

# مطالعه‌ی آزمایشگاهی ظرفیت باربری و نشست پی‌های دایره‌ی لبه‌دار واقع بر روی ماسه

سجاد قلی‌پور (دانشجوی دکتری)

مسعود مکارچیان\* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

مهندسی عمران شریف، (تابش ۱۳۹۷)  
دوره‌ی ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۱/۳، ص. ۸۳-۷۳

پی‌های لبه‌دار قابلیت استفاده به‌عنوان یک نوع پی جدید برای جایگزینی پی‌های سطحی، شامل: پی‌های مخازن نفت و گاز، توربین‌های بادی، سکوها‌ی حفاری نفتی و نیز پی‌های نیمه‌عمیق و عمیق را دارند. رفتار پی‌های لبه‌دار جهت مطالعه‌ی عملکردشان از نظر ظرفیت باربری و نشست در مقایسه با پی‌های سطحی متداول، توسط مدل‌سازی فیزیکی پی‌های دایره‌ی لبه‌دار بر روی ماسه در آزمایشگاه بررسی شد. پارامترهایی شامل: طول لبه، اندازه‌ی فونداسیون، چگالی نسبی ماسه و زبری سطح فونداسیون و لبه در پژوهش حاضر مطالعه شدند. نتایج آزمایش‌ها بهبود کلی در عملکرد پی‌های لبه‌دار را نسبت به پی‌های سطحی نشان داد. نسبت ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار به پی‌های سطحی، افزایش حدود ۲/۳ تا ۵ برابر را نشان داد و همچنین مقدار نشست پی لبه‌دار تا حدود ۸٪ نشست پی سطحی کاهش داشت. نمودارهایی جهت تخمین مقادیر افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی‌های لبه‌دار در نوشتار حاضر ارائه شده است.

واژگان کلیدی: پی‌های لبه‌دار، ظرفیت باربری، نشست، چگالی نسبی، مدل‌سازی فیزیکی.

sgholipour63@gmail.com  
makarchian@yahoo.com

## ۱. مقدمه

که نفوذ اولیه تحت اثر وزن پی در بستر خاک انجام می‌شود و پس از آنکه پی در تراز موردنظر مستقر شد، توسط نیروی مکشی که به آن اعمال می‌شود، سیستم پی لبه‌دار تا عمق پیش‌بینی شده در خاک نفوذ می‌کند. روش ایجاد نیروی مکش به این صورت است که با خارج کردن آب درون استوانه از بالای آن توسط پمپ، باعث ایجاد فشار مکشی که ناشی از اختلاف فشار به‌وجود آمده بین فشار هیدرواستاتیک بیرون و فشار کاهش‌یافته‌ی درون استوانه است، می‌شود. برای اجرای پی‌های لبه‌دار در ساحل به‌عنوان پی‌مخازن و توربین‌ها، علاوه بر روش ذکرشده از روش متداول در اجرای پی‌های نیمه‌عمیق همچون حفاری و نصب پی (روش درجا) نیز استفاده می‌شود.<sup>[۱]</sup>

با توجه به عملکرد کلی پی‌های مذکور، تغییرات قابل‌توجهی ناشی از محصور کردن خاک زیر پی‌های سطحی مورد انتظار است و بنابراین می‌توان پی‌های لبه‌دار را جایگزین مناسبی برای پی‌های متداول مورد استفاده در پروژه‌ها در نظر گرفت. مطالعات مدل‌سازی فیزیکی و تحلیل عددی مختلفی توسط پژوهشگران، جهت بررسی عملکرد پی‌های لبه‌دار انجام شده است که به برخی از موارد مهم اشاره شده است. رفتار پی‌های دایره‌ی لبه‌دار و نواری با اضافه شدن لبه‌های سازه‌ی پی به محیط زیر پی، توسط مدل‌سازی فیزیکی بررسی شد و نتایج مطالعات، افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست را برای هر دو شکل پی نشان داد. استفاده از لبه‌ها، ظرفیت باربری

پی‌های لبه‌دار سطحی در سال‌های اخیر به‌طور گسترده‌ی جهت استفاده به‌عنوان فونداسیون برای انواع سازه‌های ساحلی و فراساحلی جایگزین پی‌های سطحی، نیمه‌عمیق و عمیق شده‌اند. از جمله کاربردهای متداول پی‌های لبه‌دار سطحی، بهره‌برداری به‌عنوان پی توربین‌های بادی، پی مخازن صنایع نفت و گاز و پی سازه‌های سکوها‌ی دریایی هستند. از دلایل عمده‌ی قابلیت گسترش پی‌های لبه‌دار سطحی به‌عنوان جایگزین برای سایر انواع پی‌های متداول، سهولت و زمان کوتاه نصب آن‌ها، عدم نیاز به خاک‌برداری و مسائل اقتصادی را می‌توان برشمرد. پی‌های لبه‌دار<sup>۱</sup> مطابق شکل ۱، متشکل از یک فونداسیون سطحی در بالا و صفحه‌های نازک محیطی فرورفته در خاک زیر فونداسیون هستند؛ به‌طوری که لبه‌های سازه‌ی آن با اعمال فشار، خاک را به‌شدت محصور می‌کنند و مانع جابه‌جایی بیشتر خاک به اطراف می‌شوند. در نتیجه‌ی عمل محصورسازی، خاک درون لبه‌ها به‌همراه فونداسیون به‌صورت سیستمی واحد عمل می‌کند و بارهای سازه‌ی فوقانی را در اعماق بزرگ‌تر در تراز لبه‌ها به خاک انتقال می‌دهد. برای نصب پی‌های لبه‌دار، اغلب از روش اعمال بارگذاری و روش اعمال مکش به‌طور هم‌زمان استفاده می‌شود، به این صورت

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۵/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۵/۸/۱، پذیرش ۱۳۹۵/۸/۲۲

DOI:10.24200/J30.2018.1402

منحنی بار- نشست پی‌های سطحی واقع بر روی ماسه می‌شود. مقادیر تغییرات به پارامترهای متعددی بستگی دارد. رفتار و عملکرد تقریباً مشابهی بر حسب انواع مختلف پارامترها در مقالات توسط پژوهشگران دیگری گزارش شده است، به طوری که بهبود قابل توجه عملکرد آن را تأیید می‌کنند.<sup>[۱۹-۲۲]</sup>

با توجه به بررسی‌های انجام‌گرفته و نتایج حاصل‌شده، برای سازه‌های واقع بر خاک‌های دانه‌ی همانند پروژه‌های نزدیک سواحل، استفاده از پی‌های لبه‌دار می‌تواند انتخاب مفید و اقتصادی باشد. با این حال مطالعات بر رفتار و عملکرد این نوع پی‌ها واقع بر خاک‌های ذکرشده، به خصوص در کشور ایران در مقایسه با سایر کشورهای جهان نسبتاً محدود است. بنابراین نیاز به بررسی بیشتر و جامع‌تری در مورد سیستم پی‌های لبه‌دار احساس می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، پی‌های دایره‌ی لبه‌دار واقع بر روی ماسه، توسط آزمایش‌های آزمایشگاهی کوچک مقیاس تحت نیروهای فشاری قرار گرفته و پارامترهای مختلفی بررسی شده‌اند. قابل ذکر است که مطالعه‌ی حاضر نسبت به مطالعات مشابه پیشین، که بر روی پی‌های دایره‌ی لبه‌دار واقع بر ماسه انجام شده‌اند، در این موارد متمایز است:

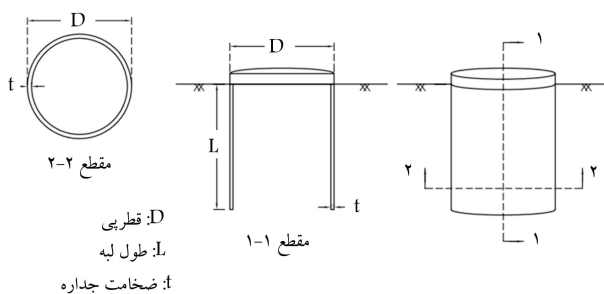
- مقایسه‌ی ظرفیت باربری، نشست و مدول عکس‌العمل بستر پی‌های لبه‌دار با پی‌های سطحی و نیمه‌عمیق؛
- نوع روش مدل‌سازی مدل پی لبه‌دار به صورت درجا و کوبشی؛
- استفاده از پی‌های دایره‌ی لبه‌دار با قطرهای مختلف؛
- در نظر گرفتن چگالی نسبی ماسه، علاوه بر زاویه‌ی اصطکاک داخلی جهت توسعه‌ی نمودارهای تخمین باربری و نشست؛
- ایجاد میزان زبری‌های مختلف بر سطوح داخل و خارج لبه و پی توسط کاغذ سمباده و بررسی تأثیر آن در نتایج.

