



مطالعه آزمایشگاهی و عددی رفتار پی دامنه دار واقع بر لوله مدفون تحت بارگذاری محوری استاتیکی

معین محمدی زاده^۱، بهرام نادى^{۱*}، البرز حاجیان نیا^۲، الهام محمودی^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه بوخوم، بوخوم، آلمان.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

کلمات کلیدی:

پی دامنه دار

تحلیل حدی المان محدود

لوله مدفون

مدل سازی آزمایشگاهی

ماسه

خلاصه: ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی واقع بر لوله معمولاً در خاک‌های ماسه‌ای به میزان قابل قبولی نبوده است، از این رو به منظور بهبود عملکرد این گونه پی‌ها روش‌های مختلفی پیشنهاد می‌گردد که یکی از به صرفه‌ترین روش‌ها اضافه نمودن دامنه به لبه‌های پی سطحی است. استفاده از دامنه زیر محیط پی‌های سطحی، سبب افزایش عمق مؤثر پی و محصورسازی خاک درون دامنه شده، که بارهای سازه به اعماق مقاوم‌تر در تراز نوک دامنه انتقال می‌یابد. در سال‌های اخیر ارزیابی عملکرد پی‌های دامنه دار به عنوان یکی از موضوع‌های مطلوب مهندسی عمران تبدیل شده است. در این مقاله اثر عمق مدفون و فاصله لوله مدفون تا مرکز بارگذاری پی با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است. از این رو از پی دامنه دار واقع بر لوله مدفون با دامنه‌های B و $2B$ (عرض پی) استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با بهره بردن از پی دامنه دار با عمق $2B$ می‌توان ظرفیت باربری را در مقایسه با پی نواری بیش از 300% افزایش داد. مقایسه عددی پی دامنه دار با پی نیمه عمیق و نواری مدفون نشان می‌دهد که ظرفیت باربری پی دامنه دار کمتر از 10% با پی نیمه عمیق اختلاف داشته است، که با بهره‌گیری از پی دامنه دار می‌توان مهندسی عمران را به سمت طراحی‌های اقتصادی و دقیق‌تر سوق داد.

۱- مقدمه

سهولت در نصب و هزینه‌های اجرای کم سبب شده که توجه به این نوع فونداسیون در سالیان اخیر افزایش چشم‌گیری داشته است. فونداسیون‌های دامنه دار برای اولین بار در سرمایه‌گذاری‌های هیدروکربنی فراساحلی در اوایل دهه ۱۹۷۰ به عنوان یک واحد پشتیبانی برای سازه‌های شناور استفاده شد. فونداسیون‌های دامنه دار، جایگزین پی‌های سطحی، نیمه عمیق و عمیق هستند که برای سازه‌های فراساحلی به منظور پشتیبانی از سازه‌های ثابت یا شناور در صنایع نفت و گاز استفاده می‌شود. برای نصب پی‌های دامنه دار سه روش معمولاً استفاده می‌شود، ۱- روش کوبش: در این روش پس از قرارگیری پی در محل خود با اعمال ضربه به عمق مورد نظر می‌رسد. ۲- روش درجا: در این روش ابتدا محل قرارگیری حفاری می‌شود و سپس پی در محل حفاری شده قرار می‌گیرد. ۳- روش مکش: اغلب از روش اعمال مکش در صورتی که محیط فونداسیون بسته باشد، استفاده می‌شود، به این صورت که نفوذ اولیه تحت اثر وزن پی در بستر خاک انجام می‌شود و پس از آنکه پی در تراز مورد نظر مستقر شده توسط نیروی مکشی که به آن اعمال می‌شود، سیستم پی دامنه دار تا عمق پیش‌بینی شده در خاک نفوذ می‌کند.

در سالیان اخیر، مهندسان ژئوتکنیک روش‌های زیادی را برای توسعه رفتار فونداسیون به منظور افزایش ظرفیت باربری خاک و همچنین کاهش نشست پی‌های سطحی ایجاد کردند. یکی از این روش‌ها استفاده از فونداسیون دامنه دار است که در مواقعی خاک محل ضعیف بوده، بارهای سازه را به اعماق مقاوم‌تر در تراز نوک دامنه انتقال می‌یابد و راندمان پی سطحی را افزایش می‌دهد. دامنه‌های محیطی را می‌توان در هندسه‌های دایره‌ای، مستطیلی، نواری و مربعی با پایه‌های کم عمق جدید و موجود استفاده کرد. آن‌ها همچنین برای افزایش ایمنی لوله‌های مدفون استفاده می‌شوند علاوه بر این، می‌توان با استفاده از دامنه‌های محیطی، از خارج شدن خاک زیر فونداسیون و هر گونه آسیب احتمالی ناشی از گودبرداری در کارهای ساختمانی مجاور جلوگیری کرد. هنگامی که بار به پی وارد می‌شود، خاک زیر پی در اثر شکست برشی به طرفین جابه‌جا می‌شود. با محصور کردن خاک در زیر پی، مکانیسم شکست را می‌توان به طور مؤثر کنترل کرد.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: nadi@pci.iaun.ac.ir



قرار داد و نشان داد اگر نسبت عمق دامنه به عرض پی ۲ باشد، کاهش نشست از مقدار ۷۰٪ تجاوز می‌کند [۸].

السعيد و همکاران در سال ۲۰۱۵ اثر هم زمان محصورسازی جانبی خاک توسط دامنه و تسلیح خاک با ژئوگرید بررسی کردند و نشان دادند که استفاده هم زمان محصور و تسلیح‌سازی خاک، ظرفیت باربری نهایی پی سطحی را تا حدود ۲۳۰٪ افزایش می‌دهد [۹]. لوو و مک‌لارن در سال ۲۰۱۶ ساز و کار باربری و عملکرد پی لبه دار واقع بر نهشته ماسه روی رس را به وسیله تحلیل اجزای محدود بررسی کرده و پوش‌های گسیختگی تحت بارگذاری ترکیبی را ارائه دادند [۱۰]. حسین و اکاپوترا در سال ۲۰۱۷ به مقایسه‌ای مقاومت کششی پی‌های اسپادکن و دامنه دار در نهشته ماسه روی خاک رس با استفاده آزمایش‌های مدل سانتریفیوژ پرداختند و نشان دادند که نیروهای گسیختگی پی‌های دامنه دار ۶۰٪ تا ۶۱٪ بیشتر پی‌های اسپادکن است [۱۱]. اسماعیلی و همکاران در سال ۲۰۱۸ نشان دادند که پی‌های دامنه دار با نفوذ به عمق خاک، ظرفیت باربری پی‌های سطحی را تا ۳۰۰٪ افزایش می‌دهند. آن‌ها همچنین می‌توانند ظرفیت باربری یک پی مدفون شده معادل را تامین کنند، که نشان دهنده‌ای این است که خاک محبوس شده بین دامنه‌ها می‌تواند به صورت صلب عمل کند و در تحمل نیروها و فشارها شرکت کند [۱۲]. رضا زاده و اسلامی در سال ۲۰۱۸ ظرفیت باربری زهکشی نشده پی دامنه دار را تحت بارگذاری عمودی، از طریق روش مشخصه تنش و اجزای محدود تعیین کردند و نشان دادند که روش‌های مرسوم به دلیل نادیده گرفتن اصطکاک دامنه، ظرفیت باربری این گونه پی‌ها رو دست پایین برآورد می‌نمایند [۱۳]. قلی پور و مکارچیان در سال ۲۰۱۸ عملکرد پی‌های سطحی دامنه دار که بر روی بستر ماسه قرار دارند را با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که ظرفیت باربری نهایی پی‌های سطحی را می‌توان تا ۵۰۰٪ افزایش داد و نشست را می‌توان به مقدار ۸٪ نسبت به پی سطحی کاهش داد [۱۴]. محمود و همکاران در سال ۲۰۲۰ تاثیر استفاده از پی‌های دامنه دار را در خاک گچی بررسی کردند و نشان دادند که ظرفیت باربری بسته به سطح و ویژگی‌های هندسی دامنه و مشخصات خاک گچی در محدوده ۱۲۹٪ تا ۲۲۷٪ بهبود می‌یابد [۱۵]. الاقباری و همکاران در سال ۲۰۲۱ به صورت آزمایشگاهی و عددی ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی دامنه دار را تحت بارهای عمودی و مورب بررسی کرده‌اند. معادله ظرفیت باربری برای پی‌های سطحی دامنه دار پیشنهاد کردند. نشان دادند که با ارائه دامنه‌ها به عمق ۱/۲۵ برابر عرض پی، ظرفیت باربری ۴۰۷٪ افزایش یافته و نشست ۱۷٪ کاهش یافت [۱۶].

