

بررسی آزمایشگاهی اثر بارگذاری خارج از مرکز بر پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای با

وجود لایه نازک ضعیف

جواد صادقی^۱، احد باقرزاده خلخالی^{۲*}، جواد نظری افشار^۳، نوید گنجیان^۴

۱- گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، a-bagherzadeh@srbiau.ac.ir

۳- گروه مهندسی عمران، واحد شهرقدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴- گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

در برخی موارد، در پروفیل خاک، میان لایه نازک ضعیف وجود دارد که امکان دارد در مطالعات ژئوتکنیک این عوارض آشکار نشوند. همچنین بسیاری از پی‌های سطحی تحت بارگذاری‌های خارج از مرکز قرار می‌گیرند که به دلیل وجود اینگونه بارها، لنگرهایی به پی تحمیل می‌شود و در نتیجه پی دچار چرخش می‌شود و فشار زیر پی یکنواخت نمی‌ماند. در این تحقیق آزمایشگاهی بر روی یک مدل پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن و همراه با لایه نازک ضعیف با ضخامت و عمق قرارگیری متفاوت تحت بارگذاری‌های خارج از مرکز عمودی، به وسیله مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس سیستم خاک - پی انجام شده است. آزمایش‌های مدل فیزیکی در مخزن استوانه‌ای از جنس فولاد با قطر داخلی ۷۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر، انجام شده است. بررسی‌ها با تغییر ضخامت و عمق قرارگیری لایه نازک ضعیف در اثر بارهای خارج از مرکز انجام گرفته است. نتایج بیانگر آن است که وجود لایه ضعیف و بار خارج از مرکز باعث افزایش چرخش پی دایره‌ای نسبت به بستر ماسه‌ای همگن شده است، به طوری که در بستر ماسه‌ای با وجود لایه‌ی نازک ضعیف، بیشترین چرخش پی دایره‌ای برای بار خارج از مرکز $0.0625D$ (D قطر پی است) و ضخامت لایه نازک ضعیف $0.2D$ و عمق قرارگیری $0.5D$ برابر با $8/2$ درجه به دست آمده است و کمترین چرخش پی دایره‌ای برای ماسه همگن با بار خارج از مرکز $0.0625D$ برابر با $4/5$ درجه به دست آمده است که نشان می‌دهد، کاهش ۴۵ درصدی داشته است.

کلمات کلیدی

ظرفیت باربری، چرخش پی، لایه نازک ضعیف، بار خارج از مرکز، پی دایره‌ای.

خاک فاکتوری مهم و مؤثر در پیدایش و شکل‌گیری هر اکوسیستم طبیعی است. بر اثر فرسایش سنگ مادر، لایه‌های نازک از خاک تشکیل می‌شود و به مرور زمان لایه‌های جدیدتری از خاک روی لایه اولیه قرار می‌گیرند. با گذشت زمان لایه‌های زیرین تغییر شکل می‌دهند و در نهایت پروفیل خاک شکل می‌گیرد. به همین دلیل تشکیل میان‌لایه‌ها درون اکثر پروفیل‌های خاک اجتناب‌ناپذیر است و به دلیل اهمیت همین میان‌لایه‌ها در این تحقیق اثر میان‌لایه نازک ضعیف درون پروفیل خاک بررسی شده است.

درحالی‌که اکثر روش‌های تحلیلی، بر اساس فرض همگنی خاک بنا شده‌اند، معمولاً خاک‌های موجود در طبیعت به صورت همگن نبوده و ممکن است دارای لایه‌های نازک باشند که معمولاً در مطالعات ژئوتکنیک آشکار نمی‌شوند، علی‌رغم آنکه به نظر می‌رسد وجود لایه‌های نازک تأثیر ناچیزی داشته باشد، اساساً می‌تواند بر رفتار خاک - پی و دیگر سیستم‌های ژئوتکنیکی، مؤثر باشد.

در بسیاری از موارد، علاوه بر بارگذاری مرکزی، پی‌ها در معرض بارگذاری خارج از مرکز قرار می‌گیرند که در نتیجه این نوع بارگذاری، لنگرهایی به پی تحمیل می‌شود. در اثر لنگرهایی که به پی وارد می‌شود، فشار زیر پی یکنواخت نمی‌ماند و چرخش در پی اتفاق می‌افتد. شیب پی با افزایش بار خارج از مرکز افزایش می‌یابد و ظرفیت باربری به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد؛ بنابراین، اندازه‌های پی افزایش می‌یابد و طراحی را غیراقتصادی می‌کند [۱].

در پیشینه تحقیق مطالعه ظرفیت باربری نهایی خاک دو لایه (به‌عنوان مثال قرارگیری خاک قوی بر روی خاک ضعیف و یا بر عکس) نسبتاً انجام شده [۲-۴] و مطالعه بر روی خاک سه لایه نیز صورت گرفته است [۵-۷]؛ همچنین تأثیر بار خارج از مرکز بر پی‌های سطحی صورت گرفته است [۸-۱۰ و ۳] ولی در خصوص اثر بارگذاری خارج از مرکز بر پی دایره‌ای با وجود لایه نازک ضعیف مطالعات بسیار اندکی انجام شده است. در این بخش مطالعات انجام شده در خصوص خاک‌های لایه لایه در بخش‌های: وجود لایه نازک، خاک دو لایه، خاک چند لایه در اثر بارهای مرکزی و خارج از مرکز ارائه می‌شود.

والور و همکاران، اثر وجود یک‌لایه نازک ضعیف افقی بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری مستقر بر بستر ماسه‌ای متراکم را بررسی و گزارش نمودند که چنانچه عمق قرارگیری لایه ضعیف نازک کمتر از حدود چهار برابر عرض پی (۴B) باشد، به طور قابل ملاحظه‌ای بر روی مکانیسم گسیختگی و ظرفیت باربری نهایی پی اثرگذار است. همچنین در این تحقیق مشخص گردیده که وجود یک‌لایه ضعیف نازک، در مواردی می‌تواند باعث کاهش ظرفیت باربری تا حد ۸۰ درصد شود [۱۱].

عسکری و همکاران، با انجام آزمایش‌های مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس، رفتار پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه‌نازک را بررسی نمودند. مطابق این تحقیق برای بستر ماسه‌ای دارای لایه‌نازک ضعیف ساخته شده از پودر رس، لایه ضعیف در عمق بحرانی ۱B (عرض پی)، بیشترین تأثیر را بر ظرفیت باربری نهایی پی دایره‌ای و سختی سیستم خاک - پی داشته است [۱۲].

ای ساواف برای شناخت رفتار پی نواری تحت اثر بار خارج از مرکز مستقر بر ماسه مسلح با ژئوگرید، مجموعه‌ای از مطالعات آزمایشگاهی و عددی را با چندین شکل چیدمان از لایه‌های ژئوگرید با تعداد، طول، خروج از مرکزیت لایه همراه با اثر دانسیته نسبی ماسه و خروج از مرکزیت بار مورد بررسی قرار داده است.

ای ساواف بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی، ملاحظه نموده که نسبت ظرفیت باربری با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید دارای طول مهاری مناسب، بهبود (ارتقا) می‌یابد. برای حالت و شرایط مطالعه شده، تعداد بهینه لایه‌های ژئوگرید، سه لایه تعیین و نسبت طول لایه ژئوگرید به عرض پی (B) بزرگ‌تر از چهار پیشنهاد گردیده است. همچنین، تأثیر مسلح کننده خاک بر نسبت ظرفیت باربری در مقادیر کمتر خروج از مرکزیت بار و دانسیته‌های نسبی بیشتر، افزایش می‌یابد [۱۳].

دستپاک و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی بر روی یک مدل پی دایره‌ای تحت بار خارج از مرکز بر روی ماسه تقویت‌شده با ژئونت پرداختند. برای این منظور، پنج سری آزمایش به‌منظور ارزیابی تأثیر بعد تقویت‌کننده و بار خارج از مرکز بر ظرفیت باربری، نشست و چرخش پی انجام شد. در این تحقیق نمودار ظرفیت باربری و تغییر در موقعیت خط چرخش در سطوح مختلف بار برای شرایط تقویت‌شده و تقویت نشده ارائه شده است [۱۴].

ژئورگیدیس و باترفیلد نتایج بررسی پاسخ پی بر روی شن و ماسه، تحت بارهای خارج از مرکز و مایل ارائه دادند. در این تحقیق دستگاهی ساخته شد که می‌توانست به طور هم‌زمان بارهایی را بر پی‌ها در هر گریز از مرکز و شیب، بدون اعمال محدودیت بر جابه‌جایی

پی اعمال کند. نتایج آزمایشگاهی، در مقایسه با داده‌های منتشر شده، تفسیر شدند و روشی برای پیش‌بینی جابه‌جایی‌های عمودی و افقی و چرخش پی‌های بارگذاری شده بر روی ماسه ارائه شد [۱۵].

