

# مدل سازی فیزیکی ارزیابی ظرفیت باربری شیروانی ماسه‌ای بهسازی شده با لبه

احسان سعیدی<sup>۱</sup>، آرش رزم‌خواه<sup>۲\*</sup>، محسن کمالیان<sup>۳</sup>، فرج‌الله عسکری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی

۲- استادیار گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی

۳- استاد پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

Email: a\_razmkhah@azad.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳

## چکیده

امروزه قرارگرفتن پی در کنار شیروانی‌های خاکی مانند استقرار پی در نزدیکی گودبرداری‌ها، دیواره‌های نگهدارنده یا پی پل‌ها و دکل‌های انتقال برق امری اجتناب‌ناپذیر است. در زمان قرارگیری پی در کنار شیروانی خاکی، ظرفیت باربری نهایی آن بسته به فاصله استقرار از تاج شیروانی به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. از این رو بهبود ظرفیت باربری و تثبیت شیروانی خاکی یکی از مهمترین چالش‌ها به شمار می‌آید. استفاده از لبه به عنوان محصورکننده پیوسته یک راه حل مناسب برای این موضوع می‌باشد. پی لبه‌دار ترکیبی از پی سطحی با لبه‌های داخلی یا جانبی از جنس فولاد یا بتن مسلح می‌باشد که با ایجاد شرایط محصورکنندگی در خاک زیر پی، تشکیل گوهی گسیختگی را به تراز نوک لبه انتقال می‌دهد. در این تحقیق، مدل فیزیکی پی نواری بهسازی شده با یک طرف لبه در مجاورت شیروانی ماسه‌ای، تحت بارگذاری قائم مورد ارزیابی قرار گرفت. تاثیر پارامترهای عمق لبه ( $H_s$ ) و فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی (b) بر ظرفیت باربری و نشست بررسی شد. ارزیابی نتایج نشان داد که، استفاده از لبه موجب بهبود ظرفیت باربری و مقدار نشست می‌گردد. با افزایش عمق لبه ( $H_s=1, 2, 3, 4B$ )، بسته به محل قرارگیری پی نسبت به تاج شیروانی، ظرفیت باربری در محدود ۱۰۴ تا ۲۳۲ درصد نسبت به حالت بهسازی نشده افزایش می‌یابد. به منظور ارزیابی اثر فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی، سه فاصله ۰، ۱ و ۲ برابر عرض پی به عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که، افزایش فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی موجب افزایش ظرفیت باربری در حالت بدون بهسازی می‌شود. استفاده از لبه در پی مستقر بر تاج شیروانی ماسه‌ای بیشترین تاثیر بر ظرفیت باربری را داشته و با افزایش فاصله قرارگیری پی نسبت به تاج شیروانی تاثیر استفاده از لبه کاهش می‌یابد. همچنین استفاده از لبه به عنوان بهسازی موجب کاهش نشست می‌شود. فاکتور کاهش نشست بسته به افزایش عمق لبه و کاهش فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی در محدوده ۴ تا ۷۲ درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این، تاثیر استفاده از لبه بر نشست نامتقارن و سازوکار گسیختگی آن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به خوبی نشان داد که، پی مستقر در مجاورت شیروانی ماسه‌ای دارای نشست نامتقارن و در جهت عقربه‌های ساعت بوده که با استفاده از لبه جهت نشست نامتقارن تغییر می‌یابد. در زمان قرارگیری پی در مجاورت شیروانی و در نشست ۱۵ درصدی عرض پی با افزایش طول لبه ( $H_s=1B, 3B$ ) مقدار کج شدگی نامتقارن پی به ترتیب ۴۶ تا ۲۴ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، استفاده از لبه موجب تغییر سازوکار گسیختگی گشته و بسته به ارتفاع لبه و فاصله پی از تاج شیروانی سازوکار گسیختگی از حالت گسیختگی سطحی و کم عمق به گسیختگی دامنه و پای شیروانی تغییر می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** شیروانی ماسه‌ای، پی لبه‌دار، مدل سازی فیزیکی، ظرفیت باربری، نشست، سازوکار گسیختگی.

## ۱. مقدمه

امروزه ساخت پی در کنار شیروانی امری اجتناب ناپذیر است. نمونه‌ای از قرارگیری پی در کنار شیروانی مربوط به پی پل‌ها، استقرار پی در نزدیکی گودبرداری‌ها، دیواره‌های نگهبان یا پی دکل‌های انتقال برق می‌باشد. پژوهشگران بسیاری به مطالعه روی ظرفیت باربری پی‌های در مجاورت سطوح شیبدار پرداخته‌اند. زمانی که پی در کنار شیروانی خاکی قرار داشته باشد، ظرفیت باربری نهایی آن بسته به فاصله از تاج شیروانی به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. گسیختگی پی در مجاورت شیروانی خاکی به علت برخورد سطح گسیختگی با دامنه شیروانی می‌باشد. با این تفاسیر بهبود ظرفیت باربری و تثبیت شیروانی خاکی یکی از مهمترین مسائل تحقیقاتی در مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌رود. روش‌های مختلفی به منظور افزایش ظرفیت باربری و پایداریسازی مطرح شده است. به عنوان نمونه اصلاح هندسه شیروانی، بهسازی خاک و استفاده از محصورکننده‌های گسسته و پیوسته مانند، دیوار حائل، شمع و لبه از شمار این روش‌ها می‌باشد. پی لبه‌دار ترکیبی از پی سطحی با لبه‌ای داخلی یا جانبی از جنس فولاد یا بتن مسلح می‌باشد. استفاده از لبه با ایجاد شرایط محصورکنندگی در خاک زیر پی، تشکیل گوه گسیختگی را به تراز نوک لبه انتقال می‌دهد. با افزایش طول سطح گسیختگی نیروی برشی بیشتری در راستای افزایش ظرفیت باربری بسیج خواهد شد. از این رو وجود لبه سبب بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست در مقابل پی‌های سطحی می‌شود و یک راهکار مناسب برای بهبود ظرفیت باربری و پایداری شیروانی به شمار می‌آید.

پژوهشگران بسیاری به بررسی و ارزیابی عملکرد پی لبه‌دار با مدل‌سازی فیزیکی و آنالیز عددی پرداخته‌اند. هو و همکاران [1] در سال ۱۹۹۹ به بررسی عددی و فیزیکی پی لبه‌دار دایره‌ای شکل روی خاک غیرهمگن پرداخته‌اند. ژو (۱۹۹۹) [2]، به ارائه ظرفیت باربری پی لبه‌دار دایره‌ای شکل مستقر بر ماسه متراکم تحت بارگذاری قائم پرداخته است. در تحقیق مذکور، تأثیرات اندازه پی، نسبت شعاع پی و بارگذاری خروج از مرکز با مدل‌سازی فیزیکی دستگاه سانتیرفیوژ و آنالیز عددی

مورد تحقیق قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی و فیزیکی اید و همکاران (۲۰۰۹) [3] و اید (۲۰۱۳) [4]، نشان داده که ظرفیت باربری پی لبه‌دار با افزایش عمق لبه افزایش می‌یابد. فیومانا و همکاران (۲۰۱۹) [5]، به ارائه نتایج آزمایشگاهی سانتیرفیوژ پی لبه‌دار روی ماسه سست تحت بارگذاری مرکب پرداخته و در نهایت به مقایسه نتایج بدست آمده از تحقیق با نتایج ارائه شده توسط سایر پژوهشگران پیشین در آزمایش‌های یک برابر جاذبه زمین پرداخته‌اند.

