکی می‌شود. به عنوان مثال، سیکل‌های متعدد بارگذاری و باربرداری، باعث ایجاد نشست‌های ماندگار در پی می‌شود که می‌تواند بهره‌برداری از سازه را

مختل سازد یا باعث گسیختگی شود. به خصوص که پیشرفت‌های صورت گرفته در صنعت و فناوری، باعث افزایش شدت بارهای وارده شده است. در طراحی پی‌های سطحی، محاسبه نشست و ظرفیت باربری نهایی از اهمیت زیادی برخوردار است. پیش‌بینی نشست پی‌ها، یکی از مهم‌ترین و مشکل‌ترین مسائل پیش روی مهندسی ژئوتکنیک است. میزان نشست پی بستگی به عوامل مختلفی چون عرض و عمق استقرار پی، نوع خاک، سختی پی، سختی روسازه، نوع و میزان بار وارده دارد. پی‌های ماشین آلات، علاوه بر بارهای استاتیکی، تحت اثر بارهای سیکلی قرار دارند. بر اثر اعمال بارهای سیکلی، پی دچار نشست‌های افزون بر نشست‌های ناشی از بارهای استاتیکی می‌شود. تعیین نشست پی‌ها تحت بارهای استاتیکی و سیکلی، یکی از مهم‌ترین مباحث در مهندسی ژئوتکنیک است. اگر چه تاکنون مطالعات زیادی بر روی رفتار پی‌های سطحی تحت بارهای استاتیکی انجام شده است، اما نشست پی‌ها تحت بارگذاری سیکلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی دیگر، پی سازه‌ها از بخش‌های مهمی هستند که تحت اثر بارهای سیکلی قرار دارند؛ بنابراین بررسی آزمایشگاهی و دقیق اثر بار

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.nikkhah@semnaniau.ac.ir



سیکلی بر رفتار پی‌ها، از مسائل مهم و ضروری به شمار می‌رود. جهت درک رفتار خاک تحت اثر بارهای سیکلی مطالعاتی انجام شده است. تا کنون پژوهشگرانی به مطالعه رفتار پی‌ها پرداخته‌اند.

رایموند و کموس<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۸ [۱] نتایج آزمایش‌های سیکلی صورت گرفته روی مدل پی نواری با عرض ۷۵ و طول ۲۲۸ میلی‌متر متکی واقع بر مصالح دآن‌های (ماسه متراکم) تحت بارگذاری سیکلی پله‌ای با شرایط سربار استاتیکی برابر صفر با فرکانس ۱ هرتز را ارائه نمودند. ایشان با این توضیح این که نشست سیکل اول، بیشتر به دلیل قرارگیری پی روی خاک است تا رفتار فونداسیون، به این نتیجه رسیدند که نشست دائمی، با افزایش تعداد سیکل و مقدار آن افزایش می‌یابد. فراگسی و لاتون<sup>۲</sup> [۲] به مطالعه اثر جرم مخصوص ماسه روی ظرفیت باربری پی نواری پرداختند و مشاهده کردند که گسیختگی برشی کلی در نشستی حدود ۱۲ درصد عرض پی رخ می‌دهد. خینگ و همکاران<sup>۳</sup> [۳] با استفاده از مدل فیزیکی آزمایشگاهی، به بررسی ظرفیت باربری پی نواری صلب واقع بر خاک ماسه‌ای پرداختند و مشاهده کردند که مقدار نشست حداکثر در حدود ۱۰ درصد عرض پی نواری به وجود می‌آید. پیوری<sup>۴</sup> و همکاران [۴] و شین<sup>۵</sup> و همکاران [۵] با انجام آزمایش‌هایی بر روی پی مربعی با ابعاد ۷۶/۲ میلی‌متر و هم‌چنین داس و شین<sup>۶</sup> [۶] با انجام آزمایش‌های مشابهی بر روی پی نواری به عرض ۷۶/۲ میلی‌متر، به بررسی نشست ماندگار<sup>۷</sup> خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری سیکلی پرداختند. در این سه پژوهش، ابتدا سربار استاتیکی و سپس سربار سیکلی به صورت پله‌ای و با فرکانس ۱ هرتز با دامنه مشخص به پی اعمال شد. نتایج این مطالعات نشان داد که به ازای یک مقدار بار استاتیکی و تعداد سیکل بارگذاری - باربرداری معین، با افزایش سربار سیکلی، نشست سیکلی پی مربعی افزایش می‌یابد که برای سربار استاتیکی و تعداد سیکل معین، مقدار نسبت نشست دینامیکی، با ازدیاد سربار دینامیکی، افزایش می‌یابد. ابریشمی و میر محمد حسینی [۷] چگونگی طراحی و ساخت مدل فیزیکی جهت مطالعه رفتار پی‌های نواری واقع بر خاک تحت اثر بارگذاری‌های استاتیکی و سیکلی را تشریح نمودند. در این تحقیق، اجزاء مختلف سیستم یاد شده، مبنای انتخاب و چگونگی عملکرد آن‌ها توضیح داده شده است. سپس، ضمن ارائه نتایج به دست آمده، با مقایسه نتایج حاصل از مدل با سایر مدل‌های آزمایشگاهی و تحلیلی،

صحت عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر دانسیته نسبی خاک بر ظرفیت باربری در حالت استاتیکی توسط دس و همکاران<sup>۸</sup> [۸]، مصلی‌نژاد و همکاران [۹]، سیریش و همکاران<sup>۹</sup> [۱۰] و محمد<sup>۱۰</sup> [۱۱] روی مدل فیزیکی تحقیق شده است. نتایج این تحقیقات نشان داد که با ازدیاد جرم مخصوص خاک، ظرفیت باربری پی افزایش یافته است. الصواف و نذیر<sup>۱۱</sup> [۱۲] با انجام آزمایش‌های کوچک مقیاس، تأثیر جرم مخصوص خاک، مقدار بار استاتیکی اولیه و تعداد سیکل بارگذاری را روی یک پی مستطیلی به طول ۱۲ و عرض ۸ سانتی‌متر را در یک خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با ازدیاد تعداد سیکل بارگذاری، مقدار نشست سیکلی افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان سربار سیکلی و تعداد سیکل‌های بار، نشست پی افزایش یافته است. برای تعداد سیکل‌های بارگذاری یکسان، با ازدیاد بار استاتیکی اولیه، نشست سیکلی افزایش می‌یابد. برای بار استاتیکی اولیه و دانسیته نسبی یکسان، نشست دائمی سیکلی با ازدیاد تعداد سیکل بارگذاری، افزایش می‌یابد. نشست تجمعی با ازدیاد تعداد سیکل بارگذاری، با آهنگ کاهش تدریجی افزایش می‌یابد. بیشتر نشست در اثر سیکل‌های اولیه به وقوع می‌پیوندد. مقدس تفرشی و داوسون<sup>۱۲</sup> [۱۳]، ظرفیت باربری پی نواری به طول ۱۴/۸ و عرض ۷/۵ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای بدانه‌بندی شده را تحت اثر بارهای استاتیکی و سیکلی، مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که تحت اثر بارهای سیکلی، رفتار پی بیشتر تحت تأثیر سیکل‌های اولیه قرار دارد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بیشترین میزان نشست، در ۱۰ سیکل اول بارگذاری می‌باشد و از طرفی با ازدیاد نسبت بار سیکلی به استاتیکی، مقدار حداکثر نشست پی افزایش می‌یابد. هاتف و همکاران [۱۴]، رفتار پی مربعی به ضلع ۲۰ سانتی‌متر را در خاک ماسه‌ای خوب دانه‌بندی شده مورد بررسی قرار دادند. در کلیه موارد، پی ابتدا تحت اثر بار استاتیکی ثابت برابر با وزن خود سازه قرار گرفته و سپس بار سیکلی به نسبت‌های مختلف بار نهایی بر روی آن اعمال شده است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با ازدیاد مقدار بار سیکلی، مقدار نشست پی نیز افزایش یافته است. ابریشمی [۱۵] با انجام آزمایش‌های سیکلی بر روی پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای با فرکانس بارگذاری زیر ۱ هرتز نشان داد، تغییرات فرکانس بارگذاری در محدوده‌ی کوچک‌تر از ۱ هرتز، اثر قابل توجه و آشکاری بر رفتار توده خاک دانه‌ای نداشته است. او علت آن را فاصله

8 Dash et al.  
9 Sireesh et al.  
10 Mohamad  
11 Sawwaf & Nazir  
12 Dawson

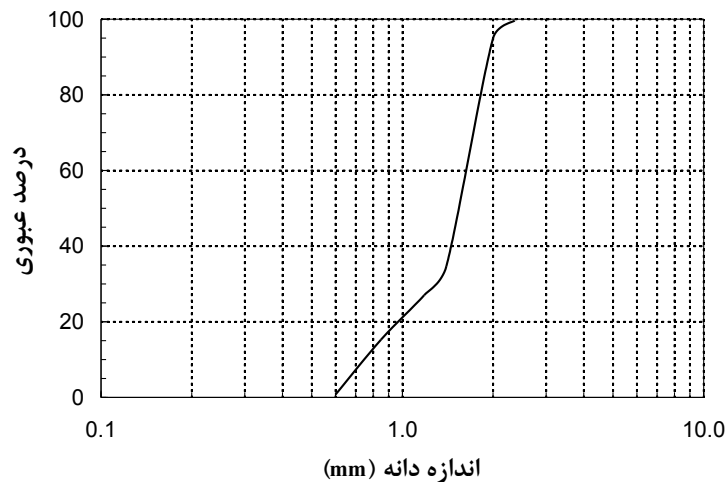
1 Raymond & Komos  
2 Fragaszy & Lawton  
3 Khing et al.  
4 Puri et al.  
5 Shin et al.  
6 Das & Shin  
7 Permanent Settlement

باربری نهایی پی‌های مربعی و دایره‌ای با سطح مقطع یکسان، تقریباً با هم برابرند. بوشهریان و همکاران [۲۲] تأثیر اندازه هر بعد پی مربعی (۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر) در خاک ماسه‌ای خوب دانه‌بندی شده بر رفتار ظرفیت باربری-نشست را در حالت استاتیکی و سیکی، مورد بررسی قرار دادند. در بارگذاری سیکی، با ازدیاد تعداد سیکل بارگذاری و همچنین بعد پی مربعی، مقدار نشست سیکی افزایش یافته است. تبری و همکاران [۲۳] رفتار پی دایره‌ای به قطر ۳۰ سانتی‌متر را در خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها در قالب نمودارهای بار-نشست و فشار نقاط مشخصی از کف پی در برابر نشست ارائه شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش فاصله از مرکز پی، مقادیر فشار عمودی وارد بر کف پی، کاهش می‌یابد. تبری و همکاران [۲۴]، اثر فرکانس بارگذاری بر نشست و ظرفیت باربری خاک دانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که بارگذاری سیکی، باعث ایجاد نشست‌های ماندگار در توده خاک شده و منجر به ازدیاد تراکم و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری نسبت به حالت استاتیکی می‌شود ولی تغییرات فرکانس، تأثیری بر ظرفیت باربری پس تناوبی ندارد. فرکانس بارگذاری تأثیری بر توزیع فشار وارد بر پی نیز نداشته است. فتاح<sup>۲</sup> و همکاران [۲۵]، تأثیر شکل و عمق استقرار پی واقع بر خاک ماسه‌ای خشک بدانه‌بندی شده را تحت اثر بار سیکی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق پی مربعی به ابعاد ۱۰ و پی دایره‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر در سه عمق استقرار مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که با ازدیاد عمق استقرار، نشست سیکی کاهش یافته و مقدار نشست پی دایره‌ای تا ۵۰ درصد، بیشتر از پی مربعی است. جایالس<sup>۴</sup> و همکاران [۲۶]، تأثیر ضخامت لایه اساس دانه‌ای بر نشست سیکی پی دایره‌ای به قطر ۲۰ سانتی‌متر را مورد بررسی قرار دادند. پس از اعمال ۵۰۰۰ سیکل بارگذاری، نشست پی بر خاک با ضخامت لایه اساس ۲۰ سانتی‌متری برابر ۲۸ میلی‌متر بوده است. این نشست برای ضخامت‌های ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر، به ترتیب برابر ۲۲ و ۱۷ میلی‌متر بوده است؛ یعنی با افزایش ضخامت لایه اساس، مقدار نشست سیکی کاهش یافت. راجا<sup>۵</sup> و شوکلا [۲۷]، اثر تعداد سیکل بارگذاری و مقدار سربار سیکی بر پی نواری به طول ۴۴ سانتی‌متر و عرض ۸ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای بدانه‌بندی شده با تراکم نسبی ۷۰ درصد را مورد بررسی قرار دادند. ظرفیت باربری نهایی این پی برابر ۹۶/۶ کیلوپاسکال بود. این پی تحت اثر سربارهای سیکی ۵۰، ۷۰

