مطالعه آزمایشگاهی و عددی ظرفیت باربری کششی پی‌های لبه‌دار دایره‌ای واقع بر بستر ماسه

سجاد قلی‌پور [۱]، 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: ۱۳۹۷/۰۸/۱۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۱۶

کلمات کلیدی:
پی لبه‌دار
ظرفیت باربری کششی
لبه محیطی
مدل‌سازی فیزیکی
تحلیل المان محدود

چکیده

پی‌های لبه‌دار جایگزین مناسبی برای پی‌های عمیق در سازه‌های ساحلی و فراساحلی هستند که علاوه بر قابلیت مقاومت در برابر بارهای بالارانشی، به‌سادگی اجرا می‌شوند. عملکرد کششی پی‌های لبه‌دار واقع بر ماسه توسط مدل‌سازی فیزیکی و عددی مطالعه شد. آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی مدل‌های پی دایره‌ای کوچک‌مقیاس با لبه‌های محیطی انجام شد. مدل‌سازی عددی توسط تحلیل المان محدود سه‌بعدی جهت صحت‌سنجی نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی و همچنین تعمیم نتایج به پی‌های بزرگ‌مقیاس صورت گرفت. اثرات پارامترهای هندسه پی و مشخصات خاک شامل قطر پی، مقاومت برشی ماسه، عمق لبه، زبری سطوح و زاویه امتداد بارگذاری بررسی شد. نتایج نشان داد که حضور لبه پیرامونی، رفتار پی‌های واقع بر ماسه را به‌لحاظ ظرفیت باربری کششی بهبود می‌بخشد؛ مقادیر بهبود با افزایش عمق لبه، مقاومت برشی ماسه و زبری سطوح پی و همچنین کاهش زاویه امتداد بارگذاری نسبت به حالت قائم، افزایش می‌یابد. بیشترین مقاومت کششی پی به‌ازای بارگذاری قائم به‌دست آمد.

Experimental and Numerical Study of Tension Bearing Capacity of Circular Skirted Foundations Resting on Sand Bed

Sajjad Gholipour[1], Masoud Makarchian[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: 5 Nov. 2018
Accepted: 7 Jul. 2019

Keywords:
Skirted foundation
Tension bearing capacity
Peripheral skirt
Physical modeling
Finite element analysis

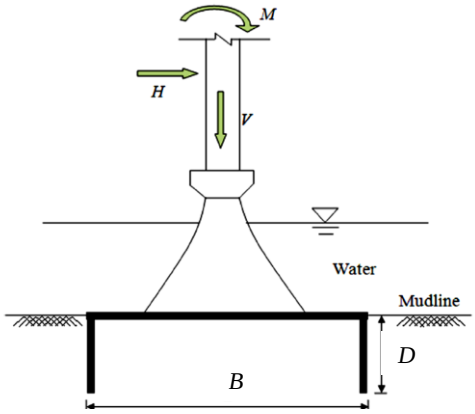
ABSTRACT

Skirted foundations are an appropriate alternative to deep foundations in onshore and offshore structures, which have the ability to withstand uplift loads, are also easy to be installed. The tensile performance of skirted foundations on sand was studied by physical and numerical modeling. Laboratory tests were carried out on small-scale foundation models with peripheral skirts. Numerical modeling was performed by 3D finite element analysis for verifying the results of physical tests, as well as generalizing the results to the large-scale models. The effects of geometry and soil properties parameters including foundation diameter, sand shear strength, skirt depth, surface roughness, and load inclination angle were investigated. The results showed that the presence of peripheral skirt improves the behavior of tension bearing capacity of foundations on sand; Improvement values increase with increasing skirt depth, sand shear strength, roughness of foundation surfaces, and also, with decreasing the load inclination angle relative to vertical direction.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.10.8]

۱ - مقدمه

در عملیات ساخت و ساز پروژه‌های ساحلی و فراساحلی، پی‌ها معمولاً در معرض بارهای ترکیبی قائم، افقی و لنگر ناشی از بارهای زیست‌محیطی و شناوری آب بوده و علاوه بر ظرفیت باربری فشاری، نیازمند مقاومت در برابر بارهای مایل، بالارانش[1] و واژگونی هستند. استفاده از پی‌های لبه‌دار[2] می‌تواند گزینه مناسبی جهت مقاومت در برابر این نوع بارها باشد. پی‌های لبه‌دار همچنین در موقعیت‌هایی که خطر آب‌شستگی یا احتمال نیروی بالارانش به‌علت تراز آب زیرزمینی بالا وجود دارد، عمق موثر پی سطحی را افزایش داده و پایداری پی را تأمین می‌کند. پی‌های لبه‌دار، سازه‌های استوانه‌ای توخالی با پی سطحی در بالا و دیواره جدارنازک در پیرامون پی به‌عنوان لبه هستند. پی‌های لبه‌دار به‌دلیل ظرفیت باربری فشاری بالا، مقاومت در برابر نیروهای کششی، نصب ساده و کوتاه‌مدت و صرفه‌جویی اقتصادی نسبت به سایر پی‌های متداول، به‌طور گسترده‌ای در صنایع دریایی و ساحلی همچون سازه‌های شناور، سکوهای ذخیره و حفاری نفت و گاز، توربین‌های بادی و صنایع انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌شوند. پی‌های سطحی لبه‌دار به‌تدریج در حال ظهور و توسعه جهت جایگزینی با انواع پی‌های عمیق هستند. نمایی از کاربرد پی‌های لبه‌دار تحت بارگذاری‌های مختلف در شکل ۱ مشاهده می‌شود [۱].



شکل ۱- نمایی از کاربرد پی‌های لبه‌دار تحت انواع بارگذاری [۱]

فرایند نصب پی‌های لبه‌دار در سازه‌های دریایی شامل نفوذ اولیه لبه به داخل خاک تحت وزن سازه و سپس اعمال فشار مکشی به درون پی، به‌دلیل اختلاف فشار هیدرواستاتیکی آب درون و بیرون لبه است که باعث اسقرار پی در موقعیت مورد نظر می‌شود. علی‌رغم انجام مطالعات متعدد [۶-۲] و همچنین پیشرفت‌های نسبتاً خوب و کامل در ارتباط با ظرفیت باربری فشاری پی‌های لبه‌دار، هنوز عدم قطعیت قابل‌توجهی مرتبط با موضوع عملکرد ظرفیت کششی این نوع پی‌ها وجود دارد. بنابراین یکی از مهمترین ملزومات طراحی و اجرای پی‌های لبه‌دار، بررسی و ارزیابی ظرفیت باربری کششی و بالارانشی آن‌ها است. مطالعات آزمایشگاهی و عددی محدودی بر ظرفیت کششی پی‌های لبه‌دار، به‌ویژه پی‌های واقع بر خاک‌های ماسه‌ای انجام گرفته است که به برخی از نتایج این تحقیقات اشاره می‌شود.

عملکرد و رفتار کششی پی‌های لبه‌دار با انجام آزمایش‌هایی بر روی مدل‌های پی واقع بر رس نرم مطالعه و با عملکرد فشاری این نوع پی‌ها مقایسه شده است [۷]. نتایج تاکید می‌کند که مقاومت کششی پی‌ها، به‌مراتب کمتر از مقاومت فشاری بوده و بایستی این موضوع در فرایند طراحی و اجرای پی‌ها در برابر بارهای کششی مورد توجه قرار گیرد. در این مطالعه، مقاومت زهکشی نشده کششی پی‌های لبه‌دار واقع بر رس، در حدود ۷۰٪ مقاومت فشاری به‌دست آمد.

نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ مدل‌های پی لبه‌دار واقع بر رس تحت بارگذاری خارج از مرکز، کاهش ظرفیت باربری کششی پی در مقایسه با پاسخ بارهای فشاری را نشان داد. بر اساس نتایج، کاهش حدود ۳۸٪ در مقادیر ظرفیت باربری کششی زهکشی نشده پی‌های لبه‌دار مشاهده شد [۸].

