

# بهبود عملکرد پی‌های سطحی مربعی توسط لبه‌های تحتانی

سجاد قلی‌پور<sup>۱</sup>، مسعود مکارچیان<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

\*makarchian@yahoo.com

تاریخ پذیرش: [۹۶/۰۳/۰۶]

تاریخ دریافت: [۹۵/۱۱/۰۵]

## چکیده

به دلیل گسترش روزافزون نوع جدیدی از روش‌های بهسازی پی‌های سطحی در مهندسی ژئوتکنیک، بررسی قابلیت استفاده از صفحات قائم در زیر پی‌های سطحی، به عنوان پی‌های لبه‌دار ضروری به نظر می‌رسد. پی‌های لبه‌دار می‌توانند به عنوان جایگزین مناسبی برای پی‌های سطحی، نیمه عمیق و عمیق در کاربری‌هایی همچون پی‌های مخازن صنایع نفت و گاز، توربین‌های بادی، سکوها حفاری و اسکله‌ها استفاده شوند. در این پژوهش، رفتار پی‌های سطحی مربعی واقع بر ماسه محصور شده به وسیله صفحات قائم به عنوان لبه، با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی کوچک مقیاس مطالعه شد. تاثیر پارامترهایی شامل نسبت طول لبه به عرض پی، اندازه پی، مقاومت برشی ماسه و زبری سطوح پی، بر رفتار پی‌های لبه‌دار از نظر افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست و بهبود ضریب واکنش بستر، تحت بارهای فشاری ارزیابی شده و با عملکرد پی‌های سطحی و نیمه عمیق مقایسه شد. نتایج مطالعه نشان داد که ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار نزدیک به مقادیر متناظر پی‌های نیمه عمیق، در عمق و عرض یکسان است. همچنین مشاهده شد که وجود لبه، ظرفیت باربری و ضریب واکنش بستر پی را افزایش و نشست پی سطحی را کاهش می‌دهد. افزایش در ظرفیت باربری و کاهش در نشست پی‌های سطحی، با افزایش طول لبه و کاهش مقاومت برشی ماسه، افزایش می‌یابد. نسبت ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار به پی‌های سطحی، در محدوده ۲/۴ تا ۵/۱ مشاهده شده و مقدار نشست پی لبه‌دار نسبت به پی سطحی تا حدود ۹۱٪ کاهش یافت. همچنین ضریب واکنش بستر، در محدوده بین ۱/۵ تا ۴/۲۳ برابر بهبود نشان داد. بر پایه تحلیل نتایج، نمودارهایی برای تخمین مقادیر ظرفیت باربری، نشست و ضریب واکنش بستر پی‌های لبه‌دار، برحسب مقادیر متناظر پی‌های سطحی ارائه شد.

**واژگان کلیدی:** پی لبه‌دار، لبه تحتانی، ظرفیت باربری، نشست، مدل‌سازی فیزیکی.

## ۱. مقدمه

یکی از روش‌های استفاده شده برای بهبود عملکرد پی‌های سطحی، استفاده از صفحات قائم به عنوان لبه در زیر محیط اطراف پی در مهندسی ژئوتکنیک است [1-4]. پی‌های لبه‌دار<sup>۱</sup> در دهه‌های اخیر به وفور به عنوان شالوده برای انواع سازه‌های مختلف همچون توربین‌های بادی، مخازن ذخیره صنایع نفت و گاز، سکوها حفاری و سازه‌های فراساحلی جایگزین پی‌های

سطحی، نیمه عمیق<sup>۲</sup> و عمیق شده‌اند [5-6]. این نوع پی‌ها متشکل از پی سطحی و لبه جدارنازک محیطی هستند که لبه تحتانی با نفوذ به داخل و محصورسازی جانبی خاک، بارهای سازه را به اعماق پایین‌تر خاک در تراز زیر لبه انتقال داده و عملکرد پی را از نظر ظرفیت باربری و نشست بهبود می‌بخشد [7-9]. از دلایل اصلی قابلیت گسترش پی‌های لبه‌دار برای جایگزینی سایر انواع پی‌ها، می‌توان به سهولت و زمان کوتاه

نصب آن‌ها، عدم نیاز به خاکبرداری و بهره‌وری اقتصادی اشاره نمود [10].

از روش‌های متداول نصب پی‌های لبه‌دار، می‌توان روش همزمان اعمال بارگذاری و مکش را نام برد؛ ابتدا نفوذ اولیه تحت اثر وزن پی در بستر خاک انجام گرفته و پس از استقرار در تراز معین، از طریق اعمال نیروی مکشی به آن، سیستم پی لبه‌دار تا عمق پیش‌بینی شده در خاک نفوذ کرده و استقرار می‌یابد. برای اجرای پی‌های لبه‌دار در ساحل به‌عنوان پی مخازن و توربین‌ها، علاوه بر روش فوق از روش متداول حفاری و نصب پی (روش درجا) نیز استفاده می‌شود [10].

عملکرد پی‌های لبه‌دار از طریق انجام مدل‌سازی فیزیکی و تحلیل عددی به وسیله پژوهشگران مختلف، مطالعه شده است که به برخی از موارد مهم آن اشاره می‌شود.

الاقباری و زین [11-12] مزیت استفاده از لبه تحتانی واقع در زیر انواع پی‌های سطحی دایره‌ای و نواری را به وسیله مدل‌سازی فیزیکی بررسی کردند. بر پایه نتایج، برای هر دو نوع شکل پی افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست مشاهده شد. وجود لبه، ظرفیت باربری پی دایره‌ای و نواری را به ترتیب حدود ۸ و ۳ برابر افزایش داد. همچنین کاهش نشست به میزان حدود ۸۹٪ و ۳۰٪ به ترتیب برای پی‌های دایره‌ای و نواری نسبت به حالت بدون لبه، گزارش شد.

نتایج بررسی رفتار پی‌های مربعی واقع بر ماسه محصور شده به وسیله لبه، بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست را با افزایش نسبت طول لبه به عرض پی و کاهش تراکم نسبی ماسه، نشان داد. با مقایسه نتایج مشاهده شد که مقادیر نشست و ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار، با مقادیر متناظر پی‌های نیمه‌عمیق تقریباً یکسان هستند. در یک نسبت طول لبه به عرض پی برابر با ۲، کاهش نشست حدود ۷۰٪ مشاهده شد [13-14]. بر اساس مطالعه مشابه دیگری، بهبود قابل‌توجهی در عملکرد پی سطحی ناشی از محصورسازی جانبی خاک گزارش شد [15].

عملکرد پی‌های لبه‌دار در خاک رس نرم به وسیله نظیر و عزام [16] و ژانگ و همکاران [17] مطالعه شد که نتایج

بررسی‌ها، بهبود قابل‌توجه در مقدار ظرفیت باربری نهایی و اصلاح منحنی بار-نشست را ارائه داد.

لوو و مک‌لارن [18] سازوکار باربری و رفتار پی لبه‌دار واقع بر بستر ماسه روی رس را به وسیله تحلیل اجزای محدود بررسی کرده و پوش‌های گسیختگی تحت بارگذاری ترکیبی را ارائه دادند.

مانا و همکاران [19] نتایج سازوکار گسیختگی و انتقال بار دو نوع پی لبه‌دار و پی سطحی مدفون در تراز پایین لبه را بررسی کردند. با مقایسه نتایج ملاحظه شد که سازوکار گسیختگی و انتقال بار پی‌های لبه‌دار با افزایش عمق لبه ( $L$ )، مشابهت زیادی به سازوکار پی‌های مدفون داشته و تفاوت چندانی باهم ندارند. در نتیجه افزایش عمق لبه در پی‌های لبه‌دار، تغییر سازوکار گسیختگی پی از حالت سطحی به نوع گسیختگی عمیق (مشابه پی‌های عمیق و نیمه‌عمیق)، به وسیله مانا و همکاران مشاهده شد که این باعث افزایش ظرفیت باربری قائم و بهبود عملکرد این نوع پی‌ها می‌شود.

رفتار لرزه‌ای پی‌های لبه‌دار با مطالعه تاثیر وجود لبه بر میزان کنترل تغییرشکل افقی خاک و نیز پایداری کلی پی، به وسیله برخی پژوهشگران بررسی شده است [20-21].

