مطالعه رفتار پی‌های سطحی واقع بر بستر ماسه محصور شده به‌صورت جانبی

سجاد قلی‌پور [۱] و مسعود مکارچیان [۲*]

[۱] دانش‌آموخته دکتری گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، sgholipour63@gmail.com
[۲] استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، makarchian@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸

کلمات کلیدی:
پی لبه‌دار
ظرفیت باربری
نشست
محصورسازی جانبی
مدل‌سازی فیزیکی

چکیده

رفتار پی‌های سطحی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه محصور با لبه محیطی توسط تحلیل عددی مطالعه شد. عملکرد پی‌های لبه‌دار با بررسی تاثیر پارامترهای مختلف تحلیل و با نتایج مدل‌های پی نیمه‌عمیق و سطحی مدفون در تراز لبه مقایسه شد. تاثیر محصورسازی جانبی ماسه بر رفتار پی‌ها، با بررسی پارامترهای عرض پی، مقاومت برشی ماسه، عمق لبه و زبری سطوح پی ارزیابی شد. نتایج تحلیل عددی با داده‌های مطالعه فیزیکی کوچک‌مقیاس مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری قائم پی‌های سطحی ناشی از محصورسازی جانبی توسط لبه، به‌طور قابل‌توجهی افزایش و نشست نیز کاهش می‌یابد. وجود لبه زیر پی سطحی باعث مقاومت در برابر جابه‌جایی جانبی خاک شده و منجر به بهبود قابل‌توجه در پاسخ پی می‌شود. بهبود رفتار با افزایش عمق لبه و کاهش مقاومت برشی ماسه، افزایش نشان داد. صرف‌نظر از پارامترهای مختلف، ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار حدود ۱/۸ تا ۳/۳ برابر مقادیر متناظر پی‌های سطحی افزایش یافته و نشست نیز حدود ٪۵۴ کاهش پیدا کرد. مقایسه نتایج نشان داد که مقادیر ظرفیت باربری و نشست پی‌های لبه‌دار نزدیک به مقادیر پی‌های نیمه‌عمیق با عمق و عرض یکسان است.

Study on the Behavior of Surface Foundations resting on Lateral Confined Sand Bed

Gholipour Sajjad[1], Makarchian Masoud[2*]

[1] PhD of Civil Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, sgholipour63@gmail.com
[2] Assistant Professor of Civil Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, makarchian@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 16 Nov. 2021
Accepted: 17 Apr. 2022

Keywords:
Skirted Foundation
Bearing Capacity
Settlement
Physical Modeling
Lateral Confinement

ABSTRACT

The behavior of circular surface foundations resting on sand, surrounded by peripheral skirt was studied by numerical analysis. The performance of skirted foundations was analyzed by evaluating the effect of different parameters and compared with the results of semi-deep and embedded foundations in the depths of skirt tip. The effect of lateral sand confinement on foundations behavior was evaluated by examining the parameters of foundation width, sand shear strength, skirt depth, and surface roughness. The results of numerical analysis were compared with small-scale physical modeling data. The results showed that the vertical bearing capacity of surface foundations due to lateral confinement, significantly increased and the settlement also decreased. The skirt existence causes resistance to soil lateral displacement and leads to a significant improvement in the response of the foundation. The improvement values increased with increasing skirt depth and decreasing sand shear strength. Depending on the different parameters, bearing capacity of skirted foundations increased by about 1.8 to 3.3 times, and settlement values reduced up to 54% those of surface foundations. Comparison of the results showed that the values of bearing capacity and settlement of skirted foundations are close to those of pier foundations with the same depth and width.

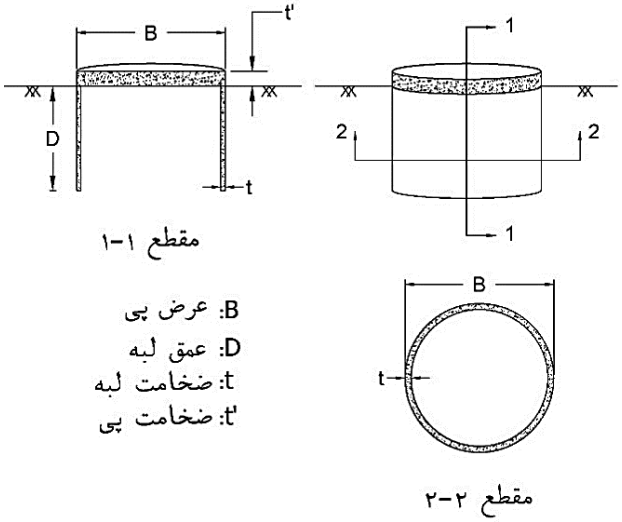
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.2.3]

۱ - مقدمه

مهندسان ژئوتکنیک همواره در حال تحقیق و توسعه بر روی روش‌های مناسب جهت جایگزینی پی‌های سطحی و عمیق متداول هستند، به‌طوری که الزامات ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی را بدون افزایش عرض پی برآورد نموده و محدودیت‌های اجرایی پی‌های عمیق را به حداقل میزان ممکن برساند. با توجه به عدم قابلیت اطمینان پی‌های سطحی به‌لحاظ محدودیت‌های باربری و نشست، پی‌های عمیق به‌طور وسیعی در انواع سازه‌های ساحلی و فراساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال محدودیت تجهیزات پیچیده ساخت و نصب، هزینه، زمان نصب و مسائل زیست‌محیطی مربوط به پی‌های عمیق، کاربرد گسترده این نوع پی‌ها را محدود می‌سازد. استفاده از صفحات قائم در زیر محیط پیرامونی پی‌های سطحی به‌عنوان لبه‌های سازه‌ای، مفهوم جدیدی از انواع پی‌ها را تحت عنوان پی‌های لبه‌دار، که در حال گسترش به‌عنوان جایگزین مناسب برای سایر انواع پی‌های متداول هستند، توسعه داده است.

پی‌های لبه‌دار شامل پی سطحی در بالا و دیواره‌های جدارنازکی تحت عنوان لبه در پیرامون هستند که لبه‌ها با ایجاد محصورسازی جانبی خاک زیر پی و درون لبه و تشکیل سیستم یکپارچه، بارهای سازه را در تراز نوک لبه به لایه‌های مستحکم زیرین خاک منتقل می‌کند. نمای شماتیک از جزئیات پی‌های لبه‌دار در شکل ۱ مشاهده می‌شود. پی‌های لبه‌دار با افزایش عمق موثر پی و افزایش سربار خاک در تراز نوک لبه، ملزومات ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی را همراه با کاهش عمق مدفون و ابعاد این نوع پی‌ها، تامین می‌نماید. پی‌های لبه‌دار از مزایای بزرگی همچون کاهش هزینه مصالح ساخت، کاهش میزان حجم گودبرداری، کوتاه کردن دوره ساخت و محدودیت‌های اجرایی کمتر نسبت به پی‌های متداول برخوردار هستند. این نوع پی‌ها به‌طور گسترده‌ای در پی مخازن ذخیره صنایع نفت و پتروشیمی، توربین‌های بادی، سکوهای حفاری نفت و گاز، پایه پل‌ها و ایجاد جزایر مصنوعی و اسکله‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

علیرغم وجود مطالعات گسترده و توسعه روابط نظری و تجربی جهت پیشگویی و تخمین ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی و عمیق با دقت قابل‌قبول، چنین روابط متناظر و تخمین‌های دقیقی برای پی‌های لبه‌دار وجود ندارد. در حالی‌که بیشتر خاک‌های واقع بر خشکی و سواحل معمولاً خاک‌های دانه‌ای هستند، غالب مطالعات مشابه قبلی در مورد پی‌های لبه‌دار، بر خاک‌های ریزدانه کف دریا و پیشگویی رفتار زهکشی نشده خاک رسی متمرکز بوده است. بنابراین نیاز به تحقیق و بررسی عملکرد پی‌های لبه‌دار با تمرکز بر ارزیابی تاثیر پارامترهای مختلف هندسه پی و لبه و همچنین مشخصات خاک‌های دانه‌ای، ضروری به‌نظر می‌رسد. در حالت کلی می‌توان اذعان داشت که با توجه به انتظار تغییرات قابل‌توجه در رفتار پی‌های سطحی ناشی از محصورسازی جانبی بستر ماسه توسط لبه، به‌کارگیری لبه می‌تواند نیاز به استفاده از پی‌های سطحی با ابعاد و عمق مدفون بزرگ و همچنین کاربرد پی‌های عمیق را کاهش دهد. مطالعه حاضر شامل تحلیل عددی المان محدود توسط نرم‌افزار تخصصی پلکسیس[1]، جهت بررسی عملکرد پی‌های دایره‌ای واقع بر بستر ماسه تحت بارگذاری قائم فشاری است. به‌منظور کمّی کردن اثرات محصورسازی جانبی ماسه توسط لبه، پارامترهای عرض پی، نسبت عمق لبه، زبری سطوح لبه و مقاومت برشی ماسه مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین جهت مقایسه رفتار و عملکرد پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های نیمه‌عمیق و پی‌های سطحی مدفون در تراز لبه، تعدادی تحلیل عددی مجزا نیز بر روی این نوع پی‌ها انجام شد.



شکل ۱- نمای شماتیک از جزئیات پی‌های لبه‌دار

۲ - پیشینه موضوع

بررسی عملکرد پی‌های لبه‌دار و اثر محصورسازی خاک بر رفتار پی‌های سطحی از طریق مدل‌سازی فیزیکی، تحلیل عددی و نظری انجام شده که در این بخش به تعدادی از نتایج گزارش شده توسط محققان مختلف اشاره می‌شود.

مطالعه رفتار پی‌های سطحی مربعی ناشی از محصورسازی جانبی ماسه توسط لبه از طریق انجام مدل‌سازی عددی و فیزیکی نشان داد که وجود دیواره صلب زیر پی‌های سطحی، ظرفیت باربری را افزایش و نشست را کاهش می‌دهد. تراز بهبود ظرفیت باربری پی با افزایش عمق دیواره و کاهش مقاومت برشی ماسه افزایش یافت. بر پایه نتایج، نمودارهایی جهت تخمین میزان افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی‌های سطحی برحسب مقادیر نسبت عمق دیواره به عرض پی و دانسیته نسبی ماسه ارائه شد [۲-۱]. در مطالعه مشابه دیگری حداکثر میزان بهبود ظرفیت باربری ناشی از وجود لبه زیر پی سطحی مربعی، به‌ازای طول لبه‌ای برابر با عرض مدل، حدود ۱/۸ برابر به‌دست آمد [۳].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.2.3]

تاثیر محصورسازی خاک بر رفتار پی‌های سطحی دایره‌ای با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و به‌کارگیری استوانه‌های پلیمری انعطاف‌پذیر با عرض و ارتفاع‌های مختلف زیر پی‌های سطحی، بررسی شد. نتایج نشان داد که محصورسازی جانبی خاک منجر به بهبود قابل‌توجهی در پاسخ پی با کاهش جابه‌جایی جانبی خاک می‌شود. برای عرض‌های کمتر استوانه، سیستم پی و استوانه به‌عنوان واحد یکپارچه عمل کرده و باعث بهبود ظرفیت باربری تا ۱۷ برابر شد [۴]. رفتار پی نواری واقع بر ماسه محصور شده توسط دیواره صلب توسط مدل‌سازی فیزیکی مطالعه و بهبود قابل‌توجه عملکرد مشاهده شد. بر پایه نتایج، ظرفیت باربری پی ۵۹٪ افزایش و نشست نیز تا ۱۶۰٪ کاهش نشان داد و بیشترین کارآمدی لبه زیر پی سطحی در خاک‌های ماسه‌ای سست به‌دست آمد [۵].

