مطالعه رفتار ظرفیت باربری و نشست پی‌های لبه‌دار واقع بر بستر خاک‌های چسبنده

سجاد قلی‌پور [۱]، مسعود مکارچیان [۲*] و رضا قلی‌پور [۳]

[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
[۳] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، r.gholiipour@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۲۱

کلمات کلیدی:
پی لبه‌دار
بهبود ظرفیت باربری
محصورسازی جانبی خاک توسط لبه
اثر لبه بر رفتار خاک چسبنده
لبه

چکیده

محدودیت‌های پی‌های سطحی به‌لحاظ ظرفیت باربری و نشست در خاک‌های رسی نرم، اهمیت مطالعه در مورد پی‌های لبه‌دار را نشان می‌دهد. پی‌های لبه‌دار با نفوذ درون خاک و محصورسازی جانبی، رفتار ظرفیت باربری و نشست را بهبود بخشیده و قابلیت استفاده در کاربری‌های مختلف همچون دریا، سواحل و خشکی را دارند. اهداف این تحقیق؛ شامل ارزیابی رفتار پی‌های دایره‌ای لبه‌دار واقع بر خاک چسبنده و برآورد میزان بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست پی توسط مدل‌سازی عددی است. پارامترهای مختلف قطر پی، عمق لبه، مقاومت زهکشی نشده رس، زبری سطوح پی- خاک و درجه ناهمگنی خاک بررسی شد. نتایج، بهبود قابل‌توجه عملکرد پی‌های لبه‌دار به‌لحاظ افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست نسبت به پی‌های سطحی را نشان داد. میزان بهبود با افزایش عمق لبه، زبری سطوح پی و کاهش مقاومت برشی رس افزایش یافت. مقادیر ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار به‌ازای عمق و قطر یکسان، نزدیک به مقادیر پی‌های نیمه‌عمیق به‌دست آمد.

Study of the bearing capacity and settlement behavior of skirted foundations resting on cohesive soils

Gholipour Sajjad[1], Makarchian Masoud[2*], Gholiipour Reza[3]

[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
[3] MSc of Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Urmia, r.gholiipour@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 14 Aug. 2019
Accepted: 11 Aug. 2020

Keywords:
skirted foundation
bearing capacity improvement
lateral confinement of soil by skirt
skirt effect on the cohesive soil
skirt

ABSTRACT

The limitations of shallow foundations in terms of bearing capacity and settlement in soft clayey soils show the importance of the studying about so-called skirted foundations. The skirted foundations with penetrating into the soil and lateral confinement of soil can improve the bearing capacity and settlement behavior. These foundations are suitable for use in various applications such as seawater, beaches and dry lands. The objectives of this research are to evaluate the behavior of the skirted circular foundations on soft clay bed, and to estimate the improvement of bearing capacity and settlement reduction of skirted foundations using the numerical modeling. Various parameters including foundation diameter, skirt depth ratio, un-drained strength of clay, roughness of interface between foundation-soil and soil heterogeneity were investigated. The analysis results showed a significant improvement in skirted foundations performance in terms of bearing capacity enhancement and settlement reduction compared to the surface foundations. The improvement values increased with increasing the ratio of skirt depth, the roughness of the foundation surface and decreasing the shear resistance of the clay. The bearing capacity values of skirted foundations for the same depth and diameter were obtained close to the values of pier foundations.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.3.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.35]

۱- مقدمه

جامعه مهندسان ژئوتکنیک همواره در تلاش جهت توسعه و به‌کارگیری روش‌های بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست پی‌های سطحی واقع بر خاک‌های ضعیف هستند. با توجه به ضعف باربری و فشردگی‌پذیری زیاد خاک‌های رسی نرم در اعماق سطحی زمین و افزایش مقاومت برشی خاک‌ها با عمق، یکی از روش‌های تأمین ملزومات ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی به‌جای استفاده از پی‌های مدفون و افزایش عرض پی‌ها، انتقال بارهای سازه به اعماق پایین‌تر با به‌کارگیری صفحات قائم زیر پی سطحی به‌نام لبه است. استفاده از لبه زیر محیط پی‌های سطحی، باعث افزایش عمق مؤثر پی و همچنین محصورسازی جانبی خاک درون لبه شده و به‌عنوان سیستم یکپارچه با پی، بارهای سازه به اعماق مقاوم زیرین در تراز نوک لبه انتقال می‌یابد. این روش برخلاف برخی روش‌های بهسازی متداول خاک، نیاز به خاکبرداری قابل‌توجه و تجهیزات خاص نصب نداشته و از نظر هزینه و مشکلات اجرایی دارای محدودیت کمتری است.

با توجه به زمان کوتاه و سهولت نصب، عدم محدودیت نسبت به حضور آب‌های زیرزمینی در تراز بالا و همچنین بهره‌وری اقتصادی، پی‌های لبه‌دار به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان پی توربین‌های بادی، مخازن ذخیره صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، سکوهای حفاری، پایه اسکله‌ها و دکل‌های انتقال نیرو می‌توانند برای جایگزینی سایر انواع پی‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

گسترش احداث پروژه‌های عمرانی در زمین‌های رسی؛ شامل اکتشافات دریایی نفت و گاز و بهسازی زمین، بررسی بیشتر عملکرد پی‌های لبه‌دار را ضروری ساخته است. استفاده از پی‌های لبه‌دار می‌تواند ضعف پی‌های سطحی واقع بر خاک‌های رسی نرم را به‌لحاظ بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست برطرف نماید. علی‌رغم مزایا و لزوم شناخت بیشتر رفتار پی‌های لبه‌دار، تاکنون مطالعات محدودی در مورد کاربرد این نوع پی‌ها به‌ویژه در خاک‌های ریزدانه انجام شده که نیاز به تحقیقات بیشتر جهت درک مکانیزم انتقال بار این نوع پی‌ها احساس می‌شود. با مروری بر منابع مرتبط با پیشینه پی‌های لبه‌دار، خلاصه‌ای از مهمترین نتایج محققان مختلف ارائه می‌شود:

نتایج تحلیل المان محدود در مورد تاثیر عمق مدفون پی لبه‌دار بر مقادیر ظرفیت باربری و پوش گسیختگی نشان داد که اندازه پوش با افزایش عمق مدفون به‌ازای مقاومت برشی یکسان در تراز لبه افزایش یافته، ولی شکل پوش برای اعماق مدفون، مشابه و یکسان با پی سطحی است [۱].

با مطالعه روش‌های محاسبه مقاومت پی‌های لبه‌دار واقع بر بستر رس در برابر نفوذ پی، مشاهده شد که مقدار ظرفیت باربری پی لبه‌دار به‌عنوان مجموع مقاومت چسبندگی[1] سطوح دیواره و مقاومت انتهایی لبه محاسبه می‌شود. مقاومت دیواره لبه پی با اعمال ضریب α به‌مقدار مقاومت زهکشی‌نشده خاک و ظرفیت باربری انتهایی نیز به‌عنوان مجموع ضرایب ظرفیت باربری N_γ و N_q، تخمین زده می‌شود [۲].

ظرفیت باربری قائم زهکشی‌نشده پی‌های لبه‌دار واقع بر رس توسط مدل‌سازی فیزیکی و عددی بررسی شد. تحلیل نتایج نشان داد که در بیشتر حالت‌ها، ظرفیت باربری پی لبه‌دار در خاک زهکشی‌نشده می‌تواند با فرض صلب بودن خاک درون لبه محاسبه شود. به‌عبارت دیگر، پی لبه‌دار همانند پی سطحی مدفون در تراز نوک لبه عمل می‌کند [۳].

پاسخ پی‌های نواری لبه‌دار واقع بر رس به بارگذاری ترکیبی نشان داد که ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار در صورت وجود تغییرشکل خاک درون لبه نسبت به حالت صلب، می‌تواند کاهش یابد. افزودن لبه میانی درون لبه محیطی، باعث ایجاد صلبیت بیشتر در خاک شده و از کاهش ظرفیت باربری جلوگیری می‌کند، به‌طوری که ظرفیت باربری پی می‌تواند تا مقدار معادل پی مدفون صلب افزایش یابد. وجود حداقل یک لبه میانی به‌ویژه برای پی‌های با نسبت عمق لبه کم و خاک‌های با مقاومت غیریکنواخت توصیه می‌شود [۴].

بر پایه نتایج مطالعه عددی بر روی ظرفیت باربری پی لبه‌دار به‌عنوان پی توربین‌های بادی واقع بر رس مشاهده شد که ظرفیت باربری قائم و اندازه پوش‌های گسیختگی پی با افزایش نسبت عمق لبه، افزایش می‌یابد [۵].

