

## مطالعه آزمایشگاهی رفتار پی نواری لبه‌دار شده با ریزشمع بر روی ماسه به روش مدل‌سازی فیزیکی

بهراد بختیاری<sup>۱</sup>، آرش رزم خواه<sup>۲\*</sup>، حسن قاسم‌زاده<sup>۳</sup>، فرج‌الله عسکری<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
- ۲- استادیار گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
- ۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران، خیابان میرداماد.
- ۴- استاد پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

ایمیل: a\_razmkhah@azad.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۳/۰۶/۱۱]

تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۰۵/۱۰]

### چکیده

امروزه افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست در پی‌ها به ویژه در پی ساختمان‌های موجود، به یکی از موضوعات مهم در رشته مهندسی ژئوتکنیک تبدیل شده است. بطور کلی در مواجهه با خاک‌های سست با قابلیت باربری کم با نشست زیاد یکی از راه‌های پیش روی مهندسان استفاده از المان‌های باربر در خاک می‌باشد. در این میان ریزشمع علاوه بر آنکه به عنوان یک المان باربر و مقاوم در برابر نشست عمل می‌کند، به دلیل تزریق دوغاب سیمان، سبب بهبود مشخصات مقاومتی خاک اطراف نیز می‌شود. در بسیاری از پروژه‌ها، از ریزشمع‌ها به عنوان عناصر سازه‌ای استفاده می‌شود. ریزشمع‌ها در واقع شمع‌های جانبی کوچکی (معمولاً با قطر کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر) هستند که بیشتر با تقویت فولادی و تزریق دوغاب سیمان همراه می‌باشند. در این مطالعه با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی، به بررسی تاثیر استفاده از ریزشمع به منظور لبه‌دار کردن پی مستقر بر بستر ماسه‌ای پرداخته شد. برای این منظور در ابتدا اثر شرایط مرزی محفظه ماسه، بر نتایج مورد بررسی قرار گرفت. بررسی اثر فاصله پی از سطح تحتانی محفظه فولادی نسبت به عرض پی نشان داد که وقتی فاصله پی از سطح تحتانی محفظه کمتر از دو برابر عرض پی باشد، مرز پایین بر نتایج مدل‌سازی فیزیکی تأثیر می‌گذارد. ارزیابی مرزهای جانبی با در نظر گرفتن فاصله پی از دیواره محفظه نسبت به عرض پی نشان داد که اگر فاصله پی از جدار محفظه بیش از پنج برابر عرض پی باشد، مرز جانبی بر نتایج تأثیری نخواهد داشت. سپس تأثیر پیکربندی‌های مختلف ریزشمع در اطراف پی، از جمله طول ریزشمع و فاصله بین دو ریزشمع متوالی بر ظرفیت باربری و نشست مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نتایج نشان داد که با افزایش طول ریزشمع و کاهش فاصله بین دو ریزشمع متوالی، ظرفیت باربری بهبود یافته است. استفاده از ریزشمع به عنوان لبه پی، ظرفیت باربری پی‌های سطحی را بین ۱.۳ تا ۲.۹۵ برابر بهبود بخشید. مقایسه منحنی‌های فشار- نشست نشان داد که، نسبت ظرفیت باربری بهینه در کمترین فاصله بین ریزشمع‌های متوالی بدست آمد. علاوه بر این، ریزشمع به عنوان لبه پی، نشست پی نواری را بین ۳۶ تا ۸۲ درصد کاهش داد. همچنین پی نواری لبه‌دار شده با ریزشمع، منجر به افزایش طول سطح گسیختگی شده و بسته به طول و فاصله ریزشمع‌ها، سازوکار گسیختگی را تغییر داد.

**واژگان کلیدی:** ظرفیت باربری، ریزشمع، مدل‌سازی فیزیکی، سازوکار گسیختگی، محصورکننده.

## ۱. مقدمه

ریزشمع‌ها، شمع‌هایی با قطر کوچک هستند (معمولاً با قطر کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر) که حفاری و دوغاب شده و با فولاد تقویت می‌شوند. آرماتورهای فولادی در یک ریزشمع اغلب درصد بیشتری (تا نصف) از حجم شفت را نسبت به سایر شمع‌های درجاریز اشغال می‌کنند. با توجه به این مزایا، ریزشمع‌ها بیشتر برای افزایش ظرفیت باربری یا کاهش نشست در مهندسی پی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین استفاده از ریزشمع‌ها برای اهداف دیگری مانند کنترل نشست سازه‌های موجود و تثبیت شیب‌ها استفاده شده‌اند [1]. سیستم پی مستقر روی ریزشمع، از ریزشمع‌ها و یک پی گسترده تشکیل شده است که به موجب آن پی گسترده در بالای گروه ریزشمع موجود، قرار می‌گیرد. بنابراین، مفهوم طراحی پی مستقر بر گروه ریزشمع مانند پی‌های سطحی مستقر بر گروه شمع می‌باشد [2، 3]، که در آن بار اصلی توسط ریزشمع‌ها و خاک زیر پی تحمل می‌شود. برخی از پژوهشگران به عملکرد پی‌های سطحی لبه‌دار شده با ریزشمع پرداخته و رفتار آنها را گزارش کرده‌اند. هان و ای در یک مطالعه میدانی، [4] به بررسی سازوکار انتقال بار ریزشمع‌های عمودی در خاک رس پرداخته‌اند. افزایش ظرفیت باربری پی‌های دایره‌ای سطحی بهسازی شده با ریزشمع با در نظر گرفتن پارامترهای آرایش و زاویه ریزشمع‌ها توسط تسوکادا و همکاران بررسی شده است [5]. همچنین سینگ و همکاران [6] به تأثیر محصور شدن خاک بر رفتار یک پی مربعی مستقر بر ماسه گانگا تحت بارگذاری مایل با خروج از مرکزیت پرداخته‌اند. در این تحقیق به بررسی پارامترهای ارتفاع، عرض و فاصله کف پی تا نوک محصورکننده ریزشمع، مقدار خروج از مرکزیت و زاویه مایل بودن بار پرداخته شده است. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری نهایی پی مربعی محصورشده در مقایسه با حالت محصورنشده، تحت بار محوری و بار مایل با خروج از مرکزیت تا ۶.۷۵ برابر افزایش یافته است. آنها همچنین مشاهده کردند که محصورکردن خاک زیر پی منجر به کاهش قابل توجهی در نشست شد.

تحقیق دیگری توسط اونیکریشان و ساچین [7] در مورد پی‌های محصور شده با الوارهای چوبی روی ماسه سست انجام شد و پاسخ با پی‌های محصور نشده مقایسه شد. نتایج نشان داد که شمع‌های محصور کننده می‌توانند ظرفیت باربری را تا ۲.۲۸ برابر نسبت به یک پی محصور نشده افزایش دهند. فاصله کمتر بین ریزشمع‌ها باعث بهبود محصور شدگی و در نتیجه ظرفیت باربری می‌شود. افزایش طول ریزشمع محصور کننده تا مقدار بهینه، ظرفیت باربری را بهبود می‌بخشد و افزایش طول ریزشمع بیش از طول بهینه، اثر معکوس دارد. السعید [8] ظرفیت باربری یک پی نواری صلب که در یک طرف آن از ریزشمع‌ها برای پایداری شیب ماسه‌ای استفاده شده بود را بررسی کرد. در این تحقیق برای تعیین قابلیت ریزشمع‌ها در پایداری شیب‌ها، پنج گروه ریزشمع با طول‌های مختلف تحت بارهای خروج از مرکز و مایل بررسی شدند. بررسی نتایج نشان داد که با افزایش طول ریزشمع، ظرفیت باربری پی ۷.۹ برابر افزایش یافته است. تحقیق آزمایشگاهی توسط یداو و دینورکار [9] برای مشاهده آثار طول لبه (ریزشمع) و تأثیر پیکربندی‌های مختلف ریزشمع بر منحنی بار-نشست پی بررسی شد. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری ماسه در پی لبه‌دار شده تا دو برابر افزایش یافت. هوانگ و همکاران [10] به بررسی سازوکار شکست و ظرفیت باربری پی گسترده مستقر روی ریزشمع از طریق مدل‌های فیزیکی و تحلیل عددی پرداختند. تأثیر نوع خاک، طول ریزشمع و زاویه نصب ریزشمع‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ریزشمع‌ها باعث تغییر در سازوکار گسیختگی خاک می‌شود. همچنین می‌توان با تغییر در نوع گسیختگی، زاویه و طول ریزشمع‌ها ظرفیت باربری را افزایش داد. در گسیختگی برشی کلی، طول مناسب ریزشمع به منظور افزایش ظرفیت باربری، در حدود ۲.۵ برابر عمق سطح گسیختگی بوده است، در حالی که در گسیختگی از نوع برشی پانچ طول موثر حدوداً ۳ برابر عمق سطح گسیختگی بود. در ادامه بررسی نتایج نشان داد که تأثیر پیکربندی‌های متفاوت لبه ریزشمع بر ظرفیت باربری پی نواری بین ۲ تا ۸ برابر بود.

