

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر عرض پی، تراکم خاک ماسه‌ای و مقدار فشار بر نشست شالوده نواری

محمود نیکخواه شه‌میرزادی*، استادیار گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی،

سمنان، ایران

سید مجدالدین میرمحمد حسینی، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی

امیرکبیر، تهران

سعید ابریشمی، استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

Email: m.nikkhah@semnaniau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶

چکیده

در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل فیزیکی، به بررسی رفتار شالوده واقع بر خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری استاتیک و تأثیر عوامل مختلف روی رفتار خاک پرداخته شده است. در این تحقیق آزمایشگاهی، تأثیر عرض پی، تراکم خاک ماسه‌ای و مقدار سربار بر نشست شالوده نواری مورد بررسی قرار گرفته است. مصالح خاکی مورد استفاده، ماسه متوسط بد دانه‌بندی شده است. مدل شالوده نواری دارای عرض ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر و طول ۳۴ سانتی‌متر است. برای به‌دست آوردن نمونه‌ی همگن با تراکم نسبی مشخص و تکرارپذیری شرایط آزمایشگاهی، روش بارش ماسه انتخاب شده است. سیستم بارگذاری به‌صورت هوای فشرده است که قابلیت اعمال بار یکنواخت و استاتیک را داراست. رابطه نشست نسبی نهایی با عرض شالوده‌های واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط به‌صورت خطی بوده و با ازدیاد عرض شالوده، پی در نشست نسبی نهایی کمتری به ظرفیت باربری نهایی خود می‌رسد. مقدار نشست شالوده واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط، حدود ۱۰ درصد بیشتر از شالوده واقع بر خاک ماسه‌ای متراکم است. رفتار خاک تا فشار حدود ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی به‌صورت ارتجاعی خطی است. رابطه فشار- نشست پی نواری تا حدود ۵ درصد عرض پی، خطی است. گسیختگی برشی کلی در نشست نسبی حدود ۱۲ تا ۱۴ درصد اتفاق می‌افتد، به همین دلیل، پیشنهاد می‌شود برای تعیین ظرفیت باربری نهایی پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای، مقدار فشار نظیر ۱۲ درصد، ملاک عمل قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: عرض پی، تراکم نسبی ماسه، نشست نسبی نهایی، فشار.

۱. مقدمه

فصل مشترک بین خاک و سازه، پی نامیده می‌شود. وظیفه‌ی پی، انتقال بار از سازه به خاک است. پی‌های سطحی مانند نواری به‌طور گسترده‌ای برای انتقال بار روسازه به خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. ظرفیت باربری خاک به گونه‌ای تعیین می‌شود که اولاً گسیختگی برشی در خاک زیر شالوده رخ ندهد و ثانیاً نشست ایجاد شده، از نشست مجاز کمتر باشد. در طراحی پی‌های سطحی، محاسبه‌ی نشست و ظرفیت باربری نهایی از اهمیت زیادی برخوردار است. پیش‌بینی نشست پی‌ها یکی از مهم‌ترین و مشکل‌ترین مسائل پیش روی مهندسين ژئوتکنیک است. برای پی‌های با عرض کوچکتر، ظرفیت باربری نهایی ممکن است، عامل کنترل کننده باشد. از طرف دیگر، طراحی پی‌ها با عرض بزرگتر، ممکن است با معیار نشست کنترل شود. در طرح پی‌های کم عمق، اغلب، نشست تعیین‌کننده است.

میزان نشست ارتجاعی^۱ پی به نوع و شکل پی (مربعی، مستطیلی، دایره‌ای، نواری)، عرض یا قطر پی، عمق استقرار پی، صلبیت یا انعطاف‌پذیری پی، نوع خاک و مشخصات آن، تراکم خاک و نوع و مقدار بار وارده بستگی دارد. روش‌های تئوریک ارائه شده برای محاسبه نشست، به تنهایی قابل اطمینان نیستند و باید از نتایج تجربی حاصل از مدل‌های آزمایشگاهی و جمع‌آوری و تحلیل داده‌های مربوط به مشاهدات صحرایی استفاده نمود. تعیین نشست پی‌ها تحت بارهای استاتیک یکی از مهم‌ترین مباحث در مهندسی ژئوتکنیک است. اگرچه تاکنون مطالعاتی روی رفتار پی‌های سطحی تحت بارهای استاتیک انجام شده است، اما نشست پی‌ها تحت بارگذاری استاتیک کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، بررسی آزمایشگاهی و دقیق اثر بار استاتیک بر رفتار پی‌ها از مسائل مهم و ضروری به شمار می‌رود.

جهت درک رفتار خاک تحت اثر بار استاتیک، تحقیقاتی انجام شده است. تا کنون پژوهشگرانی به مطالعه رفتار شالوده‌ها پرداخته‌اند.

وسیک (۱۹۶۳) تأثیر وزن مخصوص خشک خاک بر نشست نسبی پی را بررسی نمود. نتایج این تحقیق نشان داد که برای یک نوع پی معین، کاهش در تراکم نسبی موجب افزایش نشست بر اثر اعمال بار نهایی می‌شود. وسیک (۱۹۷۳) ظرفیت باربری نهایی یک شالوده نواری واقع بر خاک را مورد بررسی قرار داد. نمودار فشار-نشست برای خاک در تراکم‌های مختلف بررسی شد. ایشان، سه نوع گسیختگی برشی کلی، موضعی و سوراخ-کننده را برای طبیعت گسیختگی برشی خاک زیر پی تعریف نمودند که به ترتیب برای خاک‌های ماسه‌ای متراکم، متوسط و سست اتفاق افتاده است. در حالت گسیختگی برشی کلی، نمودار فشار-نشست دارای یک اوج است که به آن ظرفیت باربری نهایی (q_u) و نشست نظیر آن را نشست نهایی (S_u) می‌گویند.

فراگاسی و لاتون (۱۹۸۴) به مطالعه تأثیر 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 (۱۹۹۳) با استفاده از مدل فیزیکی آزمایشگاهی به بررسی ظرفیت باربری پی نواری صلب واقع بر خاک ماسه‌ای پرداختند و مشاهده کردند که مقدار S_u در نشستی حدود ۱۰ درصد عرض شالوده نواری به‌وجود می‌آید. داس و عمر (۱۹۹۴) تأثیر عرض پی و تراکم نسبی خاک ماسه‌ای بر ظرفیت باربری نهایی و نشست نسبی نظیر آن را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، پی به طول $30/48$ سانتی‌متر و عرض‌های حدود ۵ تا ۱۸ سانتی‌متر و ماسه با تراکم‌های نسبی ۵۵، ۶۵ و ۷۵ درصد مورد آزمایش قرار گرفتند. برای کلیه آزمایش‌ها روی ماسه با تراکم نسبی ۷۵ درصد، با ازدیاد عرض پی،

^۱- Elastic settlement

ظرفیت باربری نهایی و نشست نظیر آن افزایش یافته است. نشست نسبی نظیر ظرفیت باربری نهایی در محدوده ۶ تا ۸ درصد بوده است.

دش و همکاران (۲۰۰۱) تأثیر تراکم نسبی خاک بر نمودار فشار- نشست نسبی پی نواری به طول ۳۳ و عرض ۱۰ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مقدار نشست نسبی نهایی حدود ۱۰ درصد است. دش و همکاران (۲۰۰۳) تأثیر ضخامت لایه ماسه‌ای زیر پی دایره‌ای به قطر ۱۵ سانتی‌متر بر نمودار فشار- نشست نسبی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با ازدیاد ضخامت ماسه، ظرفیت باربری افزایش یافته و پی در نشستی معادل ۱۷ درصد قطر، به حداکثر مقدار ظرفیت باربری می‌رسد. پاترا و همکاران (۲۰۰۵) تأثیر عمق استقرار پی نواری به طول ۳۶ و عرض ۸ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم نسبی ۷۱ درصد را بر ظرفیت باربری نهایی و نشست نسبی بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که با ازدیاد عمق استقرار پی، ظرفیت باربری نهایی و نشست نسبی نهایی افزایش یافته است. مقدار نشست نسبی برای عمق استقرار صفر، حدود ۱۷ درصد و برای عمق استقرار معادل عرض شالوده، حدود ۲۵ درصد بوده است. مصلی‌نژاد و همکاران (۲۰۰۸) تأثیر تراکم نسبی خاک ماسه‌ای (۴۶، ۶۸ و ۷۹ درصد) بر منحنی ظرفیت باربری- نشست یک پی مربعی به ابعاد ۲۰ سانتی‌متر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که با ازدیاد تراکم نسبی، ظرفیت باربری نهایی افزایش یافته است. رابطه ظرفیت باربری تا حدود ۱ درصد نشست نسبی، به صورت خطی است.