نتایج تحلیل عددی سه‌بعدی جهت تخمین ظرفیت باربری زهکشی‌نشده پی‌های لبه‌دار واقع بر رس نشان داد که اندازه و شکل پوش‌های گسیختگی وابسته به ترکیب بار، عمق مدفون و درجه ناهمگنی خاک است. برای عمق مدفون مشخص، شکل پوش گسیختگی وابستگی بیشتری به عمق مدفون در مقایسه با بار و درجه ناهمگنی خاک دارد [۶].

اثر ایده‌آل‌سازی پی لبه‌دار به‌عنوان خاک صلب درون لبه از طریق مقایسه ضرایب ظرفیت باربری و مکانیزم گسیختگی مطالعه و روابطی جهت پیشگویی ضرایب باربری ارائه شد. مقایسه مکانیزم گسیختگی پی‌های لبه‌دار و مدفون در تراز لبه نشان داد که نوع گسیختگی و میزان ضرایب ظرفیت باربری به‌ازای نسبت‌های کمتر عمق لبه متفاوت بوده و با افزایش عمق مدفون، یکسان می‌شود. برای نسبت‌های عمق مدفون کمتر و خاک با درجه ناهمگنی بیشتر، ایجاد مکانیزم گسیختگی درون لبه مستعدتر مشاهده شد [۷].

نتایج تأثیر افزودن لبه میانی بر رفتار پی‌های لبه‌دار واقع بر خاک رس نشان داد که برای خاک با مقاومت ثابت در عمق، افزودن لبه میانی افزایش قابل‌توجهی در مقدار باربری ارائه نمی‌دهد. با این حال به‌ازای خاک غیریکنواخت، به‌دلیل تغییر مکانیزم و عمیق‌تر شدن گوه گسیختگی خاک ناشی از حضور لبه، ترکیب پی لبه‌دار با لبه داخلی افزایش حدود ۴۲٪ در مقادیر ظرفیت باربری قائم پی را نتیجه می‌دهد [۸].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.3.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.35]

ظرفیت باربری قائم پی‌های لبه‌دار واقع بر خاک رس زهکشی‌نشده توسط تحلیل المان محدود ارزیابی و معادلاتی جهت محاسبه ظرفیت باربری ارائه شد [۱۰-۹].

نتایج تحلیل و بررسی اثر عمق مدفون پی لبه‌دار و درجه ناهمگنی خاک رس بر مقادیر ظرفیت باربری نشان داد که با تغییر رس همگن به غیرهمگن، روند ضرایب ظرفیت باربری تغییر می‌یابد. به‌ازای درجه ناهمگنی کمتر از پنج، تغییرات جزئی مشاهده شد و با افزایش درجه ناهمگنی، ضرایب ظرفیت باربری افزایش یافت. همچنین مقادیر ظرفیت باربری برای نسبت‌های عمق لبه بیشتر از یک به‌ازای درجه ناهمگنی مختلف، تقریباً یکسان به‌دست آمد. نتایج نشان داد که ضرایب ظرفیت باربری در خاک رس ناهمگن به‌ازای مقاومت زهکشی‌نشده در عمق یک‌دهم قطر پی زیر نوک لبه، مقادیر تقریباً یکسانی با رس همگن دارد [۱۱].

کاربرد پی‌های لبه‌دار واقع بر شیروانی تحت بارگذاری زلزله، از طریق تحلیل عددی المان محدود با بررسی اثر لبه بر پایداری در برابر گسیختگی، کنترل جابه‌جایی‌های افقی و قائم و کاهش فشار آب حفره‌ای مطالعه شد. نتایج نشان داد که حضور لبه تأثیر زیادی در افزایش پایداری داخلی شیب و پی با کاهش تغییرشکل شیب و فشار آب حفره‌ای دارد [۱۲].

ظرفیت باربری زهکشی‌نشده پی‌های لبه‌دار واقع بر رس توسط تحلیل نظری مشخصات تنش و تحلیل المان محدود مطالعه و روابطی جهت تخمین ظرفیت باربری نهایی ارائه شد. نتایج نشان داد که افزایش عمق مدفون باعث افزایش ظرفیت باربری و تغییر مکانیزم گسیختگی پی می‌شود. ضرایب ظرفیت باربری و عمق پی برای خاک با درجه ناهمگنی زیاد، بسته به نسبت عمق ابتدا کاهش و سپس با افزایش عمق لبه، افزایش یافت [۱۳].

رفتار پی‌های لبه‌دار واقع بر خاک‌های ماسه‌ای توسط برخی دیگر از محققان مطالعه و بر اساس نتایج، بهبود قابل‌توجه ظرفیت باربری و کاهش نشست برای این نوع پی‌ها ناشی از محصورسازی جانبی ماسه گزارش شد [۱۹-۱۴].

در مطالعه کنونی توسط تحلیل المان محدود به بررسی ابعاد مختلف حضور لبه و تأثیر پارامترهای مختلف هندسی پی و مشخصات خاک بر بهبود ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی واقع بر خاک رس پرداخته شده است. تاثیر پارامترهای مختلف شامل قطر پی، نسبت عمق لبه به قطر پی، مقاومت زهکشی‌نشده رس، زبری سطوح فصل مشترک پی- خاک، درجه ناهمگنی خاک غیریکنواخت و عمق بستر لایه سنگی بررسی شد. پژوهش حاضر در مقایسه با مطالعه‌های مشابه محققان مختلف در رابطه با پی‌های لبه‌دار، در موارد ذیل متمایز است که از جنبه‌های نوآوری تحقیق به‌شمار می‌آیند:

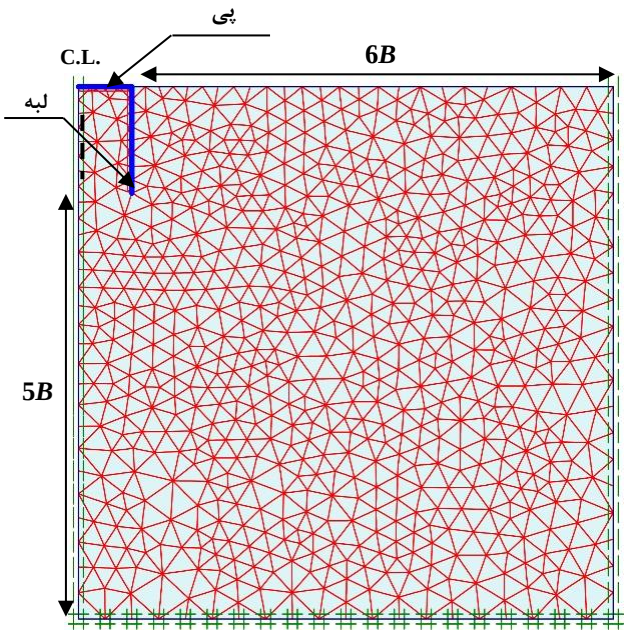
- مقایسه و ارزیابی نتایج ظرفیت باربری و نشست پی‌های لبه‌دار با مقادیر متناظر پی‌های سطحی و نیمه‌عمیق؛
- ارائه نمودارهایی جهت تخمین میزان افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی‌های لبه‌دار؛
- بررسی اثر اندازه پی و میزان زبری‌های مختلف سطوح مدل‌های پی؛
- مطالعه تاثیر محصورسازی قائم رس توسط بستر لایه سنگی بر نتایج محصورسازی جانبی لبه و ارزیابی میزان تاثیر محصورسازی سه‌بعدی خاک رس بر نتایج.

۲ - مدل‌سازی عددی

به‌منظور انجام مدل‌سازی و تحلیل المان محدود از مجموعه نرم‌افزار پلکسیس استفاده شد و تاثیر محصورسازی سه‌بعدی خاک رس ناشی از حضور لبه محیطی و بستر سنگی صلب بر رفتار پی‌های سطحی تحت بارگذاری محوری مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به وجود شرایط تقارن محوری برای مدل‌های پی و بارگذاری، مدل‌سازی به‌صورت دو بعدی (کرنش مسطح) انجام و نصف شبکه مدل تحلیل شد. جهت شبیه‌سازی شبکه المان‌ها، از المان‌های مثلثی ۱۵ گرهی برای مصالح خاک و شش گرهی برای مصالح پی استفاده گردید. به‌منظور کاهش تاثیر نامطلوب شرایط مرزی بر نتایج، فواصل مرزهای افقی و قائم شبکه المان محدود از مدل‌های پی بر اساس نتایج تحلیل حساسیت و استناد به مراجع معتبر [۲۲-۲۰]، به‌ترتیب حداقل شش و پنج برابر قطر پی در نظر گرفته شد. جزئیات ابعاد شبکه المان و شرایط مرزی مدل‌سازی در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