چندین پژوهشگر به بررسی عملکرد پی‌های لبه‌دار با مدل‌سازی فیزیکی تحت شتاب جاذبه زمین پرداخته‌اند (الاقباری و خان، ۲۰۰۲ [6]؛ الاقباری و محمدزین، ۲۰۰۴ [7]؛ ۲۰۰۶ [8]؛ الاقباری، ۲۰۰۷ [9]؛ الاقباری و دوتا، ۲۰۰۸ [10]؛ آل‌وکیل، ۲۰۱۰ [11]؛ ۲۰۱۳ [12]؛ نذیر و عظم، ۲۰۱۰ [13]؛ مومنی و همکاران، ۲۰۱۵ [14]). ویلاووبوس [15] در سال ۲۰۰۷ نتایج آزمایشگاهی پی لبه‌دار کوچک مقیاس مستقر بر خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری قائم مونوتونیک را ارائه کرده است. این بررسی شامل تأثیر طول لبه، کانی شناسی خاک و تغییرات درصد تراکم نسبی بستر بوده است. پونراتانسن [16] در سال ۲۰۰۹، به بررسی ظرفیت باربری پی مربعی و دایره‌ای مسلح‌شده با شمع صفحه‌ای روی تراکم‌های مختلف ماسه پرداخته است. نتایج آزمایش بارگذاری به وضوح نشان می‌دهد که، استفاده از شمع صفحه‌ای در پی مربعی و دایره‌ای باعث افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری می‌شود. آثار قطر پی، درصد تراکم نسبی بستر، عمق لبه و زبری سطح لبه بر ظرفیت باربری و نشست پی لبه‌دار توسط قلی پور و مکارچیان (۲۰۱۸) [17] با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که، استفاده از لبه به عنوان بهسازی در پی دایره‌ای شکل مستقر بر بستر ماسه‌ای موجب افزایش ۵ برابری ظرفیت باربری نهایی و کاهش ۸ درصدی نشست نسبت به پی بدون مسلح‌کننده می‌شود. محمود و همکاران (۲۰۲۰) [18] مقدار بهینه نسبت طول لبه به قطر پی مستقر بر خاک گچی خیس بر ظرفیت باربری را ارائه کرده‌اند. مدل فیزیکی پی لبه‌دار دایره‌ای شکل با اندازه لبه متفاوت بر بستر خاکی با تراکم نسبی خشک ۵۵ درصد ساخته شد. نتایج

نشان داد که استفاده از لبه موجب بهبود ظرفیت باربری به مقدار ۱،۹۲-۲،۲۷ می‌شود. الاقباری و محمدزین (۲۰۲۰) [19] به تاثیر استفاده از ابه بر ظرفیت باربری و نشست یک پی دایره-ای مستقر بر ماسه متراکم پرداخته‌اند. نتایج مدل‌سازی فیزیکی نشان داد که، استفاده از لبه ظرفیت باربری را تا حدود ۴۷۰ درصد افزایش داده و موجب کاهش ۱۷ درصدی نشست می‌شود.

نتایج فیزیکی آزمایش‌های مدل سانتریفیوژ بر عملکرد پی لبه‌دار توسط برخی از پژوهشگران ارائه شده است (واتسون و راندولف، ۱۹۹۸ [20]؛ برن و همکاران، ۲۰۰۰ [21]، ۲۰۰۳ [22]). یک سری از آزمایش‌های مدل سانتریفیوژ توسط یون و برانسی (۲۰۰۳) [23] به منظور بررسی پاسخ پی لبه‌دار روی ماسه شل زهکشی شده تحت بارگذاری عمودی، افقی و بارگذاری گشتاور انجام شد. ارزیابی نتایج بیانگر این بوده است که، ظرفیت باربری افقی پی لبه‌دار در حدود ۳ تا ۴ برابر پی مسلح نشده افزایش یافته است. مانا و همکاران [24]، ۲۰۱۲، به بررسی سازوکارهای شکست پی لبه‌دار مستقر بر خاک رس بیش تحکیم یافته از طریق تجزیه و تحلیل پردازش تصویر با استفاده از سانتریفیوژ درام پرداخته‌اند. همچنین آکوستا مارتینز و همکاران (۲۰۱۲) [25] نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ پی لبه‌دار بر روی خاک رس بیش تحکیم یافته تحت بارگذاری خارج از مرکز و برگشت را ارائه کرده‌اند.

پاسخ پی‌های لبه‌دار تحت ترکیب بارگذاری عمودی، افقی و گشتاور با استفاده از تحلیل عددی مورد مطالعه قرار گرفته است (برانسی و راندولف، ۱۹۹۷ [26]، ۱۹۹۸ [27] و ۱۹۹۹ [28]؛ هُو و راندولف، ۱۹۹۸ [29]). مجموعه‌ای از تحلیل اجزاء محدود توسط برانسی و یون (۲۰۰۹) [30] به منظور بررسی چگونگی تأثیر هندسه لبه بر ظرفیت باربری و سازوکار گسیختگی پی نواری تحت بارگذاری ترکیبی افقی و گشتاور انجام شده است.

بررسی رفتار پی نواری مسلح شده با لبه در کنار شیروانی خاکی توسط برخی از پژوهشگران مورد ارزیابی قرار گرفته است. عظیم و فُاروک (۲۰۱۰) [31] ظرفیت باربری پی در مجاورت شیروانی در حالت مسلح‌شده با لبه و بدون

مسلح‌کننده را گزارش کرده‌اند. پارامترهای مورد مطالعه شامل عمق لبه، فاصله قرارگیری پی لبه‌دار نسبت به تاج شیروانی و زاویه شیروانی بوده است. نتایج مدل فیزیکی و عددی نشان می‌دهد که استفاده از لبه به منظور بهسازی پی نواری در کنار شیروانی ماسه‌ای تأثیر قابل توجهی در بهبود ظرفیت باربری دارد. عظیم [32] در سال ۲۰۱۵ کاربرد استفاده از لبه در پی مجاور یک شیروانی ماسه‌ای، تحت بارگذاری لرزه‌ای را با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود دو بعدی پلکسیس، مورد مطالعه قرار داده است. نتایج تحقیق بیان داشت که، استفاده از لبه موجب افزایش پایداری شیروانی گشته و حضور المان لبه باعث کاهش شتاب پی می‌شود. پوسادکار و دایگوده (۲۰۱۶) [33] مجموعه‌ای از مدل‌سازی عددی در نرم افزار المان محدود پلکسیس را انجام داده‌اند. پارامترهای مختلف در نظر گرفته شده برای این مطالعه عبارت از، نسبت عمق مدفون شدگی پی به ارتفاع شیروانی، نسبت فاصله پی از تاج شیروانی به عرض پی، نسبت عمق لبه به عرض پی بوده است. نتایج نشان داد که، استفاده از لبه به عنوان بهسازی برای پی نواری تأثیر قابل توجهی در افزایش ظرفیت باربری داشته و با افزایش طول لبه، میزان افزایش ظرفیت باربری بیشتر می‌شود.

در این تحقیق، مجموعه‌ای از آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی پی نواری مستقر بر مجاورت شیروانی ماسه‌ای بهسازی شده با یک لبه عمودی به منظور ارزیابی پاسخ بار-نشست تحت بارگذاری فشاری قائم انجام شد. متغیرهای اصلی مورد ارزیابی در این مطالعه، عمق لبه ( $H_p$ ) و نسبت فاصله پی از تاج شیروانی به عرض پی ( $b/B$ ) بوده است. بر اساس پارامترهای ذکر شده، تعداد ۱۵ مدل آزمایشگاهی انجام شد. در انتها تأثیر حضور لبه بر مقادیر نشست، کج‌شدگی پی و همچنین سازوکار گسیختگی پی نواری بهسازی شده با لبه در مجاورت شیروانی ماسه‌ای بررسی شد.

## ۲. مدل‌سازی فیزیکی

### ۲.۱. دستگاه مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌های آزمایشگاهی

دستگاه مدل‌سازی فیزیکی مورد استفاده در این مطالعه در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب ساخته شده و شامل

هیدرولیک از طریق یک لودسل شکل s با ظرفیت ۱۰۰ کیلونیوتن اندازه‌گیری شد. همچنین مقادیر نشست با استفاده از دو خط کش اهمی با کورس ۱۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. در انتها تمامی داده‌های قرائت شده، توسط لودسل و جابه‌جایی سنج توسط یک دیتالاگر چهار کاناله ثبت و پردازش شد.

برای ارزیابی پاسخ بار-نشست مدل پی نواری در مجاورت یک شیروانی ماسه‌ای در دو حالت بهسازی نشده و بهسازی شده با یک لبه عمودی، پارامترهای عمق لبه، فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی، زاویه شیروانی، ارتفاع شیروانی، ظرفیت باربری تقویت نشده و بهسازی شده و همچنین نشست پی در هر دو حالت در نظر گرفته شد. تمامی پارامترها دارای کمیت بعد با توجه به عرض پی بی بعد شد. جزئیات آزمایش‌ها و پارامترهای تحقیق در شکل (۲) و جدول (۱) ارائه شده است. علاوه بر این، وزن مخصوص ماسه، زاویه اصطکاک داخلی خاک و مدول الاستیسیته خاک در مدل و نمونه واقعی به دلیل شباهت خاک مورد استفاده در آزمایشگاه برابر است.