افزایش ظرفیت باربری در محدوده ۱/۵-۸ برابر و کاهش نشست تا حدود ۹۰٪ برای انواع پی‌های سطحی نواری، مربعی و دایره‌ای به‌دلیل استفاده از المان‌های فلزی به‌عنوان لبه پیرامون پی‌های سطحی توسط برخی محققان [۸-۶] گزارش شده است. در مطالعه مشابه دیگری، مقدار بهبود ظرفیت باربری برای پی دایره‌ای ناشی از لبه، حدود ۶/۲۵ برابر پی سطحی به‌دست آمد [۹].

ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار با لبه‌های میانی تحت بارگذاری ترکیبی بر روی رس توسط Benin و همکاران [۱۰]، مطالعه و تاثیرات وجود لبه بر عملکرد پی‌های سطحی بررسی شد. نتایج، تغییرات قابل‌توجه را در مکانیزم گسیختگی که منجر به افزایش اساسی در ظرفیت باربری می‌شود، نشان داد. با توجه به عملکرد مناسب این نوع پی‌ها، پتانسیل جایگزینی پی‌های لبه‌دار دارای لبه میانی به‌جای پی با قطر بزرگ و بدون لبه میانی گزارش شد.

تاثیر استفاده همزمان از لبه و شمع ماسه‌ای جهت تقویت پی‌های سطحی واقع بر رس نرم بررسی شد و نتایج قابل‌قبولی از بهبود ظرفیت باربری به‌دست آمد [۱۱].

مکانیزم گسیختگی و انتقال بار پی‌های لبه‌دار مطالعه و نتایج با پی‌های مدفون در تراز لبه، مقایسه شد. نتایج نشان داد که مکانیزم گسیختگی پی‌های لبه‌دار با افزایش طول لبه، تفاوتی با پی‌های مدفون ندارد [۱۳-۱۲].

ظرفیت باربری زهکشی نشده پی‌های لبه‌دار تحت بارگذاری‌های ترکیبی از طریق روش المان محدود با بررسی اثر هندسه لبه و مشخصات خاک رس مطالعه و پوش‌های گسیختگی برای اعماق مختلف لبه ارائه شد. نتایج نشان داد که افزودن لبه میانی به پی باعث افزایش قابل‌توجه در باربری پی‌های لبه‌دار می‌شود [۱۴].

بررسی بکارگیری پی‌های لبه‌دار در خاک‌های ریزدانه تحت بارگذاری قائم و ترکیبی، جهت مطالعه اثر طول لبه بر میزان ظرفیت باربری این نوع پی‌ها از طریق مدل‌سازی عددی انجام گرفت. نتایج تحلیل، بهبود ۳ برابری ظرفیت باربری پی‌های سطحی را ناشی از وجود لبه زیر پی نشان داد. همچنین در این مطالعه منحنی‌های پوش گسیختگی پی‌های لبه‌دار تحت بارگذاری ترکیبی افقی و قائم برای حالت‌های مختلف ارائه شد [۱۵].

کاربرد پی‌های لبه‌دار جهت بهبود رفتار باربری و نشست خاک‌های ریزشی ناشی از تاثیر رطوبت، از طریق مطالعه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعه قابلیت استفاده از لبه جهت افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی‌های سطحی واقع بر چنین خاک‌هایی را با اصلاح رفتار تنش- نشست نشان داد. در این مطالعه، بسته به خصوصیات هندسی لبه و مشخصات خاک ریزشی، میزان ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار در محدوده ۱/۹۲ تا ۲/۲۷ برابر افزایش پیدا کرد [۱۶].

تخمین ظرفیت باربری پی‌های نواری لبه‌دار واقع بر خاک‌های بدون چسبندگی تحت شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی، با استفاده از نظریه خط لغزش مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج تحلیل بیانگر کسب مقادیر کمتر ظرفیت باربری نسبت به مقادیر متناظر روش تحلیل حد بالا و نزدیک به مقادیر تحقیقات آزمایشگاهی و تجربی بود. در شرایط لرزه‌ای ناشی از حضور لبه، کاهش در مقادیر ظرفیت باربری پی لبه‌دار نسبت به حالت بدون لبه مقدار کمتری گزارش شد [۱۷].

رفتار لرزه‌ای پی‌های لبه‌دار واقع بر خاک ماسه‌ای و با قابلیت روانگرایی از طریق آزمایش‌های سانتریفیوژ مطالعه شد که بر اساس نتایج، توانایی خوب این نوع پی‌ها در جهت کاهش اثرات مخرب و ناپایدار روانگرایی توسط لبه در هنگام رخداد زلزله گزارش شد [۱۸].

عملکرد پی‌های لبه‌دار در مجاورت شیب‌های ماسه‌ای تحت بارگذاری زلزله از طریق تحلیل المان محدود [۱۹] بررسی شد. نتایج تحلیل، تاثیر و کارآمدی بزرگ وجود لبه بر افزایش پایداری کلی سیستم پی و شیب و همچنین کنترل جابه‌جایی‌های افقی و قائم خاک زیر پی، را نشان داد.

رفتار باربری پی‌های لبه‌دار با شکل پی نامنظم از طریق مدل‌سازی فیزیکی بر روی مدل‌های پی پنج‌ضلعی واقع بر خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفت [۲۰]. در این مطالعه اثرات وجود لبه محیطی تک در پیرامون و همچنین لبه اضافی درون لبه محیطی، بر میزان تاثیرگذاری آن در بهبود ظرفیت باربری نسبت به پی سطحی بررسی شد. نتایج ظرفیت باربری مدل‌های پی واقع بر ماسه با دانسیته نسبی ۳۰٪ نشان داد که برای پی‌های لبه‌دار به‌ازای نسبت طول لبه معادل با ۱/۵ برابر قطر متوسط پی، ظرفیت باربری در حالت لبه محیطی تک حدود ۹۱٪ و در حالت لبه اضافی حدود ۹۵٪ مقادیر بیشتری را نسبت به پی سطحی ارائه می‌دهد. این موضوع بیانگر افزایش جزئی (حدود ۴٪) در میزان باربری به‌ازای لبه اضافی در زیر پی لبه‌دار می‌باشد [۲۰].

پیشگویی مقادیر ظرفیت باربری و نشست پی‌های لبه‌دار با آرایش‌های مختلف لبه‌ها در زیر پی سطحی واقع بر ماسه، با استفاده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.2.3]

از روش شبکه‌های عصبی و تحلیل رگرسیون انجام گرفت. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که مقادیر بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست انواع پی‌های لبه‌دار، عمدتاً ناشی از پارامترهای طول لبه و زاویه اصطکاک ماسه تحت تاثیر قرار می‌گیرد [۲۱].

بر پایه نتایج گزارش شده از بهبود رفتار پی‌های لبه‌دار از نظر افزایش ظرفیت باربری و اصلاح منحنی بار- نشست پی‌های سطحی توسط لبه، به‌کارگیری این نوع پی‌ها می‌تواند انتخاب مفید و مقرون به‌صرفه باشد. با این حال مطالعات بر رفتار و عملکرد این نوع پی‌ها، به‌خصوص در کشور ایران در مقایسه با سایر کشورهای جهان، نسبتاً محدود است که نیاز به بررسی بیشتر و جامع‌تری در این موارد احساس می‌شود. در این مقاله، به‌کمک تحلیل المان محدود و استفاده از نرم‌افزار پلکسیس و همچنین مدل‌سازی فیزیکی توسط نمونه‌های کوچک‌مقیاس، نتایج ارزیابی رفتار پی‌های لبه‌دار دایره‌ای واقع بر خاک ماسه‌ای برحسب ظرفیت باربری و نشست تحت بارگذاری قائم فشاری، ارائه می‌شود. همچنین تعدادی مدل‌سازی بر روی پی‌های نیمه‌عمیق و سطحی مدفون نیز جهت مقایسه با عملکرد پی‌های لبه‌دار انجام می‌گیرد. لازم به گفتن است که این پژوهش نسبت به تحقیقات مشابه قبلی، در موارد زیر متمایز است:

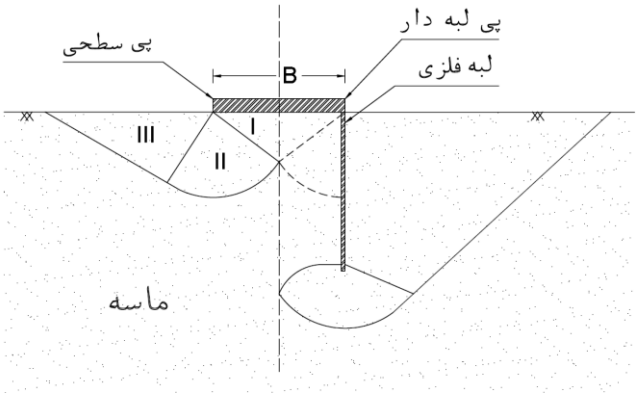
- مقایسه مقادیر ظرفیت باربری و نشست پی‌های لبه‌دار با پی‌های سطحی؛
- مقایسه عملکرد پی‌های لبه‌دار با پی‌های نیمه‌عمیق و مدفون؛
- درنظرگیری دانسیته نسبی ماسه، علاوه بر زاویه اصطکاک جهت ارائه نمودارهای تخمین باربری و نشست؛
- تحلیل مدل‌های کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس؛
- صحت‌سنجی نتایج تحلیل عددی با نتایج مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس.

۳ - بررسی نظری مسئله

برای پی سطحی واقع بر ماسه و تحت بارگذاری محوری، ظرفیت باربری نهایی تئوریک، q_{ult}، می‌تواند از رابطه (۱) محاسبه شود؛ به‌طوری که γ وزن واحد خاک، D_f، عمق مدفون پی، N_q و N_γ ضرایب ظرفیت باربری بر پایه زاویه اصطکاک داخلی ماسه (φ)، s_q، s_γ و d_q، d_γ به‌ترتیب ضرایب شکل و عمق و B عرض پی هستند [۲۲].

$$q_{ult} = \gamma D_f N_q s_q d_q + 0.5\,\gamma\, B\, N_\gamma s_\gamma d_\gamma \qquad (۱)$$

با در نظرگیری پارامترهای موثر بر ظرفیت باربری پی بر اساس رابطه (۱)، یکی از روش‌های افزایش میزان باربری پی‌های سطحی علاوه بر افزایش عرض پی و مدفون کردن پی سطحی، افزایش سربار (γD_f) از طریق محصورسازی جانبی ماسه توسط لبه در اعماق پایین‌تر است. بنابراین استفاده از لبه زیر پی‌های سطحی و محصورسازی جانبی ماسه در این راستا بوده و می‌تواند با افزایش عمق موثر و سربار خاک در تراز نوک لبه و تغییر گوه گسیختگی، عملکرد پی‌های سطحی را به‌لحاظ افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست، بهبود ببخشد. شکل ۲ نوع و تفاوت گوه‌های گسیختگی را برای پی‌های سطحی و لبه‌دار ناشی از وجود لبه، نشان می‌دهد. عمیق‌تر شدن گوه گسیختگی با انتقال آن به تراز نوک لبه و تغییر مرزهای گوه ناشی از وجود لبه در شکل کاملاً مشخص است که منجر به بهبود عملکرد پی‌های سطحی می‌شود. در این مطالعه، تاثیر تغییر الگوی گسیختگی و افزایش سربار به‌دلیل وجود لبه مطابق شکل ۲، بر مقادیر ظرفیت باربری و نشست پی‌های بررسی می‌شود.