الاقباری و محمد زین در سال ۲۰۰۴ یک معادله ظرفیت باربری اصلاح شده برای پی‌های نواری دامنه دار واقع بر روی ماسه متراکم پیشنهاد کردند و نشان دادند که استفاده از دامنه‌های سازه‌ای می‌تواند ظرفیت باربری را با ضریب ۱/۵ تا ۳/۹ بسته به ویژگی‌های هندسی و سازه ای دامنه‌ها و پی، مشخصات مکانیکی خاک و میزان اندرکنش خاک - دامنه - پی افزایش دهد [۱]. صواف و ناظر در سال ۲۰۰۵ با استفاده از مدل آزمایشگاهی تأثیر محصور شدن خاک بر رفتار یک پی که بر روی خاک دانه‌ای قرار دارد، بررسی کردند و نشان دادند که ظرفیت باربری پی دایره‌ای به میزان قابل توجهی با محصور کردن خاک افزایش می‌یابد و برای قطرهای کوچک سلول، پی سلول-خاک به عنوان یک واحد (پی عمیق) رفتار می‌کند، در حالی که این الگوی رفتاری رو برای سلول‌های با قطر بزرگ مشاهده نکردند [۲].

یون و برانسی در سال ۲۰۰۷ ظرفیت باربری قائم پی لبه دار را بر اساس تحلیل عددی و آزمایشگاهی در خاک رس بررسی کردند و نشان دادند که ظرفیت پی دامنه دار تحت بار عمودی، معادل با پی مدفون در عمق دامنه است و نتایج حاصله توافقی خوبی با نتایج حاصل از آزمایش مدل سانتریفیوژ داشتند [۳]. الاقباری و دوتا در سال ۲۰۰۸ عملکرد یک پی مربعی با یک دامنه سازه‌ای واقع بر روی ماسه را تحت نیروی عمودی به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند که ظرفیت باربری پی مربعی در محدوده ۱۱/۲٪ تا ۷۰٪ افزایش یافته و بهبود ظرفیت باربری با افزایش زبری پی کاهش می‌یابد [۴].

مانا و همکاران در سال ۲۰۱۰ از مقایسه پی‌های لبه دار و مدفون در تراز لبه نشان دادند که ضرایب ظرفیت باربری و مکانیزم گسیختگی با افزایش عمق مدفون، یکسان می‌شود. برای نسبت‌های عمق مدفون کمتر و خاک با درجه ناهمگنی بیشتر، مکانیزم گسیختگی درون لبه محتمل‌تر بوده و اختلاف‌ها زیاد شده است [۵]. بین و همکاران در سال ۲۰۱۲ به کمک مدل‌سازی عددی رفتار پی دامنه دار با اضافه کردن دامنه میانی در خاک رس یکنواخت و غیریکنواخت بررسی کردند و دریافتند که برای رس غیریکنواخت ظرفیت باربری قائم حدود ۴۲٪ افزایش داشته است [۶]. ابراهیمی و روشن ضمیر در سال ۲۰۱۳ نشان دادند که استفاده از دامن‌های سازه‌ای بسته به هندسه و مشخصات سازه‌ای دامن‌ها و پی، مشخصات مکانیکی خاک و میزان اندرکنش خاک-دامنه و خاک-پی ظرفیت باربری پایه را تا ۳۶۸٪ می‌تواند افزایش دهد [۷]. عید در سال ۲۰۱۳ با استفاده از تحلیل عددی رفتار پی‌های سطحی دامنه دار واقع بر ماسه با بارگذاری محوری را مورد مطالعه

حفره های زیرزمینی چه به شکل طبیعی یا مصنوعی مانند لوله مدفون، ممکن است در مجاورت و یا زیر سازه ها قرار گیرند (مخصوصاً در مناطق شهری). مکانیزم گسیختگی خاک در زیر پی برای حالت بدون حفره و با حفره با یکدیگر تفاوت عمدهای دارد. وجود حفره در خاک باعث کاهش ظرفیت باربری پی‌های نزدیک به حفره شده و می تواند سبب ایجاد نشستهای قابل توجهی در سطح زمین و یا حتی فروپاشی این حفره ها گردد و استفاده از پی دامنه دار ایمنی لوله‌های مدفون را افزایش می‌دهد. تفرشی و همکاران در سال ۲۰۱۰ بر اساس تحلیل عددی و آزمایشگاهی نشان دادند که یک ناحیه‌ی بحرانی برحسب عمق مدفون حفره و خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره در زیر پی وجود دارد که در صورت قرارگیری حفره داخل این ناحیه، ظرفیت باربری پی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد [۱۷]. کیوسومی و همکاران در سال ۲۰۱۱ با انجام مدل‌سازی آزمایشگاهی و تحلیل حد بالا به تعیین ظرفیت باربری و بررسی انواع حالت‌های شکست یک پی سطحی واقع بر سطح یک نهشته آهکی با وجود حفره پرداخته‌اند و نشان دادند که مکانیسم شکست وابسته به اندازه و محل قرارگیری حفره است [۱۸]. زیائو و همکاران در سال ۲۰۱۸ از تحلیل حدی المان محدود برای تعیین ظرفیت باربری زهکشی نشده یک پی نواری واقع بر یک حفره در خاک رسی دو لایه استفاده کرده‌اند. نمودارهای طراحی به منظور تعیین ظرفیت باربری پی سطحی نواری، در قالب ضریب ظرفیت باربری ارائه کردند [۱۹]. جایموهان و همکاران در سال ۲۰۱۹ از نتایج تجزیه و تحلیل اجزای محدود و آزمایشگاهی مشاهده کردند که وجود فضای خالی زیرزمینی می‌تواند باعث تمرکز تنش در داخل توده خاک و منجر به شکست شود. ضریب تمرکز تنش اطراف حفره در سمت نزدیک‌تر به بارگذاری بیشتر است. همچنین با افزایش عمق حفره، ضریب تمرکز تنش کاهش می‌یابد [۲۰]. وو و همکاران (۲۰۲۰) نیز با به کارگیری تحلیل حدی المان محدود به بررسی ظرفیت باربری پی نواری سطحی واقع شده بر یک و دو حفره مستطیلی شکل در حالتی که بارگذاری پی دارای خروج از مرکزیت باشد پرداخته‌اند. در این تحقیق مطالعه پارامتریک به کمک تحلیل کران بالا و پایین در نرم‌افزار Optum G2 انجام شده است. نشان دادند که در حضور حفره تکی، ظرفیت باربری پی زمانی که انحراف از مرکزیت بار به سمت حفره باشد نسبت به زمانی که انحراف از مرکزیت بار در سمت مقابل باشد کمتر است [۲۱].

مدفون وجود ندارد. که در این مقاله اثر عمق مدفون و فاصله لوله مدفون تا مرکز بارگذاری پی دامنه دار با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. که در ابتدا تاثیر محل قرارگیری لوله مدفون برای پی‌های لبه دار و نواری با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی و تحلیل حدی المان محدود بررسی شده است. از سوی دیگر عملکرد و شباهت رفتاری پی‌های دامنه دار با پی‌های مدفون و نیمه عمیق واقع بر لوله در شرایط قرارگیری مختلف مقایسه شده است.