با وجود بررسی‌های صورت گرفته و نتایج به‌دست آمده برای پی‌های لبه‌دار، با این حال مطالعه عملکرد این نوع پی‌ها، به ویژه در کشور ایران در مقایسه با سایر کشورها، محدود است؛ که نیاز به بررسی جامع‌تر به‌ویژه در خاک‌های دانه‌ای، احساس می‌شود. هدف از این پژوهش، بررسی و ارزیابی عملکرد پی‌های مربعی لبه‌دار در بارگذاری فشاری و نیز مطالعه تاثیر پارامترهای مختلف بر رفتار این نوع پی‌ها است که به وسیله مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس، در خاک ماسه‌ای انجام گرفت. لازم به گفتن است که این پژوهش نسبت به تحقیقات مشابه قبلی، در موارد زیر متمایز است:

- مقایسه ظرفیت باربری، نشست و ضریب واکنش بستر پی‌های لبه‌دار با پی‌های سطحی و نیمه‌عمیق؛
- به‌کارگیری دو روش مدل‌سازی فیزیکی مدل پی لبه‌دار به صورت درجا و کوبشی و مقایسه نتایج به دست آمده؛
- مدل‌سازی پی‌های مربعی با عرض‌های مختلف؛

ثابت و به میزان  $1 \text{ mm/min}$  در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری نیروهای اعمال شده به مدل‌های پی و میزان نشست متناظر، به ترتیب یک عدد نیروسنج<sup>۱</sup> با ظرفیت  $2 \text{ ton}$  و دو عدد جابه‌جایی‌سنج<sup>۲</sup> با دقت اندازه‌گیری  $0.01 \text{ mm}$ ، در دو سمت مدل پی استفاده شد. نمایش دستگاه آزمایش به همراه جزئیات آن در شکل (۱) ارائه شده است.

ابعاد مدل‌های پی بر اساس ابعاد جعبه آزمایش و در نظر گرفتن آثار شرایط مرزی انتخاب شد. با توجه به تحلیل‌های حساسیت صورت گرفته و استناد به منابع معتبر، کمینه فاصله پی تا جداره جعبه و نیز از زیر لبه پی تا کف جعبه، باید به ترتیب  $2.5B$  و  $3B$  لحاظ شود [23-25]. بنابراین با در نظرگیری کمینه فواصل موردنظر، سه نوع مدل پی مربعی از جنس فولاد به عرض‌های ۹،  $6/8$  و  $4/5 \text{ cm}$ ، برای مطالعه انتخاب شد. برای شبیه‌سازی لبه‌های مربعی، صفحات فولادی جدارنازک به ضخامت جداره  $3 \text{ mm}$  به هم جوش شده و به‌عنوان لبه در طول‌های مختلف استفاده شد. برای بررسی تاثیر پارامتر طول لبه در مطالعه، ۵ نسبت طول به عرض ( $L/B$ ) برابر با  $0.5$ ،  $1.0$ ،  $1.5$  و  $2.0$  در نظر گرفته شد. نوع و محدوده پارامترهای موردنظر برای آزمایش‌های مدل پی لبه‌دار و پی سطحی، با جزئیات کامل در شکل (۲) مشاهده می‌شود. همچنین برای ایجاد زبری روی سطوح تماس مدل‌ها با ماسه و بررسی پارامتر زبری، دو نوع کاغذ سنباده با زبری‌های متفاوت به سطوح داخلی و خارجی لبه و کف شالوده، به وسیله چسب چسبانده شد.

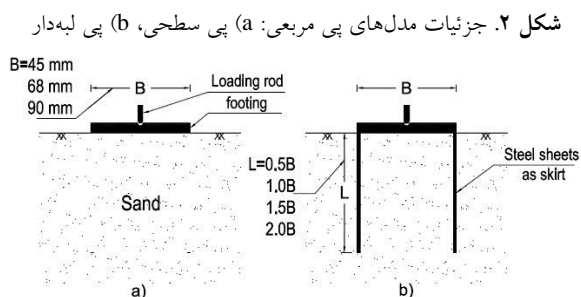


Fig. 2. Square foundation models: a) surface, b) skirted

- در نظرگیری تراکم نسبی ماسه، علاوه بر زاویه اصطکاک برای ارائه نمودارهای تخمین باربری و نشست؛
- ایجاد زبری‌های مختلف بر سطوح داخلی و خارج لبه و پی به وسیله کاغذ سنباده و بررسی تاثیر آن.

## ۲. مدل‌سازی آزمایش‌ها

### ۲-۱- دستگاه بارگذاری و مدل‌ها

برای انجام آزمایش‌ها در این پژوهش، از دستگاه آزمایشگاهی متشکل از جعبه آزمایش، سیستم ریزش ماسه، ابزارهای اندازه‌گیری، مدل‌های پی، سیستم بارگذاری و جمع‌آوری داده‌ها استفاده شد. جعبه آزمایش دارای ابعاد داخلی  $60 \times 60 \times 60 \text{ cm}$  و از جنس پلک شفاف است که به وسیله تسمه‌های فلزی در اطراف جعبه مقاوم‌سازی شده است. صلیبت جعبه آزمایش به اندازه‌ای است که در هنگام نمونه‌سازی و انجام آزمایش باعث تغییر شکل نشده و خللی در نتایج ایجاد نکند. برای تهیه و آماده‌سازی بستر یکنواخت و همگن ماسه، از روش ریزش ماسه که متشکل از سیستم توری، مخزن و قیف است، استفاده شد [22].

شکل ۱. نمایش دستگاه آزمایش به همراه جزئیات آن

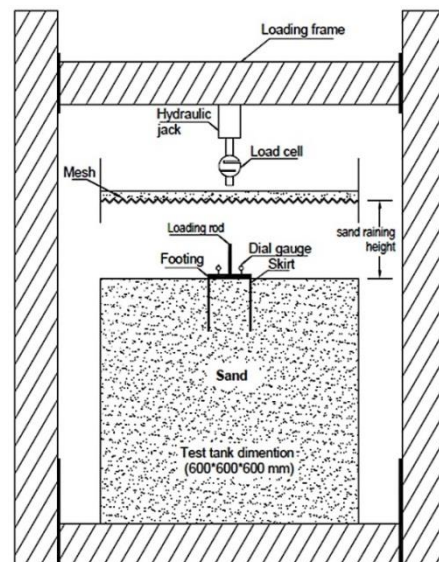


Fig. 1. Schematic view and details of the testing setup

بارگذاری مدل‌ها به وسیله جک هیدرولیکی و از طریق میله‌ای به قطر  $3 \text{ cm}$  انجام گرفت و به علت عدم تاثیر قابل توجه نرخ سرعت بارگذاری در نتایج مدل‌سازی ناشی از نوع مصالح مورد استفاده و شرایط آزمایش، سرعت بارگذاری

1 Load cell

2 Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

## ۲-۲- مصالح و مشخصات آن

در این پژوهش، ماسه سیلیسی فیروزکوه با اندازه دانه‌بندی متوسط به‌عنوان خاک زیر پی استفاده شد که مطابق سیستم طبقه‌بندی یکنواخت (متحد)، ماسه یکنواخت بد دانه‌بندی شده به نام SP، است [26]. بر اساس نمودار منحنی دانه‌بندی ماسه مطابق شکل (۳)، مقادیر ضریب یکنواختی ( $C_u$ )، ضریب انحنای ( $C_c$ ) و چگالی ویژه ماسه ( $G_s$ )، به ترتیب برابر با ۱/۳۱، ۱/۰۵ و ۲/۶۱ به دست آمد. همچنین وزن مخصوص خشک بیشینه و کمینه ماسه، به ترتیب ۱۷/۴ و ۱۴/۶  $\text{kN/m}^3$  اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها بر اساس سه نوع تراکم نسبی ۰/۵۰، ۰/۶۴ و ۰/۷۵، طراحی شدند که برای رسیدن به تراکم موردنظر، از روش ریزش ماسه استفاده شد. سیستم ریزش ماسه روشی است که به وسیله الک با آرایش سوراخ مشخص و با کنترل میزان نرخ بارش و همچنین ثابت نگه‌داشتن ارتفاع ریزش، می‌توان بستر یکنواخت و همگنی از ماسه با تراکم مشخص را شبیه‌سازی کرد [22, 27-28].