رفتار ظرفیت کششی پی‌های لبه‌دار واقع بر خاک رس توسط تحلیل المان محدود مطالعه و تاثیر پارامترهای مختلف شامل هندسه پی، دگرچسبی[3] لبه و امتداد اعمال بار بررسی شد [۹]. بر پایه نتایج، با افزایش زاویه اعمال بار از حالت قائم، مقادیر بار به‌تدریج کاهش یافت. نتایج مطالعه نشان داد که تاثیر قطر پی بر مقدار ظرفیت کششی، به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از عمق مدفون لبه است و ظرفیت کششی پی تناسب مستقیمی با دگرچسبی لبه ندارد.

گائو و همکاران با انجام آزمایش‌هایی بر روی مدل‌های کوچک‌مقیاس واقع بر ماسه، رفتار کششی پی‌های لبه‌دار را با در نظر گرفتن اثرات پارامترهای نسبت عمق لبه، زوایای امتداد بار و موقعیت‌های مختلف بارگذاری بر روی مدل پی، بررسی کردند [۱۰]. بر پایه نتایج، با افزایش زاویه امتداد بار، ظرفیت باربری کششی مدل‌های پی کاهش یافت؛ افزایش زاویه بار در بازه صفر تا 60°، نسبت به محدوده زوایای ۶۰-۹۰ درجه، دارای کاهش ظرفیت باربری بیشتری بود. همچنین نسبت عمق لبه اثر مستقیمی بر ظرفیت کششی پی، ناشی از افزایش مقاومت خاک با عمق و مقاومت جانبی خاک دارد. نتایج نشان داد که برای زوایای امتداد بار کمتر، بهینه موقعیت بارگذاری بر روی مدل پی در محدوده بین ۰/۶۶ الی ۰/۷۵ عمق لبه مشاهده شد، در حالی‌که برای زوایای بزرگ‌تر از 60°، بهینه نقطه متناظر با ظرفیت حداکثر، به‌ازای حالت کف پی حاصل شد.

مطالعه مکانیزم‌های گسیختگی خاک پیرامون پی لبه‌دار، در معرض بارگذاری‌های کششی و فشاری نشان داد که مکانیزم گسیختگی پی برای حالت کششی سطحی‌تر از حالت فشاری است [۱۱].

بر اساس نتایج بررسی پاسخ پی‌های لبه‌دار به بارگذاری ترکیبی بارهای قائم، افقی و ممان در ماسه سست زهکشی شده، افزایش حدود ۳ الی ۴ برابری در ظرفیت باربری افقی پی نسبت به پی‌های سطحی مشاهده شد [۱۲].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.10.8]

در این مقاله، بررسی جامعی از عملکرد ظرفیت کششی زهکشی شده پی‌های لبه‌دار دایره‌ای واقع بر بستر ماسه ارائه می‌شود. مجموعه‌ای از مطالعات آزمایشگاهی مدل‌های کوچک‌مقیاس و مدل‌سازی عددی شامل تحلیل المان محدود سه‌بعدی توسط برنامه پلکسیس[۴] بر روی مدل‌های پی کوچک و بزرگ‌مقیاس انجام گرفت که تاثیر پارامترهای مختلف همچون قطر پی (B)، نسبت عمق لبه (D/B)، امتداد اعمال بار (α)، چگالی ماسه (γ) و زبری سطوح فصل مشترک لبه (δ) بر نتایج ظرفیت باربری کششی پی بررسی شد. مطالعه حاضر، تصویر کلی و کمّی تاثیر هر یک از پارامترهای هندسه پی و مشخصات خاک بر ظرفیت کششی پی‌های لبه‌دار را ارائه می‌دهد و نسبت به تحقیقات مشابه قبلی در موارد ذیل متمایز است:

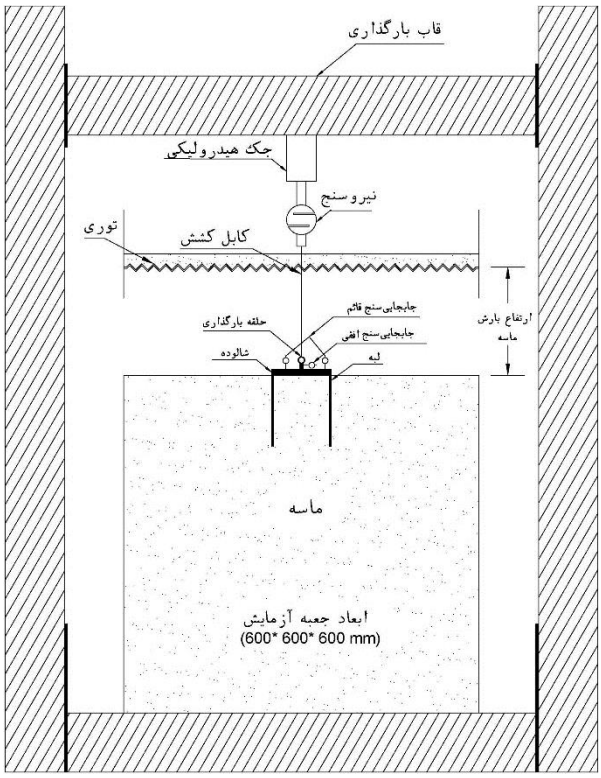
- ✓ استفاده از پی‌های با قطرهای مختلف؛
- ✓ در نظر گرفتن دانسیته ماسه، علاوه بر زاویه اصطکاک داخلی؛
- ✓ ایجاد میزان زبری‌های مختلف بر سطوح داخلی و خارجی لبه توسط کاغذ سمباده و بررسی تاثیر آن بر نتایج؛
- ✓ بررسی زوایای مختلف اعمال بارگذاری کششی؛
- ✓ مدل‌سازی مدل‌های کوچک و بزرگ‌مقیاس و مقایسه روند نتایج حاصله؛
- ✓ ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی فیزیکی توسط تحلیل عددی المان محدود.

۲ - مدل‌سازی فیزیکی

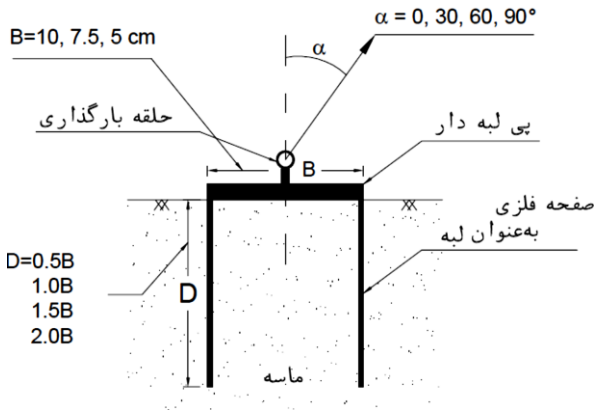
۲-۱- دستگاه و مدل‌های آزمایشگاهی

مطالعه رفتار پی‌های لبه‌دار واقع بر بستر ماسه توسط دستگاه آزمایشگاهی شامل؛ جعبه آزمایش، سیستم ریزش ماسه، تجهیزات اندازه‌گیری، مدل‌های پی، سیستم بارگذاری و جمع‌آوری داده‌ها، انجام شد. جعبه آزمایش دارای ابعاد داخلی ۶۰*۶۰*۶۰ cm و دارای جداره از جنس طلق شفاف پلکسی‌گلس[۵] است که توسط تسمه‌های فلزی در اطراف جعبه تقویت شده است. به‌منظور تهیه بستر یکنواخت و همگن ماسه از روش ریزش ماسه استفاده شد. اعمال بار کششی بر مدل‌های پی توسط جک هیدرولیکی متصل به قاب دستگاه و از طریق سیستم کابل کششی با مقاومت زیاد (جهت جلوگیری از تغییرشکل کابل) و قرقره مخصوص (یاتاقان)، انجام گرفت. برای اندازه‌گیری میزان نیرو و جابه‌جایی مدل، به‌ترتیب از نیروسنج با ظرفیت ۵۰۰ kg و جابجایی‌سنج با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ mm استفاده شد. نمای شماتیک از دستگاه آزمایش به‌همراه جزئیات آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