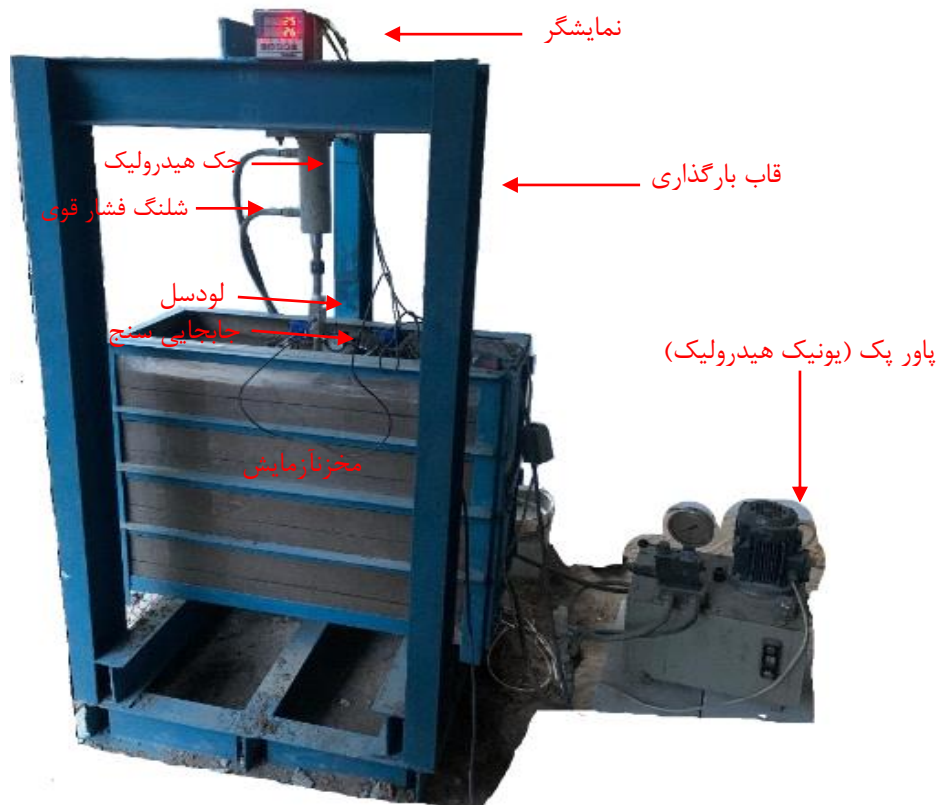
۲- مدل‌سازی آزمایشگاهی

۲-۱- دستگاه آزمایش

برای مدل‌سازی آزمایشگاهی کوچک مقیاس از دستگاهی مطابق شکل ۱ استفاده شده است، که در این تحقیق چون هدف بررسی رفتار پی نواری دامنه دار در وضعیت کرنش صفحه‌ای است، ابعاد مخزن برابر خاک با ابعاد داخلی به طول ۱۲۰۰ mm، عمق ۸۰۰ mm و عرض ۴۰۰ mm استفاده شده است. بارگذاری مدل‌ها به وسیله جک هیدرولیکی و از طریق میله‌ای به قطر ۳ cm انجام گرفت. به علت عدم تاثیر قابل توجه نرخ سرعت بارگذاری در نتایج مدل‌سازی ناشی از نوع مصالح مورد استفاده و شرایط آزمایش، سرعت بارگذاری ثابت و به میزان ۱ mm/min در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری نیروهای اعمال شده به مدل‌های پی و میزان نشست متناظر، به ترتیب یک عدد نیروسنج با ظرفیت ۵ ton و دو عدد جابه‌جایی‌سنج با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ mm، در دو سمت مدل پی استفاده شده است. پس از تکمیل فرآیند مدل‌سازی نمونه، سیستم اندازه‌گیری نیرو بر روی جک و شالوده نصب شده و با انجام تنظیم‌های مربوط به ثبت داده‌ها، بارگذاری انجام می‌شود. برای اعمال نیرو در مرکز پی و نداشتن خروج از مرکزیت بار، بر روی مدل پی سطحی متصل به دامنه‌ها شیارهای کوچک ایجاد می‌شود تا با قرارگیری نوک میله بارگذاری در آن، میله فاقد جابه‌جایی عرضی باشد.

۲-۲- خاک مورد استفاده

در این مقاله از خاک ماسه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت (SP) در جعبه آزمایش باربری پی‌ها بهره گرفته شده است. D_{10} ، D_{50} و D_{60} خاک مذکور به ترتیب برابر ۰/۰۷۸، ۰/۲۲۵ و ۰/۲۷۸ بوده است. از نتایج آزمایش پروکتور استاندارد $\rho_{min} = 1550 \text{ kg/m}^3$ و $\rho_{max} = 1820 \text{ kg/m}^3$ به دست آمده است. به منظور تعیین پارامترهای مقاومت برشی از آزمایش برش مستقیم 30×30 استفاده شده است. در این راستا مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی به ترتیب 33° و ۲ kPa گزارش شده است.



شکل ۱. دستگاه آزمایش

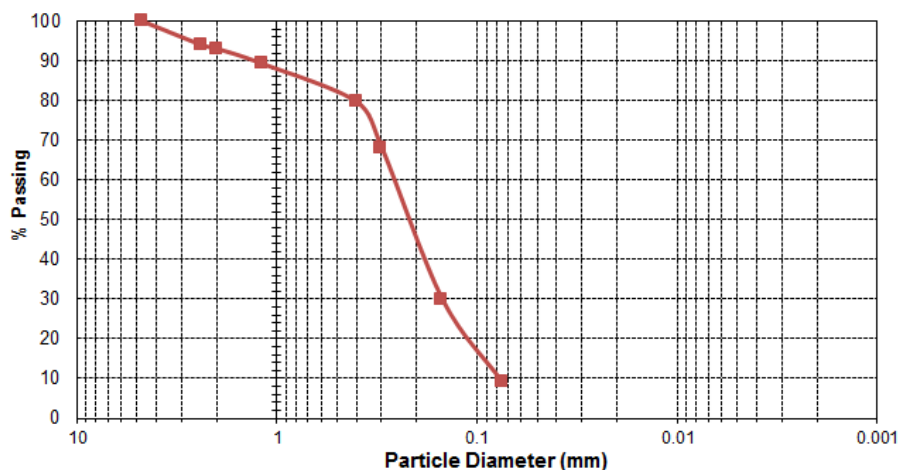
Fig. 1. Testing apparatus

اندازه ذرات خاک در مقایسه با عرض پی، ۵۰ برابر کوچکتر در نظر گرفته شود، این پارامتر نمی‌تواند موثر باشد [۲۳ و ۱۴]. در مطالعه حاضر عرض پی ۱۰۰ میلی‌متر و $D_{50} = 0.225$ خاک، $\frac{100}{0.225} = 444 > 50$ می‌باشد، بنابراین ضریب مقیاس در تحقیق پیش رو مطرح نیست و در مطالعه حاضر نمودارهای تنش-نشست مدل‌سازی فیزیکی با مقادیر مدل‌سازی عددی مقایسه شده‌اند و هدف اصلی کمی‌سازی تاثیر محل قرارگیری لوله مدفون بر پی‌ها بوده و برآورد ظرفیت باربری پی با ابعاد واقعی ملاک عمل نیست.

۲-۳- نحوه انجام آزمایش

از یک ورق فولادی به عرض ۱۰۰ mm و به طول ۳۹۵ mm به ضخامت ۲۰ mm به عنوان پی نواری در نظر گرفته شده است. دامنه‌های متصل به پی نواری به ضخامت ۲۰ mm به طول‌های ۱، ۰ و ۲ برابر عرض پی با زوایه قائم در نظر گرفته شده و لوله‌های پی وی سی با قطر خارجی ۶۳ mm و ضخامت ۲ mm و به طول ۳۹۵ mm در عمق‌های ۱، ۰، ۲ و ۴ برابر عرض پی با خروج از مرکزیت ۱، ۰ و ۲ برابر عرض پی بررسی

به دلیل مشکلات مرتبط با بارگذاری نمونه‌های مقیاس کامل برای خرابی، معمولاً از مدل‌های فیزیکی برای مطالعه ظرفیت باربری و نشست پی‌ها استفاده شده است. مدل‌های فیزیکی آزمایشگاهی روی ماسه شامل مقدار اندکی دانه و فشار کم خاک در مقایسه با نمونه‌های اصلی است. با توجه به غیرخطی بودن پوش گسیختگی مقاومت-برش ماسه، فشارهای خاک ایجاد شده در مدل‌های آزمایشگاهی باید منجر به بسیج زاویه اصطکاک بالاتر شود. در نتیجه، ظرفیت باربری و نشست اندازه‌گیری شده در مطالعه حاضر، نباید با مقادیر اندازه‌گیری شده برای پی‌های با مقیاس کامل مقایسه شود بلکه با مقادیر متناظر پیش‌بینی شده با استفاده از نظریه‌های موجود یا مدل‌سازی آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی متناظر با مدل ساخته شده، بررسی و کنترل گردد. بسیاری از مطالعات گزارش کردند که دو عامل (i) میانگین تنش زیر پی و (ii) نسبت عرض پی به اندازه ذرات خاک در مدل کوچک مقیاس ممکن است در پاسخ یک پی تأثیر بگذارد [۲۲-۲۴] علاوه بر این، در برخی از مقالات اخیر بیان شده که اندازه دانه خاک وقتی $\frac{B}{D_{50}} > 50$ باشد، نمی‌تواند بر نتایج تأثیر بگذارد. به عبارت دیگر، وقتی