## ۲-۳- روش نمونه‌سازی و انجام آزمایش

پس از روغن‌کاری سطوح داخلی جعبه آزمایش برای دوری از تاثیر شرایط دیواره بر نتایج، آماده‌سازی نمونه آزمایش با روش ریزش ماسه از ارتفاع و نرخ ثابت، در لایه‌های ۵ cm انجام گرفت. مطابق با روش ریزش ماسه برای هر یک از تراکم‌های نسبی موردنظر، ارتفاع و شدت بارش متناظر با آن مشخص شده و در آن ارتفاع و نرخ ریزش ثابت، بارش ماسه ادامه یافت. لازم به گفتن است که با افزایش ارتفاع ریزش و کاهش نرخ ریزش، مقدار وزن مخصوص و تراکم نسبی ماسه افزایش می‌یابد. برای اطمینان از همگنی بستر ماسه در تمام نقاط جعبه و همچنین حصول تراکم نسبی موردنظر، از ظرف‌هایی با حجم مشخص در نقاط مختلف جعبه استفاده شد. ریزش ماسه تا تراز قرارگیری لبه، با شرایط یکسان ادامه یافته و پس از قرارگیری لبه به صورت قائم در مرکز جعبه، ریزش ماسه درون لبه و اطراف آن تا تراز بالای لبه ادامه یافت. با اتمام بارش ماسه و تراز کردن سطح بستر ماسه، شالوده سطحی روی لبه قرار گرفته و به وسیله ۴ عدد پیچ به آن ثابت شد. پس از تکمیل فرایند مدل‌سازی نمونه، سیستم اندازه‌گیری نیرو بر روی جک و شالوده نصب شده و با انجام تنظیم‌های مربوط به ثبت داده‌ها، بارگذاری انجام شد. برای اعمال نیرو در مرکز پی و نداشتن خروج از مرکزیت بار، بر روی مدل پی سطحی شیباری کوچک ایجاد شد تا با قرارگیری نوک میله بارگذاری در آن، میله فاقد جابه‌جایی عرضی باشد. در مرحله آماده‌سازی بستر ماسه و مدل‌سازی، دقت کامل بر آن بود که با کاهش دست‌خوردگی نمونه، دقت نتایج به دست آمده افزایش یابد.

در مورد چگونگی نمونه‌سازی، معمولاً دو روش متداول شامل روش کوبشی (فشار) و روش درجا استفاده می‌شود که در این پژوهش، روش درجا به کار گرفته شد. استفاده از روش کوبش برای قرار دادن لبه درون بستر ماسه، تا حدودی باعث

شکل ۳. نمودار منحنی دانه‌بندی ماسه استفاده شده در آزمایش‌ها

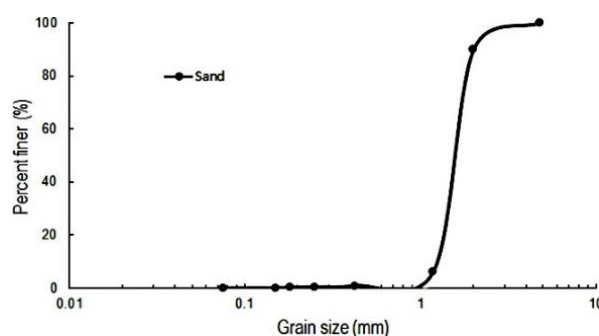


Fig. 3. Grain size distribution curve of sand used in the tests

مقاومت برشی ماسه برای تراکم‌های مختلف، به وسیله دستگاه برش مستقیم و تحت تنش‌های قائم در دامنه‌های ۱۰-۱۲۰  $\text{kN/m}^2$  تعیین شد. بر اساس نتایج پوش گسیختگی، متوسط زوایای اصطکاک داخلی ماسه برای تراکم‌های نسبی ۰/۵۰، ۰/۶۴ و ۰/۷۵ به ترتیب ۳۹، ۴۲ و ۴۳ درجه به دست آمد. زوایای اصطکاک سطح تماس بین ماسه، فولاد و همچنین سطوح پوشانده شده با کاغذ سنباده در دو زبری متفاوت ( $\delta$ ),

اجتناب کرد که این مورد در پژوهش رعایت شده است؛ ولی احتمال وجود تاثیر ناشی از اختلاف تراز تنش زیر پی، همچنان وجود دارد.

در این پژوهش، مقایسه مقادیر نشست و ظرفیت باربری با مقادیر متناظر مدل‌های آزمایشگاهی و همچنین روابط نظری، به‌جای مقادیر مدل‌های واقعی مدنظر است. به‌عبارتی می‌توان گفت که هدف اصلی، بررسی و مقایسه رفتار پی‌های لبه‌دار با پی‌های متداول سطحی و نیمه‌عمیق و نیز کمی‌سازی تاثیر پارامترهای مختلف بر نتایج بوده و اندازه‌گیری مقادیر نشست و ظرفیت باربری پی‌های واقعی، موردنظر نبوده است. بنابراین اثر مقیاس نمی‌تواند خللی در روند مقایسه نتایج به‌دست آمده، ایجاد نماید. ولی برای تعمیم نتایج مدل کوچک‌مقیاس به نتایج مدل واقعی، باید تاثیر تراز تنش بررسی شود. به‌همین منظور جهت کمی‌سازی اثر تراز تنش بر نتایج، از روش ارائه شده به وسیله دی بییر [37] استفاده شد؛ ایشان با رسم نمودارهای بدون بعد  $s\gamma^*N\gamma$  در برابر  $\gamma B/pa$ ، گزارش کردند که اثر تراز تنش به حاصل ضرب دو پارامتر عرض پی ( $B$ ) و تراکم خاک ( $\gamma$ ) بستگی دارد؛ دو شالوده با ابعاد متفاوت  $B_1$  و  $B_2$  روی دو نوع ماسه با چگالی  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$ ، در صورت برقراری رابطه  $\gamma_1 B_1 = \gamma_2 B_2$ ، تراز تنش در دو شالوده برابر بوده و مقادیر  $N\gamma$  یکسان به‌دست می‌آید [38].

تاثیر تراز تنش بر نتایج مدل‌های با عرض مختلف، بررسی و به صورت کمی ارائه شد. شکل (۴) تاثیر تراز تنش را برحسب پارامترهای  $s\gamma^*N\gamma$  و  $\gamma B/pa$  برای انواع مدل پی سطحی ( $L/B=0$ ) و تراکم ماسه نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش  $\gamma B/pa$ ، مقادیر  $N\gamma$  کاهش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که تاثیر تراز تنش در افزایش عرض پی از  $4/5$  به  $6/8$ ، بیشتر از مقدار  $6/8$  به  $9$  است. ولی روند برای سه تراکم نسبی تقریباً یکسان مشاهده می‌شود (شیب نمودارها یکسان است). شکل (۵) منحنی‌های متناظر را برای مدل‌های پی لبه‌دار، به‌ازای  $L/B$ های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که شیب منحنی‌ها برای  $L/B$ های مختلف تقریباً یکسان بوده و در مقایسه با پی‌های سطحی کمی تندتر است. بنابراین می‌توان گفت که پی‌های لبه‌دار نیز همانند پی‌های سطحی دارای تاثیر تراز تنش

دست‌خوردگی و تراکم خاک شده و سبب افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی می‌شود. به‌همین منظور، برای بررسی تاثیر راندن لبه درون ماسه بر تغییرات تراکم نسبی ماسه، تعدادی آزمایش روی نمونه‌های مدل از طریق فشار، انجام گرفت؛ پس از آماده‌سازی بستر ماسه، لبه پی با نرخ حرکتی ثابت به وسیله جک هیدرولیکی، داخل ماسه رانده شده و در تراز (عمق) مشخص قرار گرفت. با مقایسه نتایج به‌دست آمده از دو روش، مشاهده شد که روش نصب لبه با فشار جک، مقادیر بیشتری را در پاسخ بار-نشست، با اختلاف حدود ۵٪ نسبت به روش اول ارائه می‌دهد.

باید توجه شود که با توجه به مطالب گفته شده، روش استفاده شده در این پژوهش باعث می‌شود که نتایج به‌دست آمده در مقایسه با نتایج مطالعات مشابه با روش کوبش یا فشار، دست‌پایین و محافظه‌کارانه باشد.