فرکانس بارگذاری با فرکانس طبیعی سیستم بیان نمود. میر محمد حسینی و ابریشمی [۱۶]، اثر سرعت بارگذاری استاتیکی بر ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر خاک ماسه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. ایشان به این نتیجه رسیدند که افزایش سرعت بارگذاری، منجر به کاهش اندک ولی قابل مشاهده‌ی ظرفیت باربری و افزایش نسبی نشست‌های نهایی خاک می‌شود. مقدس تفرشی و داوسون [۱۷]، با انجام آزمایش‌های کوچک مقیاس بر روی پی نواری به عرض ۷/۵ سانتی‌متر واقع بر ماسه، به بررسی نشست خاک تحت بارگذاری سیکی پرداختند و مقایسه رفتار استاتیکی و سیکی پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای را انجام دادند. در طول کل آزمایش‌ها، دانسیته نسبی خاک ماسه‌ای برابر ۷۲ درصد بوده است. فرکانس بار سیکی برابر ۱ هرتز بود. مقدار نشست پی تحت اثر بار سیکی در محدوده ۹ تا ۱۸ درصد بود. مقدار نشست پلاستیک تجمعی در اثر بارهای سیکی، به مراتب بیشتر از مقدار آن تحت اثر بارگذاری استاتیکی یکنواخت است. با ازدیاد تعداد سیکل بارگذاری، نرخ نشست پی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. برای همه آزمایش‌ها، بخش بزرگی از نشست کل پی (۳۵ تا ۶۰ درصد) در ده سیکل اول بارگذاری رخ داده است. ابوفرسخ و همکاران<sup>۱</sup> [۱۸] تأثیر پی‌های با شکل مربعی به ابعاد ۱۵/۲ سانتی‌متر و مستطیلی به عرض ۱۵/۲ و طول ۲۵/۴ سانتی‌متر را در خاک ماسه‌ای تحت اثر بار استاتیکی، مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که ظرفیت باربری نهایی پی مربعی، بیشتر از پی مستطیل شکل است. هوتی و همکاران<sup>۲</sup> [۱۹] با انجام آزمایش‌هایی مشابه بر روی پی مربعی به ابعاد ۱۰ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای، به بررسی اثر بارگذاری سیکی بر رفتار خاک پی پرداختند و دریافتند که با افزایش تراکم نسبی خاک، عملکرد پی بهبود یافته و این امر سبب جلوگیری از گسیختگی برشی خاک زیر پی می‌شود. شریفی و مقدس [۲۰]، رفتار یک پی دایره‌ای به قطر ۱۱/۳ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای خوب دانه‌بندی شده را تحت بارگذاری سیکی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که نشست در سیکل‌های اول بارگذاری، درصد قابل توجهی از نشست نهایی در انتهای بارگذاری را شامل می‌شود، که این امر مبین اثر سیکل‌های اولیه به عنوان یک ویژگی رفتاری مهم بستر تحت بارگذاری سیکی است. از طرفی نرخ افزایش نشست با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، کاهش می‌یابد. بدخشان و نورزاد [۲۱] تأثیر پی‌های با شکل مربعی به ابعاد ۱۰/۶ سانتی‌متر و دایره به قطر ۱۲ سانتی‌متر را در خاک ماسه‌ای و تحت اثر بار استاتیکی، مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که ظرفیت

3 Fattah  
4 Jayalath  
5 Raja

1 Abu Farsakh et al.  
2 Hotti et al.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه

Fig. 1. Particle size distribution curve of the sand

ماسه‌ای تحت بارگذاری استاتیکی و سیکی و تأثیر عوامل مختلف روی رفتار خاک پرداخته شده است. در این مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر عرض پی، تراکم خاک ماسه‌ای، تعداد سیکل بارگذاری، شدت سربارهای استاتیکی و سیکی بر نشست سیکی پی نواری در بارگذاری دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این بخش به معرفی مشخصات مصالح، دستگاه آزمایش، نحوه آماده‌سازی و روش انجام آزمایش‌ها، الگوی بارگذاری و آزمایش‌های انجام شده پرداخته شده است.

### ۲-۱- مشخصات مصالح

#### ۲-۱-۱- ماسه

مصالح ماسه‌ای انتخابی، از محصولات شرکت تاوان سیلیس گرمسار است که از سنگ سیلیس معدن فیروزه‌کوه در اندازه‌های مختلف تهیه می‌گردد. دانه‌های این ماسه سیلیسی<sup>۱</sup> تیز گوشه و سطوح آن زبر است.

نتایج آزمایش دانه‌بندی نشان داد که کلیه دانه‌های مصالح از الک نمره ۸ می‌گذرد و روی الک نمره ۳۰ باقی می‌ماند (شکل ۱). بر این اساس و مطابق تعریف ASTM D422، مصالح خاکی مورد استفاده در این تحقیق، ماسه

و ۹۰ درصد ظرفیت باربری نهایی قرار گرفت. در سیکل صدم بارگذاری، مقدار نشست نسبی کل تحت اثر این سربارهای سیکی، به ترتیب ۷، ۱۲ و ۱۷ درصد بود. برای هر سه مقدار سربار سیکی وارده، مقدار نشست در سیکل‌های اولیه (۱ تا ۲۰) قابل توجه بود.

با توجه به اهمیت و نقش کلیدی پی در سازه‌ها، نیاز مبرمی به انجام تحقیقات بیشتر در قالب مدل‌سازی فیزیکی، جهت حصول یک جمع‌بندی در زمینه رفتار استاتیکی و نیز روشن ساختن جنبه‌های مختلف رفتار دینامیکی آن تحت اثر بارگذاری سیکی پی‌ها احساس می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده در بخش قبلی، مطالعات کمی بر روی نشست پی‌های سطحی در معرض بارگذاری سیکی واقع بر خاک ماسه‌ای انجام شده است. در مقایسه با مطالعات وسیعی که در رابطه با ظرفیت باربری استاتیکی پی‌های سطحی انجام شده است، مطالعات محدودی در زمینه ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی تحت اثر بارهای دینامیکی صورت گرفته است. همچنین اثر بارگذاری همزمان استاتیکی و سیکی نیز بسیار کم در تحقیقات انجام شده مورد مطالعه قرار گرفته است. لذا انجام تحقیق جامع‌تری که بتواند تأثیر پارامترهای مهم بر رفتار دینامیکی پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای را به خوبی نمایان سازد، ضروری به نظر می‌رسد، بنابراین در این تحقیق، با استفاده از دستگاه آزمایش، نشست پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای تحت اثر سربارهای استاتیکی و سیکی مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق حاضر با استفاده از مدل فیزیکی، به تحلیل و بررسی رفتار پی واقع بر خاک

جدول ۱. خلاصه مشخصات فیزیکی خاک ماسه‌ای

Table 1. Summary of physical characteristics of sandy soil

مقدار	واحد	علامت اختصاری	نام مشخصه
۲/۱۸	-	$C_u$	ضریب یکنواختی
۱/۳۸	-	$C_c$	ضریب انحناء منحنی دانه‌بندی
۰/۷۵	mm	$D_{10}$	اندازه مؤثر دانه‌ها
۱/۲۹	mm	$D_{30}$	
۱/۵۴	mm	$D_{50}$	اندازه متوسط دانه‌ها
۱/۶۳	mm	$D_{60}$	
۰/۸۷۸	-	$e_{max}$	نسبت تخلخل حداکثر
۰/۵۷۵	-	$e_{min}$	نسبت تخلخل حداقل
۲/۶۷	-	$G_s$	چگالی ذرات جامد
۱/۴۲	g/cm <sup>3</sup>	$(\rho_d)_{min}$	جرم مخصوص خشک حداقل
۱/۷۱	g/cm <sup>3</sup>	$(\rho_d)_{max}$	جرم مخصوص خشک حداکثر

پی، ۳۴ سانتی‌متر و نزدیک به اندازه‌ی عرض محفظه‌ی خاک و جلوگیری از درگیری مکانیکی بین مدل و محفظه حین آزمایش در نظر گرفته شده است. جهت کاهش اصطکاک مدل پی با خاک، سطوح جانبی آن کاملاً صاف و صیقلی شده است. کف پی با چسباندن یک لایه‌ی بسیار نازک مصالح ماسه‌ای به کمک چسب اپوکسی، زبر شده است. مدل پی بر اساس بررسی سایر تحقیقات مشابه، مدل‌سازی عددی و رسیدن به شرایط کرنش مسطح، طراحی و ساخته شده است؛ طوری که سختی پی در امتداد طولی قابل ملاحظه، خیزی پی در این امتداد بسیار ناچیز و تغییر شکل مدل در صفحه افقی (سطح تماس) تقریباً یکنواخت باشد. در شکل ۲، یک مدل پی نشان داده شده است.

۲-۲-۲- محفظه خاک

شکل و ابعاد محفظه خاک بایستی متناسب با شکل و ابعاد مدل پی باشد. بنابراین، محفظه‌ای به صورت مکعب مستطیل مناسب است. طول مخزن خاک متناسب با عرض مدل پی،  $B$ ، طوری انتخاب شد که گوه‌های لغزش در شرایط حدی بتوانند به صورت کامل شکل گیرند. یعنی گوه‌های لغزش ناشی از بارگذاری پی، با دیواره‌های مخزن برخورد نداشته باشد و تأثیر شرایط مرزی روی نتایج مدل‌سازی تا حد امکان کاهش یابد. حداقل طول مورد نیاز برای محفظه خاک، با توجه به تحلیل‌های عددی صورت گرفته با نرم‌افزار و

متوسط بدانه‌بندی شده (SP) است. ماسه مذکور، خشک و دارای دانه‌بندی یکنواخت است تا در ضمن بارش، تفکیک دانه‌ها رخ ندهد و تحلیل نتایج نیز آسان‌تر شود. سایر پارامترهای فیزیکی بر اساس آزمایش‌های استاندارد تعیین و نتایج حاصله در جدول ۱ ارائه شده است.

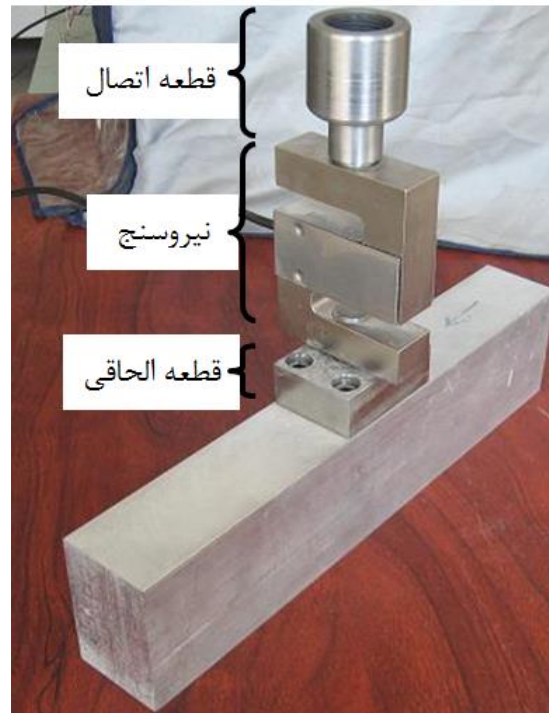
نزدیکی مقادیر نسبت تخلخل حداکثر و حداقل، نشان می‌دهد که حصول تراکم‌های مختلف دشوار است. با توجه به اهداف تحقیق و با توجه به خصوصیات سیستم بارش، جرم مخصوص  $1/55 \text{ g/cm}^3$  معادل دانسیته نسبی  $50/5$  درصد، یعنی تراکم متوسط و جرم مخصوص  $1/62 \text{ g/cm}^3$  معادل دانسیته نسبی  $71/7$  درصد، یعنی حالت متراکم انتخاب شده است.

۲-۲-۲- دستگاه آزمایش

۲-۲-۱- مدل پی

مدل پی به منظور تحقق شرایط کرنش مسطح باید دارای سختی کافی باشد. از طرفی باید سبک باشد تا قرار گرفتن آن روی خاک، تنش اولیه‌ی ناچیزی ایجاد کند و کار کردن با آن راحت باشد. به همین منظور برای ساخت مدل پی، از آلومینیوم استفاده شده است. عرض مدل پی با توجه به طول محفظه‌ی خاک و برای کاهش اثر دیواره‌ها و تشکیل کامل گوه‌های لغزش،  $5$ ،  $7/5$  و  $10$  سانتی‌متر انتخاب شده است. برای رعایت صلبیت، ضخامت مدل پی نیز معادل  $7/5$  سانتی‌متر انتخاب شده است. طول مدل





شکل ۲. مدل پی نواری با عرض ۵ cm، طول ۳۴ cm و ارتفاع ۷/۵ cm به همراه سلول بار و ملحقات مربوطه

Fig. 2. Strip foundation model with width of 5 cm, length of 34 cm and height of 7.5 cm with load cell and related accessories

بارش و بارگذاری فراهم می‌سازد.

#### ۲-۲-۳- سیستم بارش

نمونه‌سازی، یکی از مراحل مهم در مطالعات آزمایشگاهی است. در این تحقیق، برای به دست آوردن نمونه‌ی همگن با دانسیته نسبی مشخص و تکرارپذیری شرایط آزمایشگاهی، روش بارش ماسه انتخاب شده که خاک از ارتفاعی معین و با سرعتی ثابت داخل محفظه ریخته می‌شود.

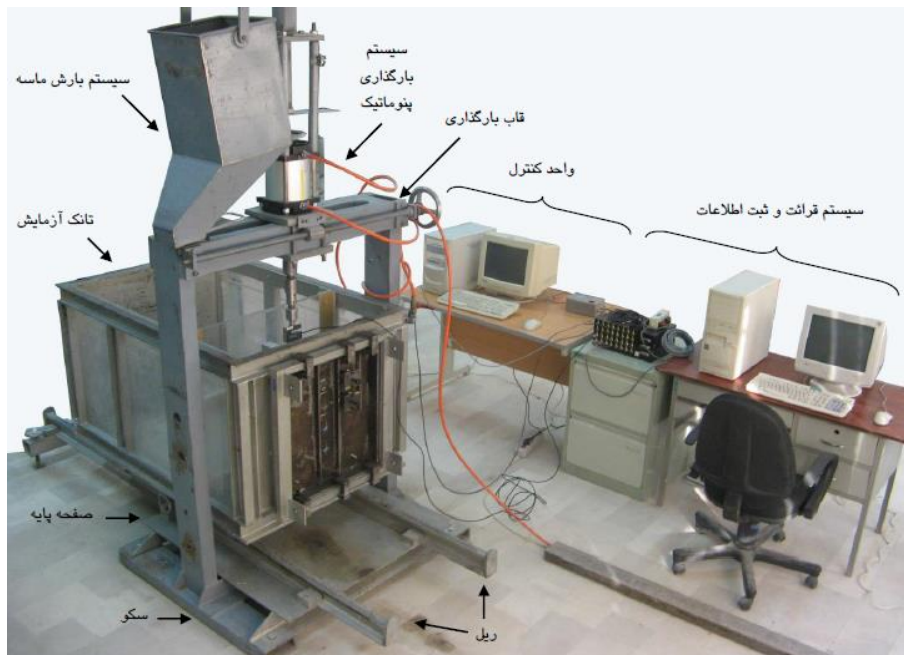
#### ۲-۲-۴- سیستم بارگذاری

سیستم بارگذاری به صورت هوای فشرده است. سیلندر دو سر شفت دو طرفه، توسط شیر متناسب‌ساز برقی که نوعی شیر تنظیم فشار است، کنترل می‌شود. این شیر به وسیله‌ی کارت آنالوگ به دیجیتال و نرم‌افزار توسعه یافته‌ی سیستم رایانه‌ای فرمان می‌گیرد. بر این اساس، می‌توان بار استاتیکی را تا میزان معین و با سرعت مورد نظر به صورت خطی بر روی مدل پی اعمال کرد.