مدل‌های پی مورد استفاده در آزمایش‌ها از جنس فولاد و ابعاد آن‌ها بر اساس ابعاد جعبه آزمایش و در نظرگیری اثرات شرایط مرزی انتخاب شد. با توجه به تحلیل‌های حساسیت و استناد به مراجع معتبر، حداقل فاصله پی تا جداره جعبه سه برابر قطر پی لحاظ شد [۱۳-۱۴]. سه نوع مدل پی با قطرهای ۱۰، ۷/۵ و ۵ cm و لوله‌های توخالی به‌ضخامت جداره ۰/۳ cm و با عمق‌های مختلف به‌عنوان لبه، در مدل‌سازی استفاده شد. جهت بررسی تاثیر پارامتر عمق لبه، چهار نسبت عمق لبه به قطر پی (D/B) برابر با ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ به‌کار گرفته شد. نوع و محدوده پارامترهای مدل‌های پی لبه‌دار در شکل ۳ مشاهده می‌شود. همچنین به‌منظور ایجاد زبری بر روی سطوح تماس لبه و ارزیابی تاثیر آن بر ظرفیت باربری پی، دو نوع کاغذ سمباده با زبری‌های متفاوت به سطوح داخلی و خارجی لبه چسبانده شد.



شکل ۲- نمای شماتیک دستگاه آزمایش به‌همراه جزئیات آن



شکل ۳- جزئیات مدل‌های پی لبه‌دار مورد استفاده در آزمایش‌ها

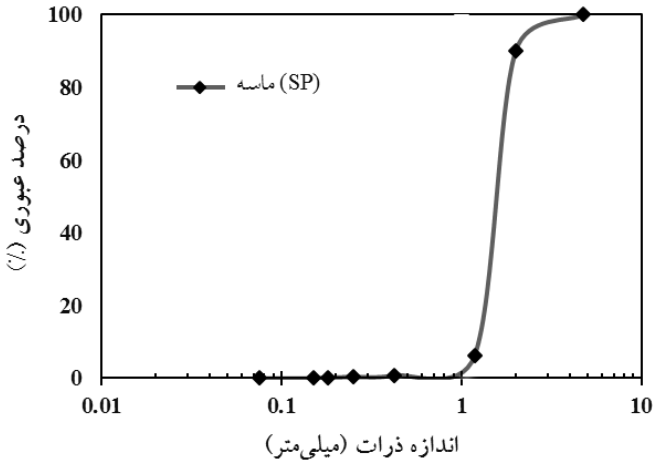
۲-۲- مصالح و مشخصات آن

خاک مورد استفاده در این تحقیق، ماسه سیلیسی فیروزکوه با اندازه دانه‌بندی متوسط است که بر اساس سیستم طبقه‌بندی یکنواخت یا

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.10.8]

متحد (USCS)[۶]، ماسه یکنواخت بد دانه‌بندی شده (SP) طبقه‌بندی شده است [۱۵]. بر پایه نمودار دانه‌بندی ماسه مطابق شکل ۴، مقادیر ضریب یکنواخت (C_u)، ضریب انحنا (C_c) و چگالی ویژه ماسه (G_s)، به‌ترتیب برابر با ۱/۳۱، ۱/۰۵ و ۲/۶۱ به‌دست آمد. وزن مخصوص خشک حداکثر و حداقل ماسه نیز مطابق آزمایش‌های مرتبط، به‌ترتیب برابر ۱۷/۴ و ۱۴/۶ kN/m^3 اندازه‌گیری شد. آزمایش‌های مدل بر روی ماسه با سه نوع دانسیته نسبی ۵۰٪، ۶۴٪ و ۷۵٪، متناظر با وزن‌های مخصوص ۱۵/۹، ۱۶/۳ و ۱۶/۶ kN/m^3، انجام شد که برای رسیدن به مقادیر موردنظر دانسیته نسبی و بستر همگن و یکنواخت ماسه، از روش متداول ریزش ماسه[۷] استفاده شد.



شکل ۴- نمودار دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در مدل‌سازی‌ها

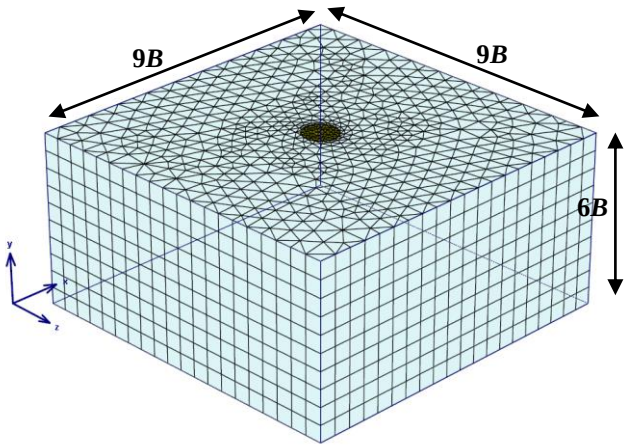
پارامترهای مقاومت برشی ماسه توسط دستگاه برش مستقیم و سه‌محوری، تحت تنش‌های نرمال در محدوده ۱۵۰-۱۰ kN/m^2 به‌ازای دانسیته‌های مورد نظر تعیین شد. بر اساس نتایج منحنی‌های پوش گسیختگی، متوسط زوایای اصطکاک داخلی ماسه (φ) برای دانسیته‌های نسبی ۵۰٪، ۶۴٪ و ۷۵٪ به‌ترتیب 38°، 41° و 43° به‌دست آمد. همچنین متوسط زوایای اصطکاک سطوح فصل مشترک (δ) بین ماسه با دانسیته نسبی ۶۴٪ و فولاد با میزان زبری‌های متفاوت، توسط دستگاه آزمایش برش مستقیم به‌ترتیب برابر با مقادیر 29°، 34° و 37° تخمین زده شد.

۲-۳- روش مدل‌سازی و انجام آزمایش

پس از روغن‌کاری سطوح داخلی جعبه آزمایش جهت دوری از تاثیرات جداره جعبه بر نتایج، مدل‌سازی توسط روش بارش ماسه از ارتفاع و نرخ ریزش ثابت، در لایه‌های ۵ cm انجام گرفت. به‌منظور اطمینان از همگنی و یکنواختی بستر ماسه و همچنین حصول دانسیته نسبی مورد نظر، از ظروفی با حجم مشخص در نقاط مختلف جعبه استفاده شد. بارش ماسه تا تراز قرارگیری لبه با شرایط یکسان ادامه یافته و لبه به‌صورت قائم در مرکز جعبه بر روی ماسه قرار گرفت و ریزش ماسه درون و اطراف لبه تا تراز بالای آن ادامه یافت. با اتمام بارش ماسه و تراز کردن سطح بستر، پی سطحی بر روی لبه قرار گرفته و توسط چهار عدد پیچ به آن ثابت شد. سپس کابل با زاویه مورد نظر بارگذاری از طریق سیستم قرقره به نیروسنج[۸] و توسط حلقه به شیار روی فونداسیون متصل شد. با تکمیل مراحل مدل‌سازی و تجهیز سیستم اندازه‌گیری بر روی جک و فونداسیون، اعمال بار کششی توسط کابل و قرقره‌های مخصوص واقع بر روی قاب، انجام شد. در فرایند مدل‌سازی بستر ماسه و استقرار مدل پی در موقعیت مورد نظر، سعی و دقت کامل بر حداقل نمودن میزان دست‌خوردگی ماسه و دوری از تاثیرات احتمالی بر نتایج انجام گرفت.