سیریش و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر تراکم نسبی خاک ماسه‌ای سست (تراکم نسبی ۴۸ درصد)، متوسط (تراکم نسبی ۵۹ درصد) و متراکم (تراکم نسبی ۷۰ درصد) را بر نمودار ظرفیت باربری- نشست نسبی پی دایره‌ای به قطر ۱۵ سانتی‌متر، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این

تحقیق نشان داد که ظرفیت باربری پی واقع بر خاک ماسه‌ای متراکم، بیشتر از سست است. از طرفی، مقدار ظرفیت باربری نهایی در نشست نسبی ۱۶، ۱۳ و ۱۱ درصد به ترتیب در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم ایجاد شده است. لاتا و سوموانشی (۲۰۰۹) منحنی ظرفیت باربری- نشست نسبی یک پی مربعی به ابعاد ۱۵ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده با تراکم نسبی ۷۰ درصد را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که ظرفیت باربری نهایی در نشست نسبی حدود ۱۴ درصد به وقوع پیوسته است.

محمد (۲۰۱۰) تأثیر تراکم خاک ماسه‌ای سست و متراکم بر ظرفیت باربری پی نواری به عرض ۱۰ سانتی-متر را مورد بررسی قرار داد. برای تعیین ظرفیت باربری نهایی، نشست نسبی ۱۰ درصد ملاک عمل قرار گرفته است. در نمودار ظرفیت باربری بر حسب نشست نسبی، مقدار حداکثر ظرفیت باربری برای شالوده واقع بر خاک متراکم، در نشست نسبی حدود ۱۴ درصد حاصل شده است. السواف و نذیر (۲۰۱۰) تأثیر تراکم نسبی خاک ماسه‌ای سست (۴۰ درصد) و متراکم (۷۵ درصد) روی ظرفیت باربری پی مستطیلی به طول ۱۲ و عرض ۸ سانتی‌متر را مورد بررسی قرار دادند. برای شالوده واقع بر خاک متراکم، ظرفیت باربری نهایی در نشست نسبی حدود ۶/۵ درصد به وقوع پیوسته است.

مقدس تفرشی و داوسون (۲۰۱۰) نمودار ظرفیت باربری- نشست نسبی پی نواری به طول ۱۴/۸ و عرض ۷/۵ سانتی‌متر واقع بر یک خاک ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده با تراکم نسبی ۷۲ درصد را مورد بررسی قرار دادند. مقدار نشست نسبی در ظرفیت باربری نهایی، حدود ۱۲ درصد بوده است.

بوشهریان و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر ابعاد پی مربعی (۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر) بر منحنی ظرفیت باربری- نشست واقع بر خاک ماسه‌ای خوب دانه‌بندی شده با تراکم نسبی ۷۰ درصد را مورد بررسی قرار دادند و به

این نتیجه رسیدند که با ازدیاد ابعاد پی مربعی، ظرفیت باربری نهایی و نشست نظیر آن نیز افزایش می‌یابد. میرمحمدحسینی و ابریشمی (۱۳۹۱) اثر سرعت بارگذاری بر ظرفیت باربری و نشست نسبی نهایی پی نواری را مورد بررسی قرار دادند. پی نواری به عرض ۵ سانتی‌متر و طول ۳۴ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای بدانه‌بندی شده با تراکم نسبی ۵۶ درصد تحت تأثیر بار استاتیک با سرعت‌های مختلف قرار گرفت. ایشان به این نتیجه رسیدند که افزایش سرعت بارگذاری منجر به کاهش اندک ولی قابل مشاهده‌ی ظرفیت باربری نهایی و افزایش نسبی نشست‌های نهایی خاک می‌شود. نتایج این تحقیق نشان داد که در محدوده سرعت‌های بارگذاری انجام شده، مقدار نشست نسبی در محدوده ۱۶ تا ۱۷/۵ درصد تغییر داشته است.

ابوفرسخ و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر شکل و عمق استقرار پی واقع بر خاک ماسه‌ای بدانه‌بندی شده را بر ظرفیت باربری نهایی و نشست نسبی بررسی کردند. در این تحقیق، از پی مربعی به ابعاد ۱۵/۲ سانتی‌متر و پی مستطیلی به عرض ۱۵/۲ و طول ۲۵/۴ سانتی‌متر استفاده شده است. پی‌ها در دو عمق استقرار صفر و برابر عرض پی، مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که ظرفیت باربری پی مربعی حدود ۲ درصد بیشتر از پی مستطیلی است. ظرفیت باربری پی مربعی با عمق استقرار برابر عرض آن، حدود ۳/۹ برابر پی با عمق استقرار صفر است. از طرفی، مقدار نشست نسبی در محل ظرفیت باربری نهایی حدود ۷ تا ۱۰ درصد برای پی‌های با عمق استقرار برابر عرض پی و ۴ تا ۷ درصد برای پی‌های با عمق استقرار صفر است. یعنی با ازدیاد عمق استقرار، پی در نشست نسبی بیشتری به ظرفیت باربری نهایی خود می‌رسد.

پورحسینی و حسینی ناوی (۱۳۹۳) منحنی فشار- نشست پی به طول ۱۴/۶ و عرض ۵ سانتی‌متر واقع بر

خاک ماسه‌ای با وزن مخصوص ۱۶ کیلونیوتن بر متر مکعب را بررسی نمودند. نمودار فشار- نشست دارای قله نبود. مقدار ظرفیت باربری برابر ۳۰ کیلونیوتن بر متر مربع به دست آمد. نشست نسبی نظیر آن حدود ۷ درصد بود. جزدارابی و مقدس (۱۳۹۵) رفتار فشار- نشست دو پی دایره‌ای به قطرهای ۱۱/۳ و ۳۰ سانتی‌متر را در آزمایش کوچک و بزرگ مقیاس مقایسه نمودند و به این نتیجه رسیدند که اگرچه نتایج آزمایش‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس از نظر کمی تفاوت قابل توجهی دارند، اما رفتار تنش- نشست مدل پی و تأثیر پارامترهای مختلف در رفتار بستر، در هر دو آزمایش از نظر کیفی یکسان است. نادری و هاتف (۱۳۹۶) رفتار فشار- نشست پی دایره‌ای به قطر ۱۲ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای با وزن مخصوص خشک ۱۶ کیلونیوتن بر متر مکعب را مورد بررسی قرار دادند. به دلیل اینکه منحنی فشار- نشست نقطه اوجی نداشت، ظرفیت باربری نهایی از روش مماسی^۱ به دست آمد. در این روش، ظرفیت باربری نهایی پی، از محل برخورد دو مماس در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی نمودار فشار- نشست تعیین شد. ظرفیت باربری نهایی پی دایره‌ای طبق این روش، برابر ۳۵۷ کیلو پاسکال و نشست نسبی نظیر ظرفیت باربری برابر ۵/۵ درصد به دست آمده است. دبیریان و همکاران (۲۰۱۷) نمودار فشار- نشست نسبی پی نواری به عرض ۵ و طول ۳۴ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم نسبی ۷۲ درصد را بررسی نمودند. ظرفیت باربری نهایی حدود ۱۵۰ کیلوپاسکال به دست آمد. مقدار نشست نسبی در محل ظرفیت باربری نهایی حدود ۱۵ درصد بود. بدخشان و نورزاد (۲۰۱۷) ظرفیت باربری پی‌های مربعی (بعد ۱۰/۶ سانتی‌متر) و دایره‌ای (قطر ۱۲ سانتی‌متر) با مساحت یکسان واقع بر خاک ماسه‌ای بدانه‌بندی شده با تراکم نسبی ۶۰ درصد را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ظرفیت باربری نهایی پی مربعی تقریباً با پی