## ۲. برنامه‌ی آزمایش‌ها

### ۱.۲. دستگاه و مدل‌های آزمایشگاهی

مطالعه‌ی ظرفیت باربری و نشست مدل‌های پی واقع بر ماسه، توسط دستگاه آزمایشگاهی شامل جعبه‌ی آزمایش، سیستم ریزش ماسه، ابزارآلات اندازه‌گیری، مدل‌های فونداسیون، سیستم بارگذاری و جمع‌آوری داده‌ها انجام شد. جعبه‌ی آزمایش با ابعاد داخلی  $(60 \times 60 \times 60 \text{ cm})$  و از جنس پلاستیک شفاف پلی‌کسی‌گل‌س<sup>۳</sup> است که توسط تسمه‌های فلزی در اطراف جعبه مقاوم‌سازی شده است. صلبیت و استحکام جعبه‌ی آزمایش به اندازه‌ی پی‌ها است که در هنگام نمونه‌سازی و انجام آزمایش باعث تغییر شکل نشود و خللی در نتایج ایجاد نکند. برای تهیه و آماده‌سازی بستر یکنواخت و همگن ماسه در یک چگالی مشخص، از روش ریزش ماسه<sup>۴</sup> که متشکل از سیستم الک (توری)، مخزن و قیف است، استفاده شد.<sup>[۲۳]</sup>

سیستم بارگذاری مورد استفاده در آزمایش‌ها از یک جک هیدرولیکی که بر روی تیر افقی قاب دستگاه ثابت شده است، تشکیل و بارگذاری توسط جک از طریق میله‌ی با قطر  $(3 \text{ cm})$  انجام شده است. همچنین به علت عدم تأثیر قابل توجه نرخ سرعت بارگذاری در نتایج مدل‌سازی ناشی از نوع مصالح مورد استفاده و شرایط آزمایش، سرعت بارگذاری ثابت و به میزان  $(1 \text{ mm/min})$  در نظر گرفته شده است. برای اندازه‌گیری نیروهای اعمالی به فونداسیون و میزان نشست پی، به ترتیب یک عدد نیروسنج<sup>۵</sup> با ظرفیت  $(2 \text{ ton})$  و دو عدد جابه‌جایی‌سنج  $(LVDT)$  با دقت



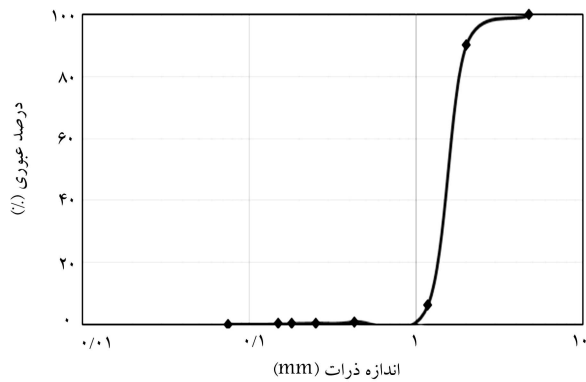
شکل ۱. نمای شماتیک از جزئیات پی دایره‌ی لبه‌دار.

پی نواری را تا  $3/12$  برابر و پی دایره‌ی لبه‌دار را  $1/5$  تا  $8$  برابر افزایش داد. همچنین کاهش نشست پی نسبت به حالت پی بدون لبه برای پی‌های نواری و دایره‌ی لبه‌دار به ترتیب حدود  $30\%$  و  $90\%$  گزارش شد.<sup>[۲۴]</sup> در مطالعه‌ی آزمایشگاهی مشابه دیگری، مقدار بهبود ظرفیت باربری برای پی دایره‌ی لبه‌دار ناشی از لبه، حدود  $6/25$  برابر پی سطحی به دست آمد.<sup>[۴]</sup>

نتایج بررسی رفتار پی‌های مربعی واقع بر ماسه‌ی محصورشده توسط لبه‌های سازه‌ی، بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست را با افزایش نسبت طول لبه به عرض پی و کاهش چگالی نسبی ماسه نشان داد. مقایسه‌ی نتایج نشان داد که مقادیر نشست و ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار با پی‌های نیمه عمیق، اختلاف ناچیزی دارند. در یک نسبت طول لبه به عرض پی برابر با  $2$ ، کاهش نشست حدود  $70\%$  مشاهده شد.<sup>[۶]</sup> در مطالعه‌ی مشابهی، تأثیر محصورسازی خاک در رفتار مدل‌های پی واقع بر خاک دانه‌ی با بهبود قابل توجه (تا  $17$  برابر) عملکرد پی سطحی تأیید شد.<sup>[۷]</sup> تأثیر ژئوسل<sup>۲</sup> در عملکرد پی‌های نواری واقع بر ماسه با مطالعه‌ی مدل‌های آزمایشگاهی بررسی شد که افزایش در نسبت ظرفیت باربری نهایی تا حدود  $8$  برابر به دست آمد.<sup>[۸]</sup> بهبود در رفتار پی‌های واقع بر ماسه‌ی مسلح با ژئوسل، در برخی پژوهش‌های دیگر نیز بررسی و تأیید شده است.<sup>[۹، ۱۰]</sup> برخی مطالعات آزمایشگاهی در مورد روش نصب پی‌های لبه‌دار و عملکرد آن‌ها در خاک‌های چسبنده و نرم همچون رس انجام شد، و نتایج بررسی‌ها، بهبود قابل توجهی در مقدار ظرفیت باربری نهایی و اصلاح منحنی بار- نشست را برای پی‌های لبه‌دار ارائه داد.<sup>[۱۱-۱۳]</sup>

همچنین بررسی مکانیزم گسیختگی و ظرفیت باربری پی لبه‌دار واقع بر ماسه‌ی روی بستر رس نرم  $(20/16)$ ، توسط تحلیل المان محدود انجام گرفت و پوش گسیختگی به همراه نمودارهای ظرفیت باربری افقی، قائم و ترکیبی ارائه شد.<sup>[۱۴]</sup> مکانیزم گسیختگی و انتقال بار پی‌های لبه‌دار بررسی و نتایج با پی‌های مدفون در عمق یکسان با تراز لبه مقایسه شدند. با توجه به مکانیزم انتقال بار پی‌های لبه‌دار، که مشابه پی‌های نیمه عمیق و عمیق است، ظرفیت باربری پی‌های مذکور به صورت مجموع باربری نوک و اصطکاک جداره‌ی لبه محاسبه می‌شود. براساس نتایج به دست آمده ملاحظه شد که مکانیزم گسیختگی و انتقال بار پی‌های لبه‌دار با افزایش طول لبه، تفاوتی با مکانیزم پی‌های مدفون ندارد.<sup>[۱۵]</sup> همچنین مشاهده شد که تغییر مکانیزم از حالت گسیختگی سطحی به نوع گسیختگی عمیق (مشابه پی‌های عمیق و نیمه عمیق) ناشی از افزایش طول لبه در پی‌های لبه‌دار است که باعث افزایش ظرفیت باربری قائم و بهبود عملکرد پی‌های مذکور می‌شود.<sup>[۱۶]</sup> رفتار لرزه‌ی پی‌های لبه‌دار، نیز با مطالعه‌ی تأثیر لبه‌های سازه‌ی در کنترل جابه‌جایی افقی خاک و همچنین پایداری کلی سیستم پی در برابر گسیختگی لرزه‌ی، توسط برخی پژوهشگران بررسی شد.<sup>[۱۷، ۱۸]</sup>

به طور کلی نتایج تحلیل‌های عددی و مدل‌سازی آزمایشگاهی نشان داد که لبه‌دار کردن پی‌های سطحی، مشجر به افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست و اصلاح



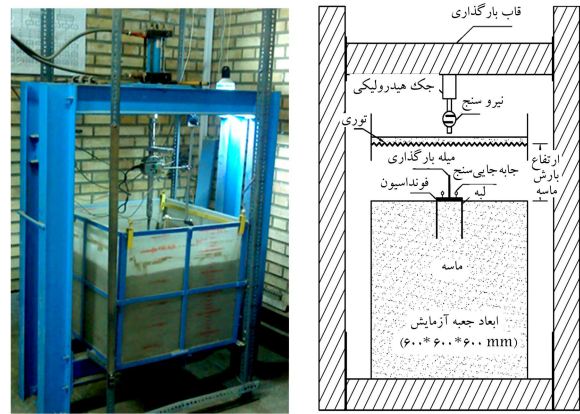
شکل ۴. نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی مورد استفاده در آزمایش.