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ای مورد آزمایش

Fig. 2. Grain size distribution curves for the sandy soil used

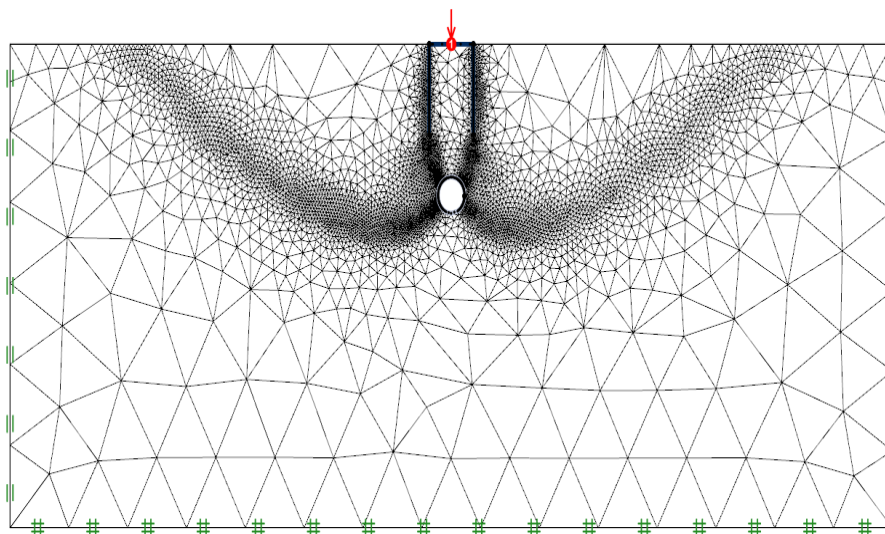


شکل ۳. نصب پی دامنه دار؛ الف) هم تراز شدن خاک با دامنه‌ها ب) بستن پی سطحی بر روی دامنه‌ها با چهار پیچ

Fig. 3. Installation of a skirted foundation; a) Leveling the soil with skirts b) Fastening the surface foundation on the skirts with four nails (screws)

الک تک، در ارتفاع بارش مشخص تراکم خاک در سه نقطه مختلف از مخزن خاک اندازه‌گیری و با میانگین‌گیری تراکم نسبی ۷۳٪ به دست آمده است. جهت جلوگیری از تأثیرات جداره دستگاه آزمایش بر نتایج پس از روغن‌کاری سطوح داخلی جعبه آزمایش، با استفاده از روش بارش ماسه از ارتفاع و نرخ ریزش ثابت، در لایه‌های ۵ cm انجام گرفته است. بارش ماسه تا تراز قرارگیری دامنه با شرایط یکسان درون و اطراف دامنه تا تراز بالای آن ادامه یافت. با اتمام بارش ماسه و تراز کردن سطح بستر، مطابق شکل ۳ پی سطحی بر روی دامنه قرار گرفته و توسط چهار عدد پیچ به آن ثابت شده است.

شده است. همچنین برای ایجاد زبری روی سطوح تماس مدل‌ها با ماسه کاغذ سنباده به سطوح داخلی و خارجی دامنه و کف شالوده، به وسیله چسب چسبانده شده است و از روش درجا استفاده شده که تراکم خاک دچار تغییر نگردد. دیواره‌های داخلی مخزن صیقلی شده تا با چسباندن پلکسی گلس به دیواره‌های داخلی، اصطکاک با ماسه را تا حد ممکن کاهش یابد. ساخت مدل‌های خاکی با تراکم نسبی مشخص و تکرارپذیری ساخت آن‌ها، امری تعیین کننده در نتایج آزمایش‌ها است. به این منظور، روش‌های مختلفی برای ساخت نمونه‌ها و مدل‌های فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک پیشنهاد شده است. در تحقیق حاضر با استفاده از روش بارش ماسه‌ای در هوا و



شکل ۴. فضای مدل‌سازی و مش‌بندی خودکار در نرم‌افزار Optum G2

Fig. 4. Modeling and automatic meshing in Optum G2 software

۳- مدل‌سازی عددی

انتخاب یک روش مناسب برای حل مسئله مهم است. بین روش‌های حل موجود، تحلیل حدی المان محدود (FELA) و روش اجزا محدود (FEM) نسبت به سایر روش‌های حل برتری دارند. برای این روش‌های حل در نظر گرفتن یک الگوی شکست برای حل مسئله ضروری نیست. تحلیل حدی المان محدود از تکنیک سازگاری خودکار مش‌بندی استفاده می‌کند و به منظور افزایش دقت محاسبات به صورت خودکار مش‌های موجود در محل‌هایی که تمرکز تنش به وجود می‌آید را ریزتر در نظر می‌گیرد، اما در روش اجزا محدود، مش‌بندی به صورت دستی در اطراف هر منطقه مورد نیاز است. به منظور صحت‌سنجی و مقایسه نتایج به دست آمده در این تحقیق از نرم‌افزار تحلیل حدی المان محدود به نام Optum G2 [۲۵] استفاده شده است. مدل‌سازی در فضای دو بعدی و با در نظر گرفتن شرایط کرنش صفحه‌ای انجام شده است. معیار گسیختگی موهر-کلمب به عنوان معیار گسیختگی خاک در نظر گرفته شده است. به منظور مدل‌سازی پی‌ها از یک المان صفحه صلب استفاده شده است. مرز بین پی‌ها با خاک با استفاده از ضریب کاهش، R ، کاملاً زبر در نظر گرفته شده، از این رو مقدار ۱ به ضریب کاهش اختصاص داده شد. مرز پایین مدل در هر دو جهت افقی و عمودی و مرزهای کناری تنها در جهت افقی مقید شده‌اند. برای هر مدل‌سازی تحلیل کران بالا و پایین انجام شده است و مقدار متوسط آن

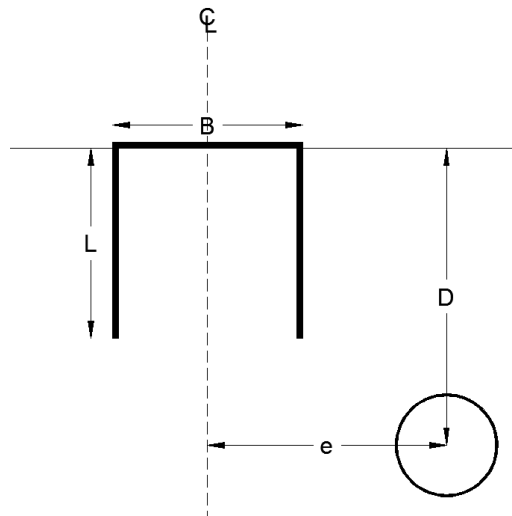
به عنوان نتیجه نهایی هر مدل گزارش شده است. مدل‌سازی و مش‌بندی عددی در شکل ۴ نشان داده شده است. برای مدل‌سازی فرض شده است که تعداد مش‌ها در ابتدای مدل‌سازی ۱۰۰۰ عدد باشد. پس از شروع تحلیل بر اساس توزیع تنش برشی و به صورت خودکار در محل‌هایی که تمرکز تنش بیشتر شود مش‌های ریزتری ایجاد می‌شود تا جایی که تعداد کل مش‌ها تا ۱۰۰۰۰ عدد افزایش یابد. برای هر مدل این فرآیند ۳ بار تکرار می‌شود تا جواب بهینه حاصل شود.

۴- نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی

به منظور نشان دادن وضعیت شرایط آزمایش، شکل ۵ طرح کلی آزمایشات انجام شده با در نظر گرفتن اثرات طول دامنه (L/B)، عمق مدفون لوله (D/B)، خروج از مرکزیت لوله مدفون نسبت به خط مرکزی پی (e/B) بر میزان ظرفیت باربری پی را نشان می‌دهد.

۴-۱- تاثیر عمق و خروج از مرکزیت لوله مدفون

همانطور که در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده با افزایش خروج از مرکزیت، ظرفیت باربری پی‌ها به سمت حالتی که لوله مدفون در زیر پی نباشد میل می‌کند. مطابق شکل ۶، در حالتی که عمق مدفون لوله ۳ برابر عرض پی و خروج از مرکزیت لوله مدفون نسبت به خط مرکزی پی ۲ برابر عرض



شکل ۵. طرح کلی آزمایشات انجام شده

Fig. 5. The outline of the experiments

۴-۲- تاثیر طول دامنه‌های اضافه شده به پی نواری

در این تحقیق رفتار پی‌های دامنه دار با دامنه‌های به طول‌های ۱، ۰ و ۲ برابر عرض پی بررسی شده است. خاک بین دامنه‌ها همانطور که توسط محققین پیشین نیز گفته شده است، به صورت صلب عمل می‌کند و باعث تشکیل گوه گسیختگی در عمق‌های بیشتر شده و برای رسیدن به گسیختگی نیروی بیشتری احتیاج هست. عملکرد پی از حالت سطحی به رفتار پی نیم عمیق تغییر پیدا می‌کند. برای حالتی که، لوله در زیر پی وجود ندارد با اضافه شدن دامنه‌ها به طول ۱ و ۲ برابر عرض پی ظرفیت باربری به ترتیب حدود ۲۰٪ و ۳۰٪ شده است. همین تاثیرپذیری برای زمانی که لوله دقیقاً در خط مرکزی پی در عمق برابر عرض پی واقع شود، ظرفیت باربری حدود ۱۹٪ و ۲۷٪ شده است. بنابراین اضافه شدن دامنه‌ها ظرفیت باربری را به صورت چشمگیری تحت تاثیر قرار می‌دهد که البته این افزایش در صورت نبود لوله مدفون بیشتر خواهد بود.