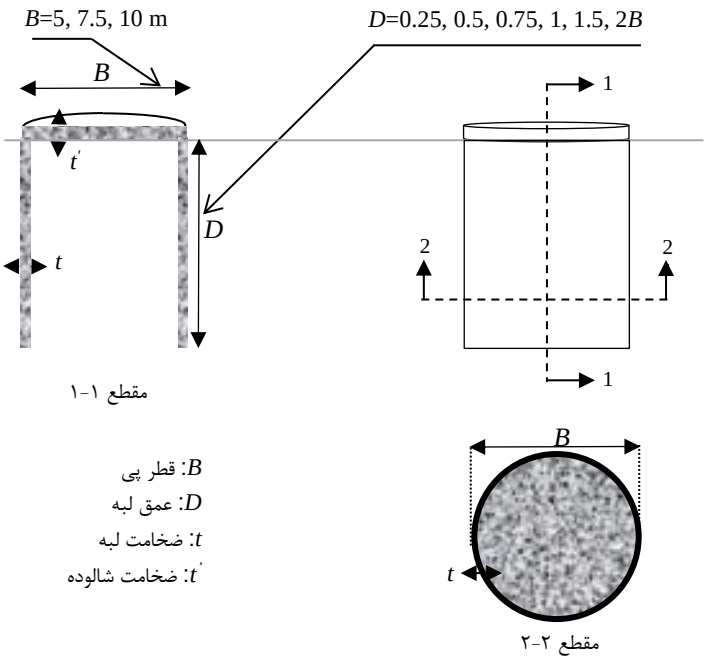
جهت شبیه‌سازی سطوح فصل‌مشترک المان‌های صلب پی و لبه با خاک رس و همچنین در نظرگیری میزان زبری‌های مختلف سطوح در مدل‌سازی‌ها، از ضریب کاهش مقاومت سطوح فصل‌مشترک ($R_{\text{interface}}$) استفاده شد. مدل‌های پی به‌صورت تدریجی و توسط روش جابه‌جایی کنترل بارگذاری شده و پاسخ‌های نیرو- نشست به‌ازای هر یک از مدل‌ها به‌دست آمد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.3.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.35]



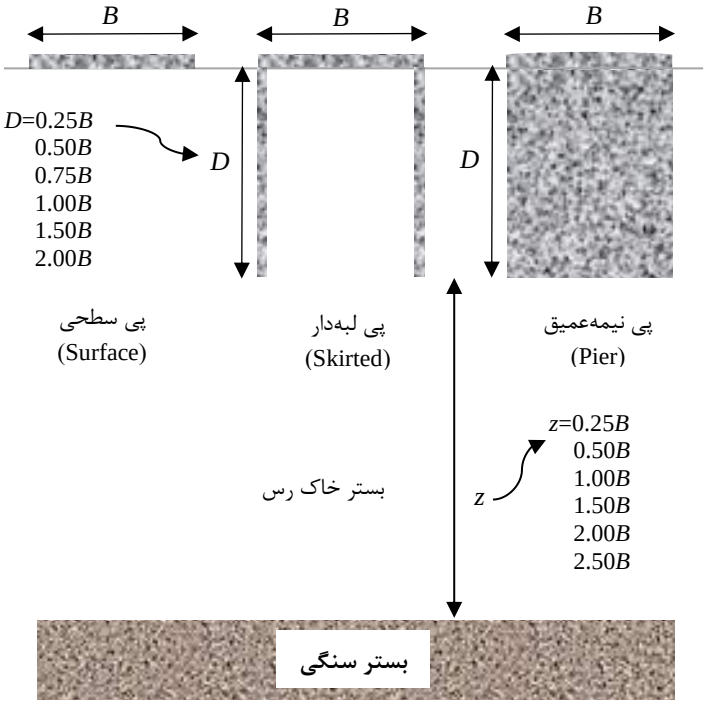
شکل ۱- جزئیات شبکه المان و شرایط مرزی مدل‌سازی

مدل‌های پی لبه‌دار متشکل از شالوده‌های دایره‌ای با قطرهای (B) برابر با ۲/۵، ۵ و ۱۰ m و لبه‌های به عمق D، مورد تحلیل قرار گرفت. به‌منظور بررسی تأثیر عمق لبه بر مقادیر ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی، هفت نسبت عمق لبه به قطر پی (D/B) برابر با ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵ و ۲ مدل‌سازی و بررسی شد. شکل ۲ نمایی از هندسه و ابعاد مدل‌های پی استفاده شده در تحلیل را نشان می‌دهد. با توجه به تأثیر کم خاک رس بر تغییرشکل مدل پی و صلب در نظر گرفتن مدل‌ها، ضخامت شالوده (t'=0.06B) و لبه‌ها (t=0.02B) برحسب مقادیر قطر پی و جنس بتن در نظر گرفته شد.



شکل ۲- هندسه مدل‌های پی لبه‌دار و مقادیر قطر پی و عمق لبه

همچنین به‌منظور مطالعه تاثیر محصورسازی قائم پی‌های لبه‌دار بر عملکرد این نوع پی‌ها، مطابق شکل ۳ فاصله کف پی تا لایه بستر سنگی (z) به‌صورت نسبتی از میزان قطر پی z/B برابر با ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵، مدل‌سازی شد. مدل‌های پی با در نظر گرفتن ضخامت و سختی کافی مطابق مشخصات بتن، توسط المان مدل‌سازی پلیت[۲] در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد. جهت بررسی میزان کارآمدی پی‌های لبه‌دار در مقایسه با سایر انواع پی‌های متداول، مدل‌های پی سطحی و نیمه‌عمیق یکسان و متناظر با ابعاد پی و لبه (شکل ۳)، مورد تحلیل قرار گرفت.



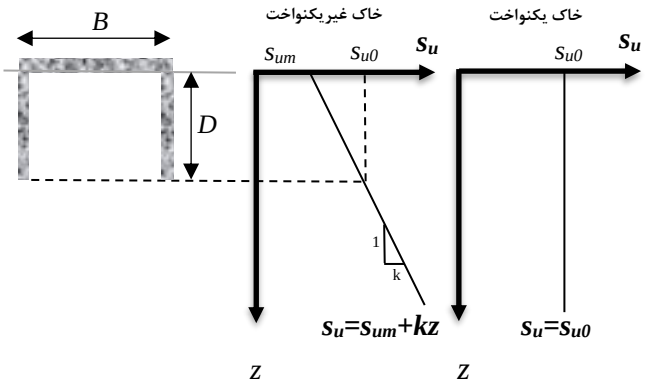
شکل ۳- ابعاد و محدوده پارامترهای مورد مطالعه مدل‌های پی

جهت شبیه‌سازی مصالح خاک و مدل پی در نرم‌افزار المان محدود، از مدل رفتاری تنش- کرنش الاستیک خطی- پلاستیک کامل ترسکا[۳] برای مدل‌سازی خاک رس و از مدل الاستیک خطی برای مصالح بتنی پی استفاده شد. مدل‌های پی بر روی بستر خاک رس با شرایط زهکشی‌نشده (φ=۰) در نظر گرفته شد، به‌طوری که دو نوع خاک رس با مقاومت برشی یکنواخت در عمق و خاک غیریکنواخت با درجه ناهمگنی مختلف، مطابق شکل ۴ تحلیل شد. برای حالت رس یکنواخت، مقاومت زهکشی‌نشده (s_u) به‌مقدار ثابت ۵ kPa و برای رس غیریکنواخت که مقاومت با افزایش عمق به‌صورت خطی افزایش می‌یابد، مطابق رابطه (۱) در نظر گرفته شد:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.3.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.35]

$$s_u = s_{um} + kz \qquad (۱)$$

که s_{um} مقاومت زهکشی‌نشده رس در سطح زمین، k نرخ افزایش مقاومت با عمق و z عمق زیر تراز سطح زمین است. مقادیر موردنظر برای مصالح خاک و مدل‌های پی به‌ازای پارامترهای مختلف تحلیل، در جدول ۱ ارائه شده است.