شکل ۲. نمایی شماتیک از پارامترهای تحقیق

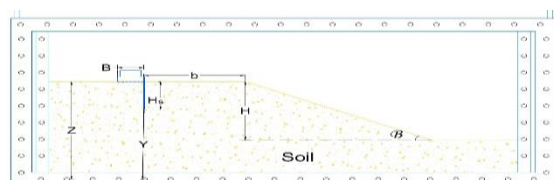


fig. 2. Schematic view of variable parameters in this research

جدول ۱. جزئیات آزمایش‌ها و مشخصات متغیرها

| Test series                    | Type of model                                     | $H_s/B$   | $b/B$ | + |
|--------------------------------|---------------------------------------------------|-----------|-------|---|
| Series. 01<br>(Test No. 19-23) | Reinforced-Skirted Foundation                     | 0,1,2,3,4 | 0     | 5 |
| Series. 02<br>(Test No. 24-28) |                                                   | 0,1,2,3,4 | 1     | 5 |
| Series. 03<br>(Test No. 29-33) |                                                   | 0,1,2,3,4 | 2     | 5 |
| $B$                            | Footing width                                     |           |       |   |
| $H_s$                          | Skirt depth                                       |           |       |   |
| $b$                            | Distance of footing from crest                    |           |       |   |
| $H$                            | Height of slope                                   |           |       |   |
| $\beta$                        | Slope angle                                       |           |       |   |
| $q_0$                          | Unreinforced bearing capacity of slope            |           |       |   |
| $q_s$                          | Reinforced bearing capacity of slope with skirted |           |       |   |
| $s_0$                          | Unreinforced settlement of slope                  |           |       |   |
| $s_s$                          | Reinforced settlement of slope with skirted       |           |       |   |

Table.1. Testing program considered for different parameters

مخزن مدلسازی صلب، قاب بارگذاری، سیستم بارش و ابزار اندازه‌گیری (لودسل، جابه‌جایی سنج و دیتالاگر) بود. شکل (۱) نمایی شماتیک از جزئیات دستگاه مدلسازی را ارائه می‌دهد.

شکل ۱. نمایی شماتیک از تجهیزات سیستم مدلسازی فیزیکی

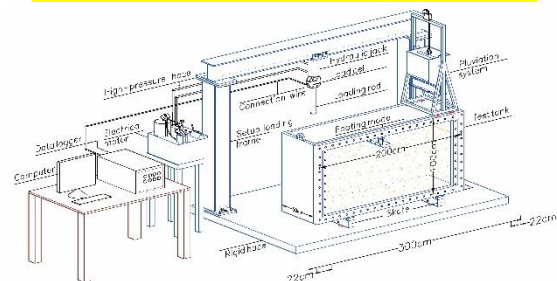


fig. 1. Schematic view and details of the testing system

مخزن مدلسازی در ابعاد ۲۰۰ سانتی‌متر طول، ۵۰ سانتی‌متر عرض و ۱۰۰ سانتی‌متر ارتفاع ساخته شد. به منظور جلوگیری از هرگونه تغییر شکل در زمان بارگذاری، مخزن مدلسازی صلب ساخته شد. دیواره مخزن در قسمت جانبی و پشت با استفاده از ورق فولادی محصور شد. برای مشاهده رخداد پدیده ژئوتکنیکی از صفحه پلکسی گلس ۲٫۵ سانتی‌متر در دیواره روبرویی مخزن مدلسازی استفاده شد. برای جلوگیری از تغییر شکل در صفحه پلکسی‌گلس، این صفحه در قاب فلزی متصل به بدنه اصلی قرار گرفت. به منظور ایجاد شرایط یکسان زبری در مخزن، دیواره پشتی با یک صفحه پلکسی گلس ۵ میلی‌متر فرش شد. به منظور کاهش اثر مرز مدل بر تغییر شکل قائم تمام سطوح داخلی محفظه مدلسازی روغن کاری شد. قاب بارگذاری با استفاده از پروفیل HEB220 به منظور جلوگیری از تغییر شکل آن تحت بارهای اعمال شده، ساخته شد. دهانه و ارتفاع قاب بارگذاری به ترتیب ۲٫۵۳ و ۱٫۷۸ متر در نظر گرفته شد. ستون‌ها به یک پایه صلب به طول ۳ متر، عرض ۱٫۲ متر و ارتفاع ۰٫۸۵ متر پیچ شد. از یک جک هیدرولیک الکتریکی ۱۰ کیلونیوتن برای تامین شرایط بارگذاری استفاده شد. انتقال بار از جک بارگذاری به شبیه‌ساز پی از طریق میله بارگذاری صورت گرفت. اتصال میله بارگذاری به پی از طریق یاتاقان توپی (Ball Bearing) صورت گرفت. یاتاقان توپی به منظور جلوگیری از ایجاد لنگر خارجی بر پی استفاده می‌شود. مقدار بارگذاری اعمال شده توسط جک

## ۲.۲. مشخصات مصالح

خاک - در این تحقیق از ماسه سیلیسی فیروزکوه (شماره ۱۶۱، با یک درصد ریزادنه) 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 (۳) و جدول (۲) ارائه شده است. ضریب یکنواختی و ضریب انحنای به ترتیب ۲،۰ و ۱،۳۵ است. این ماسه بر اساس سیستم طبقه‌بندی یکپارچه، در زمره خاک ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده طبقه‌بندی می‌شود. وزن مخصوص خشک کمترین و بیشترین ماسه به ترتیب ۱۳،۳۷ و ۱۶،۲۱۷ کیلو نیوتن بر مترمکعب است (چنگیزی، ۲۰۲۲ [34]، جهانیان، ۲۰۲۲ [35]). اگرچه شرایط اشباع و غیراشباع بودن بستر خاکی بر ظرفیت باربری تأثیر خواهد داشت (قاسم زاده و اکبری، ۲۰۱۹ [36]، ۲۰۲۰ [37])، اما این تحقیق روی خاک در شرایط خشک متمرکز شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

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

Table 2. Physical characteristics of Firuzkuh sand (No.161)

پی نواری و لبه - به منظور شبیه‌سازی پی نواری از یک صفحه فولادی استفاده شد. برای دستیابی به شرایط صلب، ضخامت ورق فولادی ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. عرض مدل پی در تمام آزمایش‌ها برابر با ۱۰ سانتی‌متر ثابت انتخاب شد. به منظور تامین شرایط کرنش صفحه، طول ورق فولادی ۵ میلی‌متر کمتر از عرض جعبه آزمایش انتخاب شد.

لبه صلب از ورق فولادی به ضخامت ۳ میلی‌متر و با نسبت ۰،۱ ضخامت پی ساخته شده است. نظر به صلب بودن لبه، با تغییر در ضخامت لبه تفاوتی در روند نتایج ایجاد نمی‌شود. زبری سطح زیرین پی و رویه داخلی و خارجی لبه در تمام آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد. شکل (۴) نمایی از پی نواری و لبه مورد استفاده را نشان می‌دهد.

شکل ۳. منحنی دانه‌بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

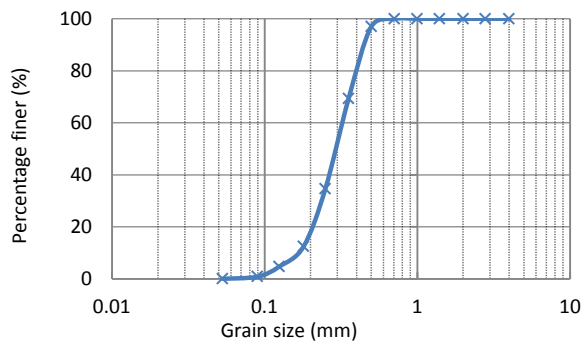


fig. 3. Grain size distribution curve of Firuzkuh sand (No.161)

شکل ۴. پی نواری و لبه



fig. 4. Strip footing and skirts

## ۳. روش مدل‌سازی و انجام آزمایش

یکی از عمده‌ترین چالش‌ها در مدل‌سازی فیزیکی، تکرارپذیری در آماده‌سازی بستر است. به منظور دسترسی به شرایط مطلوب و مدل‌سازی سریع، آماده‌سازی بستر با روش بارش یکی از مطمئن‌ترین روش‌ها است. روش بارش به علت گستره وسیعی از تراکم، سرعت بالا در ساخت مدل، ایجاد تراکم یکنواخت در بستر و تکرارپذیری، مورد توجه قرار گرفته است. در روش بارش پرده‌ای، بارش ماسه از طریق شکاف طولی در زیر محفظه ماسه انجام می‌گیرد. در این تحقیق به منظور مدل‌سازی همگن بستر ماسه‌ای از صفحه بارش با شیباری به عرض دو میلی‌متر برای بازسازی بستر ماسه‌ای در ارتفاع سقوط برابر با ۵۰ سانتی‌متر با سرعت حرکت ۵ سانتی‌متر بر ثانیه استفاده شد (شکل ۵). با توجه به کمترین و بیشترین وزن مخصوص خشک ماسه و با توجه به تأثیر سرعت جعبه بارش، عرض پرده