### ۳. بررسی اثر مقیاس

با توجه به وجود برخی مشکلات در انجام آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس و واقعی، به لحاظ تجهیزات بارگذاری و هزینه زیاد، معمولاً از مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس کوچک استفاده می‌شود. ولی به‌علت وجود اثر مقیاس و تاثیر احتمالی بر نتایج، مدل آزمایشگاهی نمی‌تواند دقیقاً همان رفتار مدل اصلی را منعکس نماید. اثر مقیاس به ویژه در خاک‌های دانه‌ای بیشتر اهمیت دارد. در مورد علل به‌وجود آمدن اثر مقیاس در مدل‌های آزمایشگاهی، پژوهشگران مختلفی مطالعه کرده‌اند [29-32]. برخی منشاء ایجاد چنین آثاری را به وجود اختلاف در تراز تنش زیر پی مدل و شالوده با اندازه اصلی، برخی دیگر به نسبت میان عرض پی و اندازه متوسط دانه‌ها و گروهی دیگر از پژوهشگران نیز به عرض مطلق پی نسبت داده‌اند [33-36]. بنابراین، رعایت هر کدام از موارد تاثیرگذار گفته شده در مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس، اهمیت دارد. با استفاده از مصالح با اندازه دانه‌بندی کوچک نسبت به عرض پی ( $B/D_{50}$ ) می‌توان به‌راحتی از اثر مقیاس ناشی از اندازه دانه‌ها

مدل‌های پی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه منحنی‌ها نقطه بیشینه کاملاً مشخصی را به‌عنوان بار گسیختگی نشان نمی‌دهند، ظرفیت باربری نهایی و نشست متناظر آن، به‌عنوان نقطه‌ای که شیب منحنی صفر شده و یا با شیب تقریباً ثابتی ادامه می‌یابد، در نظر گرفته شد. تنش گسیختگی برای پی‌های سطحی در نشستی حدود ۶-۹٪ عرض پی و برای پی‌های لبه‌دار در محدوده نشست ۱۶٪-۱۳٪، بسته به تراکم نسبی ماسه، میزان زبری و طول لبه به دست آمد.

برای بررسی درستی انجام آزمایش‌ها و همچنین دقت نتایج، ظرفیت باربری نهایی پی‌های سطحی از طریق روابط نظری پیشنهادی به وسیله پژوهشگران مختلف از جمله میرهوف [39]، هنسن [40]، وسیک [33]، لاندگرن و مورتسن [41]، اسپانگلر و هاندی [42]، محاسبه و با نتایج اندازه‌گیری شده به وسیله مدل‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. مقایسه نتایج مطابق جدول (۱)، نشان داد که توافق خوبی میان مقادیر نظری و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد، که این نتیجه را می‌توان به نتایج به‌دست آمده به وسیله پی‌های لبه‌دار تعمیم داد.

شکل ۶. نمونه‌ای از منحنی‌های پاسخ تنش - نشست اندازه‌گیری شده به

وسیله آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی

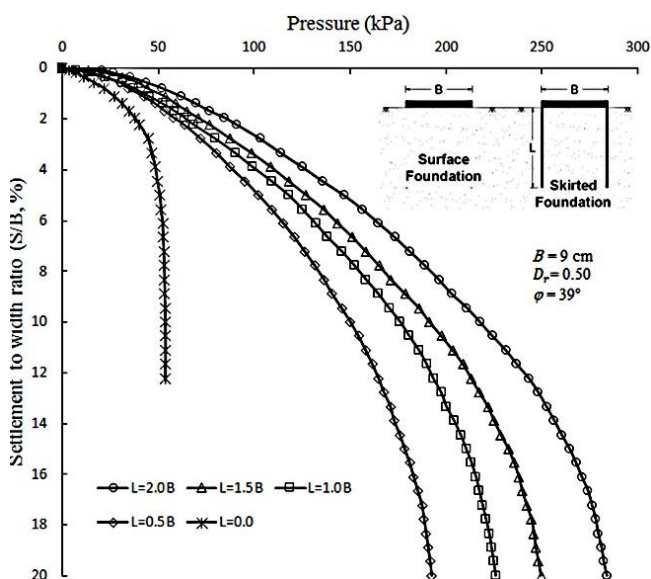


Fig. 6. Typical curves of stress-settlement response measured using physical modeling tests

بوده، ولی افزایش طول لبه تغییر چندانی بر نتایج به دست آمده ندارد.

شکل ۴. تغییرات تاثیر تراز تنش مدل‌های پی سطحی بر  $S_f/N_f$

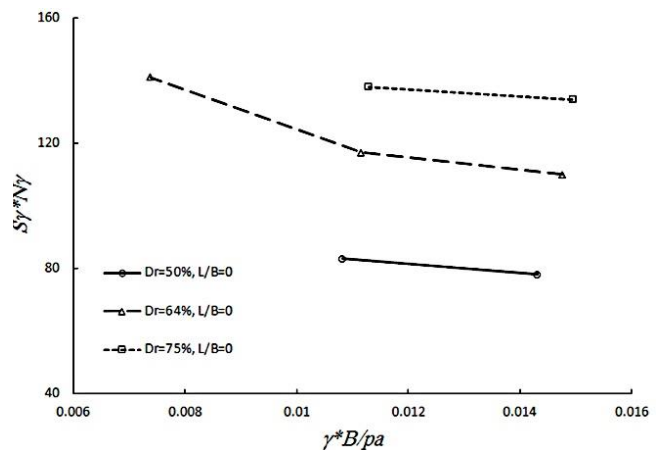


Fig. 4. Variation of the stress level effect of surface foundation models on  $S_f/N_f$

شکل ۵. تغییرات تاثیر تراز تنش مدل‌های پی لبه‌دار بر  $S_f/N_f$

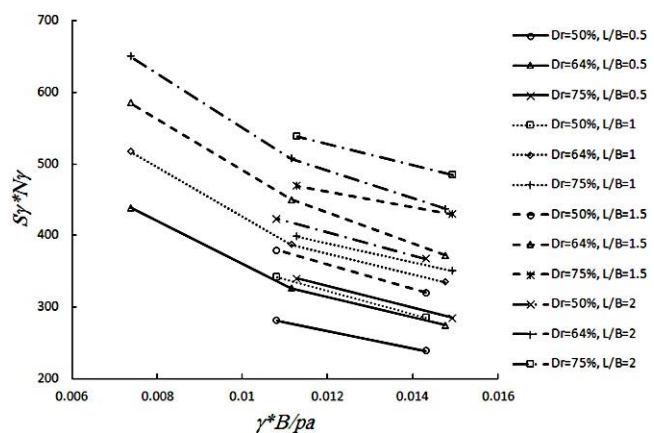


Fig. 5. Variation of the stress level effect of skirted foundation models on  $S_f/N_f$

#### ۴. نتایج آزمایش‌ها

بر اساس تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، مشاهده شد که وجود لبه در محیط پیرامون پی، رفتار پی‌های سطحی را از نظر ظرفیت باربری، نشست و ضریب واکنش بستر، بهبود می‌بخشد. مقدار بهبود عملکرد پی با افزایش طول لبه، کاهش تراکم نسبی و افزایش میزان زبری سطح لبه، افزایش می‌یابد. شکل (۶) نمونه‌ای از منحنی‌های پاسخ تنش - نشست را برای

محاسبه و با مقادیر مانند پی‌های لبه‌دار ( $Q_{sk}$ ) اندازه‌گیری شده به وسیله مدل‌سازی فیزیکی، مقایسه شدند.

#### ۱-۵-۱- تاثیر نسبت طول لبه به عرض پی ( $L/B$ )

برای بررسی اثر طول لبه بر پاسخ پی لبه‌دار، آزمایش‌های مدل در ۵ طول مختلف با نسبت‌های طول به عرض ( $L/B$ ) ۰/۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲، انجام گرفت. نتایج تغییرات نسبت ظرفیت باربری ( $BCR$ ) در برابر مقادیر  $L/B$  در شکل (۷) ارائه شده است. روند منحنی‌ها نشان می‌دهد که وجود لبه زیر پی سطحی، ظرفیت باربری پی را متناسب با نسبت  $L/B$  افزایش می‌دهد؛ نتیجه به‌دست آمده، محصورسازی ماسه با افزایش طول لبه را منعکس می‌کند که باعث می‌شود پی و ماسه احاطه شده درون لبه، به‌عنوان سیستمی واحد عمل کرده و ظرفیت باربری افزایش یابد. کمینه بهبود ظرفیت باربری پی سطحی به‌ازای  $L/B=0.5$  حدود ۲/۳۹ برابر و برای  $L/B=2.0$  حدود ۳/۸۱ برابر به‌دست آمد. برای سایر عرض‌های مدل پی لبه‌دار نیز رفتار مشابهی مشاهده شد.