^۱- Tangant method

است. در مقایسه با مطالعات وسیعی که در رابطه با ظرفیت باربری استاتیک پی‌های سطحی انجام شده، مطالعات محدودی در زمینه نشست پی‌های سطحی تحت اثر بارهای وارده صورت گرفته است. بنابراین، انجام تحقیق جامع‌تری که بتواند تأثیر پارامترهای مهم بر رفتار پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای را به‌خوبی نمایان سازد، ضروری به نظر می‌رسد، در این پژوهش، با استفاده از دستگاه آزمایش نشست شالوده نواری واقع بر خاک ماسه‌ای تحت اثر سربار استاتیک بررسی شده و با استفاده از مدل فیزیکی، به تحلیل و بررسی رفتار شالوده واقع بر خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری استاتیک و تأثیر عوامل مختلف روی رفتار خاک پرداخته شده است. در این مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر عرض شالوده، تراکم خاک ماسه‌ای و فشار استاتیک بر نشست شالوده نواری مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مشخصات مصالح

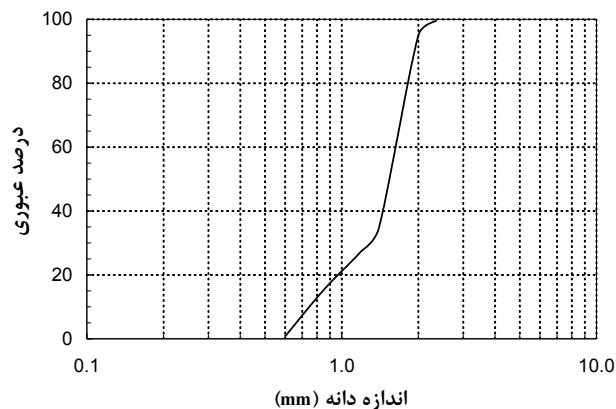
مصالح ماسه‌ای انتخابی، از محصولات شرکت تاوان سیلیس گرمسار است که از سنگ سیلیس معدن فیروزه‌کوه در اندازه‌های مختلف تهیه می‌گردد. دانه‌های این ماسه سیلیسی^۱ تیزگوشه و سطوح آنها زبر است. نتایج آزمایش دانه‌بندی نشان داد که کلیه دانه‌های مصالح از الک نمره ۸ می‌گذرد و روی الک نمره ۳۰ باقی می‌ماند (شکل ۱). بر این اساس و مطابق تعریف سیستم طبقه بندی یونیفاید، مصالح خاکی مورد استفاده در این تحقیق، ماسه متوسط بدانه‌بندی شده 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.

دایره‌ای با سطح مقطع یکسان، برابرند. تبری و همکاران (۱۳۹۷-الف) نمودار فشار- نشست نسبی پی دایره‌ای به قطر ۳۰ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای بدانه‌بندی شده با تراکم متوسط (تراکم نسبی ۵۵ درصد) را مورد بررسی قرار دادند. نمودار دارای قله مشخصی نبود و مقدار ظرفیت باربری از روش مماسی برابر ۸۵ کیلوپاسکال به دست آمد. نشست نسبی نظیر آن حدود ۶ درصد بود. تبری و همکاران (۱۳۹۷-ب) منحنی ظرفیت باربری- نشست نسبی پی دایره‌ای به قطر ۳۰ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای بدانه‌بندی شده فیروزکوه با تراکم نسبی ۷۲ درصد را مورد تحقیق قرار دادند. مقدار ظرفیت باربری نهایی بر اساس روش تقاطع مماس‌های ابتدا و انتهای منحنی فشار- نشست برابر ۲۹۰ کیلو پاسکال به دست آمد. مقدار نشست نسبی نظیر برابر ۱۷ درصد بود. فاضلی و همکاران (۲۰۲۱)، بایرام و سادوغلو (۲۰۲۱)، گیل و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر تراکم نسبی خاک ماسه‌ای بر منحنی فشار- نشست را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که ازدیاد تراکم نسبی خاک، باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود.

بهارتی و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر عمق استقرار و خروج از مرکزی را بر ظرفیت باربری و نشست پی مستطیلی واقع بر خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش عمق استقرار و کاهش خروج از مرکزی، نشست پی کاهش می‌یابد.

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 استاتیک و نیز مشخص کردن جنبه‌های مختلف رفتار آن تحت اثر بار وارد به پی احساس می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده در بخش قبلی، مطالعات آزمایشگاهی کمی در مورد نشست پی‌های سطحی در معرض بارگذاری استاتیک واقع بر خاک ماسه‌ای انجام شده

^۱- Silica sand



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه

جدول ۱. خلاصه مشخصات فیزیکی خاک ماسه‌ای

مقدار	واحد	علامت اختصاری	نام مشخصه
۲/۱۸	-	C_u	ضریب یکنواختی
۱/۳۸	-	C_c	ضریب انحناء منحنی دانه بندی
۰/۷۵	mm	D_{10}	اندازه مؤثر دانه‌ها
۱/۲۹	mm	-	-
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^3	$(\gamma_d)_{min}$	وزن مخصوص خشک حداقل
۱/۷۱	g/cm^3	$(\gamma_d)_{max}$	وزن مخصوص خشک حداکثر

۲-۲. دستگاه آزمایش

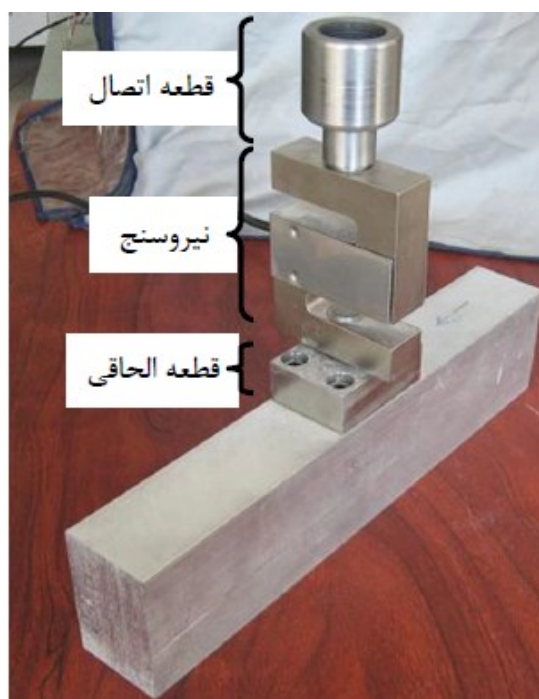
۲-۲-۱. مدل پی

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 کارکردن با آن راحت باشد. به همین منظور، برای ساخت مدل پی، از آلومینیوم استفاده شده است. عرض مدل پی

نزدیکی مقادیر نسبت تخلخل حداکثر و حداقل نشان می‌دهد که حصول تراکم‌های مختلف دشوار می‌باشد. با توجه به اهداف تحقیق و خصوصیات سیستم بارش، جرم مخصوص $1/55 g/cm^3$ معادل تراکم نسبی ۵۰/۵ درصد، یعنی تراکم متوسط و جرم مخصوص $1/62 g/cm^3$ معادل تراکم نسبی ۷۱/۷ درصد، یعنی حالت متراکم انتخاب شده است.

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 زیر شده است. در شکل ۲، یک مدل پی نشان داده شده است.

با توجه به طول محفظه‌ی خاک و برای کاهش اثر دیواره-ها و تشکیل کامل گوه‌های لغزش، ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر انتخاب شده است. عرض پی با توجه به محدوده تغییرات آن در تحقیقات مشابه قبلی، مدل‌سازی عددی، قابلیت دستگاه بارگذاری و رسیدن به شرایط کرنش مسطح، انتخاب شده است. برای رعایت صلبیت، ضخامت مدل پی نیز معادل ۷/۵ 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 نیروسنج و ملحقات مربوطه

اصطکاک جدار با مصالح، از داخل ورق پلکسی گلاس به آن متصل شده است. محفظه خاک روی ریلی قرار دارد که امکان جابجایی آن برای عملیات بارش و بارگذاری فراهم می‌سازد.