شکل ۲- مکانیزم گسیختگی پی‌های سطحی و لبه‌دار

۴ - جزئیات مدل‌سازی

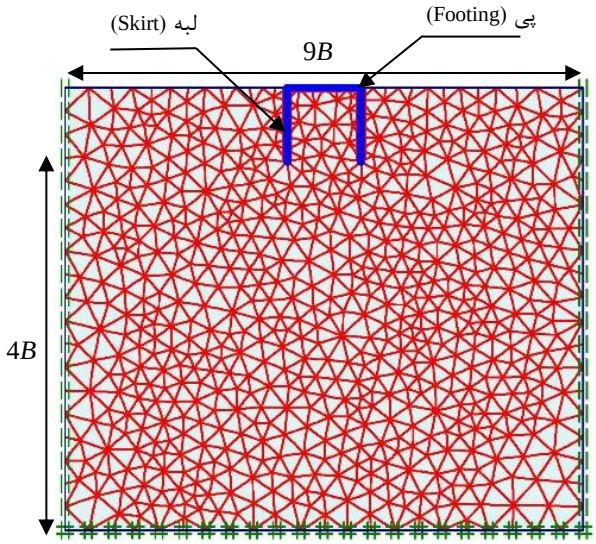
در این پژوهش به‌منظور مطالعه و ارزیابی کامل رفتار بار- نشست مدل‌های پی لبه‌دار در مقایسه با سایر انواع پی‌ها، دو نوع مدل‌سازی کلی شامل مدل‌سازی فیزیکی (آزمایشگاهی) و عددی بر روی انواع مدل‌های کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس انجام گرفت که جزئیات کامل نحوه انجام مدل‌سازی، پارامترهای مورد مطالعه، ابعاد هندسی مدل‌ها، خصوصیات نوع خاک و شرایط مدل‌سازی در زیر به تفکیک تشریح شده است.

۴-۱- مدل‌سازی عددی

تحلیل المان محدود گسترده توسط نرم‌افزار پلکسیس جهت بررسی اثرات وجود لبه بر رفتار پی‌های سطحی واقع بر ماسه تحت بارگذاری محوری انجام گرفت. جهت مدل‌سازی شبکه المان، از المان‌های ۱۵ گرهی مثلثی و به‌منظور شبیه‌سازی سطوح فصل مشترک مدل پی با ماسه، از ضریب کاهش مقاومت (R_{inter}) استفاده شد. به‌منظور حداقل کردن تاثیر شرایط مرزی بر نتایج، براساس نتایج تحلیل حساسیت و نیز استناد به منابع فنی [۲۵-۲۳]، فاصله مرزهای قائم شبکه المان محدود از لبه پی و فاصله قائم زیر تراز نوک لبه تا مرز افقی حداقل ۴ برابر عرض پی، $4B$ در نظر گرفته شد. شکل ۳ جزئیات کامل ابعاد شبکه المان و شرایط مرزی درنظر گرفته شده برای مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

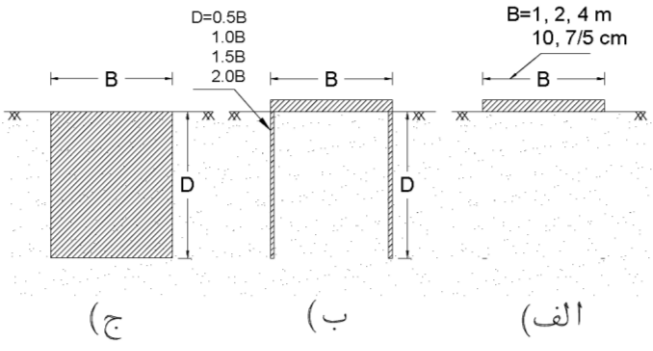
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.2.3]



شکل ۳- ابعاد شبکه المان و شرایط مرزی مدل‌سازی

به‌منظور مقایسه نتایج تحلیل عددی با مقادیر مدل‌سازی فیزیکی [۲۶]، عرض مدل‌های کوچک‌مقیاس پی دایره‌ای لبه‌دار در ابعاد ۱۰ و ۷/۵ cm و همچنین مدل‌های بزرگ‌مقیاس مختلف با عرض‌های ۱، ۲ و ۴ m در نظر گرفته شد. پنج نسبت مختلف عمق لبه به عرض پی (D/B) برابر با مقادیر ۰/۰، ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲ مدل‌سازی و تحلیل شد. تصویر شماتیک انواع مدل‌های پی و جزئیات ابعاد پی‌های استفاده شده در تحلیل شامل مدل‌های پی سطحی[۲]، لبه‌دار[۳] و نیمه‌عمیق[۴] در شکل ۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۴- جزئیات انواع مدل‌های پی؛ الف) سطحی، ب) لبه‌دار، ج) نیمه‌عمیق

برای خاک موردنظر در مدل‌سازی، از مشخصات ماسه فیروزکوه با دانه‌بندی متوسط استفاده شد که خصوصیات فیزیکی و مقاومتی آن در آزمایشگاه مکانیک خاک اندازه‌گیری شده است. جهت بررسی مشخصات خاک، سه نوع دانسیته مختلف برای ماسه و سه نوع میزان زبری متفاوت، متناظر با میزان اصطکاک سطوح مدل‌ها در مطالعه در نظر گرفته شد.

نوع مدل رفتاری جهت شبیه‌سازی مصالح، شامل مدل رفتاری الاستیک خطی به‌ازای مدل‌های پی و لبه، و مدل رفتاری الاستوپلاستیک سخت شونده (HS)[۵] جهت شبیه‌سازی رفتار ماسه، به‌علت خاصیت اتساعی خاک است. با توجه به سطحی بودن اعماق پی‌ها، مدول یانگ با فرض مقدار ثابت در عمق مد نظر قرار گرفت. مقادیر زوایای اصطکاک داخلی ماسه و مدول یانگ (E_{50}) بر پایه نتایج آزمایش‌های سه‌محوری و برش مستقیم انجام گرفته در فرایند مدل‌سازی فیزیکی انتخاب شدند.

مدل‌های پی به‌صورت تدریجی و توسط روش کرنش کنترل بارگذاری شده و رفتار بار- نشست اندازه‌گیری شد. مقادیر درنظر گرفته شده برای مصالح خاک و مدل‌های پی، به‌ازای پارامترهای مختلف تحلیل در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای مصالح مورد استفاده در تحلیل عددی

پارامتر	خاک (سه نوع ماسه)	پی سطحی و لبه (فولاد)	پی نیمه‌عمیق (بتن)
مدل تنش- کرنش	سخت شونده	الاستیک خطی	الاستیک خطی
وزن مخصوص (KN/m^3)	۱۵/۹ (Dr=0.5) ۱۶/۳ (Dr=0.64) ۱۶/۶ (Dr=0.75)	۷۸	۲۲
نسبت پواسون	۰/۳	۰/۳	۰/۲
مدول یانگ (MN/m^2)	۲۴ ،۲۱،۱۶	۲/۱e۴	۲e۴
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۴۳ ،۴۱،۳۸	-	-
زاویه اتساع (درجه)	۱۳ ،۱۱ ،۸	-	-
ضریب مقاومت فصل مشترک	۰/۶ ،۰/۸ ،۰/۹	-	-

۴-۲- مدل‌سازی فیزیکی

به‌منظور شبیه‌سازی فیزیکی رفتار پی‌های لبه‌دار، آزمایش‌ها بر روی مدل‌های کوچک‌مقیاس پی توسط دستگاه آزمایشگاهی با مخزنی به ابعاد ۶۰*۶۰*۶۰ cm و متعلقات مرتبط (شکل ۵) انجام گرفت و جهت نمونه‌سازی خاک درون مخزن از سیستم متداول بارش ماسه[۶] استفاده شد. بارگذاری مدل‌های پی توسط جک هیدرولیکی انجام شده و نیرو از طریق میله بارگذاری به مدل پی انتقال داده شد. جهت اندازه‌گیری پاسخ‌های نیرو- نشست مدل‌های پی، از ابزار نیروسنج[۷] با ظرفیت بارگذاری ۲ ton و جابه‌جایی‌سنج[۸] با میزان دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ mm استفاده شد. ابعاد در نظر گرفته شده برای مدل‌ها، با توجه به محدودیت ابعاد مخزن آزمایش و دوری از تاثیر شرایط مرزی انتخاب شد. مدل‌های فولادی پی شامل فونداسیون سطحی به‌ضخامت ۱۳ mm و لبه به‌ضخامت جداره ۳ mm هستند

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.2.3]

که با اتصال لبه پیرامونی به فونداسیون سطحی توسط پیچ، سیستم پی لبه‌دار تشکیل شد [۲۶].



شکل ۵- تصویر دستگاه آزمایش مورد استفاده در مدل‌سازی فیزیکی

با توجه به جنس مصالح مدل‌ها و میزان کم زبری سطوح مدل‌های پی، به‌منظور افزایش میزان زبری سطوح مدل‌ها (کف مدل و سطوح جانبی لبه‌ها) و بررسی تاثیر میزان اصطکاک بر نتایج، با چسباندن دو نوع کاغذ سنباده با میزان زبری‌های مختلف بر سطوح پی، مدل‌های پی با مقادیر مختلف زبری سطح ایجاد شد. شکل ۶ تصاویری از انواع مدل‌های پی دایره‌ای با سطوح صاف و زبر را نشان می‌دهد [۲۶].



شکل ۶- تصاویر مدل‌های پی لبه‌دار با ابعاد و زبری مختلف

در فرایند آماده‌سازی نمونه‌ها و مدل‌سازی فیزیکی، جهت تهیه بستر یکنواخت و همگن ماسه از روش مرسوم بارش ماسه درون جعبه استفاده شد. با انجام روغن‌کاری سطوح داخلی جعبه آزمایش جهت کاهش تاثیر شرایط جداره بر نتایج مدل‌سازی، ماسه در لایه‌های ۵ سانتی‌متری از ارتفاع ثابت و نرخ بارش یکنواخت به‌ازای دانسیته نسبی مشخص، ریخته شد. با تغییر ارتفاع و نرخ بارش ماسه، میزان تراکم و دانسیته نسبی ماسه قابل تغییر است. با بارش ماسه و رسیدن تراز بستر ماسه به عمق موردنظر استقرار لبه، لبه پی در مرکز جعبه و به‌صورت قائم بر روی بستر ماسه قرار گرفته و بارش ماسه درون و اطراف لبه تا رسیدن ارتفاع ماسه به تراز سطح فوقانی لبه ادامه یافت. سپس فونداسیون سطحی بر روی لبه قرار گرفته و توسط چهار عدد پیچ به لبه پی متصل شده و مدل پی یکپارچه تشکیل شد.

با تکمیل فرایند نمونه‌سازی و استقرار سیستم اندازه‌گیری پاسخ پی شامل نیروسنج، جابه‌جایی‌سنج و تجهیزات بارگذاری بر روی جک و مدل، و میله انتقال نیرو بر روی مدل پی، بارگذاری توسط جک هیدرولیکی و از طریق میله مخصوص انجام و داده‌های خروجی توسط داده‌نگار ثبت شد. قابل ذکر است که با افزایش دقت در مراحل مختلف مدل‌سازی، فرایند بارش ماسه و آماده کردن بستر ماسه، میزان دست‌خوردگی در نمونه مدل دارای کمترین میزان محتمل بود که نتایج تکرار آزمایش‌ها بر روی مدل‌های مختلف، این موضوع را ثابت کرد. شکل ۷ تصاویری از آماده‌سازی، فرایند بارگذاری و اندازه‌گیری پاسخ مدل‌های پی را در آزمایشگاه نشان می‌دهد.