با استناد به تحقیقات قبلی برای خاک، ۵ برابر عرض پی است. جهت حصول شرایط کرنش مسطح، باید عرض محفظه خاک تقریباً برابر طول مدل پی باشد. عرض محفظه برابر  $34/2$  سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

ارتفاع محفظه خاک باید طوری انتخاب شود که کف صلب، تأثیر چندانی روی نتایج نداشته باشد. بر اساس مطالعات انجام شده روی پی‌ها، در صورتی که عمق لایه صلب از کف پی بیش از دو برابر عرض پی باشد، تأثیری روی ظرفیت باربری نخواهد گذاشت. در نهایت، با توجه به موارد فوق و موارد متعارف در متون فنی، محفظه‌ای با ابعاد داخلی طول ۸۰ cm، عرض ۳۴/۲ cm و ارتفاع ۷۵ cm در داخل محفظه موجود تعبیه گردیده است.

به منظور ایجاد صلبیت مورد نیاز و کاهش تغییر شکل‌های محفظه به مقدار ناچیز، قاب این محفظه با پروفیل‌های فلزی ساخته شده است. سه وجه جانبی از ورق پلکسی گلاس ساخته شده که امکان مشاهده‌ی چگونگی ساخت نمونه و تغییر شکل خاک را فراهم می‌سازد. وجه چهارم (یکی از وجوه طولی)، از ورق فلزی ساخته شده ولی برای کاهش اصطکاک جدار با مصالح، از داخل ورق پلکسی گلاس به آن متصل شده است. محفظه خاک روی ریلی قرار دارد که امکان جابه‌جایی آن برای عملیات



شکل ۳. مجموعه کامل سیستم آزمایشگاهی رفتار پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای تحت اثر سربار سیکلی

Fig. 3. Complete set of laboratory system of strip foundation behavior located on sandy soils under the effect of cyclic overhead

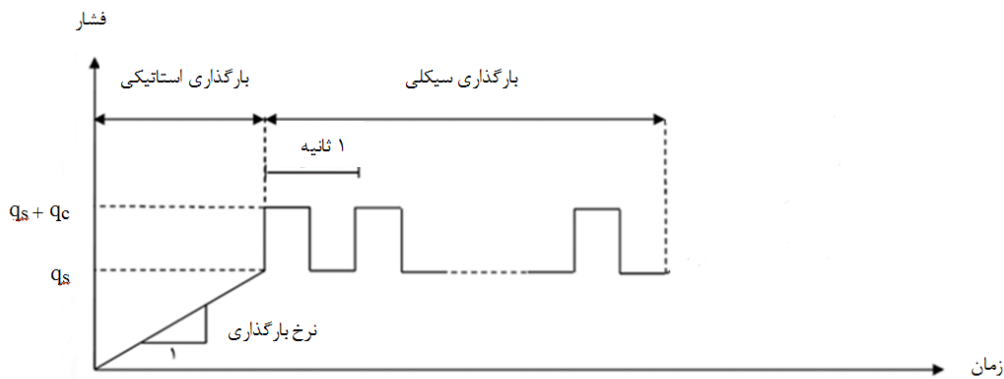
### ۲-۳- آماده‌سازی و روش انجام آزمایش‌ها

ابتدا محفظه خاک، زیر سیستم بارش مستقر می‌شود. خاک از صفحه‌ی مشبک با قطر چشمه‌های ۱۰ میلی‌متر در ۴ لایه به ضخامت ۱۴ سانتی‌متر و از دو ارتفاع ثابت، داخل محفظه به روش بارش، ریخته می‌شود. ارتفاع بارش با توجه به کالیبراسیون سیستم بارش به گونه‌ای انتخاب شده که تغییرات آن تأثیر چندانی بر جرم مخصوص ماسه نداشته باشد و بتوان دو حالت دانسیته نسبی متوسط (۵۰/۵ درصد) و متراکم (۷۱/۷ درصد) را به دست آورد. ضخامت لایه‌ی بارش نیز با توجه به حجم مخزن بارش و محدوده‌ی عدم تغییرپذیری جرم مخصوص از ارتفاع ثابت انتخاب شده است. جرم مخصوص تمامی لایه‌ها پس از آزمایش به وسیله‌ی ظروف صلبی که در گوشه‌های محفظه جاگذاری شده‌اند، کنترل می‌شود. عملیات بارش تا رسیدن به سطح نهایی ادامه می‌یابد. پس از اتمام عملیات بارش، عملیات تسطیح بدون دست‌خوردگی عمق خاک و با دقت خاصی انجام می‌شود تا سطح خاک کاملاً تراز و برای قرار گرفتن مدل پی مناسب باشد. سپس

### ۲-۲-۵- سیستم قرائت و ثبت داده‌ها

از حسگر اندازه‌گیری تغییر مکان با دامنه‌ی جابه‌جایی ۱۰ سانتی‌متر و با قابلیت اندازه‌گیری جابه‌جایی تا سرعت ۱۰ متر بر ثانیه با دقت ۰/۰۵ میلی‌متر برای اندازه‌گیری نشست و از حسگر اندازه‌گیر نیروی دینامیکی (سلول بار) با شکل S و با ظرفیت ۲/۵ تن برای اندازه‌گیری بار محوری اعمالی با دقت ۰/۶ کیلوگرم استفاده شده است. چهار سنسور اندازه‌گیری فشار عمودی در وجه جانبی و یک سنسور در کف، به منظور اندازه‌گیری فشار، نصب شده است. طراحی و ساخت این سنسور نیز برای آزمایش‌های سریع چنان است که قادر به اندازه‌گیری و ثبت تغییرات سریع فشار باشد.

داده‌های سنسورها به صورت آنالوگ توسط یک سیستم ثبت داده‌های ۳۲ کاناله‌ی دینامیکی، که توانایی قرائت ۵۰ داده از هر کانال در یک ثانیه را دارد، قرائت شده و به سیگنال‌های دیجیتال تبدیل می‌شود. در شکل ۳ مجموعه کامل سیستم آزمایشگاهی رفتار پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای تحت اثر سربار سیکلی نشان داده شده است.



شکل ۴. نمودار فشار- زمان تولید شده با سیستم بارگذاری

Fig. 4. Pressure – time diagram produced by the loading system

خاک دانه‌ای نداشته است. البته به دلیل تراکم‌پذیری هوا و اصطکاک سیلندر، اعمال بار با فرکانس‌های بالا دشوار است و کالیبراسیون سیستم نیز دچار مشکل می‌شود. به همین دلیل بر اساس محدوده فرکانس تحقیقات قبلی، قابلیت دستگاه بارگذاری و آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، فرکانس بارگذاری سیکلی برابر ۱ هرتز انتخاب شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نشست پی در سیکل اول بارگذاری

یک پی سطحی، بسته به نوع سازه فوقانی و نوع بارگذاری، ممکن است تحت اثر بارهای دینامیکی واقع شود. بارگذاری دینامیکی ممکن است شامل انواع بارگذاری، نظیر بارگذاری یکنواخت<sup>۱</sup> با سرعت‌های متغیر، بارگذاری سیکلی<sup>۲</sup> و بارگذاری گذرا<sup>۳</sup> باشد. پی‌ها ممکن است در اثر اعمال بار سیکلی، متحمل نشست دائمی شوند. از آنجایی که نشست پی بعد از اعمال اولین سیکل بارگذاری عمدتاً به لحاظ جای‌گذاری پی بوده تا رفتار آن، لذا بایستی تأثیر پارامترهای مهم را روی آن در نظر گرفت و سپس نشست پی را در اثر اعمال سیکل‌های بیشتر بارهای تناوبی مورد بررسی قرار داد. در ادامه، تأثیر شدت سربارهای استاتیکی، سیکلی و همچنین تراکم خاک ماسه‌ای بر نشست پی بررسی شده است.

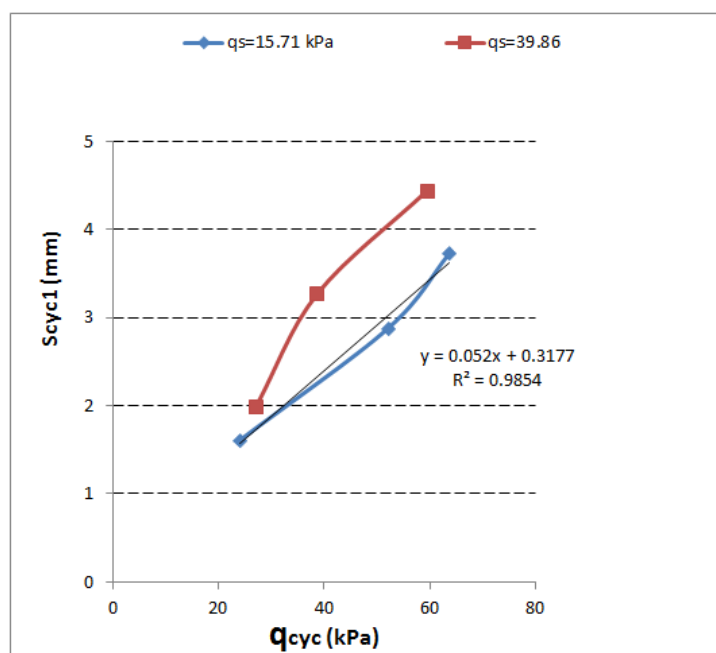
محفظه‌ی خاک به آرامی حرکت داده شده و زیر قاب بارگذاری، در محل خود ثابت می‌شود. مدل پی که قبلاً به شافت سیلندر بارگذاری متصل شده، به آرامی پایین می‌آید و روی سطح خاک قرار می‌گیرد. دستور مورد نظر، شامل نرخ بارگذاری و بیشینه بار اعمالی به سیستم کنترل داده می‌شود. هم‌زمان سیستم کنترل و سیستم قرائت و ثبت داده‌ها فعال شده و تا پایان انجام آزمایش، دستور مورد نظر پیگیری می‌شود و داده‌های مورد نظر به منظور تحلیل نتایج، قرائت و ثبت می‌شوند.

#### ۳-۲- الگوی بارگذاری استاتیکی و سیکلی

با توجه به کنترل فشار داخل سیلندر، سیستم بارگذاری به صورت کنترل فشار عمل می‌کند. شکل ۴ نمونه‌ای از بار استاتیکی-سیکلی اعمال شده توسط این سیستم را نشان می‌دهد. بارگذاری اعمالی شامل دو مرحله است. در مرحله اول، بارگذاری استاتیکی به صورت کنترل فشار تا رسیدن به فشار استاتیکی ( $q_s$ ) مورد نظر انجام می‌شود و در مرحله دوم، بارگذاری سیکلی تا رسیدن به دامنه سربار سیکلی ( $q_c$ ) انجام شده است. این بارگذاری تا رسیدن به تعداد سیکل مورد نظر یا وقوع گسیختگی در خاک زیر پی ادامه می‌یابد. برای انتخاب فرکانس بارگذاری، تعدادی آزمایش سیکلی بر روی پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای با فرکانس بارگذاری زیر یک هرتز (۰/۱۱)، ۰/۳۳ و ۰/۹۹ هرتز) انجام شد. نتایج نشان داد، تغییرات فرکانس بارگذاری در محدوده‌ی کوچک‌تر از یک هرتز، اثر قابل توجه و آشکاری بر رفتار توده

- 1 Monotonic Loading
- 2 Cyclic Loading
- 3 Transient Loading





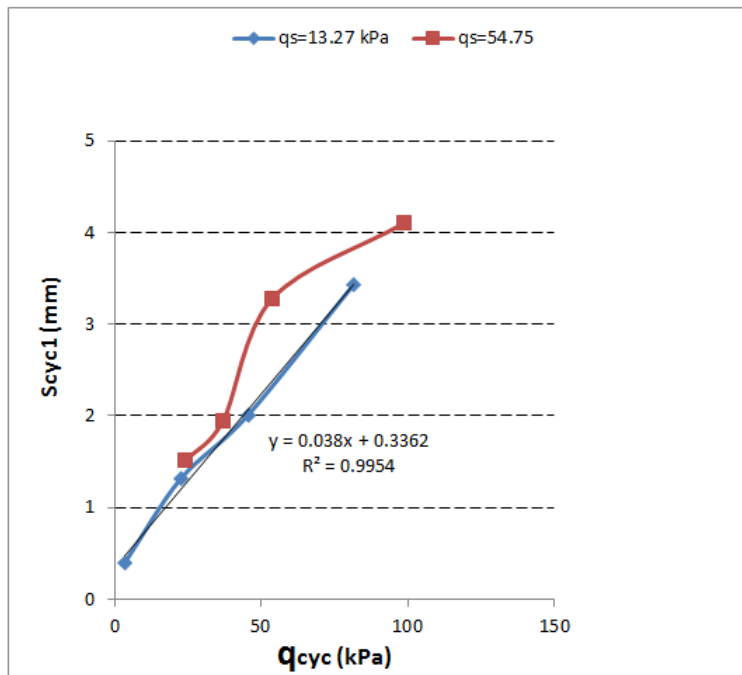
شکل ۵. نشست پی در سیکل اول تحت تأثیر سربار استاتیکی ثابت ۱۵/۷۱ و ۳۹/۸۶ کیلوپاسکال و سربارهای سیکلی مختلف در خاک با تراکم متوسط