مخزن  $200 \times 1000 \times 50$  (سانتی‌متر) بود. به منظور جلوگیری از هرگونه تغییر شکل در زمان بارگذاری، مخزن مدل‌سازی صلب ساخته شد. برای مشاهده پدیده‌های ژئوتکنیکی، وجه روبه‌رو در جهت طولی مخزن از ورق پلکسی گلاس ۲.۵ سانتی‌متری ساخته شد. برای کاهش اثر مرز مدل بر تغییر شکل قائم ابتدا دیواره‌های وجوه داخلی مخزن با ورق پلکسی گلاس به ضخامت ۵ میلی‌متر پوشانده شد، سپس جداره‌های وجه داخلی روغن‌کاری شد. به منظور جلوگیری از تغییر شکل قاب بارگذاری تحت بار اعمالی، از پروفیل فولادی HEB220 در ساخت آن استفاده شد. عرض دهانه (فاصله ستون‌ها) و ارتفاع قاب بارگذاری به ترتیب ۲.۵۳ و ۱.۷۸ متر در نظر گرفته شد. ستون‌های قاب بارگذاری به یک پی صلب با طول ۳ متر، عرض ۱.۲ متر و ارتفاع ۰.۰۸۵ متر پیچ شدند. سیستم بارگذاری شامل یک جک هیدرولیک ۱۰ کیلونیوتن بود که روی تیر افقی نصب شد.

در این تحقیق به ارائه نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی پی نواری لبه‌دار شده با ریزشمع مستقر بر ماسه فیروزکوه (#۱۶۱) تحت بارگذاری قائم پرداخته شد. تاثیر پیکربندی‌های مختلف ریزشمع‌ها مانند طول ریزشمع و فاصله دو ریزشمع متوالی در اطراف پی بر ظرفیت باربری و نشست مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس پارامترهای مذکور، ۱۶ آزمایش روی مدل فیزیکی انجام شد. همچنین در پایان به بررسی سازوکار گسیختگی پی لبه‌دار شده با ریزشمع در بستر ماسه‌ای پرداخته شد.

## ۲. مدل‌سازی فیزیکی

### ۱-۲. دستگاه مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌های آزمایشگاهی

این مطالعه آزمایشگاهی روی مدل کوچک مقیاس پی نواری انجام شد. دستگاه آزمایش مورد استفاده در این تحقیق شامل یک مخزن صلب، قاب بارگذاری، سیستم بارش ماسه و ابزارهایی مانند لودسل، جابه‌جایی سنج و دیتالاگر بود. شکل (۱) نمای شماتیک از دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد. ابعاد

شکل ۱. نمای شماتیک از سیستم مدل‌سازی فیزیکی

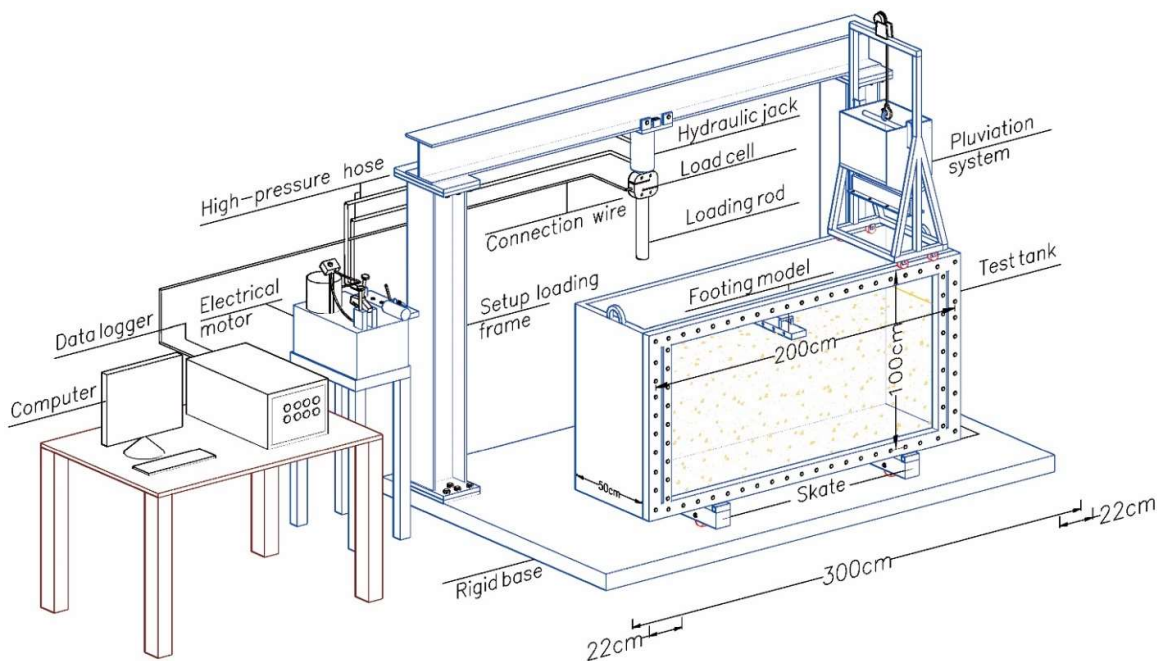


Fig. 1. Schematic view and details of the physical modeling system

شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

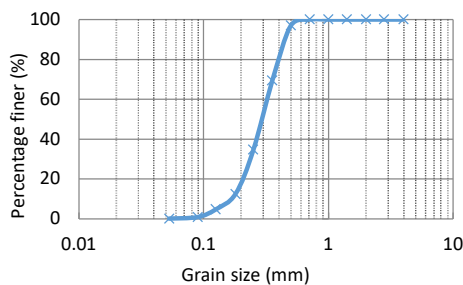


Fig. 2. Grain size distribution curve of Firuzkuh sand (#161)

در این تحقیق برای ساخت هندسه مدل از روش بارش ماسه در هوا استفاده شد. شکل (۳) نمای کلی از سیستم بارش ماسه در هوا را ارائه می‌دهد. در تمام مدل‌های آزمایشگاهی تراکم نسبی خاک  $3 \pm 75\%$  درصد در نظر گرفته شد. به منظور اطمینان از تراکم نسبی بستر در هنگام بارش، ظرف اندازه‌گیری استوانه‌ای در سه ارتفاع مختلف در محفظه مدل‌سازی، پایین، وسط و بالا قرار داده شد. درصد تراکم نسبی از آزمایش روی نمونه‌ها به دست آمد.

شکل ۳. دستگاه بارش

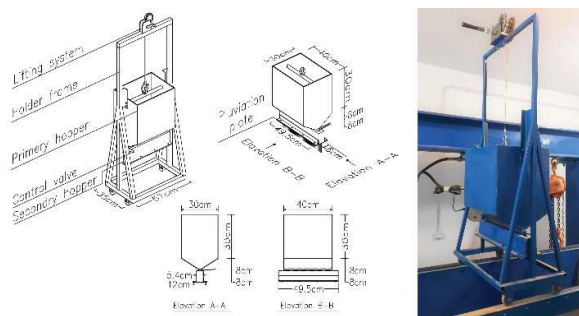


Fig. 3. View of the pluviation system

پی نواری و ریزشمع. به منظور شبیه‌سازی پی نواری در مدل فیزیکی از یک صفحه فولادی استفاده شد. به منظور ایجاد شرایط صلب، ضخامت ورق فولادی ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. عرض پی (پی شامل، صفحه فولادی با عرض ۹.۶ سانتی‌متر به اضافه ضخامت تسمه ۰.۳ سانتی‌متر در دو طرف صفحه فولادی) در تمام آزمایش‌ها برابر با ۱۰ سانتی‌متر انتخاب شد. مدل پی با یک فاصله ۰.۲۵ سانتی‌متری از دو طرف مخزن قرار گرفت. طول مدل پی ۴۹.۵ سانتی‌متر در نظر

جک هیدرولیک قابلیت حرکت در جهت طولی محفظه برای اعمال بار را داشت. بار با استفاده از میله بارگذاری و یاتاقان تویی به منظور جلوگیری از ایجاد لنگر خارجی به پی منتقل شد. نیروی اعمال شده توسط جک هیدرولیک از طریق یک لودسل با ظرفیت ۱۰۰ کیلو نیوتن اندازه‌گیری شد. نشست پی با استفاده از دو خط‌کش اهمی با دامنه تغییرات محدود به ۱۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. تمام داده‌های خط‌کش‌های اهمی و لودسل توسط یک دیتالاگر چهار کاناله و کامپیوتر قرائت و پردازش شدند.