۲-۲-۳. سیستم بارش

نمونه‌سازی، یکی از مراحل مهم در مطالعات آزمایشگاهی است. روش‌های مختلفی برای آماده‌سازی نمونه‌ها متناسب با جنس خاک پیشنهاد شده است. از جمله روش‌های مناسب برای خاک‌های ماسه‌ای خشک

۲-۲-۲. محفظه خاک

محفظه‌ی خاک دارای ابعاد داخلی به طول ۸۰ عرض ۳۴/۲ و عمق ۷۵ سانتی‌متر است. به‌منظور ایجاد صلبیت مورد نیاز و تقلیل تغییرشکل‌های 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 تغییرشکل خاک را فراهم می‌سازد. وجه چهارم (یکی از وجوه طولی)، از ورق فلزی ساخته شده ولی برای کاهش

۱۶۰ میلی‌متر با ظرفیت بارگذاری ۲ تن استفاده شده است. سیلندر دو سر شفت دوطرفه، توسط شیر متناسب-ساز برقی که نوعی شیر تنظیم فشار است، کنترل می‌شود. این شیر به وسیله‌ی کارت D/A و نرم‌افزار توسعه‌یافته‌ی شیر برقی از سیستم رایانه‌ای فرمان می‌گیرد. بر این اساس، می‌توان بار استاتیک را تا میزان معین و با سرعت مورد نظر به صورت خطی روی مدل پی اعمال کرد. سرعت اعمال بار در آزمایش‌های انجام شده، حدود ۵ کیلوگرم بر ثانیه بود.

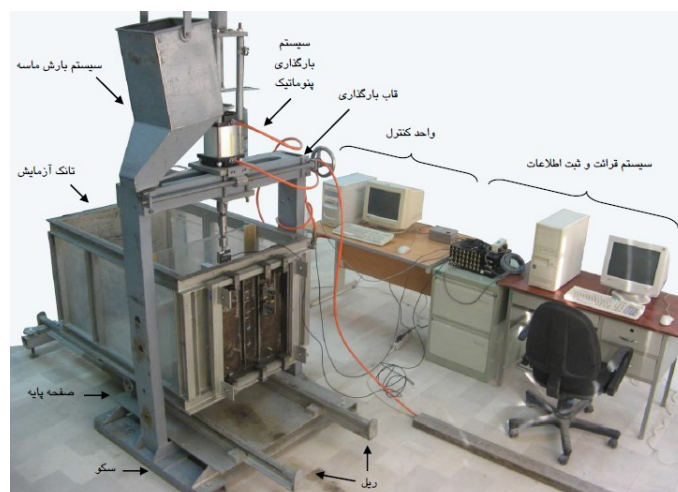
۲-۲-۵. سیستم قرائت و ثبت داده‌ها

از حسگر اندازه‌گیری تغییر مکان با دامنه‌ی جابجایی ۱۰ سانتی‌متر و با قابلیت اندازه‌گیری جابجایی تا سرعت ۱۰ متر بر ثانیه با دقت ۰/۰۵ میلی‌متر برای اندازه‌گیری نشست و از حسگر اندازه‌گیر نیرو (سلول بار) دینامیک با شکل S و با ظرفیت ۲/۵ تن برای اندازه‌گیری بار محوری اعمالی با دقت ۰/۶ کیلوگرم استفاده شده است. چهار حسگر (سنسور) اندازه‌گیری فشار نرمال در وجوه جانبی و یک حسگر در کف، به منظور اندازه‌گیری فشار، نصب شده است. طراحی و ساخت این حسگر نیز برای آزمایش‌های سریع چنان است که قادر به اندازه‌گیری و ثبت تغییرات سریع فشار باشد. اطلاعات حسگرها به صورت آنالوگ توسط یک سیستم ثبت داده‌های ۳۲ کاناله‌ی دینامیک، 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.

می‌توان به بارش، ارتعاش و تراکم اشاره نمود. برای به‌دست آمدن جرم مخصوص مشخص در این تحقیق و رسیدن به نمونه‌های همگن با تراکم نسبی مشخص و تکرارپذیری شرایط آزمایشگاهی، روش بارش ماسه انتخاب شد که خاک از ارتفاعی معین و با سرعتی ثابت داخل محفظه ریخته می‌شود. ارتفاع بارش، سرعت بارش و مشخصات مصالح، بر جرم مخصوص لایه ریخته شده مؤثرند. به همین دلیل، برای یک نوع ماسه خاص، با استفاده از صفحات مشبک و انتخاب ارتفاعات بارش گوناگون، دستگاه بارش برای مصالح مورد نظر واسنجی شده است. در نتیجه می‌توان تراکم‌های مختلف را به‌طور مناسب به‌دست آورد. بدین ترتیب، نمونه‌های آماده شده هم از نظر یکنواختی قابل قبول بوده و هم قابلیت تکرار دوباره را خواهند داشت. تعدادی ظرف، حین بارش داخل محفظه جاگذاری شد تا بتوان با تعیین وزن و حجم خاک از جرم مخصوص نمونه ساخته شده اطمینان حاصل نمود. تعداد زیادی از پژوهشگران قبلی از جمله پورحسینی و حسینی ناد (۱۳۹۳)، بدخشان و نورزاد (۲۰۱۷)، فاخر و فخرالدین (۲۰۲۱) و اُسش- اینفانته و همکاران (۲۰۲۲) برای آماده سازی خاک، از روش بارش استفاده کرده‌اند.

۲-۲-۴. سیستم بارگذاری

سیستم بارگذاری به صورت هوای فشرده است. ابعاد سیلندر بارگذاری باید متناسب با ابعاد پی و مشخصات خاک به گونه‌ای باشد که بتواند بار گسیختگی مورد نظر را اعمال نماید. همچنین، برای کنترل و عملکرد مطلوب سیلندر، باید نیروی اصطکاک آن اندک باشد. در مدل حاضر، با توجه به نکات یاد شده، از سیلندر با قطر



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

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 چهار لایه به ضخامت ۱۴ سانتی‌متر و از دو ارتفاع ثابت، داخل محفظه باریده می‌شود. ارتفاع بارش با توجه به واسنجی سیستم بارش به گونه‌ای انتخاب شد که تغییرات آن تأثیر چندانی بر جرم مخصوص ماسه نداشته باشد و بتوان دو حالت تراکم 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 و به وسیله‌ی ظروف صلبی که در گوشه‌های محفظه جاگذاری شده‌اند، کنترل می‌شود. عملیات بارش تا

رسیدن به سطح نهایی ادامه یافت. 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، محفظه-ی 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. خلاصه آزمایش‌های انجام شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. خلاصه آزمایش‌های انجام شده

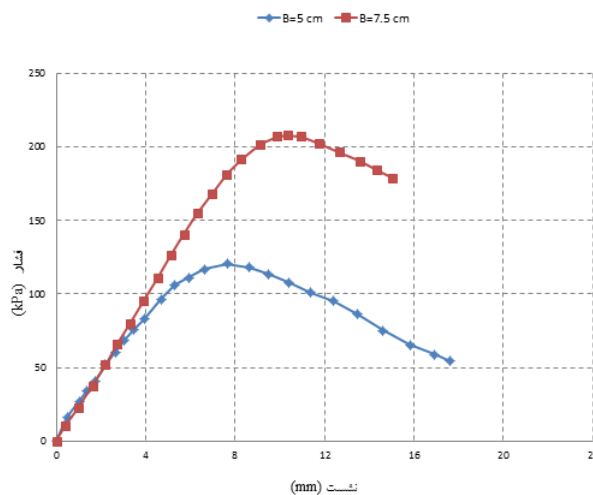
عرض شالوده (سانتی‌متر)	تراکم نسبی (درصد)	
۵	۵۰/۵	۷۱/۷
۷/۵	۵۰/۵	۷۱/۷
۱۰	۵۰/۵	۷۱/۷

۳. نتایج و بحث

۳-۱. تأثیر عرض شالوده بر منحنی فشار- نشست

نشست نهایی شالوده سطحی به عواملی نظیر نوع، تراکم و مقاومت خاک، عمق استقرار شالوده، نوع و ابعاد آن بستگی دارد. شالوده‌های نواری به عرض ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر روی خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط قرار گرفته و تنش یکنواختی با سرعت ثابت به آنها اعمال شده است. با اعمال فشار یکنواخت q به شالوده، نشست در آن به-وجود می‌آید. در صورت افزایش فشار یکنواخت، نشست شالوده به تدریج افزایش می‌یابد. زمانی که q به q_u می‌رسد، گسیختگی خاک زیر شالوده رخ داده و شالوده به ظرفیت باربری نهایی خود می‌رسد. با ادامه

بارگذاری شالوده، بدون افزایش بیشتر q ، شالوده دچار نشست بسیار زیادی می‌شود. نمودار فشار- نشست شالوده‌های به عرض ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر واقع بر خاک با تراکم متوسط در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق مشاهدات صورت گرفته تحقیق حاضر، در کلیه آزمایش‌های بارگذاری استاتیک، حالت گسیختگی برشی کلی در خاک زیر پی رخ می‌دهد. یعنی مطابق تعریف وسیک (۱۹۷۳)، نقطه گسیختگی در نمودار فشار- نشست کاملاً واضح و مشهود بوده، بار تا مقدار حداکثر افزایش و سپس کاهش می‌یابد و لحظه بار حداکثر، حالت نهایی^۱ نامیده می‌شود و گسیختگی به-صورت ناگهانی می‌باشد.