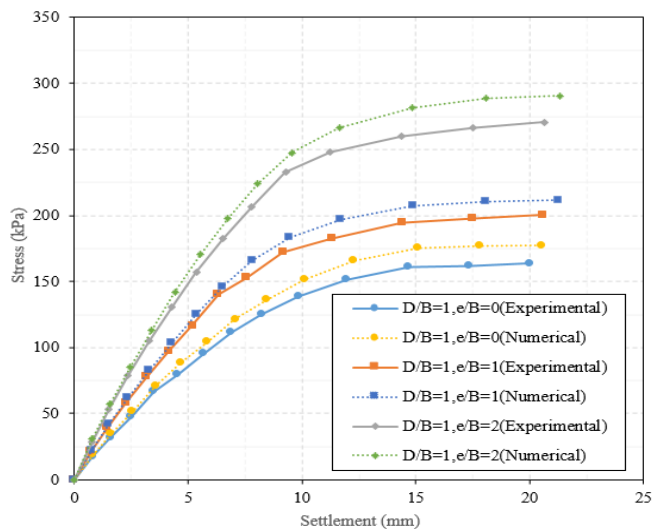
۴-۳- تاثیر لوله مدفون

به منظور در نظر گرفتن تاثیر لوله برای سه حالت تعریف شده در این تحقیق از پارامتر بدون بعد BCR تعریف شده است، که به شرح زیر می‌باشد:

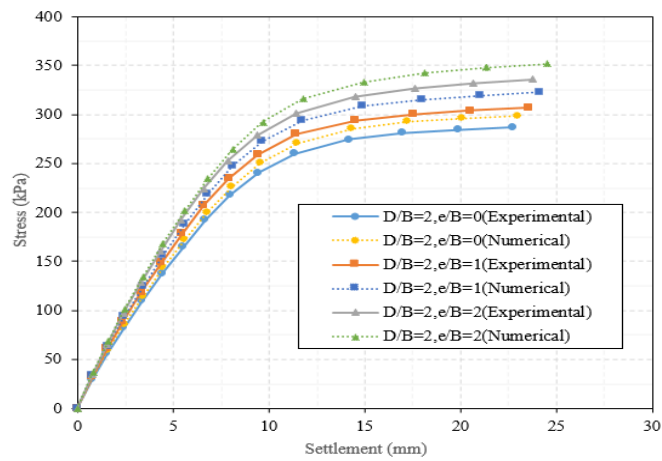
$$BCR = \frac{Q_{u(\text{with void})}}{Q_{u(\text{without void})}} \quad (1)$$

پی باشد، منحنی‌های تنش-تنسست کاملاً با حالت بدون لوله یکی باشد و این امر نشان دهنده عدم تداخل حباب تنش پی با لوله مدفون می‌باشد. برای پی نواری بدون دامنه وجود لوله در حالت‌های مورد بررسی ظرفیت باربری را تا حدود ۵۷٪ کاهش داده است. یکی از راهکارهای محافظت از لوله‌های مدفون قرار دادن آن‌ها بین دامنه‌هاست، اما چون صلبیت و یکپارچگی خاک محصور شده بین دامنه‌ها رو بهم می‌زند، ظرفیت باربری برای دامنه‌های ۱ و ۲ برابر عرض پی به ترتیب حدوداً ۵۸٪ و ۶۰٪ کاهش می‌یابد. این کاهش ظرفیت باربری برای پی‌های با دامنه‌های بلندتر بیشتر بوده است، زیرا که در مسیر انتقال تنش توسط دامنه‌ها به لایه‌های زیرین وجود لوله مدفون، نقطه ضعفی را به وجود می‌آورد.

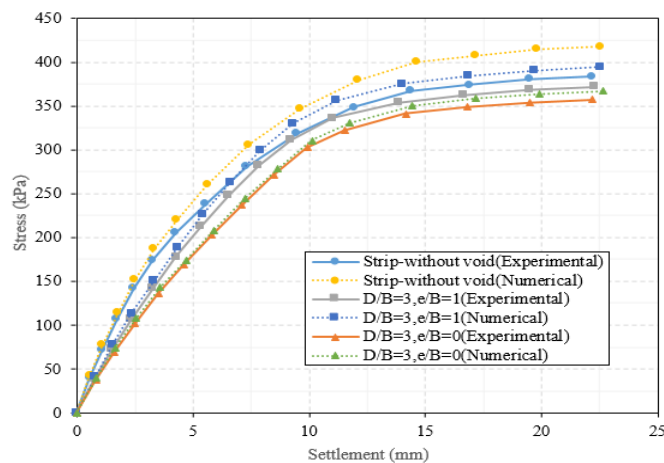
با کاهش عمق مدفون لوله، تاثیر خروج از مرکزیت بیشتر خود را نمایان می‌کند. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده، برای پی نواری زمانی که لوله در عمق ۳ برابر عرض پی به ۱ برابر عرض پی انتقال پیدا کند، میزان تاثیر خروج از مرکزیت بر ظرفیت باربری از حدوداً ۷٪ به ۳۹٪ افزایش می‌یابد. این تاثیر پذیری با اضافه شدن دامنه‌ها به طول ۱ و ۲ برابر عرض پی به ترتیب از حدود ۸٪ به ۴۰٪ و ۷٪ به ۴۳٪ افزایش می‌یابد، که در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با وجود تفاوت جزئی در پارامترهای مکانیکی مصالح و برهم کنش پی-خاک، تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی وجود دارد.



(الف)



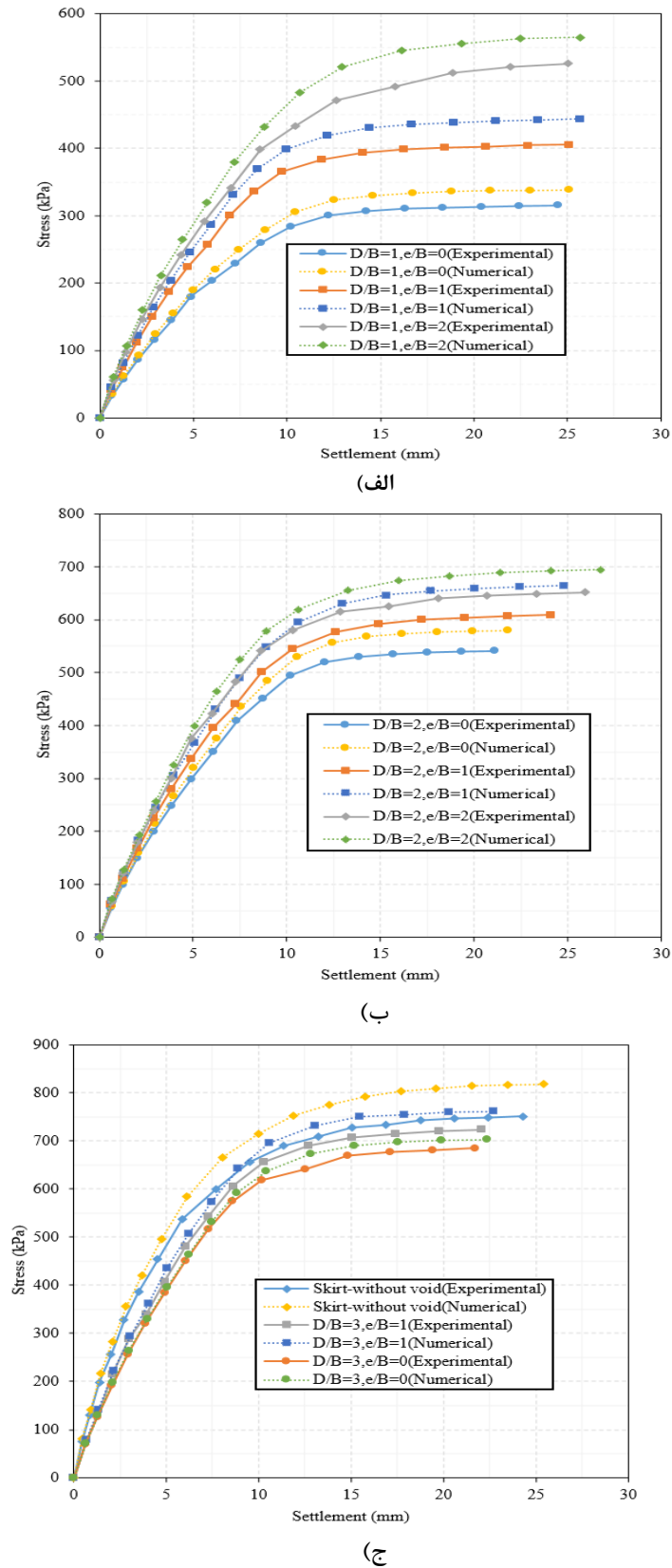
(ب)