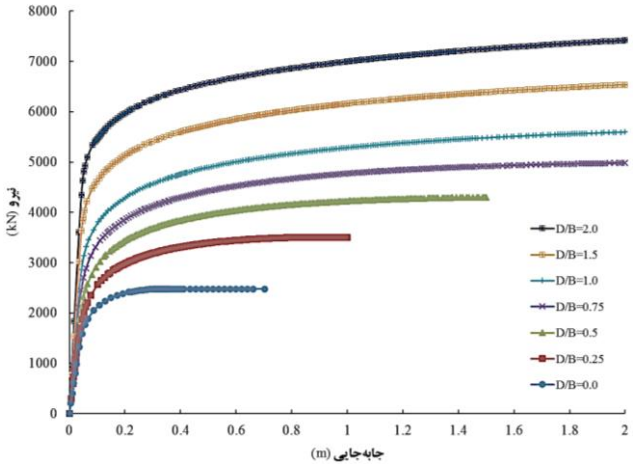
شکل ۴- تغییرات مقاومت برشی زهکشی نشده خاک رس

جدول ۱- خصوصیات مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی عددی

مصالح / پارامتر	خاک رس: یکنواخت	خاک رس: غیریکنواخت	پی (بتن)
مدل تنش- کرنش	ترسکا		الاستیک خطی
وزن واحد (kN/m^3)	۱۶		۲۲
نسبت پواسون	۰/۴۹۵		۰/۲
مدول یانگ (kN/m^2)	۵۰۰*s_u		۲/۶۲*۱۰^۷
مقاومت زهکشی نشده (kPa)	۵	sum+kz	-
درجه ناهمگنی خاک رس (kB/s_{um})	۰	۲، ۴، ۶، ۱۰، ۳۰	-
ضریب زبری فصل‌مشترک	۰/۱-۲۵		-

۳ - نتایج مدل‌سازی عددی

جهت بررسی عملکرد پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های سطحی و میزان تأثیر عمق لبه و بستر سنگی، با انجام بیش از ۱۶۰ مدل‌سازی با در نظرگیری پارامترهای مؤثر بر عملکرد پی‌های لبه‌دار، مقادیر ظرفیت باربری نهایی و نشست متناظر مدل‌های پی از روی منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی به‌دست آمده و با مقادیر متناظر پی‌های سطحی مقایسه شد. تأثیر پارامترهای مختلف شامل مشخصات هندسی پی همچون قطر پی (B)، نسبت عمق لبه (D/B) و مشخصات خاک شامل مقاومت زهکشی‌نشده رس (s_u)، ضریب زبری سطوح فصل مشترک پی- خاک (α)، درجه ناهمگنی خاک غیریکنواخت (kB/s_{um}) و عمق بستر لایه سنگی (z) بر رفتار پی‌های لبه‌دار واقع بر رس به‌لحاظ ظرفیت باربری و نشست بررسی شد. شکل ۵ نمونه‌ای از منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی مدل‌های پی لبه‌دار را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمونه‌ای از منحنی‌های پاسخ نیرو- جابه‌جایی پی لبه‌دار به‌ازای نسبت‌های مختلف عمق لبه (B=10 m, kB/s_{um}=0, α=1)

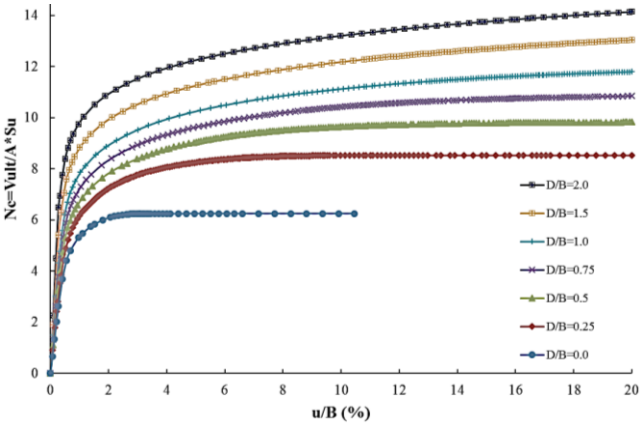
به‌منظور تعیین نیروی گسیختگی و جابه‌جایی متناظر مدل‌های پی، از میان روش‌های مختلف موجود در مراجع [۲۳]، روش تقاطع خطوط مماس مدنظر قرار گرفته و بار نهایی بر پایه این معیار تخمین زده شد. در این روش، خطوط مماس در نواحی ابتدا و انتهای منحنی‌ها ترسیم و بار متناظر با نقطه تقاطع خطوط به‌عنوان بار نهایی در نظر گرفته شد.

برای پی‌های دایره‌ای واقع بر خاک رس زهکشی‌نشده تحت بارگذاری قائم، ظرفیت باربری خالص می‌تواند توسط رابطه (۲) تخمین زده شود که در این رابطه V_{ult} بار قائم نهایی پی، s_u مقاومت برشی زهکشی‌نشده رس، N_c ضریب ظرفیت باربری، A سطح مقطع پی، s_c ضریب شکل و d_c ضریب عمق هستند:

$$V_{ult} = s_u * N_c * s_c * d_c * A \qquad (۲)$$

به‌منظور بررسی بهتر عملکرد پی‌های لبه‌دار و مقایسه تأثیر پارامترهای مختلف، رفتار باربری برحسب ضریب ظرفیت باربری نرمالیزه شده ($N_c=V_{ult}/A*s_u$) مطالعه و نمودارهایی برحسب ضریب بی‌بعد N_c در برابر نسبت نشست u/B ارائه شد. در رابطه مذکور، s_u برای رس ناهمگن مقدار مقاومت زهکشی‌نشده در تراز نوک لبه در نظر گرفته شده و پارامتر u نشست پی و B قطر پی هستند. نمونه‌ای از منحنی‌های نرمالیزه شده ضریب ظرفیت باربری برحسب نسبت نشست، در شکل ۶ مشاهده می‌شود. روند منحنی‌ها بیانگر افزایش قابل‌توجه مقادیر بار قائم پی‌های لبه‌دار با افزایش عمق لبه است که مقادیر کمّی بهبود عملکرد در بخش‌های بعدی ارائه شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.3.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.35]



شکل ۶- نمونه‌ای از منحنی‌های نرمالیزه شده برحسب ضریب ظرفیت باربری و نسبت نشست (B=10 m, kB/s_{um}=0, α=0.5)

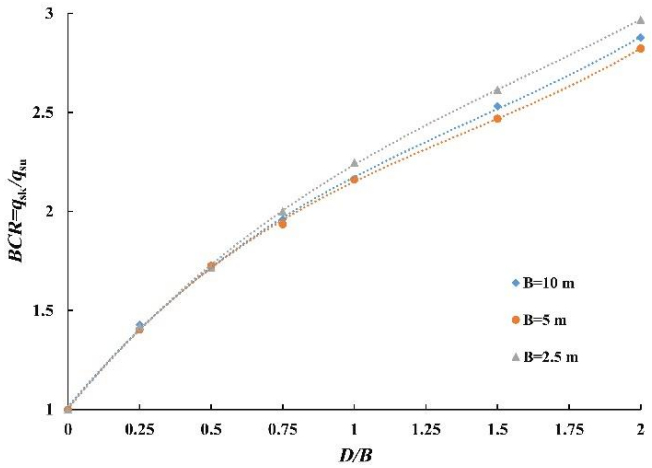
۴ - تحلیل، بحث و بررسی نتایج

با توجه به نمودارهای نیرو- جابه‌جایی، مقادیر بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست پی‌های سطحی ناشی از وجود لبه (محصورسازی جانبی) و لایه بستر سنگی (محصورسازی قائم) زیر پی، محاسبه و تأثیر پارامترهای مختلف توسط نمودارهای بی‌بعد نسبت ظرفیت باربری (BCR)[۴] و ضریب کاهش نشست (SRF)[۵] ارائه شد. مقادیر نسبت ظرفیت باربری ($BCR=q_{sk}/q_{su}$) به‌عنوان نسبت ظرفیت باربری پی لبه‌دار (q_{sk}) به ظرفیت باربری پی سطحی متناظر (q_{su}) تعریف می‌شود. نمودارهای ضریب کاهش نشست ($SRF=S_{sk}/S_{su}$) نیز برحسب نسبت نشست پی لبه‌دار (S_{sk}) به نشست پی سطحی متناظر (S_{su}) ارائه شده است. مقادیر نشست متناظر پی‌ها در میزان تراز تنشی برابر با ۵۰٪ ظرفیت باربری پی سطحی ($0.5q_{su}$) محاسبه شده است. در نظرگیری میزان تنش $0.5q_{su}$ در محاسبات نشست، حساسیت محاسبات را کاهش داده و تأثیر کمی بر دقت نتایج دارد. با توجه به مقادیر معمول تنش‌های مجاز در عملیات طراحی که در حدود نصف تا یک‌سوم ظرفیت باربری نهایی پی در نظر گرفته می‌شود، انتخاب چنین تراز تنشی در محاسبات می‌تواند تطابق خوب و قابل‌قبولی با واقعیت داشته باشد.

بر پایه نتایج BCR و SRF، ملاحظه شد که محصورسازی جانبی و قائم خاک زیر پی سطحی، مقادیر ظرفیت باربری را به‌طور قابل‌توجهی افزایش و میزان نشست را نیز کاهش می‌دهد.