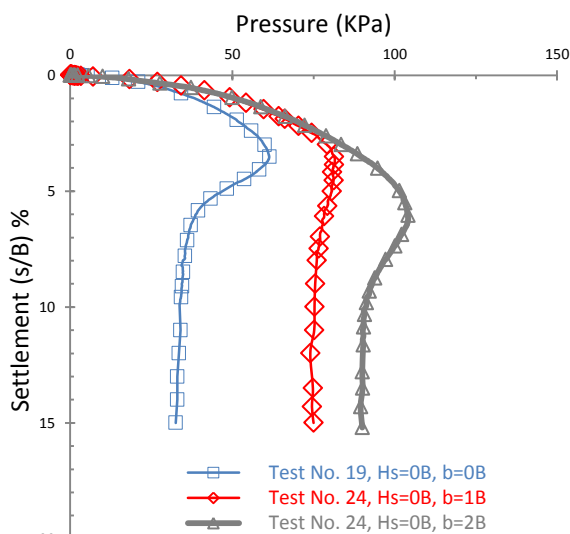
بارش و ارتفاع سقوط، درصد تراکم نسبی ماسه در تمام آزمایش‌ها حدود  $3 \pm 75$  درصد بدست آمد. آماده‌سازی بستر در لایه‌های ۱۰ سانتی‌متری در مخزن مدل‌سازی صورت گرفت. پس از تهیه هر لایه، یک لایه نازک (۵ میلی‌متر) از ماسه رنگی برای بررسی سازوکار گسیختگی ایجاد شد. ابعاد مدل شیروانی برای یک هندسه ثابت با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و زاویه  $26.56^\circ$  درجه در نظر گرفته شد. آماده‌سازی هندسه تا دستیابی به تراز نوک لبه ادامه داشت. پس از آن لبه به صورت عمودی در تراز مورد نظر قرار گرفته و سپس ادامه ساخت هندسه با روش بارش تا دستیابی به تراز قرارگیری پی ادامه یافت. قرارگیری لبه با این روش، مقدار دستخوردگی در بستر را به کمترین رسانده و تغییر محسوسی در تراکم نسبی ایجاد نمی‌شود. پی در مکان مورد نظر قرار گرفته و اتصال پی و لبه به وسیله پنج پیچ صورت گرفت. پس از جانمایی پی، دو خط کش اهمی به صورت مورب بر پی قرار گرفته تا مقادیر نشست حاصل از بارگذاری را قرائت کند. به منظور بررسی نمودار بار-نشست بارگذاری قائم با روش نشست کنترل با نرخ سرعت ۳ میلی‌متر بر دقیقه اعمال شد. تمامی مقادیر تا لحظه گسیختگی برای رسم نمودار بار-نشست توسط دیتالاگر ثبت شد.

#### ۱,۴. پی نواری در مجاورت شیروانی ماسه‌ای

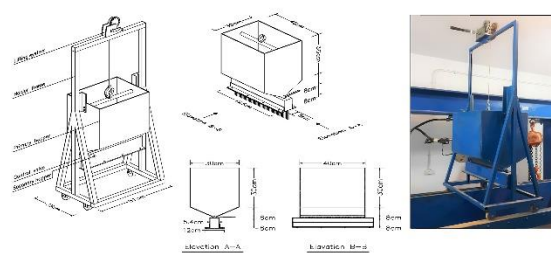
استقرار پی در کنار شیروانی بر ظرفیت باربری و نشست آن تاثیر داشته و موجب کاهش ظرفیت باربری و افزایش نشست پی سطحی می‌گردد. کِسکین و لاما (۲۰۱۳) [38]، به مطالعات آزمایشگاهی برای ارزیابی ظرفیت باربری نهایی پی در مجاورت شیروانی ماسه‌ای خشک پرداخته‌اند. آنها دریافتند که، ظرفیت باربری با افزایش فاصله قرارگیری از تاج شیروانی افزایش یافته و زمانی که فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی ۴ برابر عرض پی باشد، حضور شیروانی هیچگونه تاثیری بر نتایج نداشته است. در این تحقیق با متغیر در نظر گرفتن نسبت فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی به عرض پی بین ۰ تا ۲، مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفت. منحنی بار-نشست با در نظر گرفتن تغییرات اعمال شده در شکل (۶) نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان داد که، با افزایش فاصله قرارگیری پی از لبه شیروانی ظرفیت باربری افزایش می‌یابد و به منظور جلوگیری از تأثیر شیروانی بر ظرفیت باربری پی نواری باید فاصله پی از تاج شیروانی افزایش یابد.

شکل ۶. منحنی بار-نشست پی نواری بدون لبه در کنار شیروانی ماسه‌ای

با مقدار متفاوت در نسبت  $b/B$



**fig. 6.** Pressure-settlement curves of the strip footing on sandy slope with different  $b/B$  ratios



**fig. 5.** View of the pluviation system

ظرفیت باربری نهایی بطور مستقیم از عملکرد پی بدست می‌آید. روش‌های متفاوتی به منظور دستیابی به ظرفیت باربری نهایی وجود دارد. هر یک از این روش‌ها مقدار متفاوتی از ظرفیت باربری را ارائه می‌دهند. بنابراین انتخاب یک روش واحد به منظور دستیابی به مقدار ظرفیت باربری نهایی مهم است. در این مطالعه ظرفیت باربری نهایی برای هر مدل

## ۲.۴. پی نواری در کنار شیروانی ماسه‌ای بهسازی شده با لبه

همانطور که اشاره شد، ظرفیت باربری نهایی از مقدار تنش که در آن شیب منحنی بار-نشست صفر یا یک مقدار ثابت باشد، بدست می‌آید. نمودارهای بار-نشست برای اعماق مختلف لبه و سایر پارامترهای به دست آمده از مدل فیزیکی در شکل (۷) نشان داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که نمودارهای بار-نشست با توجه به مقادیر نشست متوسط رسم شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده ظرفیت باربری نهایی پی بهسازی شده با لبه ( $q_s$ ) و بهسازی نشده ( $q_0$ ) در جدول (۳) ارائه شده است.

رفتار پی نواری لبه‌دار در مجاورت شیروانی ماسه با در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای عمق لبه و فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده (پاسخ بار-نشست) نشان می‌دهد که وجود لبه، ظرفیت باربری و عملکرد نشست پی در مجاورت شیروانی ماسه ای را بهبود می‌بخشد. مقدار ظرفیت باربری با افزایش عمق لبه افزایش می‌یابد. منحنی‌های بار-نشست برحسب یک عامل بی بعد به عنوان نسبت نشست، نشان داده می‌شوند.

شکل ۷. نمودارهای فشار-نشست پی نواری لبه‌دار در مجاورت شیروانی ماسه‌ای با نسبت متغیر  $b/B$  و  $H_s/B$