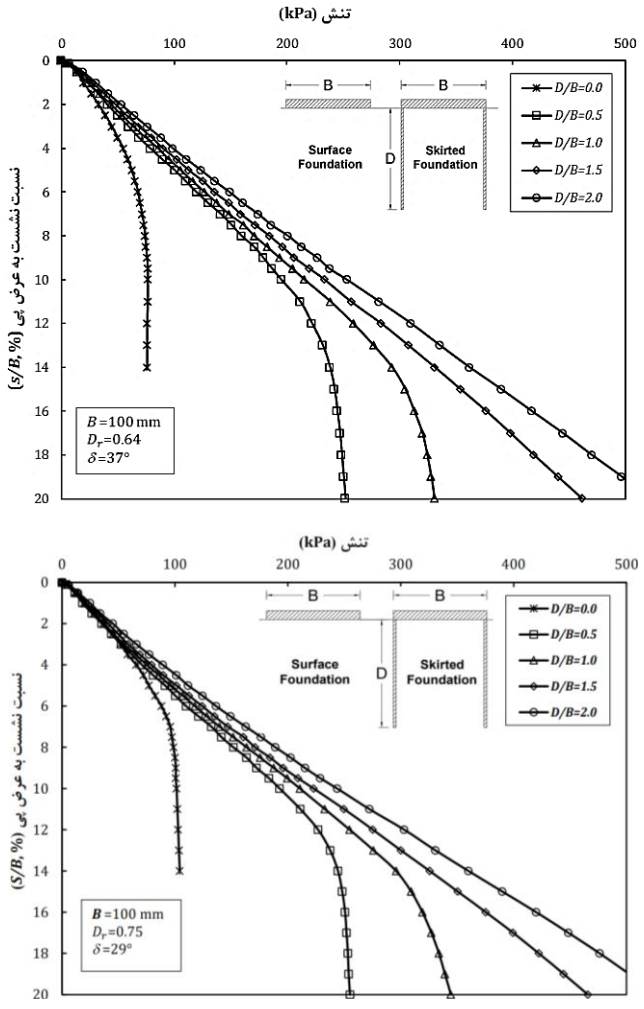
شکل ۷- تصاویر مدل، بارگذاری و اندازه‌گیری پاسخ مدل‌های پی لبه‌دار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

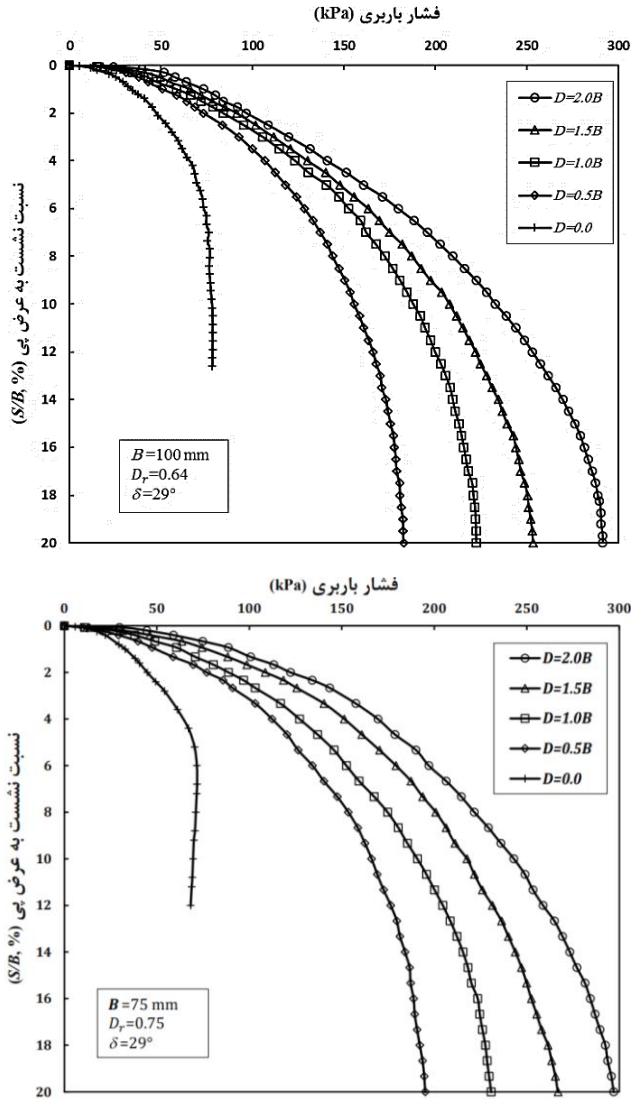
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.2.3]

۵- بحث و بررسی نتایج

تحلیل نتایج مدل‌سازی‌ها نشان داد که محصورسازی ماسه ناشی از وجود لبه زیر پی سطحی، با اصلاح منحنی‌های تنش- نشست، عملکرد ظرفیت باربری و نشست پی‌ها را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد، طوری که مقادیر بهبود با افزایش عمق لبه افزایش می‌یابد. دو نمونه از پاسخ‌های تنش- نسبت نشست تیپ برای مدل‌های پی لبه‌دار به‌ازای پارامترهای مختلف، به‌دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی و فیزیکی به‌ترتیب در شکل‌ها ۸ و ۹ مشاهده می‌شود. روند کلی منحنی‌های به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی برخلاف نتایج مدل‌سازی فیزیکی نشان می‌دهد که به‌ازای عمق‌های بزرگ‌تر لبه، نقطه تنش حداکثر و مشخصی به‌عنوان ظرفیت باربری نهایی مشاهده نشده است. در صورتی‌که نقطه تنش حداکثر و کاملاً مشخص در منحنی‌های حاصله از نتایج مدل‌سازی فیزیکی ملاحظه می‌گردد. بنابراین به‌منظور مقایسه بهتر نتایج دو نوع مدل‌سازی، برای تعیین ظرفیت باربری نهایی از تنش متناظر با نسبت نشست به عرض پی (s/B) برابر با ۱۰٪، به‌عنوان ظرفیت باربری نهایی مدل‌های پی در نظر گرفته شد [۲۰].



شکل ۸- پاسخ تیپ تنش- نسبت نشست پی لبه‌دار مدل‌سازی عددی



شکل ۹- پاسخ تیپ تنش- نسبت نشست پی لبه‌دار مدل‌سازی فیزیکی

هدف اصلی در این پژوهش، مطالعه عملکرد و رفتار ظرفیت باربری و نشست پی‌های لبه‌دار با تمرکز بر بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر نتایج بوده و همچنین مقایسه رفتار کلی این نوع پی‌ها با سایر انواع پی‌های سطحی، نیمه‌عمیق و سطحی مدفون[۹] در تراز لبه است. به‌همین منظور، دو پارامتر بدون بعد تحت عناوین نسبت ظرفیت باربری [۱۰] ($BCR=q_{sk}/q_{su}$) و ضریب کاهش نشست [۱۱] ($SRF=s_{sk}/s_{su}$) تعریف شد. BCR که حاصل نسبت ظرفیت باربری پی لبه‌دار (q_{sk}) به ظرفیت باربری پی سطحی متناظر (q_{su}) است، بیانگر بهبود ظرفیت باربری پی سطحی ناشی از وجود لبه در زیر پی می‌باشد. SRF نیز که از تقسیم نشست پی‌های لبه‌دار بر پی‌های سطحی متناظر به‌دست می‌آید، نشان‌دهنده میزان کاهش نشست پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های سطحی به‌دلیل حضور لبه پیرامون پی است. مقادیر نشست متناظر پی‌ها در میزان تراز تنشی برابر با ۵۰٪ ظرفیت باربری پی سطحی ($0.5q_{su}$) محاسبه شده است. انتخاب این میزان تنش در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.2.3]

محاسبات نشست، حساسیت محاسبات را به کمترین میزان ممکن رسانده و تاثیر کمی بر دقت محاسبات و نتایج دارد.

نمودارهای ارائه شده برحسب مقادیر BCR و SRF، میزان افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی‌های سطحی را ناشی از وجود لبه زیر پی سطحی نشان می‌دهد. روند مقادیر بهبود عملکرد پی‌ها ناشی از وجود لبه به‌ازای پارامترهای مختلف، در بخش‌های بعدی به تفکیک و جزئیات بیشتر ارائه شده است.

۵-۱- اثر نسبت عمق لبه

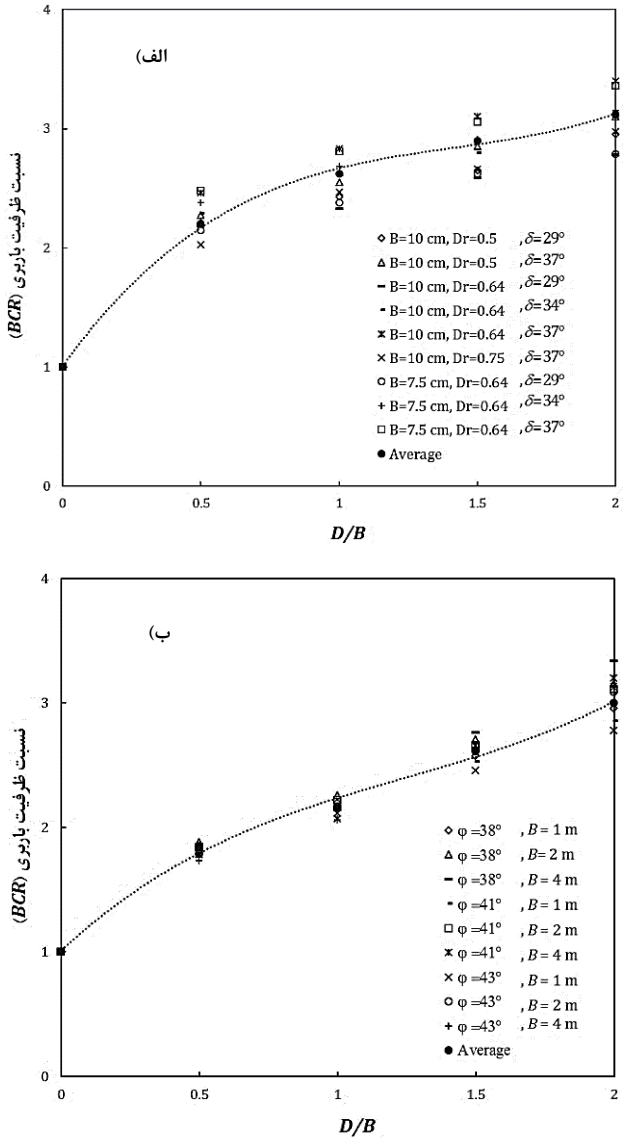
در این مطالعه، به‌منظور بررسی میزان تاثیر عمق لبه بر نتایج ظرفیت باربری و نشست پی‌های لبه‌دار، مدل‌های پی به‌ازای ۴ نسبت مختلف عمق D/B برابر با ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ مدل‌سازی شده و با نتایج متناظر پی سطحی (D/B=0) مقایسه گردید. تغییرات مقادیر نسبت ظرفیت باربری برای مدل‌های پی کوچک و بزرگ‌مقیاس برحسب نسبت‌های مختلف عمق لبه، در شکل ۱۰ ارائه شده است. از روند منحنی‌ها ملاحظه می‌شود که محصورسازی جانبی ماسه ناشی از حضور لبه زیر پی‌های سطحی، ظرفیت باربری را صرف‌نظر از مقادیر پارامترهای مختلف، به‌طور قابل‌توجهی در محدوده ۱/۸ تا ۳/۳ برابر بهبود می بخشد؛ به‌طوری که میزان بهبود ظرفیت باربری متناسب با افزایش عمق لبه پی افزایش می‌یابد.

تحلیل نتایج نشان داد که حضور لبه، ظرفیت باربری پی سطحی را با ضریبی حدود ۱/۹۵ به‌ازای نسبت عمق ۰/۵ تا مقادیر حدود ۳/۱ برای نسبت عمق ۲، صرف‌نظر از میزان زبری سطوح و مقادیر دانسیته ماسه افزایش می‌دهد که این بیانگر بهبود ۳۰۰٪ در عملکرد پی سطحی از نظر افزایش ظرفیت باربری است.

مقایسه نتایج مدل‌های کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس در شکل ۱۰ (الف و ب)، بیانگر این است که علی‌رغم اختلاف جزئی در مقادیر نسبت ظرفیت باربری (BCR) صرف‌نظر از پارامترهای مختلف، روند کلی منحنی‌ها یکسان به‌نظر می‌رسد.

همچنین جهت ارزیابی تاثیر عمق لبه بر میزان کاهش نشست پی‌های سطحی، مقادیر نسبت‌های نشست (s_{sk}/s_{su})، که بیانگر ضریب کاهش نشست ناشی از وجود لبه زیر پی‌های سطحی است؛ بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی به‌ازای نسبت‌های مختلف عمق لبه مطابق شکل ۱۱ ارائه شده است.