یکنواخت بد دانه‌بندی شده با نام SP، طبقه‌بندی شده است. [۲۷] نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی موردنظر در شکل ۴ مشاهده می‌شود. 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 است. وزن مخصوص خشک بیشینه و کمینه ماسه به ترتیب ۱۷٫۴ و ۱۴٫۶  $(kN/m^3)$  به دست آمد. آزمایش‌ها براساس ۳ نوع چگالی نسبی ۵۰٪، ۶۴٪ و ۷۵٪ طراحی شدند که برای رسیدن به چگالی موردنظر از روش ریزش ماسه استفاده شد. سیستم ریزش ماسه، روشی است که با استفاده از الک با آرایش سوراخ مشخص و با کنترل میزان نرخ بارش و همچنین ثابت نگه‌داشتن ارتفاع ریزش، می‌توان بستری یکنواخت و همگن از ماسه با چگالی مشخص را شبیه‌سازی کرد. [۲۳-۲۹]

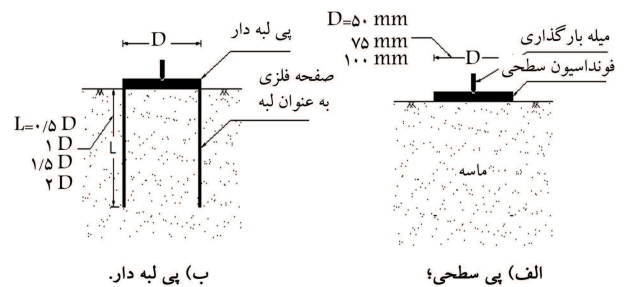
مقاومت برشی ماسه توسط دستگاه برش مستقیم و تحت تنش‌های نرمال بین  $(kN/m^2)$  ۱۰ - ۱۱۰ برای چگالی‌های موردنظر تعیین شد. با انجام آزمایش برش مستقیم و نتایج پوش گسیختگی، متوسط زاویه‌های اصطکاک داخلی ماسه برای ۳ چگالی نسبی ۵، ۶۴ و ۷۵، به ترتیب ۳۹، ۴۲ و ۴۳ درجه به دست آمد. زاویه‌ی اصطکاک سطح تماس بین ماسه و فولاد (سطح تماس صاف) و همچنین کاغذ سمباده (سطح تماس زبر) با دو میزان زبری متفاوت، با همان تنش‌های نرمال و در چگالی نسبی ۶۴ توسط آزمایش برش مستقیم مشخص شد. براین اساس، زاویه‌ی اصطکاک بین ماسه و فولاد، ۲۹ درجه و زاویه‌ی اصطکاک بین ماسه و کاغذ سمباده برای نوع نرم و زبر، به ترتیب برابر با ۳۴ و ۳۷ درجه به دست آمد. زاویه‌های به دست آمده برای سطوح زبر ایجاد شده،  $\delta$  (زاویه‌ی اصطکاک داخلی بین ماسه و سطوح زبر است که بر حسب درصدی از بیشینه‌ی زاویه‌ی اصطکاک داخلی ماسه ( $\phi$ ) است)، تقریباً متناظر با زاویه‌ی اصطکاک بین خاک و بتن  $\{\phi = (0.8 - 0.9)\phi\}$  است؛ [۳۰-۳۱] که می‌تواند برای فونداسیون‌های بتنی که در عملیات اجرایی بر روی خاک ساخته می‌شوند، شبیه‌سازی شود.

### ۳.۲. روش آماده‌سازی نمونه و انجام آزمایش

قبل از شروع آزمایش جهت دوری از تأثیر شرایط جداره در نتایج به دست آمده، سطوح داخلی جعبه‌ی آزمایش با روغن مخصوص روغن‌کاری شد. سپس با استفاده از روش ریزش ماسه از ارتفاع و نرخ ثابت از طریق قیف مخصوص در لایه‌های ۵ سانتی‌متری بر روی تمام سطح جعبه انجام شد. برای تغییر وزن مخصوص ماسه و رسیدن به چگالی نسبی موردنظر، مطابق با روش ریزش ماسه برای هر یک از چگالی‌های نسبی، ارتفاع و شدت بارش متناظر با آن که از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در چگالی هستند، تغییر یافت و در آن ارتفاع و نرخ ثابت ریزش متناظر با چگالی نسبی، بارش ماسه انجام شد. قابل ذکر است که با افزایش ارتفاع ریزش



شکل ۲. نمای شماتیک و واقعی از دستگاه آزمایش به همراه جزئیات آن.



شکل ۳. مدل‌های پی دایره‌ی استفاده شده در آزمایش‌ها.

اندازه‌گیری  $(mm)$  ۱۰ درجه‌ی بکار گرفته شد. جابه‌جایی سنج‌ها در دو سمت مدل پی بر روی آن قرار گرفتند که متوسط دو مقدار به دست آمده، به عنوان نشست پی در نظر گرفته شد. نمایی از دستگاه آزمایش به همراه جزئیات آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود. مدل پی و لیه‌های استفاده شده در برنامه‌ی آزمایش‌ها از جنس فولاد است. ابعاد مدل‌های پی براساس ابعاد جعبه‌ی آزمایش و در نظر گرفتن آثار شرایط مرزی انتخاب شد. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته و استناد به منابع معتبر، کمینه‌ی فاصله‌ی پی تا جداره و نیز از زیر لبه‌ی پی تا کف جعبه باید به ترتیب  $2.5D$  و  $3D$  لحاظ شود. [۲۶-۲۸] با در نظر گرفتن فواصل موردنظر، بیشینه‌ی قطر برای مدل فونداسیون دایره‌ی  $(cm)$  ۱۰ انتخاب شد. غالب آزمایش‌ها بر روی مدل اصلی به قطر  $(cm)$  ۱۰ انجام شدند، ولی برای در نظر گرفتن تأثیر پارامتر اندازه‌ی فونداسیون در نتایج و مقایسه‌ی آن، برخی آزمایش‌ها نیز روی دو نوع مدل دیگر با قطرهای  $7.5$  و  $5$   $(cm)$  و با ضخامت  $(cm)$  ۱٫۳ انجام گرفت. برای شبیه‌سازی لبه‌ها، از لوله‌های توخالی به ضخامت جداره‌ی  $(mm)$  ۳ و در طول‌های مختلف که قطرهای یکسان با مدل پی سطحی دارند، استفاده شد. جهت بررسی پارامتر طول لبه در مطالعه، ۵ نسبت طول به قطر  $(L/D)$  برابر با ۰٫۵، ۱٫۰، ۱٫۵ و ۲٫۰ طراحی شدند. شکل ۳، نوع و محدوده‌ی پارامترهای موردنظر برای آزمایش‌های مدل پی لبه‌دار و سطحی را با جزئیات نشان می‌دهد. همچنین برای بررسی پارامتر زبری سطح تماس لبه، دو نوع کاغذ سمباده با زبری‌های متفاوت به سطوح داخلی و خارجی لبه و نیز کف فونداسیون چسبانده شد، تا سطح زبر ایجاد شود.

### ۲.۲. مصالح و مشخصات آن

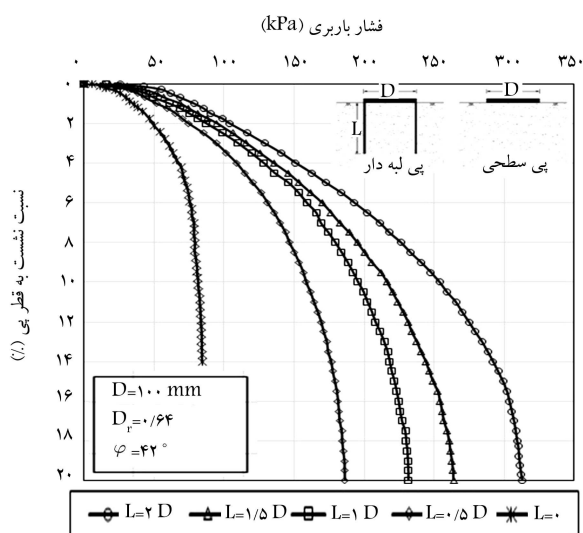
در پژوهش حاضر، خاک مورد استفاده برای زیر پی از نوع ماسه‌ی سیلیسی فیروزکوه با اندازه‌ی دانه‌بندی متوسط بوده است که براساس سیستم طبقه‌بندی متحد، ماسه‌ی