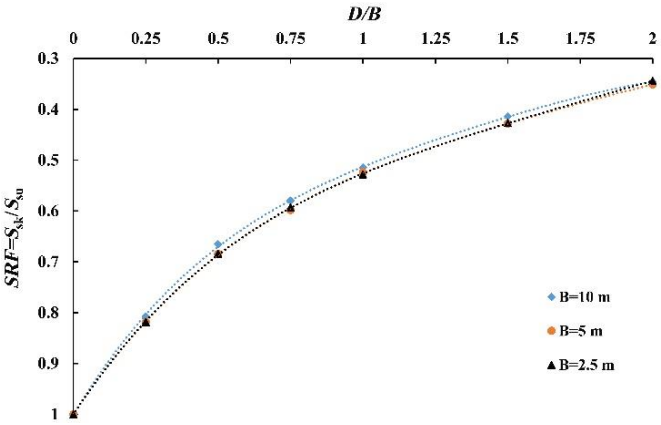
۴-۱- بررسی تأثیر نسبت عمق لبه (D/B)

همان‌طوری که از منحنی‌های بار- جابه‌جایی مشاهده شد؛ وجود لبه زیر پی‌ها، ظرفیت باربری را به‌مقدار قابل‌توجهی افزایش داده و روند افزایش باربری با اضافه شدن مقدار عمق لبه، افزایش می‌یابد. به‌منظور کمّی کردن مقادیر بهبود ظرفیت باربری با افزایش عمق لبه، نمودار نسبت ظرفیت باربری در برابر نسبت عمق لبه به‌ازای قطرهای مختلف پی در شکل ۷ ارائه شده است. برای همه قطرها، روند تقریباً یکسانی از افزایش ظرفیت باربری مشاهده می‌شود؛ با افزایش عمق لبه از ۰/۲۵ قطر پی تا ۲ برابر، مقادیر ظرفیت باربری در محدوده ۲/۹۷-۱/۴ برابر افزایش یافته که بیانگر بهبود قابل‌توجه ۳۰۰٪ در باربری پی سطحی به‌ازای نسبت عمق D/B=2 است. کمترین میزان افزایش باربری برای نسبت عمق ۰/۲۵ و به‌میزان ۴۰٪ به‌دست آمد.



شکل ۷- تغییرات نسبت ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار برحسب مقادیر مختلف عمق لبه و عرض پی (kB/s_{um}=0, α=1)

تأثیر وجود لبه بر میزان کاهش نشست پی‌های سطحی برحسب ضریب SRF در برابر نسبت عمق لبه در شکل ۸ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که وجود لبه نشست را کاهش داده و روند کاهش نشست با افزایش عمق لبه افزایش می‌یابد. تغییرات ضریب کاهش نشست به‌ازای اعماق مختلف لبه حدود ۰/۳۴-۰/۸۲ به‌دست آمد که بیانگر کاهش حداکثر ۶۶٪ و حداقل ۱۸٪ نشست پی سطحی ناشی از لبه است. روند نتایج به‌ازای همه قطرهای پی تقریباً یکسان بوده و تغییر قابل‌توجهی در مقادیر کاهش نشست مشاهده نشد.

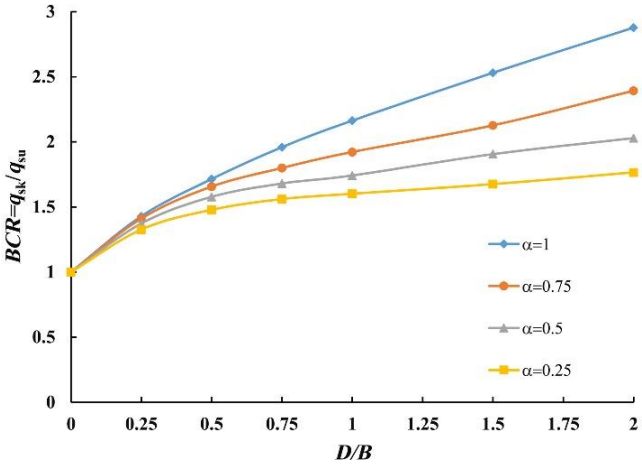


شکل ۸- مقادیر تغییرات ضریب کاهش نشست پی لبه‌دار برحسب مقادیر مختلف عمق لبه و عرض پی (kB/s_{um}=0, α=1)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.3.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.35]

۴-۲- بررسی تأثیر ضریب فصل مشترک خاک و پی

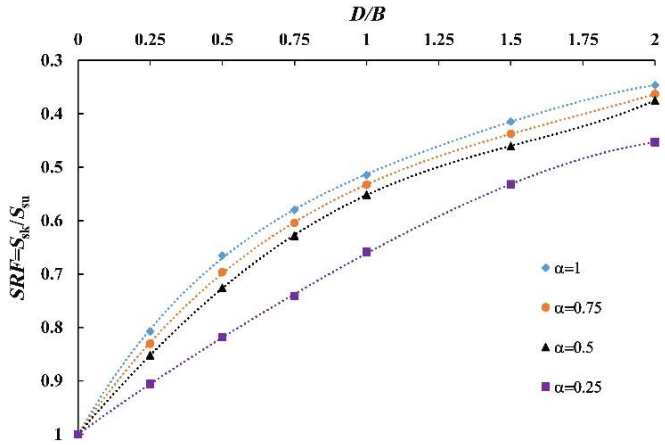
با توجه به اینکه یکی از پارامترهای مؤثر بر ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار، ضریب فصل مشترک سطوح خاک و پی (α) است، تغییرات نسبت ظرفیت باربری به‌ازای مقادیر مختلف زبری در شکل ۹ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که با کاهش ضریب زبری، مقادیر بهبود ظرفیت باربری متناسب با نسبت عمق لبه کاهش یافته است؛ به‌طوری که با افزایش عمق لبه، تأثیر کاهش زبری مشهودتر بوده و میزان اختلاف نتایج باربری به‌ازای زبری‌های مختلف، افزایش می‌یابد.



شکل ۹- تغییرات نسبت ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار برحسب زبری‌های مختلف سطوح فصل مشترک (B=10 m, kB/s_{um}=0)

تغییرات مقادیر نسبت ظرفیت باربری از محدوده ۲/۹۷-۱/۴ به‌ازای α=۱، به‌حدود ۱/۸-۱/۳ برای α=۰/۲۵ کاهش یافته که بیانگر افت قابل‌توجه بهبود ظرفیت باربری است. تحلیل نتایج نشان داد که به‌ازای D/B=2، با کاهش ۵۰٪ و ۷۵٪ در میزان زبری، مقادیر ظرفیت باربری پی لبه‌دار به‌ترتیب حدود ۳۱٪ و ۴۱٪ کاهش یافته، در حالی‌که برای D/B=0.5، حدود ۴٪ و ۸٪ کاهش یافته است.

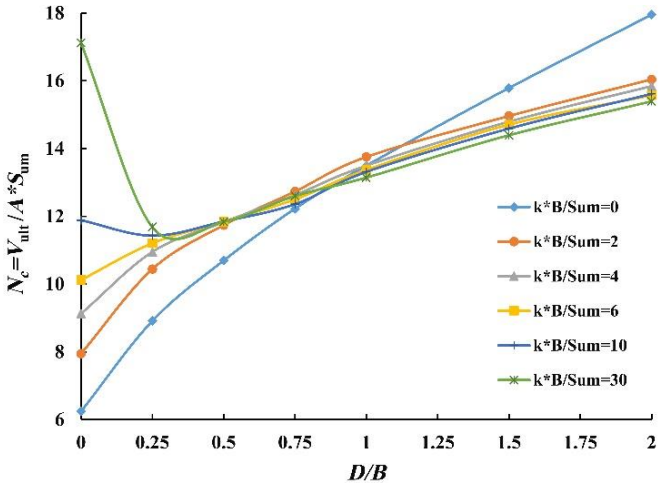
شکل ۱۰ تأثیر ضریب زبری سطوح فصل مشترک بر مقادیر کاهش نشست پی‌های لبه‌دار به‌ازای عمق‌های مختلف لبه را نشان می‌دهد. همانند مقادیر ظرفیت باربری، با کاهش میزان زبری سطوح پی، بهبود عملکرد پی‌های لبه‌دار به‌لحاظ کاهش نشست نیز کاهش یافته است. بر اساس تحلیل نتایج، به‌ازای α=۱ محدوده تغییرات ضریب کاهش نشست از میزان ۰/۳۴-۰/۸۲ به‌حدود ۰/۴۵-۰/۹۱ برای حالت α=۰/۲۵ تغییر یافته که کاهش عملکرد پی لبه‌دار را به‌لحاظ کاهش نشست به‌میزان ۲۴٪ نشان می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان اذعان نمود که افزایش میزان زبری سطوح فصل مشترک لبه و پی با خاک، باعث بهبود عملکرد پی‌های لبه‌دار از نظر افزایش میزان ظرفیت باربری و کاهش نشست پی می‌شود.