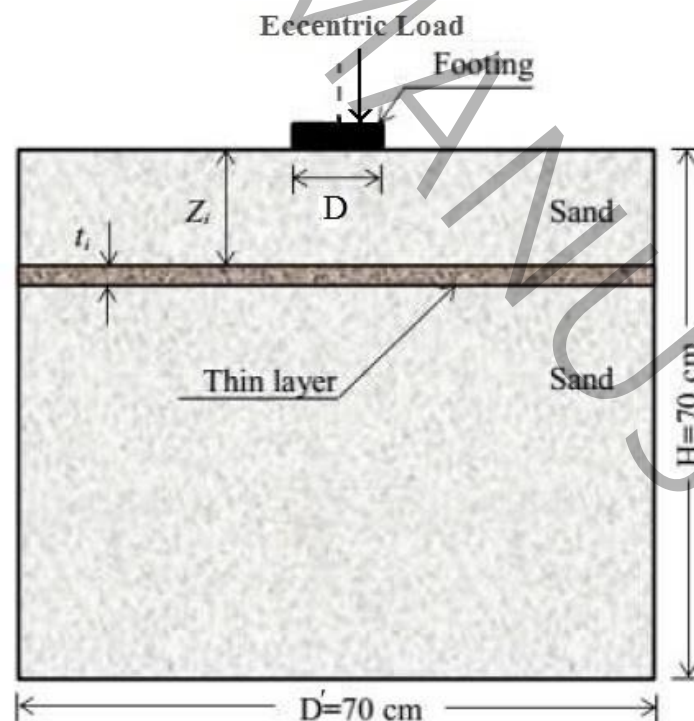
با بررسی پیشینه تحقیق فوق، کاملاً واضح است که تحقیقات محدودی در رابطه با اثر توده خاک‌های لایه‌ای و به‌ویژه حالت لایه‌های خاک حاوی لایه نازک ضعیف بر ظرفیت باربری نهایی و همچنین چرخش پی دایره‌ای در اثر بارگذاری خارج از مرکز انجام شده است، به‌نظر می‌رسد زمینه انجام تحقیقات و مطالعات بیشتر، می‌تواند به‌طور محسوسی به افزایش شناخت شرایط رفتاری و اثرات پارامترهای موجود در طبیعت و واقعیت بر ظرفیت باربری و چرخش پی‌ها منجر گردد. بنابراین در این مطالعه، تأثیر بارگذاری خارج از مرکز بر روی پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای با وجود لایه نازک ضعیف افقی با دانسیته نسبی متوسط و کمی کردن تأثیر پارامترهای مختلف بر نتایج چرخش نهایی پی دایره‌ای به عنوان نوآوری این مطالعه نسبت به مطالعات دیگر می‌باشد که به‌وسیله مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس سیستم خاک - پی بررسی می‌گردد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- طراحی و ساخت دستگاه آزمایش، مخزن آزمایش، پی مدل و سیستم بارگذاری

شکل کلی مسئله مورد بررسی شامل لایه‌های ماسه، میان‌لایه نازک، پی دایره‌ای، بارگذاری خارج از مرکز و ابعاد مخزن در شکل ۱ نشان داده شده است. پی دایره‌ای به‌صورت صلب بوده و بر روی سطح بستر قرار می‌گیرد، یعنی عمق مدفون صفر در نظر گرفته می‌شود. خاک بستر شامل دو نوع مصالح است: بستر ماسه‌ای و یک لایه ضعیف با ضخامت t . برای ماسه بستر از ماسه سیلیسی شکسته با دانسیته نسبی متوسط و با طبقه‌بندی SP استفاده شده است. جنس لایه‌نازک از مصالح با خصوصیات مقاومتی ضعیف نسبت به ماسه بستر استفاده شده است. برای انجام آزمایش‌ها، مدل آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس طراحی و ساخته شده است (شکل ۲).

Figure 1. Schematic of physical model



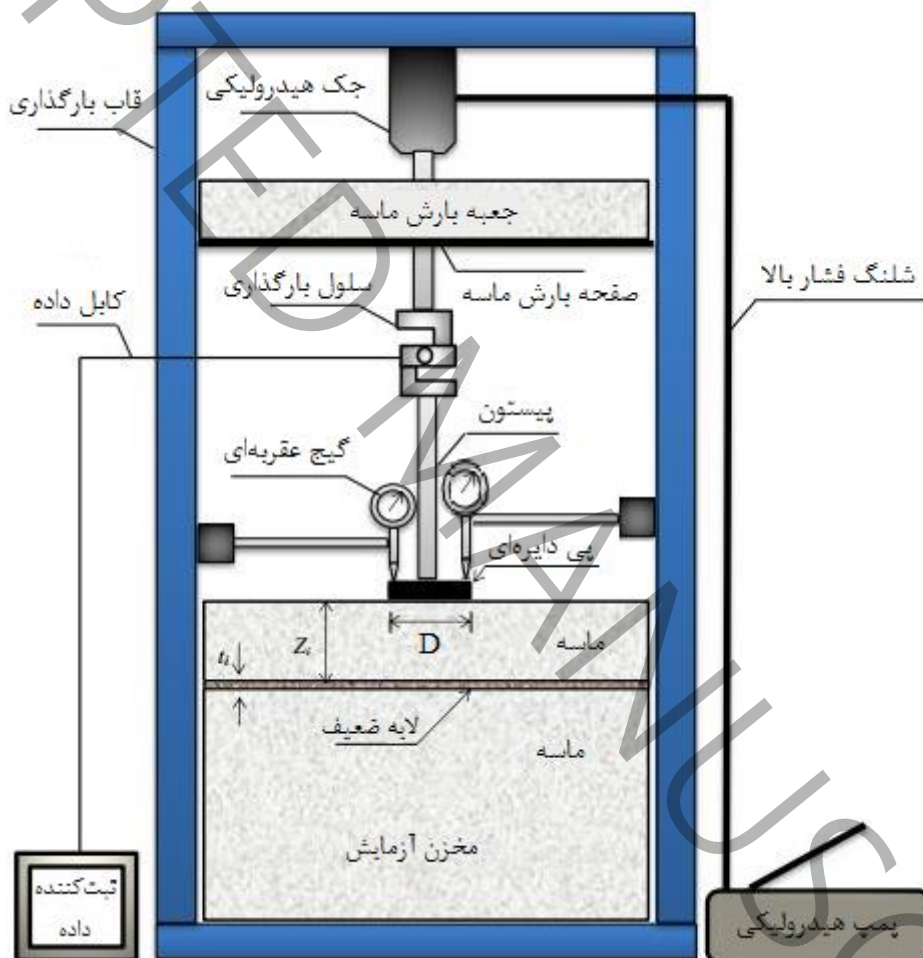
شکل ۱: شکل کلی مسئله مورد بررسی

آزمایش‌های مدل فیزیکی به‌وسیله مخزن استوانه‌ای از جنس فولاد با قطر داخلی ۷۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر، انجام شده است. در مرحله اول به‌منظور دوری از تأثیرات شرایط جداره مخزن بر نتایج، قبل از شروع نمونه‌سازی، سطوح داخلی مخزن با روغن

مخصوص روغن کاری می شود. برای رسیدن به دانسیته موردنظر، جعبه بارش در قسمت بالایی چهارچوب بارگذاری طراحی و ساخته شده است؛ و ماسه از ارتفاع ثابت ۶۰ سانتی متر تخلیه شده است.

پی صلب مدل به وسیله ورق فولادی به قطر ۸ سانتی متر و ضخامت ۳ سانتی متر، مدل سازی گردید و پی مدل در مرکز مخزنی که از مصالح ماسه ای و میان لایه نازک ضعیف به ارتفاع مشخص مطابق با برنامه ی آزمایش ها پر شده است، قرار داده می شود. باتوجه به نمودارهای حباب تنش (منحنی های هم تنش) بر اساس نظریه بوسینسک، در عمقی حدود $4R$ و فاصله از مرکز پی حدود $2R$ از هر طرف پی، تنش قائم به میزان ۱۰٪ کاهش می یابد و چنانچه این معیار ۵٪ تنش قائم نیز در نظر گرفته شود، فواصل مذکور حدود $5/5R$ و $2/5R$ خواهد بود [۱۶]؛ بنابراین عمق و شعاع مخزن استوانه ای، به ترتیب $17/5R$ و $8/75R$ (از هر طرف) است و مرزهای مخزن هیچ گونه تأثیر منفی بر پاسخ مدل فیزیکی ندارد.

Figure 2. A view of the physical model and loading farme

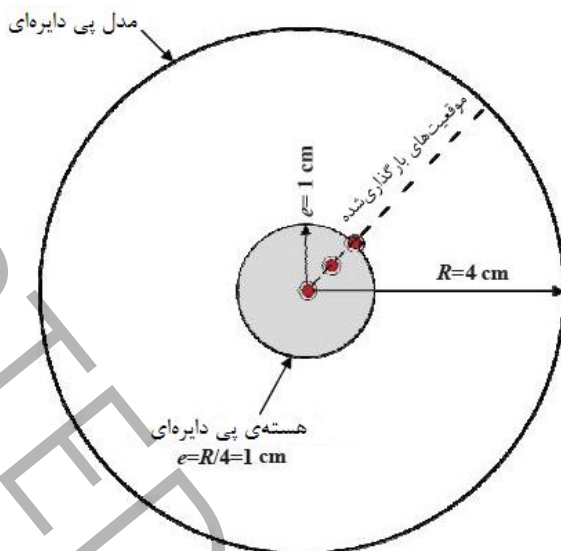


شکل ۲: نمایی از مدل فیزیکی ساخته شده

در این تحقیق باتوجه به اینکه پی دایره ای زیر بار برون محوری قرار داده می شود، برای پی هسته ی پی تعریف می شود به طوری که اگر بار خارج از مرکز درون هسته ی پی وارد شود، همه ی پی، تنش فشاری را تحمل می کند و اگر بارگذاری در مرز هسته وارد شود، تنش فشاری در گوشه پی صفر می شود. برای پی دایره ای، مرز هسته $\frac{R}{4}$ است و بارگذاری درون مرز هسته، باعث می شود که مساحت کل پی، تحت فشار قرار بگیرد [۱۷]. به همین دلیل دو مقدار خروج از مرکزیت یکی در مرز هسته و دیگری نصف مرز هسته در برنامه های آزمایش پی دایره ای در نظر گرفته شده است. در این تحقیق همان طور که در برنامه های آزمایش نشان داده می شود، سه بارگذاری فرض

شده است، مرکزی ($e=0$)، خارج از مرکز و درون هسته ($e=0.5$ cm) و خارج از مرکز و روی مرز هسته ($e=1$ cm). هسته‌ی پی و موقعیت‌های بارگذاری شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