و کاهش نرخ ریزش، مقدار وزن مخصوص و چگالی نسبی ماسه افزایش می‌یابد. برای اطمینان از همگن بودن و یکنواختی بستر ماسه در تمام نقاط جعبه و همچنین حصول چگالی نسبی موردنظر، از ظرف‌هایی با حجم مشخص در نقاط مختلف استفاده شد. ریزش ماسه تا تراز قرارگیری لبه‌ی پی یا فونداسیون سطحی با شرایط یکسان ادامه یافت و سطح بستر ماسه تراز شد. همچنین تراز قرارگیری لبه و فونداسیون سطحی با توجه به شرایط مرزی انتخاب شد، به این صورت که برای کمیته‌سازی تأثیر کف جعبه در نتایج و دوری از آثار شرایط مرزی، کمیته‌ی فاصله‌ی کف جعبه تا نوک لبه یا کف فونداسیون سطحی باید برابر با  $3D$  باشد.<sup>[۲۴-۲۶]</sup> پس از رسیدن تراز ماسه به ارتفاع موردنیاز، لبه به صورت قائم در مرکز جعبه بر روی ماسه قرار گرفت و ریزش ماسه‌ی درون لبه و اطراف آن تا تراز بالای لبه ادامه یافت. با اتمام بارش ماسه و تراز کردن سطح بستر، فونداسیون سطحی بر روی لبه قرار گرفت و توسط ۴ عدد پیچ به آن ثابت شد. با تکمیل مراحل نمونه‌سازی و جای‌گیری فونداسیون لبه‌دار در تراز موردنظر، سیستم اندازه‌گیری بر روی جک و فونداسیون نصب و با انجام تنظیمات مربوط به جمع‌آوری داده‌ها توسط نرم‌افزار، بارگذاری انجام شد. جهت اعمال نیرو در مرکز پی و نداشتن خروج از مرکزیت بار، بر روی مدل پی سطحی، زبانه‌ی کوچکی ایجاد شد تا با قرارگیری نوک میله در آن، میله فاقد جابه‌جایی عرضی باشد. در مرحله‌ی آماده‌سازی بستر ماسه و مدل پی، سعی و دقت کامل بر آن بود که دست‌خوردگی به کمترین میزان خود برسد و در نتایج تأثیری نداشته باشد.

همان‌طور که مشخص است، با کوبش یا استفاده از فشار برای وارد کردن لبه در بستر ماسه، تا حدودی دست‌خوردگی ایجاد و باعث تغییر در چگالی نسبی و افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی می‌شود. یکی از روش‌های نمونه‌سازی علاوه بر روش مورد استفاده در پژوهش حاضر، روش کوبش یا فشار است که در مطالعات مشابه پیشین استفاده شده است. در پژوهش حاضر جهت بررسی تأثیر راندن لبه در بستر ماسه در تغییرات چگالی نسبی ماسه، تعداد محدودی آزمایش بر روی نمونه‌های مدل انجام گرفت؛ به این صورت که پس از آماده‌سازی بستر ماسه، لبه‌ی پی با نرخ حرکتی ثابت توسط جک هیدرولیکی به داخل ماسه رانده شد و در موقعیت موردنظر قرار گرفت. با مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از دو روش مشاهده شد که روش دوم (نصب 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 ذکر شده، روش استفاده شده در پژوهش حاضر باعث می‌شود که نتایج به دست آمده در مقایسه با نتایج مطالعات مشابه با روش کوبش یا فشار، دست‌پایین و محافظه‌کارانه باشد.

#### ۴. نتایج آزمایش‌ها

آزمایش‌های مدل پی لبه‌دار انجام‌گرفته در مطالعه‌ی حاضر نشان داد که حضور لبه در زیر محیط پی دایره‌ی، رفتار پی‌های سطحی واقع بر ماسه را از نظر ظرفیت باربری، نشست و مدول عکس‌العمل بستر خاک بهبود می‌بخشد. مقدار بهبود با افزایش طول لبه، کاهش چگالی نسبی و افزایش میزان زبری سطح افزایش می‌یابد. نمونه‌ی از نمودار تنش - نشست به دست آمده از آزمایش مدل‌های پی در شکل ۵ مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه نمودارها، نقطه‌ی بیشینه‌ی کاملاً مشخصی را به عنوان بار متناظر گسیختگی نشان نمی‌دهند، لذا در مطالعه‌ی حاضر براساس روش‌های موجود در منابع معتبر، جهت تعیین ظرفیت باربری نهایی، از جمله: روش تقاطع مماس‌ها و شیب نزدیک به صفر، با توجه به اختلاف کم نتایج دو روش، ظرفیت باربری نهایی و نشست متناظر آن برای هر یک از آزمایش‌ها به این صورت به دست آمد که نقطه‌ی



شکل ۵. نمونه‌ی از نمودار تنش - نشست اندازه‌گیری شده براساس آزمایش‌های مدل پی ( $D = 10 \text{ cm}$  و  $D_f = 0.64$ )

#### ۳. بررسی اثر مقیاس

مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس کوچک، عموماً برای بررسی رفتار پی‌ها به دلیل اینکه انجام آزمایش‌ها در مقیاس بزرگ و واقعی به لحاظ تجهیزات بارگذاری و هزینه‌ی زیاد، سختی‌هایی به همراه دارد، استفاده می‌شود. در نتیجه‌ی استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی به دلیل برخی عوامل معروف به اثر مقیاس، مدل آزمایشگاهی نمی‌تواند دقیقاً همان رفتار مدل اصلی را منعکس کند. اثر مقیاس به خصوص در خاک‌های دانه‌ی بیشتر اهمیت دارد. پژوهشگران مختلفی در مورد علل به وجود آمدن اثر مقیاس در مدل‌های آزمایشگاهی بحث و بررسی کرده‌اند.<sup>[۲۶-۲۴]</sup> برخی از پژوهشگران منشأ ایجاد چنین آثاری را به وجود اختلاف در تراز تنش زیر پی مدل و پروتوتایپ<sup>۸</sup>

جدول ۱. مقادیر ظرفیت باربری نهایی اندازه‌گیری شده ( $q_{ult}$ )، برای پی‌های لبه‌دار.

$D_p = 0.64, D = 7.5 \text{ cm}$		$D_p = 0.64, D = 10 \text{ cm}$		$D_p, D = 7.5 \text{ cm}$			$D_p, D = 10 \text{ cm}$			$q_{ult}$ ( $kN/m^2$ )
سطح زیر		سطح زیر								$D_p$ $L/D$
II	I	II	I	0.75	0.64	0.5	0.75	0.64	0.5	
67	64	80	77	67	56	42	93	72	55	0.5
191	172	222	202	175	150	134	214	174	160	0.5
245	226	268	246	206	185	159	262	218	195	1
286	259	307	280	244	217	177	300	246	223	1.5
310	285	360	335	277	248	207	361	301	265	2

I: سطح نسبتاً زیر ایجاد شده با کاغذ سمباده با زاویه اصطکاک  $\delta = 34^\circ$  بین ماسه و سمباده.

II: سطح زیر ایجاد شده با کاغذ سمباده با زاویه اصطکاک  $\delta = 37^\circ$  بین ماسه و سمباده.

جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ظرفیت باربری پی سطحی با مقادیر متناظر روابط نظری پژوهشگران مختلف ( $D_p = 0.64, D = 10$  و  $7.5 \text{ cm}$ )

Martin (2005)	Spangler and Handy (1982)	Lundgren and Mortensen (1953)	Vesic (1973)	Hansen (1970)	Meyerhof (1963)	Experimental	
123.4	130.6	137.9	155.5	113.9	139.3	-	$N_\gamma$
61.2	64.3	67.9	76.5	56.1	68.5	71.9	$q_{ult} (kPa)$ $D = 10 \text{ cm}$
45.9	48.3	50.8	57.5	41.7	51.5	56.1	$q_{ult} (kPa)$ $D = 7.5 \text{ cm}$

برای تخمین مقدار بهبود در ظرفیت باربری، نمودارهای بی بعد توسعه و ارائه شد. همچنین نسبت‌های نشست میان مدل‌های پی لبه‌دار ( $s_{sk}$ ) و مدل‌های پی سطحی ( $s_{su}$ ) در یک تراز تنش اعمالی برابر با نصف ظرفیت باربری پی سطحی ( $0.5 q_{su}$ )، برحسب نسبت نشست ( $s_{sk}/s_{su}$ ) در نظر گرفته شد. انتخاب این مقدار تنش برای محاسبات نسبت نشست، تأثیر کمی در دقت نتایج دارد و حساسیت محاسبات را به کمترین میزان می‌رساند. مقادیر نشست در چنین تراز تنش، مطابقت خوبی با نشست متناظر تنش‌های مجازی دارند، که معمولاً در عملیات طراحی و اجرایی در محدوده‌ی نصف تا یک سوم ظرفیت باربری نهایی در نظر گرفته می‌شوند. نمودارهایی براساس نسبت نشست برای مقادیر مختلف نسبت طول لبه، جهت تخمین میزان کاهش نشست در نتیجه‌ی استفاده از لبه‌ی زیر پی سطحی ارائه شده است. با در نظر گرفتن مقادیر کاهش نشست ملاحظه می‌شود که کارایی و سودمندی پی‌های لبه‌دار زمانی پراهمیت می‌شود که ظرفیت باربری نهایی پی‌ها به علت وجود نشست‌های زیاد محدود می‌شود. به عبارتی دیگر، فرضیه‌ی نشست بر ظرفیت باربری حاکم می‌شود، نه گسیختگی برشی. بنابراین در سازه‌هایی که به نشست خیلی حساس هستند، استفاده از پی‌های لبه‌دار می‌تواند همان مقدار ظرفیت باربری مجاز را در مقدار نشست خیلی کم نتیجه دهد. به همین منظور براساس نتایج حاصل، نمودارهای بدون بعد برای تخمین مقادیر کاهش نشست ارائه شده است.