### ۲-۲. مشخصات مصالح

ماسه. در این تحقیق از ماسه سیلیسی فیروزکوه (شماره ۱۶۱، با یک درصد ریزدانه) استفاده شد. مقدار ناخالصی‌های ماسه مورد استفاده ناچیز بوده و ۹۸.۴۱ درصد آن از کوارتز تشکیل شده است. ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱ به عنوان ماسه استاندارد در ایران شناخته می‌شود و پر مصرف‌ترین ماسه برای مطالعات آزمایشگاهی به شمار می‌آید. منحنی دانه‌بندی و مشخصات فیزیکی ماسه مطابق آزمایش استاندارد الک در شکل (۲) و جدول (۱) ارائه شده است. ضریب یکنواختی و ضریب انحنای به ترتیب ۲.۰ و ۱.۳۵ می‌باشد. این ماسه بر اساس سیستم طبقه‌بندی یکپارچه، در زمره خاک ماسه‌ای بدانه‌بندی شده طبقه‌بندی می‌شود. وزن مخصوص خشک کمترین و بیشترین ماسه به ترتیب ۱۳.۳۷ و ۱۶.۲۱۷ کیلونیوتن بر مترمکعب می‌باشد (چنگیزی و همکاران، ۲۰۲۲ [11]، جهانیان و همکاران، ۲۰۲۲ [12]، سعیدی و همکاران [13]). اگرچه شرایط اشباع و غیراشباع بودن بستر خاکی بر ظرفیت باربری تأثیر خواهد داشت (قاسم‌زاده و اکبری، ۲۰۱۹ [14]، ۲۰۲۰ [15])، اما این تحقیق روی خاک در شرایط خشک متمرکز شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

Firuzkuh (No. 161)	$D_{50}$ , mm	$e_{max}$	$e_{min}$	$G_s$
	0.35	0.943	0.603	2.658

Table. Physical characteristics of Firuzkuh sand (No.161)

گرفته شد که منجر به شرایط کرنش صفحه در طول آزمایش‌ها می‌شود. ریزشمع از لوله‌های آلومینیومی با قطر ۱۲ میلی‌متر و ضخامت جداره ۱ میلی‌متر انتخاب شد. در این تحقیق طول ریزشمع‌ها به ترتیب ۱، ۲ و ۳ برابر عرض پی در نظر گرفته شد. برای اتصال صلب ریزشمع‌ها به مدل پی، غلاف فولادی با قطر داخلی ۱۲ میلی‌متر و طول ۳۰ میلی‌متر استفاده شد. برای اتصال هر ریزشمع به غلاف فولادی از یک پیچ استفاده شد. غلاف‌های فولادی به یک تسمه فولادی (به ابعاد ۴۹.۵ در ۶ در ۰.۳ سانتی‌متر در دو طرف از عرض صفحه فولادی صلب) جوش داده شد. از پنج پیچ برای اتصال تسمه‌های فولادی به مدل پی استفاده شد. جزئیات پی نواری لبه‌دار شده با ریزشمع در شکل (۴) نشان داده شده است. زبری سطح پایین پی و ریزشمع در تمام آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد.

شکل ۴، پی نواری و لبه ریزشمع

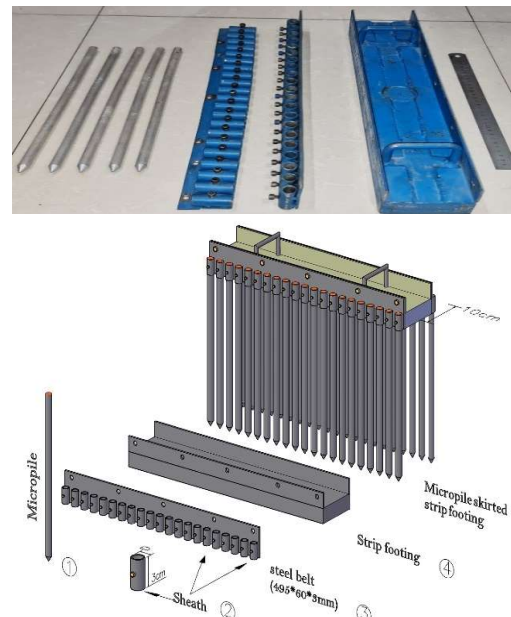


Fig. 4 Details of MSSF

### ۳. روش مدل‌سازی و انجام آزمایش

در ابتدا اثر شرایط مرزی محفظه، مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای اصلی برای یک پی نواری مستقر بر بستر ماسه‌ای شامل عرض پی (B)، فاصله پی از سطح انتهایی مخزن (Z)، فاصله پی از جدار سمت راست/چپ محفظه (X, X)، است. نشست پی توسط دو خط کش اهمی مستقر روی پی اندازه‌گیری شد. پارامترهای تاثیرگذار بر پاسخ بار-نشست پی نواری لبه‌دار شده با ریزشمع شامل طول ریزشمع (L)، فاصله بین دو ریزشمع متوالی (S)، قطر ریزشمع (D)، سختی خمشی ریزشمع (EI)، سختی محوری ریزشمع (EA)، فاصله بین نوک ریزشمع و سطح انتهایی مخزن (Y)، ظرفیت باربری ماسه در حالت بهسازی شده ( $Q_m$ ) و نشست پی در حالت بهسازی شده ( $S_m$ ) می‌باشد. علاوه بر این، وزن مخصوص ماسه ( $\gamma$ )، زاویه اصطکاک داخلی خاک ( $\phi$ ) و مدول الاستیسیته خاک (E)

تمام پارامترها با توجه به عرض پی بی‌بعد شده‌اند ( $X/B$ ,  $Z/B$ ) ، همچنین فاصله ریزشمع‌ها با توجه به قطر ریزشمع ( $S/D$ ) بی‌بعد شده است.

ضریب مقیاس به عنوان طول ریزشمع در نمونه واقعی ( $L_p$ ) و مدل ( $L_m$ ) تعریف شد که نسبت آنها برابر با  $N$  بوده است. جدول ۲ ضرایب مقیاس پارامترها در نمونه واقعی نسبت به نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد در شکل ۶ نمایی شماتیک از پی نواری بدون لبه و پی نواری لبه‌دار شده با ریزشمع، واقع بر بستر ماسه‌ای نشان داده شده است. مقدار  $N$  در تحقیق ۱۰ در نظر گرفته شده است.

جزئیات طرح و برنامه آزمایش‌ها در جدول (۳) ارائه شده است. ظرفیت باربری نهایی مستقیماً از عملکرد پی تخمین زده شد. متداول‌ترین روش‌ها برای ارزیابی ظرفیت باربری نهایی شامل روش ۱۰٪ عرض پی، روش مماس متقاطع، روش لگاریتمی و روش هذلولی است [16، 17 و 18]. تفسیر هر یک از این روش‌های ممکن است مقدار متفاوتی از ظرفیت باربری را ارائه دهد و بنابراین انتخاب یک روش واحد به منظور سازگاری نتایج ضروری است. در این تحقیق، ظرفیت باربری نهایی هر مدل از روی منحنی بار-نشست با استفاده از روش ۱۰٪ عرض پی تعیین شد.

در مدل آزمایشگاهی و نمونه واقعی به دلیل یکسان بودن خاک مورد استفاده در دو حالت، مشابه بود.