۳ - مدل‌سازی عددی

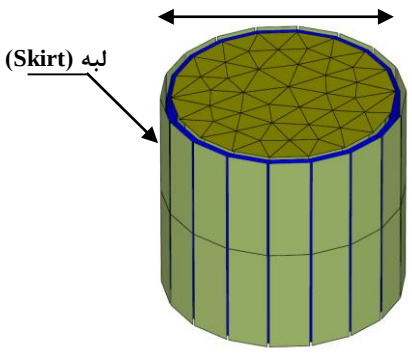
به‌منظور صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس و تعمیم نتایج به مدل‌های بزرگ‌مقیاس، مجموعه‌ای از تحلیل‌های المان محدود کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس بر روی پی‌های لبه‌دار دایره‌ای واقع بر ماسه توسط نرم‌افزار پلکسیس انجام گرفت. علی‌رغم هندسه متقارن مدل‌های پی لبه‌دار، اعمال بارگذاری در امتدادهای مختلف، منجر به ایجاد موقعیت سه‌بعدی تنش و کرنش شده و تحلیل المان محدود به‌صورت سه‌بعدی در نظر گرفته شد. در مدل‌سازی شبکه المان‌ها، از المان‌های ۱۵ و ۶ گرهی و جهت بارگذاری مدل‌ها از روش متداول کنترل تغییرمکان[۹] استفاده شد. به‌منظور کاهش اثرات احتمالی شرایط مرزی بر نتایج مدل‌سازی، فاصله مرزهای قائم شبکه المان از لبه پی بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، حداقل چهار برابر قطر پی، در نظر گرفته شد. شکل ۵ نمونه‌ای از ابعاد شبکه المان و شرایط مرزی مدل‌سازی مورد استفاده در تحلیل عددی را به‌صورت سه‌بعدی نشان می‌دهد.



B=4, 2, 1 m

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.10.8]



شکل ۵- ابعاد شبکه المان و شرایط مرزی مدل‌سازی عددی؛ الف) شرایط مرزی شبکه المان، ب) مدل پی لبه‌دار

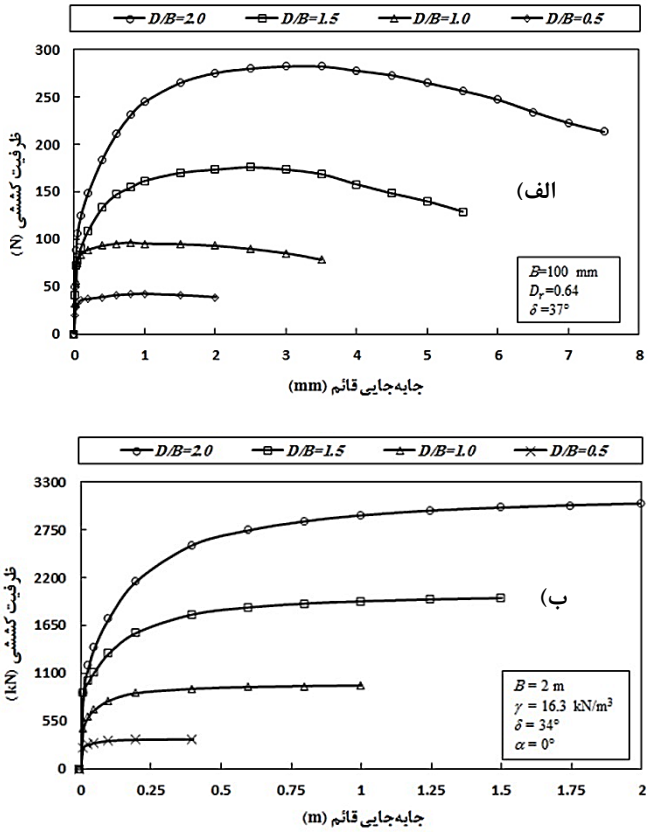
مدل‌های پی و لبه به‌عنوان مصالح الاستیک خطی با مقادیر $7.85\ kN/m^3$، $210\ GN/m^2$ و ۰/۳ به‌ترتیب برای پارامترهای وزن واحد، مدول یانگ و نسبت پواسون مصالح فولادی در نظر گرفته شد. جهت شبیه‌سازی رفتار ماسه، از مدل رفتاری الاستوپلاستیک سخت شونده[10] استفاده شد که مقادیر ۱۵/۹، ۱۶/۳ و $16.6\ kN/m^3$ برای وزن واحد ماسه، ۱۶، ۲۱ و $24\ MN/m^2$ برای مدول الاستیسیته، ۳۸°، ۴۱° و ۴۳° برای زوایای اصطکاک داخلی ماسه و ۰/۳ برای نسبت پواسون ماسه به‌ازای دانسیته‌های مختلف، اختصاص داده شد. همچنین برای شبیه‌سازی میزان زبری سطوح فصل مشترک بین المان‌های لبه با ماسه، از ضریب کاهش مقاومت سطوح فصل مشترک ($R_{inter}= \tan\delta/\tan\varphi$) با مقادیر بین ۰/۶-۰/۹ استفاده شد. مقادیر متناظر مدول الاستیسیته (E_{50}) و زاویه اتساع ماسه به‌ازای دانسیته‌های مختلف، توسط آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی شده تعیین شد که متوسط مقادیر زاویه اتساع (ψ)، حدود ۶°، ۹° و ۱۱° به‌دست آمد.

مدل‌های کوچک‌مقیاس پی لبه‌دار در ابعاد ۱۰ و ۷/۵ cm و مدل‌های بزرگ‌مقیاس با قطرهای ۱، ۲ و ۴ m مدل‌سازی شد. مدل پی‌ها از جنس فولاد و دارای ضخامت‌های ۱۵ و ۵ cm، به‌ترتیب برای مدل‌های بزرگ‌مقیاس پی سطحی و لبه‌ها، و ۱/۵ و ۰/۳ cm برای مدل‌های کوچک‌مقیاس در نظر گرفته شد.

۴ - نتایج مدل‌سازی

تحلیل نتایج مدل‌سازی‌ها نشان داد که حضور لبه زیر محیط پی سطحی، رفتار پی‌های سطحی واقع بر ماسه را به‌لحاظ ظرفیت باربری کششی بهبود می‌بخشد؛ میزان بهبود با افزایش میزان عمق لبه، دانسیته نسبی ماسه، زبری سطوح لبه و همچنین کاهش زاویه امتداد اعمال بارگذاری نسبت به حالت قائم، افزایش می‌یابد. نمونه‌ای از روند منحنی‌های بار- جابه‌جایی به‌ازای مدل‌سازی فیزیکی و تحلیل عددی مدل‌های پی لبه‌دار در شکل ۶ نشان داده شده است. به‌منظور تخمین میزان ظرفیت کششی نهایی مدل‌های پی از روی منحنی‌های بار- جابه‌جایی، از روش متداول افزایش بار تا نقطه حداکثر منحنی (مشاهده قله) و کاهش بار پس از آن و یا ثابت ماندن شیب منحنی، استفاده شد. از روند منحنی‌ها مشاهده می‌شود که به‌ازای مدل‌های مدل‌سازی فیزیکی، منحنی‌ها دارای افت بار با شیب ملایم پس از رسیدن به بار نهایی بوده و برای حالت‌های دانسیته متراکم و سطوح زبر لبه، مقادیر افت بار قابل‌توجه و نقطه گسیختگی منحنی کاملاً مشهود است. برخلاف نتایج مدل‌های مدل‌سازی فیزیکی، در منحنی‌های به‌دست آمده از تحلیل عددی، به‌ویژه برای مدل‌های بزرگ‌مقیاس، منحنی‌ها پس از رسیدن به مقدار حداکثر بار کششی، با شیب نسبتاً ثابتی ادامه یافته و افت بار مشاهده نشده است.

بر پایه نتایج منحنی‌های بار- جابه‌جایی مدل‌های پی لبه‌دار به‌دست آمده از مدل‌سازی‌های فیزیکی و عددی، تاثیر پارامترهای مختلف هندسی پی و مشخصات خاک؛ شامل نسبت عمق لبه، دانسیته نسبی ماسه، زبری سطوح فصل مشترک لبه و زاویه امتداد اعمال بارگذاری بر مقادیر ظرفیت باربری کششی پی لبه‌دار بررسی و نمودارهایی جهت تخمین میزان افزایش ظرفیت کششی پی ارائه شد.