شکل ۱۰- تغییرات ضریب کاهش نشست پی‌های لبه‌دار برحسب زبری فصل مشترک (B=10 m, kB/s_{um}=0)

۴-۳- بررسی تأثیر درجه ناهمگنی خاک

جهت بررسی عملکرد پی‌های لبه‌دار در خاک‌های با مقاومت غیریکنواخت و مقایسه با حالت خاک یکنواخت، تعدادی مدل‌سازی بر روی بستر رس با درجات ناهمگنی مختلف بین صفر تا ۳۰ انجام و نتایج تحلیل شد. تغییرات ضریب نرمالیزه شده ظرفیت باربری ($N_c=V_{ult}/A*s_{um}$) در برابر نسبت عمق لبه و به‌ازای درجات مختلف ناهمگنی ($k*B/s_{um}$) در شکل ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۱۱- تغییرات مقادیر ضریب ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار به‌ازای درجه ناهمگنی خاک (B=10 m, α=1)

از روند منحنی‌ها ملاحظه می‌شود که با تغییر مقاومت خاک از حالت یکنواخت به غیریکنواخت، رفتار منحنی ضریب ظرفیت باربری تغییر می‌کند؛ برای حالت خاک یکنواخت با افزایش نسبت عمق لبه، منحنی به‌صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. در حالی‌که برای حالت خاک غیریکنواخت، به‌ازای درجات ناهمگنی کمتر از $k*B/s_{um}$<10، روند تقریباً یکسان با حالت خاک یکنواخت مشاهده شد؛ با این تفاوت که مقادیر N_c برای نسبت‌های عمق کوچک‌تر از یک و بزرگ‌تر از یک، به‌ترتیب بیشتر و کمتر از مقادیر حالت یکنواخت است. با افزایش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.3.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.35]

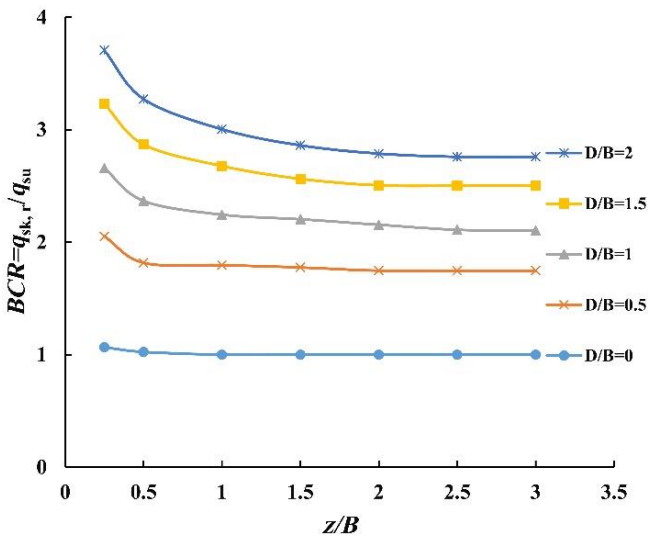
بیشتر درجه ناهمگنی خاک ($k^*B/s_{um}\geq10$)، ضرایب ظرفیت باربری به‌ازای نسبت‌های عمق کمتر از ۰/۵، ابتدا کاهش و سپس با افزایش نسبت عمق، افزایش می‌یابد. نتایج همچنین نشان داد که اختلاف مقادیر N_c برای نسبت‌های عمق کمتر از ۰/۵ به‌ازای ناهمگنی‌های مختلف خاک بیشتر است که با افزایش نسبت عمق لبه، مقادیر به یکدیگر نزدیک شده و تقریباً به‌مقدار یکسانی می‌رسند.

۴-۴- بررسی تأثیر مقاومت زهکشی نشده رس

با توجه به تاثیرگذاری پارامتر مقاومت زهکشی‌نشده رس (s_u) بر مقادیر ظرفیت باربری پی‌های واقع بر خاک‌های رسی، علاوه بر مقاومت زهکشی‌نشده ۵ kPa، دو مقدار ۱۰ و ۲۰ kPa نیز جهت مطالعه اثر مقاومت زهکشی‌نشده رس بر ظرفیت باربری بررسی شد. مقایسه نتایج نسبت ظرفیت باربری به‌ازای مقادیر مختلف مقاومت زهکشی‌نشده رس نشان داد که میزان بهبود در عملکرد پی‌های لبه‌دار به‌ازای خاک رس نرم و با مقاومت برشی کمتر، بهتر بوده و استفاده از لبه دارای کارایی و بهره‌وری بیشتری است. به‌طوری که با افزایش مقاومت زهکشی‌نشده رس، نسبت ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار کاهش یافت؛ با افزایش دو و چهار برابری مقاومت زهکشی‌نشده، مقادیر نسبت ظرفیت باربری پی لبه‌دار به‌طور متوسط حدود ۸٪ و ۱۷٪ کاهش نشان داد. به‌طور کلی، استفاده از لبه محیطی زیر پی‌های سطحی واقع بر خاک‌های ریزدانه، برای خاک‌های نرم‌تر و دارای مقاومت برشی کمتر، دارای سودمندی و کارآیی بیشتری است.

۴-۵- بررسی اثر محصورسازی قائم توسط بستر سنگی

یکی از روش‌های بهبود عملکرد پی‌های سطحی علاوه بر محصورسازی جانبی خاک توسط لبه، وجود لایه بستر سنگی در اعماق زیر پی و محصورسازی قائم خاک است. در این مطالعه، تأثیر استفاده همزمان از لبه و بستر سنگی زیر پی سطحی جهت محصورسازی سه‌بعدی خاک رس بر مقادیر بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست پی بررسی شد. شکل ۱۲ تاثیر وجود بستر سنگی زیر پی‌های لبه‌دار واقع بر لایه رس با ضخامت‌های مختلف بر تغییرات نسبت ظرفیت باربری برحسب مقادیر z/B را نشان می‌دهد. نتایج، بهبود مقادیر ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار را با افزایش نسبت عمق لبه و کاهش مقادیر z/B (کاهش ضخامت رس) نشان می‌دهد. بر اساس تحلیل نتایج، برای محصورسازی جانبی توسط لبه مقادیر نسبت ظرفیت باربری به‌ازای D/Bهای مختلف در محدوده ۲/۹۷-۱/۴ به‌دست آمد، در حالی‌که برای محصورسازی سه‌بعدی توسط لبه و بستر سنگی به‌ازای شرایط یکسان، به‌میزان ۳/۷۱-۱/۷۵ مشاهده شد که افزایش متوسطی در حدود ۲۶٪ را ناشی از محصورسازی قائم خاک نسبت به محصورسازی جانبی به‌همراه دارد.



شکل ۱۲- تغییرات نسبت ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار برحسب عمق بستر سنگی و عمق لبه (B=10 m, kB/s_{um}=0)

تاثیر محصورسازی سه‌بعدی رس توسط لبه و بستر سنگی بر تغییرات ضریب کاهش نشست نیز نشان داد که با افزایش عمق لبه و کاهش فاصله لایه رس از بستر سنگی، مقادیر ضریب کاهش نشست کاهش می‌یابد که بیانگر بهبود عملکرد پی‌های سطحی به‌لحاظ کاهش نشست ناشی از محصورسازی قائم و جانبی خاک است. مقادیر ضریب کاهش نشست ناشی از محصورسازی سه‌بعدی به‌ازای همه نسبت‌های عمق لبه تا مقدار حدود ۰/۱ به‌دست آمد که بیانگر کاهش قابل‌توجه نشست پی سطحی به‌میزان حدود ۹۰٪ است. تحلیل نتایج نشان داد که به‌ازای همه مقادیر D/B، مقدار عمق بحرانی بستر سنگی (z) که پس از آن عمق، میزان افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی لبه‌دار ثابت می‌شود، در حدود $2B$ است.