شکل ۵. آماده‌سازی هندسه طرح (الف) چگونگی قرارگیری ریزشمع‌ها، (ب) چگونگی قرارگیری پی

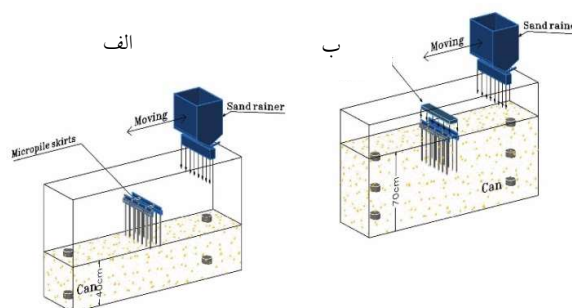


Fig. 5. Preparation of sand bed, (a) micropiles tip level, (b) bottom level of foundation base

یکی از روش‌های رایج برای پیش‌بینی رفتار خاک در مقیاس واقعی، انجام آزمایش روی مدل‌های فیزیکی است. در مدل‌سازی فیزیکی، لازم است آثار مقیاس برای اجزای مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته شود. آنالیز ابعادی برای ارزیابی آثار مقیاس مطابق با قضیه II باکینگهام (۱۹۱۴) انجام می‌شود. در این تحقیق، تابع  $F$  (معادله ۱) حاکم بر سیستم را می‌توان به صورت زیر بیان داشت:

$$F(Q_m, Q_0, S_m, S_0, B, L, D, S, EA, EI, \gamma, E, \phi) = 0 \quad (1)$$

شکل ۶. نمایی شماتیک (a) متغیرهای شرایط مرزی (b, c) جزئیات پی نواری لبه‌دار شده با ریزشمع

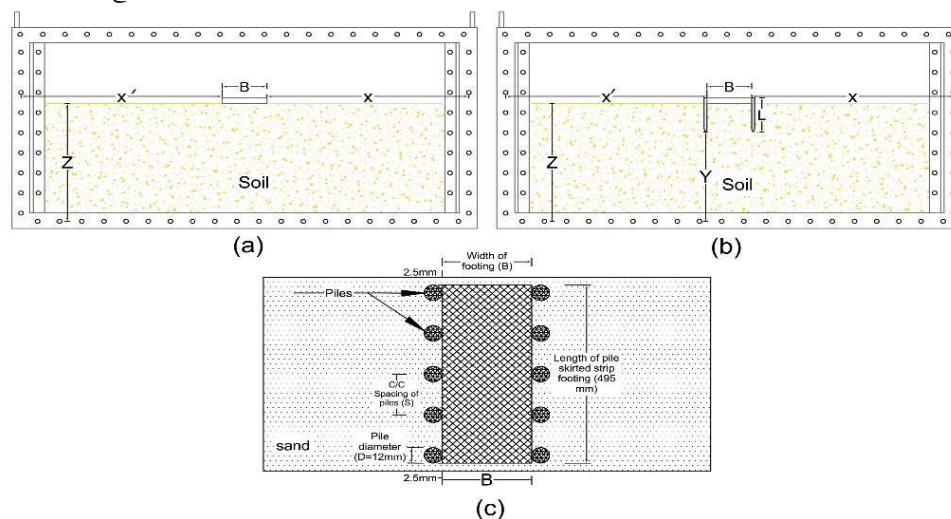


Fig. 6. Schematic view of (a) variable parameters of boundary condition, (b, c) MSSF details

جدول ۲. ضرائب مقیاس پارامترها

Parameter	$Q_m (0)$	$S_m (0)$	B	L	D	S	EA	EI	$\gamma$	E	$\phi$
Scale factor	N	N	N	N	N	N	$N^2$	$N^3$	1	N	1

Table 2. Scale factors of parameters

جدول ۳. جزئیات طرح و برنامه آزمایشها

Test series	Type of model	Z/B	x/B	S/D	L/B	No. of tests
Series. 01 (Test No. 01-07)	bottom boundary Unreinforced- surface strip footing located on sand	1,2,3,4,5,6,7	9.5	-	-	7
Series. 02 (Test No. 08-15)	lateral boundary Unreinforced- surface strip footing located on sand	5	0,1,2,3,4,5,6,7	-	-	8
Series. 03 (Test No. 16-21)	Pile skirted strip footing located on sand Reinforced-Pile skirted Foundation	7	-	2,4,6,8,10	1	5
Series. 04 (Test No. 22-26)			-	2,4,6,8,10	2	5
Series. 05 (Test No. 27-33)			-	2,4,6,8,10	3	5

Table 3. Test program details

اجتناب ناپذیری در مدل سازی فیزیکی یک برابر شتاب زمین وجود خواهد داشت و صرف نظر کردن از آن غیر ممکن می باشد. علاوه بر این، از آنجایی که نسبت قطر ریزشمع به اندازه ذرات ماسه در مدل سازی فیزیکی حدود ۳۴ است، اثر نامطلوب مقیاس را در مدل سازی فیزیکی می توان ناچیز در نظر گرفت [30 و 31].

#### ۴. نتایج مدل های فیزیکی

۴-۱. آثار مرز تحتانی (آزمایش های سری ۰۱)  
مشکل اساسی در بررسی رفتار کل توده ژئوتکنیکی با مدل سازی فیزیکی تحت شتاب زمین، ارتباط بین مدل و نمونه واقعی می باشد. مرزهای توده خاک در واقعیت نامحدود بوده ولی در مدل های کوچک مقیاس، مرزهای توده خاک بازسازی شده تحت تاثیر مرزهای جانبی و تحتانی محفظه محدود بوده و بر پاسخ مدل فیزیکی اثر گذار می باشد، بنابراین تاثیر شرایط مرزی باید مورد بررسی قرار گیرد. از این رو ابعاد محفظه

#### ۳-۱. آثار مقیاس

مدل سازی فیزیکی در مقیاس یک برابر جاذبه زمین یکی از رایج ترین روش ها برای بررسی رفتار نمونه واقعی است. در نظر گرفتن آثار مقیاس در مدل سازی فیزیکی برای نمونه های کوچک مقیاس به ویژه برای پی های مستقر بر خاک دانه ای ضروری است. پژوهشگران زیادی در زمینه پدیده آثار مقیاس مطالعه کرده اند. پژوهشگران نشان داده اند که سه عامل عرض پی [19، 20، 21، 22 و 23]، نسبت اندازه ذرات ماسه به عرض پی [24، 25 و 26] و میانگین سطح تنش در زیر پی [26، 27 و 28] بر پاسخ یک پی تاثیر می گذارد. کوزاکابه (۱۹۹۵) [29] بیان داشت که آثار اندازه ذرات در  $B/D_{50\%}$  بزرگتر از ۵۰ تا ۱۰۰، در نتایج به دست آمده ناچیز می باشد. در این تحقیق مقدار  $D_{50\%}$  برابر ۰.۳۵ میلی متر بوده و نسبت  $B/D_{50\%}$  برای عرض پی بیشتر از ۱۰۰ بوده است. در نتیجه، اندازه ذرات ماسه بر نتایج آزمایش تاثیر نمی گذارد. با این حال، اثر مقیاس با توجه به تغییرات در سطح تنش های اصلی در زیر پی به طور

۴-۲. آثار مرز جانبی (آزمایش‌های سری ۰۲)

برای ارزیابی تاثیر مرز جانبی بر ظرفیت باربری نهایی، هشت آزمایش مدل‌سازی فیزیکی انجام شد. نسبت فاصله پی از دیواره سمت راست محفظه آزمایش به عرض پی، در این آزمایش‌ها متغیر بوده است. فاصله پی از دیواره سمت راست محفظه آزمایش بین ۰ تا هفت برابر عرض پی متغیر در نظر گرفته شد. منحنی‌های بار-نشست پی نواری روی خاک ماسه‌ای با نسبت‌های  $x/B$  مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است. در ابتدا، پی مماس بر مرز جانبی قرار گرفت. سپس آزمایش‌ها با افزایش فاصله پی از مرز جانبی تکرار شد. ارزیابی نتایج نشان داد که افزایش فاصله پی از دیواره باعث کاهش اثر مرز جانبی بر ظرفیت باربری خاک شد. هنگامی که فاصله پی از دیواره‌های محفظه آزمایش کمتر از پنج برابر عرض پی باشد، مرز جانبی بر ظرفیت باربری و نشست تأثیر می‌گذارد. در  $x/B \geq 5$ ، مرز جانبی بر نتایج تأثیری نداشت.

شکل ۸. نمودار بار-نشست آثار مرز جانبی (سری ۰۲)

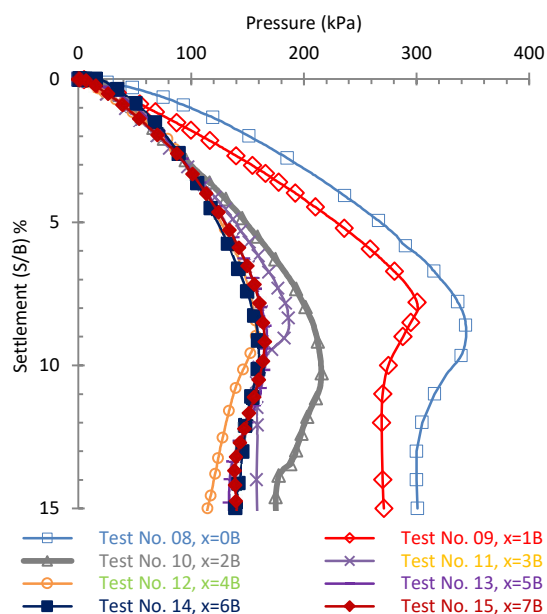


Fig. 8. Pressure -settlement curves with different  $x/B$  ratios

۴-۳. پی نواری لبه‌دار شده با ریزشمع مستقر بر بستر ماسه‌ای

رفتار پی نواری لبه‌دار شده با ریزشمع مستقر بر بستر ماسه‌ای با در نظر گرفتن آثار پارامترهایی مانند طول ریزشمع‌ها و فاصله