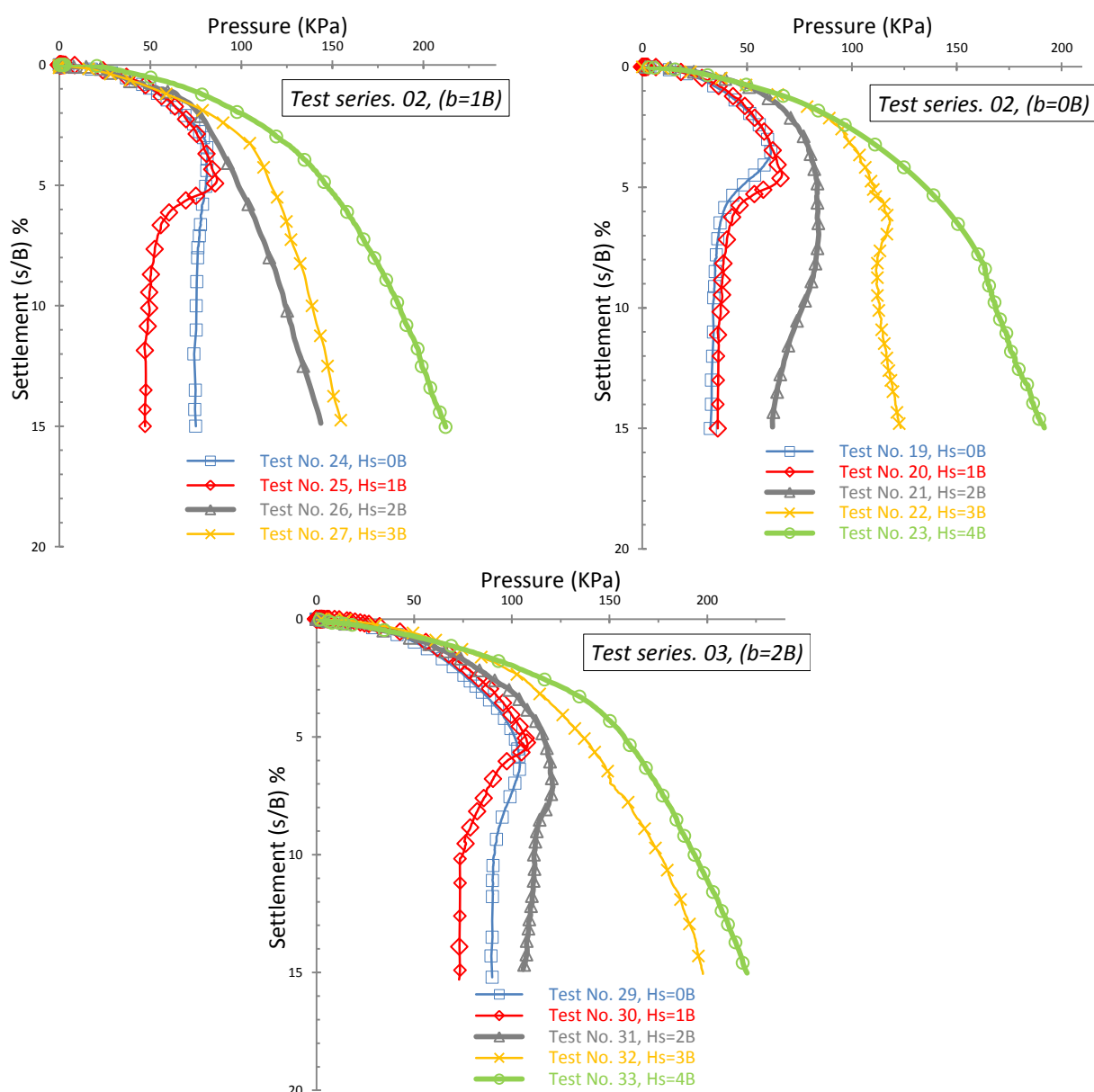


fig. 7. Pressure -settlement curves of skirted foundation near sandy slope with different  $b/B$  and  $H_s/B$  ratios

جدول ۳. ظرفیت باربری نهایی پی نواری بهسازی شده و بدون بهسازی در مجاورت شیروانی ماسه‌ای

| q <sub>ult</sub> (KPa), q <sub>0</sub> , q <sub>s</sub> |     | H <sub>s</sub> /B |        |        |        |        |        |
|---------------------------------------------------------|-----|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                                         |     | 0                 | 1      | 2      | 3      | 4      |        |
| Series. 01 (Test No. 19-23)                             | b/B | 0                 | 60.83  | 66.67  | 82.92  | 110.12 | 141.53 |
| Series. 02 (Test No. 24-28)                             |     | 1                 | 81.15  | 86.68  | 98.38  | 116.23 | 168.19 |
| Series. 03 (Test No. 29-33)                             |     | 2                 | 104.18 | 108.06 | 118.36 | 143.22 | 181.68 |

Table 3. Ultimate bearing capacities for the reinforced and unreinforced strip foundation models near sandy slope

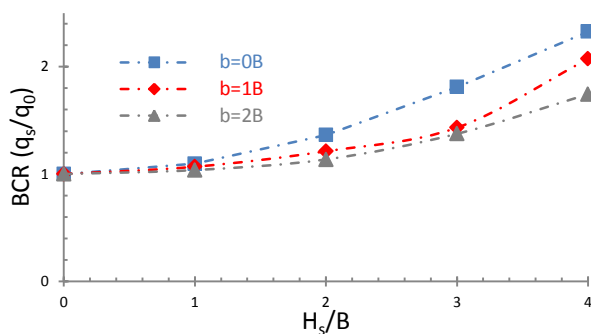
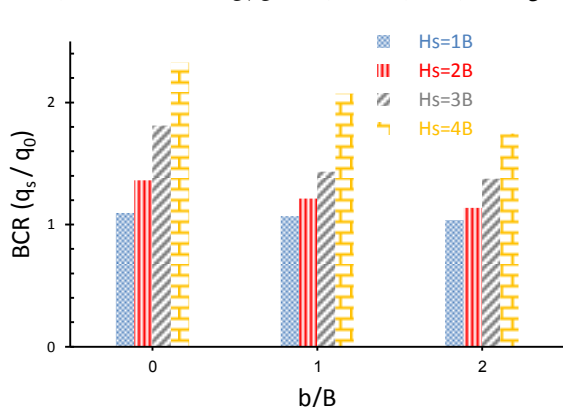
### ۳.۴. ظرفیت باربری

بر اساس نتایج آزمایش‌های فیزیکی مدل پی لبه‌دار، آثار عمق لبه و فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی، بر ظرفیت باربری و رفتار نشست مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بهبود ظرفیت باربری پی‌های سطحی مجاور شیروانی ماسه‌ای به دلیل وجود لبه با استفاده از نسبت ظرفیت باربری،  $(BCR)$   $q_s/q_0$  تعریف می‌شود. نسبت ظرفیت باربری به نسبت مقدار ظرفیت باربری پی نواری در مجاورت شیروانی ماسه‌ای بهسازی شده با یک طرف لبه به ظرفیت باربری بدون مسلح کننده اتلاق می‌شود. تاثیر عمق لبه، به منظور ارزیابی تأثیر عمق لبه بر پاسخ بار-نشست، مدل‌های فیزیکی با استفاده از پنج نسبت عمق مختلف لبه مورد مطالعه قرار گرفت. تغییرات در نسبت ظرفیت باربری از نظر مقادیر نسبت عمق لبه و فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی به عرض پی، در شکل (۸) نشان داده شده است. واضح است که قرار گرفتن لبه در ماسه در زیر پی منجر به افزایش قابل توجهی در مقادیر ظرفیت باربری پی سطحی می‌شود. ظرفیت باربری نهایی پی‌های لبه‌دار با افزایش نسبت عمق لبه به عرض پی در حدود ۱۰۴ تا ۲۳۲ درصد افزایش یافت. استفاده از لبه با ارتفاع ۴ برابر عرض پی بیشترین تأثیر بر ظرفیت باربری را داشته است.

### تأثیر فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی

در این مطالعه، آثار فاصله قرارگیری پی نواری تقویت شده با لبه از تاج شیروانی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی اثر فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی بر رفتار پی لبه‌دار، از سه نسبت فاصله قرارگیری پی تا تاج شیروانی به عرض پی در مدل‌سازی فیزیکی استفاده شد. شکل (۹) تغییرات نسبت ظرفیت باربری را به عنوان تابعی از فاصله قرارگیری پی به عرض آن را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی تأثیر استفاده از لبه بر ظرفیت

باربری مشهود است. ولی بیشترین تأثیر استفاده از لبه به عنوان تقویت کننده در قرارگیری پی در کنار شیروانی است و با افزایش فاصله پی از تاج شیروانی مقدار تأثیر لبه بر ظرفیت باربری کاهش می‌یابد.

شکل ۸. تغییرات نسبت ظرفیت باربری پی نواری با نسبت متغیر  $H_s/B$  و  $b/B$ fig. 8. Variation in bearing capacity ratio in terms of  $H_s/B$  and  $b/B$ شکل ۹. تغییرات ظرفیت باربری نهایی پی نواری با نسبت متغیر  $b/B$ fig. 9. Variation in bearing capacity ratio in terms of  $b/B$ 

### ۴.۴. نشست

برای ارزیابی رفتار پی‌های لبه‌دار از نظر نشست، مقادیر نشست مدل پی بهسازی شده با لبه در مجاورت شیروانی ماسه‌ای در سطوح تنش اعمالی معادل ۱۰۰ درصد ظرفیت باربری نهایی پی سطحی بدون لبه در مجاورت شیروانی با فاصله قرارگیری

مقادیر کج شدگی در حالت تقویت شده با افزایش عمق لبه افزایش می‌یابد و در مقادیر نشست بالاتر افزایش بیشتری داشته است. مشاهده شد که در فاصله قرارگیری  $b/B=0$ ، در مقدار نشست ۱۵ درصدی عرض پی با افزایش عمق لبه مقدار کج شدگی ۴۸٪ تا ۲۴ درصد کاهش می‌یابد. در حالی که مقدار کج شدگی برای شرایط مشابه با استفاده از لبه با عمق ۴ برابر عرض پی ۲۶٪ افزایش می‌یابد.