Fig. 5. Foundation settlement in the first cycle under the influence of constant static overhead of 15.71 and 39.86 kPa and different cyclic overheads in medium density soil

در آزمایش بعدی، به این پی در ابتدا ۳۳ درصد ظرفیت باربری نهایی یعنی ۳۹/۸۶ کیلوپاسکال بار استاتیکی وارد نموده و سپس سه مقدار متفاوت بار سیکلی ۲۷/۰۶، ۳۸/۶۶ و ۵۹/۴۳ کیلوپاسکال به ترتیب معادل ۰/۶۸، ۰/۹۷ و ۱/۴۹ برابر بار استاتیکی به آن اعمال شده است. نمودار تغییرات نشست در سیکل اول برحسب مقدار سربار سیکلی در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار نشست در سیکل اول تحت اثر سربار استاتیکی ۳۹/۸۶ و سیکلی ۲۷/۰۶ کیلوپاسکال برابر ۱/۹۹ میلی متر است. با ازدیاد بارسیکلی از ۲۷/۰۶ به ۳۸/۶۶ و ۵۹/۴۳ کیلوپاسکال، مقدار نشست در سیکل اول به ترتیب ۱/۶۴ و ۲/۲۳ برابر شد. با ازدیاد سربارهای استاتیکی و سیکلی، مقدار نشست در سیکل اول بارگذاری نیز افزایش یافته است. در خاک‌های ماسه‌ای با تراکم متوسط، تحت اثر سربارهای استاتیکی حدود ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی و سیکلی حدود ۶۰ درصد سربار استاتیکی وارده، رابطه نشست در سیکل اول برحسب سربار سیکلی را می‌توان خطی در نظر گرفت. در کلیه آزمایش‌های انجام شده در خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط، مقدار نشست پی در سیکل اول، حدود ۴۳ تا ۵۰ درصد و بطور متوسط، ۴۶ درصد کل نشست سیکلی را شامل شده است.

۳-۱-۱- تأثیر شدت سربارهای استاتیکی و سیکلی بر نشست پی واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط

یک پی نواری به عرض ۵ سانتی متر روی خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط (تراکم نسبی ۵۰ درصد) قرار دارد. ظرفیت باربری نهایی استاتیکی این پی برابر ۱۲۰/۸ کیلوپاسکال بود. به این پی، در ابتدا ۱۳ درصد ظرفیت باربری نهایی یعنی ۱۵/۷۱ کیلوپاسکال بار استاتیکی وارد نموده و سپس سه مقدار متفاوت بار سیکلی ۲۴/۰۴، ۵۲/۰۶ و ۶۳/۶۶ کیلوپاسکال به ترتیب معادل ۱/۵۳، ۳/۳۲ و ۴/۰۵ برابر بار استاتیکی به آن وارد شد. نمودار تغییرات نشست در سیکل اول برحسب مقدار سربار سیکلی در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار نشست در سیکل اول تحت اثر سربار استاتیکی ۱۵/۷۱ و سیکلی ۲۴/۰۴ کیلوپاسکال برابر ۱/۶۱ میلی متر است. با ازدیاد بار سیکلی از ۲۴/۰۴ به ۵۲/۰۶ و ۶۳/۶۶ کیلوپاسکال، مقدار نشست در سیکل اول به ترتیب ۱/۷۹ و ۲/۳۲ برابر می‌شود. ملاحظه می‌شود که تحت اثر سربارهای استاتیکی (تا حدود ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی استاتیکی) و سیکلی کم، رابطه نشست در سیکل اول برحسب سربار سیکلی را می‌توان خطی در نظر گرفت. ضریب تعیین در این حالت بارگذاری برابر ۰/۹۸۵ است.



شکل ۶. نشست پی در سیکل اول تحت تأثیر سربار استاتیکی ثابت ۱۳/۲۷ و ۵۴/۷۵ کیلوپاسکال و سربارهای سیکلی مختلف در خاک متراکم

Fig. 6. Foundation settlement in the first cycle under the influence of constant static overhead of 13.27 and 54.75 kPa and different cyclic overheads in dense soil

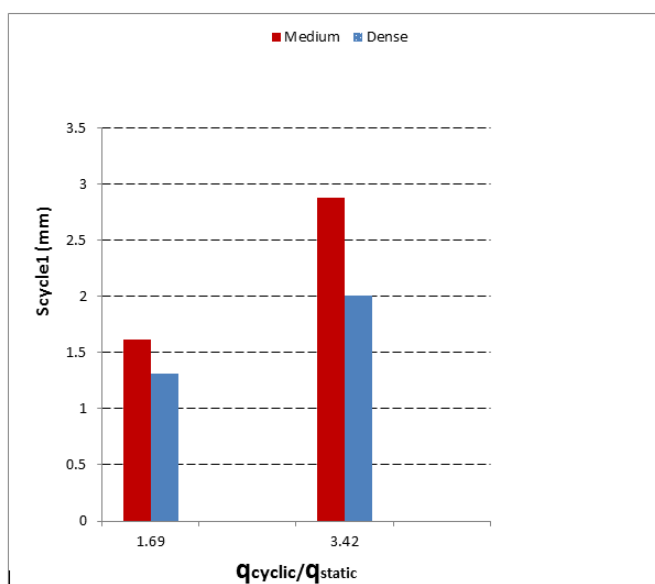
حدود ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی استاتیکی را می‌توان خطی (با ضریب تعیین ۰/۹۹۵) در نظر گرفت.

در آزمایش بعدی، به این پی ۳۳ درصد ظرفیت باربری نهایی یعنی ۵۴/۷۵ کیلوپاسکال بار استاتیکی وارد نموده و سپس چهار مقدار متفاوت بار سیکلی ۲۴/۰۶، ۳۶/۸۳، ۵۳/۷۵ و ۹۸/۵۴ کیلوپاسکال به آن وارد شد. نمودار تغییرات نشست در سیکل اول برحسب مقدار سربار سیکلی در شکل ۶ نشان داده شده است. مقدار نشست در سیکل اول تحت اثر سربار استاتیکی ۵۴/۷۵ و سیکلی ۲۴/۰۶ کیلوپاسکال برابر ۱/۵۱ میلی‌متر است. با ازدیاد بارسیکلی از ۲۴/۰۶ به ۳۶/۸۳، ۵۳/۷۵ و ۹۸/۵۴ کیلوپاسکال، مقدار نشست در سیکل اول به ترتیب ۱/۹۴، ۳/۲۸ و ۴/۱۰ میلی‌متر شد. تحت اثر سربارهای استاتیکی و سیکلی کم، با ۲/۲ برابر شدن سربار سیکلی ۲۴/۰۶، نشست در اولین سیکل بارگذاری حدود ۲/۲ برابر نشست در سربار سیکلی نظیر است.

در خاک‌های ماسه‌ای متراکم، تحت اثر سربارهای استاتیکی حدود ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی و سیکلی حدود ۷۵ درصد سربار استاتیکی وارد، رابطه نشست در سیکل اول برحسب سربار سیکلی را می‌توان خطی در نظر گرفت. در کلیه آزمایش‌های انجام شده در خاک ماسه‌ای متراکم، مقدار

۳-۱-۲- تأثیر شدت سربار استاتیکی و سیکلی بر نشست پی واقع بر خاک ماسه‌ای متراکم

یک پی به عرض ۵ سانتی‌متر روی خاک ماسه‌ای متراکم با دانسیته نسبی ۷۱/۷ درصد قرار دارد. ظرفیت باربری نهایی استاتیکی این پی برابر ۱۶۵/۹ کیلوپاسکال بوده است. به این پی در ابتدا ۸ درصد ظرفیت باربری نهایی یعنی ۱۳/۲۷ کیلوپاسکال بار استاتیکی وارد نموده و سپس چهار مقدار متفاوت بار سیکلی ۳/۴۸، ۲۲/۴۰، ۴۵/۴۶ و ۸۱/۴۶ کیلوپاسکال به ترتیب معادل ۰/۲۶، ۴۳/۶۹، ۳/۱ و ۶/۱۴ برابر بار استاتیکی به آن اعمال شده است. نمودار تغییرات نشست در سیکل اول برحسب مقدار سربار سیکلی در شکل ۶ نشان داده شده است. مقدار نشست در سیکل اول تحت اثر سربار استاتیکی ۱۳/۲۷ و سیکلی ۳/۴۸ کیلوپاسکال برابر ۰/۴۰ میلی‌متر است. با ازدیاد بار سیکلی از ۳/۴۸ به ۲۲/۴۰، ۴۵/۴۶ و ۸۱/۴۶ کیلوپاسکال، مقدار نشست در سیکل اول به ترتیب ۱/۳۱، ۲/۰۱ و ۳/۴۳ میلی‌متر شد. تحت اثر سربارهای استاتیکی و سیکلی کم، با دو برابر شدن سربار سیکلی، نشست در اولین سیکل بارگذاری حدود ۵۰ درصد افزایش یافت. از طرفی رابطه بین نشست پی در سیکل اول بارگذاری و مقدار سربار سیکلی در سربارهای استاتیکی تا



شکل ۷. نمودار مقایسه‌ای تغییرات نشست در سیکل اول برحسب نسبت سربارهای استاتیکی و سیکلی (۱/۶۹ و ۳/۴۲) در خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط و متراکم

Fig. 7. Comparative diagram of settlement changes in the first cycle in terms of static and cyclic overhead ratios (1.69 and 3.42) in medium and dense sandy soils

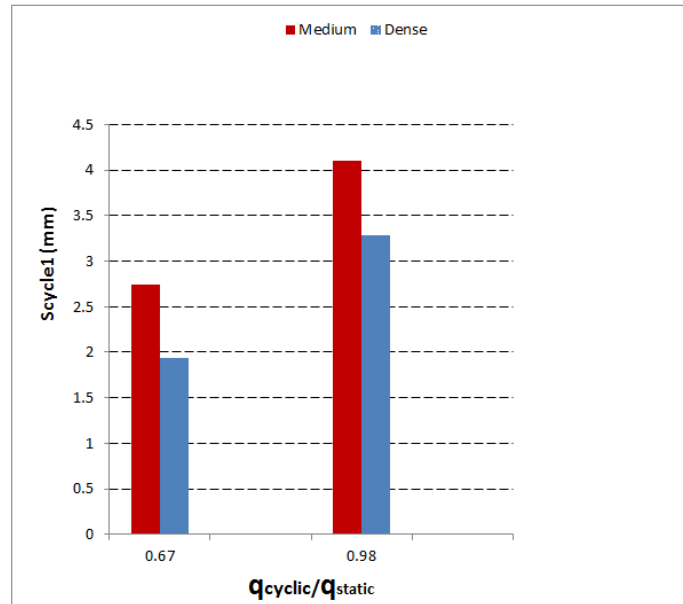
اول بارگذاری تحت اثر نسبت‌های مختلف سربار سیکلی به استاتیکی است. دو آزمایش روی خاک ماسه‌ای با تراکم نسبی متوسط (ظرفیت باربری نهایی ۱۲۰/۸ کیلوپاسکال) با مقادیر یکسان سربار استاتیکی ۱۵/۷۱ کیلوپاسکال (معادل ۱۳ درصد ظرفیت باربری نهایی) و مقادیر متفاوت سربار سیکلی (۲۴/۰۴ و ۵۲/۰۶ کیلوپاسکال) روی پی نواری به عرض ۵ سانتی‌متر انجام شد. نسبت سربار سیکلی به استاتیکی در این دو آزمایش به ترتیب برابر ۱/۵۳ و ۳/۳۱ است. نمودار میله‌ای تغییرات نشست پی در سیکل اول برحسب نسبت سربار سیکلی به استاتیکی در شکل ۷ نشان داده شده است. برای نسبت سربار ۱/۵۳، مقدار نشست پی در سیکل اول بارگذاری برابر ۱/۶۱ میلی‌متر است. با ازدیاد این نسبت از ۱/۵۳ به ۳/۳۱، مقدار نشست در سیکل اول حدود ۷۹ درصد افزایش می‌یابد. نتایج دو آزمایش انجام شده روی خاک ماسه‌ای متراکم (ظرفیت باربری نهایی ۱۶۵/۹ کیلوپاسکال) با مقادیر یکسان سربار استاتیکی ۱۳/۲۷ کیلوپاسکال و مقادیر متفاوت سربار سیکلی (۲۲/۴۰ و ۴۵/۴۶ کیلوپاسکال) روی پی نواری به عرض ۵ سانتی‌متر انجام شده است. نسبت سربار سیکلی به استاتیکی در این دو آزمایش به ترتیب برابر ۱/۶۹ و ۳/۴۳ است. نمودار میله‌ای تغییرات نشست پی در سیکل اول برحسب نسبت سربار سیکلی به استاتیکی در شکل ۷ نشان داده شده است. برای نسبت

نشست پی در سیکل اول، حدود ۴۶ تا ۵۶ درصد و به طور متوسط، ۵۱ درصد کل نشست سیکلی را شامل می‌شود.