Figure 3. Footing core for circular footing and loaded locations



شکل ۳. هسته‌ی پی برای پی دایره‌ای و موقعیت‌های بارگذاری شده

وقتی یک پی تحت بار خارج از مرکز قرار می‌گیرد، چرخش پی اجتناب‌ناپذیر است. در این مطالعه به منظور محاسبه چرخش پی، دو گیج برای اندازه‌گیری نشست پی در دو گوشه پی و در جهت اعمال بار خارج از مرکز به کار گرفته شده است. کج‌شدگی پی با توجه به اختلاف بین نشست‌های ثبت شده توسط دو گیج محاسبه شده است. همچنین اثر لایه‌های نازک ضعیف روی چرخش پی‌ها، به عنوان یک موضوع ناشناخته، برای شناسایی اثر لایه‌های نازک ضعیف روی BCR که این پارامتر به عنوان نسبتی بی‌بعد از ظرفیت باربری نهایی در خاک ماسه‌ای با وجود لایه نازک ضعیف به خاک ماسه‌ای همگن تعریف می‌شود (رابطه (۱))، برای پی‌های بارگذاری شده به صورت مرکزی و خارج از مرکز در این مطالعه بررسی شده است.

$$BCR = \frac{q_{u(CFWTL)}}{q_{u(CFHSB)}} \quad (1)$$

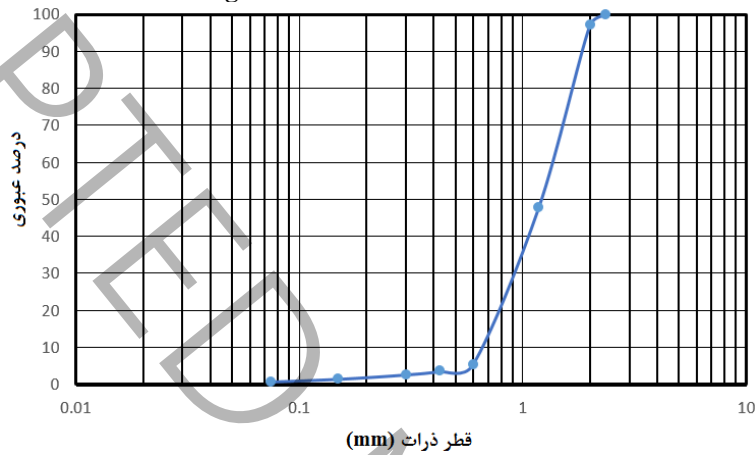
که در آن $q_{u(CFWTL)}$ فشار باربری ماسه دارای لایه نازک ضعیف و $q_{u(CFHSB)}$ فشار باربری ماسه یکنواخت است. بار به وسیله جک هیدرولیکی دستی و با سرعت 1 mm/min به پی منتقل می‌شود. بار اعمالی از طریق جک هیدرولیکی، به کمک لود سل نصب شده به پیستون جک و با ظرفیت 50 kN ثبت می‌گردد. برای ثبت نشست‌های پی، از گیج‌های عقربه‌ای با دقت 0.01 mm استفاده شده است.

۲-۲- خصوصیات ماسه بستر

ماسه بستر، از کارخانه‌های تولید ماسه سیلیسی غرب ایران، با سیلیس حدود ۹۶ درصد، تأمین شده است. ماسه در شرایط خشک شده در هوا استفاده شده است. مطابق طبقه‌بندی یکنواخت، ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) توصیف می‌گردد. توزیع اندازه ذرات با استفاده از روش الک‌خشک بر طبق استاندارد ASTM D422-90 [۱۸] به دست آمده و در شکل ۴ نشان داده شده است. برای دستیابی به دانسیته نسبی یکسان در آزمایش‌ها، ماسه به روش بارش خشک، از ارتفاع سقوط یکسان ریخته می‌شود. برخی از مشخصات فیزیکی ماسه در جدول ۱ نمایش داده شده است.

دانسیتة نسبی، D_r ، مطابق استانداردهای شماره ASTM D 4253-00 و ASTM D 4254-00 (ASTM, 2004a, 2004b) تعیین شده است [۱۹ و ۲۰]. از آنجا که نسبت D/d_{50} بزرگتر از ۵۰ است؛ لذا مطابق توصیه بسیاری از محققان (به عنوان مثال تیلور، تویوساوا و همکاران)، اثر اندازه ذرات را می‌توان ناچیز در نظر گرفت [۲۱ و ۲۲]. پارامترهای مقاومت برشی ماسه که تابعی از سطح تنش نرمال است، به وسیله سه آزمایش برش مستقیم، تعیین شده است. قابل ذکر است که سطح تنش در توده خاک مدل کوچک مقیاس برای عمق مؤثر، کمتر از حدود ۴۶kPa است. نتیجه آزمایش برش مستقیم متناظر با سطح تنش مدل ($16kPa < \sigma_v < 46kPa$) در شکل ۵ ارائه شده است.

Figure 4. Gradation curve for sand



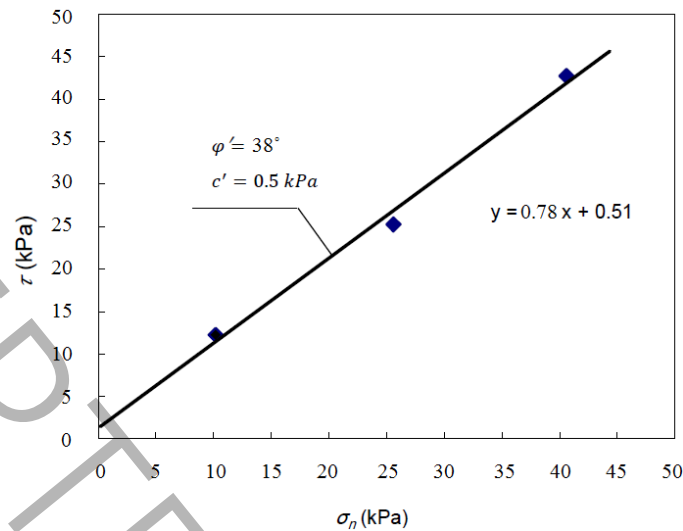
شکل ۴: منحنی دانه‌بندی ماسه

جدول ۱: پارامترهای ژئوتکنیکی ماسه در آزمایش‌های مدل

مقدار	خصوصیات
۲/۳۶	D_{max} (mm)، حداکثر اندازه دانه،
۱/۴۴	اندازه متناظر با ۶۰ درصد ریزتر، D_{60} (mm)
۱/۲۶	اندازه متوسط دانه، D_{50} (mm)
۰/۹	اندازه متناظر با ۳۰ درصد ریزتر، D_{30} (mm)
۰/۶۵	اندازه مؤثر، D_{10} (mm)
۲/۱۵	ضریب یکنواختی، C_u
۰/۸۴	ضریب خمیدگی، C_c
۲/۶۴	چگالی ویژه، G_s
۱۹/۸۶	وزن مخصوص خشک حداکثر، γ_{dmax} (kN/m^3)
۱۳/۷۴	وزن مخصوص خشک حداقل، γ_{dmin} (kN/m^3)
۱۵/۷۲	وزن مخصوص خشک، γ_d (kN/m^3)
۳۹	دانسیتة نسبی، D_r (%)
SP	طبقه‌بندی خاک، (USCS)
۳۸	زاویه اصطکاک داخلی مؤثر، ϕ'
۰/۵	چسبندگی مؤثر c' ، (kPa)

Table 1. Geotechnical parameters of sand used in model tests

Figure 5. Results of direct shear test on sand bed, with effective stress level ($16 \text{ kPa} < \sigma_v < 46 \text{ kPa}$)



شکل ۵: نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی ماسه بستر، با سطح تنش مؤثر ($16 \text{ kPa} < \sigma_v < 46 \text{ kPa}$)

۲-۳- خصوصیات لایه ضعیف

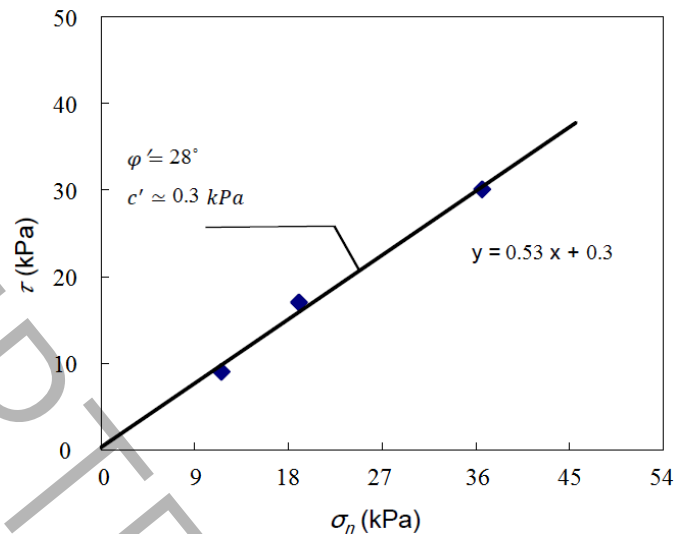
برای لایه ضعیف از مصالح با خصوصیات مقاومت برشی کمتر نسبت به ماسه بستر استفاده شده است. در این تحقیق برای لایه ضعیف از پودر خاک رس CL با دانسیته بسیار کم، استفاده شده است. پودر خاک رس مصرفی با رطوبت طبیعی ۵/۵ درصد در تمامی آزمایش‌ها، به صورت ثابت استفاده شده است. مشخصات فیزیکی مصالح ضعیف در جدول ۲ نشان داده شده است. پارامترهای مقاومت برشی خاک رس، به وسیله سه آزمایش برش مستقیم، تعیین شده است. با توجه به اینکه جنس مصالح لایه ضعیف رسی بوده و امکان شکستگی دانه‌ها در آن منتفی است؛ لذا نتایج پارامترهای مقاومت برشی وابسته به سطح تنش نخواهد بود، نتیجه آزمایش برش مستقیم متناظر با سطح تنش مدل ($16 \text{ kPa} < \sigma_v < 46 \text{ kPa}$) در شکل ۶ ارائه شده است. قابل ذکر است با توجه به اینکه رطوبت خاک رس بسیار کم بوده، به همین دلیل چسبندگی آن شبیه به خاک‌های دانه‌ای، تقریباً صفر به دست آمده است.