آزمایش باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا اثر شرایط مرزی ناچیز باشد [32]. نتایج ارائه شده در ادبیات نشان می‌دهد که اگر فاصله کف پی تا مرز صلب تحتانی ۱.۵ تا ۲ برابر عرض پی باشد، بسته به نوع ماسه و چگالی نسبی، اثر مرز صلب تحتانی منجر به افزایش ظرفیت باربری می‌شود [33]. به منظور بررسی اثر مرز صلب تحتانی بر ظرفیت باربری هفت آزمایش انجام شد، که در آزمایش اول ضخامت خاک معادل عرض پی به ضخامت خاک اضافه شد. به گونه‌ای که در آزمایش هفتم ضخامت خاک معادل هفت برابر عرض پی در نظر گرفته شد. منحنی-های بار-نشست پی نواری به عرض ۱۰ سانتی‌متر مستقر بر خاک ماسه‌ای با چگالی نسبی ۷۵ درصد با نسبت‌های مختلف  $Z/B$  در شکل (۷) نشان داده شده است. ارزیابی نتایج شکل (۷) نشان داد که وقتی فاصله پی از سطح تحتانی مخزن فولادی کمتر از دو برابر عرض پی باشد، نتایج ظرفیت باربری غیر واقعی است. به عبارت دیگر، زمانی که  $Z$  کمتر از دو برابر عرض پی باشد، مرز تحتانی بر نتایج مدل‌سازی فیزیکی تأثیر می‌گذارد. در نسبت‌های مختلف  $Z/B$  بزرگتر از ۳، منحنی‌های بار-نشست همگرا شده‌اند.

شکل ۷. نمودار بار-نشست آثار مرز تحتانی (سری ۰۱)

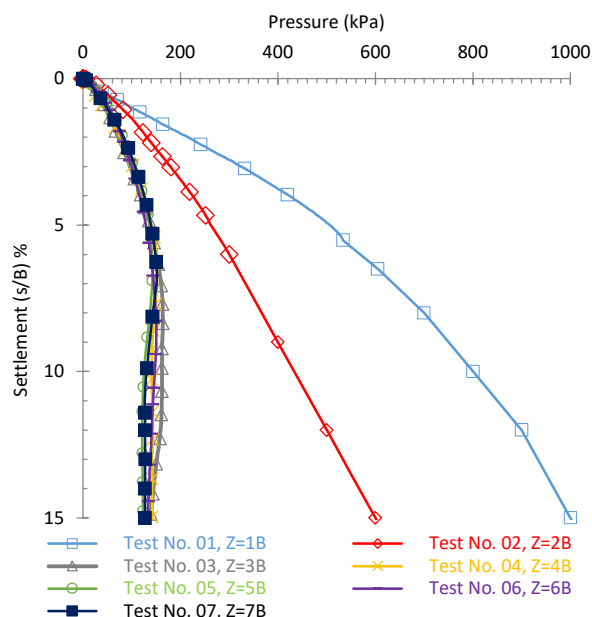


Fig. 7. Pressure-settlement curves with different  $Z/B$  ratios



طول سطح شکست، در مقادیر  $L/B$  بالاتر می‌باشد. در ادبیات فنی شواهدی وجود دارد که این نتیجه را تأیید می‌کند. به عنوان نمونه، یاداو و دینورکار [34] از یک مدل پی محصور شده به ابعاد  $100 \times 100$  میلی‌متر مستقر بر بستر ماسه‌ای استفاده کردند. آنها نشان دادند که محصور کردن خاک زیر پی سطحی مستقر بر بستر ماسه‌ای، ظرفیت باربری را تا دو برابر حالت محصور نشده افزایش می‌دهد. همچنین، سینگ و همکاران [35] نشان دادند که ظرفیت باربری پی محصور شده می‌تواند تا ۶.۷۵ برابر ظرفیت باربری پی محصور نشده باشد.

#### ۴-۵. اثر فاصله بین ریزشمع‌ها

در این تحقیق تأثیر فاصله بین ریزشمع‌ها بر  $BCR$  مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی تأثیر فاصله بین ریزشمع‌ها بر رفتار پی لبه‌دار شده با ریزشمع، فاصله ریزشمع‌ها ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ برابر قطر ریزشمع در نظر گرفته شد. شکل (۱۱) تغییرات  $BCR$  را به عنوان تابعی از فاصله بین ریزشمع‌ها و سه طول مختلف نشان می‌دهد. مشاهده شد که هر چه فاصله بین ریزشمع‌ها نزدیکتر باشد، ظرفیت باربری بیشتر است. به طور کلی، روند مشابهی برای آزمایش‌های انجام شده با استفاده از طول‌های مختلف ریزشمع مشاهده می‌شود. با افزایش فاصله بین ریزشمع‌ها، اثر محصور شدگی کاهش می‌یابد. در مجموع، ظرفیت باربری نهایی پی سطحی محصور شده در هر فاصله بین ریزشمع‌ها به طور قابل توجهی بیشتر از ظرفیت باربری نهایی پی سطحی محصور نشده است. مقایسه نمودارهای بار-نشست پی نواری محصور شده و محصور نشده نشان داد که افزایش  $BCR$  در  $S/D=2$  نسبت به سایر موارد، بیشتر بوده است. به عنوان نمونه، نتایج ارائه شده در منحنی‌ها نشان می‌دهد که وجود ریزشمع ظرفیت باربری پی سطحی را در  $S/D=2$  تا ۲.۹۵ برابر و در  $S/D=10$  تا ۱.۳ برابر افزایش می‌دهد.

#### ۴-۶. نشست

در این مطالعه، مقادیر نشست مدل‌های پی لبه‌دار شده با ریزشمع و پی سطحی بدون لبه در هنگام گسیختگی مقایسه شد.

بین ریزشمع‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی نتایج به دست آمده (پاسخ بار-نشست) نشان داد که وجود لبه ریزشمع، ظرفیت باربری و عملکرد نشست یک پی سطحی مستقر بر بستر ماسه‌ای را بهبود می‌بخشد. با افزایش طول ریزشمع‌ها و کاهش فاصله بین ریزشمع‌ها ظرفیت باربری افزایش یافته و نشست کاهش می‌یابد. منحنی‌های بار-نشست برحسب یک ضریب بی‌بعد به عنوان نسبت نشست  $(S/B, \%)$  نشان داده می‌شوند که در آن نشست  $(S)$  و عرض پی  $(B)$  می‌باشد. نمودارهای بار-نشست برای طول‌های مختلف و فواصل مختلف ریزشمع‌ها در شکل (۹) نشان داده شده است. همانطور که پیشتر ذکر شد، ظرفیت باربری نهایی برای هر آزمایش از منحنی بار-نشست با استفاده از روش ۰.۱ عرض پی تعیین می‌شود. نمودارهای بار-نشست بر اساس مقادیر میانگین نشست رسم شد. مقادیر اندازه‌گیری شده ظرفیت باربری نهایی برای پی نواری لبه‌دار شده با ریزشمع  $(Q_m)$  و پی نواری بدون لبه  $(Q_0)$  در جدول (۴) ارائه شده است. افزایش ظرفیت باربری به دلیل محصور شدن خاک زیر پی با ضریب بی‌بعد  $BCR$  نشان داده شده است. این ضریب به عنوان نسبت ظرفیت باربری نهایی پی نواری لبه‌دار به ظرفیت باربری پی نواری بدون لبه تعریف می‌شود.