در بیان علت زیاد بودن مقدار نشست در سیکل اول بارگذاری می‌توان به این نکته اشاره نمود که با اعمال بار سیکلی، نشست‌های رفت و برگشتی در خاک رخ می‌دهد. بخشی از نشست رخ داده، ارتجاعی است و با برداشتن بار حذف می‌شود، اما بخشی از آن ماندگار است که علت اصلی آن جابه‌جایی دانه‌های خاک است. نشست ماندگار در سیکل‌های اولیه (به خصوص سیکل اول) بیشتر است که دلیل آن تراکم‌پذیری بیشتر خاک در این مرحله است. این نتیجه در تحقیقات انجام شده توسط ابریشمی و میرحسینی [۷] نیز حاصل شده است.

### ۳-۱-۳- تأثیر همزمان سربارهای استاتیکی، سیکلی و تراکم خاک ماسه‌ای بر نشست پی

در بخش قبلی این نتیجه حاصل شد که برای پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای، عواملی از جمله ظرفیت باربری نهایی، مقدار سربارهای استاتیکی و سیکلی، روی نشست پی در سیکل اول بارگذاری تناوبی تأثیر گذارند. در ادامه هدف تعیین میزان تأثیر تراکم نسبی خاک ماسه‌ای بر نشست پی در سیکل



شکل ۸. نمودار مقایسه‌ای تغییرات نشست در سیکل اول برحسب نسبت سربارهای استاتیکی و سیکلی (۰/۶۷ و ۰/۹۸) در خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط و متراکم

Fig. 8. Comparative diagram of settlement changes in the first cycle in terms of static and cyclic overhead ratios (0.67 and 0.98) in medium and dense sandy soils

این آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که مقدار سربار سیکلی نیز در نشست پی تأثیرگذار است.

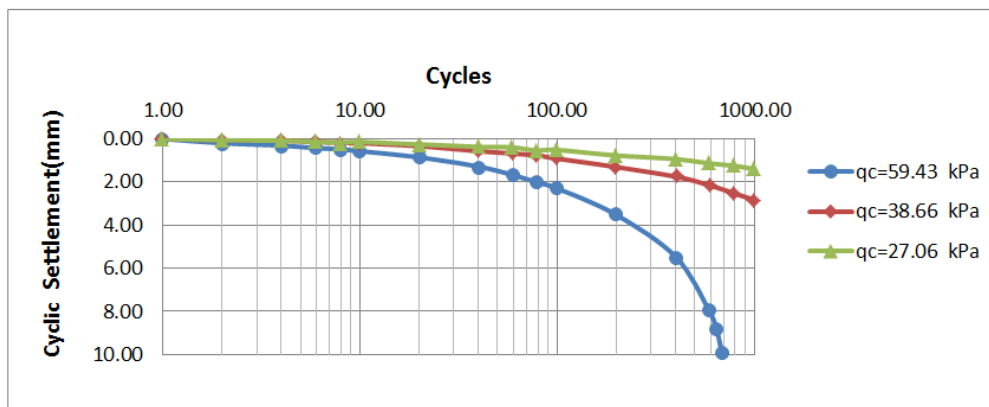
دو آزمایش روی خاک ماسه‌ای با تراکم نسبی متوسط (ظرفیت باربری نهایی ۱۲۰/۸ کیلوپاسکال) با مقادیر یکسان سربار استاتیکی ۳۹/۸۶ کیلوپاسکال و مقادیر متفاوت سربار سیکلی (۲۷/۰۶ و ۳۸/۶۶ کیلوپاسکال) روی پی نواری به عرض ۵ سانتی‌متر انجام شده است. نسبت سربار سیکلی به استاتیکی در این دو آزمایش به ترتیب برابر ۰/۶۷ و ۰/۹۸ است. نمودار میله‌ای تغییرات نشست پی در سیکل اول برحسب نسبت سربار سیکلی به استاتیکی در شکل ۸ نشان داده شده است. برای نسبت سربار ۰/۶۸، مقدار نشست پی در سیکل اول بارگذاری برابر ۱/۹۹ میلی‌متر است. با ازدیاد این نسبت از ۰/۶۷ به ۰/۹۸ (افزایش ۴۶ درصدی)، مقدار نشست در سیکل اول، حدود ۶۴ درصد افزایش می‌یابد.

دو آزمایش روی خاک ماسه‌ای متراکم (ظرفیت باربری نهایی ۱۶۵/۹ کیلوپاسکال) با مقادیر یکسان سربار استاتیکی ۵۴/۷۵ کیلوپاسکال و مقادیر متفاوت سربار سیکلی (۳۶/۸۳ و ۵۳/۷۵ کیلوپاسکال) روی پی نواری به عرض ۵ سانتی‌متر انجام شده است. نسبت سربار سیکلی به استاتیکی در این دو آزمایش به ترتیب برابر ۰/۶۷ و ۰/۹۸ است. نمودار میله‌ای تغییرات

سربار ۱/۶۹، مقدار نشست پی در سیکل اول بارگذاری برابر ۱/۳۱ میلی‌متر است. با ازدیاد این نسبت از ۱/۶۹ به ۳/۴۲، مقدار نشست در سیکل اول حدود ۵۳ درصد افزایش یافته است.

جهت تعیین میزان تأثیر تراکم نسبی ماسه بر مقدار نشست در سیکل اول بارگذاری، باید به این نکته توجه نمود که نشست سیکل اول پی به مقادیر سربارهای استاتیکی و سیکلی نیز بستگی دارد. لذا به منظور تعیین تأثیر تراکم نسبی ماسه باید آزمایش‌هایی انتخاب شوند که مقادیر سربارهای استاتیکی و سیکلی در آن‌ها یکسان باشند. دو آزمایش با مقدار سربار استاتیکی متوسط ۱۴/۵۰ کیلوپاسکال و سربار سیکلی متوسط ۲۳/۲۲ کیلوپاسکال را در نظر می‌گیریم. نشست پی واقع بر خاک ماسه‌ای متراکم برابر ۱/۳۱ میلی‌متر است. اگر این پی روی خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط قرار گیرد، مقدار نشست آن در سیکل اول بارگذاری حدود ۲۳ درصد افزایش می‌یابد.

دو آزمایش دیگر با مقدار سربار استاتیکی متوسط ۱۴/۵۰ کیلوپاسکال و سربار سیکلی متوسط ۴۸/۷۶ کیلوپاسکال انجام شده است. نشست پی واقع بر خاک ماسه‌ای متراکم برابر ۲/۰۱ میلی‌متر است. اگر این پی روی خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط قرار گیرد، مقدار نشست آن در سیکل اول بارگذاری حدود ۴۳ درصد افزایش می‌یابد. با مقایسه نشست پی نواری در



شکل ۹. تغییرات نشست سیکلی (غیر از سیکل اول) با تعداد سیکل بارگذاری و شدت سربار سیکلی تحت اثر سربار استاتیکی معادل ۳۳ درصد ظرفیت باربری نهایی

Fig. 9. Changes in cyclic settlement (other than the first cycle) with the number of loading cycles and the intensity of cyclic overhead under the effect of static overhead equal to 33% of the final bearing capacity

انجام شده است. محدوده تغییرات سربار استاتیکی ۱۳ تا ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی و محدوده تغییرات سربار سیکلی ۰/۵ تا ۴ برابر سربار استاتیکی بوده است. به این پی ابتدا ۱۳، ۳۳ و ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی، بار یکنواخت استاتیکی وارد شد.

### ۳-۲-۱-۱- سربار استاتیکی ۳۳ درصد ظرفیت باربری نهایی

در تعدادی از آزمایش‌های سیکلی، در ابتدا سربار استاتیکی ۳۹/۸۶ کیلوپاسکال معادل ۳۳ درصد ظرفیت باربری نهایی به صورت یکنواخت اعمال گردیده و سپس سربارهای سیکلی ۲۷/۰۶، ۳۸/۶۶ و ۵۹/۴۳ کیلوپاسکال به ترتیب معادل ۰/۶۸، ۰/۹۷ و ۱/۴۹ برابر سربار استاتیکی به پی نواری وارد شد. نمودار تغییرات نشست سیکلی در شکل ۹ نشان داده شده است.

### تأثیر تعداد سیکل بارگذاری

تحت اثر سربار سیکلی ۳۸/۶۶ کیلوپاسکال، مقدار نشست در سیکل‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ به ترتیب برابر ۰/۲۰، ۰/۹۱ و ۲/۸۲ میلی‌متر است. با ازدیاد تعداد سیکل از ۱۰ به ۱۰۰، مقدار نشست سیکلی ۴/۵۵ برابر شده و از سیکل ۱۰۰ به ۱۰۰۰، این نسبت به ۳/۱۰ برابر افزایش یافت. با ازدیاد تعداد سیکل بارگذاری، نشست ماندگار سیکلی افزایش یافته ولی آهنگ این افزایش با ازدیاد تعداد سیکل بارگذاری، کاهش می‌یابد.

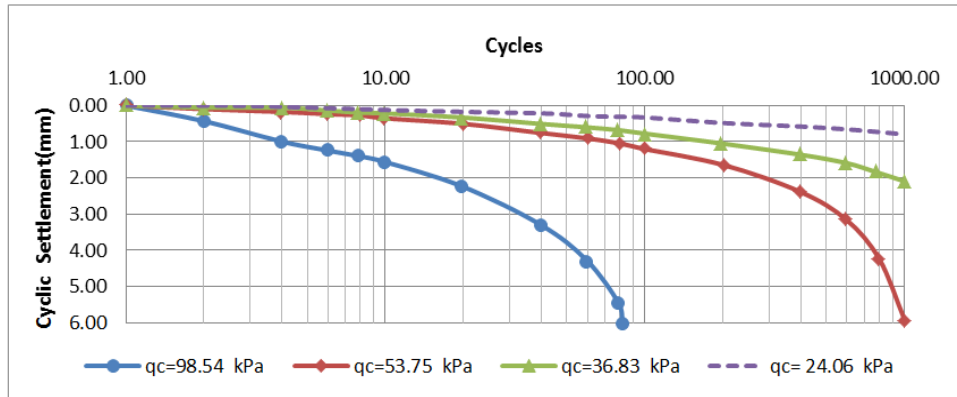
نشست پی در سیکل اول برحسب نسبت سربار سیکلی به استاتیکی در شکل ۸ نشان داده شده است. برای نسبت سربار ۰/۶۷، مقدار نشست پی در سیکل اول بارگذاری برابر ۱/۹۴ میلی‌متر است. با ازدیاد این نسبت از ۰/۶۸ به ۰/۹۷ (افزایش ۴۶ درصد)، مقدار نشست در سیکل اول حدود ۶۹ درصد افزایش یافته است. با مقایسه نشست پی نواری در این آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که مقدار سربار سیکلی نیز در نشست پی تأثیرگذار است.

### ۳-۲- نشست سیکلی پی

جهت مقایسه نتایج آزمایش‌های سیکلی خاک و تحلیل بهتر آن، باید ابتدا آزمایش‌های مشابهی روی خاک صورت گیرد. لازم به ذکر است که با توجه به نشست قابل ملاحظه پی در اولین سیکل بارگذاری و جهت هم‌آغاز نمودن نمودارهای نشست-سیکل، مقدار این نشست از نتایج حاصله حذف و به صورت جداگانه بررسی شده است. این عمل به صورت مشابه برای سایر آزمایش‌ها نیز تکرار شده است.

۳-۲-۱- تأثیر تعداد سیکل بارگذاری و شدت سربارهای استاتیکی و سیکلی بر نشست پی واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط  
در آزمایش استاتیکی انجام شده، ظرفیت باربری نهایی پی نواری به عرض ۵ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط برابر ۱۲۰/۸ کیلوپاسکال بوده است. ۸ آزمایش اصلی روی خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط





شکل ۱۰. تغییرات نشست سیکلی (غیر از سیکل اول) با تعداد سیکل بارگذاری و شدت سربار سیکلی تحت اثر سربار استاتیکی معادل ۳۳ درصد ظرفیت باربری نهایی

Fig. 10. Changes in cyclic settlement changes (other than the first cycle) with the number of loading cycles and the intensity of cyclic overhead under the effect of static overhead equal to 33% of the final bearing capacity

#### تأثیر شدت سربار سیکلی

در سیکل صدم، مقدار نشست تحت اثر سربارهای سیکلی ۲۷/۰۶، ۳۸/۶۶ و ۵۹/۴۳ کیلوپاسکال به ترتیب برابر ۰/۵۱، ۰/۹۱ و ۲/۲۸ میلی‌متر است. با ازدیاد سربار سیکلی از ۲۷/۰۶ به ۳۸/۶۶ کیلوپاسکال، مقدار نشست سیکلی ۱/۷۸ برابر شده و از سربار ۳۸/۶۶ به ۵۹/۴۳ کیلوپاسکال، این نسبت به ۲/۵۱ برابر افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با ازدیاد سربار سیکلی، نشست ماندگار سیکلی نیز افزایش خواهد یافت. به عبارتی با ازدیاد سربار سیکلی و رسیدن آن به محدوده گسیختگی، نشست ماندگار سیکلی نیز به شدت افزایش خواهد یافت.

#### ۳-۲-۱- سربار استاتیکی ۳۳ درصد ظرفیت باربری نهایی

در تعدادی از آزمایش‌های سیکلی دیگر، در ابتدا سربار استاتیکی ۵۴/۷۵ کیلوپاسکال معادل ۳۳ درصد ظرفیت باربری نهایی به صورت یکنواخت اعمال شد و سپس سربارهای سیکلی ۲۴/۰۶، ۳۶/۸۳، ۵۳/۷۵ و ۹۸/۵۴ کیلوپاسکال به ترتیب معادل ۰/۴۴، ۰/۶۷، ۰/۹۸ و ۱/۸۰ برابر سربار استاتیکی به پی نواری وارد شد. نمودار تغییرات نشست سیکلی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

#### تأثیر تعداد سیکل بارگذاری

تحت اثر سربار سیکلی ۵۳/۷۵ کیلوپاسکال، مقدار نشست در سیکل‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ به ترتیب برابر ۰/۳۵، ۱/۲۰ و ۵/۹۲ میلی‌متر است. با ازدیاد تعداد سیکل از ۱۰ به ۱۰۰، مقدار نشست سیکلی ۳/۴۲ برابر شده و از سیکل ۱۰۰ به ۱۰۰۰، این نسبت به ۴/۹۳ برابر افزایش یافت. با ازدیاد تعداد سیکل بارگذاری، نشست ماندگار سیکلی افزایش می‌یابد.