شکل ۶- منحنی‌های بار- جابه‌جایی مدل‌های پی لبه‌دار؛ الف) نتایج مدل‌سازی فیزیکی، ب) نتایج مدل‌سازی عددی

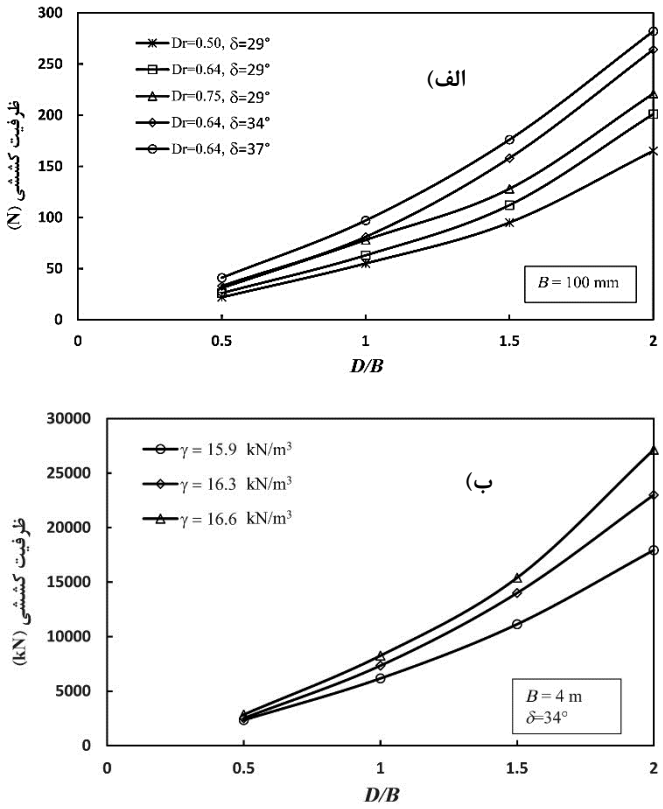
۴-۱- بررسی اثر عمق لبه

به‌منظور بررسی تاثیر میزان عمق لبه بر پاسخ کششی پی لبه‌دار، مدل‌های پی در چهار نسبت عمق لبه به قطر پی (D/B)، برابر با

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.10.8]

مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ مورد مطالعه قرار گرفت. تغییرات ظرفیت کششی قائم مدل‌های پی لبه‌دار در برابر مقادیر *D/B*، به‌ازای دانسیته و زبری‌های مختلف در شکل ۷ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که صرف‌نظر از مقدار دانسیته نسبی و میزان زبری سطوح، وجود لبه زیر پی سطحی ظرفیت کششی پی را متناسب با افزایش نسبت *D/B*، به‌صورت غیرخطی افزایش داده است؛ به‌طوری که با افزایش دانسیته نسبی ماسه و میزان زبری سطوح فصل مشترک تماس لبه، مقادیر عملکرد ظرفیت کششی پی افزایش می‌یابد. روند منحنی‌ها نشان می‌دهد که برای مدل‌های با نسبت‌های عمق *D/B* بزرگ‌تر از یک، منحنی‌ها حالت صعودی داشته و میزان افزایش ظرفیت کششی پی مشهودتر است. مقایسه نتایج مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس (شکل ۷، الف) و مدل‌های بزرگ‌مقیاس تحلیل عددی (شکل ۷، ب)، روند یکسان تغییرات ظرفیت باربری کششی مدل‌های پی را نشان می‌دهد که این موضوع می‌تواند بیانگر قابلیت تعمیم نتایج مدل‌های کوچک‌مقیاس به مدل‌های با ابعاد بزرگ و واقعی باشد.



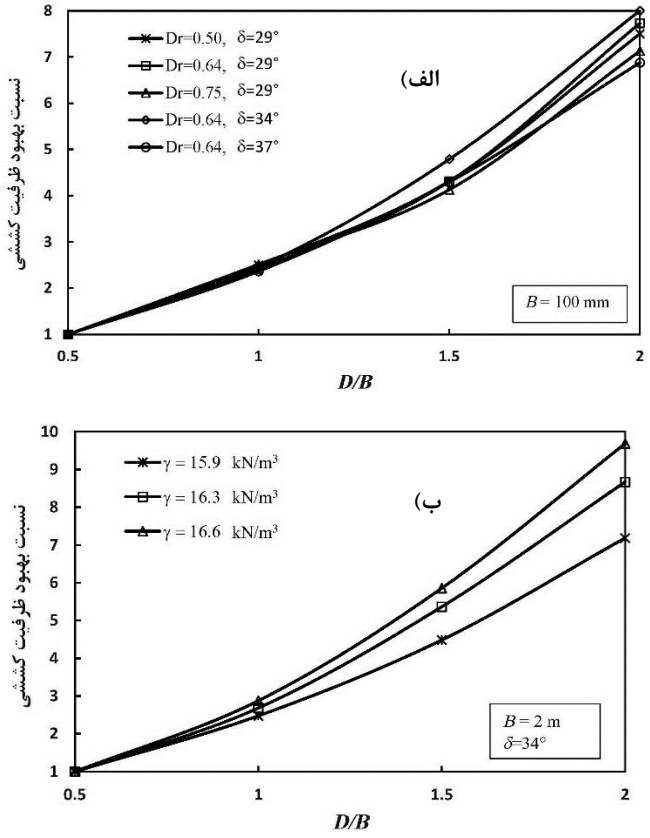
شکل ۷- تغییرات میزان ظرفیت کششی در برابر نسبت عمق لبه (*D/B*)؛ الف) نتایج مدل‌سازی فیزیکی، ب) نتایج مدل‌سازی عددی

بر پایه تحلیل نتایج، مقایسه کمّی تاثیر افزایش میزان عمق لبه بر مقادیر بهبود ظرفیت باربری کششی مدل‌های پی نسبت به حالت مبنای *D/B* برابر با ۰/۵، مطابق شکل ۸ به‌ازای دو نوع مدل‌سازی ارائه شده است. تحلیل و مقایسه مقادیر نسبت بهبود ظرفیت کششی برحسب پارامترهای مختلف نشان داد که به‌ازای قطر ثابت پی، با افزایش نسبت عمق لبه از مقدار ۰/۵ به ۱، ۱/۵ و ۲ برابر، متوسط بهبود ظرفیت کششی پی به‌ترتیب برابر با ۲/۵، ۴/۸ و ۷/۹ برابر به‌دست آمد. نتیجه حاصله، روند صعودی ظرفیت کششی پی به‌ازای عمق‌های زیاد لبه ناشی از ایجاد درگیری بیشتر لبه با خاک را نشان می‌دهد.

بر اساس برازش منحنی‌های مختلف حاصله از نتایج تحقیق، رابطه (۱) می‌تواند جهت تخمین میزان بهبود ظرفیت کششی پی‌های لبه‌دار به‌ازای *D/B*های مختلف، نسبت به مقادیر مبنای *D/B* برابر با ۰/۵، استفاده شود:

$$TCI = 1.591(D/B)^2 + 0.622(D/B) + 0.292 \qquad (۱)$$

رابطه (۱) بر پایه میانگین منحنی‌های مختلف به‌ازای پارامترهای قطر پی، دانسیته نسبی ماسه و زبری سطوح به‌دست آمده و بیانگر متوسط بهبود ظرفیت کششی پی (TCI)[11] است.