شکل ۷. تغییرات نسبت ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار و تاثیر تراکم نسبی

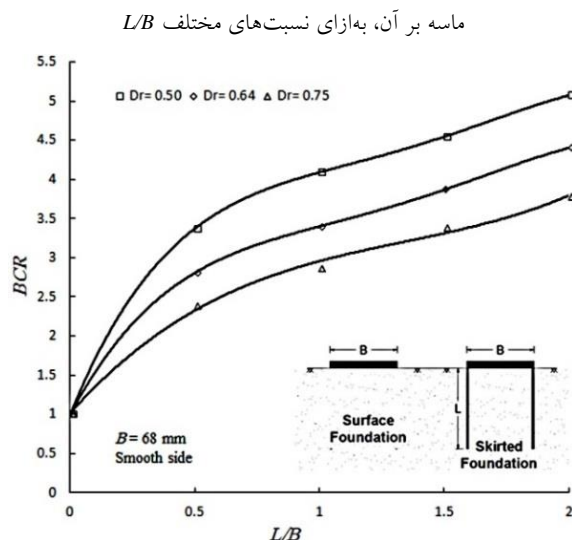


Fig. 7. Variation in the bearing capacity ratio and effect of sand relative density on values in terms of different  $L/B$

با مقایسه نتایج به‌دست آمده در این مطالعه با نتایج گزارش شده در مطالعات مشابه قبلی، تفاوت‌هایی در مقادیر بهبود ظرفیت باربری ملاحظه می‌شود. به‌طور نمونه، السواف و نظیر [15]، با انجام آزمایش‌های مدل پی به قطر ۷/۵ cm و لبه

جدول ۱. مقایسه نتایج آزمایشگاهی ظرفیت باربری مدل‌های پی سطحی با مقادیر متناظر روابط نظری

	$N_{\gamma}$	$q_{ult}$ (kPa)	
		$B = 9\text{cm}$	$B = 6.8\text{cm}$
Present study	-	84.5	65.3
Meyerhof (1963)	139.3	82.5	63.4
Hansen (1970)	114.1	63.7	50.8
Vesi'c (1973)	155.5	91.9	69.4
Lundgren and Mortensen (1953)	137.9	81.4	61.5
Spangler and Handy (1982)	130.6	77.2	58.3

Table 1. Comparison of experimental results of bearing capacity of surface foundation with theoretical values

## ۵. تحلیل و بحث در مورد نتایج

### ۱-۵-۵- ظرفیت باربری و نشست

برای بررسی عملکرد پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های سطحی، ظرفیت باربری مدل‌های پی لبه‌دار ( $q_{sk}$ )، با مقادیر متناظر پی‌های سطحی ( $q_{su}$ )، مقایسه شده و میزان افزایش در مقدار ظرفیت باربری پی‌های سطحی ناشی از وجود لبه، برحسب نسبت ظرفیت باربری ( $BCR=q_{sk}/q_{su}$ )، ارائه شد. همچنین با مقایسه مقادیر نشست مدل‌های پی لبه‌دار ( $s_{sk}$ ) و پی سطحی ( $s_{su}$ )، نمودارهای بی‌بعدی برای تخمین مقادیر کاهش نشست، برحسب ضریب نسبت نشست ( $SRF=s_{sk}/s_{su}$ )، توسعه و ارائه شد. مقادیر نشست در تنشی برابر با نصف ظرفیت باربری پی سطحی ( $0.5q_{su}$ ) مقایسه شد. انتخاب این مقدار تنش برای محاسبات نسبت نشست، باعث کاهش حساسیت در محاسبات شده و دقت نتایج را افزایش می‌دهد. مقادیر نشست در چنین تراز تنشی، هماهنگی خوبی با نشست متناظر تنش‌های مجاز (نصف تا یک سوم ظرفیت باربری) موردنظر در عملیات طراحی و اجرا، دارند.

برای بررسی دقیق‌تر عملکرد پی‌های لبه‌دار، مقادیر ظرفیت باربری پی‌های نیمه‌عمیق ( $Q_{pr}$ )، به وسیله روابط نظری شامل ترزاقی [43]، میرهوف [39]، هسن [40] و وسیک [33]

به‌منظور بررسی میزان کارایی پی‌های لبه‌دار در مقایسه با پی‌های نیمه‌عمیق، تغییرات ظرفیت باربری پی‌های نیمه‌عمیق ( $Q_{pr}$ ) و لبه‌دار ( $Q_{sk}$ ) برحسب نسبت ظرفیت باربری ( $Q_{pr}/Q_{sk}$ )، در شکل (۹) ارائه شد. مشاهده می‌شود که میزان باربری پی‌های نیمه‌عمیق، به‌طور متوسط حدود ۱۰٪ بیشتر از پی‌های لبه‌دار است و دو نوع پی عملکرد تقریباً مشابهی دارند. با توجه به نزدیکی میزان عملکرد پی‌های لبه‌دار و نیمه‌عمیق از نظر باربری، و بیشتر بودن میزان مصالح صرفه‌جویی شده در پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های نیمه‌عمیق، استفاده از پی لبه‌دار می‌تواند مقرون به‌صرفه باشد. البته بایستی به این نکته اشاره نمود که نتیجه به دست آمده، بر اساس مقایسه با روابط کلاسیک موجود انجام گرفته و برای اظهارنظر دقیق‌تر، نیاز به بررسی و پژوهش‌های بیشتری به ویژه آزمایش روی پی‌های نیمه‌عمیق است.

شکل ۹. مقایسه نسبت ظرفیت باربری پی‌های نیمه‌عمیق و لبه‌دار

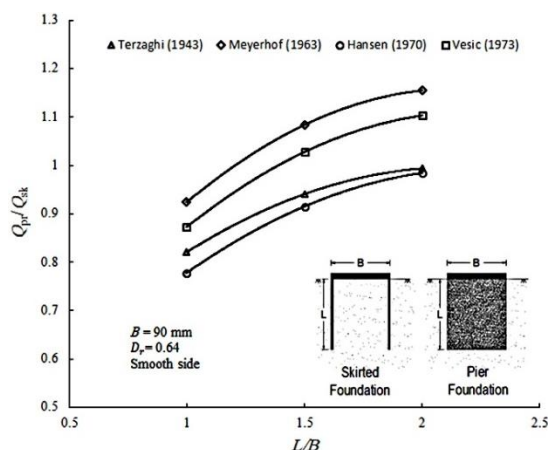


Fig. 9. Comparison of bearing capacity ratio of skirted foundations with those of pier foundations

#### ۲-۱-۵- تاثیر تراکم نسبی ماسه

برای بررسی تاثیر تراکم نسبی ماسه بر رفتار پی‌های لبه‌دار، آزمایش‌های مدل در سه نوع تراکم نسبی ۵۰٪، ۶۴٪ و ۷۵٪، انجام شد. شکل (۷) تغییرات نسبت ظرفیت باربری را برحسب تراکم نسبی نشان می‌دهد. از نمودارها مشاهده می‌شود که وجود لبه در ماسه با تراکم نسبی کمتر، دارای تاثیر و کارآمدی بیشتری است؛ به‌طوری که بهبود در نسبت ظرفیت باربری با کاهش تراکم نسبی ماسه افزایش می‌یابد. تحلیل نتایج نشان داد که متوسط مقدار بهبود ظرفیت باربری در تراکم نسبی ۵۰٪

از جنس UPVC، واقع بر ماسه با تراکم نسبی ۷۶٪، مقدار بهبود نسبت ظرفیت باربری را به‌ازای  $L/D=2.0$  حدود ۱۰٪ گزارش کردند که بسیار بیشتر از مقادیر به‌دست آمده در این پژوهش است. در بررسی مشابه دیگری به وسیله عید و همکاران [13]، برای پی مربعی به‌عرض ۱۰ cm و  $L/B=1.0$ ، بیشینه میزان بهبود در ظرفیت باربری برای تراکم نسبی ۵۷٪، حدود ۲/۷ گزارش شد. همچنین برای پی دایره‌ای به قطر ۱۲ cm واقع بر ماسه با تراکم نسبی ۶۴٪، نسبت بهبود ظرفیت باربری در دامنه ۱/۵ تا ۸/۱ به‌دست آمد [12]. به‌طور کلی با وجود تفاوت‌های موجود در شرایط آزمایش و مصالح مورد استفاده، وجود اختلاف در نتایج به‌دست آمده به وسیله پژوهشگران مختلف، نیاز به بررسی بیشتری دارد.