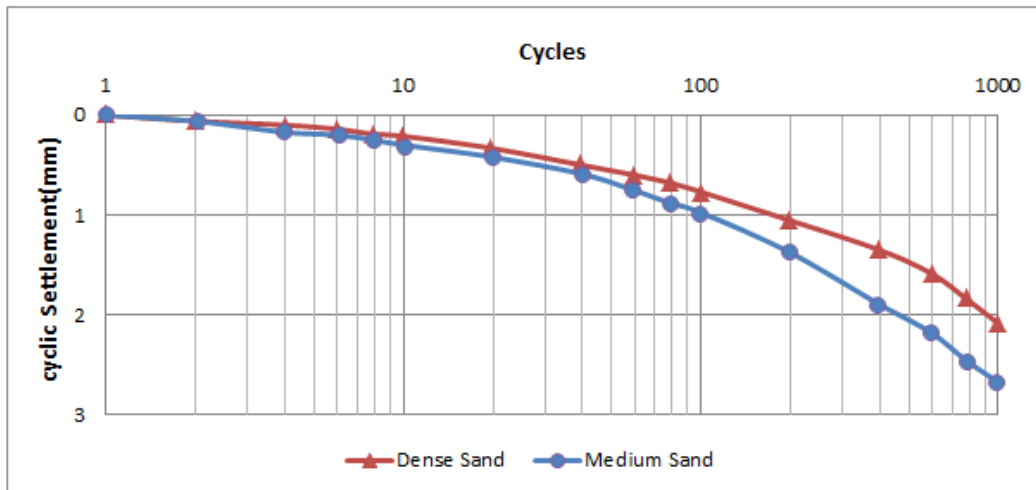
#### تأثیر شدت سربار سیکلی

در سیکل صدم، مقدار نشست تحت اثر سربارهای سیکلی ۲۴/۰۶، ۳۶/۸۳ و ۵۳/۷۵ کیلوپاسکال به ترتیب برابر ۰/۳۳، ۰/۷۷ و ۱/۵۶ میلی‌متر است. با ازدیاد سربار سیکلی از ۲۴/۰۶ به ۳۶/۸۳ کیلوپاسکال، مقدار نشست

#### ۳-۲-۲- تأثیر تعداد سیکل بارگذاری و شدت سربارهای استاتیکی و

سیکلی بر نشست پی واقع بر خاک ماسه‌ای متراکم آزمایش‌های این سری با هدف تعیین تأثیر تراکم، روی خاک ماسه‌ای متراکم انجام گردیده است. در انجام این آزمایش‌ها از  $q_s/q_u$  متوسط ۸، ۳۳ و ۵۰ درصد استفاده شده است.

ظرفیت باربری نهایی پی نواری به عرض ۵ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای متراکم برابر ۱۶۵/۹ کیلوپاسکال بوده است. ۱۲ آزمایش اصلی روی خاک ماسه‌ای متراکم مورد بررسی قرار گرفته است. به این پی ابتدا ۸، ۳۳ و ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی، بار یکنواخت استاتیکی وارد شد. نسبت سربار سیکلی به استاتیکی در محدوده ۰/۳ تا ۶ متغیر بود.



شکل ۱۱. تغییرات نشست سیکلی (غیر از سیکل اول) با تعداد سیکل بارگذاری و شدت سربار سیکلی در خاک‌های ماسه‌ای متوسط و متراکم تحت اثر سربارهای استاتیکی ۵۷/۵ و سیکلی ۳۶/۲ کیلوپاسکال

Fig. 11. Changes in cyclic settlement changes (other than the first cycle) with the number of loading cycles and the intensity of cyclic overhead in medium and dense sandy soils under the effect of 57.5 kPa and 36.2 kPa cyclic overhead

نشست پی واقع بر خاک ماسه‌ای متوسط و متراکم در سیکل اول بارگذاری به ترتیب برابر ۲/۷۴ و ۱/۹۴ میلی‌متر است. در اولین سیکل بارگذاری، نشست پی واقع بر خاک با تراکم متوسط حدود ۴۱ درصد بیشتر از خاک متراکم است. مقدار نشست پی واقع بر خاک ماسه‌ای متراکم در سیکل‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ به ترتیب برابر ۰/۲۱، ۰/۷۷ و ۲/۰۹ میلی‌متر است. مقدار نشست پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای متوسط در سیکل‌های مشابه به ترتیب ۱۹، ۲۶ و ۲۸ درصد بیشتر از خاک متراکم است.

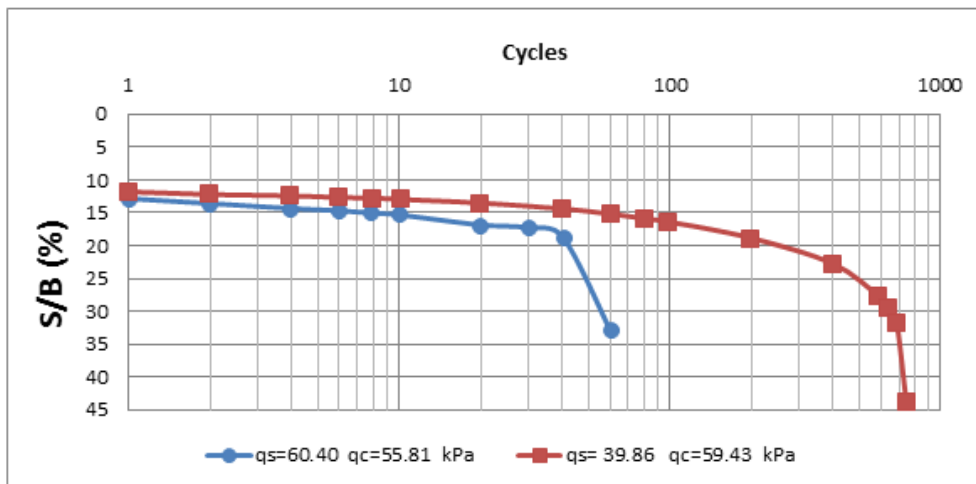
#### ۳-۲-۴- تأثیر نسبت بارهای استاتیکی و سیکلی بر نشست کل پی

تغییرات نشست کل نسبی با تعداد سیکل بارگذاری تا لحظه گسیختگی پی واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط در شکل ۱۲ نشان داده شده است. منظور از نشست کل در این شکل، یعنی مجموع نشست استاتیکی، نشست سیکل اول و نشست سیکلی است. برای شالوده‌ای به عرض ۵ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط، برای سربار استاتیکی ۳۳ درصد ظرفیت باربری نهایی، میانگین مقدار نشست استاتیکی حدود ۱/۳۷ میلی‌متر بود. با اعمال سربارهای سیکلی با نسبت‌های ۰/۶۸، ۰/۹۷ و ۱/۴۹ برابر سربار استاتیکی، مقدار نشست در سیکل اول بارگذاری به ترتیب برابر ۱/۹۹، ۳/۲۷ و ۴/۴۴ میلی‌متر بود. برای نسبت بار سیکلی ۰/۶۸ سربار استاتیکی، مقدار نشست کل پی پس از اعمال ۱۰۶۸ سیکل بارگذاری برابر

سیکلی ۲/۳۳ برابر شده و از سربار ۳۶/۸۳ به ۵۳/۷۵ کیلوپاسکال، این نسبت به ۱/۵۶ برابر افزایش یافت. در سیکل چهارم، با ازدیاد سربار سیکلی از ۵۳/۷۵ به ۹۸/۵۴ کیلوپاسکال، مقدار نشست سیکلی ۴/۳۹ برابر می‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در محدوده گسیختگی خاک زیر پی، آهنگ ازدیاد نشست سیکلی افزایشی است.

#### ۳-۲-۳- تأثیر تراکم خاک ماسه‌ای بر نشست سیکلی

یکی از اهداف تحقیق در بخش بارگذاری دینامیکی، تعیین میزان تأثیر تراکم خاک ماسه‌ای (متوسط و متراکم) بر نشست پی نواری تحت اثر سربارهای سیکلی است. عواملی از جمله عرض پی، تراکم خاک، سربار استاتیکی، سربار سیکلی، تعداد سیکل بارگذاری در میزان نشست ماندگار سیکلی تأثیر گذارند. به عبارتی برای اینکه بتوان تأثیر تراکم خاک ماسه‌ای را بررسی نمود، لازم است سایر پارامترهای تأثیرگذار، ثابت باشند. تغییرات نشست سیکلی (غیر از سیکل اول) با تعداد سیکل بارگذاری و شدت سربار سیکلی در خاک‌های ماسه‌ای متوسط و متراکم تحت اثر سربارهای استاتیکی ۵۷/۵ و سیکلی ۳۶/۲ کیلوپاسکال در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تحت اثر سربار استاتیکی، مقدار نشست پی واقع بر خاک ماسه‌ای متراکم برابر ۲/۲۶ میلی‌متر است. نشست استاتیکی پی واقع بر خاک متوسط حدود ۳۳ درصد بیشتر است.



شکل ۱۲. تغییرات نشست کل نسبی با تعداد سیکل بارگذاری تا لحظه گسیختگی پی واقع بر خاک ماسه‌ای تراکم متوسط

Fig. 12. Changes in relative total settlement with the number of loading cycles up to the moment of foundation failure located on medium density sandy soil

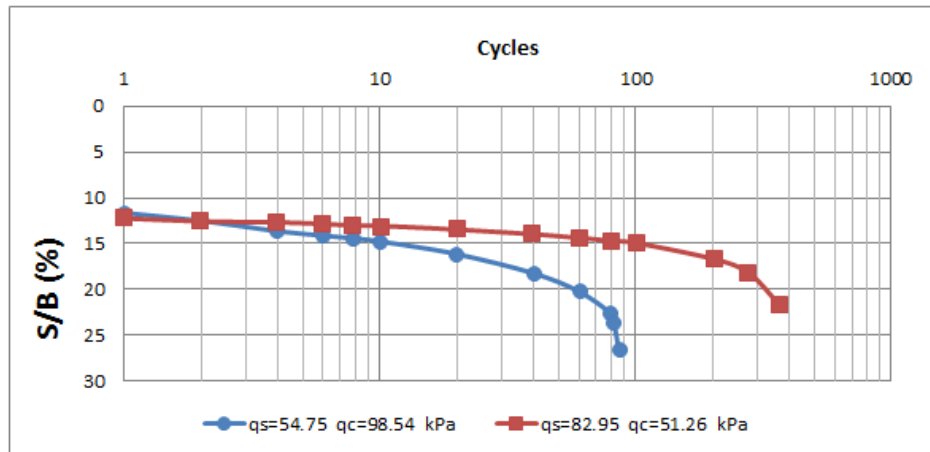
وجود نشست نسبتاً زیاد، گسیختگی در خاک ماسه‌ای تراکم، به وجود نیامد. در این حالت، پی نواری توانست تا ۲۰ درصد عرض پی، متحمل نشست کل استاتیکی و سیکلی شود. این موضوع نشان دهنده تأثیر بسیار زیاد شدت سربار استاتیکی بر رفتار پی است.

برای سربار استاتیکی ۳۳ درصد ظرفیت باربری نهایی، میانگین مقدار نشست استاتیکی حدود ۱/۷۵ میلی‌متر بود. با اعمال سربارهای سیکلی با نسبت‌های ۰/۴۴، ۰/۶۷، ۰/۹۸ و ۱/۸۰ برابر سربار استاتیکی، مقدار نشست در سیکل اول بارگذاری به ترتیب برابر ۱/۵۱، ۱/۹۴، ۳/۲۸ و ۴/۱۰ میلی‌متر به دست آمد. برای نسبت بار سیکلی ۰/۴۴ سربار استاتیکی، مقدار نشست کل پی پس از اعمال ۹۹۹ سیکل بارگذاری برابر ۴/۰۲ میلی‌متر، هم‌چنین نسبت سربار سیکلی ۰/۶۷ بار استاتیکی، پس از اعمال ۱۰۶۷ سیکل بارگذاری، نشست کل ۵/۷۵ میلی‌متر و برای نسبت سربار ۰/۹۸ بار استاتیکی، نشست کل ۱۱/۰۴ میلی‌متر به دست آمد. برای نسبت سربار سیکلی ۱/۸۰، مقدار نشست پس از اعمال ۸۶ سیکل بارگذاری برابر ۱۳/۲۹ میلی‌متر بوده و خاک زیر دچار گسیختگی شده است. به عبارتی برای نسبت ۳۳ درصد سربار استاتیکی، گسیختگی در نسبت سربار سیکلی ۱/۸۰ برابر سربار استاتیکی حاصل شد. در این حالت خاک در نشستی معادل ۲۷ درصد عرض پی دچار گسیختگی شده است. بیشترین نشست در سیکل اول بارگذاری و هم‌چنین نشست کل، مربوط به این حالت بارگذاری است (شکل ۱۳).

۴/۷۴ میلی‌متر، هم‌چنین نسبت سربار سیکلی ۰/۹۷ بار استاتیکی، پس از اعمال ۱۱۰۰ سیکل بارگذاری، نشست کل ۷/۴۲ میلی‌متری به دست آمد. برای نسبت سربار سیکلی ۱/۴۹، مقدار نشست کل پس از اعمال ۷۴۴ سیکل بارگذاری برابر ۲۱/۸۲ میلی‌متر بود و خاک زیر، دچار گسیختگی شد. علت اصلی این پدیده را می‌توان به تراکم نسبی خاک متوسط و نسبت بالای سربار سیکلی به استاتیکی، نسبت داد.