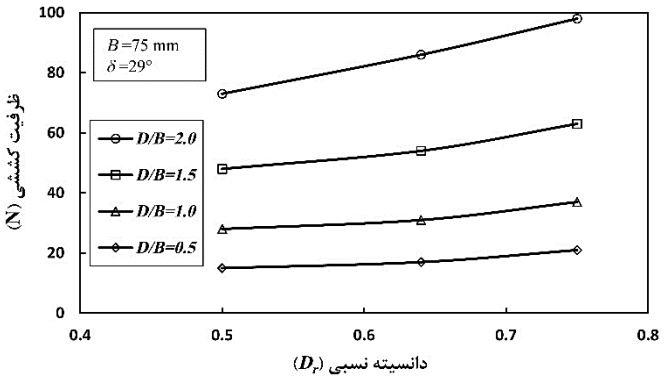
شکل ۸- مقادیر بهبود ظرفیت کششی مدل‌های پی به‌ازای *D/B*های مختلف؛ الف) نتایج مدل‌سازی فیزیکی، ب) نتایج مدل‌سازی عددی

۴-۲- بررسی تاثیر دانسیته ماسه

تاثیر مقاومت برشی ماسه بر پاسخ کششی پی‌های لبه‌دار، به‌ازای دانسیته‌های نسبی ۵۰٪، ۶۴٪ و ۷۵٪ مورد مطالعه قرار گرفت. تغییرات مقادیر ظرفیت کششی برحسب دانسیته نسبی ماسه در شکل ۹ ارائه شده است. روند نتایج نشان می‌دهد که کارآمدی و تاثیر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.10.8]

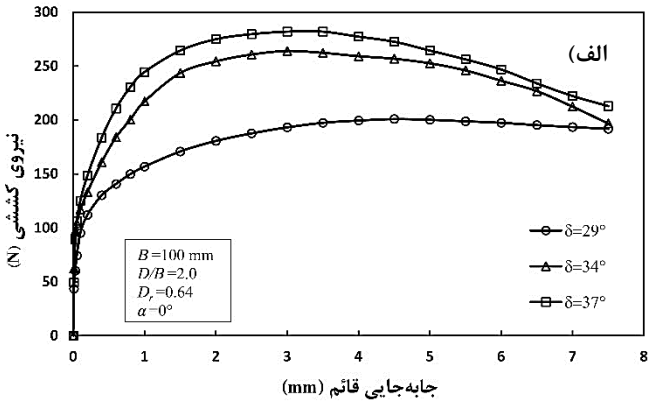
حضور لبه در ماسه با دانسیته نسبی زیاد (ماسه متراکم)، به‌علت افزایش زاویه اصطکاک داخلی ماسه، بیشتر است. به‌عبارت دیگر، ظرفیت کششی با افزایش میزان دانسیته ماسه بهبود می‌یابد؛ به‌طوری که با افزایش دانسیته نسبی از ۵۰٪ به ۷۵٪، میزان ظرفیت کششی به‌طور متوسط ۳۷٪ افزایش یافته است.

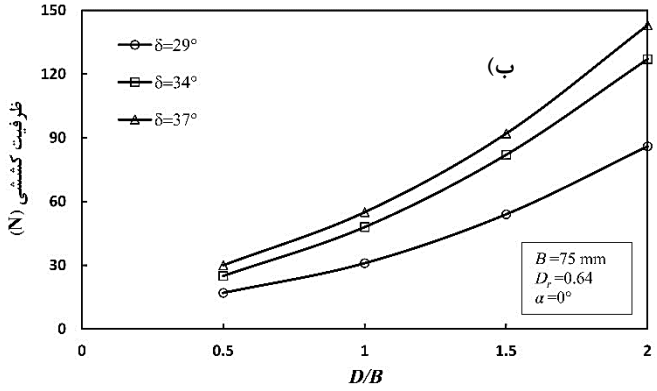


شکل ۹- تاثیر دانسیته نسبی ماسه بر میزان ظرفیت کششی پی

۴-۳- بررسی اثر زبری سطوح لبه

جهت ارزیابی اثر زبری سطوح لبه بر عملکرد کششی پی‌های لبه‌دار، زبری‌های مختلف توسط کاغذ سنباده بر روی سطوح لبه ایجاد و نتایج مدل‌های زبر با حالت صاف مقایسه شد. مقادیر زاویه اصطکاک فصل مشترک بین سطوح زبر و ماسه (δ) برای سه حالت صاف، نسبتاً زبر و زبر به‌ترتیب 29°، 34° و 37° به‌دست آمد. شکل ۱۰ منحنی‌های بار- جابه‌جایی و تغییرات میزان نیروی کششی را به‌ازای زبری‌های مختلف نشان می‌دهد. تاثیر میزان زبری سطوح لبه در مقایسه با حالت صاف به‌لحاظ میزان افزایش ظرفیت باربری و روند افزایش ظرفیت کششی تا نقطه حداکثر و کاهش قابل‌ملاحظه پس از آن، از روند منحنی‌ها کاملاً مشهود است.





شکل ۱۰- تغییرات ظرفیت کششی مدل‌های پی به‌ازای زبری‌های مختلف لبه؛ الف) منحنی بار- جابه‌جایی، ب) مقادیر ظرفیت کششی در برابر D/B

مقایسه و تحلیل نتایج نشان داد که با افزایش زبری سطوح تماس لبه با ماسه نسبت به حالت صاف، میزان نیروی کششی به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد؛ به‌طوری که متوسط بهبود و افزایش به‌ازای حالت زبر در مقایسه با حالت صاف، حدود ۵۹٪ به‌دست آمد. برای قطرهای مختلف مدل پی، روند تقریباً مشابهی مشاهده شد. بنابراین با توجه به نتایج حاصله در رابطه با میزان تاثیر زبری سطوح لبه بر مقادیر افزایش ظرفیت کششی پی، میزان زبری سطوح لبه می‌تواند در انتخاب و طراحی نوع جنس پی و لبه (بتنی یا فولادی) مد نظر قرار گیرد.

۴-۴- بررسی تاثیر زاویه اعمال بارگذاری

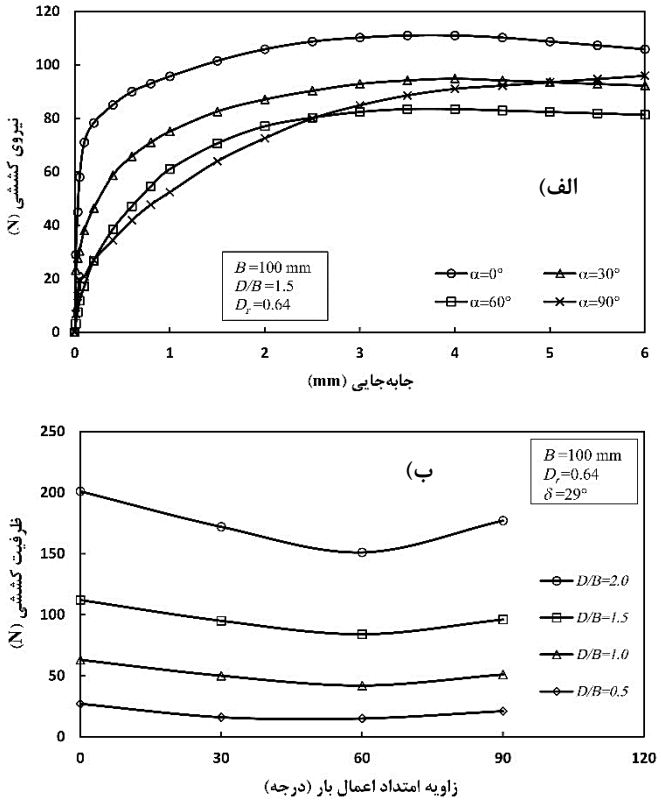
با توجه به اهمیت بررسی زوایای اعمال بارگذاری غیر از حالت قائم و به‌منظور مطالعه تاثیر زاویه امتداد اعمال بار (α) بر میزان ظرفیت کششی پی، مدل‌های پی تحت زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به امتداد قائم تحت بارگذاری کششی قرار گرفته و نتایج با حالت قائم (صفر درجه) مقایسه شد. برای مدل‌های با امتداد زاویه بارگذاری بزرگ‌تر از صفر درجه، با توجه به بسیج شدن مقادیر نیروی افقی کمتر، بار افقی به‌عنوان نیروی گسیختگی مد نظر قرار گرفت.