جدول ۲: پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح ضعیف در آزمایش‌های مدل

مقدار	خصوصیات
۲/۶۶	چگالی ویژه، Gs
۱۲/۱	وزن مخصوص، (kN/m^3)
۲۷	حد روانی، LL (%)
۱۹	حد خمیری، PL (%)
۸	نشانه خمیری، PI (%)
CL	طبقه‌بندی خاک، (USCS)
۵/۵	درصد رطوبت، ω (%)
۲۸	زاویه اصطکاک داخلی مؤثر، ϕ'
۰/۳	چسبندگی مؤثر (kPa)، c'

Table 2. Geotechnical parameters of weak materials in model tests

Figure 6. Results of direct shear test on weak layer, with effective stress level ($16 \text{ kPa} < \sigma_v < 46 \text{ kPa}$)



شکل ۶: نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی لایه ضعیف، با سطح تنش مؤثر ($16 \text{ kPa} < \sigma_v < 46 \text{ kPa}$)

۲-۴- روند انجام آزمایش‌ها

مدل‌سازی فیزیکی و ساخت نمونه مدل آزمایشگاهی دارای مراحل است که به صورت گام به گام انجام می‌گیرد. در مرحله اول به منظور دوری از تأثیرات شرایط جداره مخزن بر نتایج، قبل از شروع نمونه‌سازی، سطوح داخلی مخزن با روغن مخصوص روغن‌کاری می‌شود. در شروع آزمایش، جعبه دستگاه بارش، در بالای مخزن آزمایش و در ارتفاع مشخص نصب می‌شود و سپس ماسه در لایه‌های با ضخامت ۴ cm به روش بارش اجرا شده است. کنترل دانسیته ماسه بارشی، با قراردادن قوطی‌هایی با حجم مشخص در نقاط مختلف مخزن صورت گرفته است. لایه‌های نازک ضعیف با استفاده از شابلون‌های ساده در عمق‌ها و ضخامت‌های مشخص اجرا شده‌اند و لایه‌های بعدی ماسه تا رسیدن به سطح موردنیاز اجرا شده‌اند.

پی دایره‌ای مدل در موقعیت مرکز مخزن بر روی سطح ماسه قرار داده می‌شود. در نهایت بار به وسیله جک هیدرولیکی دستی با سرعت ۱ mm/min به پی مدل اعمال می‌شود. سپس توسط گیج عقربه‌ای، نشست پی مدل با دقت ۰/۰۱ mm اندازه‌گیری می‌شود. همچنین به دلیل بار خارج از مرکز، نشست‌های پی در دو لبه انتهایی آن توسط دو گیج که در دو طرف پی و در جهت بار خارج از مرکز قرار دارند، برای محاسبه چرخش پی دایره‌ای استفاده شده است. در تعدادی از موارد، برای اطمینان از نتایج، آزمایش‌ها تکرار شده‌اند.

۳- پارامترها و برنامه آزمایشگاهی

پارامترهای متغیر در آزمایش‌ها (مطابق با شکل شماتیک ۱) و مقادیر آن‌ها در جدول ۳ به صورت پارامتریک نشان داده شده است. برای انجام آزمایش‌ها، مدل آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس طراحی و ساخته شده است. پانزده آزمایش برای مطالعه اثر بارهای مرکزی و برون محوری روی یک پی دایره‌ای، برای هر دو ماسه‌ی همگن (یکنواخت) و ماسه با لایه نازک ضعیف انجام شد. این ۱۵ تست شامل سه گروه آزمایش‌ها روی یک پی دایره‌ای برای مطالعه اثر بارهای مرکزی و خارج از مرکز متفاوت ($e/D = 0, 0/0625, 0/125$) روی پاسخ بار - تغییر مکان ماسه انجام شد. همچنین در این آزمایش‌ها دو مقدار برای ضخامت لایه نازک و برای عمق قرارگیری این لایه نیز دو مقدار در نظر گرفته شده است تا بتوان اثر این دو پارامتر یعنی ضخامت و عمق قرارگیری لایه نازک ضعیف را بر روی نتایج بررسی کنیم.

جدول ۳: برنامه آزمایش‌های مدل فیزیکی

شماره آزمایش	نوع آزمایش	پارامترهای ثابت	پارامترهای متغیر
۱	ماسه همگن (بدون لایه نازک) (CFHSB)	$D_r = 39\%$, $D_f/D = 0$	$Z_i/D = 0$, $t_i/D = 0$, $e/D = 0$
۲	ماسه همگن (بدون لایه نازک) (CFHSB)	$D_r = 39\%$, $D_f/D = 0$	$Z_i/D = 0$, $t_i/D = 0$, $e/D = 0.0625$
۳	ماسه همگن (بدون لایه نازک) (CFHSB)	$D_r = 39\%$, $D_f/D = 0$	$Z_i/D = 0$, $t_i/D = 0$, $e/D = 0.125$
۴	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$D_r = 39\%$, $D_f/D = 0$	$Z_i/D = 0.5$, $t_i/D = 0.1$, $e/D = 0$
۵	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$D_r = 39\%$, $D_f/D = 0$	$Z_i/D = 0.5$, $t_i/D = 0.1$, $e/D = 0.0625$
۶	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$D_r = 39\%$, $D_f/D = 0$	$Z_i/D = 0.5$, $t_i/D = 0.1$, $e/D = 0.125$
۷	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$D_r = 39\%$, $D_f/D = 0$	$Z_i/D = 0.5$, $t_i/D = 0.2$, $e/D = 0$
۸	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$D_r = 39\%$, $D_f/D = 0$	$Z_i/D = 0.5$, $t_i/D = 0.2$, $e/D = 0.0625$
۹	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$D_r = 39\%$, $D_f/D = 0$	$Z_i/D = 0.5$, $t_i/D = 0.2$, $e/D = 0.125$
۱۰	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$D_r = 39\%$, $D_f/D = 0$	$Z_i/D = 1$, $t_i/D = 0.1$, $e/D = 0$
۱۱	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$D_r = 39\%$, $D_f/D = 0$	$Z_i/D = 1$, $t_i/D = 0.1$, $e/D = 0.0625$
۱۲	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$D_r = 39\%$, $D_f/D = 0$	$Z_i/D = 1$, $t_i/D = 0.1$, $e/D = 0.125$
۱۳	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$D_r = 39\%$, $D_f/D = 0$	$Z_i/D = 1$, $t_i/D = 0.2$, $e/D = 0$
۱۴	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$D_r = 39\%$, $D_f/D = 0$	$Z_i/D = 1$, $t_i/D = 0.2$, $e/D = 0.0625$
۱۵	ماسه دارای لایه ضعیف (CFWTL)	$D_r = 39\%$, $D_f/D = 0$	$Z_i/D = 1$, $t_i/D = 0.2$, $e/D = 0.125$

Table 3. Program of model tests

در این تحقیق، پی دایره‌ای روی بستر ماسه‌ای همگن به اختصار با حروف^۱ CFHSB و پی دایره‌ای روی بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک ضعیف به اختصار با حروف^۲ CFWTL بیان می‌شود.

۴- اثر مقیاس

مدل فیزیکی در واقع نمونه واقعی کوچک شده است که اگر به درستی طراحی و ساخته شود، تقریباً رفتاری مشابه نمونه واقعی خواهد داشت. با این حال، باید توجه داشت که رفتار یک مدل فیزیکی کاملاً با رفتار نمونه واقعی مطابقت ندارد و نتایج مدل‌های فیزیکی باید با توجه به استدلال‌های مهندسی تفسیر شوند. تغییر در اندازه یک مدل پی کم عمق منجر به تغییر در ظرفیت باربری آن می‌شود. دلایل مختلفی برای ظهور اثر مقیاس در مدل‌سازی پی کم عمق وجود دارد. با این حال، یکی از دلایل اصلی تغییر مکانیسم شکست پی در هنگام کاهش مقیاس است که باعث ایجاد اثر مقیاس می‌شود [۲۳].

¹ Circular Footing on Homogeneous Sand Bed

² Circular Footing on Sandy Bed with Weak Thin Layer

به طور کلی در مدل‌های فیزیکی سازه‌های خاکی این بحث مطرح می‌شود که باید تعداد بی‌نهایت دانه‌های خاک در سطح مشترک خاک و سازه یا سطح تماس لایه‌های خاک و در مرزهای مدل وجود داشته باشد. بنابراین، کوچک کردن دانه‌ها در مدل‌های خاک معمول نیست زیرا تعداد دانه‌های خاک در منطقه قرارداد آنقدر زیاد است که می‌توان آن را بی‌نهایت فرض کرد [۲۳]. بنابراین، در این مطالعه، ابعاد پلان مدل پی در $n=7/5$ کاهش می‌یابد. با این حال، اندازه دانه‌های خاک در نمونه فیزیکی و نمونه واقعی یکسان فرض می‌شود. بنابراین، تفاوت در سطح تنش را می‌توان یکی از عوامل اصلی دیگر برای تفاوت رفتاری بین مدل فیزیکی و نمونه واقعی در مدل‌سازی تحت شتاب گرانشی (۱g) در نظر گرفت. بر این اساس، ای ساواف استفاده از مدل‌های ۱g را تنها برای پیش‌بینی رفتارهای کلی و عمومی نمونه‌های اصلی پیشنهاد کرد [۲۴]. مویر وود از تجزیه و تحلیل ابعادی و معادلات شباهت برای ارائه ضرایب مقیاس مورد استفاده در مهندسی ژئوتکنیک استفاده کرد که برخی از آنها در جدول ۴ ارائه شده است [۲۵]. امکان تعمیم نتایج مدل فیزیکی به نمونه اصلی با استفاده از ضرایب مقیاس و استفاده گسترده از مدل‌سازی فیزیکی وجود دارد.