برای سربار استاتیکی ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی، میانگین مقدار نشست استاتیکی حدود ۲/۲۹ میلی‌متر بود. با اعمال سربارهای سیکلی با نسبت‌های ۰/۵۹ و ۰/۹۲ برابر سربار استاتیکی، مقدار نشست در سیکل اول بارگذاری به ترتیب برابر ۲/۷۴ و ۴/۱۰ میلی‌متر به دست آمده است. برای نسبت بار سیکلی ۰/۵۹ سربار استاتیکی، مقدار نشست کل پی پس از اعمال ۱۰۷۸ سیکل بارگذاری برابر ۷/۶۸ میلی‌متر، هم‌چنین نسبت سربار سیکلی ۰/۹۲ بار استاتیکی، پس از اعمال ۶۰ سیکل بارگذاری، نشست کل ۱۶/۴۱ میلی‌متری به دست آمد و خاک زیر دچار گسیختگی شد (شکل ۱۲).

تغییرات نشست کل نسبی با تعداد سیکل بارگذاری تا لحظه گسیختگی پی واقع بر خاک ماسه‌ای تراکم در شکل ۱۳ نشان داده شده است. برای شالوده‌ای به عرض ۵ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای تراکم، در سربارهای استاتیکی کم (مثلاً ۸ درصد ظرفیت باربری نهایی استاتیکی) حتی در نسبت سربار سیکلی به استاتیکی حدود ۶٪ پس از اعمال ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری، با



شکل ۱۳. تغییرات نشست کل (استاتیکی و سیکلی) نسبی با تعداد سیکل بارگذاری تا لحظه گسیختگی پی واقع بر خاک ماسه‌ای متراکم

Fig. 13. Relative total settlement changes (static and cyclic) with the number of loading cycles until the moment of foundation failure located on dense sandy soil

دارند. با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، نشست ماندگار نیز افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که نشست در سیکل‌های اول بارگذاری، درصد قابل توجهی از نشست نهایی در انتهای بارگذاری را شامل می‌شود، که این امر مبین اثر سیکل‌های اولیه به عنوان یک ویژگی رفتاری مهم بستر تحت بارگذاری سیکلی است. تحت سیکل‌های اولیه بار، نشست‌های قابل توجه و عمدتاً خمیری منجر به بروز گسیختگی در خاک می‌شود. این نتیجه با نتایج پژوهش شریفی و مقدس [۲۰] تطابق خوبی دارد.

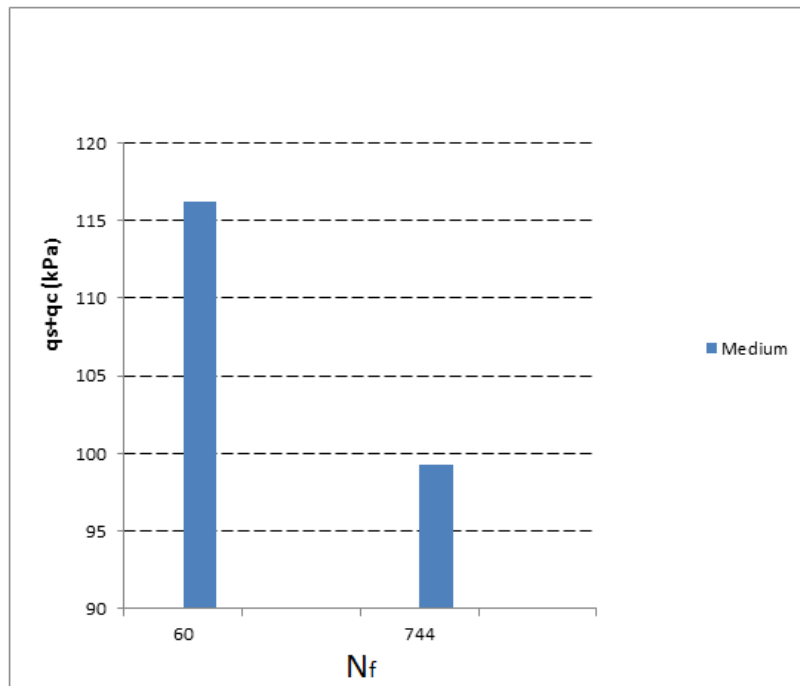
برای عرض ۵ سانتی‌متر، مقدار نشست بسیار نزدیک به نتایج حاصل از تحقیقات لاتا و ساموانشی [۲۸]، مقدس و داوسون [۱۷]، میرحسینی و ابریشمی [۱۶] و کارگر و میرحسینی [۲۹] است. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، می‌توان نتیجه گرفت که بخش زیادی از نشست پی، در سیکل‌های اولیه بارگذاری به وقوع پیوسته است، اختصاص درصد زیادی از نشست کل در سیکل‌های اولیه بارگذاری، با نتایج سایر تحقیقات (ابریشمی و میرحسینی [۷]، شریفی و مقدس [۲۰]، تبرئی و ابریشمی [۲۴]، مقدس و داوسون [۱۷] و [۱۳] و الصواف و نذیر [۱۲]) تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

۳-۳- تعداد سیکل لازم برای بروز گسیختگی خاک زیر پی

برای خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط در دو حالت، بروز گسیختگی

برای سربار استاتیکی ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی، میانگین مقدار نشست استاتیکی حدود ۲/۶۹ میلی‌متر بود. با اعمال سربارهای سیکلی با نسبت‌های ۰/۳۰، ۰/۳۴، ۰/۴۷ و ۰/۶۲ برابر سربار استاتیکی، مقدار نشست در سیکل اول بارگذاری به ترتیب برابر ۱/۸۸، ۱/۹۳، ۲/۳۱ و ۳/۳۲ میلی‌متر به دست آمد. برای نسبت بار سیکلی ۰/۳۰ سربار استاتیکی، مقدار نشست کل پی پس از اعمال ۹۹۹ سیکل بارگذاری برابر ۶/۱۰ میلی‌متر، هم‌چنین نسبت سربار سیکلی ۰/۳۴ بار استاتیکی، پس از اعمال ۸۵۹۸ سیکل بارگذاری، نشست کل ۵/۹۲ میلی‌متری به دست آمد و خاک زیر دچار گسیختگی نشده است. برای نسبت بار سیکلی ۰/۴۷ سربار استاتیکی، مقدار نشست کل پی پس از اعمال ۲۶۲۱ سیکل بارگذاری برابر ۷/۱۱ میلی‌متر به دست آمد. برای نسبت سربار سیکلی ۰/۶۲، مقدار نشست پس از اعمال ۳۶۵ سیکل بارگذاری برابر ۱۰/۸۳ میلی‌متر بود و خاک زیر دچار گسیختگی شد. به عبارتی برای نسبت ۵۰ درصد سربار استاتیکی، گسیختگی در نسبت سربار سیکلی ۰/۶۲ سربار استاتیکی حاصل شد. بیشترین مقدار نشست استاتیکی مربوط به این حالت بارگذاری است. در این حالت، پی در نشستی معادل ۲۲ درصد عرض پی دچار گسیختگی شد.

بارگذاری سیکلی، باعث ایجاد نشست‌های ماندگار در توده خاک می‌شود. به نظر می‌رسد با توجه به ماهیت بارگذاری سیکلی، بخشی از نشست پی به دلیل فرار ذرات از زیر صفحه بارگذاری باشد. به عبارت دیگر، بر خلاف بارگذاری استاتیکی، ذرات خاک بیشتر تمایل به حرکت جانبی



شکل ۱۴. تغییرات سربار کل استاتیکی و سیکلی با تعداد سیکل بارگذاری در لحظه گسیختگی پی واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط

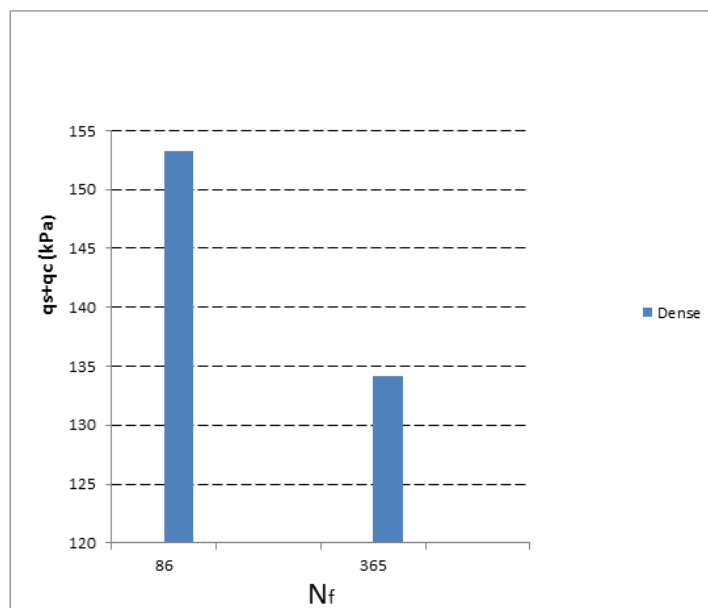
**Fig. 14. Changes in total static and cyclic overhead with the number of loading cycles at the moment of foundation failure located on medium density sandy soil**

پی نواری مشاهده شد. در حالت اول، مقدار سربار استاتیکی برابر ۳۳ درصد ظرفیت باربری نهایی (۵۴/۷۵ کیلوپاسکال) و سربار سیکلی ۱/۸۰ برابر سربار استاتیکی (۹۸/۵۴ کیلوپاسکال) بود. خاک زیر پی تحت اثر مجموع سربارهای استاتیکی و سیکلی حدود ۱۵۳ کیلوپاسکال، در سیکل ۸۶ دچار گسیختگی شد. خاک زیر پی در نشست برابر ۲۷ درصد عرض پی دچار گسیختگی شده است. برای سربار استاتیکی ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی (۸۲/۹۵ کیلوپاسکال) و سربار سیکلی ۶۲ درصد سربار استاتیکی (۵۱/۲۶ کیلوپاسکال)، خاک ماسه‌ای متراکم تحت اثر مجموع سربارهای استاتیکی و سیکلی ۱۳۴ کیلوپاسکال در سیکل ۳۶۵ گسیخته شده است خاک زیر پی در نشست برابر ۲۲ درصد عرض پی دچار گسیختگی شد (شکل ۱۵).

با اعمال سیکل‌های بیشتر، خاک به تراکم ثابتی رسیده، بارگذاری منجر به شکل گرفتن گوه‌های لغزش می‌شود. نتایج این تحقیق نشان داد که در سیکل‌های اول بارگذاری، درصد قابل توجهی از نشست نهایی در انتهای بارگذاری را شامل می‌شود، که این امر مبین اثر سیکل‌های اولیه به عنوان یک ویژگی رفتاری مهم بستر تحت بارگذاری سیکلی است. از طرفی نرخ

در خاک زیر پی نواری مشاهده شد. در حالت اول، مقدار سربار استاتیکی برابر ۳۳ درصد ظرفیت باربری نهایی (۳۹/۸۶ کیلوپاسکال) و سربار سیکلی ۱/۴۹ برابر سربار استاتیکی (۵۹/۴۳ کیلوپاسکال) بود. خاک زیر پی تحت اثر مجموع سربارهای استاتیکی و سیکلی حدود ۹۹ کیلوپاسکال، در سیکل ۷۴۴ دچار گسیختگی شده است. خاک زیر پی در نشست برابر ۴۴ درصد عرض پی دچار گسیختگی شده است. برای سربار استاتیکی ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی (۶۰/۴ کیلوپاسکال) و سربار سیکلی ۹۲ درصد سربار استاتیکی (۵۵/۸۱ کیلوپاسکال)، خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط تحت اثر مجموع سربارهای استاتیکی و سیکلی ۱۱۶ کیلوپاسکال در سیکل ۶۰ گسیخته شد (شکل ۱۴). خاک زیر پی در نشست برابر ۳۳ درصد عرض پی دچار گسیختگی شده است. به عبارتی دیگر هر چه سربار کل وارد به خاک کمتر باشد، خاک تعداد سیکل بارگذاری بیشتری را تحمل می‌کند تا دچار گسیختگی شود؛ یعنی با ازدیاد سربار استاتیکی و سیکلی، خاک در تعداد سیکل کمتری دچار گسیختگی می‌شود. برای خاک ماسه‌ای متراکم، در دو حالت بروز گسیختگی در خاک زیر





شکل ۱۵. تغییرات سربار کل استاتیکی و سیکلی با تعداد سیکل بارگذاری در لحظه گسیختگی پی واقع بر خاک ماسه‌ای متراکم

Fig. 15. Changes in total static and cyclic overhead with the number of loading cycles at the moment of foundation failure located on dense sandy soil

افزایش نشست با ازدیاد تعداد سیکل بارگذاری، کاهش یافت.

برای تعداد سیکل بار یکسان، با ازدیاد بار استاتیکی اولیه، مقدار نشست

بارگذاری نیز افزایش می‌یابد.

تحت اثر بار سیکلی افزایش می‌یابد. برای نسبت بار استاتیکی اولیه و تعداد

حدود ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی و سیکلی حدود ۶۰ درصد سربار

سیکل بارگذاری یکسان، مقدار نشست کل با ازدیاد بار سیکلی وارده، افزایش

استاتیکی وارده، رابطه نشست در سیکل اول برحسب سربار سیکلی را

می‌یابد. برای بار استاتیکی اولیه و دانسیته نسبی یکسان، نشست سیکلی

می‌توان خطی در نظر گرفت.

ماندگار، با ازدیاد تعداد سیکل افزایش می‌یابد. مقدار نشست سیکلی، با

افزایش سربار سیکلی و استاتیکی افزایش می‌یابد.

افزایش سربار سیکلی و استاتیکی افزایش می‌یابد.