#### ۴-۴. اثر طول ریزشمع

به منظور بررسی اثر طول ریزشمع بر پاسخ پی نواری، آزمایش‌های مختلفی با سه نسبت (طول ریزشمع به عرض پی) ۱، ۲ و ۳ انجام شد. تغییرات  $BCR$ ، با توجه به نسبت‌های طول ریزشمع به عرض پی، در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در پی لبه‌دار شده با ریزشمع، ظرفیت باربری پی سطحی افزایش قابل توجهی داشته است. ظرفیت باربری نهایی پی لبه‌دار شده با ریزشمع با افزایش نسبت طول ریزشمع به عرض پی، افزایش می‌یابد. ظرفیت باربری بین ۳۰ تا ۱۹۵ درصد افزایش داشته است. بررسی نتایج نشان داد که، ظرفیت باربری پی سطحی در حالتی که طول لبه برابر با عرض پی باشد ۱.۶ برابر حالت بدون لبه و در حالتی که طول لبه سه برابر عرض پی می‌باشد، ۲.۹۵ برابر حالت بدون لبه، می‌شود. این افزایش ظرفیت باربری به دلیل محصور شدن بیشتر ماسه و افزایش

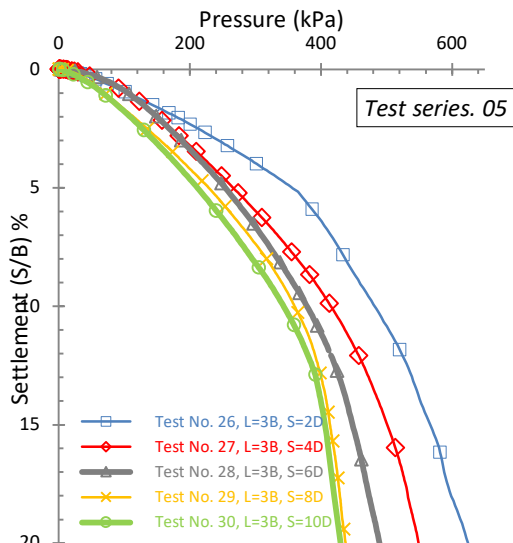
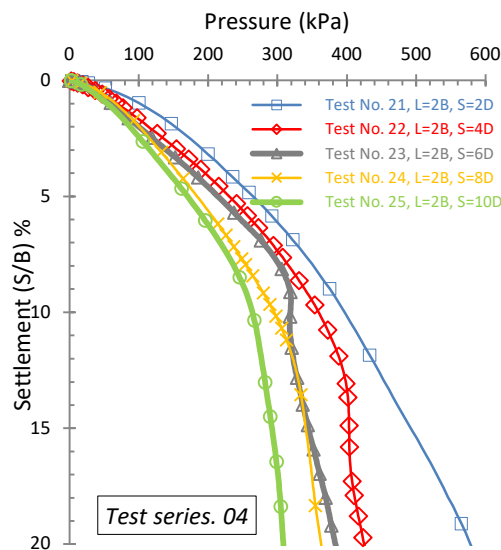


Fig. 9. Pressure-settlement curves of MSSF with different L/B and S/D ratios

شکل ۹. نمودار بار-نشست پی نواری لبه‌دار شده با ریزشمع در نسبت‌های

مختلف L/B و S/D (سری ۰۳، ۰۴ و ۰۵)



Test series. 04

شکل ۱۰. تغییرات BCR بر اساس تغییرات طول ریزشمع‌ها

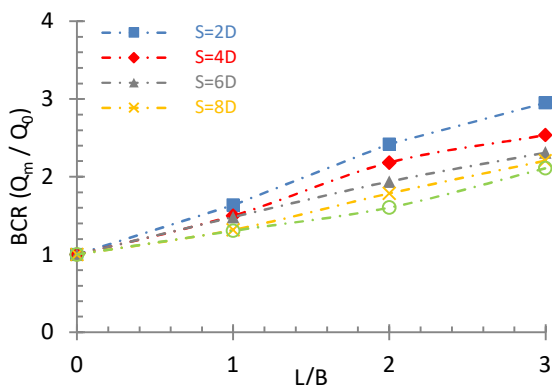
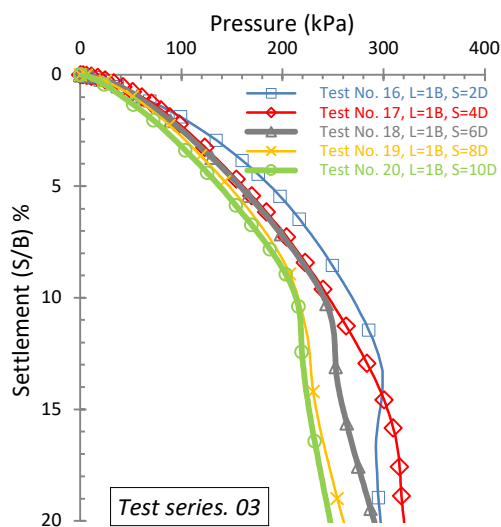


Fig. 10. Variation in BCR ( $Q_m/Q_0$ ), in terms of micropile skirt lengths ratios (L/B) (S/D)



Test series. 03

جدول ۴. ظرفیت باربری نهایی پی لبه‌دار و بدون لبه

q <sub>ult</sub> (kPa), Q <sub>0</sub> , Q <sub>m</sub>	S/D						
	0	2	4	6	8	10	
Series. 01 (Test No. 07) Without skirt	0	164	-	-	-	-	
Series. 03 (Test No. 16-20)	L/B	1	268	246	243	216	214
Series. 04 (Test No. 21-25)		2	397	358	318	293	263
Series. 05 (Test No. 26-30)		3	484	416	379	362	346

Table 4. Ultimate bearing capacities of strip footing with and without confinement

می‌توان ظرفیت باربری مجاز را در نشست بسیار پایین‌تر به دست آورد. محصور شدن خاک تأثیر قابل توجهی در بهبود رفتار پی لبه‌دار شده با ریزشمع مستقر بر بستر ماسه‌ای دارد. میزان کاهش نشست در مقایسه با پی بدون لبه حدود ۳۶ تا ۸۲ درصد بوده است.

#### ۴-۷. سازوکار شکست

در ماسه متراکم، سازوکار گسیختگی از نوع شکست برشی کلی است. بنابراین هنگام گسیختگی جابه‌جایی از جهت عمودی به افقی تبدیل شد. همانطور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، رفتار منبسط‌شوندگی ماسه متراکم در هنگام گسیختگی در زیر پی باعث گسترش طول سطح گسیختگی برشی به سمت سطح زمین می‌شود و گسیختگی برشی کلی در جایی که جابه‌جایی به سطح زمین می‌رسد، رخ می‌دهد. با این حال، در این تحقیق، گسیختگی برشی کلی فقط در زیر پی نواری رخ داده است.

شکل ۱۳. الگوی گسیختگی برشی کلی ناشی از حرکت بی‌سطحی [۳۶]

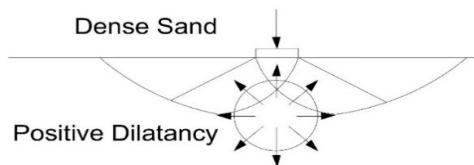


Fig. 13. General shear failure pattern induced by the movement of the surface footing (Tsukada et al, 2006)

لبه‌دار کردن پی با ریزشمع به طور قابل ملاحظه‌ای طول سطح گسیختگی خاک را افزایش می‌دهد و حالت گسیختگی همچنان گسیختگی برشی کلی مشابه با پی نواری محصور نشده بود. با این حال، با توجه به چگونگی نصب لبه ریزشمع، ناحیه‌ای که سطح گسیختگی در بر می‌گیرد، اصلاح شد. یک سازوکار احتمالی که بیانگر بهبود سطح گسیختگی است، تشکیل یک قوس از دانه‌های خاک است که در اثر محصور شدگی دانه‌ها ایجاد می‌شود (شکل ۱۴ الف). ایجاد شکل قوسی (طاق) در برخورد با ریزشمع، از حرکت جانبی دانه‌های خاک و در نتیجه افزایش نشست جلوگیری می‌کند و ظرفیت باربری خاک را افزایش می‌دهد. در این فرآیند، قوس، عکس-

شکل ۱۱. تغییرات BCR بر اساس تغییرات فاصله بین ریزشمع‌ها

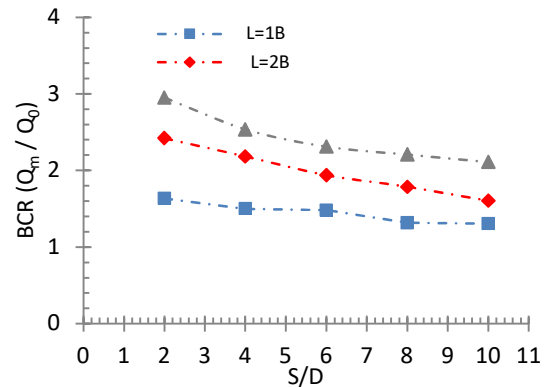


Fig. 11. Variation in BCR ( $Q_m/Q_0$ ), in terms of spacing between micropiles ratios ( $S/D$ )

شکل ۱۲. تغییرات SRF بر اساس تغییرات فاصله بین ریزشمع‌ها

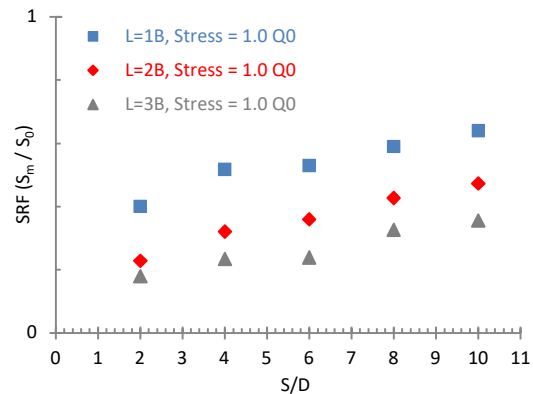


Fig. 12. Variation in settlement reduction factor ( $S_m/S_0$ ), in terms of spacing between micropiles ratios ( $S/D$ )

گسیختگی در نشست معادل ۱۰٪ عرض پی در نظر گرفته شد ( $S/B=10\%$ ) که در آن  $B$  عرض پی و  $S$  نشست پی می‌باشد). میزان کاهش نشست به دلیل وجود لبه بر حسب ضریب کاهش نشست ( $S_m/S_0$ ) در شکل (۱۲) ارائه شده است. مقایسه نتایج نشست در یک بار معین ( $Q_0$ ) نشان داد که، استفاده از لبه باعث کاهش نشست می‌شود. میزان نشست بستگی به طول دامنه ریزشمع و فاصله بین ریزشمع‌ها دارد. مقدار نشست با افزایش طول لبه ریزشمع و همچنین با کاهش فاصله بین ریزشمع‌ها، کاهش می‌یابد.