جدول ۴: ضرایب اثر مقیاس [۲۵]

مدل آزمایشگاهی (۱g)	کمیت
$1/n$	طول
۱	چگالی جرمی
$1/n$	تنش
$1/n^3$	نیرو
$1/n^2$	نیرو در طول

Table 4. coefficients of scale effect

۵- نتایج و بحث

در این بخش نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی پی‌دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن و بستر ماسه‌ای با وجود لایه نازک ضعیف در اثر بارگذاری‌های مرکزی و خارج از مرکز، ارائه شده است. برای تعیین ظرفیت باربری نهایی پی‌دایره‌ای، ترسیم منحنی‌های فشار - نشست برای پی‌مدل‌ها مورد نیاز است. در این منحنی‌ها، نشست پی (S) بر حسب قطر پی (D) به صورت نسبت $(S/D, \%)$ ارائه شده است. با توجه به این که بار اعمالی به صورت کرنش - کنترل به وسیله جک هیدرولیکی و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه اعمال شده است، بنابراین پس از گسیختگی خاک بستر زیر پی، تغییر شکل در سیستم خاک - پی ادامه خواهد یافت، اما بار اعمالی به طور قابل ملاحظه‌ای کاسته می‌شود و تمایل به برآمدگی کمی در اطراف خاک مجاور در هر دو طرف پی را می‌توان در اکثر مراحل بارگذاری مشاهده کرد. شایان ذکر است که این موضوع در مقاله کلیدی وسیک ۱۹۷۳ نیز اشاره شده است [۲۶].

۵-۱- رفتار پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن و دارای لایه ضعیف تحت بارهای مرکزی و خارج از مرکز

منحنی فشار - نشست پی دایره‌ای در هر دو شرایط ماسه همگن و ماسه دارای لایه نازک ضعیف با ضخامت $t/D=0/1$ و $t/D=0/2$ در اعماق و خروج از مرکزیت‌های مورد نظر به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده است و برای هر منحنی، نقطه معادل با ظرفیت باربری نهایی با رنگ نارنجی مشخص شد. مطابق منحنی فشار - نشست پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن که در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است، مقدار ظرفیت باربری نهایی $97/2$ کیلوپاسکال و مقدار نشست متناظر با نقطه اوج، ۸ میلی‌متر و مقدار نشست نسبی $(S/D, \%)$ ۱۰ درصد به دست آمده است. مطابق شکل، وجود نقطه اوج در منحنی فشار - نشست، بیانگر گسیختگی برشی کلی است.

برای مقایسه و صحت‌سنجی مدل، مقادیر ظرفیت باربری نهایی پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای یکنواخت با روش‌های تحلیلی محققان مختلف (روابط (۲) تا (۷)) [۲۶-۲۸] برای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی متناظر با سطح تنش مدل محاسبه و نتایج در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق نتایج، مقادیر محاسباتی با روش‌های وسیک و مارتین با نتایج آزمایشگاهی تطابق بیشتری دارد.

$$q_u = 0.3\gamma \cdot D \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma + 1.3C \cdot N_c \cdot S_c \quad (2)$$

$$N_q = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \cdot e^{\pi \cdot \tan \phi} \quad (3)$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi \quad (\text{Vesic, 1973}) \quad (4)$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan 1.4\phi \quad (\text{Meyerhof, 1963}) \quad (5)$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan 1.32\phi \quad (\text{Martin, 2005}) \quad (6)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (7)$$

جدول ۵: مقایسه ظرفیت باربری نهایی پی دایره‌ای مدل با روابط تحلیلی محققان مختلف

Martin, (2005)	Vesic, (1973)	Meyerhof, (1963)	N_γ	زاویه حداکثر مقاومت برشی (درجه) و چسبندگی (kPa)
۵۸	۷۸	۶۴	N_γ	۳۸°, ۰/۵ (kPa)
۸۷/۷۲	۹۲/۳	۷۶/۴۵	q_u (kPa)	

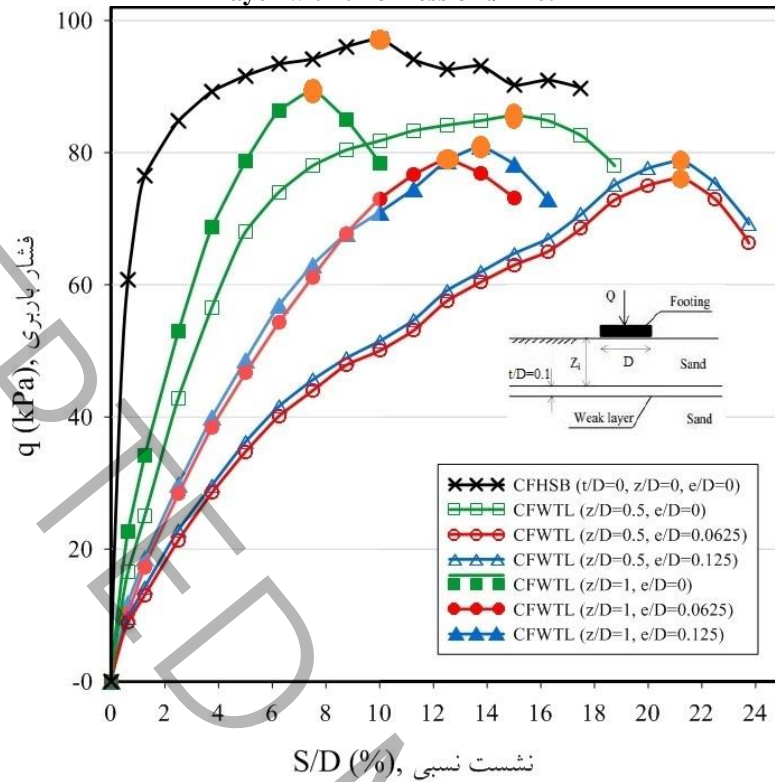
Table 5. Comparison of the ultimate bearing capacity of circular footing model with the analytical formula of different researchers

مطابق شکل‌های ۷ و ۸، وجود لایه ضعیف و بار خارج از مرکز باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی و سختی سیستم خاک-شالوده شده است. بدیهی است تأثیر لایه ضعیف با ضخامت بیشتر و بار خارج از مرکز مشهودتر است. بیشترین کاهش ظرفیت باربری نهایی در عمق بحرانی ۰/۵D و خروج از مرکزیت ۰/۰۶۲۵D و ضخامت لایه ضعیف ۰/۲D به میزان ۳۰ درصد (از ۹۷/۲ کیلوپاسکال به ۶۷/۵۶ کیلوپاسکال) رخ داده است.

مطابق شکل‌های ۷ و ۸ سختی سیستم خاک - پی تا قبل از نقطه اوج که به صورت $\Delta q / \Delta s$ تعریف می‌شود، با وجود لایه نازک ضعیف کمتر از حالت خاک همگن است. نشست متناظر با نقطه اوج منحنی‌ها، با وجود لایه نازک ضعیف و خروج از مرکزیت، بیشتر از خاک همگن است (برای خاک همگن ۸ میلی‌متر و با وجود لایه نازک ضعیف و بار خارج از مرکز، بین ۱۰ تا ۱۷ میلی‌متر متغیر است). لازم به ذکر است که پارامتر $\Delta q / \Delta s$ به نوعی مدول سکانتی در منحنی‌های فشار-نشست است که بر اساس شیب خط سکانتی تعریف می‌شود.

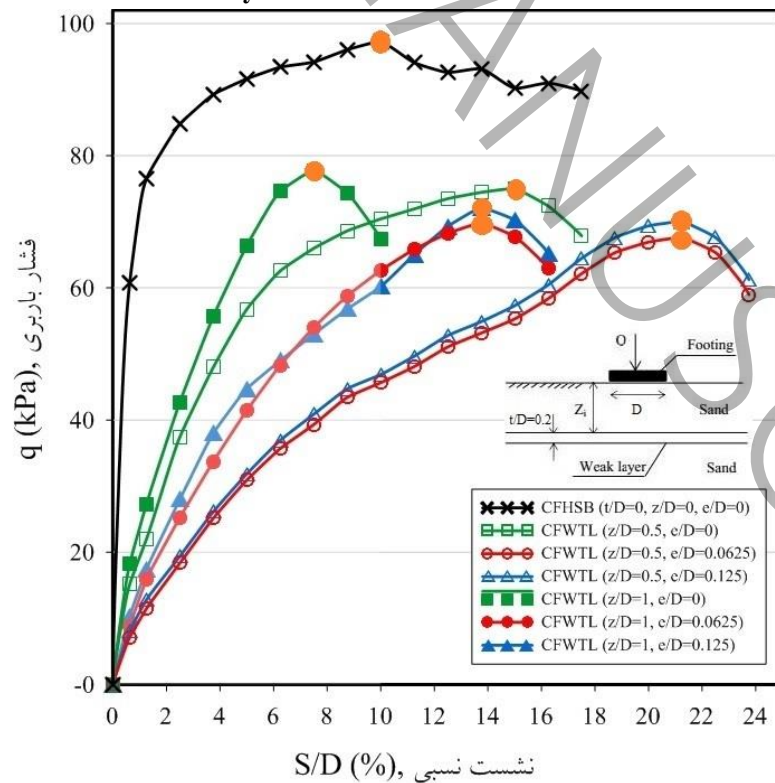
نتایج فوق نشان‌دهنده تأثیر وجود لایه نازک ضعیف و بار خارج از مرکز بر ظرفیت باربری نهایی پی و سختی سیستم خاک-پی دارد. میزان این تأثیر به‌طور کلی بستگی به اختلاف مقاومت برشی بین لایه ضعیف و ماسه بستر و ضخامت و عمق قرارگیری لایه ضعیف و بار خارج از مرکز دارد.