مقادیر تغییرات بار- جابه‌جایی و ظرفیت کششی مدل‌های پی برحسب زوایای مختلف امتداد اعمال بار در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بر پایه نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه امتداد اعمال بار از حالت قائم، میزان ظرفیت کششی مدل‌های پی به‌ازای همه زوایای امتداد بار کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، بیشترین مقدار مقاومت کششی پی در حالت امتداد قائم بارگذاری (زاویه صفر درجه) به‌دست آمد. به‌ازای پارامترها و شرایط یکسان مدل‌سازی، تحلیل نتایج نشان داد که با افزایش زاویه امتداد اعمال بار از مقدار 0° به 30°، 60° و 90°، متوسط میزان ظرفیت کششی مدل‌های پی به‌ترتیب حدود ۲۱٪، ۳۰٪ و ۱۷٪ کاهش یافته است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.10.8]

از روند منحنی‌ها ملاحظه می‌شود که به‌ازای جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر مدل‌های پی، میزان ظرفیت کششی برای زاویه بارگذاری 90°، بیشتر از زوایای 30° و 60° است. به‌عبارت دیگر، روند کاهشی مقادیر ظرفیت کششی با افزایش زاویه امتداد بارگذاری، در محدوده زاویه 60 تا 90 درجه تغییر یافته و شروع به افزایش دوباره ظرفیت کششی مدل پی می‌نماید. نتیجه حاصله می‌تواند به بسیج شدن فشار جانبی بیشتر خاک در حالت زاویه 90° در مقایسه با زوایای 30° و 60° نسبت داده شود. با این حال، برای جابه‌جایی‌های کمتر و با فرض معیار تغییرشکل مجاز در محاسبات نیروی کششی، بار نهایی به‌ازای زاویه 90° کمتر از سایر حالت‌های اعمال بارگذاری است.



شکل ۱۱- تغییرات ظرفیت کششی مدل‌های پی لبه‌دار به‌ازای زوایای اعمال بارگذاری؛ الف) منحنی بار- جابه‌جایی، ب) مقادیر ظرفیت کششی برحسب زوایای اعمال بارگذاری

روند کلی منحنی‌ها و تحلیل نتایج بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد ظرفیت کششی مدل‌های پی لبه‌دار، نشان داد که با توجه به عدم وجود گیرداری کافی سطوح لبه پی با ماسه، ناشی از فرورفت کم لبه درون خاک در نسبت‌های کم عمق لبه (D/Bهای کمتر)، تفاوت در مقادیر دانسیته نسبی ماسه، میزان زبری سطوح لبه و زاویه امتداد اعمال بار، تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر نتایج نیروی کششی نداشته است و این موضوع برای نسبت‌های D/B کمتر از یک، کاملاً مشهود است. به‌طور کلی تاثیرگذاری پارامترهای مختلف بر نتایج ظرفیت باربری کششی، در عمق‌های بزرگ‌تر لبه نسبت به مقادیر کمتر عمق لبه، مشهودتر و قابل‌توجه‌تر مشاهده شد.

۴-۵- مقایسه تاثیر قطر پی و عمق لبه

با توجه به رابطه مستقیم پارامترهای عمق لبه و قطر پی با افزایش ظرفیت کششی پی لبه‌دار ناشی از افزایش سطوح لبه‌ها، تاثیر هر دو پارامتر مذکور بر میزان افزایش ظرفیت باربری کششی مدل‌های پی ارزیابی و مورد مقایسه قرار گرفت. تحلیل نتایج نشان داد که به‌ازای عمق ثابت لبه، تغییر قطر پی نسبت به تغییر عمق لبه به‌ازای قطر ثابت، تاثیر و کارآیی بیشتری بر روی تغییرات ظرفیت باربری دارد؛ به‌طوری که برای قطر ثابت پی، با نصف شدن عمق لبه و مساحت سطح تماس پی با ماسه، ظرفیت باربری کششی به‌طور متوسط حدود ۶۴٪ کاهش یافت، در حالی‌که به‌ازای عمق ثابت لبه، با کاهش قطر پی به میزان نصف، مقادیر ظرفیت کششی مدل پی حدود ۸۶٪ کاهش پیدا کرد که بیانگر اختلاف ۲۲٪ تاثیرگذاری قطر پی و عمق لبه بر ظرفیت کششی پی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در صورت نیاز به افزایش ظرفیت کششی پی‌های لبه‌دار، تغییر قطر پی در مقایسه با عمق لبه، دارای ارجحیت بیشتری است.

۵ - مقایسه نتایج مدل‌سازی فیزیکی و تحلیل عددی

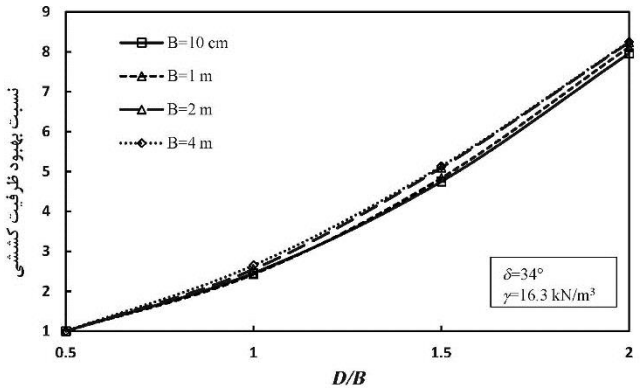
به‌منظور اعتبارسنجی و بررسی صحت و سقم نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی، تعدادی از آزمایش‌ها توسط تحلیل عددی سه‌بعدی مدل‌سازی و نتایج با مقادیر متناظر مدل‌سازی فیزیکی مقایسه شد. همچنین مجموعه‌ای از مدل‌های بزرگ‌مقیاس جهت تعمیم نتایج مدل‌های کوچک‌مقیاس به بزرگ‌مقیاس و واقعی، توسط تحلیل عددی مطالعه شد.

مقایسه روند کلی منحنی‌های بار- جابه‌جایی به‌ازای دو حالت مدل‌سازی عددی و فیزیکی کوچک‌مقیاس، نتایج تقریباً مشابهی را نشان داد؛ با این تفاوت که مقادیر بار نهایی در حالت تحلیل عددی به‌ازای میزان جابه‌جایی بیشتر نسبت به حالت مدل‌سازی فیزیکی، به‌دست آمد. همچنین مقایسه کمّی نتایج دو روش مدل‌سازی بر روی مدل‌های پی دایره‌ای کوچک‌مقیاس، اختلاف جزئی در حدود ۳٪ را نشان داد که دقت و انطباق قابل‌قبول نتایج مدل‌سازی فیزیکی را منعکس می‌کند.