روند منحنی‌ها نشان می‌دهد که صرف‌نظر از پارامترهای مختلف پی و خاک، محصورسازی جانبی ماسه درون لبه به‌علت حضور لبه، باعث کاهش میزان نشست پی‌های سطحی شده است. تاثیر وجود لبه بر میزان کاهش نشست، با افزایش عمق لبه بیشتر شده و ضریب کاهش نشست کمتری را ارائه داده است.



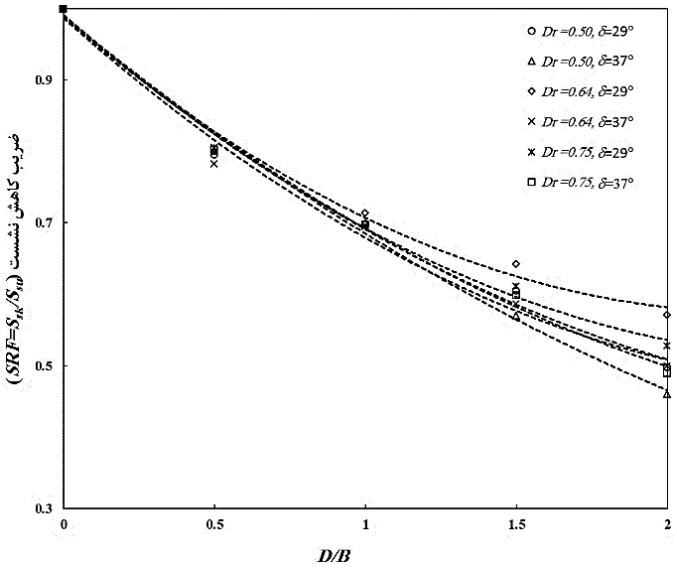
شکل ۱۰- تغییرات نسبت ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار در برابر نسبت عمق لبه؛ الف) مدل کوچک‌مقیاس، ب) مدل بزرگ‌مقیاس

استفاده از لبه باعث مقاومت در برابر حرکت و تغییرشکل جانبی ماسه شده و عملکرد پی سطحی به‌لحاظ کاهش نشست بهبود یافته است. بر پایه تحلیل نتایج مدل‌سازی به‌ازای نسبت‌های مختلف عمق لبه، محدوده ضرایب کاهش نشست در حدود ۰/۷۹-۰/۴۶ به‌دست آمد که بیانگر حداقل کاهش نشست برای نسبت عمق لبه ۰/۵ حدود ۲۱٪ و حداکثر کاهش نشست برای نسبت عمق لبه ۲، حدود ۵۴٪ است.

از روند منحنی‌ها ملاحظه می‌شود که تاثیر تغییر دانسیته ماسه و زبری سطوح فصل مشترک مدل پی- ماسه بر مقادیر ضریب کاهش نشست، با افزایش میزان عمق لبه مشهودتر بوده و به‌ازای عمق‌های کمتر لبه، ناچیز است که بیانگر اهمیت طول لبه در عملکرد و بهره‌وری وجود لبه زیر پی سطحی می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

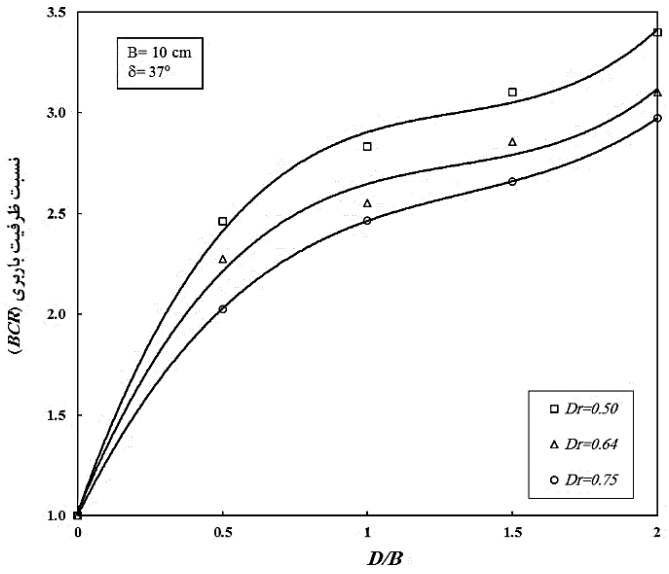
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.2.3]



شکل ۱۱- تغییرات ضریب کاهش نشست پی‌های لبه‌دار برحسب نسبت‌های مختلف عمق لبه

۵-۲- اثر دانسیته نسبی ماسه

به‌منظور بررسی تاثیر مشخصات مقاومتی خاک ماسه بر میزان عملکرد پی‌های لبه‌دار برحسب ظرفیت باربری، سه نوع خاک ماسه‌ای با وزن‌های مخصوص ۱۵/۹، ۱۶/۳ و ۱۶/۶ kN/m^3 در مدل‌سازی استفاده شد که بیانگر دانسیته‌های نسبی (D_r) برابر با ۵۰٪، ۶۴٪ و ۷۵٪ برای ماسه است. شکل ۱۲، نمونه تیپ (B=10 cm, δ=37°) از تغییرات نسبت ظرفیت باربری مدل‌های پی لبه‌دار واقع بر ماسه با دانسیته‌های مختلف را برحسب نسبت عمق لبه نشان می‌دهد. برای سایر حالت‌های مدل‌ها صرف‌نظر از مقادیر پارامترهای مختلف، نیز روند مشابهی مشاهده شد.

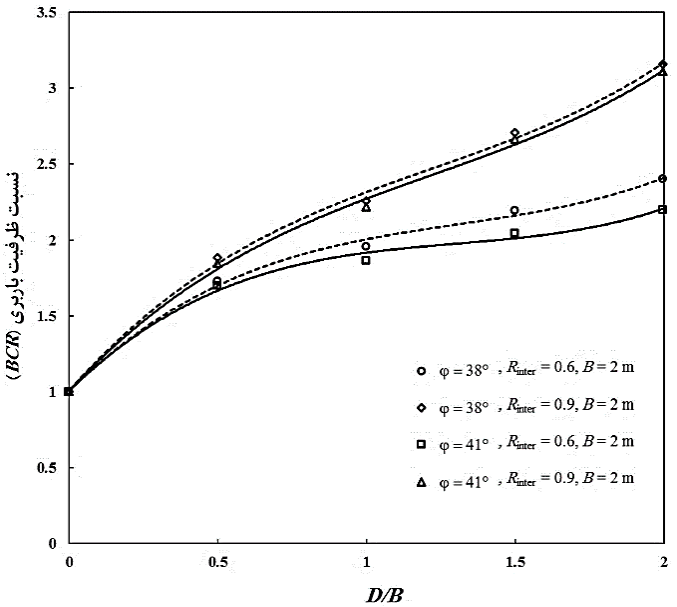


شکل ۱۲- تغییرات نسبت ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار برحسب دانسیته‌های مختلف ماسه

از روند منحنی‌ها در شکل ملاحظه می‌شود که با افزایش میزان دانسیته ماسه، عملکرد باربری پی‌های لبه‌دار نیز کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، استفاده از لبه سازه‌ای پیرامون پی‌های سطحی واقع بر خاک‌های با مقاومت برشی کمتر، دارای بهره‌وری و کارآمدی بیشتری به‌لحاظ میزان باربری است. برای پارامترهای در نظر گرفته شده در این مطالعه، با افزایش مقدار دانسیته نسبی ماسه از حدود ۵۰٪ به ۷۵٪، میزان ظرفیت باربری مدل پی حدود ۷٪ کاهش یافته است. بنابراین به‌طور کلی، در صورت استفاده از لبه زیر پی جهت بهبود عملکرد پی‌های سطحی، به‌کارگیری این نوع پی‌ها در خاک‌های با مقاومت برشی کمتر، ارجحیت بیشتری دارد.

۵-۳- اثر زبری سطوح پی

جهت مطالعه میزان تاثیر زبری سطوح فصل‌مشترک لبه و پی با ماسه بر مقادیر ظرفیت باربری و نشست پی‌های لبه‌دار، سه نوع میزان زبری مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، میزان زبری سطوح مدل‌های پی توسط ضریب کاهش سطح مشترک (R_{inter}) در محدوده ۰/۹-۰/۶ که متناظر با زوایای اصطکاک سطوح مشترک پی و ماسه (δ) برابر با 29°، 34° و 37° است، در نظر گرفته شد. نتایج تغییرات مقادیر ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار واقع بر ماسه با دانسیته‌های مختلف، برحسب میزان زبری سطوح مدل پی، به‌ازای نتایج مدل‌های بزرگ‌مقیاس در شکل ۱۳ ارائه شده است.



شکل ۱۳- تاثیر میزان زبری سطوح فصل مشترک مدل پی-ماسه بر مقادیر ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار

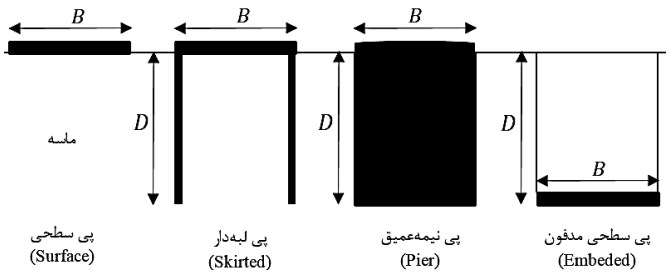
از تحلیل نتایج مشاهده می‌شود که با کاهش میزان زبری و کاهش مقدار ضریب فصل‌مشترک از مقدار ۰/۹ تا ۰/۶، صرف‌نظر از مقدار دانسیته نسبی ماسه، میزان ظرفیت باربری پی لبه‌دار کاهش می‌یابد. طوری که مقادیر کاهش ظرفیت باربری با افزایش نسبت عمق لبه و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.2.3]

دانسیته ماسه، افزایش نیز پیدا می‌کند که بیانگر تاثیر بیشتر میزان زبری سطوح لبه برای عمق‌های بزرگ‌تر لبه و تراکم بیشتر ماسه است. در این مطالعه صرف‌نظر از مقادیر پارامترهای مختلف، با افزایش میزان ضریب فصل‌مشترک از ۰/۶ به ۰/۹، مقادیر ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار به‌طور متوسط حدود ۲۳٪ افزایش نشان داد.

۶- مقایسه نتایج پی‌های لبه‌دار با مقادیر متناظر پی‌های نیمه‌عمیق و مدفون

تحلیل نتایج مدل‌های پی لبه‌دار، بهبود عملکرد این نوع پی‌ها را نسبت به پی‌های سطحی ناشی از وجود لبه محیطی، به‌لحاظ افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست نشان داد. با توجه به نوع مکانیزم گسیختگی و انتقال بار پی‌های لبه‌دار که مشابهت زیادی به پی‌های عمیق و نیمه‌عمیق دارند، میزان کارآیی پی‌های لبه‌دار نسبت به سایر انواع پی‌ها همچون پی‌های نیمه‌عمیق و سطحی مدفون در تراز لبه، با مقایسه نتایج متناظر مدل‌های پی لبه‌دار با این نوع پی‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۴، شمای کلی از انواع پی‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