#### ۵.۴. سازوکار گسیختگی

در ادامه این تحقیق، تأثیر استفاده از لبه بر سازوکار گسیختگی پی نواری در نزدیکی شیروانی ماسه‌ای بررسی شد. در شکل (۱۱) حالت‌های بالقوه سازوکار گسیختگی پی در مجاورت شیروانی ارائه شده است. حالت شکست (a) زمانی قابل مشاهده است که شیروانی خود پایدار باشد و پی به فشار حد خود برسد.

حالت شکست (b) به عنوان شکست شیروانی کلی شناخته می‌شود و تحت بارگذاری به دلیل وزن توده خاک رخ می‌دهد. حالت شکست (c) زمانی اتفاق می‌افتد که فاصله پی از تاج شیروانی زیاد بوده و تأثیر شیب از بین رفته و سازوکار گسیختگی مانند گسیختگی پی در زمین هموار می‌شود (مفیدی و همکاران، ۲۰۱۴ [39]).

شکل ۱۱. حالت‌های گسیختگی: (a,c) گسیختگی ظرفیت باربری، (b) گسیختگی پای شیروانی، (d) سازوکار گسیختگی پی مستقر بر هندسه افقی بهسازی شده با لبه

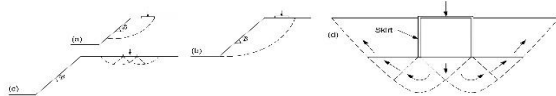


fig. 11. Failure modes: (a, c) bearing capacity failure; (b) overall slope failure; (d) failure mechanism of footing resting on horizontal ground with skirt

لبه و خاک محدود شده توسط آن به عنوان یک سیستم برای انتقال بار به خاک تا نوک لبه عمل می‌کنند. شکل (۱۱) (d) سازوکار احتمالی گسیختگی برای پی لبه‌دار را نشان می‌دهد. حضور لبه، سازوکار گسیختگی پی کم عمق را به لایه‌های عمیق‌تر خاک منتقل می‌کند. در این تحقیق از لبه عمودی در یک طرف استفاده شد.

پی از لبه شیروانی برابر، مقایسه شد. استفاده از مقادیر کاهش نشست (SRF) به دلیل وجود لبه با در نظر گرفتن نسبت نشست  $(s_s/s_0)$  در شکل (۱۰)، ارائه شده است. مقایسه نتایج نشست پی لبه‌دار و بدون تسلیح کننده در شرایط یکسان و در یک بار مشخص نشان داد که وجود لبه موجب کاهش نشست می‌شود. نسبت نشست بستگی به مقدار بار انتخابی، عمق لبه و فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی دارد. حضور لبه موجب کاهش نشست بین ۷ تا ۷۲ درصد نشست در حالت بدون مسلح کننده می‌شود. به بیان دیگر، در پی مستقر بر شیروانی ماسه‌ای با فاصله قرارگیری  $b/B=0$ ، استفاده از لبه با عمق ۴ برابر عرض پی بیشترین تأثیر بر کاهش نشست را داشته است.

شکل ۱۰. تغییرات نسبت نشست در مقابل پارامتر بی بعد  $H_s/B$

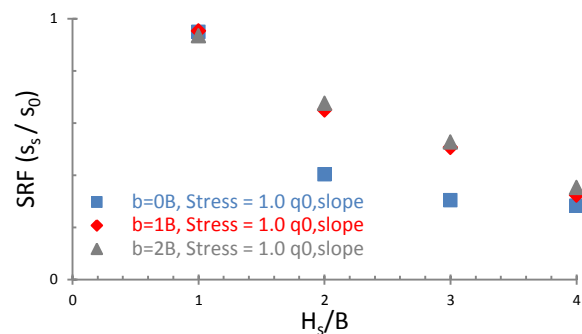


fig. 10 Variation in settlement ratio in terms of  $H_s/B$

#### کج شدگی پی

قرارگیری پی در مجاورت شیروانی ماسه‌ای موجب نشست نامتقارن و در نتیجه کج شدن پی می‌شود. تأثیر حضور لبه در یک طرف پی در مجاورت شیروانی بر روی مقادیر کج شدگی پی بررسی شد. مقادیر نشست نامتقارن و کج شدگی برای پی‌های نواری با/بدون لبه مستقر در مجاورت شیروانی ماسه‌ای در مقادیر مختلف نشست اندازه‌گیری شده و در جدول (۴) ارائه شد. افزایش فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی ماهیت نامتقارن سازوکار شکست را کاهش داده و امکان پشتیبانی بیشتری را از سمت شیروانی فراهم می‌نماید. همچنین، ارزیابی نتایج نشان داد که پی نواری نزدیک شیروانی ماسه‌ای دارای زاویه کج شدگی در جهت عقربه‌های ساعت بوده و پس از بهسازی شرایط با لبه، جهت زاویه کج شدگی تغییر می‌کند.

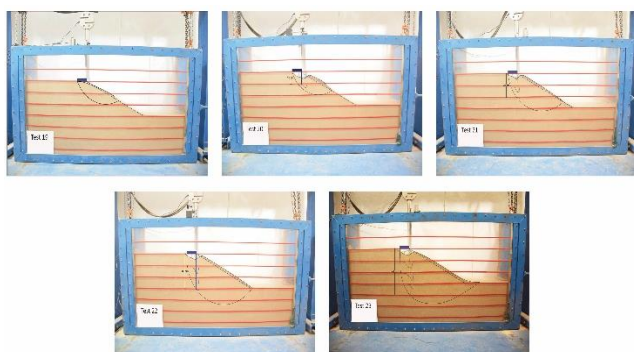
جدول ۴. مقادیر کج شدگی پی نواری در حالت بهسازی با لبه و بدون بهسازی در مقادیر متفاوت نشست

| Test series | model No.           | H <sub>s</sub> /<br>B | b/B | Tilt (degree) |        |         |         |
|-------------|---------------------|-----------------------|-----|---------------|--------|---------|---------|
|             |                     |                       |     | s/B=2%        | s/B=5% | s/B=10% | s/B=15% |
| Series. 04  | Test No.<br>19      | 0                     | 0   | + 0.36        | + 1.25 | + 2.89  | + 4.69  |
|             | Test No.<br>20      | 1                     |     | - 0.36        | - 1.20 | - 1.81  | - 2.41  |
|             | Test No.<br>21      | 2                     |     | - 0.55        | - 1.27 | - 2.21  | - 3.00  |
|             | Test No.<br>22      | 3                     |     | - 0.58        | - 1.54 | - 2.70  | - 3.53  |
|             | Test No.<br>23      | 4                     |     | - 0.74        | - 2.05 | - 4.23  | - 5.94  |
| Series. 05  | Test No.<br>24      | 0                     | 1   | + 0.12        | + 0.33 | + 1.08  | + 2.02  |
|             | Test No.<br>25      | 1                     |     | - 0.26        | - 0.79 | - 1.63  | - 2.46  |
|             | Test No.<br>26      | 2                     |     | - 0.47        | - 1.18 | - 2.07  | - 2.74  |
|             | Test No.<br>27      | 3                     |     | - 0.55        | - 1.52 | - 2.72  | - 3.70  |
|             | Test No.<br>28      | 4                     |     | - 0.68        | - 1.85 | - 3.86  | - 5.40  |
| Series. 06  | Test No.<br>29      | 0                     | 2   | + 0.03        | + 0.19 | + 0.63  | + 1.09  |
|             | Test No.<br>30      | 1                     |     | - 0.28        | - 0.83 | - 1.87  | - 3.05  |
|             | Test No.<br>31      | 2                     |     | - 0.55        | - 1.46 | - 2.63  | - 3.70  |
|             | Test No.<br>32      | 3                     |     | - 0.73        | - 1.95 | - 3.53  | - 4.69  |
|             | Test No.<br>33      | 4                     |     | - 0.83        | - 2.28 | - 4.66  | - 6.29  |
| ×           | The model is failed |                       |     |               |        |         |         |
| +           | Clockwise ⤵         |                       |     |               |        |         |         |
| -           | Anticlockwise ⤴     |                       |     |               |        |         |         |

**Table.4.** The measured tilt values for strip footings with/without single side skirt resting on the horizontal ground of sand slope for various settlements

مجاورت شیروانی ماسه‌ای، طول سطح گسیختگی را افزایش می‌دهند.