شکل ۴. نمودار فشار- نشست شالوده‌های به عرض ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر واقع بر خاک با تراکم متوسط

۳-۲. تأثیر عرض شالوده بر نشست نهایی

یکی از عوامل تأثیرگذار بر نشست پی‌نواری، عرض آن است. عرض شالوده (B) بر نشست نهایی (S_u) نیز تأثیرگذار است. مقدار نشست نهایی شالوده نواری واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط با عرض ۵ سانتی‌متر برابر ۷/۷۲ میلی‌متر و در عرض‌های ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر ۱۰/۳۰ و ۱۳/۲۸ میلی‌متر است. با ازدیاد عرض از ۵ به ۷/۵ سانتی‌متر، مقدار نشست نهایی حدود

۳۳ درصد و با ازدیاد عرض از ۷/۵ به ۱۰ سانتی‌متر، نشست نهایی حدود ۲۹ درصد افزایش می‌یابد. همانطور که از شکل ۵ ملاحظه می‌شود، رابطه نشست با عرض پی به صورت خطی بوده و مقدار ضریب تعیین آن برابر ۰/۹۹۴ است. این رابطه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

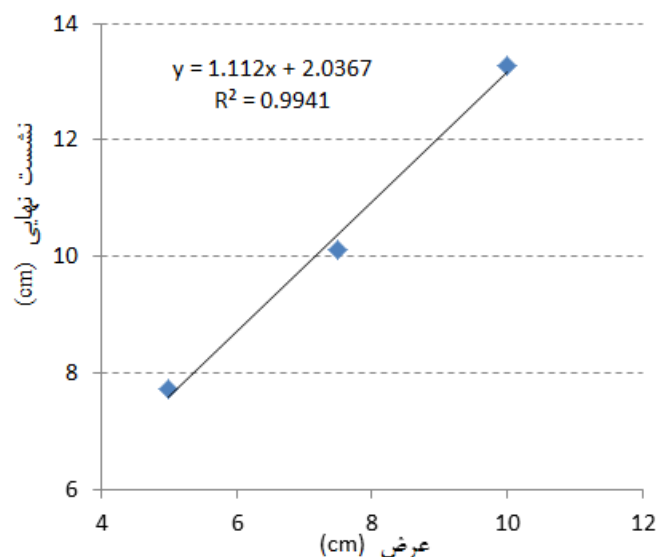
$$S_u(\text{mm}) = 1.112B(\text{cm}) + 2.0367 \quad (1)$$

این رابطه نشان می‌دهد که با ازدیاد عرض شالوده، نشست نهایی آن نیز افزایش می‌یابد. این یافته مشابه نتایج

^۱- Ultimate

باریک هستند. به عبارتی، با افزایش عرض پی، مقدار نشست افزوده می‌شود. با ازدیاد عرض پی نواری، محدوده بیشتری از خاک زیر پی تحت تأثیر تنش قرار گرفته و به همین دلیل، مقدار نشست افزایش می‌یابد.

تحقیقات داس و عمر (۱۹۹۴) و بوشهریان و همکاران (۲۰۱۱) است. نشست خاک ماسه‌ای زیر پی نواری، به عرض پی نیز بستگی دارد. به ازای یک فشار ثابت، پی‌های عریض دارای نشست بیشتری نسبت به پی‌های



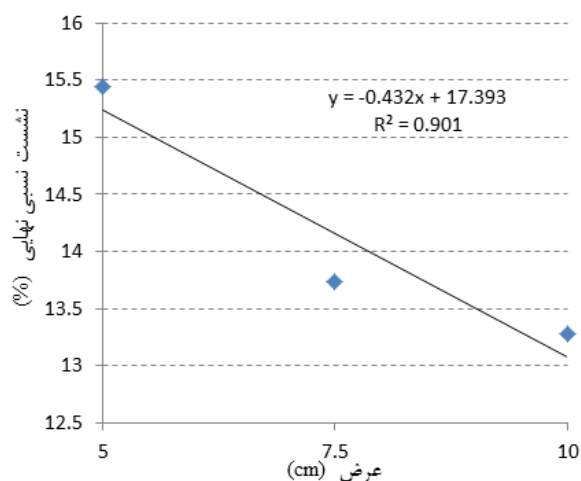
شکل ۵. تغییرات نشست نهایی (S_u) بر حسب عرض شالوده (B)

$$S_u/B(\%) = -0.432B(\text{cm}) + 17.393 \quad (2)$$

این رابطه نشان می‌دهد که با ازدیاد عرض شالوده، نشست نسبی نهایی آن کاهش می‌یابد. به عبارتی، می‌توان نتیجه گرفت که با ازدیاد عرض شالوده، پی در نشست نسبی نهایی کمتری به ظرفیت باربری نهایی خود می‌رسد، یعنی اینکه سختی خاک افزایش می‌یابد.

۳-۳. تأثیر عرض شالوده بر نشست نسبی نهایی

تعیین رابطه نشست نسبی نهایی با عرض شالوده نیز مهم است. در شکل ۶، تغییرات نشست نسبی نهایی با عرض شالوده ترسیم شده است. ضریب تعیین در این حالت برابر ۰/۹۰۱ می‌باشد. رابطه به صورت زیر است:

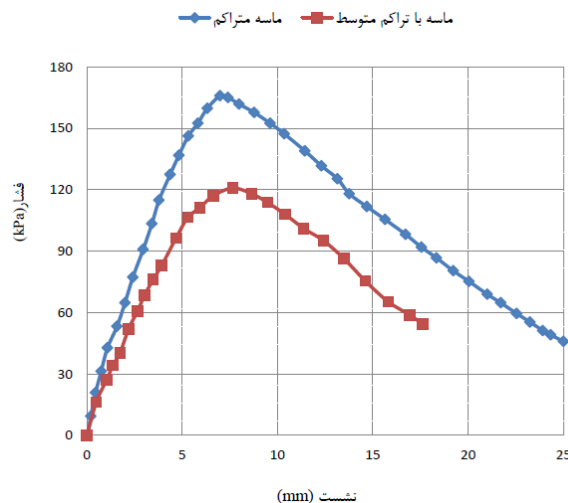


شکل ۶. تغییرات نشست نسبی نهایی (S_u/B) بر حسب عرض شالوده (B)

۳-۴. تأثیر تراکم نسبی خاک بر منحنی فشار-نشست

رفتار این شالوده روی خاک ماسه‌ای متراکم مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۷، نمودار مقایسه‌ای رفتار شالوده واقع بر خاک‌های متوسط و متراکم نشان داده شده است.

شالوده‌ای به عرض ۵ سانتی‌متر در یک آزمایش روی خاک با تراکم متوسط بارگذاری شد و در آزمایش دیگر

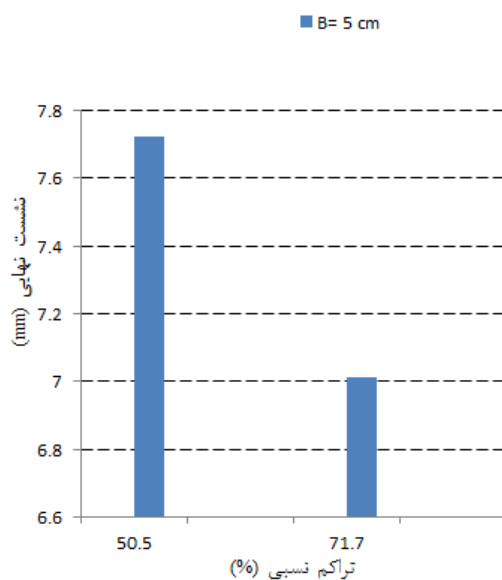


شکل ۷. نمودارهای مقایسه‌ای فشار - نشست شالوده به عرض ۵ سانتی‌متر واقع بر خاک‌های ماسه‌ای با تراکم متوسط و متراکم

۳-۵. تأثیر تراکم نسبی خاک بر نشست نهایی

تراکم خاک زیر پی بر نشست نهایی آن تأثیرگذار است. در شکل ۸، نمودار تأثیر تراکم نسبی بر نشست نهایی برای شالوده به عرض ۵ سانتی‌متر مشاهده می‌شود.