۵ - مقایسه و صحت‌سنجی نتایج

۵-۱- مقایسه عملکرد پی‌های لبه‌دار و نیمه‌عمیق

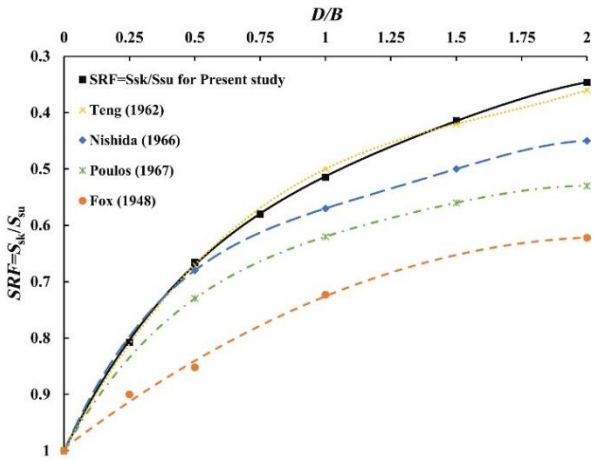
با توجه به بهبود مقادیر ظرفیت باربری و کاهش نشست پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های سطحی و نوع مکانیزم گسیختگی و انتقال بار پی‌های لبه‌دار مشابه مکانیزم پی‌های نیمه‌عمیق و عمیق، میزان کارآیی پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های نیمه‌عمیق بررسی شد. پی‌های نیمه‌عمیق با عمق‌های معادل با نسبت عمق D/B (پی‌های بتنی معادل با پی‌های لبه‌دار که خاک درون لبه با بتن جایگزین شده) مدل‌سازی و نتایج با مقادیر متناظر پی‌های لبه‌دار مقایسه شد. تحلیل نتایج بیانگر عملکرد و رفتار نزدیک و مشابه پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های نیمه‌عمیق به‌ازای همه مقادیر عمق است و تأییدی بر صحت نتایج تحقیقات قبلی مبنی بر شباهت مکانیزم گسیختگی و باربری دو نوع پی می‌باشد. بر اساس مقایسه کمّی نتایج، مقادیر بار متحمل شده توسط پی نیمه‌عمیق حدود ۳٪ بیشتر از پی لبه‌دار است

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.3.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.35]

که بیانگر کاهش جزئی عملکرد پی‌های لبه‌دار ناشی از تغییرشکل خاک درون لبه نسبت به حالت صلب است. بنابراین استفاده از پی لبه‌دار به‌جای پی نیمه‌عمیق می‌تواند کارآمد و مقرون به صرفه باشد.

۵-۲- مقایسه نشست پی‌های لبه‌دار و سطحی مدفون

در سازه‌هایی که حساسیت زیادی به میزان نشست پی دارند و معیار نشست به‌جای گسیختگی برشی بر ظرفیت باربری پی حاکم می‌شود، به‌کارگیری پی عمیق، افزایش عرض پی و استفاده از پی سطحی مدفون در تراز اعماق پایین‌تر به‌منظور کاهش میزان نشست، از راه‌حل‌های مرسوم در عملیات اجرایی است. نتایج مطالعه نشان داد که وجود لبه زیر پی سطحی، باعث کاهش قابل‌توجه نشست پی سطحی می‌شود. به‌عبارت دیگر، استفاده از پی لبه‌دار به‌جای پی سطحی می‌تواند مقدار ظرفیت باربری مجاز یکسان را در مقادیر نشست خیلی کمتر ارائه دهد. بنابراین کارایی پی لبه‌دار از نظر میزان نشست نسبت به پی سطحی مدفون در تراز متناظر با نوک لبه، بررسی و مقایسه شد. مقادیر ضریب کاهش نشست پی لبه‌دار با مقادیر نسبت نشست پی مدفون در اعماق متناظر با D/B بر نشست پی سطحی، از طریق ضرایب اصلاح عمق در روابط تخمین نشست پیشنهادی توسط محققان مختلف همچون فاکس [۲۴]، تنگ [۲۵]، پولس و دیویس [۲۶] و نیشیدا [۲۷]، مطابق شکل ۱۳ مقایسه شد.



شکل ۱۳- مقایسه ضریب کاهش نشست پی‌های لبه‌دار و مدفون

ملاحظه می‌شود که غیر از یک حالت، استفاده از لبه زیر پی به‌ازای همه نسبت‌های عمق لبه، مقادیر نشست پی‌های سطحی را نسبت به پی‌های مدفون، کاهش بیشتری می‌دهد؛ اختلاف میزان کاهش نشست برای دو نوع پی، برای نسبت‌های کم عمق لبه، کمتر و با افزایش عمق لبه، عملکرد لبه در میزان کاهش نشست بهتر مشاهده شد. با توجه به نتایج می‌توان اذعان نمود که استفاده از لبه زیر پی‌های سطحی که منجر به افزایش عمق مؤثر پی می‌شود، در مقایسه با افزایش عمق مدفون پی دارای عملکرد بهتری به‌لحاظ کاهش نشست است.

۵-۳- مقایسه نتایج تحلیل عددی با روابط نظری

جهت صحت‌سنجی و بررسی میزان دقت نتایج ظرفیت باربری نهایی مدل‌های پی اندازه‌گیری شده در این تحقیق، نتایج تحلیل عددی با مقادیر متناظر به‌دست آمده از روابط نظری مقایسه شد. مقادیر ظرفیت باربری نهایی پی‌های سطحی واقع بر بستر رس توسط روابط تئوری و استفاده از روابط پیشنهادی برای ضریب ظرفیت باربری توسط محققان مختلف از جمله ترزاقی [۲۸]، میرهوف [۲۹]، اسکمپتون [۳۰]، بیروم و عید [۳۱] تخمین زده شد. مقایسه نتایج مطابق جدول ۲ نشان داد که توافق خوب و قابل‌قبولی میان مقادیر نظری و نتایج تحلیل عددی وجود دارد؛ به‌طوری که صحت و دقت نتایج پی‌های سطحی را می‌توان به نتایج پی‌های لبه‌دار تعمیم داده و صحت نتایج مدل‌سازی عددی را تأیید نمود.

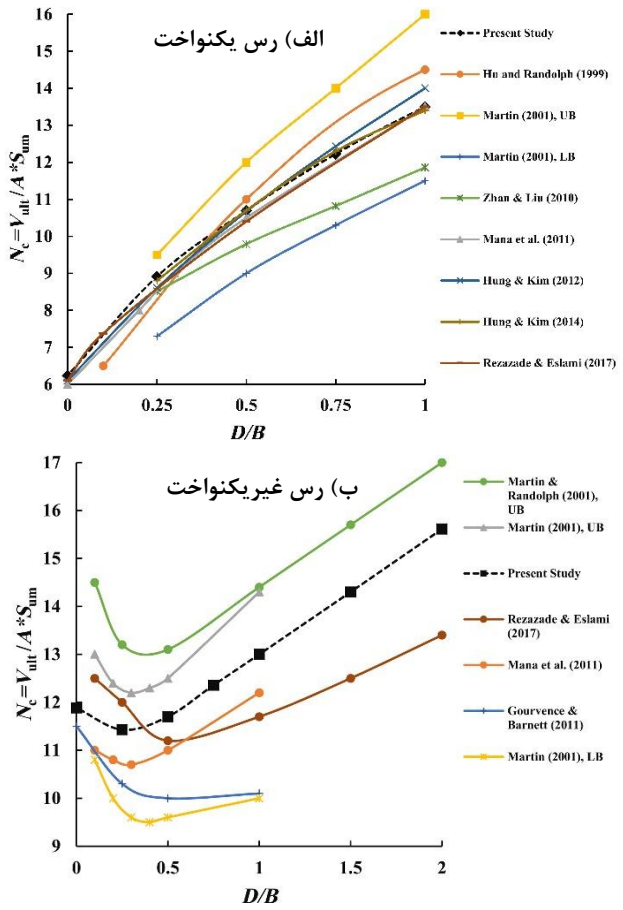
جدول ۲- مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده ظرفیت باربری پی‌های سطحی با مقادیر متناظر روابط نظری

محققان	N_c	q_{ult} (kPa) B =10 m
پژوهش حاضر	6.32	31.6
ترزاقی (۱۹۴۳)	5.7	37
میرهوف (۱۹۶۳)	5.14	30.8
اسکمپتون (۱۹۵۳)	6.2	31
بیروم و عید (۱۹۵۶)	6.3	31.5

۵-۴- مقایسه نتایج با با مقادیر متناظر سایر محققان

به‌منظور بررسی و صحت‌سنجی نتایج اندازه‌گیری شده در مدل‌سازی عددی، تعدادی از نتایج گزارش شده توسط محققان مختلف [۵، ۹، ۱۰و ۳۴-۳۲] با مقادیر متناظر در این پژوهش مقایسه شد. تغییرات مقادیر ضریب ظرفیت باربری (N_c) اندازه‌گیری شده در این مطالعه و نتایج سایر محققان برای رس‌های یکنواخت و غیریکنواخت در شکل ۱۴ ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که با وجود اختلاف در مقادیر، روند نتایج حاصله یکسان بوده و مقادیر در بیشتر مطالعات نزدیک به‌هم است که بیانگر دقت قابل‌قبول تحلیل و نتایج می‌باشد. دلایل واقعی اختلاف در نتایج محققان مختلف نیاز به بررسی بیشتری دارد؛ با این وجود، اختلاف در نتایج می‌تواند به تفاوت‌های موجود در شرایط انجام تحلیل‌ها، مقادیر پارامترها و سایر شرایط مدل‌سازی نسبت داده شود. به‌عنوان نمونه، تفاوت در مقاومت برشی خاک، زبری سطوح پی و نوع روش تعیین ظرفیت باربری نهایی، می‌تواند از دلایل اختلاف در نتایج باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.3.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.35]



شکل ۱۴- مقایسه مقادیر ضریب ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار با مقادیر سایر محققان: الف) رس یکنواخت، ب) رس غیریکنواخت

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار پی‌های لبه‌دار واقع بر خاک‌های ریزدانه رسی بر عملکرد پی‌ها به‌لحاظ ظرفیت باربری و نشست از طریق انجام تحلیل‌های عددی مطالعه شد. تاثیر پارامترهای مختلف شامل قطر پی، نسبت عمق لبه به قطر پی، زبری سطوح فصل مشترک، مقاومت زهکشی‌نشده و درجه ناهمگنی خاک بررسی شد. خلاصه‌ای از مهمترین نتایج را می‌توان به شرح ذیل ارائه نمود:

۱) استفاده از لبه با ایجاد محصورسازی جانبی خاک، ظرفیت باربری پی را متناسب با افزایش عمق لبه به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. افزایش حدود ۳۰۰٪ به‌ازای نسبت عمق لبه ۲ دراین مطالعه مشاهده شد.