شکل ۱۲. سطح گسیختگی در مدل‌سازی فیزیکی (آزمایش‌های سری ۰۱)



**fig. 12.** Failure surfaces in physical modeling tests (test Series 01)

سطوح گسیختگی در مدل‌های آزمایشگاهی سری ۰۱ در شکل (۱۲) نشان داده شده است. ارزیابی نتایج نشان داد که وجود لبه منجر به افزایش سطح شکست می‌شود. همچنین، لبه مورد استفاده بسته به عمق لبه و فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی بر نوع سازوکار گسیختگی از شکست کم عمق به لغزش پای شیروانی یا عمیق تأثیر می‌گذارد. از بررسی سازوکار گسیختگی پی مستقر بر یک لایه همگن، مشخص شده است که ظرفیت باربری با افزایش طول کل سطح گسیختگی افزایش می‌یابد که مقاومت برشی بالاتری را بسیج می‌نماید. از اینرو می‌توان تصور کرد که لبه با اتصال صلب در یک طرف پی نواری کم عمق در

## ۵. اثر مقیاس

مدل فیزیکی تحت شتاب جاذبه زمین، یکی از متداول‌ترین روش‌ها به منظور پیش‌بینی رفتار سازه ژئوتکنیکی در مقیاس واقعی به شمار می‌آید. در مدل‌سازی فیزیکی کوچک مقیاس، به دلیل تاثیر مقیاس بر نتایج در نظر گرفتن آثار مقیاس به ویژه برای پی‌های مستقر بر خاک دانه‌ای امری ضروری است. بسیاری از پژوهشگران به بررسی تاثیر آثار مقیاس پرداخته‌اند. پژوهشگران نشان داده‌اند که سه عامل عرض پی (شیرایشی، ۱۹۹۰ [40] و سراتو و لوتنگر [41])، نسبت اندازه ذرات ماسه به عرض پی (تاتسوئوکا و همکاران، ۱۹۹۱ [42]) و میانگین تنش در زیر پی (یاماگوچی و همکاران، ۱۹۹۷ [43]) بر پاسخ پی تاثیر می‌گذارد.

کوزاکابه [44] در سال ۱۹۹۵ نشان داد که، مادامی که نسبت عرض پی به متوسط اندازه ذرات بزرگتر از ۵۰ تا ۱۰۰ برابر باشد، آثار اندازه ذرات در نتایج به دست آمده ناچیز می‌باشد. در این پژوهش، متوسط اندازه ذرات برابر با ۰٫۳۵ میلی‌متر است. بنابراین، نسبت عرض پی مورد استفاده به متوسط اندازه ذرات بزرگتر از ۱۰۰ می‌باشد. در نتیجه، از تاثیر اندازه ذرات ماسه بر نتایج آزمایش اجتناب می‌شود. با این حال، اثر مقیاس مربوط به تغییرات در سطح متوسط تنش در زیر شالوده به طور اجتناب ناپذیری در مدل‌سازی فیزیکی وجود خواهد داشت و اجتناب از آن دشوار است. به هر حال، در این تحقیق روند کلی رفتار پی لبه‌دار و تعیین کمیت تاثیر پارامترهای مختلف بر نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته است. بنابراین، اثرات مقیاس تاثیر قابل توجهی بر رفتار نسبی پی لبه‌دار و بدون مسلح کننده نخواهد داشت.

تحلیل ابعادی به منظور مقیاس کردن مدل فیزیکی و ارزیابی آثار مقیاس مطابق با قضیه  $\Pi$  باکینگهام (۱۹۱۴) انجام شد. در این تحقیق، تابع  $F$  (رابطه ۱) حاکم بر سیستم را می‌توان به صورت زیر بیان داشت،

$$F(B, H_s, b, H, \beta, q_0, q_s, s_0, s_s) = 0 \quad (1)$$

ضریب مقیاس هندسی به عنوان پارامتر طول در نمونه واقعی ( $L_p$ ) و مدل ( $L_m$ ) تعریف شد که نسبت آنها برابر با  $(L_p/L_m) N=10$  در نظر گرفته شد.

## ۶. نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، ظرفیت باربری و رفتار نشست پی‌های نواری با/بدون لبه در مجاورت شیروانی ماسه‌ای تحت بارگذاری عمودی، با استفاده از یک سری مدل‌سازی فیزیکی ارزیابی شد. این تحقیق کاربرد بالقوه پی نواری لبه‌دار به منظور افزایش قابل توجه ظرفیت باربری و کاهش نشست در مقایسه با پی نواری سطحی بدون بهسازی در مجاورت شیروانی را نشان داده است. از نتایج مدل‌های آزمایشگاهی نتایج زیر بدست آمد:

۱. مقایسه منحنی بار-نشست مدل‌های پی نواری در مجاورت شیروانی ماسه با در نظر گرفتن فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی به عنوان متغیر، نشان داد که با افزایش مقادیر  $b/B$  تاثیر حضور شیروانی کمتر شده و ظرفیت باربری افزایش می‌یابد.

۲. بهسازی پی نواری در مجاورت شیروانی ماسه‌ای بسته به نسبت عمق لبه به عرض پی ( $H_s/B$ ) و فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی به عرض پی ( $b/B$ )، ظرفیت باربری را در حدود ۱٫۰۴ تا ۲٫۳۲ برابر نسبت به حالت بدون تسلیح کننده افزایش می‌دهد.

۳. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که مقدار ظرفیت باربری با افزایش عمق لبه افزایش می‌یابد.

۴. استفاده از لبه در یک طرف پی نواری در مجاورت شیروانی ماسه‌ای، نشست پی را در یک بار اعمال شده معین به مقدار ۷ تا ۷۲ درصد مقدار بدون بهسازی کاهش می‌دهد.

۵. قرارگیری پی روی زمین افقی در مجاورت شیروانی ماسه‌ای باعث نشست نامتقارن و در نتیجه کج شدن پی در جهت عقربه‌های ساعت می‌شود. استفاده از لبه موجب تغییر زاویه کج شدگی می‌شود.

۶. استفاده از لبه در پی سطحی نواری در نزدیکی شیروانی ماسه‌ای منجر به افزایش سطح شکست می‌شود و بسته به طول لبه و فاصله قرارگیری پی از تاج شیروانی، الگوی شکست خاک را تغییر می‌دهد. افزایش طول سطح شکست، مقاومت برشی بالاتری را به همراه داشته و منجر به افزایش ظرفیت باربری می‌شود.

## ۷. مراجع

of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 168(6), 539-550.

15. Villalobos FAJ (2007) Bearing capacity of skirted foundations in sand. VI Congreso Chileno de Geotecnia SOCHIGE. Ponti Ficia Catholic University, Valdivia, Chile.

16. Punrattanasin, P. (2009). The horizontal capacity of circular and square sheet pile skirted foundations at various sand densities. International Journal of Geotechnical Engineering, 3(4), 499-507.

17. Gholipour, S., & Makarchian, M. (2018). Study of the behaviour of skirted shallow foundations resting on sand. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 18(3), 117-130.

18. Mahmood, M. R., Fattah, M. Y., & Khalaf, A. (2020). Experimental investigation on the bearing capacity of skirted foundations on submerged gypseous soil.

19. Al-Aghbari, M. Y., & Mohamedzein, Y. E. A. (2020). The use of skirts to improve the performance of a footing in sand. International Journal of Geotechnical engineering, 14(2), 134-141.

20. Watson, P. G., & Randolph, M. F. (1998). SKIRTED FOUNDATIONS IN CALCAREOUS SOIL. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 131(3), 171-179.

21. Byrne, B.W. (2000). Investigations of suction caissons in dense sand. PhD thesis. Oxford University, Oxford, UK.

22. Byrne, B. W., Villalobos, F., Houlsby, G. T., & Martin, C. M. (2003). Laboratory testing of shallow skirted foundations in sand. In BGA International Conference on Foundations: Innovations, observations, design and practice: Proceedings of the international conference organized by British Geotechnical Association and held in Dundee, Scotland on 2-5th September 2003 (pp. 161-173). Thomas Telford Publishing.