در یک فشار ثابت، نشست خاک متوسط بیشتر از خاک متراکم است. هرچه خاک سست‌تر باشد، ظرفیت باربری نهایی آن کاهش یافته و این ظرفیت باربری در نشست بیشتری اتفاق می‌افتد.



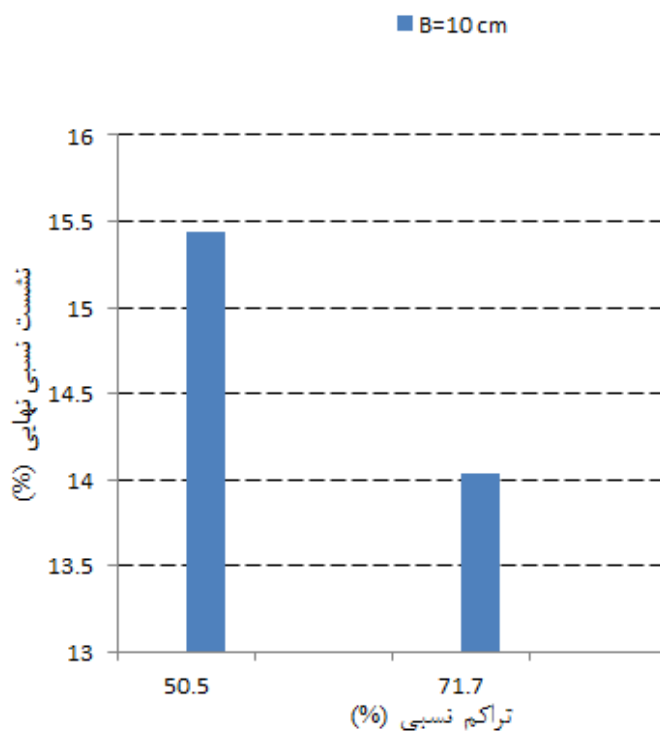
شکل ۸. تأثیر تراکم خاک بر نشست نهایی برای شالوده به عرض ۵ سانتی‌متر

۳-۶. تأثیر تراکم نسبی خاک بر نشست نسبی

نهایی

در شکل ۹، نمودار تأثیر تراکم نسبی بر نشست نسبی نهایی برای شالوده به عرض ۵ سانتی متر مشاهده می شود. نشست نسبی نهایی شالوده واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط $15/44$ درصد و شالوده واقع بر خاک متراکم برابر $14/03$ درصد است. با ازدیاد تراکم نسبی، پی در نشست نسبی کمتری به ظرفیت باربری نهایی می رسد. این نتیجه مشابه نتایج به دست آمده در تحقیقات وسیک (۱۹۷۳) است.

نشست نهایی شالوده واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط (تراکم نسبی از $50/7$) حدود ۱۰ درصد بیشتر از شالوده واقع بر خاک متراکم (با تراکم نسبی $71/7$) است. یکی از دلایل اصلی نشست پی، جابجایی دانه‌های جامد خاک است. هرچه تراکم خاک کمتر باشد، امکان جابجایی خاک بیشتر بوده و به همین دلیل، با کاهش تراکم خاک، مقدار نشست پی افزایش می یابد.



شکل ۹. تأثیر تراکم خاک بر نشست نسبی نهایی برای شالوده به عرض ۵ سانتی متر

در این تحقیق آزمایشگاهی، محدوده تغییرات نشست نسبی نهایی (S_u/B) بین ۱۲ تا $15/5$ درصد است. هرچه خاک متراکم تر باشد، S_u/B کاهش می یابد. ازدیاد عرض پی نواری باعث کاهش S_u/B می شود که در تحقیقات بوشهریان و همکاران (۲۰۱۱) نیز مشاهده شد. در تحقیقات مقدس تفرشی و داوسون (۲۰۱۲) مقدار نشست در محل ظرفیت باربری نهایی (حداکثر فشار) ۱۲

با ازدیاد تراکم نسبی از $50/7$ به $71/7$ ، مقدار نشست نسبی نهایی حدود ۱۰ درصد کاهش می یابد. این یافته مشابه نتایج تحقیق سیریش و همکاران (۲۰۰۹) است. بیشترین مقدار S_u/B برابر $15/44$ برای شالوده به عرض ۵ سانتی متر واقع بر خاک متوسط با تراکم نسبی $50/5$ بوده و کمترین مقدار S_u/B برابر $12/42$ برای شالوده نواری به عرض ۱۰ سانتی متر واقع بر خاک متراکم است.

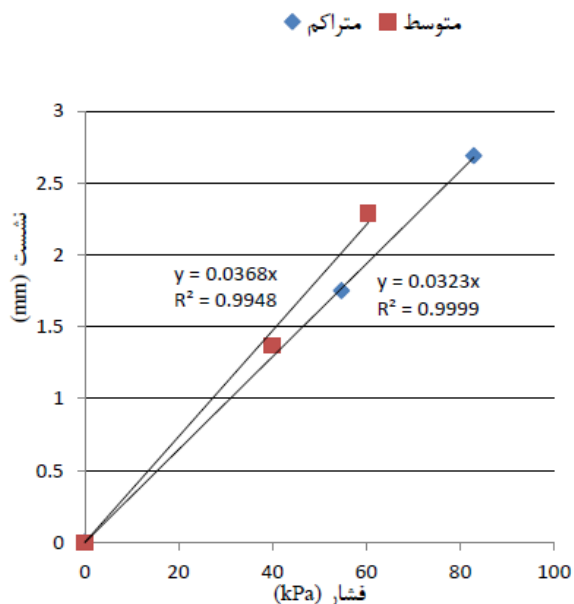
شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، رابطه نشست برحسب سربار استاتیک به صورت خطی با ضریب تعیین حدود یک است و این نشان‌دهنده آن است که رفتار خاک در محدوده‌ی فشارهای اعمالی، ارتجاعی خطی است. به عبارتی، این نتایج نشان می‌دهد که رفتار خاک تا فشار حدود ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی، به صورت ارتجاعی خطی است.

جهت تعیین میزان تأثیر تراکم خاک ماسه‌ای بر منحنی نشست- فشار شالوده نواری به عرض ۵ سانتی‌متر، می‌توان به نمودارهای مقایسه‌ای نشان داده شده در شکل ۱۰ توجه نمود. نمودارهای این شکل نشان می‌دهد که در محدوده فشارهای کمتر از ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی هر یک از شالوده‌های سطحی مورد آزمایش، رفتار خاک‌های ماسه‌ای با تراکم‌های نسبی ۵۰/۵ و ۷۱/۷ درصد به صورت ارتجاعی خطی است. به عنوان نمونه، برای ایجاد نشست ۲/۵ میلی‌متر در خاک ماسه‌ای با تراکم ۵۰/۵ درصد، فشاری برابر ۷۰ کیلو پاسکال مورد نیاز است. فشار ۷۵ کیلو پاسکالی می‌تواند چنین نشست ارتجاعی را در خاک ماسه‌ای با تراکم نسبی ۷۱/۷ به وجود آورد. در فشار یکسان، مقدار نشست شالوده واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط، حدود ۱۰ درصد بیشتر از شالوده واقع بر خاک ماسه‌ای متراکم است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که برای شالوده نواری واقع بر خاک‌های ماسه‌ای با تراکم متوسط و متراکم و در محدوده فشارهای استاتیک کمتر از ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی، رابطه نشست بر حسب سربار استاتیک به صورت خطی با ضریب تعیین حدود یک است.