## ۲.۵. تأثیر طول لبه

جهت بررسی اثر طول لبه در پاسخ پی لبه‌دار، آزمایش‌ها در ۵ طول مختلف با نسبت‌های طول به قطر ( $L/D$ )، 0.5، 1.0، 1.5 و 2.0 انجام شدند. تغییرات نسبت ظرفیت باربری ( $q_{sk}/q_{su}$ ) در برابر مقادیر  $L/D$ ، برای ۳ چگالی نسبی

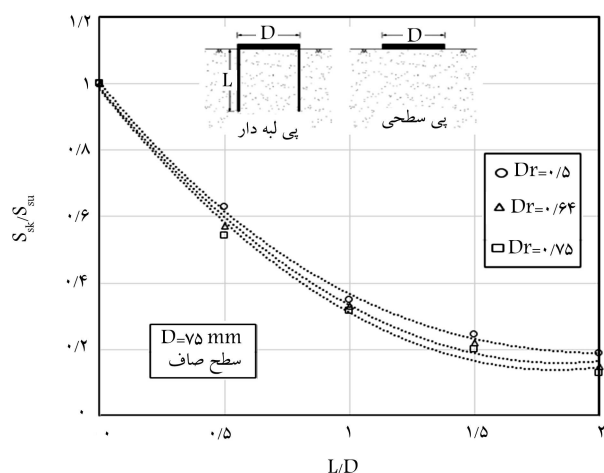
پس از آنکه شیب منحنی صفر می‌شد یا با یک شیب تقریباً ثابتی ادامه می‌یافت، به عنوان تنش گسیختگی در نظر گرفته شد. تنش گسیختگی برای پی‌های سطحی در نشست حدود ۵-۸ درصد قطر پی و برای پی‌های لبه‌دار در محدوده‌ی نشست ۱۱-۱۶ درصد، بسته به چگالی نسبی ماسه و طول لبه مشاهده شد. خلاصه‌ی نتایج ظرفیت‌های باربری نهایی اندازه‌گیری شده برای مدل‌های پی در جدول ۱ ارائه شده است.

جهت بررسی دقت نتایج آزمایشگاهی به دست آمده و همچنین صحت روش انجام آزمایش، از برخی روابط نظری ارائه شده، [۲۷-۲۹] ظرفیت باربری نهایی برای پی‌های سطحی محاسبه و با نتایج اندازه‌گیری شده مقایسه شدند. [۲۶-۲۷] خلاصه‌ی نتایج در جدول ۲ مشاهده می‌شود. با مقایسه‌ی نتایج ملاحظه می‌شود که توافق خوبی میان مقادیر نظری و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد، بنابراین تطابق ذکر شده را می‌توان به نتایج به دست آمده توسط پی‌های لبه‌دار تعمیم داد و صحت و دقت روش آزمایش‌ها و نتایج به دست آمده را تأیید کرد.

## ۵. تحلیل و بحث در مورد نتایج

### ۱.۵. ظرفیت باربری و نشست

تأثیر پارامترهای مختلفی همچون طول لبه، اندازه‌ی پی، مقاومت برشی ماسه و زیری سطح پی در رفتار پی‌های لبه‌دار با استفاده از آزمایش‌های مدل فیزیکی بررسی شدند. با مقایسه‌ی ظرفیت باربری مدل‌های پی لبه‌دار ( $q_{sk}$ ) و ظرفیت باربری پی‌های سطحی ( $q_{su}$ )، افزایش در مقدار ظرفیت باربری پی‌های سطحی به علت حضور لبه براساس نسبت ظرفیت باربری ( $q_{sk}/q_{su}$ ) ارائه شد.



شکل ۷. تغییرات نسبت نشست پی لبه‌دار برحسب مقادیر  $L/D$  و اثر وجود لبه در مقادیر نشست پی‌های سطحی.

برای یک پی با نسبت  $L/D$  برابر با  $2/1$ ، نشست پی لبه‌دار می‌تواند تا حدود  $8\%$  مقدار نشست متناظر پی سطحی کاهش یابد.

### ۳.۵. تأثیر چگالی نسبی ماسه

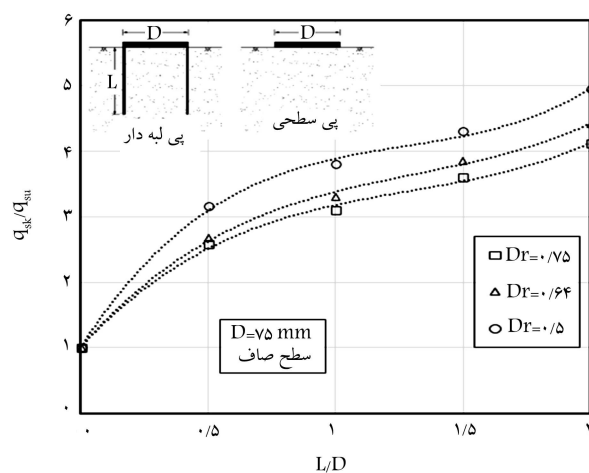
آزمایش مدل‌های پی لبه‌دار واقع بر ماسه در  $3$  نوع چگالی نسبی  $0.5$ ،  $0.64$  و  $0.75$  جهت بررسی اثر چگالی در رفتار این نوع از پی‌ها انجام و تغییرات نسبت ظرفیت باربری براساس چگالی نسبی در شکل ۶ نشان داده شده است. از نمودارها مشاهده می‌شود که کارآمدی و تأثیر حضور لبه‌ی زیر پی در ماسه با چگالی نسبی کم، قابل ملاحظه‌تر و بیشتر است. به عبارت دیگر، بهبود در نسبت ظرفیت باربری با کاهش چگالی نسبی افزایش می‌یابد. تحلیل نتایج نشان داد که مقدار بهبود ظرفیت باربری در چگالی نسبی  $0.5$  نسبت به حالت چگالی نسبی  $0.75$ ، به‌طور متوسط حدود  $25\%$  افزایش دارد.

### ۴.۵. تأثیر زبری سطوح پی

با توجه به اینکه مدل‌های پی، جنس فولاد با سطح تقریباً صاف دارند و برای اینکه میزان تأثیر زبری سطوح پی و لبه در عملکرد این نوع از پی‌ها بررسی و با حالت بتن، که معمولاً در عملیات اجرایی استفاده می‌شود، مقایسه شود؛ دو مقدار زبری متفاوت دیگر شامل سطح نسبتاً زبر ( $\delta = 34^\circ$ ) و زبر ( $\delta = 37^\circ$ )، علاوه بر فولاد ( $\delta = 29^\circ$ ) نیز در آزمایش‌ها استفاده شد. شکل ۸، تغییرات ظرفیت باربری را براساس  $3$  نوع سطح صاف، نسبتاً زبر و زبر نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که بهبود ظرفیت باربری برای حالت زبر نسبت به حالت صاف و زبری کمتر، مقدار بیشتری را به‌دست می‌دهد. بنابراین با افزایش میزان زبری سطح تماس پی با ماسه، ظرفیت باربری افزایش و بهبود می‌یابد.

### ۵.۵. تأثیر لبه در مدول عکس‌العمل بستر ماسه

با توجه به بهبود ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی ناشی از حضور لبه، تأثیر وجود لبه‌ی زیر پی در مدول عکس‌العمل بستر ماسه ( $K_s$ ) نیز بررسی شد. بر پایه‌ی نتایج تنش - نشست و وجود رابطه میان مدول عکس‌العمل بستر با ظرفیت باربری و نشست، مدول عکس‌العمل بستر مدل‌های پی لبه‌دار ( $k_{sk}$ ) و پی سطحی

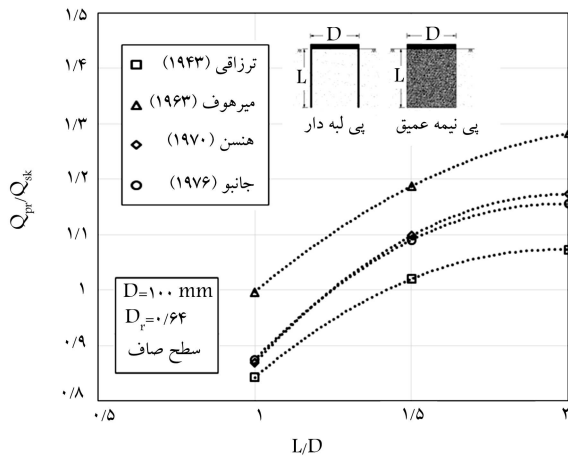


شکل ۶. تغییرات نسبت ظرفیت باربری نهایی پی‌های لبه‌دار برحسب نسبت  $L/D$  و اثر چگالی نسبی ماسه در ظرفیت باربری.