23. Yun, G. J., & Bransby, M. F. (2003). Centrifuge modeling of the horizontal capacity of skirted foundations on drained loose sand. In BGA International Conference on Foundations: Innovations, observations, design and practice: Proceedings of the international conference organised by British Geotechnical Association and held in Dundee, Scotland on 2-5th September 2003 (pp. 975-984). Thomas Telford Publishing.

24. Mana DSK, Gourvenec SM, Randolph MF and Hossain MS (2012) Failure mechanisms of skirted foundations in uplift and compression. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics 12(2):47-62.

25. Acosta-Martinez, H. E., Gourvenec, S., & Randolph, M. F. (2012). Centrifuge study of capacity of a skirted foundation under eccentric transient and sustained uplift. Géotechnique, 62(4), 317-328.

26. Bransby, M. F., & Randolph, M. F. (1997, January). Finite element modelling of skirted strip footings subject to combined loadings. In The Seventh International Offshore and Polar Engineering

1. Hu, Y., Randolph, M. F., & Watson, P. G. (1999). Bearing response of skirted foundation on nonhomogeneous soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125(11), 924-935.

2. Zhu, F. (1999). Centrifuge modelling and numerical analysis of bearing capacity of ring foundations on sand. PhD thesis, Memorial University of Newfoundland, St. John's, Canada.

3. Eid, H. T. (2013). Bearing capacity and settlement of skirted shallow foundations on sand. International Journal of Geomechanics, 13(5), 645-652.

4. Eid HT, Alansari OA, Odeh AM, Nasr MN and Sadek HA (2009) A comparative study on the behavior of square foundations resting on confined sand. Canadian Geotechnical Journal 46(4): 438-453.

5. Fiumana, N., Bienen, B., Govoni, L., Gourvenec, S., Cassidy, M. J., & Gottardi, G. (2019). Combined loading capacity of skirted circular foundations in loose sand. Ocean Engineering, 183, 57-72.

6. Al-Aghbari, M. Y., & Khan, A. J. (2002). Behaviour of Shallow Strip Foundations With Structural Skirts Resting On Dense Sand. In Challenges of Concrete Construction: Volume 6, Concrete for Extreme Conditions: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 9-11 September 2002 (pp. 737-746). Thomas Telford Publishing.

7. Al-Aghbari, M. Y., & Mohamedzein, Y. E. (2004). Bearing capacity of strip foundations with structural skirts. Geotechnical and Geological Engineering, 22(1), 43-57.

8. Al-Aghbari, M. Y., & Mohamedzein, Y. A. (2006). Improving the performance of circular foundations using structural skirts. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 10(3), 125-132.

9. Al-Aghbari, M. Y. (2007). Settlement of shallow circular foundations with structural skirts resting on sand. J Eng Res, 4(1), 11-16.

10. Al-Aghbari, M. Y., & Dutta, R. K. (2008). Performance of square footing with structural skirt resting on sand. Geomechanics and Geoenvironment: An International Journal, 3(4), 271-277.

11. El Wakil, A. Z. (2010). Horizontal capacity of skirted circular shallow footings on sand. Alexandria Engineering Journal, 49(4), 379-385.

12. El Wakil, A. Z. (2013). Bearing capacity of skirt circular footing on sand. Alexandria Engineering Journal, 52(3), 359-364.

13. 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(4), 371-377.

14. Momeni, E., Nazir, R., Armaghani, D. J., & Sohaie, H. (2015). Bearing capacity of precast thin-walled foundation in sand. Proceedings of the Institution

36. Ghasemzadeh, H., and F. Akbari. (2019). Determining the bearing capacity factor due to nonlinear matric suction distribution in the soil. *Can. J. Soil Sci.* 99 (4): 434-446.
37. 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.
38. Keskin, M. S., and M. Laman. (2013). Model Studies of Bearing Capacity of Strip Footing on Sand Slope. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 17 (4): 699-711.
39. Mofidi Rouchi, J., Farzaneh, O., & Askari, F. (2014). Bearing capacity of strip footings near slopes using lower bound limit analysis. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 47(1), 89-109.
40. Shiraishi, S. (1990). Variation in Bearing Capacity Factors of Dense Sand Assessed by Model Loading Tests. *Soils and Foundations*, 30(1), 17-26.
41. 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.
42. 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.
43. 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 and Foundation Engineering*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Japan, vol. 1, pp. 795-798.
44. 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).
- Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.
27. Bransby, M. F., & Randolph, M. F. (1998, January). The effect of skirted foundation shape on response to combined V-MH loadings. In *The Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.
28. Bransby, F., & Randolph, M. (1999). The effect of embedment depth on the undrained response of skirted foundations to combined loading. *Soils and Foundations*, 39(4), 19-33.
29. Hu, Y., & Randolph, M. F. (1998, January). H-adaptive FE analysis of bearing capacity of skirted foundations. In *The Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.
30. Bransby, M. F., & Yun, G. J. (2009). The undrained capacity of skirted strip foundations under combined loading. *Géotechnique*, 59(2), 115-125.
31. Azzam, W. R., & Farouk, A. (2010). Experimental and numerical studies of sand slopes loaded with skirted strip footing. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 795-812.
32. Azzam, W. R. (2015). Finite element analysis of skirted foundation adjacent to sand slope under earthquake loading. *HBRC Journal*, 11(2), 231-239.
33. Pusadkar, S. S., & Dhaygude, P. S. *PLAXIS 2D*.
34. 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.
35. 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.

# Bearing Capacity Evaluation of Skirted Reinforced Sand Slopes by Physical Modeling

E. Saeedi<sup>1</sup>, A. Razmkhah<sup>2\*</sup>, M. Kamalian<sup>3</sup>, F. Askari<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD Candidate of Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University.

<sup>2</sup> Assistant Professor of Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University.

<sup>3</sup> Professor of Geotechnical Engineering Research Centre, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES).

a\_razmkhah@azad.ac.ir

## Abstract

Foundations are sometimes located either on a sloped surface or near the crown of a slope. Obvious examples can be seen in the footings of bridges abutments, foundations near excavations, retaining walls, and electric transmission towers built on mountain slopes. When the footing is placed near the edge of sloping ground, the bearing capacity may be significantly reduced, depending on the location of the footing concerning the slope. Therefore, the bearing capacity and stability of a slope is one of the most important research issues in geotechnical engineering. The adjacent soil's bearing capacity and the slope's stability can be increased by installing continuous confining structures like skirts. Skirted foundations are a type of shallow foundation with internal or lateral skirts made of steel or reinforced concrete. Using a skirt due to confinement of the soil beneath the foundation and transmitting the shear Failure at the level of the skirt tip. In this research, a series of laboratory tests were conducted on strip footing models adjacent to sand slope with one side vertical skirt to evaluate the load-settlement response subjected to vertical compression loading. The effects of skirt depth ( $H_s$ ) and setback distance ( $b$ ) of the model on the bearing capacity and settlement of skirted foundations were studied. The results of the model tests have shown that using skirts improves the bearing capacity and settlement values of skirted foundations compared with shallow foundations without a skirt. The ultimate bearing capacity of skirted foundations increases up to about 104 to 232% with increasing the ratio of skirt depth to foundation width. To investigate the effect of setback distance on the skirted foundation behavior, three different distances of footing from crest to the width of the footing of 0, 1, and 2 were used. The results showed that the increase in the ratio of the distance of footing from the crest to the width of footing caused to increase in the ultimate bearing capacity of only footing. The results showed when the skirted footing is placed directly at the crest ( $b=0$ ), increasing the depth of skirts leads to a significant increase in the bearing capacity. By increasing the edge distance from the slope crest to the footing, the effect of utilized skirts decreases. The Settlement Reduction Factor (SRF) decreased from 4 to 72% with the increase in the depth of the skirt and with a decrease in setback distance. Furthermore, the effect of a single-side skirt strip foundation resting on the top of the sand slope was investigated on the values of foundation tilting and failure mechanism. Evaluating results showed that strip footing near the slope has a clockwise tilt angle and after using one single skirt the tilt angle got changed. It was observed that in setback distance  $b/B=0$  under  $s/B=15\%$  with an increase in skirt depth ( $H_s=1b, 3B$ ), the reduction values of footing tilt were from 46 to 24%, respectively. In the end, utilized skirts affect the failure mechanism and dependent on skirt length and setback distance change the failure pattern of the soil, face failure to toe, or base failure.

**Keywords:** Sandy slope, skirted foundation, physical modeling, bearing capacity, settlement, failure mechanism