بنابراین در مواردی که سازه‌ها به نشست بسیار حساس هستند، با افزایش طول لبه ریزشمع یا با کاهش فاصله بین ریزشمع‌ها،

و همچنین ظرفیت باربری را بهبود می‌بخشد و نشست را کاهش می‌دهد.

### ۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ظرفیت باربری و رفتار نشست پی نواری مستقر بر بستر ماسه‌ای با/بدون لبه ریزشمع تحت بارگذاری عمودی با استفاده از یک سری آزمایش‌های فیزیکی ارزیابی شد. این تحقیق کاربرد بالقوه پی نواری لبه‌دار شده با ریزشمع را برای افزایش قابل توجه ظرفیت باربری و کاهش نشست را در مقایسه با پی‌های سطحی بدون لبه نشان می‌دهد. پی نواری لبه‌دار شده با ریزشمع منجر به افزایش سطح گسیختگی شد و بسته به طول ریزشمع و همچنین فاصله بین ریزشمع‌ها، الگوی شکست خاک تغییر یافت. افزایش طول سطح گسیختگی مقاومت برشی بالاتری را به همراه داشت و منجر به افزایش ظرفیت باربری شد. از آزمایش‌های مدل فیزیکی نتایج زیر را به دست آمد:

۱. بررسی فاصله پی از سطح تحتانی محفظه فولادی نسبت به عرض پی (B)، نشان داد که وقتی فاصله پی از سطح تحتانی محفظه کمتر از دو برابر عرض پی باشد، مرز پایین بر نتایج مدل‌سازی فیزیکی تأثیر می‌گذارد.

۲. ارزیابی مرزهای جانبی با در نظر گرفتن فاصله پی از دیواره محفظه (X) نسبت به عرض پی نشان داد که در  $X/B \geq 5$ ، مرز جانبی بر نتایج تأثیری نداشته است.

۳. در پی لبه‌دار شده با ریزشمع، بسته به نسبت  $L/B$  و فاصله بین ریزشمع‌ها، ظرفیت باربری پی‌های سطحی را با ضریب  $1.3-2.95$  بهبود داده شد.

۴. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که ظرفیت باربری پی‌های سطحی با افزایش طول ریزشمع بهبود یافته است. بنابراین بیشترین افزایش ظرفیت باربری در  $L/B=3$  مشاهده شد.

۵. پیکربندی‌های مختلف پی نواری لبه‌دار شده با ریزشمع با فاصله متغیر بین ریزشمع‌ها مورد آزمایش قرار گرفت. مقایسه نمودارهای بار-نشست نشان داد که افزایش BCR در  $S/D=2$  نسبت به سایر موارد در طول‌های ثابت ریزشمع، بیشتر می‌شود.

عمل نیروها را به دو انتهای خود (ریزشمع‌ها) منتقل می‌کند و ریزشمع‌ها به دلیل سختی خود مقاومت می‌کنند. با افزایش فاصله بین ریزشمع‌ها، دهانه قوس نیز بزرگتر می‌شود و قوس با بار جانبی کمتری فرو می‌ریزد. اگر ریزشمع‌ها از هم فاصله زیادی داشته باشند یا اگر خاک بالای سطح لغزش بسیار ضعیف باشد، امکان جابه‌جایی دانه‌های خاک در بین ریزشمع‌های مجاور وجود دارد (شکل ۱۴.ب).

شکل ۱۴. (الف) سازوکار محصور شدگی با ریزشمع‌های محصور کننده کننده [۳۷]، (ب) تغییر شکل پلاستیکی خاک بین دو ریزشمع مجاور

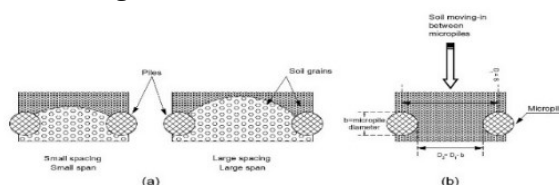


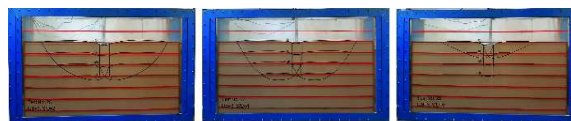
Fig. 14. (a) Mechanism of confinement with confining piles (Unnikrishnan, N., & Sachin, 2009), (b) plastically deforming soil between two adjacent micropiles

شکل ۱۵. سازوکار شکست (الف) تغییرات نسبت  $L/B$ ، (ب) تغییرات

نسبت  $S/D$



(الف)



(ب)

Fig. 15. Failure mechanism (a) variations  $L/B$  ratio, (b) variations  $S/D$  ratio

ناحیه‌ای که سطح گسیختگی را شامل می‌شود، نسبت به طول ریزشمع و همچنین فاصله بین ریزشمع‌ها، اصلاح شد. در شکل (۱۵)، مشاهده می‌شود که با افزایش طول ریزشمع و کاهش فاصله بین ریزشمع‌ها سطح گسیختگی برشی گسترش می‌یابد. افزایش سطح گسیختگی مقاومت برشی را بالاتر برده