۲) رفتار بار- جابه‌جایی پی‌های لبه‌دار ناشی از محصورسازی جانبی خاک توسط لبه اصلاح شده و نشست پی‌های سطحی به‌طور قابل‌توجهی کاهش نشان داد. کمترین و بیشترین میزان کاهش نشست به‌ترتیب برابر با ۱۸٪ و ۶۶٪ بدست آمد.

۳) میزان بهبود عملکرد پی‌های لبه‌دار به‌لحاظ افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست با افزایش زبری سطوح فصل مشترک پی- خاک، افزایش می‌یابد.

٤) مقادیر ظرفیت باربری به‌ازای خاک یکنواخت متناسب با افزایش نسبت عمق لبه، به‌صورت خطی افزایش یافت، در حالی‌که برای حالت غیریکنواخت، به‌ازای درجه ناهمگنی زیاد، ظرفیت باربری برای *D/B*های کمتر از ۰/۵ ابتدا کاهش و با افزایش نسبت عمق لبه، افزایش یافت.

۵) بیشترین کارآیی و سودمندی استفاده از لبه زیر پی‌های سطحی، برای خاک‌های نرم و با مقاومت برشی کمتر مشاهده شد.

۶) استفاده از لایه بستر سنگی در زیر پی‌های لبه‌دار باعث بهبود عملکرد پی‌های لبه‌دار از نظر افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست می‌شود.

۷) بر اساس مقایسه نتایج تحلیل پی‌های لبه‌دار و نیمه‌عمیق، مقادیر ظرفیت باربری نهایی پی‌های لبه‌دار نزدیک به مقادیر متناظر پی‌های نیمه‌عمیق و به‌طور متوسط حدود ۳٪ کمتر به‌دست آمد که بیانگر عملکرد خوب و قابل‌قبول پی‌های لبه‌دار است.

۸) استفاده از لبه زیر پی‌های سطحی با افزایش عمق موثر پی تا انتهای لبه مشابه مکانیزم باربری پی‌های نیمه‌عمیق، باعث بهبود عملکرد این نوع پی‌ها می‌شود.

کلید واژگان

1- Adhesion
1- Plate
3- Tresca Criterion
4- Bearing Capacity Ratio
5- Settlement Reduction Factor

۷- مراجع

[1] Bransby, M.F. and Randolph, M.F., (1999), *The effect of embedment depth on the undrained response of skirted foundations to combined loading*, Soils and Foundations, Vol. 39(4), p. 19–33.

[2] Houlsby, G.T. and Byrne, B.W., (2005), *Design procedures for installation of suction caissons in clay and other materials*, Proc. of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering, Vol. 158(2), p.75-82.

[3] Yun, G.J. and Bransby, M.F., (2007), *The undrained vertical bearing capacity of skirted foundations*, Soils and Foundations, Vol. 47(3), p.493-505.

[4] Bransby, M.F. and Yun, G.J., (2009), *The untrained capacity of skirted strip foundations under combined loading*, Geotechnique, Vol. 59(2), p.115–125.

[5] Zhan, Y.G. and Liu, F.C., (2010), *Numerical analysis of bearing capacity of suction bucket foundation for offshore wind turbines*, Elec. J. of Geotechnical Engineering, Vol. 15(F), p.633-644.

[6] Gourvenec, S. and Barnett, S., (2011), *Undrained failure envelope for skirted foundations under general loading*, Geotechnique, Vol. 61(3), p.263–270.

[7] Mana, D.S.K., Gourvenec, S. and Randolph, M.F., (2011), *A numerical study of the vertical bearing*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.3.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.35]

[20] Cerato, A.B. and Lutenegger, A.J., (2013), *Model footing test on a finite layer of granular soil*, Proc. of the FONDSUP: International Symposium.

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

[22] Pfeifle, T.W. and Das, B.M., (1979), *Model tests for bearing capacity in sand*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 105(9), p.1112-1116.

[23] Fellenius, B.H., (1980), *The analysis of results from routine pile loading tests*, Ground Engineering: Foundation Publishing Ltd., Vol. 13(6), p.19-31.

[24] Fox, E.N., (1948), *The mean elastic settlement of a uniformly loaded area at a depth below the ground surface*, 2nd Int. Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1.

[25] Teng, W., (1962), *Foundation Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.

[26] Poulos, H.G. and Davis, E.H., (1974), *Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, 411 p.

[27] Nishida, Y., (1966), *Vertical stress and vertical deformation of ground under a deep circular uniform pressure in the semi-infinite*, Proceedings of the 1st ISRM Congress, Lisbon, Portuga.

[28] Terzaghi, K., (1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York.

[29] Meyerhof, G.G., (1963), *Some recent research on the bearing capacity of foundations*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 1(1), p.16–26.

[30] Skempton, A.W., (1951), *The bearing capacity of clays*, Proc. Building Research Congress, London, p.180-189.

[31] Bjerrum, L. and Eide, O., (1956), *Stability of strutted excavations in clay*, Geotechnique, Vol. 6, p.115-128.

[32] Hu, Y., Randolph, M.F. and Watso, P.G., (1999), *Bearing response of skirted foundation on nonhomogeneous soil*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 125, p.924-935.

[33] Martin, C.M., (2001), *Vertical bearing capacity of skirted circular foundations on tresca soil*, Proceedings 15th ICSMGE, Vol. 1, p.743–746.

[34] Martin, C.M. and Randolph, M.R., (2001), *Applications of the lower and upper bound theorems of plasticity to collapse of circular foundations*, Proceedings of the Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Tucson, Vol. 1, p.417-428

capacity of skirted foundations, Frontiers in Offshore Geotechnics II- Taylor & Francis Group, London, p.433-438.

[8] Bienen, B., Gaudin, Ch., 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, p.127–139.

[9] Hung, L.C. and Kim, S.R., (2012), *Evaluation of vertical and horizontal bearing capacities of bucket foundations in clay*, Ocean Engineering, Vol. 52, p.75–82.

[10] Hung, L.C. and Kim, S.R., (2014), *Evaluation of undrained bearing capacities of bucket foundations under combined loads*, Marine Georesources & Geotechnology, Vol. 32, p.76-92.

[11] Du, J., Du, Sh., Shen, Sh. and Yin, Z., (2015), *Numerical investigation of the undraned compression and pullout capacity of suction foundations in clay*, Polish Maritime Research Special, Vol. 22(86), p.126-135.

[12] Azzam, W.R., (2015), *Finite element analysis of skirted foundation adjacent to sand slope under earthquake loading*, Housing and Building National Research Center, Vol. 11(2), p.231–239.

[13] Rezazadeh, S. and Eslami, E., (2018), *Bearing capacity of semi-deep skirted foundations on clay using stress characteristics and finite element analyses*, Marine Georesources & Geotechnology, Vol. 36(6), p.625-639.

[14] 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(4), p. 271-277.

[15] Eid, H.T., (2013), *Bearing capacity and settlement of skirted shallow foundations on sand*, International Journal of Geomechanics, ASCE, Vol. 13(5), p.645-652.

[16] El-Saied, A.E., Saleh, N.M. and Elmashad, M.E., (2015), *Behavior of circular footing resting on laterally confined granular reinforced soil*, Housing and Building National Research Center, Vol. 11, p.240-245.

[17] Fattah, M.Y., Shlash, K.T. and Mohammed, H.A., (2015), *Experimental study on the behaviour of strip footing on sandy soil bounded by a wall*, Arab. J. of Geoscience, Vol. 8, p.4779-4790.

[18] 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(3), p.117-130.

[19] Prasanth, T. and Kumar, P.R., (2017), *A study on load carrying capacity of skirted foundation on sand*, International Journal of Science and Research, Vol. 6(6).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.3.4]

[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.35]