درصد عرض پی نواری بود. برای عرض ۵ سانتی‌متر، مقدار نشست بسیار نزدیک به نتایج حاصل از تحقیقات لاتا و سوموانشی (۲۰۰۹)، مقدس تفرشی و داوسون (۲۰۱۲)، میرمحمد حسینی و ابریشمی (۱۳۹۱) و کارگر و میرمحمد حسینی (۲۰۱۸) است.

۷-۳. تأثیر فشار بر نشست شالوده

ظرفیت باربری نهایی شالوده به عرض ۵ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط برابر ۱۲۰/۸ کیلو پاسکال بود. در سه آزمایش، مقدار فشار استاتیک برابر ۳۹/۸۶ و در آزمایش‌های دیگر مقدار این فشار استاتیک برابر ۶۰/۴۰ بود. نمودار تغییرات نشست استاتیک بر حسب فشار وارده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در محدوده سربارهای وارده، رابطه نشست برحسب فشار به صورت خطی با ضریب تعیین ۰/۹۹۵ است و این نشان‌دهنده آن است که رفتار خاک در محدوده‌ی فشارهای اعمالی، ارتجاعی خطی است. از طرفی، با افزایش سربار، مقدار نشست پی نیز افزایش یافته است. با ازدیاد سربار، عمق بیشتری از خاک تحت تأثیر تنش قرار گرفته و همین امر باعث افزایش نشست می‌شود. ظرفیت باربری نهایی مدل مبنا در حالت استاتیک برای یک شالوده نواری به عرض ۵ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای متراکم برابر ۱۶۵/۹ کیلو پاسکال بود. مقادیر ۱۳ و ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی (معادل فشار ۵۴/۷۵ و ۸۲/۹۵ کیلو پاسکال) به شالوده به عرض ۵ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای متراکم وارد شد. تحت اثر این فشارها، شالوده دچار نشست شده است. نمودار تغییرات نشست استاتیک بر حسب فشار وارده در

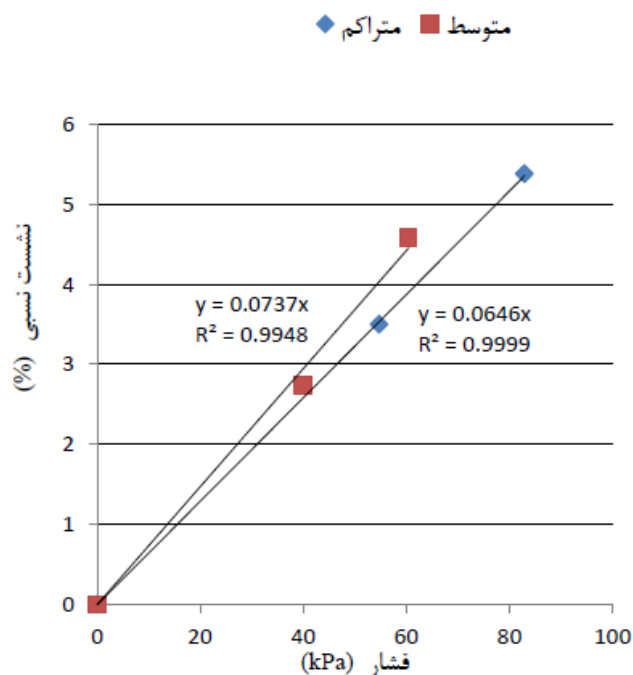


شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌ای تغییرات نشت بر حسب فشار برای شالوده به عرض ۵ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط و متراکم

درصد به صورت خطی است. به عبارتی، تا حدود ۵

درصد نشت نسبی، نشت پی را می‌توان ارتجاعی در نظر گرفت.

نمودار تغییرات نشت نسبی بر حسب فشار در شکل ۱۱ ترسیم شده است. رابطه نشت نسبی با فشار وارده در خاک‌های متوسط و متراکم به ترتیب تا ۴/۵۸ و ۵/۳۸



شکل ۱۱. نمودار مقایسه‌ای تغییرات نشت نسبی بر حسب فشار برای شالوده به عرض ۵ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط و متراکم

نکته قابل ذکر اینکه در یک پی واقعی، بارگذاری روی پی تا میزان ظرفیت باربری نهایی آن انجام نمی‌شود و با در نظر گرفتن ضریب اطمینان لازم و محدودیت نشست آیین‌نامه‌ای، طراحی پی انجام می‌شود. بنابراین، در طراحی ایمن شالوده باید به این نکته توجه نمود که مقدار نشست، نباید از مقدار مجاز آن بیشتر شود.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مدل آزمایشگاهی پی‌های نواری واقع بر خاک ماسه‌ای ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیقات حاضر، نتیجه‌گیری‌های زیر را می‌توان در مورد رفتار پی-های نواری که روی خاک ماسه‌ای قرار گرفته‌اند، انجام داد.

- برای شالوده به عرض ۵ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه-ای با تراکم متوسط، نشست نسبی نهایی (S_u/B) برابر ۱۵/۴۴ درصد است. نشست نسبی نهایی برای شالوده‌های به عرض ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر ۱۳/۷۴ و ۱۳/۲۸ درصد است. یعنی افزایش عرض پی، سبب می‌شود تا ظرفیت باربری نهایی در نشست نسبی نهایی کمتری رخ دهد.

- رابطه نشست نسبی نهایی با عرض شالوده‌های واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط به صورت خطی بوده و ضریب تعیین آن برای آزمایش‌های انجام شده برابر ۰/۹۰۱ است. رابطه به صورت زیر است:

$$S_u/B(\%) = -0.432B(\text{cm}) + 17.393$$

این رابطه نشان می‌دهد که با ازدیاد عرض شالوده، نشست نسبی نهایی آن کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، می‌توان نتیجه گرفت که با ازدیاد عرض شالوده، پی در نشست نسبی نهایی کمتری به ظرفیت باربری نهایی خود می‌رسد؛ یعنی اینکه سختی خاک افزایش می‌یابد.

- نشست نهایی شالوده نواری به عرض ۵ سانتی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط (تراکم نسبی از ۵۰/۷)

حدود ۱۰ درصد بیشتر از شالوده واقع بر خاک متراکم (با تراکم نسبی ۷۱/۷) است. یعنی در یک فشار ثابت، نشست خاک با تراکم متوسط، بیشتر از خاک متراکم است.

- نشست نسبی نهایی شالوده واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط برابر ۱۵/۴۴ درصد و شالوده واقع بر خاک متراکم برابر ۱۴/۰۳ درصد است.

بیشترین مقدار S_u/B برابر ۱۵/۴۴ برای شالوده به عرض ۵ سانتی‌متر واقع بر خاک متوسط با تراکم نسبی ۵۰/۵ بوده و کمترین مقدار S_u/B برابر ۱۲/۴۲ برای شالوده نواری به عرض ۱۰ سانتی‌متر واقع بر خاک متراکم است. در این تحقیق آزمایشگاهی، محدوده تغییرات نشست نسبی نهایی (S_u/B) بین ۱۲ تا ۱۵/۵ درصد بود. هرچه خاک متراکم‌تر باشد، S_u/B کاهش می‌یابد.

- در فشار یکسان، مقدار نشست شالوده واقع بر خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط، حدود ۱۰ درصد بیشتر از شالوده واقع بر خاک ماسه‌ای متراکم است.

۱- رفتار خاک تا فشار حدود ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی، به صورت ارتجاعی خطی است.

۲- برای شالوده نواری واقع بر خاک‌های ماسه-ای با تراکم متوسط و متراکم و در محدوده فشارهای استاتیک کمتر از ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی، رابطه نشست بر حسب سربار استاتیک به صورت خطی با ضریب تعیین حدود یک است.

- رابطه نشست نسبی با شدت سربار وارده در خاک‌های متوسط و متراکم به ترتیب تا ۴/۵۸ و ۵/۳۸ درصد به صورت خطی است. به عبارتی، تا حدود ۵ درصد نشست نسبی (S/B)، نشست پی را می‌توان ارتجاعی در نظر گرفت. به عبارتی، رابطه فشار- نشست پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای تا حدود ۵ درصد عرض پی، خطی است.