مختلف در شکل ۶ مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌شود که وجود لبه‌ی زیر پی سطحی، ظرفیت باربری پی را افزایش می‌دهد و این افزایش، تناسب مستقیمی با نسبت  $L/D$  دارد که افزایش در محصورسازی ماسه با زیاد شدن طول لبه را منعکس می‌کند. تحلیل نتایج نشان داد که حضور لبه، ظرفیت باربری پی سطحی را برای نسبت  $L/D = 0.5$ ، دست‌کم  $2/31$  برابر و برای نسبت  $L/D = 2/1$ ، دست‌کم حدود  $4/11$  برابر به‌دست می‌دهد. رفتار مشابهی برای پی‌های لبه‌دار با سایر قطرها نیز مشاهده شد. روند منحنی‌ها در شکل ۶ نشان می‌دهد که در نسبت‌های  $L/D$  بزرگ‌تر، منحنی‌ها با انحنا به سمت بالا هستند که نشان‌دهنده‌ی افزایش بیشتر نتایج در مقادیر بزرگ‌تر  $L/D$  است که در تفسیر علت آن می‌توان گفت که محصورسازی ماسه توسط لبه باعث می‌شود که پی و ماسه‌ی احاطه‌شده درون لبه، به‌عنوان سیستم واحدی عمل کند و با افزایش ظرفیت باربری، همانند پی‌های عمیق و نیمه‌عمیق رفتار کند.

با مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده در مطالعه‌ی حاضر با نتایج گزارش شده در مطالعات مشابه پیشین، تفاوت‌هایی در مقادیر بهبود ظرفیت باربری ناشی از حضور لبه‌ی زیر پی سطحی ملاحظه می‌شود. مثلاً با انجام آزمایش‌های مدل پی به قطر  $7.5\text{ cm}$  و لبه از جنس UPVC، واقع بر ماسه با چگالی نسبی  $0.76$ ، مقدار بهبود در نسبت ظرفیت باربری به ازاء  $L/D = 2/1$  حدود  $10$  گزارش شده است.<sup>[۷]</sup> که به‌طور قابل توجهی بیشتر از مقادیر به‌دست آمده در مطالعه‌ی حاضر است. در مطالعه و بررسی مشابه در پژوهش دیگری، برای یک پی مربعی به عرض  $10\text{ cm}$  و نسبت  $L/D = 1/1$ ، بیشینه‌ی میزان بهبود در ظرفیت باربری برای چگالی نسبی  $0.57$ ، حدود  $2/7$  گزارش شده است.<sup>[۵]</sup> همچنین برای پی دایره‌یی به قطر  $12\text{ cm}$  واقع بر ماسه با چگالی نسبی  $0.64$ ، صرف‌نظر از مقدار زبری سطح مدل، نسبت بهبود ظرفیت باربری در محدوده‌ی  $1/5$  تا  $8/1$  به‌دست آمد.<sup>[۴]</sup> به‌طور کلی با وجود تفاوت‌های موجود در شرایط انجام آزمایش و مصالح، وجود اختلاف در نتایج به‌دست آمده توسط پژوهشگران مختلف نیاز به تحقق و بررسی بیشتر دارد.

مقادیر نسبت‌های نشست برای پی‌های لبه‌دار واقع بر ماسه در چگالی‌های مختلف به ازاء نسبت‌های مختلف  $L/D$ ، به‌صورت نمودار در شکل ۷ ارائه شده است که مطابق آن وجود لبه‌ی اطراف پی سطحی، به‌طور قابل توجهی نشست آن را کاهش می‌دهد؛ میزان کاهش نشست متناسب با نسبت طول لبه به قطر پی است و با زیاد شدن نسبت متناظر، مقدار کاهش نشست نیز افزایش می‌یابد. به‌طور نمونه،



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نسبت ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار و نیمه‌عمیق براساس روابط نظری.

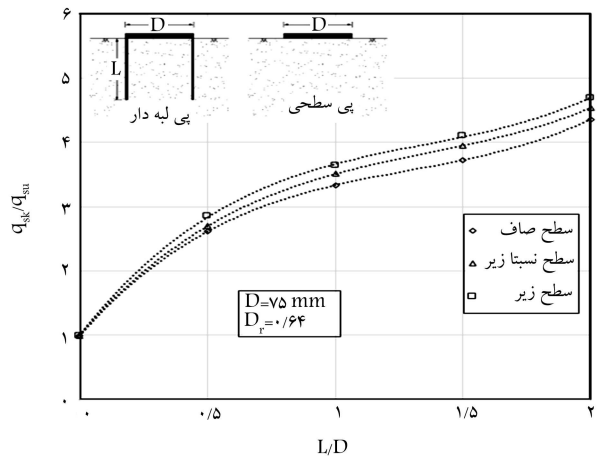
ظرفیت باربری پی‌های نیمه‌عمیق ( $Q_{pr}$ ) و پی‌های لبه‌دار ( $Q_{sk}$ ) براساس نسبت ظرفیت باربری ( $Q_{pr}/Q_{sk}$ )، در برابر نسبت طول لبه و برای چگالی نسبی ۰/۶۴ و سطح صاف، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به طور متوسط، مقدار باربری پی‌های نیمه‌عمیق بین ۱۰ تا ۱۵ درصد بیشتر از پی‌های لبه‌دار است؛ بیشترین اختلاف برای رابطه‌ی میرهوف<sup>[۴۱]</sup> و کمترین اختلاف برای رابطه‌ی تزاقی، به دست آمد.<sup>[۴۸]</sup> همچنین ملاحظه می‌شود که در نسبت کمتر طول لبه به عمق ( $L/D$ )، پی لبه‌دار نسبت به پی نیمه‌عمیق عملکرد بهتری دارد. نتیجه‌ی به دست آمده با نتایج ارائه‌شده برای بهبود ظرفیت باربری پی‌های سطحی مطابقت دارد، به طوری که با مقایسه‌ی نتایج ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار و پی‌های سطحی، شیب نمودار در نسبت‌های کمتر طول لبه نسبت به مقادیر  $L/D$  زیاد، بیشتر مشاهده شد. با توجه به نتایج حاصل‌شده برای پی‌های لبه‌دار در مقایسه با پی‌های نیمه‌عمیق و عملکرد نزدیک دو نوع پی در میزان باربری و اینکه در پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های نیمه‌عمیق، میزان مصالح صرفه‌جویی شده به مراتب بیشتر است، استفاده از پی لبه‌دار می‌تواند مقرون به صرفه باشد.

#### ۷.۵. مقایسه‌ی نشست پی‌های لبه‌دار با پی‌های سطحی مدفون

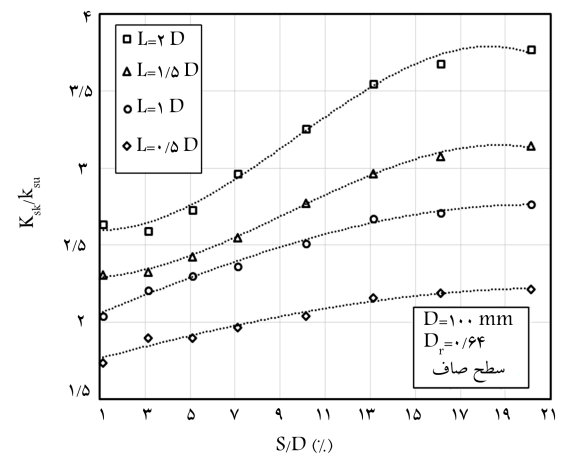
براساس نتایج مدل فیزیکی به دست آمده و مقایسه‌ی نشست پی‌های لبه‌دار و سطحی، رابطه‌ی جهت پیش‌بینی مقدار نشست پی لبه‌دار بر حسب میزان نشست پی سطحی، مطابق رابطه‌ی ۱ ارائه شد. مقدار نشست پی لبه‌دار به ازاء نسبت  $L/D$  پی، قابل محاسبه است:

$$S_{sk} = 1.061 \times e^{-1.06(L/D)} \times S_{su} \quad (1)$$

همچنین مقدار نشست پیش‌بینی شده برای پی لبه‌دار از نتایج مدل فیزیکی، با مقادیر نشست پی سطحی مدفون واقع در عمق‌های متناظر با نسبت ( $L/D$ )، توسط ضرایب اصلاحی که توسط برخی پژوهشگران،<sup>[۵۲-۵۰]</sup> پیشنهاد شده‌اند، مطابق شکل ۱۱ مقایسه شدند. از مقایسه‌ی نتایج ملاحظه می‌شود که پی‌های لبه‌دار در مقایسه با پی‌های سطحی مدفون در اعماق متناظر با تراز نوک لبه، مقادیر نشست پی سطحی را بیشتر کاهش می‌دهند. اختلاف نتایج برای نسبت‌های کمتر ( $L/D$ )، نسبت به اعماق زیاد، کمتر به دست آمد. نتایج به دست آمده، عملکرد بهتر و مزیت



شکل ۸. نسبت ظرفیت باربری نهایی مدل پی لبه‌دار بر حسب میزان زبری سطوح پی.