(ج)

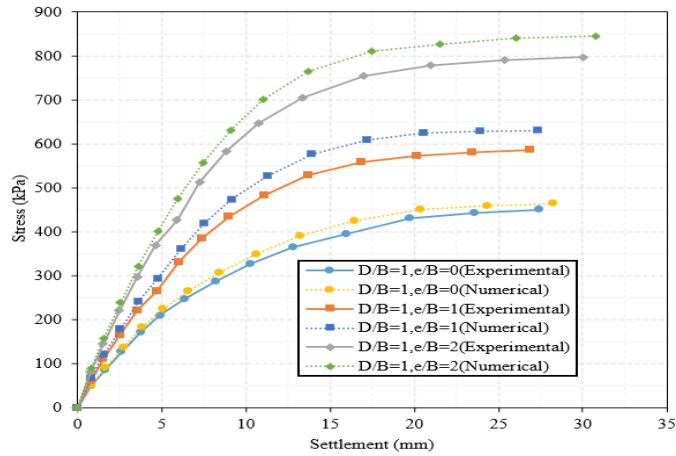
شکل ۶. تاثیر عمق قرارگیری لوله برای پی نواری الف) $D/B = 1$ ب) $D/B = 2$ ج) $D/B = 3$

Fig. 6. The effect of the pipe placement depth for strip foundations a) $D/B = 1$ b) $D/B = 2$ c) $D/B = 3$

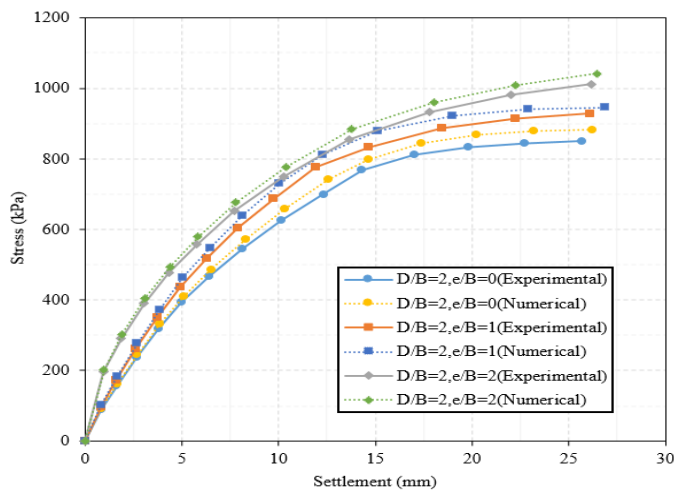


شکل ۷. تاثیر عمق قرارگیری لوله برای پی نواری با دامنه‌های به طول عرض پی (الف) $D/B = 1$ (ب) $D/B = 2$ (ج) $D/B = 3$

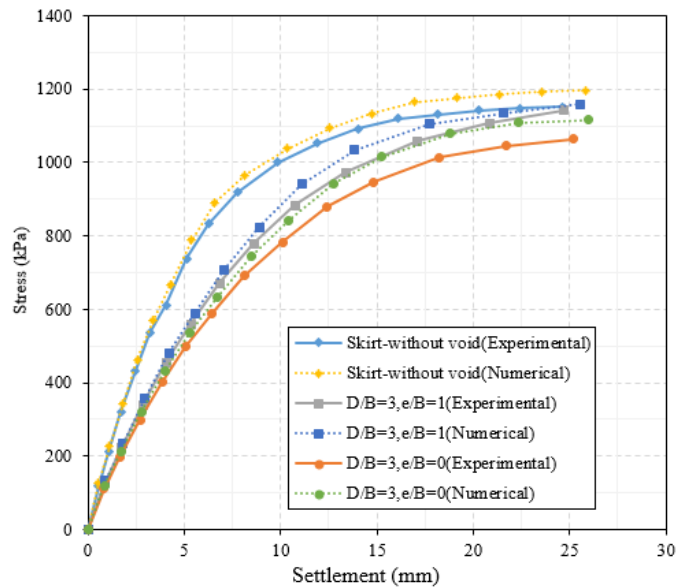
Fig. 7. The effect of pipe placement depth for a strip foundation with skirts as long as the width of the foundation a) $D/B = 1$ b) $D/B = 2$ c) $D/B = 3$



(الف)



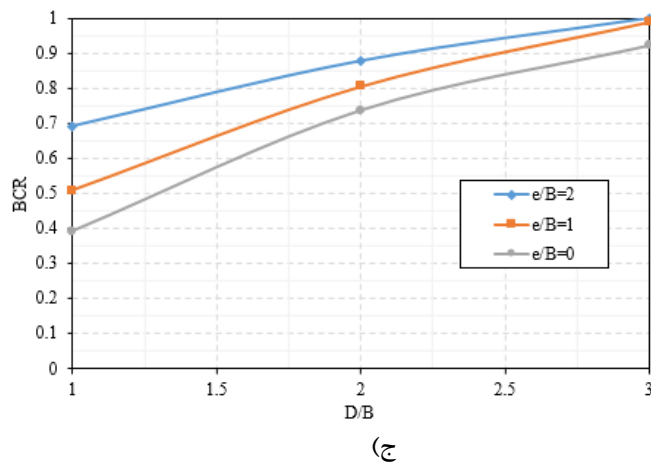
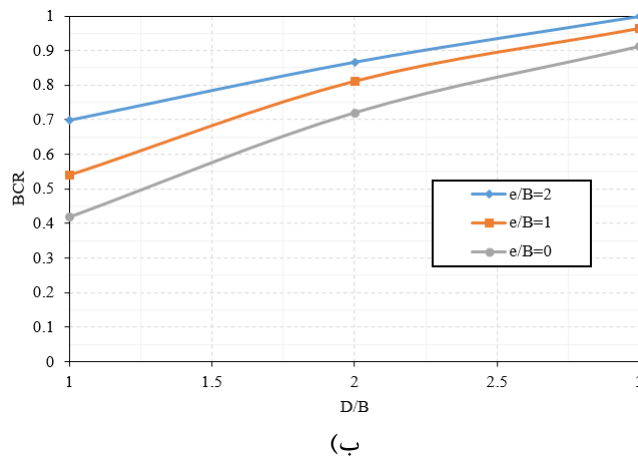
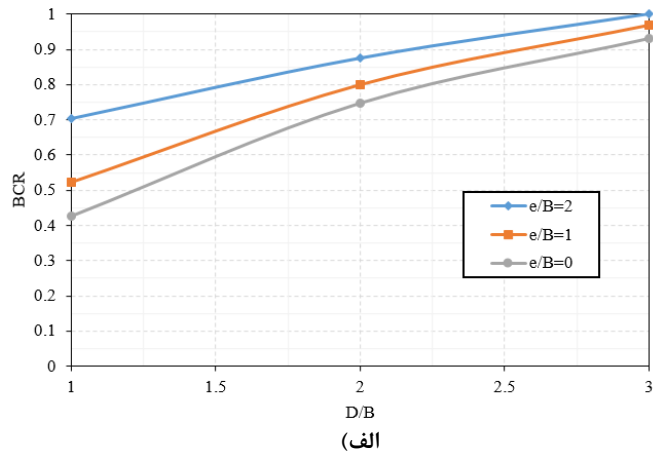
(ب)



(ج)

شکل ۸. تاثیر عمق قرارگیری لوله برای پی نواری با دامنه‌های به طول دو برابر عرض پی (الف) $D/B = 1$ (ب) $D/B = 2$ (ج) $D/B = 3$

Fig. 8. The effect of pipe placement depth for strip foundation with skirts twice the width of foundation a) $D/B = 1$ b) $D/B = 2$ c) $D/B = 3$