گسیختگی برشی کلی در نشست نسبی حدود ۱۲ تا ۱۴ درصد اتفاق می‌افتد. به همین دلیل پیشنهاد می‌شود برای تعیین ظرفیت باربری نهایی پی نواری واقع بر خاک

ماسه‌ای، مقدار فشار نظیر ۱۲ درصد ملاک عمل قرار گیرد. جهت تبیین این امر مهم، انجام تحقیقات آزمایشگاهی با مقیاس بزرگ پیشنهاد می‌شود.

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.

تعمیم نتایج حاصل از این آزمایش‌های انجام شده روی مدل پی به موارد میدانی باید با دقت انجام شود، زیرا عملکرد پی واقع بر خاک ماسه‌ای به ابعاد پی و سایر عوامل تأثیرگذار بستگی دارد. از طرفی، با توجه به ابعاد پی‌ها و نوع خاک مورد استفاده در آزمایش‌های این تحقیق، اثر مقیاس و نحوه تعمیم نتایج به پی با ابعاد بزرگتر و واقعی، موضوع بسیار مهمی است، بنابراین،

۶. مراجع

پورحسینی، ر. و حسینی ناوی، س. ن. ۱۳۹۳. "ظرفیت باربری پی نواری واقع بر ماسه‌ی سست مقاوم‌شده با لایه‌ی ماسه‌ی مسلح". مهندسی عمران شریف، ۳۰/۲ (۱/۱): ۷۹-۷۳.
 تبرئی، ع.، ابریشمی، س.، سیدی حسینی نیا، س. ا. و گنجیان، ن. ۱۳۹۷-الف. "مطالعه آزمایشگاهی ظرفیت باربری شالوده دایره‌ای واقع بر سطح خاک دانه‌ای مسلح به ژئوگرید". نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۰ (۵): ۹۷۳-۹۸۶.
 تبرئی، ع.، ابریشمی، س.، سیدی حسینی نیا، س. ا. و گنجیان، ن. ۱۳۹۷-ب. "بررسی اثر فرکانس بارگذاری بر نشست و ظرفیت باربری خاک دانه‌ای مسلح به ژئوگرید". فصلنامه علوم و مهندسی زلزله، ۵ (۳): ۳۸-۲۷.
 جزدارابی، ن. و مقدس تفرشی، س. ن. ۱۳۹۵. "بررسی رفتار پی واقع بر لایه‌های مخلوط خاک و خرده‌لاستیک دانه‌ی: مطالعه آزمایشگاهی روی مدل‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس". مهندسی عمران شریف، ۳۲/۲ (۲/۲): ۷۹-۸۸.
 میرمحمدحسینی، س. م. و ابریشمی، س. ۱۳۹۱. "اثر سرعت بارگذاری بر ظرفیت باربری شالوده‌های نواری واقع بر خاک ماسه‌ای مسلح به ژئوگرید". مهندسی عمران شریف، ۲۸/۲ (۱): ۴۷-۳۹.
 نادری، ع. و هاتف، ن. ۱۳۹۶. "بررسی آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی ظرفیت باربری پی‌های حلقوی و دایره‌ی قرار گرفته بر روی ماسه مسلح". مهندسی عمران شریف، ۳۳/۲ (۱/۱): ۷۲-۶۳.

- Abu-Farsakh, M., Chen, Q. and Sharma, R. 2013. "An experimental evaluation of the behavior of footings on geosynthetic-reinforced sand". *Soils Found.*, 53(2): 335-348.
- Badakhshan, E. and Noorzad, A. 2017. "Effect of footing shape and load eccentricity on behavior of geosynthetic reinforced sand bed". *Geotext. Geomembranes*, 45(2): 58-67.
- Bayram, A. T. E. Ş. and Şadoğlu, E. 2021. "Experimental and numerical investigation of load-settlement behaviour to model shallow foundation rest on sandy soil". *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(2): 686-703.
- Bharti, G., Shukla, B. K., Srinivasan, V. and Bansal, V. 2022. "Experimental study on eccentrically loaded rectangular footing on sand for embedded condition to enhance serviceability of structures". *Materials Today: Proceedings*.
- Boushehrian, A. H., Hataf, N. and Ghahramani, A. 2011. "Modeling of the cyclic behavior of shallow foundations resting on geomesh and grid-anchor reinforced sand". *Geotext. Geomembranes*, 29(3): 242-248.
- Dabiryan, H., Kargar, M., Aghabeigi, E., Mir Mohammad Hosseini, S. M. and Hosseini Varkiyani, S. M. 2017. "Evaluating the performance of geocells made from needle-punched nonwoven layers in the bearing capacity of reinforced soil". *J. Text. Inst.*, 108(10): 1747-1752.
- Das, B. M. and Omar, M. T. 1994. "The effects of foundation width on model tests for the bearing capacity of sand with geogrid reinforcement". *Geotech. Geolog. Eng.*, 12(2): 133-141.

- Dash, S. K., Krishnaswamy, N. R. and Rajagopal, K. 2001. "Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand". *Geotext. Geomembranes*, 19(4): 235-256.
- Dash, S. K., Sireesh, S. and Sitharam, T. G. 2003. "Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay". *Geotext. Geomembranes*, 21(4): 197-219.
- El Sawwaf, M. and Nazir, A. K. 2010. "Behavior of repeatedly loaded rectangular footings resting on reinforced sand". *Alexandria Eng. J.*, 49(4): 349-356.
- Fakher, N. and Fakhruldin, M. 2021. "Experimental study of relative density effect on bearing capacity of sand reinforced with geogrid". *Kufa J. Eng.*, 12(3): 46-55.
- Fazeli Dehkordi, P., Ghazavi, M. and Karim, U. F. 2021. "Bearing capacity-relative density behavior of circular footings resting on geocell-reinforced sand". *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, doi: 10.1080/19648189.2021.1884901
- Fragaszy, R. J. and Lawton, E. 1984. "Bearing capacity of reinforced sand subgrades". *J. Geotech. Eng.*, 110(10): 1500-1507.
- Gill, G., Mittal, R. K. and Dandautiya, R. 2021. "Pressure settlement behaviour of strip footing resting on unreinforced and tire chips reinforced copper slag". *KSCE J. Civ. Eng.*, 25(1): 92-106.
- Kargar, M. and Mir Mohammad Hosseini, S. M. 2018. "Influence of reinforcement stiffness and strength on load-settlement response of geocell-reinforced sand bases". *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, 22(5): 596-613.
- Khing, K. H., Das, B. M., Puri, V. K., Cook, E. E. and Yen, S. C. 1993. "The bearing capacity of a strip foundation on geogrid-reinforced sand". *Geotext. Geomembranes*, 12(4): 351-361.
- Latha, G. M. and Somwanshi, A. 2009. "Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand". *Geotext. Geomembranes*, 27(4): 281-294.
- Moghaddas Tafreshi, S. N. and Dawson, A. R. 2010. "Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement". *Geotext. Geomembranes*, 28(1): 72-84.
- Moghaddas Tafreshi, S. N. and Dawson, A. R. 2012. "A comparison of static and cyclic loading responses of foundations on geocell-reinforced sand". *Geotext. Geomembranes*, 32: 55-68.
- Mohamed, M. H. 2010. "Two-dimensional experimental study for the behaviour of surface footings on unreinforced and reinforced sand beds overlying soft pockets". *Geotext. Geomembranes*, 28(6): 589-596.
- Mosallanezhad, M., Hataf, N. and Ghahramani, A. 2008. "Experimental study of bearing capacity of granular soils, reinforced with innovative grid-anchor system". *Geotech. Geolog. Eng.*, 26(3): 299-312.
- Patra, C. R., Das, B. M. and Atalar, C. 2005. "Bearing capacity of embedded strip foundation on geogrid-reinforced sand". *Geotext. Geomembranes*, 23(5): 454-462.
- Sireesh, S., Sitharam, T. G. and Dash, S. K. 2009. "Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlying clay bed with void". *Geotext. Geomembranes*, 27(2): 89-98.
- Useche-Infante, D., Aiassa Martinez, G., Arrúa, P. and Eberhardt, M. 2022. "Experimental study of behaviour of circular footing on geogrid-reinforced sand". *Geomech. Geoeng.*, 17(1): 45-63.
- Vesic, A. B. 1963. "Bearing capacity of deep foundations in sand". *Highway Res. Record*, 39: 112-153.
- Vesic, A. S. 1973. "Analysis of ultimate loads of shallow foundations". *J. Soil Mech. Found. Div.*, 99(1): 45-73.