برای تخمین میزان کاهش نشست ناشی از حضور لبه، مقادیر ضرایب نسبت نشست ( $SRF$ ) برحسب مقادیر  $L/B$  و تراکم‌های مختلف ماسه، در شکل (۸) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که وجود لبه زیر پی سطحی، به‌طور قابل‌توجهی نشست شالوده را کاهش می‌دهد؛ میزان کاهش نشست متناسب با نسبت  $L/B$  بوده و با زیاد شدن نسبت متناظر، مقدار کاهش نشست نیز افزایش می‌یابد. میزان نشست پی لبه‌دار برای نسبت‌های  $L/B$  برابر با ۰/۵ و ۲/۰، در محدوده بین ۵۸٪ تا ۹٪ مقدار نشست متناظر پی سطحی کاهش یافته، که کاهش در حدود ۹۱٪ را نشان می‌دهد.

شکل ۸. تغییرات ضریب نسبت نشست و اثر وجود لبه بر نشست پی‌های

سطحی به‌ازای مقادیر  $L/B$

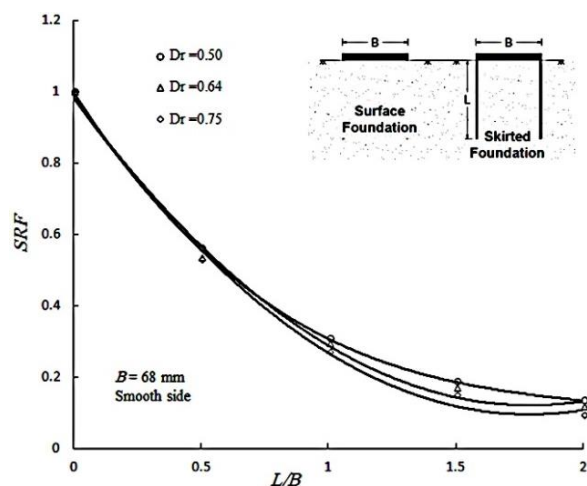


Fig. 8. Variation in settlement ratio factor and effect of skirt existence on settlement of surface foundations



نسبت به حالت‌های ۰.۶۴٪ و ۰.۷۵٪، به ترتیب حدود ۰.۲۲٪ و ۰.۳۶٪ افزایش دارد.

### ۳-۱-۵- تاثیر زبری سطوح پی و لبه

تاثیر میزان زبری سطوح پی و لبه، با در نظرگیری دو سطح نسبتاً زبر ( $\delta=34^\circ$ ) و زبر ( $\delta=37^\circ$ ) نسبت به حالت سطح صاف ( $\delta=29^\circ$ )، مطالعه شد. تغییرات نسبت ظرفیت باربری برای زبری‌های مختلف مطابق شکل (۱۰)، نشان می‌دهد که بهبود ظرفیت باربری برای حالت زبر نسبت به سایر حالت‌ها، مقدار بیشتری را به دست می‌دهد. به گونه‌ای که با افزایش میزان زبری سطح نسبت به حالت صاف، ظرفیت باربری به طور متوسط حدود ۱۹٪ بهبود پیدا می‌کند.

شکل ۱۱. تغییرات نسبت ضریب واکنش بستر مدل‌های پی لبه‌دار

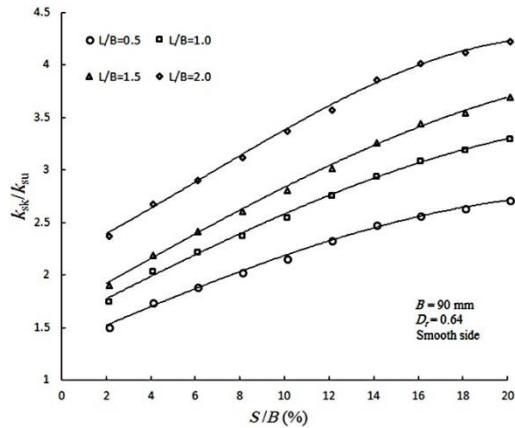


Fig. 11. Variation in the ratio of subgrade reaction modulus of skirted foundation models

### ۵-۳- مقایسه نشست پی لبه‌دار با پی سطحی مدفون

مقادیر نشست پی‌های سطحی مدفون در اعماق متناظر با  $L/B$ ، با اعمال ضرایب اصلاح عمق پیشنهادی به وسیله پولس و دیویس [44]، فاکس [45] و نیشیدا [46]، محاسبه شده و با مقادیر نشست پی‌های لبه‌دار به دست آمده از مدل‌سازی فیزیکی، مقایسه شدند. مقایسه نتایج مطابق شکل (۱۲) نشان داد که وجود لبه زیر پی سطحی، نسبت به پی سطحی مدفون در اعماق متناظر با نوک لبه، مقادیر نشست را بیشتر کاهش می‌دهد.

شکل ۱۰. نسبت ظرفیت باربری مدل‌های پی لبه‌دار برحسب زبری

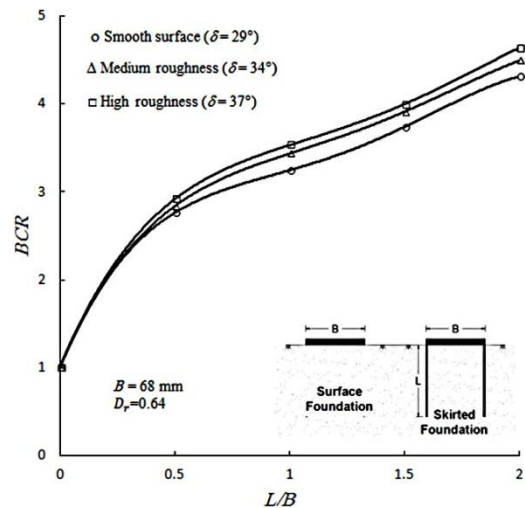


Fig. 10. The bearing capacity ratio of skirted foundation models in terms of roughness

### ۲-۵- تاثیر لبه بر ضریب واکنش بستر ماسه

بر پایه نتایج به دست آمده از بهبود عملکرد پی‌های لبه‌دار از نظر افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست، تاثیر وجود لبه بر ضریب واکنش بستر ماسه ( $k_s$ ) نیز بررسی شد. مطابق پاسخ‌های تنش-نشست، ضریب واکنش بستر برای مدل‌های پی لبه‌دار ( $k_{sk}$ ) و پی سطحی ( $k_{su}$ ) محاسبه شده و منحنی تغییرات برحسب نسبت ضریب واکنش بستر ( $k_{sk}/k_{su}$ )، ارائه شد. تغییرات نسبت ضریب واکنش بستر برحسب نسبت نشست مطابق شکل (۱۱)، نشان می‌دهد که با افزایش نسبت نشست، ضریب واکنش بستر پی لبه‌دار ناشی از وجود لبه، در

شکل ۱۲. مقایسه نشست پی لبه‌دار و پی سطحی مدفون در تراز لبه

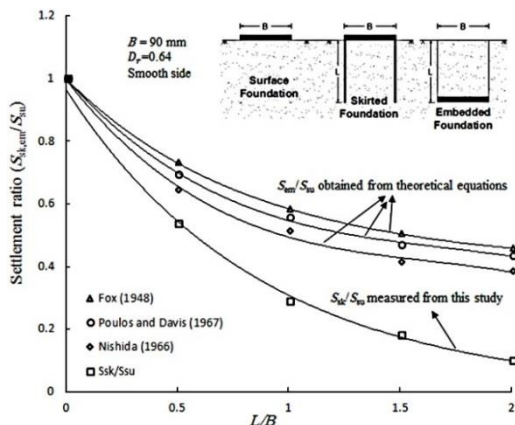


Fig. 12. Comparison of skirted foundation settlement with that embedded surface foundation in skirt tip level

افزایش باربری، با زیاد شدن نسبت طول لبه به عرض پی و کاهش تراکم نسبی ماسه افزایش می‌یابد. در این مطالعه بسته به طول لبه و تراکم نسبی ماسه، ظرفیت باربری پی سطحی بین  $2/4$  تا  $5/1$  برابر بهبود یافت.