شکل ۹. نسبت مدول عکس‌العمل بستر مدل‌های پی لبه‌دار بر حسب نسبت نشست.

( $k_{su}$ ) به دست آمد و بهبود در مقدار مدول عکس‌العمل بستر پی‌های سطحی براساس نسبت مدول عکس‌العمل بستر  $k_{sk}/k_{su}$  ارائه شد. نمودار نسبت مدول عکس‌العمل بر حسب نسبت نشست در شکل ۹ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که به علت وجود لبه، مدول عکس‌العمل بستر مدل پی سطحی کمیته‌ی ۱/۷۴ و بیشینه‌ی ۳/۷۷ برابر بهبود یافت. برای مدل پی با یک نسبت طول لبه به قطر ( $L/D$ ) ۰/۵، مدول عکس‌العمل بستر تا ۲/۲۱ برابر افزایش داشت. برای همه مدل‌های پی سطحی و لبه‌دار، با افزایش نسبت نشست مدول بستر کاهش می‌یابد، ولی نسبت مدول ( $k_{sk}/k_{su}$ ) افزایش پیدا می‌کند؛ می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که اولاً با افزایش نشست، نرخ افزایش باربری در پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های سطحی زیاد است و ثانیاً به علت وجود لبه، میزان نشست پی لبه‌دار نسبت به پی سطحی کاهش قابل توجهی دارد. بنابراین با افزایش نسبت نشست، مدول بستر پی لبه‌دار نسبت به پی سطحی افزایش می‌یابد.

#### ۶.۵. مقایسه‌ی عملکرد پی‌های لبه‌دار با پی‌های نیمه‌عمیق

جهت مقایسه‌ی عملکرد پی‌های لبه‌دار و نیمه‌عمیق، مقدار ظرفیت باربری پی‌های نیمه‌عمیق توسط روابط موجود در برخی منابع،<sup>[۴۹،۴۸،۴۲،۴۱]</sup> محاسبه و با مقادیر نظیر پی‌های لبه‌دار که توسط مدل‌سازی به دست آمده‌اند، مقایسه شدند. تغییرات

قشر پی و کاهش چگالی نسبی ماسه افزایش می‌یابد. استفاده از لبه در مطالعه‌ی حاضر، ظرفیت باربری پی سطحی را در محدوده‌ی بین ۲/۳ تا ۵، بسته به طول لبه و چگالی ماسه بهبود بخشید.

۲. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که لبه‌دار کردن پی‌های سطحی، رفتار بار - نشست را به‌طور قابل‌توجهی اصلاح می‌کند و همراه با افزایش مقدار ظرفیت باربری، نشست پی‌ها را نیز کاهش می‌دهد. مقدار کاهش اندازه‌گیری‌شده در مطالعه‌ی حاضر، صرف‌نظر از مقدار طول لبه و چگالی نسبی، حدود ۹۲٪ به‌دست آمد.

۳. بر مبنای نتایج به‌دست آمده، استفاده از لبه‌ی زیر پی می‌تواند به‌عنوان روش بهسازی، جهت بهبود عملکرد پی سطحی از نظر ظرفیت باربری و نشست در نظر گرفته شود.

۴. در سازه‌هایی که عملکرد آن‌ها نسبت به مقدار نشست خیلی حساس است و عامل نشست به جای گسیختگی برشی، کنترل‌کننده‌ی ظرفیت باربری است؛ محصورسازی خاک توسط لبه، همان مقدار ظرفیت باربری مجاز را در مقدار نشست خیلی کمتری به‌دست می‌دهد.

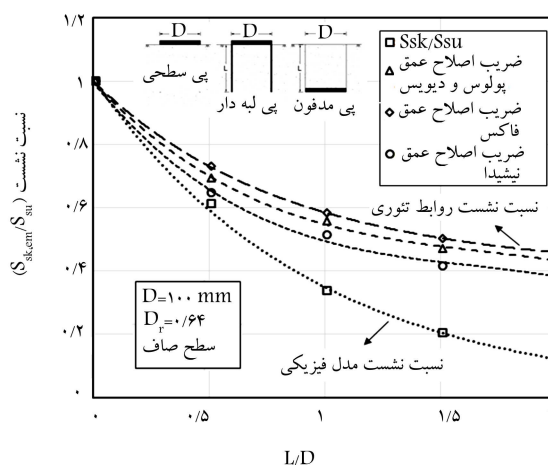
۵. به‌کارگیری لبه‌ی زیر پی سطحی در خاک‌های ماسه‌بی‌سست و با تراکم متوسط، کارایی و سودمندی بیشتری نسبت به حالت متراکم ارائه می‌دهد.

۶. میزان بهبود عملکرد پی‌های لبه‌دار با افزایش میزان زبری سطح پی و لبه افزایش می‌یابد.

۷. تحلیل نتایج اندازه‌گیری‌شده و در نظر گرفتن نوع مکانیزم گسیختگی و انتقال بار برای پی‌های لبه‌دار، نشان می‌دهد که پی لبه‌دار به‌همراه خاک درون لبه می‌تواند به‌صورت سیستم واحد عمل کند و بارهای سازه را به اعماق پایین‌تر انتقال دهد و باعث بهبود قابل‌توجهی در عملکرد پی‌های سطحی شود.

۸. براساس مقادیر نسبت ظرفیت باربری و نسبت کاهش نشست، نمودارهایی جهت تخمین میزان افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست، با توجه به مقادیر  $L/D$  و چگالی نسبی مختلف، توسعه و ارائه شده است.

۹. همانند بهبود ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی ناشی از لبه‌ی زیر پی سطحی، مدل عکس‌العمل بستر مدل‌های پی سطحی نیز به میزان کمیته‌ی ۱/۷۴ و بیشینه‌ی ۳/۷۷ برابر بهبود یافته است.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی نسبت نشست پی‌های لبه‌دار و پی‌های سطحی مدفون براساس روابط نظری.

پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های سطحی مدفون را در میزان کاهش نشست به وضوح نشان می‌دهد.

## ۶. نتیجه‌گیری

هدف اصلی از مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر، بررسی رفتار پی‌های دایره‌یی لبه‌دار و مقایسه‌ی آن با پی‌های سطحی از نظر افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست و همچنین بهبود مدل عکس‌العمل بستر، به‌دلیل حضور لبه‌ی سازه‌یی در زیر پی سطحی بود. به همین منظور ۶۶ آزمایش بر روی مدل‌های پی واقع بر ماسه، تحت بارگذاری قائم و نیروی فشاری انجام شد، تا تأثیر پارامترهایی، همچون: اندازه‌ی پی، طول لبه، چگالی نسبی ماسه و زبری سطح پی بررسی شود. برای شرایط در نظر گرفته‌شده در مطالعه‌ی حاضر، این نتایج را می‌توان ارائه داد:

۱. محصورسازی جانبی ماسه توسط لبه‌ی زیر فونداسیون سطحی، ظرفیت باربری پی را افزایش می‌دهد. این تراز افزایش باربری با زیاد شدن نسبت طول لبه به

## پانویس‌ها

1. skirted foundations
2. geocell
3. Plexiglass
4. sand raining
5. load cell
6. linear variable differential transformer (LVDT)
7. USCS
8. prototype

## منابع (References)

1. Andersen, K.H. and Jostad, H.P. "Foundation design of skirted foundations and anchors in clay", *Offshore Tech. Conf.*, Houston, Texas, pp. 3-6 (1999).
2. Al-Aghbari, M.Y. and Mohamedzein, Y.E.A. "Bearing capacity of strip foundations with structural skirts", *J. Geotech. Geol. Eng.*, **22**(1), pp. 43-57 (2004).
3. Al-Aghbari, M.Y. and Mohamedzein, Y.E.A. "Improv-