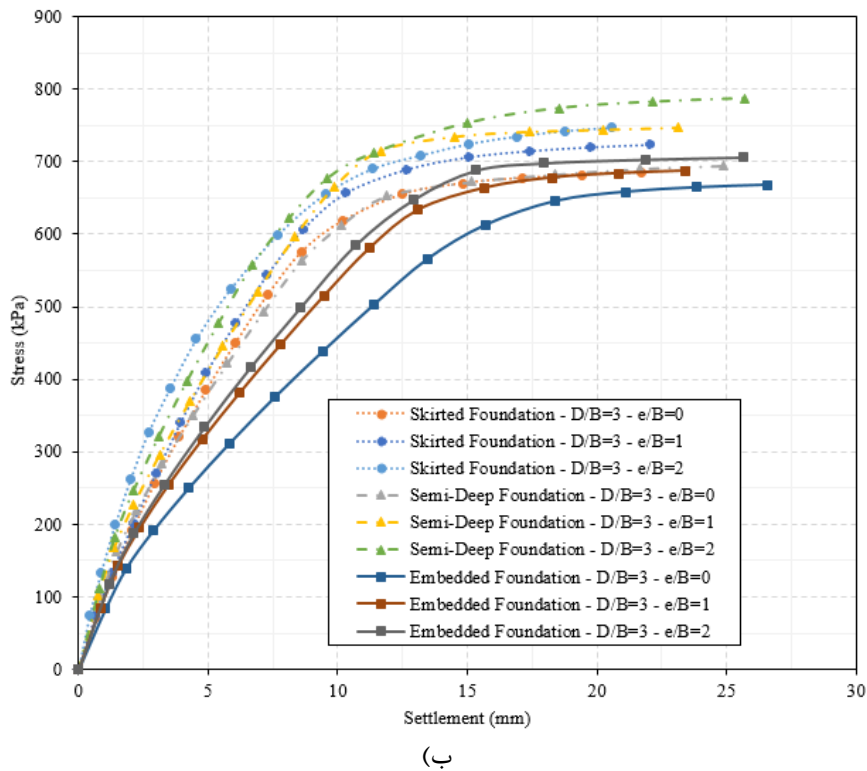
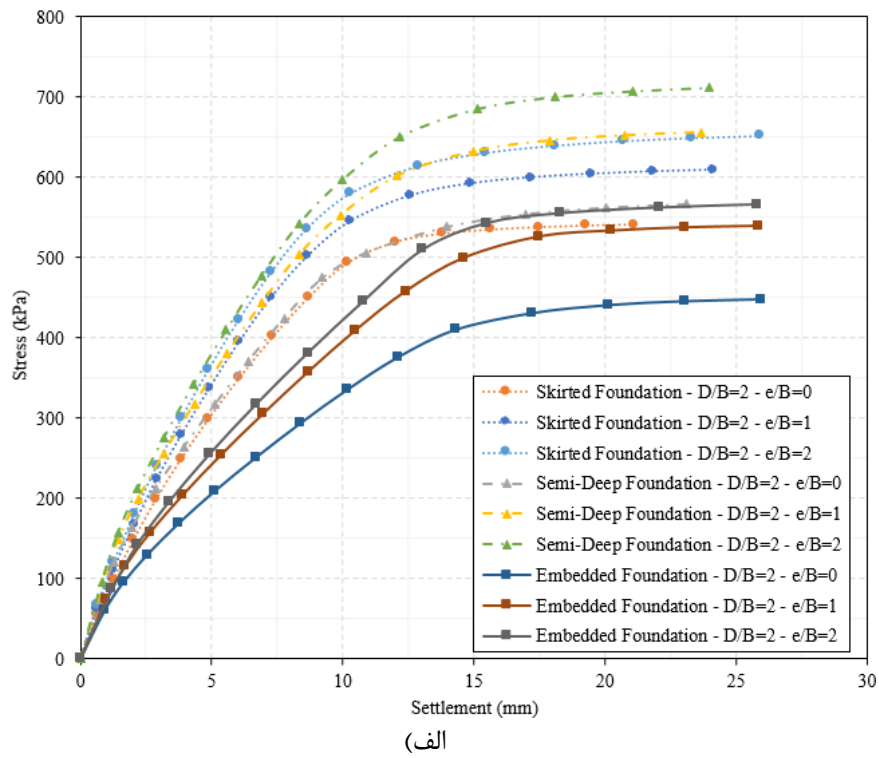


شکل ۹. نسبت ظرفیت باربری برای الف) $L/B=0$ ب) $L/B=1$ ج) $L/B=2$

Fig. 9. The bearing capacity ratio for a) $L/B=0$ b) $L/B=1$ c) $L/B=2$

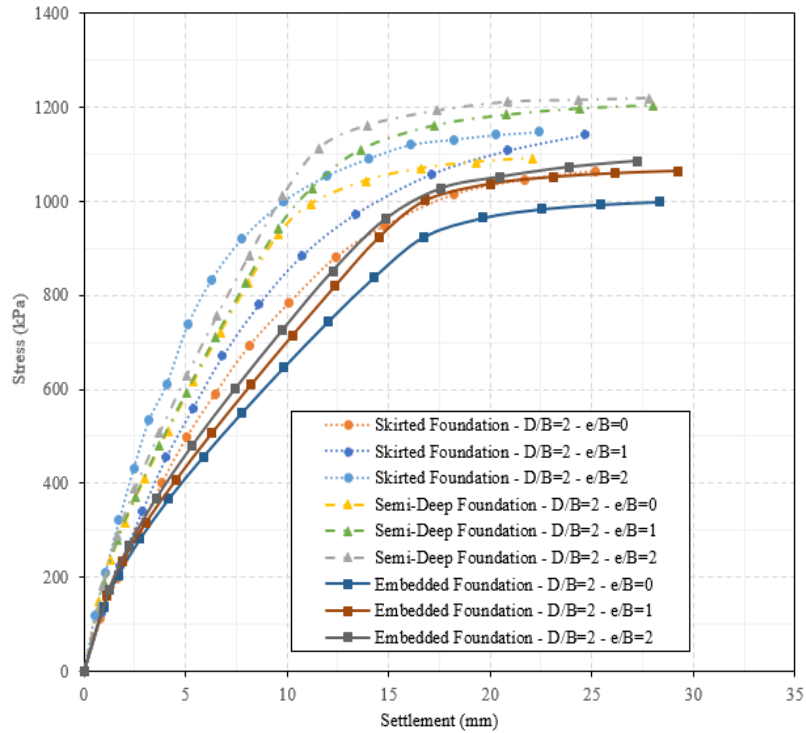
ظرفیت باربری با افزایش عمق مدفون لوله افزایش می‌یابد، که این افزایش باربری تا رسیدن عمیق مدفون به حد معینی (حدی که بعد از آن لوله از حباب تنش زیر پی خارج می‌شود) ادامه پیدا می‌کند. این امر از یک طرف به علت بسیج بیشتر مقاومت برشی به دلیل افزایش ضخامت لایه‌ی خاک

که در آن $q_u(\text{with void})$ ظرفیت باربری پی دامنه دار با حفره، $q_u(\text{without void})$ ظرفیت باربری پی دامنه دار بدون حفره است. شکل ۹ تغییرات نسبت ظرفیت باربری BCR در مقابل تغییرات نسبت D/B برای مقادیر مختلف e/B را نشان می‌دهد. برای یک B مشخص،

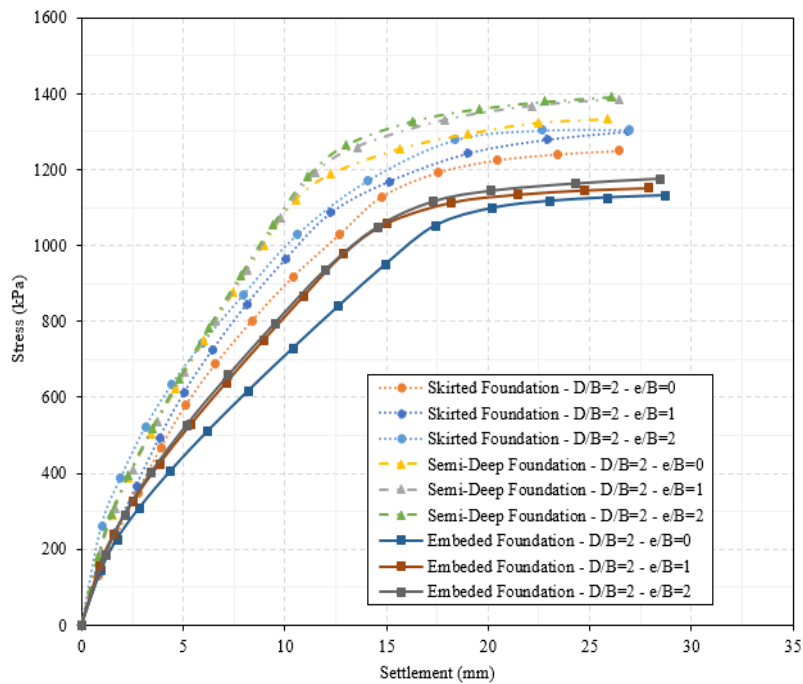


شکل ۱۱. مقایسه نسبت ظرفیت باری پی دامنه دار، نیمه عمیق و مدفون برای $L/B = 1$ (الف) $D/B=L+B$ (ب) $D/B=L+2B$

Fig. 11. Comparison of bearing capacity ratio of skirted, semi-deep and buried foundations for $L/B = 1$ a) $D/B=L+B$ b) $D/B=L+2B$



(الف)



(ب)

شکل ۱۲. مقایسه نسبت ظرفیت باری پی دامنه دار، نیمه عمیق و مدفون برای $L/B = 2$ (الف $D/B=L+B$ ب) $D/B=L+2B$

Fig. 12. Comparison of bearing capacity ratio of skirted, semi-deep and buried foundations for $L/B = 2$
a) $D/B=L+B$ b) $D/B=L+2B$

بیشتر از مقادیر به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی بوده ولی تا حد قابل قبولی نزدیک به آن بوده است.