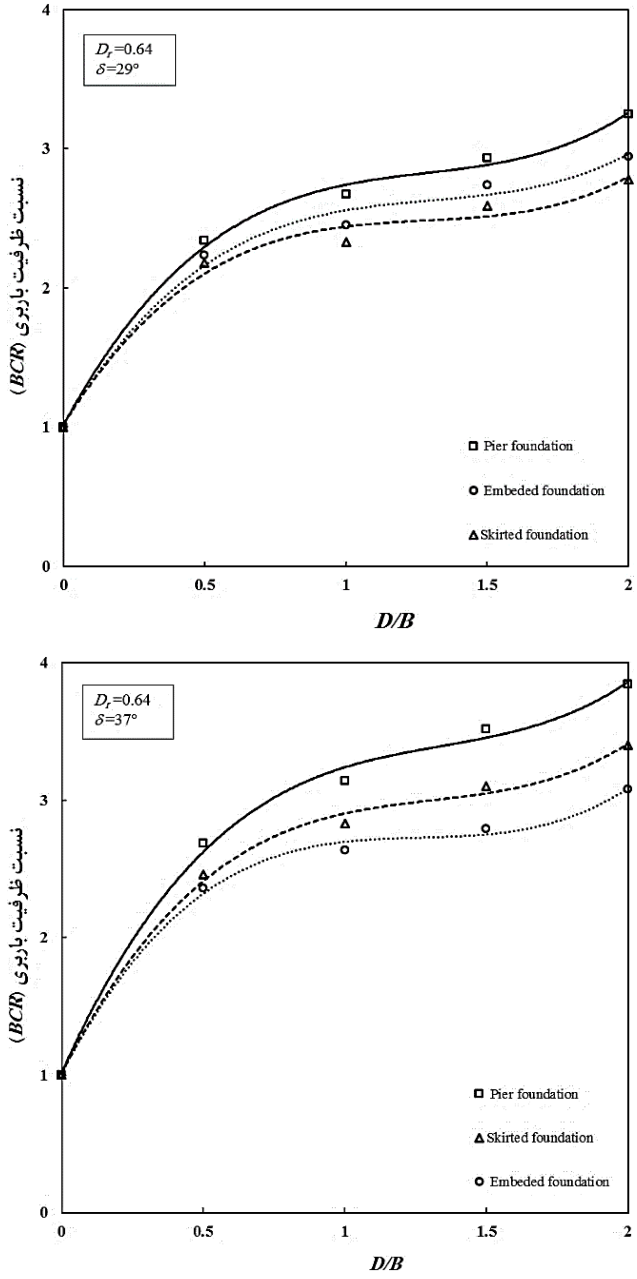


شکل ۱۴- شمای کلی انواع پی‌های متداول مورد مطالعه

۶-۱- مقایسه عملکرد پی‌های لبه‌دار و نیمه‌عمیق

جهت مقایسه عملکرد انواع پی‌های متداول، نتایج تغییرات نسبت ظرفیت باربری مدل‌های پی لبه‌دار، نیمه‌عمیق و مدفون در تراز لبه در مقایسه با پی‌های سطحی، به‌ازای دو نوع زبری مختلف سطوح پی در شکل ۱۵ ارائه شده است. از مقایسه کمّی نتایج ملاحظه می‌شود که مقادیر نسبت ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار به‌ازای زبری‌های مختلف سطوح، صرف‌نظر از مشخصات ماسه و مدل پی، به‌طور متوسط حدود ۹٪ کمتر از مقادیر متناظر پی‌های نیمه‌عمیق است که عملکرد نزدیک و مناسب پی‌های لبه‌دار را نسبت به پی‌های نیمه‌عمیق نشان می‌دهد. نتیجه کلی مشابهی نیز در مطالعات قبلی از طریق مدل‌سازی عددی گزارش شده است [۱۵].

نتیجه حاصله می‌تواند به توسعه گوه‌های گسیختگی زیر پی‌ها، در تراز کمی بالاتر از نوک لبه در پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های نیمه‌عمیق نسبت داده شود که باعث کاهش حدود ۹٪ در مقادیر ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار شده است. مقایسه نتایج به‌ازای دو نوع زبری سطوح در شکل ۱۵ نشان می‌دهد که میزان اختلاف نتایج پی‌های لبه‌دار و نیمه‌عمیق، با افزایش نسبت عمق لبه و همچنین میزان زبری سطوح لبه بیشتر می‌شود.



شکل ۱۵- مقایسه نسبت ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار، نیمه‌عمیق و سطحی مدفون به‌ازای میزان زبری‌های مختلف سطوح (δ=29°, 37°)

در تفسیر عملکرد تقریباً مشابه پی‌های لبه‌دار و نیمه‌عمیق می‌توان به این نکته اشاره کرد که با محصورسازی جانبی ماسه توسط لبه و افزایش عمق موثر پی سطحی مطابق شکل ۲، گوه‌های گسیختگی در زیر پی سطحی متناسب با عمق لبه، عمیق‌تر شده و با افزایش میزان ظرفیت باربری، بار سازه در تراز نوک لبه به خاک انتقال داده می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.2.3]

با توجه به عملکرد قابل‌قبول پی‌های لبه‌دار در مقایسه با پی‌های نیمه‌عمیق در میزان افزایش باربری پی‌های سطحی و میزان مصالح صرفه‌جویی شده بیشتر در پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های نیمه‌عمیق، استفاده از پی‌های لبه‌دار در پروژه‌ها، می‌تواند مقرون به‌صرفه و اقتصادی باشد.

۶-۲- مقایسه عملکرد پی‌های لبه‌دار و سطحی مدفون

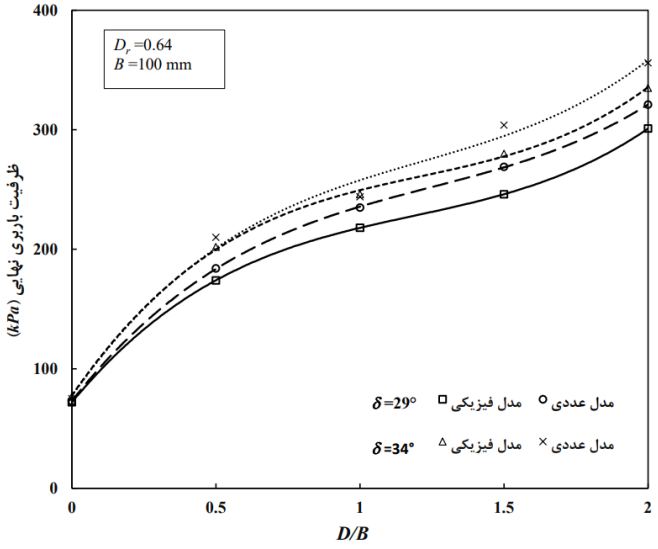
تحلیل نتایج و مقایسه عملکرد پی‌های لبه‌دار و سطحی مدفون در عمقی برابر با تراز لبه مطابق شکل ۱۵، نشان داد که با وجود مشابهت روند منحنی‌ها به‌ازای دو نوع مدل پی، مقادیر ظرفیت باربری مدل‌های پی لبه‌دار نسبت به پی سطحی مدفون برحسب میزان زبری سطوح لبه، متغیر است. به این صورت که در مدل‌های پی دارای سطوح زبر (δ=37°)، پی‌های لبه‌دار عملکرد بهتری در مقایسه با پی های مدفون نشان می‌دهد؛ به‌طوری که مقادیر ظرفیت باربری به‌طور متوسط حدود ۸٪ بیشتر از مقادیر متناظر پی سطحی مدفون به‌دست آمد. در حالی‌که برای مدل‌های با سطوح صاف (δ =29°)، نسبت ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار حدود ۴٪ کمتر از مقادیر متناظر پی های سطحی مدفون است.

بنابراین بر پایه تحلیل و مقایسه نتایج می‌توان اذعان داشت که در صورت استفاده از پی‌های لبه‌دار به‌جای پی‌های سطحی مدفون در تراز لبه، به‌کارگیری لبه‌های سازه‌ای با سطوح زبر، دارای ارجحیت بیشتری بوده و می‌تواند کارآمدی بیشتری را به‌لحاظ ظرفیت باربری و میزان نشست داشته باشد.

۷- مقایسه نتایج تحلیل عددی با مدل‌سازی فیزیکی

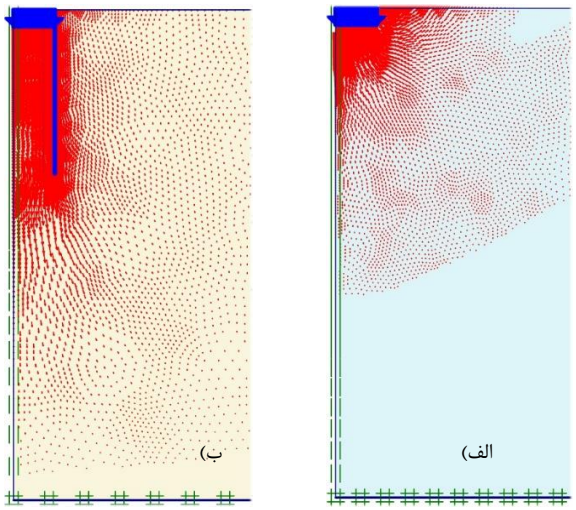
با توجه به انجام تعدادی مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس آزمایشگاهی بر روی مدل‌های پی لبه‌دار، به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی، نتایج تحلیل عددی با مقادیر متناظر مدل‌های فیزیکی مورد مقایسه قرار گرفت. برخلاف نتایج مدل‌سازی عددی مطابق شکل ۸، که روند مشابه در تحقیقات دیگر نیز مشاهده شده است [۲۰]، بر اساس نتایج مطالعه آزمایشگاهی، منحنی‌های تنش- نسبت نشست به‌ازای تمامی مدل‌ها دارای نقطه تنش حداکثر مشخصی به‌عنوان ظرفیت باربری را به نمایش گذاشت. نمونه پاسخ تنش- نسبت نشست مدل‌سازی فیزیکی در شکل ۹ مشاهده می‌شود. بنابراین با توجه به مقایسه نتایج دو نوع مدل‌سازی، مشابه تحلیل عددی، تنش متناظر با نسبت نشست ۱۰٪ به‌عنوان ظرفیت باربری نهایی مد نظر قرار گرفت.

به‌منظور مقایسه نتایج و مشاهده بهتر تطابق یا مغایرت نتایج دو نوع مدل‌سازی، مقادیر ظرفیت باربری نهایی مدل‌های پی حاصل شده از مدل‌سازی‌های فیزیکی و عددی به‌ازای دو حالت با سطوح لبه صاف (δ=29°) و زبر (δ=34°) و ماسه با دانسیته نسبی ۶۴٪، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همچنین برای سایر حالت‌های مدل پی، خلاصه نتایج ظرفیت باربری نهایی جهت مقایسه بیشتر نتایج، در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱۶- مقایسه مقادیر ظرفیت باربری نهایی مدل‌های پی بر اساس نتایج مدل‌سازی فیزیکی و عددی

در مورد تفسیر علت عدم مشخص بودن نقطه حداکثر تنش در نسبت‌های بزرگ‌تر لبه در پاسخ تنش- نشست مدل‌سازی عددی، می‌توان گفت که مطابق نمودارهای توزیع جابه‌جایی مدل‌های پی لبه‌دار (شکل ۱۷) و همچنین نتایج تحقیقات قبلی، با افزایش عمق لبه، تغییرات مکانیزم انتقال بار و الگوی جابه‌جایی ماسه ناشی از محصورسازی جانبی ماسه در جهات افقی رخ می‌دهد. از شکل ملاحظه می‌شود که حضور لبه زیر پی، مکانیزم جابه‌جایی خاک را عمیق‌تر نموده و با افزایش عمق موثر پی، خاک بیشتری درگیر باربری پی می‌شود و گسیختگی پی در میزان نشست‌های بزرگ‌تری می‌تواند رخ دهد.