- ing the performance of circular foundations using structural skirts”, *Ground Improvement*, **10**(3), pp. 125-132 (2006).
4. EL-Wakil, A.Z. “Bearing capacity of skirt circular footing on sand”, *Alexandria Eng. J.*, **52**(3), pp. 359-364 (2013).
  5. Eid, H.T., Alansari, O.A., Odeh, A.M., Nasr, M.N. and Sadek, H.A. “A comparative study on the behavior of square foundations resting on confined sand”, *Can. Geotech. J.*, **46**(4), pp. 438-453 (2009).
  6. Eid, H. “Bearing capacity and settlement of skirted shallow foundations on sand”, *Int. J. Geomech.*, **13**(5), pp. 645-652 (2013).
  7. El- Sawwaf, M.E.I. and Nazer, A. “Behavior of circular footings on confined granular soil”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, **131**(3), pp. 359-366 (2005).
  8. Dash, S.K., Krishnaswamy, N. and Rajagopal, K. “Bearing capacity of strip footing supported on geocell-reinforced sand”, *Geotext. Geomemb.*, **19**(4), pp. 235-256 (2001).
  9. Dash, S.K., Sireesh, S. and Sitharam, T.G. “Behavior of geocell reinforced sand beds under circular footing”, *Ground Improvement*, **7**(3), pp. 111-115 (2003).
  10. Sireesh, S., Sitharam, T.G. and Dash, S.K. “Bearing capacity of circular footing on geocell sand mattress overlying clay bed with void”, *Geotext. Geomemb.*, **27**(2), pp. 89-98 (2009).
  11. Nazir, A.K. and Azzam, W.R. “Improving the bearing capacity of footing on soft clay with sand pile with/without skirts”, *Alexandria Eng. J.*, **49**(4), pp. 371-377 (2010).
  12. Salencon, J. “Bearing capacity of strip footings with horizontal confinement”, *Comptes Rendus J.*, **331**(5), pp. 319-324 (2003).
  13. Zhang, P., Guo, Y., Liu, Y. and Ding, H. “Experimental study on installation of hybrid bucket foundations for offshore wind turbines in silty clay”, *Ocean Eng.*, **114**(1), pp. 87-100 (2016).
  14. Lu, P. and Maclaren, D. “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*, , pp. 58-69 (2016).
  15. Mana, D.S.K., Gourvenec, S. and Randolph, M.F. “A numerical study of the vertical bearing capacity of skirted foundations”, *Frontiers in Offshore Geotechnics II- Taylor & Francis Group*, pp. 433-438, London (2011).
  16. Hung, L.C. and Kim, S.R. “Evaluation of vertical and horizontal bearing capacities of bucket foundations in clay”, *Ocean Engineering*, **52**, pp. 75-82 (2012).
  17. Azzam, W.R. “Finite element analysis of skirted foundation adjacent to sand slope under earthquake loading”, *HBRC Journal*, **11**(2), pp. 231-239 (2015).
  18. Wang, X., Zeng, X., Yu, H. and Wang, H. “Centrifuge modeling of offshore wind turbine with bucket foundation under earthquake loading”, *Int. Foundation Congress and Equipment Expo, San Antonio, Texas* (2015).
  19. Villalobos, F.A.J. “Model testing of foundations for offshore Wind turbines”, PhD Thesis, University of Oxford (2006).
  20. Villalobos, F.A.J. “Bearing capacity of skirted foundations in sand”, *VI Congreso Chileno de Geotecnia, SOCHIGE, Valparaiso* (2007).
  21. Byrne, B.W., Villalobos, F., Houlby, G.T. and Martin, C.M. “Laboratory testing of shallow skirted foundations in sand”, *Thomas Telford Conference, London* (2001).
  22. El-saied, A.E., Saleh, N.M. and El-mashad, M.E. “Behavior of circular footing resting on laterally confined granular reinforced soil”, *HBRC Journal*, **11**(2), pp. 240-245 (2015).
  23. Rad, N.S. and Tumay, M.T. “Factors affecting sand specimen preparation by raining”, *Geotech. T. J.*, **10**(1), pp. 31-37 (1987).
  24. Cerato, A.B. and Lutenecker, A.J. “Bearing capacity of square and circular footings on a finite layer of granular soil underlain by a rigid base”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **132**(11), pp. 1496-1501 (2006).
  25. Pfeifle, T.W. and Das, B.M. “Model tests for bearing capacity in sand”, *J. Geotech. Eng.*, **105**(9), pp. 1112-1116 (1979).
  26. Chen, Q. “An Experimental Study on Characteristics and Behavior of Reinforced Soil Foundation”, PhD Thesis, Louisiana State University (2007).
  27. *ASTM 2006, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*, ASTM Standard D2487, West Conshohocken, PA (2006).
  28. LoPresti, D.C.F., Pedroni, S. and Crippa, V. “Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D 4253-83: A comparative study”, *Geotechnical Testing Journal*, **15**(2), pp. 180-189 (1992).
  29. Vaid, Y.P. and Negussey, D. “Relative density of pluviated sand samples”, *Soils and Foundations*, **24**(2), pp. 101-105 (1984).
  30. Acar, Y.B., Durgunoglu, H.T. and Tumay, M.T. “Interface properties of sand”, *J. Geotech. Eng.*, **108**(4), pp. 648-654 (1982).
  31. Kulhawy, F.H., *Drilled Shaft Foundations: Foundation Engineering Handbook, 2<sup>nd</sup> ed.*, Edited by: H.-Y., Fang, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 537-552 (1991).
  32. Kusakabe, O., Maeda, Y. and Ohuchi, M. “Large-scale loading tests of shallow footing in pneumatic caisson”, *J. Geotech. Eng.*, **118**(11), pp. 1681-1695 (1992).
  33. Herle, I. and Tejchman, J. “Effect of grain size and pressure level on bearing capacity of footings on sand”, *IS-Nagoya'97: Deformation and Progressive Failure in Geomechanics*, Edited by: A. Asaoka; T. Adachi, and F. Oka, eds., Pergamon, Oxford, pp. 781-786 (1997).
  34. Tatsuoka, F., Okahara, M., Tanaka, T., Tani, K., Morimoto, T. and Siddiquee, M.S.A. “Progressive failure and particle size effect in bearing capacity of a footing on sand”, *Geotech. Spec. Pub.*, **27**(2), pp. 788-802 (1991).
  35. Yamaguchi, H., Kimura, T. and Fujii, N. “On the scale effect of footings in dense sand”, *Proc., 9th Int. Conf. on Soil Mech. Found. Eng.*, Tokyo, Japan, 1, pp. 795-798 (1977).

36. Ueno, K., Miura, K., Kusakabe, O. and Nishimura, M. "Reappraisal of size effect of bearing capacity from plastic solution", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **127**(3), pp. 275-281 (2001).
37. Vesić, A.S. "Analysis of ultimate loads of shallow foundations", *J. Soil Mech. Found. Div.*, **99**(1), pp. 45-73 (1973).
38. Shirashi, S. "Variation in bearing capacity factors of dense sand assessed by model loading tests", *Soils and Foundations*, **30**(1), pp. 17-26 (1990).
39. Zhu, F., Clark, J.I. and Phillips, R. "Scale effect of strip and circular footings resting on dense sand", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **127**(7), pp. 613-621 (2001).
40. Cerato, A.B. and Lutengger, A.J. "Scale effects of shallow foundation bearing capacity on granular material", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **133**(10), pp. 1192-1202 (2007).
41. Meyerhof, G.G. "Some recent research on the bearing capacity of foundations", *Can. Geotech. J.*, **1**(1), pp. 16-26 (1963).
42. Hansen, J.B. "A revised and extended formula for bearing capacity", Bulletin No. 28, Danish Geotech. Ins., Copenhagen, pp. 5-11 (1970).
43. Lundgren, H. and Moetensen, K. "Determination by theory of plasticity on the Bearing capacity of continuous footing on sand", *Proc., 3th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, 1, pp. 409-412 (1953).
44. Spangler, M.G. and Handy, R.L., *Soil Engineering*, 4<sup>th</sup> Edition, Harper and Row, New York, 819 p. (1982).
45. Martin, C.M. "Exact bearing capacity calculations using the method of characteristics", *Proc, 11th Int. Conf. IACMAG*, Turin (2005).
46. Das, B.M., *Principles of Foundation Engineering*, 3<sup>th</sup> Edition, PWS pub. Com., 828 p. (1995).
47. Bowles, J.E., *Foundation Analysis and Design*, Macgraw-Hill, 5<sup>th</sup> Edition, (1996).
48. Terzaghi, K., *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, 510 p. (1943).
49. Janbu, N. "Static bearing capacity of friction piles", *Proc. 6th European Conference on SMFE*, **1**(2), pp. 479-488 (1976).
50. Poulos, H.G. and Davis E.H., *Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics*, John Wiley & Sons, NewYork, 411 p. (1974).
51. Fox, E.N. "The mean elastic settlement of a uniformly loaded area at a depth below the ground surface", 2<sup>nd</sup> ICSMFE, 1, pp. 129-132 (1948b).
52. Nishida, Y. "Vertical stress and vertical deformation of ground under a deep circular uniform pressure in the semi-infinite", 1st ISRM Congress, Lisbon, Portugal (1966).