افزایش نشست با ازدیاد تعداد سیکل بارگذاری، کاهش یافت.

برای تعداد سیکل بار یکسان، با ازدیاد بار استاتیکی اولیه، مقدار نشست

بارگذاری نیز افزایش می‌یابد.

تحت اثر بار سیکلی افزایش می‌یابد. برای نسبت بار استاتیکی اولیه و تعداد

حدود ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی و سیکلی حدود ۷۵ درصد سربار استاتیکی

سیکل بارگذاری یکسان، مقدار نشست کل با ازدیاد بار سیکلی وارده، افزایش

استاتیکی وارده، رابطه نشست در سیکل اول برحسب سربار سیکلی را می‌توان خطی

در نظر گرفت.

در نظر گرفت.

ماندگار، با ازدیاد تعداد سیکل افزایش می‌یابد. مقدار نشست سیکلی، با

افزایش سربار سیکلی و استاتیکی افزایش می‌یابد.

افزایش سربار سیکلی و استاتیکی افزایش می‌یابد.

افزایش نشست با ازدیاد تعداد سیکل بارگذاری، کاهش یافت.

برای تعداد سیکل بار یکسان، با ازدیاد بار استاتیکی اولیه، مقدار نشست

بارگذاری نیز افزایش می‌یابد.

تحت اثر بار سیکلی افزایش می‌یابد. برای نسبت بار استاتیکی اولیه و تعداد

حدود ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی و سیکلی حدود ۴۶ و ۵۱ درصد کل نشست

سیکل بارگذاری یکسان، مقدار نشست کل با ازدیاد بار سیکلی وارده، افزایش

استاتیکی وارده، رابطه نشست در سیکل اول برحسب سربار سیکلی را می‌توان خطی

در نظر گرفت.

در نظر گرفت.

ماندگار، با ازدیاد تعداد سیکل افزایش می‌یابد. مقدار نشست سیکلی، با

افزایش سربار سیکلی و استاتیکی افزایش می‌یابد.

افزایش سربار سیکلی و استاتیکی افزایش می‌یابد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مدل آزمایشگاهی انجام

شده روی پی‌های نواری واقع بر خاک ماسه‌ای تحت اثر بار سیکلی ارائه شده

است. بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر، می‌توان نتیجه‌گیری

زیر را در مورد نشست پی‌های واقع بر خاک ماسه‌ای تحت اثر بارگذاری

سیکلی انجام داد.

افزایش نشست با ازدیاد تعداد سیکل بارگذاری، کاهش یافت.

برای تعداد سیکل بار یکسان، با ازدیاد بار استاتیکی اولیه، مقدار نشست

تحت اثر بار سیکلی افزایش می‌یابد. برای نسبت بار استاتیکی اولیه و تعداد

سیکل بارگذاری یکسان، مقدار نشست کل با ازدیاد بار سیکلی وارده، افزایش

استاتیکی وارده، رابطه نشست در سیکل اول برحسب سربار سیکلی را می‌توان خطی

در نظر گرفت.

شرایط مشابه استاتیکی است.

- در خاک ماسه‌ای متراکم و در سربارهای استاتیکی، پس از اعمال ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری، گسیختگی در خاک، به وجود نیامده است. این موضوع نشان دهنده تأثیر بسیار زیاد شدت سربار استاتیکی بر رفتار پی است. - در خاک ماسه‌ای متراکم برای نسبت ۵۰ درصد سربار استاتیکی، گسیختگی در نسبت سربار سیکلی ۰/۶۲ سربار استاتیکی حاصل شد. - خاک ماسه‌ای متراکم، در نشست معادل ۳۳ تا ۴۳ درصد عرض پی دچار گسیختگی شده است.

رفتار پی تحت اثر بار سیکلی با رفتار آن تحت اثر بار استاتیکی، متفاوت است. با توجه به ایجاد نشست ماندگار در پی تحت اثر بارهای سیکلی، طراحی پی تحت اثر این نوع بارگذاری باید طوری باشد تا پی بتواند بهره‌برداری از روسازه را مختل نساخته و باعث گسیختگی خاک زیر پی نشود. به همین دلیل، در طراحی پی‌ها تحت اثر بارهای سیکلی، مقدار نشست پیش‌بینی شده حتماً بایستی از مقدار مجاز آن کمتر باشد. یعنی در هیچ حالتی، دامنه نوسان مجاز بار سیکلی نباید از حد نصاب مشخص شده توسط سازنده ماشین آلات تجاوز نماید. در تعیین دامنه مجاز، بایستی به سازه، ماشین آلات موجود در مجاورت پی و افراد توجه شود تا تشدید و یا ضایعه‌ای برای آن‌ها پیش نیاید.

## ۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان به خاطر حمایت مالی این تحقیق، در قالب طرح پژوهشی، صمیمانه تقدیر و تشکر نمایند.

## منابع

- [1] G.P. Raymond, F.E. Komos, Repeated load testing of a model plane strain footing, *Canadian Geotechnical Journal*, 15(2) (1978) 190-201.
- [2] R.J. Frigaszy, E. Lawton, Bearing capacity of reinforced sand subgrades, *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(10) (1984) 1500-1507.
- [3] K. Khing, B. Das, V. Puri, E. Cook, S. Yen, The bearing-capacity of a strip foundation on geogrid-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 12(4) (1993) 351-361.
- [4] V. Puri, S. Yen, B. Das, B. Yeo, Cyclic load-induced settlement of a square foundation on geogrid-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 12(6) (1993) 587-

نهایی در انتهای بارگذاری را شامل می‌شود، که این امر مبین اثر سیکل‌های اولیه به عنوان یک ویژگی رفتاری مهم خاک تحت بارگذاری سیکلی است. - با ازدیاد تعداد سیکل بارگذاری، نشست ماندگار سیکلی افزایش یافته ولی آهنگ این افزایش با ازدیاد تعداد سیکل بارگذاری، کاهش می‌یابد. - با ازدیاد سربار سیکلی و رسیدن آن به محدوده گسیختگی، نشست ماندگار سیکلی نیز به شدت افزایش یافته است.

- در سربارهای استاتیکی کم، حتی در نسبت سربار سیکلی به استاتیکی حدود ۴، پس از اعمال ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری، گسیختگی در خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط به وجود نیامده است.

- در خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط برای نسبت ۳۳ درصد سربار استاتیکی، گسیختگی در نسبت سربار سیکلی ۱/۴۹ برابر سربار استاتیکی حاصل شد. بیشترین نشست در سیکل اول بارگذاری و هم‌چنین نشست کل، مربوط به این حالت است.

- برای خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط، برای نسبت ۵۰ درصد سربار استاتیکی، گسیختگی خاک در نسبت سربار سیکلی ۰/۹۲ سربار استاتیکی حاصل شد. بیشترین مقدار نشست استاتیکی و هم‌چنین مجموع نشست استاتیکی و سیکل اول بارگذاری مربوط به این حالت است.

- برای خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط، در دو حالت بروز گسیختگی در خاک زیر پی نواری مشاهده گردید. در حالت اول، مقدار سربار استاتیکی برابر ۳۳ درصد ظرفیت باربری نهایی و سربار سیکلی ۱/۴۹ برابر سربار استاتیکی بود. خاک زیر پی تحت اثر مجموع سربارهای استاتیکی و سیکلی حدود ۹۹ کیلوپاسکال، در سیکل ۷۴۴ دچار گسیختگی شده است. برای سربار استاتیکی ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی و سربار سیکلی ۹۲ درصد سربار استاتیکی، خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط تحت اثر مجموع سربارهای استاتیکی و سیکلی ۱۱۶ کیلوپاسکال در سیکل ۶۰ گسیخته شده است.

- هرچه سربار کل وارد به خاک کمتر باشد، خاک تعداد سیکل بارگذاری بیشتری را تحمل می‌کند تا دچار گسیختگی شود.

- با افزایش سربارهای استاتیکی و سیکلی، مقدار نشست سیکلی، افزایش می‌یابد ولی تأثیر افزایش سربار استاتیکی در مقایسه با سربار سیکلی کمتر است. البته با تجمع نشست‌های استاتیکی با سیکلی و نزدیک شدن به لحظه گسیختگی، سربار استاتیکی اثر خود را بیشتر نشان می‌دهد.

- خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط، در نشست معادل ۲۲ تا ۲۷ درصد عرض پی دچار گسیختگی شد.

- در کلیه آزمایش‌های سیکلی، نشست لحظه گسیختگی بزرگ‌تر از

- reinforced with geogrid and grid anchor under cyclic loading, (2010).
- [15] S. Abrishami, The Study of Cyclic Bearing Capacity of Dry Geogrid Reinforced Sand by Physical Modeling, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, (2010). (in Persian)
- [16] S. Mir Mohammad Hosseini, S. Abrishami, the influence of loading rate on the bearing capacity of strip footings resting on geogrid reinforced sand, Sharif Journal of Civil Engineering, (1) (2012) 39-47. (in Persian)
- [17] S.M. Tafreshi, A. Dawson, A comparison of static and cyclic loading responses of foundations on geocell-reinforced sand, Geotextiles and Geomembranes, 32 (2012) 55-68.
- [18] M. Abu-Farsakh, Q. Chen, R. Sharma, An experimental evaluation of the behavior of footings on geosynthetic-reinforced sand, Soils and Foundations, 53(2) (2013) 335-348.
- [19] B. Hotti, P. Rakaraddi, S. Kodde, Behavior of square footing resting on reinforced sand subjected to incremental loading and unloading, International Journal of Research in Engineering and Technology, 3(6) (2014).
- [20] P. Sharifi, S. Moghaddas Tafreshi, Experimental study of layered geocell reinforced bed subjected to repeated load, Sharif Journal of Civil Engineering, (4.1) (2014) 75-83. (in Persian)
- [21] E. Badakhshan, A. Noorzad, Effect of footing shape and load eccentricity on behavior of geosynthetic reinforced sand bed, Geotextiles and Geomembranes, 45(2) (2017) 58-67.
- [22] A. Boushehrian, N. Hataf, A. Ghahramani, Modeling of the cyclic behavior of shallow foundations resting on geomesh and grid-anchor reinforced sand, Geotextiles and Geomembranes, 29(3) (2011) 242-248.
- [23] A. Tabaroei, S. Abrishami, E. Seyedi Hosseininia, N. Ganjian, A study on bearing capacity of circular footing resting on geogrid reinforced granular soil, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 50(5) (2018) 973-986. (in Persian)
- 597.
- [5] B. Shin, S. Kim, B. Yeo, B. Das, H. Imamoto, Permanent settlement of a square shallow foundation sand due to cyclic load, in: Earthquake Geotechnical Engineering, 1995, pp. 779-783.
- [6] B. Das, E. Shin, Strip foundation on geogrid-reinforced clay: behavior under cyclic loading, Geotextiles and Geomembranes, 13(10) (1994) 657-667.
- [7] S. Abrishami, S. Mir Mohammad Hosseini, Design and development of a new physical model of strip footings on reinforced soil media under cyclic loadings, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 41(2) (2010) 73-83. (in Persian)
- [8] S.K. Dash, N. Krishnaswamy, K. Rajagopal, Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand, Geotextiles and Geomembranes, 19(4) (2001) 235-256.
- [9] M. Mosallanezhad, N. Hataf, A. Ghahramani, Experimental study of bearing capacity of granular soils, reinforced with innovative grid-anchor system, Geotechnical and Geological Engineering, 26(3) (2008) 299-312.
- [10] S. Sireesh, T. Sitharam, S.K. Dash, Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlying clay bed with void, Geotextiles and Geomembranes, 27(2) (2009) 89-98.
- [11] M.H. Mohamed, Two dimensional experimental study for the behaviour of surface footings on unreinforced and reinforced sand beds overlying soft pockets, Geotextiles and Geomembranes, 28(6) (2010) 589-596.
- [12] M. El Sawwaf, A.K. Nazir, Behavior of repeatedly loaded rectangular footings resting on reinforced sand, Alexandria Engineering Journal, 49(4) (2010) 349-356.
- [13] S.M. Tafreshi, A. Dawson, Behaviour of footings on reinforced sand subjected to repeated loading-Comparing use of 3D and planar geotextile, Geotextiles and Geomembranes, 28(5) (2010) 434-447.
- [14] N. Hataf, A. Boushehrian, A. Ghahramani, Experimental and numerical behavior of shallow foundations on sand

- [27] M.N.A. Raja, S.K. Shukla, Experimental study on repeatedly loaded foundation soil strengthened by wraparound geosynthetic reinforcement technique, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(4) (2021) 899-911.
- [28] G.M. Latha, A. Somwanshi, Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(4) (2009) 281-294.
- [29] M. Kargar, S.M. Mir Mohammad Hosseini, Influence of reinforcement stiffness and strength on load-settlement response of geocell-reinforced sand bases, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22(5) (2018) 596-613.
- [24] A. Tabaroei, S. Abrishami, H.E. Seyedi, N. Ganjian, An Experimental Investigation on the Effect of Loading Frequency on the Settlement and Bearing Capacity of the Footing over the Soil Reinforced by One Geogrid Layer, (2018). (in Persian)
- [25] M.Y. Fattah, H.H. Karim, H.H. Al-Qazzaz, Effect of Embedment Depth on Cyclic Behavior of Tank Footings on Dry Sand, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 9(2) (2022) 220-235.
- [26] C. Jayalath, C. Gallage, K. Wimalasena, J. Lee, J. Ramanujam, Performance of composite geogrid reinforced unpaved pavements under cyclic loading, *Construction and Building Materials*, 304 (2021) 124570.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Nikkhah Shahmirzadi, S. M. Mir Mohammad Hosseini, S. Abrishami, Settlement of Strip Footings on Sand Subjected to Cyclic Loading, Amirkabir J. Civil Eng., 55(1) (2023) 109-130.*

DOI: 10.22060/ceej.2022.20341.7398