Figure 7. The pressure-settlement curve of circular footing located on homogeneous sand bed, with a weak thin layer with thickness of $t/D=0.1$



شکل ۷: منحنی فشار - نشست پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن و دارای لایه نازک ضعیف با ضخامت $t/D=0.1$

Figure 8. The pressure-settlement curve of circular footing located on homogeneous sand bed, with a weak thin layer with thickness of $t/D=0.2$

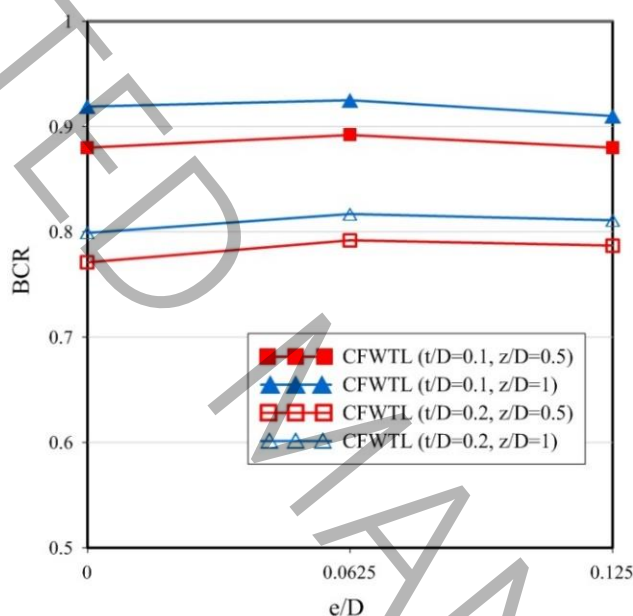


شکل ۸: منحنی فشار - نشست پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن و دارای لایه نازک ضعیف با ضخامت $t/D=0.2$

همانطور که از شکل ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، وجود لایه نازک ضعیف باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی پی نسبت به بستر ماسه‌ای همگن شده است و بارگذاری خارج از مرکز باعث کاهش بیشتر ظرفیت باربری نهایی و افزایش نشست پی دایره‌ای شده است. به طوری که اگر بارگذاری خارج از مرکز و عمق قرارگیری لایه نازک ضعیف برابر با $z/D=0.5$ باشد، نشست‌های پی نسبت به حالت‌های دیگر بسیار افزایش یافته است.

مقادیر نسبت بی‌بعد شده ظرفیت باربری نهایی (BCR) برای حالت‌های مختلف در شکل ۹ مقایسه شده‌اند. مطابق شکل ۹، اگر بارگذاری خارج از مرکز در نصف مرز هسته ($e/D=0.0625$) به پی اعمال شود، نسبت بی‌بعد شده ظرفیت باربری نهایی (BCR) برای همه‌ی حالت‌ها کمی بیشتر از بارگذاری مرکزی و بارگذاری خارج از مرکز دیگر یعنی وقتی بار در مرز هسته ($e/D=0.125$) اعمال شده، به دست آمده است.

Figure 9. Comparison of normalized values of the ultimate bearing capacity of circular footing (BCR) versus normalized eccentric loads

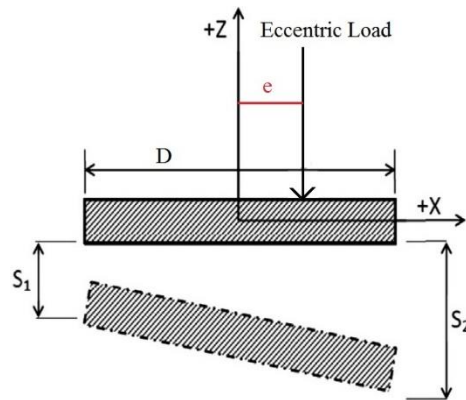


شکل ۹: مقایسه مقادیر بی‌بعد شده ظرفیت باربری نهایی پی دایره‌ای (BCR) نسبت به خروج از مرکزیت‌های بی‌بعد شده

۵-۲- چرخش پی دایره‌ای در اثر بارهای خارج از مرکز با وجود لایه نازک ضعیف

وقتی که بار به صورت خارج از مرکز بر پی سطحی وارد می‌شود، چرخش پی اتفاق می‌افتد و فشار زیر پی یکنواخت نمی‌ماند. شکل شماتیک چرخش پی دایره‌ای تحت تأثیر بار خارج از مرکز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری چرخش پی تحت تأثیر بار خارج از مرکز، نشست‌های پی در دو لبه انتهایی آن توسط دو گیج عقربه‌ای که در دو طرف پی و در جهت بار خارج از مرکز قرار دارند، برای محاسبه چرخش پی دایره‌ای استفاده شد. در شکل ۱۱ نمایی از چرخش پی دایره‌ای با اعمال بار خارج از مرکز با وجود لایه نازک ضعیف در مدل فیزیکی کوچک مقیاس نشان داده شده است.

Figure 10. Rotation of circular footing due to eccentric load



شکل ۱۰: چرخش پی دایره‌ای ناشی از بار خارج از مرکز

Figure 11. A view of circular footing rotation due to eccentric loading with a weak thin layer in small scale physical model

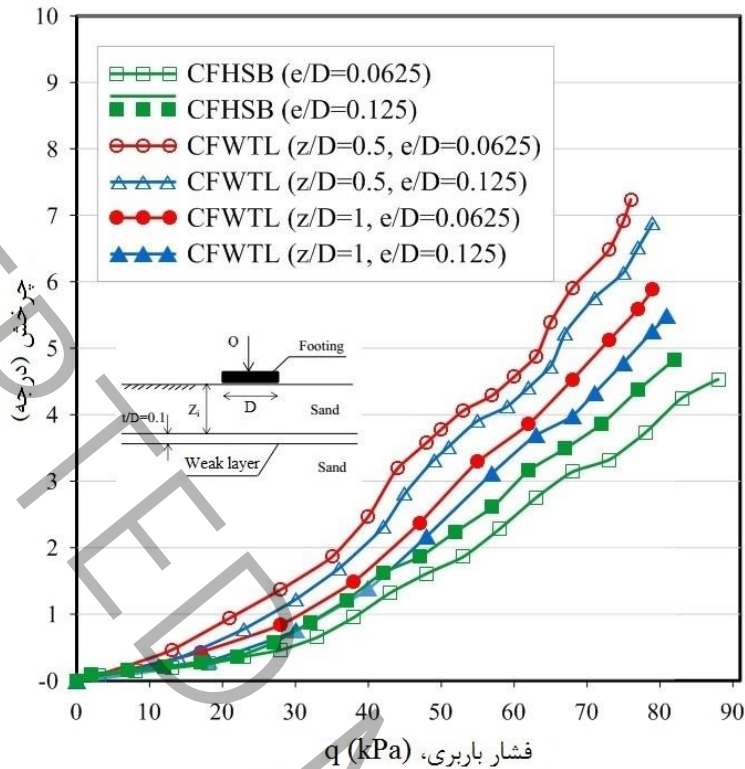


شکل ۱۱: نمایی از چرخش پی دایره‌ای در اثر بارگذاری خارج از مرکز با وجود لایه نازک ضعیف در مدل فیزیکی کوچک مقیاس

منحنی فشار - چرخش پی دایره‌ای در هر دو شرایط ماسه همگن و ماسه دارای لایه نازک ضعیف با ضخامت $t/D=0/1$ و $t/D=0/2$ در اعماق و خروج از مرکزیت‌های مختلف به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۱۴ مقادیر چرخش نهایی پی دایره‌ای مربوط به لحظه‌ی شروع بارگذاری خارج از مرکز تا وقتی که پی دایره‌ای به ظرفیت باربری نهایی می‌رسد، برای بستر ماسه‌ای همگن و بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک ضعیف تحت تأثیر بارهای خارج از مرکز نشان داده شده است. مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳، شیب پی برای ماسه همگن با افزایش خروج از مرکزیت افزایش و ظرفیت باربری به طور قابل توجهی کاهش یافته است ولی برای حالتی که لایه ضعیف وجود دارد وقتی که بار خارج از مرکز بی‌بعد شده (e/D) در محلی برابر با $0/0625$ وارد شد، شیب پی کمی بیشتر و ظرفیت باربری کمی کمتر از حالتی که بار در محلی برابر با $0/125D$ وارد شد، به دست آمده است.