شکل ۱۷- نمودار توزیع جابه‌جایی به‌دست آمده از تحلیل عددی؛ الف) مدل پی سطحی، ب) مدل پی لبه‌دار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.2.3]

جدول ۲- مقایسه مقادیر ظرفیت باربری نهایی مدل‌های پی لبه‌دار اندازه‌گیری شده توسط مدل‌سازی فیزیکی و عددی

q_{ult} (kN/m²)	B =10 cm, D_r = 0.64								B =7.5 cm, D_r = 0.64		
	δ=29°			δ=34°			δ=37°			δ=37°		
D/B	مدل فیزیکی	مدل عددی	درصد اختلاف	مدل فیزیکی	مدل عددی	درصد اختلاف	مدل فیزیکی	مدل عددی	درصد اختلاف	مدل فیزیکی	مدل عددی	درصد اختلاف
۰/۰	۷۲	۷۳	٪۱/۴	۷۷	۷۵	٪۲,۶	۷۹	۷۷	٪۲,۵	۵۶	۵۸	٪۳,۶
۰/۵	۱۷۴	۱۸۴	٪۵/۷	۲۰۲	۲۱۰	٪۴	۲۲۲	۲۳۰	٪۳,۶	۱۵۰	۱۵۷	٪۴,۷
۱	۲۱۸	۲۳۵	٪۷/۸	۲۴۶	۲۴۴	٪۰,۸	۲۶۸	۲۹۱	٪۸,۶	۱۸۵	۱۹۴	٪۴,۹
۱/۵	۲۴۶	۲۶۹	٪۹/۳	۲۸۰	۳۰۴	٪۸,۶	۳۰۷	۳۳۱	٪۷,۸	۲۱۹	۲۳۰	٪۵
۲	۳۰۱	۳۲۱	٪۶/۶	۳۳۵	۳۵۶	٪۶,۳	۳۶۰	۳۹۲	٪۸,۹	۲۵۴	۲۶۶	٪۴,۷

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مقادیر ظرفیت باربری تحلیل عددی به‌ازای تنش‌های به‌دست آمده از معیار نسبت نشست ۱۰٪، به‌طور متوسط حدود ۵/۵٪ بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده توسط مدل‌سازی فیزیکی است. در حالی‌که با فرض معیار نسبت تنش ۱۵٪ برای محاسبه ظرفیت باربری مدل‌های پی، اختلاف مقادیر دو نوع مدل‌سازی کاهش یافته و در حدود یک درصد می‌شود.

بنابراین در حالت کلی می‌توان اذعان داشت که علارغم اختلاف در روند منحنی‌های پاسخ تنش- نشست دو نوع مدل‌سازی فیزیکی و عددی، مقادیر ظرفیت باربری با اختلاف جزئی در نتایج، دارای توافق مناسب و قابل‌قبولی هستند.

۸- مقایسه نتایج مدل‌سازی با مقادیر متناظر سایر محققان

جهت ارزیابی دقت و صحت نتایج حاصل از این پژوهش، در این بخش نتایج مطالعه با مقادیر متناظر سایر محققان در سه حالت مورد مقایسه قرار گرفت؛ حالت اول شامل مقایسه نتایج مدل‌های پی سطحی با مقادیر به‌دست آمده از روابط تجربی و نظری متداول محققان مختلف می‌باشد. در حالت دوم و سوم نیز، به‌ترتیب نتایج نسبت ظرفیت باربری و نسبت نشست مدل‌های پی لبه‌دار در این مطالعه با نتایج متناظر سایر مدل‌سازی‌های مشابه انجام گرفته در حوزه مدل‌های پی لبه‌دار است که به‌صورت مجزا در دو بخش ارائه شده است.

۸-۱- مقایسه نتایج مدل‌های پی سطحی با روابط نظری

به‌منظور بررسی صحت و دقت نتایج مدل‌سازی‌های فیزیکی و عددی و همچنین بررسی میزان تطابق نتایج با مقادیر نظری، مقادیر ظرفیت باربری نهایی مدل‌های پی سطحی، از طریق روابط نظری پیشنهادی توسط محققان مختلف از جمله میرهوف [۲۲]، هنسن [۲۷]، وسیک [۲۸]، لاندگرن و مورتنسن [۲۹]، اسپانگلر و هاندی [۳۰]، محاسبه و با نتایج اندازه‌گیری شده توسط مدل‌ها مقایسه شد. مقادیر ظرفیت باربری نهایی مدل‌های پی سطحی واقع بر بستر ماسه می‌تواند از رابطه کلاسیک (۲)، تخمین زده شود؛ γ وزن مخصوص ماسه، B عرض پی، N_γ ضریب ظرفیت باربری، s_γ و d_γ به‌ترتیب ضرایب شکل و عمق پی هستند که در این مطالعه مقادیر ضریب عمق برابر یک و مقادیر ضرایب شکل برابر با ۰/۶ در نظر گرفته شد:

$$q_{ult} = 0.5\gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma \quad (۲)$$

مقایسه مقادیر ظرفیت باربری نهایی اندازه‌گیری شده برای مدل‌های پی سطحی توسط مدل‌سازی فیزیکی و عددی با مقادیر متناظر محاسبه شده از طریق روابط نظری مطابق جدول ۳ ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان داد که توافق خوب و قابل‌قبولی میان مقادیر نظری و نتایج مدل‌سازی وجود دارد؛ به‌طوری که صحت و دقت نتایج پی‌های سطحی را می‌توان به نتایج پی‌های لبه‌دار تعمیم داده و صحت نتایج مدل‌سازی را مورد تایید قرار داد.

جدول ۳- مقایسه نتایج ظرفیت باربری مدل‌های پی سطحی و مقادیر متناظر روابط نظری (B= 10 cm, D_r=0.64)

روابط پیشنهادی	N_γ	q_{ult} (kPa)
مدل‌سازی فیزیکی	-	۷۲
مدل‌سازی عددی	-	۷۳
میرهوف (۱۹۶۳)	۱۳۹/۳	۶۹
هنسن (۱۹۷۰)	۱۱۳/۹	۵۶
وسیک (۱۹۷۳)	۱۵۵/۵	۷۷
لاندگرن و مورتنسن (۱۹۵۳)	۱۳۷/۹	۶۸
اسپانگلر و هاندی (۱۹۸۲)	۱۳۰/۶	۶۵

۸-۲- مقایسه نتایج ظرفیت باربری با مقادیر متناظر سایر محققان

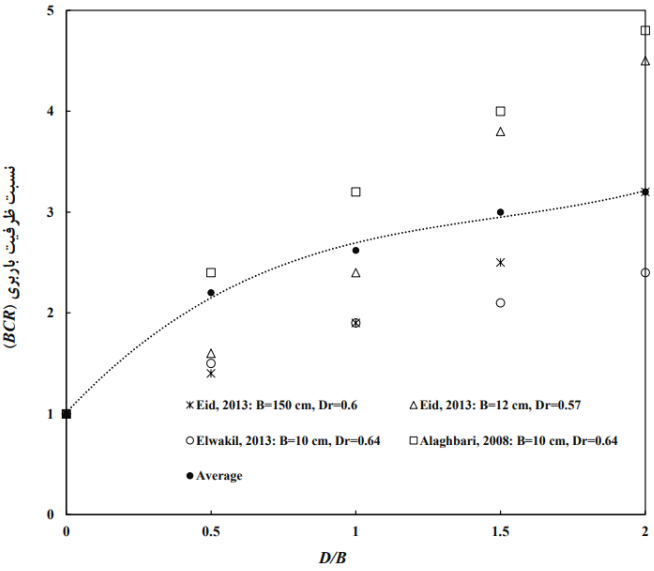
با توجه به پارامترها و ابعاد مدل‌های پی مورد مطالعه توسط مدل‌سازی کوچک‌مقیاس، مقادیر نسبت ظرفیت باربری (BCR) پی‌های لبه‌دار، در محدوده ۱/۸ تا ۳/۳ به‌دست آمد. با مقایسه نتایج نسبت ظرفیت باربری این مطالعه با نتایج متناظر مطالعات مشابه محققان مختلف، تفاوت‌هایی در مقادیر بهبود ظرفیت باربری ناشی از حضور لبه زیر پی سطحی ملاحظه می‌شود. به‌عنوان نمونه، الصواف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.2.3]

و ناظر [۴]، با انجام آزمایش بر روی مدل‌های پی به قطر ۷/۵ cm و لبه از جنس UPVC، واقع بر بستر ماسه با دانسیته نسبی ۷۶٪، مقدار بهبود نسبت ظرفیت باربری را به‌ازای D/B=2.0، حدود ۱۰ گزارش کردند که به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده در این تحقیق است. در مدل‌سازی عددی و فیزیکی مشابه دیگری توسط عید و همکاران [۲-۱]، میزان بهبود در مقادیر ظرفیت باربری برای مدل‌های پی مربعی به‌عرض ۱۲ cm و دانسیته نسبی ۴۴٪، در حدود ۲/۲ تا ۴/۶ ارائه شد. همچنین الاغبری و داتا [۶]، رفتار مدل‌های پی مربعی به‌عرض ۱۰ cm واقع بر ماسه با دانسیته نسبی ۶۴٪ را بررسی و افزایش ظرفیت باربری را در محدوده ۱/۴۱ تا ۴/۶۴ گزارش کردند. الوکیل [۹] با انجام مدل‌سازی فیزیکی بر روی مدل‌های پی دایره‌ای به قطر ۱۰ cm واقع بر ماسه با دانسیته نسبی ۶۵٪، مقادیر نسبت ظرفیت باربری را در محدوده ۱/۵ تا ۲/۴ به‌دست آورد.

نتایج نسبت ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده که در شکل ۱۰ (الف) نشان داده شده است، به‌منظور مقایسه با نتایج متناظر سایر محققان، متوسط مقادیر به‌دست آمده در این مقاله مجدداً در شکل ۱۸ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که علارغم متغیر بودن اندازه مدل‌ها و شرایط مدل‌سازی‌ها در موارد مختلف، روند نتایج مشابه نتایج سایر محققان بوده، ولی مقادیر نسبت ظرفیت باربری دارای پراکندگی در محدوده مشخصی است.



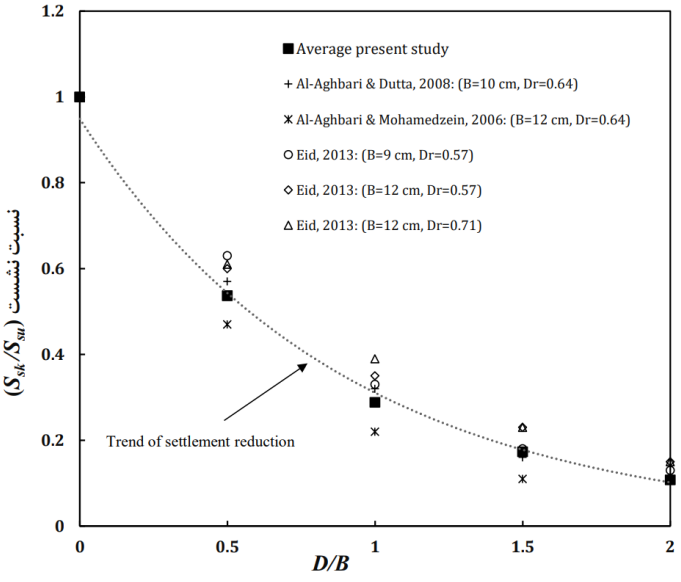
شکل ۱۸- مقایسه متوسط مقادیر نسبت ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده با مقادیر متناظر سایر محققان

با توجه به روند نتایج می‌توان گفت که دلایل اختلاف و تناقض موجود در نتایج، نیاز به بررسی و تحقیق بیشتری دارد؛ با این وجود، اختلاف در نتایج گزارش شده می‌تواند به تفاوت‌های موجود در شرایط انجام آزمایش‌ها و مدل‌سازی‌ها، ابعاد مدل‌های پی، مقادیر پارامترها و جنس مصالح مورد استفاده برای مدل‌ها در مدل‌سازی‌ها نسبت داده شود. به‌عنوان نمونه، جنس مصالح مورد استفاده برای مدل پی و لبه، توسط محققان مختلف متفاوت بوده و یکسان نیست که این موضوع منجر به تفاوت در صلبیت مدل‌ها و تناقض در نتایج تنش- نشست پی‌ها می‌شود. همچنین تفاوت در دانسیته نسبی ماسه، زبری سطوح مدل‌ها و نوع روش مورد استفاده جهت تعیین مقادیر ظرفیت باربری نهایی، می‌تواند از دیگر دلایل تناقض و اختلاف در نتایج مطالعه‌های مشابه باشد. به‌طور کلی، دلایل واقعی اختلاف و تناقض در نتایج محققان مختلف و همچنین میزان سهم هر کدام از علل مذکور، نیاز به تحقیق و بررسی بیشتر و جامع‌تری دارد.