(۲) مقادیر ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار، نزدیک به مقادیر متناظر پی‌های نیمه‌عمیق به دست آمد. بنابراین استفاده از پی لبه‌دار می‌تواند باعث صرفه‌جویی قابل توجهی در مصالح به‌کار رفته در عملیات ساخت و اجرایی، نسبت به پی‌های نیمه‌عمیق شود.

(۳) نتایج نشان داد که وجود لبه، پاسخ تنش-نشست را اصلاح نموده و نشست پی‌های سطحی را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. در این مطالعه، کمینه و بیشینه ضریب کاهش نشست برای نسبت‌های  $L/B$  برابر با  $0/5$  و  $2/0$ ، به ترتیب  $0/58$  و  $0/09$  به دست آمد. با توجه به میزان کاهش نشست ناشی از حضور لبه، سازه‌هایی که عملکردشان حساس به مقدار نشست بوده و نشست کنترل کننده است، محصورسازی خاک می‌تواند همان باربری را در مقدار نشست خیلی کمتری تامین نماید.

(۴) به علت استفاده از لبه، ضریب واکنش بستر مدل‌های پی سطحی در محدوده  $1/5$  تا  $4/23$  برابر بهبود یافت.

(۵) به‌کارگیری لبه زیر پی سطحی در خاک‌های ماسه‌ای سست و با تراکم متوسط، کارایی و سودمندی بیشتری نسبت به حالت ماسه متراکم، به دست می‌دهد.

(۶) نتایج نشان داد که میزان بهبود عملکرد پی‌های لبه‌دار با افزایش میزان زبری سطوح پی و لبه، افزایش می‌یابد.

(۷) مقایسه نتایج مدل‌های پی لبه‌دار و پی سطحی مدفون در تراز لبه، نشان داد که وجود لبه زیر پی سطحی، مقادیر نشست را بیشتر از پی‌های سطحی مدفون، کاهش می‌دهد.

(۸) بر اساس مقادیر نسبت ظرفیت باربری و نسبت کاهش نشست، نمودارهای بی‌بعدی جهت تخمین میزان افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست، با توجه به مقادیر  $L/B$  و تراکم نسبی مختلف، توسعه و ارائه شد.

همچنین مشاهده شد که نتایج دو نوع پی لبه‌دار و سطحی مدفون، در مقادیر  $L/B$  کمتر، داری اختلاف کمتری است. عملکرد بهتر پی لبه‌دار در میزان کاهش نشست نسبت به پی سطحی مدفون، به‌وضوح در شکل مشاهده می‌شود.

## ۶. بررسی پی لبه‌دار از نظر صرفه اقتصادی

از مزیت‌های مهم پی‌های لبه‌دار نسبت به سایر انواع پی‌ها، استفاده از پمپ‌های مکش به‌جای چکش‌های بزرگ برای نصب پی‌ها، یا انجام حفاری‌های جزئی به‌جای حفاری قابل توجه برای پی‌های عمیق و نیمه‌عمیق است. با توجه به عملیات ساخت و نصب، پی‌های لبه‌دار در مقایسه با سایر انواع پی‌ها، دارای پتانسیل صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجهی هستند. به عنوان نمونه، به وسیله برخی پژوهشگران هزینه اجرایی چند پروژه واقعی پی لبه‌دار برآورد شده، که اختلاف در هزینه کل عملیات ساخت و اجرای پی‌های لبه‌دار نسبت به سایر انواع پی‌ها، در برخی موارد تا بیش از  $50\%$  نیز گزارش شده است [10, 47]. با توجه به نزدیک بودن عملکرد پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های نیمه‌عمیق و همچنین کارآمدی بهتر پی‌های لبه‌دار در مقایسه با پی‌های سطحی و پی‌های مدفون در تراز لبه از نظر میزان باربری و نشست، و نیاز به حفاری‌های حجیم در پی‌های سطحی مدفون و مقدار مصالح موردنیاز در این پی‌ها، ساخت و اجرای پی‌های لبه‌دار می‌تواند صرفه‌جویی اقتصادی زیادی به‌همراه داشته باشد.

## ۷. نتیجه‌گیری

ارزیابی رفتار پی‌های لبه‌دار و بررسی قابلیت بهبود ظرفیت باربری، نشست و همچنین ضریب واکنش بستر، نسبت به حضور لبه در زیر محیط پی‌های سطحی، از اهداف اصلی این تحقیق بود. به‌همین منظور تعداد  $53$  آزمایش بر روی مدل‌های پی واقع بر ماسه، به وسیله مدل‌سازی فیزیکی انجام شد که برای شرایط و پارامترهای در نظر گرفته شده در این مطالعه، خلاصه نتایج زیر می‌تواند ارائه شود:

(۱) استفاده از لبه تحتانی زیر پی سطحی، ظرفیت باربری پی را بر اثر محصورسازی جانبی ماسه، افزایش می‌دهد. تراز

## References

## ۸ مراجع

- [1] Tjelta T. I. & Haaland G. 1993 Novel foundation concept for a jacket finding its place.