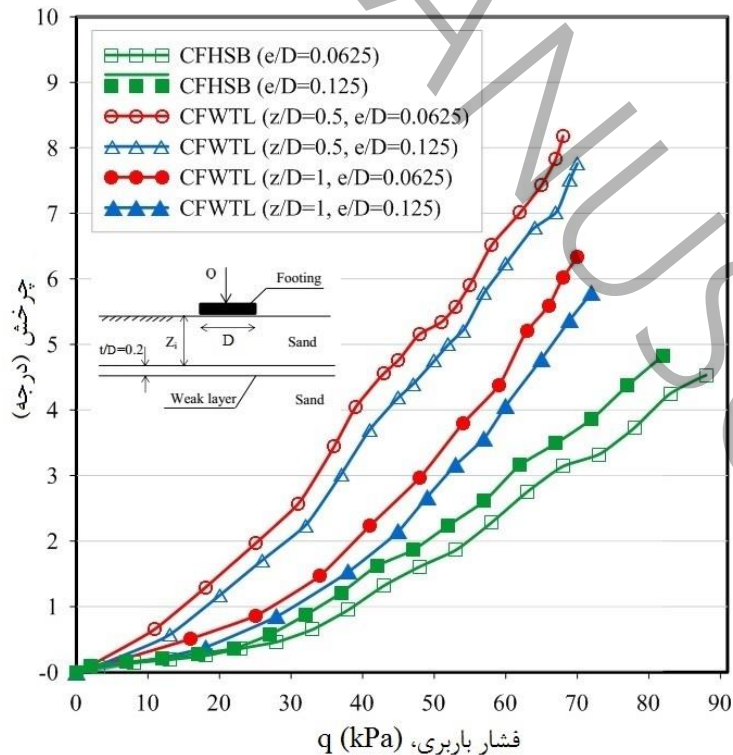
مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳، چرخش پی دایره‌ای تحت تأثیر بار خارج از مرکز با وجود لایه ضعیف با ضخامت بیشتر (یعنی $t/D=0/2$)، بیشتر از حالتی که ضخامت لایه ضعیف کمتر (یعنی $t/D=0/1$) است، به دست آمده است. بیشترین چرخش پی دایره‌ای از لحظه‌ی اعمال بار تا وقتی که به ظرفیت باربری نهایی می‌رسد، مربوط به حالتی است که ضخامت لایه ضعیف $0/2D$ و بار خارج از مرکز $0/0625D$ و محل قرارگیری لایه ضعیف در عمق $0/5D$ است و مقدار چرخش پی دایره‌ای در این حالت برابر با $8/2$ درجه به دست آمده است. همچنین کمترین چرخش پی دایره‌ای مربوط به حالتی است که ماسه همگن و بار خارج از مرکز $0/0625D$ است و مقدار کج‌شدگی پی دایره‌ای در این حالت برابر با $4/5$ درجه به دست آمده است.

Figure 12. The pressure-rotation curve of circular footing located on homogeneous sand bed, with a weak thin layer and thickness of $t/D=0.1$



شکل ۱۲: منحنی فشار - چرخش پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن و دارای لایه نازک ضعیف با ضخامت $t/D=0.1$

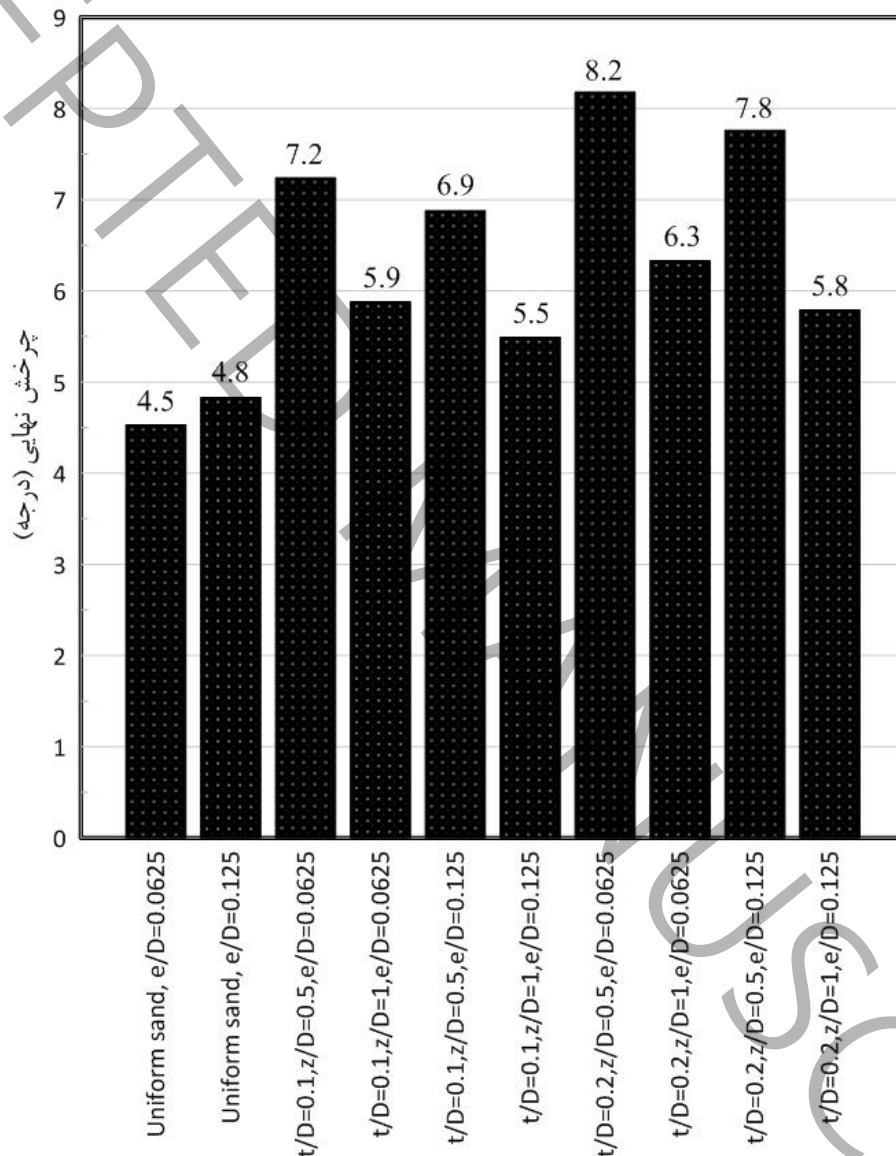
Figure 13. The pressure-rotation curve of circular footing located on homogeneous sand bed, with a weak thin layer and thickness of $t/D=0.2$



شکل ۱۳: منحنی فشار - چرخش پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای همگن و دارای لایه نازک ضعیف با ضخامت $t/D=0.2$

در این مطالعه نشان داده شد که برای بستر ماسه‌ای همگن با افزایش e/D ، چرخش پی دایره‌ای کمی بیشتر شده است ولی در صورت وجود لایه نازک ضعیف به ازای ۱ و $Z/D=0.5$ با افزایش e/D ، چرخش پی دایره‌ای کمی کمتر شده است به طوری که چرخش برای $e/D=0.125$ کمی کمتر از چرخش برای $e/D=0.625$ شده است، که دلیل آن می‌تواند وجود لایه نازک ضعیف و تغییر در مکانیزم گسیختگی باشد. مقادیر چرخش نهایی پی دایره‌ای برای تمامی حالت‌ها در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

Figure 14. Comparison of ultimate rotation values of circular footing for homogeneous sand bed, with a weak thin layer under the influence of eccentric loads



شکل ۱۴. مقایسه مقادیر چرخش نهایی پی دایره‌ای، برای بستر ماسه‌ای همگن و دارای لایه نازک ضعیف تحت تأثیر بارهای خارج از مرکز

۶- نتیجه‌گیری

رفتار پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک ضعیف، به وسیله آزمایش‌های مدل کوچک مقیاس بررسی شده است. هدف از این مطالعه، تعیین تأثیر بارهای عمودی خارج از مرکز بر چرخش پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای با وجود لایه نازک افقی ضعیف در ضخامت‌ها و عمق‌های قرارگیری متفاوت است. بر اساس تحقیقات، نتیجه‌گیری‌های اصلی زیر را می‌توان ارائه نمود:

- وجود لایه ضعیف و بار خارج از مرکز، باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی پی و سختی سیستم خاک- پی شده است. میزان این تأثیر بستگی به ضخامت و عمق قرارگیری لایه ضعیف دارد.
- وجود لایه ضعیف و بار خارج از مرکز باعث افزایش چرخش پی دایره‌ای نسبت به حالتی که بستر ماسه‌ای همگن است، شده است.
- برای ماسه همگن بیشترین چرخش پی دایره‌ای برای بار خارج از مرکز $0.125D$ برابر با $4/8$ درجه به دست آمده است و به میزان 7 درصد افزایش چرخش پی نسبت به ماسه همگن با بار خارج از مرکز $0.625D$ (از $4/8$ درجه به $4/5$ درجه)، رخ داده است.
- برای بستر ماسه‌ای با وجود لایه‌ی نازک ضعیف، بیشترین چرخش پی دایره‌ای برای بار خارج از مرکز $0.625D$ و ضخامت لایه نازک ضعیف $0.2D$ و عمق قرارگیری $0.5D$ برابر با $8/2$ درجه به دست آمده است و کمترین چرخش پی دایره‌ای برای بار خارج از مرکز $0.125D$ و ضخامت لایه نازک ضعیف $0.1D$ و عمق قرارگیری $1D$ برابر با $5/5$ درجه به دست آمده است که کاهش 33 درصدی را نشان داده است.
- برای بستر ماسه‌ای همگن و بستر ماسه‌ای با وجود لایه‌ی نازک ضعیف، بیشترین چرخش پی دایره‌ای برای بار خارج از مرکز $0.625D$ و ضخامت لایه نازک ضعیف $0.2D$ و عمق قرارگیری $0.5D$ برابر با $8/2$ درجه به دست آمده است و کمترین چرخش پی دایره‌ای برای ماسه همگن با بار خارج از مرکز $0.625D$ برابر با $4/5$ درجه به دست آمده است که کاهش 45 درصدی را نشان داده است.
- با توجه به نتایج بیان شده برای بستر ماسه‌ای همگن چرخش پی دایره‌ای برای بار خارج از مرکز $0.625D$ (بارگذاری در نصف مرز هسته) نسبت به بارگذاری خارج از مرکز دیگر (بارگذاری در مرز هسته) کاهش 7 درصدی را نشان داده است ولی برای بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک ضعیف چرخش پی دایره‌ای برای بار خارج از مرکز $0.625D$ نسبت به بارگذاری خارج از مرکز دیگر کمی بیشتر شده است، به طوری که وقتی ضخامت لایه نازک ضعیف $0.1D$ و عمق قرارگیری $0.5D$ است به میزان 5 درصد افزایش و وقتی ضخامت لایه نازک ضعیف $0.1D$ و عمق قرارگیری $1D$ است، به میزان 7 درصد افزایش و وقتی ضخامت لایه نازک ضعیف $0.2D$ و عمق قرارگیری $0.5D$ است، به میزان 5 درصد افزایش و وقتی ضخامت لایه نازک ضعیف $0.2D$ و عمق قرارگیری $1D$ است، به میزان 8 درصد افزایش نشان داده شده است.
- با مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی محققان مختلف، مقادیر به دست آمده از نتایج تحلیلی وسیک و مارتین با نتایج آزمایشگاهی تطابق بیشتری دارد، به طوری که روش تحلیلی وسیک کاهش 5 درصدی و روش تحلیلی مارتین کاهش 9 درصدی را نسبت به نتایج آزمایشگاهی این تحقیق نشان داده است و به همین دلیل روابط تحلیلی قبلی با نتایج آزمایشگاهی این تحقیق مطابقت نزدیکی را نشان داده است، همچنین نشان‌دهنده انتخاب صحیح پارامترهای مقاومت برشی متناظر با سطح تنش مؤثر در مدل فیزیکی بوده است.
- از دیگر نتایج این تحقیق این است که در تحقیقات صحرائی، هرگز نباید جزئیات کوچک زمین‌شناسی همانند لایه‌های نازک ضعیف و بارهای خارج از مرکز نادیده گرفته شود. در این تحقیق به منظور کم کردن اثر مقیاس، انجام آزمایش‌های مدل فیزیکی کوچک مقیاس در سطح تنش‌های زیاد انجام شده است. از طرفی هدف اصلی این تحقیق، پیش‌بینی روند کلی رفتار پی دایره‌ای با حضور لایه نازک ضعیف و بار خارج از مرکز و کمی کردن تأثیر پارامترهای مختلف بر نتایج چرخش نهایی پی دایره‌ای بوده است.

علائم انگلیسی

BCR	نسبت $Qu(CFWSB)$ به $Qu(CFWL)$
c'	چسبندگی، kPa
D	قطر پی، cm
D'	قطر مخزن مدل فیزیکی، cm
D_r	دانسیته نسبی
D_f	عمق مدفون پی، m
e	خروج از مرکزیت بار
G_s	چگالی ویژه
H	ارتفاع مخزن مدل فیزیکی، cm
LL	حد روانی

ضرایب ظرفیت باربری	N_q, N_γ, N_c
نشانه خمیری	PI
حد خمیری	PL
فشار باربری، kPa	q
فشار باربری ماسه دارای لایه نازک ضعیف، kPa	$q_u(CFWTL)$
فشار باربری ماسه یکنواخت، kPa	$q_u(CFHSB)$
شعاع پی دایره‌ای	R
نشست پی، mm	S
ضخامت لایه نازک ضعیف، mm	t_i
عمق قرارگیری لایه نازک ضعیف، mm	Z_i
وزن مخصوص، kN/m^3	γ
وزن مخصوص خشک، kN/m^3	γ_d
وزن مخصوص خشک حداکثر، kN/m^3	γ_{dmax}
وزن مخصوص خشک حداقل، kN/m^3	γ_{dmin}
زاویه اصطکاک داخلی، درجه	φ'
تنش برشی، kPa	τ
تنش نرمال، kPa	σ_n
تنش قائم، kPa	σ_v
درصد رطوبت	ω
نسبت تغییرات فشار باربری به تغییرات نشست	$\Delta q/\Delta s$

- [1] H. Mahiyar, A.N. Patel, Analysis of angle shaped footing under eccentric loading, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(12) (2000) 1151-1156.
- [2] M.J. Kenny, K.Z. Andrawes, The bearing capacity of footings on a sand layer overlying soft clay, *Geotechnique*, 47(2) (1997) 339-345.
- [3] K. Papadopoulou, G. Gazetas, Eccentricity effects on bearing capacity of strip and square footings on two-layered clay, *Geotechnical and Geological Engineering*, 37 (2019) 4099-4120.
- [4] P. Rao, Y. Liu, J. Cui, Bearing capacity of strip footings on two-layered clay under combined loading, *Computers and Geotechnics*, 69 (2015) 210-218.
- [5] M. Ziccarelli, C. Valore, S.R. Muscolino, V. Fioravante, Centrifuge tests on strip footings on sand with a weak layer, *Geotechnical Research*, 4(1) (2017) 47-64.
- [6] G. Misir, M. Laman, Estimating the bearing capacity of single reinforced granular fill overlying clay, *Geotextiles and Geomembranes*, 46(6) (2018) 817-829.
- [7] A.M. Hanna, G.G. Meyerhof, Ultimate bearing capacity of foundations on a three-layer soil, with special reference to layered sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 16(2) (1979) 412-414.
- [8] A.M. Basha, E.A. Eldisouky, Effect of eccentric loads on the behavior of circular footing with/without skirts resting on sand soil, *International Journal of Geo-Engineering*, 14(1) (2023) 13.
- [9] Q.N. Pham, S. Ohtsuka, K. Isobe, Y. Fukumoto, T. Hoshina, Ultimate bearing capacity of rigid footing under eccentric vertical load, *Soils and Foundations*, 59(6) (2019) 1980-1991.
- [10] A. TaghaviGhalesari, M.K. Tabari, A.J. Choobbasti, N. EsmaeilpourShirvani, Behavior of eccentrically loaded shallow foundations resting on composite soils, *Journal of Building Engineering*, 23 (2019) 220-230.
- [11] C. Valore, M. Ziccarelli, S.R. Muscolino, The bearing capacity of footings on sand with a weak layer, *Geotechnical Research*, 4(1) (2017) 12-29.
- [12] M. Askari, A.B. Khalkhali, M. Makarchian, N. Ganjian, The bearing capacity of circular footings on sand with thin layer: An experimental study, *Geomechanics and Engineering*, 27(2) (2021) 123-130.
- [13] M. El Sawwaf, Experimental and numerical study of eccentrically loaded strip footings resting on reinforced sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(10) (2009) 1509-1518.
- [14] P. Dastpak, S. Abrishami, S. Sharifi, A. Tabarpei, Experimental study on the behavior of eccentrically loaded circular footing model resting on reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 48(5) (2020) 647-654.
- [15] M. Georgiadis, R. Butterfield, Displacements of footings on sand under eccentric and inclined loads, *Canadian Geotechnical Journal*, 25(2) (1988) 199-212.
- [16] V. Murthy, 12 of of K of, in: *Geotechnical Engineering*, CRC Press, 2002, pp. 409-409.
- [17] 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.
- [18] D. ASTM 422-90, 1990, Standard test method for particle-size analysis. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [19] D. ASTM, 4253-00, 2004a, Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [20] D. ASTM, 4254-00, 2004b, Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [21] R. Taylor, Centrifuges in modelling: principles and scale effects, in: *Geotechnical centrifuge technology*, CRC Press, 2018, pp. 19-33.
- [22] Y. Toyosawa, K. Itoh, N. Kikkawa, J.J. Yang, F. Liu, Influence of model footing diameter and embedded depth on particle size effect in centrifugal bearing capacity tests, *Soils and foundations*, 53(2) (2013) 349-356.
- [23] A. Fakher, *Research Methods in Geotechnics*, University of Tehran Press, Tehran, Iran, 2014, in Persian.
- [24] M.A. El Sawwaf, Strip footing behavior on pile and sheet pile-stabilized sand slope, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(6) (2005) 705-715.
- [25] D. Muir Wood, *Geotechnical modeling*, Spon Press, London, United Kingdom, 2004.
- [26] A.S. Vesić, Analysis of ultimate loads of shallow foundations, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(1) (1973) 45-73.
- [27] G.G. Meyerhof, Some recent research on the bearing capacity of foundations, *Canadian geotechnical journal*, 1(1) (1963) 16-26.
- [28] C. Martin, Exact bearing capacity calculations using the method of characteristics, *Proc. IACMAG. Turin*, (2005) 441-450.

Experimental investigation of eccentric loading effect on circular footing located on sandy bed with a weak thin layer

ABSTRACT

In some cases, there is a weak thin interlayer in the soil profile, which may not reveal these complications in geotechnical studies. also, most of shallow footings are subjected to eccentric loads that due to the existence of such loads, moments are imposed on the footing and as a result, the footing rotates and the pressure under the footing does not remain uniform. In this research, an experimental investigation has been carried out on a circular footing model located on a homogeneous sand bed with a weak thin layer with different thickness and depth of placement under vertical eccentric loads by small-scale physical model of soil-footing system. Physical model tests are performed in a cylindrical steel tank with an inner diameter of 70 cm and a height of 70 cm. Investigations have been carried out by changing the thickness and depth of placement of a weak thin layer due to eccentric loads. The results show that the existence of a weak layer and eccentric load has increased the rotation of circular footing compared to the homogeneous sand bed. So that in the sand bed with a weak thin layer, the maximum rotation of circular footing has been obtained equal to 8.2 degrees for eccentric load $0.0625D$ (D is the diameter of footing) and thickness of weak thin layer $0.2D$ and depth of placement $0.5D$ and the minimum rotation of circular footing for homogeneous sand with eccentric load of $0.0625D$ is equal to 4.5 degrees, which shows a reduction of 45%.

KEYWORDS

Bearing capacity, rotation of footing, weak thin layer, eccentric load, circular footing.