- nonlinear matric suction distribution in the soil. *Can. J. Soil Sci.* 99 (4).
15. Ghasemzadeh, H., and F. Akbari. (2020). Investigation of soil active wedge angle with linear matric suction distribution below the footing. *Int. J. Civ. Eng.* 18 (2): 161-168.
  16. De Beer, E. E. (1970). Experimental determination of the shape factors and the bearing capacity factors of sand. *Geotechnique*, 20(4),387-411.
  17. Briaud, J. L., & Jeanjean, P. (1994). Load settlement curve method for spread footings of sand. In *Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments* (pp. 1774-1804). ASCE.
  18. Lutenegeger, A. J., & Adams, M. T. (1998, March). Bearing capacity of footings on compacted sand. In *Proceedings of the 4th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering* (Vol. 1216, p. 1224).
  19. De Beer, E. E. (1963). The scale effect in the transposition of the results of deep-sounding tests on the ultimate bearing capacity of piles and caisson foundations. *Geotechnique*, 13(1), 39-75.
  20. Shiraishi, S. (1990). Variation in Bearing Capacity Factors of Dense Sand Assessed by Model Loading Tests. *Soils and Foundations*, 30(1), 17-26.
  21. Ueno, K., Miura, K., & Maeda, Y. (1998). Prediction of ultimate bearing capacity of surface footings with regard to size effects. *Soils and Foundations*, 38(3), 165-178.
  22. Zhu, F., Clark, J.I. and Phillips, R. (2001) Scale Effect of Strip and Circular Footings Resting on Dense Sand. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, ASCE, Vol.127, No. 7, p.p 613-621.
  23. Cerato AB and Lutengger AJ (2007) Scale effects of shallow foundation bearing capacity on granular material. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* 133(10): 1192-1202.
  24. Herle I and Tejchman J (1997) Effect of grain size and pressure level on bearing capacity of footings on sand. In *IS-Nagoya'97: Deformation and Progressive Failure in Geomechanics* (Asaoka A and Adachi T Oka F (eds)). Pergamon, Elsevier Science Ltd, Oxford, UK, pp. 781-786.
  25. Kusakabe, O., Maeda, Y., & Ohuchi, M. (1992). Large-scale loading tests of shallow footings in pneumatic caisson. *Journal of geotechnical engineering*, 118(11), 1681-1695.
  26. Tatsuoka F, Okahara M, Tanaka T et al. (1991) Progressive failure and particle size effect in bearing capacity of a footing on sand. *Geotechnical Special Publication* 27(2): 788-802.
  27. Tatsuoka F, Siddiquee MSA and Tanaka T (1994) Link among design, model tests, theories and sand properties in the bearing capacity of footing on sand. *Proceeding of the 13<sup>th</sup>*.
  28. Yamaguchi H, Kimura T and Fujii N (1977). On the scale effect of footings in dense sand. *Proceeding of the 9th International Conference on Soil Mechanics*
۶. پی نواری لبه‌دار شده با ریزش‌معم در مقایسه با پی نواری بدون لبه، مقدار نشست را ۳۶ تا ۸۲ درصد کاهش داده است.
۶. مراجع
1. FHWA, 2005. *Micro-pile Design and Construction*. United States Department of Transportation, No. FHWA NHI-05-039, December, pp. 5-1-5-18.
  2. Poulos, H.G., Davis, E.W., 1981. *Pile Foundation Analysis and Design*. John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 71-142.
  3. Reul, O., Randolph, M.F., 2003. Pile raft in over consolidated clay: comparison of in situ measurement and numerical analysis. *Geotechnique* 40 (2), 351-361.
  4. Han, J., Ye, S.L., 2006. A field study on the behavior of a foundation underpinned by micro-piles. *Can. Geotech. J.* 43 (1), 30-42.
  5. Tsukada, Y., Miura, K., Tsubokawa, Y., Otani, Y., You, G., 2006. Mechanism of bearing capacity of spread footings reinforcing with micro-piles. *J. Soils Found.* 46 (3), 367-376.
  6. Singh, V. K., Prasad, A., & Agrawal, R. K. (2007). Effect of soil confinement on ultimate bearing capacity of square footing under eccentric-inclined load. *EJGE*, 12, 1-14.
  7. Unnikrishnan, N., & Sachin, P. (2009). Influence of confining micro piles on the bearing capacity of sand. In *Contemporary Topics in Deep Foundations* (pp. 367-374).
  8. Elsaied, A. E. (2014). Performance of footing with single side micro-piles adjacent to slopes. *Alexandria Engineering Journal*, 53(4), 903-910.
  9. Yadav, M. S., & Dindorkar, N. (2014) IMPROVEMENT OF BEARING CAPACITY OF PILE SKIRTED FOOTINGS IN SAND DUE TO VARYING SIZE & LENGTH OF SKIRT.
  10. Hwang, T. H., Kim, K. H., & Shin, J. H. (2017). Effective installation of micropiles to enhance bearing capacity of micropiled raft. *Soils and Foundations*, 57(1), 36-49.
  11. Changizi, F., Razmkhah, A., Ghasemzadeh, H., & Amelsakhi, M. (2022). Behavior of geocell-reinforced soil abutment wall: A physical modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(3), 04021495.
  12. Jahanian, M. S., Razmkhah, A., Ghasemzadeh, H., & Vosoughifar, H. (2022). Bearing capacity of the strip footing located on the sand reinforced by geocell under eccentric load. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(15), 1-18.
  13. Saeedi E, Razmkhah A, kamalian M, Askari F. 2024. "Bearing Capacity Evaluation of Skirted Reinforced Sand Slopes by Physical Modeling." *Modares Civil Engineering journal*, 2025; 24 (1).
  14. Ghasemzadeh, H., and F. Akbari. (2019). Determining the bearing capacity factor due to

33. Mandel, J., & Salencon, J. (1972). BEARING CAPACITY OF A SOIL LAYER RESTING ON A RIGID BASE (THEORETICAL STUDY). *GEOTECHNIQUE*, 22(1).
34. Yadav, M. S., & Dindorkar, N. (2014). IMPROVEMENT OF BEARING CAPACITY OF PILE SKIRTED FOOTINGS IN SAND DUE TO VARYING SIZE & LENGTH OF SKIRT.
35. Singh, V. K., Prasad, A., & Agrawal, R. K. (2007). Effect of soil confinement on ultimate bearing capacity of square footing under eccentric-inclined load. *EJGE*, 12, 1-14.
36. Tsukada, Y., Miura, K., Tsubokawa, Y., Otani, Y., You, G., 2006. Mechanism of bearing capacity of spread footings reinforcing with micro-piles. *J. Soils Found.* 46 (3), 367-376.
37. Unnikrishnan, N., & Sachin, P. (2009). Influence of confining micro piles on the bearing capacity of sand. In *Contemporary Topics in Deep Foundations* (pp. 367-374).
- and Foundation Engineering, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Japan, vol. 1, pp. 795-798.
29. Kusakabe, O., Foundations, in: R.N. Taylor (Ed.), *Geotech. Centifuge Technology*, vol. 37, Blackie Academi & Professional, London, 1995, pp. 828-842, *Cand. Geotechnical J* (Chapter 6).
30. Ovesen, N. K. (1979). Panel discussion in session 9. In *The use of physical models in design*", Proc. 7<sup>th</sup> European Conf Soil Mech. and Found. Eng (Vol. 4, pp. 318-323).
31. Miura, K., Otsuka, N., Kohama, E., Supachawarote, C., & Hirabayashi, T. (2003). The size effects of earth pressure cells on measurement in granular materials. *Soils and foundations*, 43(5), 133-147.
32. Ullah, S. N., Hu, Y., Stanier, S., & White, D. (2017). Lateral boundary effects in centrifuge foundation tests. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 17(3), 144-160.

# Improving The Bearing Capacity of Strip Footing with Micropile Skirts Located On Sand Soil

Behrad Bakhtiari<sup>1</sup>, Arash Razmkhah<sup>2</sup>, Hasan Ghasemzadeh<sup>3</sup>, Farajollah Askari<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Ahang Bld., Abouzar Bld., Basij Highway, Tehran, Iran. E-mail;

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Ahang Bld., Abouzar Bld., Basij Highway, Tehran, Iran, (Corresponding author),

<sup>3</sup> Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Mirdamade Ave, Tehran, Iran. E-

<sup>4</sup> Geotechnical Engineering Research Centre, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), No. 21, Arghavan Street, North Dibajee, Farmanieh, Tehran, Iran.

## Abstract:

Recently, the modification of bearing capacity and the reduction in settlement of existing foundations and buildings has become one of the important topics in the field of geotechnical engineering. Also, the foundation of the buildings on the problematic and flowing sand bed, especially in the coastal strips is inevitable. In general, when faced with problematic soils such as loose soils with low load-bearing capacity, high settlement, liquefaction, disturbed soils, etc., there are two ways for geotechnical engineers, one of which is to use bearing elements in the soil and the other is to improve and modify the physical-mechanical properties of the soil mass. In addition to acting as a bearing and settlement-resistant element, the micro pile also improves the bearing strength of the surrounding soil due to the injection of cement slurry. In many projects, micro piles are used as structural elements. In fact, micro piles are small replacement piles (usually less than 300 mm in diameter) that are often accompanied by steel reinforcement and cement grout injection. Micro piles can be designed and used at any angle and for different purposes, including bearing axial and lateral loads, replacing conventional piles, or as part of a soil-pile system, depending on the purpose of the design. In this study, by physical modeling, the effect of using micro piles on the edge the foundation on sand bed was investigated. For this purpose, the effect of the boundary conditions of the chamber was first investigated. The parameters included the width of the foundation ( $B$ ), the distance of the foundation from the end surface of the tank ( $Z$ ), the distance of the foundation from the right/left wall of the chamber ( $X$ ,  $X'$ ), unreinforced bearing capacity ( $Q_0$ ) and unreinforced sand settlement ( $S_0$ ). Also, the investigation of the effect of the distance of the foundation from the lower surface of the steel chamber to the width of the foundation ( $B$ ) showed that when the distance of the foundation from the lower surface of the chamber was less than twice the width of the foundation, the lower boundary affected the results of physical modeling. The evaluation of the lateral boundaries given the distance of the foundation from the chamber wall ( $X$ ) to the width of the foundation showed that for  $X/B \geq 5$ , the lateral boundary had no effect on the results. Influences of various micropile skirt configurations were investigated, including micropile length ( $L$ ) and spacing between two consecutive micropiles ( $S$ ) on bearing capacity-settlement. The micropile skirts improved the bearing capacity of shallow foundations, depending on the  $L/B$  ratio and spacing between micropiles depending on the  $S/D$  ratio. Analysis of the results indicated that improved bearing capacity upon increasing the length of micropile skirt and reducing the spacing between two consecutive micropiles. Comparison of the pressure-settlement curves showed that in constant micropile lengths, the optimum Bearing Capacity Ratio (BCR) was in  $S/D=2$ . Further, the skirt piles reduced the settlement of strip footing. The Micropile Skirted Strip Footing (MSSF) led to increased failure surface and, depending on the pile length and spacing micropiles, it changed the failure pattern of the soil.

**Keywords:** Bearing capacity, micropile, physical Models, failure mechanism, confinement.