- foundations for offshore wind turbines in silty clay. *Ocean Engineering*, 114, 87-100.
- [18] Lu P. & Maclaren D. 2016 Geotechnical challenge of offshore mud-mat foundation stability: Combining analytical and finite element investigation of bearing capacity of sand overlying soft clay. *Geomechanics for Energy and the Environment*.
- [19] Mana D. S. K., Gourvenec S. & Randolph M. F. 2011 A numerical study of the vertical bearing capacity of skirted foundations. *Frontiers in Offshore Geotechnics II*- Taylor & Francis Group, London.
- [20] Azzam W. R. 2015 Finite element analysis of skirted foundation adjacent to sand slope under earthquake loading. *HBRC Journal*, 11, 231-239.
- [21] Wang X., Zeng X., Yu H. & Wang H. 2015 Centrifuge modeling of offshore wind turbine with bucket foundation under earthquake loading. *Int. Foundation Congress and Equipment Expo*, San Antonio, Texas.
- [22] Rad N. S. & Tumay M. T. 1987 Factors affecting sand specimen preparation by raining. *Geotechnical Testing Journal*, 10(1), 31-37.
- [23] Cerato A. B. & Lutenegeger A. J. 2006 Bearing capacity of square and circular footings on a finite layer of granular soil underlain by a rigid base. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11), 1496-1501.
- [24] Pfeifle T. W. & Das B. M. 1979 Model tests for bearing capacity in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 105, 1112-1116.
- [25] Chen Q. 2007 An Experimental Study on Characteristics and Behavior of Reinforced Soil Foundation. PhD Thesis, Louisiana State University, USA.
- [26] ASTM 2006, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM standard D2487, West Conshohocken, PA.
- [27] LoPresti D. C. F., Pedroni S. & Crippa V. 1992 Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D 4253-83: A comparative study. *Geotechnical Testing Journal*, 15(2), 180-189.
- [28] Vaid Y. P. & Negussey D. 1984 Relative density of pluviated sand samples. *Soils and Foundations*, 24(2), 101-105.
- [29] Kusakabe O., Maeda Y. & Ohuchi M. 1992 Large-scale loading tests of shallow footing in pneumatic caisson. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(11), 1681-1695.
- [30] Herle I. & Tejchman J. 1997 Effect of grain size and pressure level on bearing capacity of footings on sand. *IS-Nagoya '97: Deformation and Progressive Failure in Geomechanics*, T. Adachi, and F. Oka, Pergamon, Oxford, 781-786.
- [31] Tatsuoka F., Okahara M., Tanaka T., Tani K., Morimoto T. & Siddiquee M. S. A. 1991 Progressive failure and particle size effect in bearing capacity of a footing on sand. *Geotech. Spec. Pub.*, 27(2), 788-802.
- [32] Ueno K., Miura K., Kusakabe O. & Nishimura M. 2001 Reappraisal of size effect of bearing capacity *Offshore site investigation and foundation behavior*, Society for Underwater Technology, 28, 717-728.
- [2] Rusaas P., Aas-Jakobsen A., Barrett G., Christiansen P. E. & Baerheim M. 1995 Design, operations planning and experience from the marine operations for the Europipe jacket with bucket foundations. *Proc. Offshore Technol. Conf.*, OTC 7794, Houston, TX, 885-895.
- [3] Erbrich C. T. & Tjelta T. I. 1999 Installation of bucket foundations and suction caissons in sand: geotechnical performance. *Offshore Technology Conference*, Houston, TX.
- [4] Lacasse S. 1999 Ninth OTRC Honors Lecture: Geotechnical Contributions to Offshore Development. *Offshore Technology Conference*, Paper 10822.
- [5] Jostad H. P. & Andersen K. H. 2006 Potential benefits of Using Skirted Foundations for Jackup Platforms. *Offshore Technology Conference*.
- [6] Houlsby G. T., Ibsen L. B. & Byrne B. B. 2005 Suction caissons for wind turbines. In: Gourvenec, Cassidy (Eds.), *Frontiers in Offshore Geotechnics*, Taylors and Francis group, London.
- [7] Tani K. & Craig W. H. 1995 Bearing capacity of circular foundations on soft clay of strength increasing with depth. *Soils & Foundations*, 35(4).
- [8] Hung L. C. & Kim S. R. 2012 Evaluation of vertical and horizontal bearing capacities of bucket foundations in clay. *Ocean Engineering*, 52, 75-82.
- [9] Bransby M. F. & Randolph M. F. 1999 The effect of embedment depth on the undrained response of skirted foundations to combined loading. *Soils and Foundations*, 39(4), 19-33.
- [10] Andersen K. H. & Jostad H. P. 1999 Foundation design of skirted foundations and anchors in clay. *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, 3-6.
- [11] Al-Aghbari M. Y. & Mohamedzein Y. E. A. 2004 Bearing capacity of strip foundations with structural skirts. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 22(1), 43-57.
- [12] Al-Aghbari M. Y. & Mohamedzein Y. E. A. 2006 Improving the performance of circular foundations using structural skirts. *Ground Improvement*, 10(3), 125-132.
- [13] Eid H. T., Alansari O. A., Odeh A. M., Nasr M. N. & Sadek H. A. 2009 A comparative study on the behavior of square foundations resting on confined sand. *Can. Geotech. J.*, 46(4), 438-453.
- [14] Eid H. T. 2013 Bearing capacity and settlement of skirted shallow foundations on sand. *International Journal of Geomechanics*, 13(5), 645-652.
- [15] El-Sawwaf M. E. I. & Nazer A. 2005 Behavior of circular footings on confined granular soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 131(3), 359-366.
- [16] Nazir A. K. & Azzam W. R. 2010 Improving the bearing capacity of footing on soft clay with sand pile with/without skirts. *Alexandria Engineering Journal*, 49, 371-377.
- [17] Zhang P., Guo Y., Liu Y. & Ding H. 2016 Experimental study on installation of hybrid bucket

- [40] Hansen J. B. 1970 A revised and extended formula for bearing capacity. Bulletin No. 28, Danish Geotech. Ins., Copenhagen, 5–11.
- [41] Lundgren H. & Moetensen K. 1953 Determination by theory of plasticity on the Bearing capacity of continuous footing on sand. Proc., 3th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 1, 409-412.
- [42] Spangler M. G. & Handy R. L. 1982 Soil Engineering, 4th Ed., Harper, New York.
- [43] Terzaghi K. 1943 Theoretical Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York.
- [44] Poulos H. G. & Davis E. H. 1974 Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics. John Wiley & Sons, New York.
- [45] Fox E. N. 1948 The mean elastic settlement of a uniformly loaded area at a depth below the ground surface. 2nd ICSMFE, 1, 129-132.
- [46] Nishida Y. 1966 Vertical stress and vertical deformation of ground under a deep circular uniform pressure in the semi-infinite. 1st ISRM Congress, Lisbon, Portugal.
- [47] Nowachi F., Kiu J. F. E. & Isa O. M. 1996 Use of skirted foundations for offshore structures. Offshore South East Asia Conference, Singapore.
- from plastic solution. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(3), 275-281.
- [33] Vesić A. S. 1973 Analysis of ultimate loads of shallow foundations. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 991, 45–73.
- [34] Shirashi S. 1990 Variation in bearing capacity factors of dense sand assessed by model loading tests. Soils and Foundations, 30(1), 17-26.
- [35] Zhu F., Clark J. I. & Phillips R. 2001 Scale effect of strip and circular footings resting on dense sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1277, 613–621.
- [36] Cerato A. B. & Lutengger A. J. 2007 Scale effects of shallow foundation bearing capacity on granular material. J. of Geotech. Geoenviron. Eng., 133(10), 1192–1202.
- [37] DeBeer E. E. 1965 Bearing capacity and settlement of shallow foundations on sand. Proc. of the Symposium on Bearing Capacity and Settlement of Foundations, Durham, 15-33.
- [38] Loukidis D. & Salgado R. 2011 Effect of relative density and stress level on the bearing capacity of footings on sand. Geotechnique, 61(2), 107–119.
- [39] Meyerhof G. G. 1963 Some recent research on the bearing capacity of foundations. Canadian Geotechnical Journal, 1(1), 16–26.

# Improvement of Performance of square skirted foundations Using Vertical Plates

S. Gholipour<sup>\*1</sup>, M. Makarchian<sup>2</sup>

1- PhD Student, Civil Engineering Faculty, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Assist. Prof., Civil Engineering Faculty, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

\*makarchian@yahoo.com

## Abstract:

As the new type of improvement methods of shallow foundations in the geotechnical engineering are improving, it seems necessary to study the performance of vertical plates beneath the periphery of shallow foundations known as skirted foundations. Skirted foundations are steel or concrete foundations, which have a top raft and a relatively thin plate constructed beneath the periphery. The skirts penetrate the soil beneath foundation which encompass and confine the soil very firmly. The skirts and confined soil behave as a unit to transmit loads to the soil at the level of skirt tip. The benefit of skirted foundations compared with deep foundations such as piers and piles lies in their ease and short time of installations. The skirted foundations can be used as an appropriate alternative for shallow foundations, pier and deep foundations in applications such as oil and gas storage tanks, wind turbines, oil drilling platforms, harbor, and offshore and jacket structures. The behavior of square shallow foundations resting on confined sand by vertical plates as skirt, was studied using small scale physical modeling in the laboratory. The effects of parameters including ratio of skirt length to foundation width, foundation size, the shear strength of sand, and roughness of skirt and foundation surfaces on skirted foundations behavior in terms of increasing bearing capacity, the settlement reduction, and improvement of subgrade reaction modulus were assessed under compression loading, and results were compared with the performance of shallow and pier foundations. Modeling test analyses revealed the overall improvement of square skirted foundations performance compared to shallow and pier foundations. Results of this study showed that the values of bearing capacity and settlement of skirted foundations are almost close to those of pier foundations of the same width and depth. Also, it was observed that the existence of skirt, increases the bearing capacity and modulus of subgrade reaction, together with decrease of settlement of shallow foundation. The enhancement of the bearing capacity, as well as the reduction in the settlement of shallow foundations increases with increasing skirt depth and decreasing the shear strength of sand. So that, bearing capacity ratio (BCR) of skirted foundations to surface foundations was observed to be in the range of about 2.4 to 5.1 times for the different values of L/B. Furthermore, the value of skirted foundation settlement decreased up to 91% of that a surface foundation in the case of having skirt depth/foundation width of 2.0. The modulus of subgrade reaction improved in the range of about 1.5 to 4.23 times due to skirt existence. From the accomplished laboratory tests, it was found out that skirted foundations resting on loose sand, are more beneficial than in the case of resting on medium and dense sand. In cases where structures are very sensitive to settlement values, the skirted foundations can be used to gain a much lower settlement, at the same allowable bearing capacity. In this paper, based on the analysis of the obtained results, charts and equations are presented to estimate bearing capacity and settlement and subgrade reaction modulus of skirted shallow foundations in terms of those of surface foundation and sand relative density, skirt depth to foundation width ratio and its roughness.

**Keywords:** Skirted foundation, inferior skirt, bearing capacity, settlement, physical modeling