۸-۳- مقایسه نتایج نسبت نشست با مقادیر متناظر سایر محققان

با ارزیابی تاثیر وجود لبه بر میزان کاهش نشست پی‌های سطحی بر مبنای نتایج مدل‌های فیزیکی، مقادیر متوسط نسبت‌های نشست (S_{sk}/S_{su})، به‌ازای پارامترهای مختلف مورد مطالعه برحسب نسبت‌های مختلف عمق لبه مطابق شکل ۱۹ ارائه شد. همچنین به‌منظور مقایسه با نتایج متناظر مطالعات مشابه، مقادیر نسبت‌های نشست گزارش شده توسط محققان مختلف [۸، ۶، ۱]، همراه مقادیر این مطالعه در نمودار شکل ۱۹ گزارش شد.

از مقایسه نتایج نسبت نشست در شکل ملاحظه می‌شود که نتایج اندازه‌گیری شده در این مطالعه، در محدوده مقادیر متناظر سایر محققان بوده و توافق نسبتاً خوب و قابل‌قبولی را نشان می‌دهد. بنابراین در حالت کلی می‌توان اذعان داشت که سازگاری مقادیر نسبت نشست نیز همانند تطابق مقادیر نسبت ظرفیت باربری در قسمت‌های ۸-۲ و ۸-۱، بیانگر صحت و دقت نسبتاً خوب نتایج گزارش شده در این پژوهش است.



شکل ۱۹- مقایسه متوسط مقادیر نسبت‌های نشست مدل‌های فیزیکی پی با مقادیر متناظر سایر محققان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.2.3]

۹- نتیجه‌گیری

هدف اصلی مقاله، بررسی پتانسیل و قابلیت استفاده از لبه محیطی در پیرامون پی‌های سطحی به‌منظور بهبود عملکرد این نوع پی‌ها، ناشی از محصورسازی جانبی ماسه درون لبه بود که توسط تحلیل عددی، تاثیر مشخصات هندسی پی و مقاومتی خاک بر بهبود رفتار ظرفیت باربری و نشست پی‌های لبه‌دار مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفت. پژوهش حاضر شامل انجام تحلیل‌های کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس به‌تعداد بیش از ۹۰ مدل‌سازی است که در آن پارامترهای عرض پی، نسبت عمق لبه، زبری سطوح پی و دانسیته ماسه بررسی شد. همچنین عملکرد مدل‌های پی لبه‌دار نسبت به سایر انواع پی‌های نیمه‌عمیق و مدفون مورد تحلیل قرار گرفته و مقایسه شد. خلاصه‌ای از مهمترین نتایج حاصله، به این شرح ارائه می‌شود؛

- محصورسازی جانبی ماسه ناشی از حضور لبه پیرامون پی سطحی، باعث بهبود عملکرد پی به‌لحاظ افزایش ظرفیت باربری می شود. در مطالعه حاضر، بسته به پارامترهای مختلف، نسبت ظرفیت باربری در محدوده ۲/۸-۳/۳ به‌دست آمد که بیانگر افزایش قابل‌توجه ظرفیت باربری پی‌های سطحی است. تراز افزایش ظرفیت باربری مدل‌های پی لبه‌دار، متناسب با افزایش عمق لبه افزایش یافت. استفاده از لبه باعث بزرگ‌تر شدن گوه گسیختگی، و افزایش قابل‌توجه ظرفیت باربری فشاری حتی به‌ازای نسبت‌های کمتر عمق لبه، برابر با نصف عرض پی شد.

- وجود لبه پیرامون محیط پی سطحی، پاسخ تنش- نشست پی را اصلاح و همراه با افزایش مقادیر ظرفیت باربری، نشست پی های سطحی را نیز کاهش می‌دهد. صرف‌نظر از مقدار عمق لبه، دانسیته ماسه و زبری سطوح مدل‌ها، حداقل و حداکثر ضریب کاهش نشست برای نسبت‌های عمق لبه ۰/۵ و ۲، به‌ترتیب حدود ۰/۷۹ و ۰/۴۶ به‌دست آمد.

- بهبود در نسبت ظرفیت باربری با کاهش دانسیته ماسه افزایش یافت. به‌عبارت دیگر، بیشترین کارآیی و سودمندی پی‌های لبه‌دار از نظر بهبود ظرفیت باربری، در خاک‌های ماسه‌ای سست و با تراکم کمتر حاصل شد.

- مقادیر بهبود عملکرد پی‌های لبه‌دار از نظر افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست، با افزایش میزان زبری سطوح پی و لبه، به‌طور متوسط حدود ۲۳٪ افزایش پیدا کرد.

- بر پایه مقایسه نتایج مدل‌های پی لبه‌دار و پی نیمه‌عمیق، مقادیر ظرفیت باربری نهایی پی‌های لبه‌دار نزدیک به مقادیر متناظر پی‌های نیمه‌عمیق مشاهده شد. استفاده از لبه جدارنازک زیر پی سطحی به‌جای پی نیمه‌عمیق، به‌لحاظ ظرفیت باربری تنها باعث کاهش حدود ۹٪ نسبت به پی نیمه‌عمیق می‌شود.

- مقادیر ظرفیت باربری مدل‌های پی لبه‌دار نسبت به پی سطحی مدفون در تراز لبه، برحسب میزان زبری سطوح، متغیر مشاهده شد. با افزایش میزان زبری سطوح لبه، ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار نسبت به پی سطحی مدفون بیشتر به‌دست آمد.

- مقایسه نتایج مدل‌های پی لبه‌دار با نتایج متناظر سایر انواع پی‌های نیمه‌عمیق و سطحی مدفون نشان داد که استفاده از لبه، مشابه پی‌های نیمه‌عمیق به‌دلیل انتقال بار به اعماق پایین‌تر باعث بهبود قابل‌توجه در عملکرد پی‌های سطحی از نظر افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست و صرفه‌جویی در میزان مصالح به‌کار رفته در عملیات ساخت می‌شود.

کلید واژگان

1- Plaxis Software
2- Surface Foundation
3- Skirted Foundation
4- Pier Foundation
5- Hardening Soil Model
6- Sand Raining
7-LoadCell
8-LVDT
9-Embedded Foundation
10- Bearing Capacity Ratio
11- Settlement Reduction Factor

۱۰- مراجع

1-Eid, H., (2013), *Bearing capacity and settlement of skirted shallow foundations on sand*, International Journal of Geomechanics, Vol. 13, No. 5, pp. 645–652.

2-Eid, H., Alansari, O.A., Odeh, A.M., Nasr, M.N. and Sadek, H.A., (2009), *Comparative study on the behavior of square foundations resting on confined sand*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 46, pp. 438-453.

3-Hwang, J.G., Yoon, Y.W., and Song, K.I., (2121), *Improvement of Bearing Capacity of Shallow Foundation with the Wall Attached to the Base-Slab*: *Model Test*, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 25, pp. 1276–1282.

4-El-Sawwaf, M.E.I. and Nazer, A., (2005), *Behavior of circular footings on confined granular soil*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 3, pp. 359–366.

5-Fattah, M.Y., Shlash, K.T. and Mohammed, H.A., (2015), *Experimental study on the behavior of strip*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.2.3]

18-Wang, X., Zeng, X., Yu, H. and Wang, H., (2015), *Centrifuge modeling of offshore wind turbine with bucket foundation under earthquake loading*, International Foundation Congress and Equipment Expo, San Antonio, Texas.

19-Azzam, W.R., (2015), *Finite element analysis of skirted foundation adjacent to sand slope under earthquake loading*, HBRC Journal, Vol. 11, pp. 231–239.

20-Thakur, A., and Dutta, R. K., (2021), *Study of bearing capacity of skirted irregular pentagonal footings on different sands*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 105, No. 1, pp. 5-17.

21-Gnananandarao, T., Khatri, V. N., and Dutta, R. K., (2020), *Bearing capacity and settlement prediction of multi-edge skirted footings resting on sand*, Ingenier´ıa e Investigación, Vol. 40, No. 3, pp. 9-21.

22-Meyerhof, G.G., (1963), *Some recent research on the bearing capacity of foundations*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 16–26.

23- Pfeifle, T.W. and Das, B.M., (1979), *Model tests for bearing capacity in sand*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 105, pp. 1112-1116.

24- Cerato, A.B. and Lutenegger, A.J., (2006), *Bearing capacity of square and circular footings on a finite layer of granular soil underlain by a rigid base*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132 (11), pp. 1496–1501.

25-Chen Q, (2007), *An Experimental Study on Characteristics and Behavior of Reinforced Soil Foundation*, PhD Thesis, Louisiana State University.

26- Gholipour, S. and Makarchian, M., (2018), *Study of the behaviour of skirted shallow foundations resting on sand*, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol. 18, No. 3, pp. 117-130.

27- Hansen, J. B., (1970), *A revised and extended formula for bearing capacity*, Bulletin No. 28, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, pp. 5–11.

28-Vesić, A. S., (1973), *Analysis of ultimate loads of shallow foundations*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 99, No. 1, pp. 45–73.

29-Lundgren, H., and Moetensen, K., (1953), *Determination by theory of plasticity on the Bearing capacity of continuous footing on sand*, Proceedings 3th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 409-412.

30-Spangler, M. G., and Handy, R. L., (1982), *Soil Engineering*, 4th Edition, Harper, New York, USA.

footing on sandy soil bounded by a wall, Arabian Journal of Geosciences, Vol. 8, No. 7, pp.4779–4790.

6-Al-Aghbari, M.Y. and Dutta, R.K., (2008), *Performance of square footing with structural skirt resting on sand*, Geomechanic and Geoengineering Journal, Vol. 3, No. 4, pp. 271-277.

7-Al-Aghbari, M.Y. and Mohamedzein, Y.E.A. (2004), *Bearing capacity of strip foundations with structural skirts*, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 43–57.

8-Al-Aghbari, M.Y. and Mohamedzein, Y.E.A., (2006), *Improving the performance of circular foundations using structural skirts*, Ground Improvement, Vol. 10, No. 3, pp. 125–132.

9-EL-Wakil, A.Z., (2013), *Bearing capacity of skirt circular footing on sand*, Alexandria Engineering Journal, Vol. 52, pp. 359–364.

10-Bienen, B., Gaudin, C.h., Cassidy, M.J., Rausch, L., Purwana, O.A. and Krisdani, H., (2012), *Numerical modelling of a hybrid skirted foundation under combined loading*, Computers and Geotechnics, Vol. 45, pp. 127–139.

11-Nazir, A.K. and Azzam, W.R., (2010), *Improving the bearing capacity of footing on soft clay with sand pile with/without skirts*, Alexandria Engineering Journal, Vol. 49, pp. 371–377.

12-Mana, D.S.K., Gourvenec, S. and Randolph, M.F., (2011), *A numerical study of the vertical bearing capacity of skirted foundations*, Frontiers in Offshore Geotechnics II- Taylor & Francis Group, London, 2011.

13-Mana, D., Gourvenec, S. and Martin, C., (2013), *Critical skirt spacing for shallow foundations under general loading*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 139, No. 9, pp. 1554-1566.

14-Bransby, M.F. and Yun, G.J., (2009), *The untrained capacity of skirted strip foundations under combined loading*, Geotechnique, Vol. 59, No. 2, pp. 115–125.

15-Esmaeili, K., Eslami, A., and Rezazadeh, S., (2018), *Semi-deep skirted foundations and numerical solution to evaluate bearing capacity*, Open Journal of Geology, Vol. 8, No. 6, pp. 623-640.

16-Mahmood, R. M., Fattah, M. Y., and Khalaf, A., (2020), *Experimental investigation on the bearing capacity of skirted foundations on submerged gypseous soil*, Marine Georesources & Geotechnology, Vol. 38, No.10, pp. 1151-1162.

17-Santhoshkumar, G., and Ghosh, P., (2020), *Ultimate bearing capacity of skirted foundation on cohesionless soil using slip line theory*, Computers and Geotechnics, Vol. 123.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.2.3]