بر پایه مقایسه نتایج متناظر مدل‌های کوچک و بزرگ‌مقیاس، روند کلی منحنی‌ها با اختلاف جزئی، مشابه و یکسان مشاهده شد. با توجه به تفاوت ابعاد مدل‌های پی و متعاقباً مقادیر ظرفیت باربری کششی، به‌منظور مقایسه کمّی نتایج متناظر، نسبت مقادیر بهبود ظرفیت کششی به‌ازای قطرهای مختلف مدل‌های پی در برابر نسبت عمق لبه، مطابق شکل ۱۲، ارائه شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.10.8]



شکل ۱۲- مقایسه تغییرات نسبت بهبود ظرفیت کششی مدل‌های با ابعاد مختلف

ملاحظه می‌شود که روند منحنی‌ها و مقادیر متناظر بهبود ظرفیت کششی مدل‌های مختلف، با اختلاف کمی برهم منطبق است. بنابراین با دقت قابل‌قبولی می‌توان نتایج مدل‌های کوچک‌مقیاس را به پی‌های با ابعاد بزرگ و واقعی تعمیم داده و از نتایج مدل‌سازی فیزیکی در جهت تخمین مقادیر بهبود ظرفیت کششی استفاده نمود.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به گسترش به‌کارگیری پی‌های لبه‌دار در انواع سازه‌ها طی سالیان اخیر توسط جامعه مهندسی ژئوتکنیک، به‌منظور ارزیابی رفتار و عملکرد ظرفیت کششی پی‌های دایره‌ای لبه‌دار و بررسی تاثیر مشخصات و پارامترهای مختلف پی و خاک بر نتایج، مطالعه جامعی از طریق مدل‌سازی فیزیکی و تحلیل عددی انجام گرفت. در فرایند این مطالعه، به‌تعداد بیش از ۵۵ آزمایش فیزیکی بر روی مدل‌های کوچک‌مقیاس و حدود ۶۲ مدل‌سازی عددی کوچک و بزرگ‌مقیاس، جهت بررسی تاثیر پارامترهای مختلف قطر پی، عمق لبه، چگالی ماسه، زبری سطوح لبه و زاویه امتداد اعمال بار، انجام شد. برای شرایط و پارامترهای مورد نظر این مطالعه، خلاصه نتایج ذیل را می‌توان ارائه نمود:

- وجود لبه محیطی زیر پی‌های سطحی، باعث بهبود ظرفیت کششی بالارانش پی متناسب با مقدار عمق لبه می‌شود؛ میزان بهبود ظرفیت کششی پی با زیاد شدن نسبت عمق لبه به قطر پی، به‌صورت غیرخطی افزایش یافت که بیانگر تاثیر بیشتر حضور لبه به‌ازای عمق‌های بزرگ‌تر لبه است. صرف‌نظر از میزان چگالی ماسه و زبری سطوح لبه، با افزایش ۲، ۳ و ۴ برابری عمق لبه، متوسط بهبود ظرفیت باربری کششی به‌ترتیب حدود ۲/۵، ۴/۸ و ۷/۹ برابر به‌دست آمد.
- استفاده از لبه پیرامون پی سطحی در خاک‌های ماسه‌ای با تراکم زیاد، کارآیی بیشتری را در مقایسه با حالت ماسه سست ارائه می‌دهد. به‌عبارت دیگر، با افزایش دانسیته ماسه، میزان ظرفیت باربری کششی مدل‌های پی لبه‌دار افزایش می‌یابد؛ به‌ازای تراکم‌های مورد مطالعه در این تحقیق، متوسط میزان افزایش ظرفیت کششی پی ناشی از تغییر دانسیته نسبی از مقدار ۵۰٪ به ۷۵٪، در حدود ۳۷٪ به‌دست آمد.
- افزایش میزان زبری سطوح مدل‌های پی، باعث افزایش قابل‌توجه مقادیر نیروی کششی می‌شود؛ برای میزان زبری‌های مختلف مورد مطالعه، متوسط بهبود و افزایش ظرفیت باربری کششی پی در حالت زبر نسبت به حالت صاف، حدود ۵۹٪ مشاهده شد.
- بررسی تاثیر زاویه امتداد بارگذاری کششی توسط مدل‌سازی فیزیکی و عددی نشان داد که با افزایش زاویه امتداد اعمال بار از حالت قائم، میزان ظرفیت کششی مدل‌های پی به‌ازای همه زوایای امتداد بار، کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، بزرگ‌ترین ظرفیت باربری کششی پی لبه‌دار در حالت قائم (صفر درجه) به‌دست آمد. مقادیر ظرفیت کششی مدل‌های پی با افزایش زاویه امتداد اعمال بار از مقدار °۰ به °۳۰، °۶۰ و °۹۰، به‌ترتیب حدود ۲۱٪، ۳۰٪ و ۱۷٪ کاهش یافت.
- تغییرات میزان قطر پی نسبت به تغییر عمق لبه، تاثیر و کارآیی بیشتری بر روی مقادیر ظرفیت باربری کششی نشان داد؛ برای قطر ثابت پی، با نصف شدن عمق لبه و به‌ازای عمق ثابت لبه، با کاهش قطر پی به میزان نصف، متوسط ظرفیت باربری کششی به‌ترتیب حدود ۶۴٪ و ۸۶٪ کاهش یافت.
- روند منحنی‌ها و تحلیل نتایج نشان داد که با توجه به عدم وجود فرورفت و گیرداری کافی لبه با ماسه در مدل‌های پی با نسبت کم عمق لبه، تغییر مقادیر پارامترهای مختلف دانسیته نسبی، میزان زبری سطوح لبه و زاویه امتداد بارگذاری، تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر نتایج ظرفیت کششی ندارد. بنابراین به‌منظور کارآمدی بیشتر حضور لبه به‌لحاظ افزایش مقاومت در برابر نیروهای کششی، لازم است حداقل عمق لبه محیطی زیر پی سطحی برابر با قطر پی در نظر گرفته شود.
- با توجه به نتایج تحلیل، به‌کارگیری و استفاده از لبه زیر محیط پی سطحی می‌تواند به‌عنوان یک روش بهسازی مناسب در جهت افزایش ظرفیت کششی پی، به‌منظور مقابله با نیروهای کششی بالارانش، افقی و لنگر، در نظر گرفته شود.
- بر پایه مقایسه نتایج مدل‌سازی فیزیکی و تحلیل عددی مدل‌های پی، علی‌رغم اختلاف جزئی در مقادیر کمّی ظرفیت باربری کششی، روند کلی منحنی‌ها تقریباً یکسان مشاهده شد که دقت قابل‌قبول مطالعه را تایید می‌کند.

کلید واژگان

1- Uplift
2- Skirted Foundations

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.10.8]

3-Adhesion
4- Plaxis Software
5- Plexiglass
6- Unified Soil Classification System
7- Sand raining
8- Load Cell
9- Displacement Controlled Method
10- Hardening Soil Model
11- Tension Capacity Improvement

۷- مراجع

1- Liu, M., Yang, M. and Wang, H., (2014), *Bearing behavior of wide-shallow bucket foundation for offshore wind turbines in drained silty sand*, Ocean Engineering, Vol. 82, pp. 169–179.

2- 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.

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

4- 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 Journal, HBRC, Vol. 11, pp. 240-245.

5- Gholipour, S. 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.

6- Rezazadeh, S. and Eslami, A., (2018), *Bearing capacity of semi-deep skirted foundations on clay using stress characteristics and finite element analyses*, Marine Georesources and Geotechnology, Vol. 36, No. 6, pp. 625-639.

7- Acosta-Martinez, H.E., Gourvenec, S.M. and Randolph, M.F., (2008), *An experimental investigation of a shallow skirted foundation under compression and tension*, Soils and Foundations, Vol. 48, No. 2, pp. 247–254.

8- Acosta-Martinez, H.E., Gourvenec, S.M. and Randolph, M.F., (2012), *Centrifuge study of capacity of a skirted foundation under eccentric transient and sustained uplift*, Geotechnique, Vol. 62, No. 4, pp. 317–328.

9- Zdravkovic, L., Potts, D.M. and Jardine, R.J., (2001), *A parametric study of the pull-out capacity of bucket foundations in soft clay*, Geotechnique, Vol. 51, No. 1, pp. 55-67.

10- Gao, Y., Qiu, Y., Li, B., Li, D., Sha, C.h. and Zheng, X., (2013), *Experimental studies on the anti-uplift behavior of the suction caissons in sand*, Applied Ocean Research, Vol. 43, pp. 37–45.

11- Mana, D.S.K., Gourvenec, S.M., Randolph, M.F. and Hossain, M.S., (2012), *Failure mechanisms of skirted foundations in uplift and compression*, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol. 12 (2), pp. 47–62.

12- Yun, G.J. and Bransby, M.F., (2003), *Centrifuge modeling of the horizontal capacity of skirted foundations on drained loose sand*, BGA International Conference on Foundations: Innovations, Observations, Design and Practice, Thomas Telford, London, pp. 975-984.

13- 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.

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

15- ASTM D2487, (2006), *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.10.8]