- عملکرد پی‌های دامنه دار به رفتار پی نیمه عمیق نسبت به پی مدفون شباهت بیشتری دارد. به خصوص در مواردی که طول دامنه کوچک‌تر بوده، به دلیل تغییر شکل‌های کمتر خاک داخل دامنه‌ها، رفتار پی دامنه دار به پی‌های نیمه عمیق تمایل بیشتری دارد.

منابع

- [1] M. Al-Aghbari, Y.E. Mohamedzein, Bearing capacity of strip foundations with structural skirts, *Geotechnical & Geological Engineering*, 22(1) (2004) 43-57.
- [2] M. El Sawwaf, A. Nazer, Behavior of circular footings resting on confined granular soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(3) (2005) 359-366.
- [3] G. Yun, M. Bransby, The undrained vertical bearing capacity of skirted foundations, *Soils and foundations*, 47(3) (2007) 493-505.
- [4] M.Y. Al-Aghbari, R. Dutta, Performance of square footing with structural skirt resting on sand, *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 3(4) (2008) 271-277.
- [5] D. Mana, S. Gourvenec, M. Randolph, A numerical study of the vertical bearing capacity of skirted foundations, in: *Proc. 2nd Int. Symp. Front. Off. Geotech.(ISFOG)*, Perth, 2010, pp. 433-438.
- [6] B. Bienen, C. Gaudin, M.J. Cassidy, L. Rausch, O.A. Purwana, H. Krisdani, Numerical modelling of a hybrid skirted foundation under combined loading, *Computers and Geotechnics*, 45 (2012) 127-139.
- [7] S. Golmoghani-Ebrahimi, M. Rowshanzamir, Experimental evaluation of bearing capacity of skirted footings, *Civil Engineering and Architecture*, 1(4) (2013) 103-108.
- [8] H.T. Eid, Bearing capacity and settlement of skirted shallow foundations on sand, *International Journal of Geomechanics*, 13(5) (2013) 645-652.
- [9] A.E. Elsaied, N.M. Saleh, M.E. Elmashad, Behavior of circular footing resting on laterally confined granular

دیگر مقدار و هزینه حفاری پی‌های دامنه نسبت به پی‌های سطحی مدفون بسیار کمتر بوده و ضمن اینکه عملکرد رضایت بخش‌تری داشته است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله از طریق مدل‌سازی فیزیکی کوچک مقیاس و عددی به بررسی ابعاد مختلف حضور دامنه و تأثیر موقعیت مختلف هندسی لوله مدفون بر بهبود ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی واقع بر خاک ماسه پرداخته شده است. در این راستا عملکرد پی دامنه دار در شرایط مختلف حضور لوله مدفون با پی‌های نیمه عمیق و سطحی مدفون مقایسه و بررسی گردید و نتایجی که در این تحقیق به دست آمده به شرح زیر است:

- اضافه کردن دامنه زیر پی نواری باعث بهبود ظرفیت باربری شده است. این افزایش به صورت غیرخطی بوده، که نشان دهنده تأثیر بیشتر برای دامنه‌های با طول بیشتر است. اضافه شدن دامنه‌ها به طول‌های ۱ و ۲ برابر عرض پی، ظرفیت باربری را به ترتیب حدوداً ۲۰٪ و ۳۰٪ افزایش داده است.
- وجود لوله زیر پی‌ها سبب کاهش ظرفیت باربری می‌شود، اما اضافه کردن دامنه به پی نواری سبب بهبود عملکرد آن شده است. در بدترین حالت در این تحقیق اضافه کردن دامنه به طول ۱ برابر عرض پی، ظرفیت باربری را ۹۲٪ افزایش داده، که می‌تواند روش مقرون به صرفه برای بهبود ظرفیت باربری باشد.
- خروج از مرکزیت لوله نسبت به خط مرکزی پی، سبب افزایش ظرفیت باربری پی‌های دامنه دار می‌شود. زمانی که لوله با خروج از مرکزیت ۲ برابر عرض پی و در عمق ۳ برابر عرض پی واقع شده، با وضعیتی که لوله وجود نداشته باشد یکسان است، که نشان دهنده عدم تداخل لوله با حباب تنش زیر پی بوده است.
- نرخ رشد ظرفیت باربری برای پی دامنه دار با طول دامنه ۲ برابر عرض پی نسبت به حالت‌های دیگر بیشتر است.
- تأثیرگذاری عمق مدفون لوله نسبت به خروج از مرکزیت لوله در نرخ رشد ظرفیت باربری پی دامنه دار یکسان، بیشتر است.
- روند نرخ رشد ظرفیت باربری برای پی دامنه دار با شرایط مختلف تقریباً مشابه بوده است. نرخ رشد ظرفیت باربری با افزایش خروج از مرکزیت و عمق مدفون لوله کاهش می‌یابد و روند افزایش کمتر می‌شود.
- به منظور صحت و کنترل نتایج به دست آمده، مقادیر آزمایشگاهی و عددی با هم مقایسه شده‌اند و تمامی مقادیر به دست آمده از نتایج عددی

- NUMERICAL ANALYSIS ON THE EFFECT OF A CIRCULAR VOID ON THE BEARING CAPACITY OF A STRIP FOOTING ABOVE SAND, Sharif Journal of Civil Engineering, (1) (2010) 29-35.
- [18] M. Kiyosumi, O. Kusakabe, M. Ohuchi, Model tests and analyses of bearing capacity of strip footing on stiff ground with voids, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 137(4) (2011) 363-375.
- [19] Y. Xiao, M. Zhao, H. Zhao, Undrained stability of strip footing above voids in two-layered clays by finite element limit analysis, Computers and Geotechnics, 97 (2018) 124-133.
- [20] J. Jayamohan, T. Shajahan, A. Sasikumar, Effect of underground void on the internal stress distribution in soil, in: Ground improvement techniques and geosynthetics, Springer, 2019, pp. 45-56.
- [21] G. Wu, M. Zhao, H. Zhao, Y. Xiao, Effect of eccentric load on the undrained bearing capacity of strip footings above voids, International Journal of Geomechanics, 20(7) (2020) 04020078.
- [22] I. Herle, Effect of grain size and pressure level on bearing capacity of footings on sand, Deformation and Progressive Failure in Geomechanics, (1997) 781-786.
- [23] O. Kusakabe, Y. Maeda, M. Ohuchi, Large-scale loading tests of shallow footings in pneumatic caisson, Journal of geotechnical engineering, 118(11) (1992) 1681-1695.
- [24] T. TATSUOKA, Progressive failure and particle size effect in bearing capacity of footing on sand, ASCE Geotechnical Special Publication, 27 (1991) 788-802.
- [25] K. Krabbenhoft, A. Lyamin, J. Krabbenhoft, Optum computational engineering (OptumG2), Computer software, (2015).
- reinforced soil, HBRC Journal, 11(2) (2015) 240-245.
- [10] P. Lu, D. Maclaren, Geotechnical challenge of offshore mudmat foundation stability: combining analytical and finite element investigation of bearing capacity of sand overlying soft clay, Geomechanics for Energy and the Environment, 6 (2016) 58-69.
- [11] M.S. Hossain, Y. Hu, D. Ekaputra, Extraction response of skirted foundations and a spudcan on sand-over-clay deposits, Géotechnique, 67(5) (2017) 460-465.
- [12] K. Esmaceli, A. Eslami, S. Rezazadeh, Semi-deep Skirted Foundations and Numerical Solution to Evaluate Bearing Capacity, Open Journal of Geology, 8(06) (2018) 623.
- [13] S. Rezazadeh, A. Eslami, Bearing capacity of semi-deep skirted foundations on clay using stress characteristics and finite element analyses, Marine Georesources & Geotechnology, 36(6) (2018) 625-639.
- [14] G. Sajjad, M. Masoud, Study of the behaviour of skirted shallow foundations resting on sand, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 18(3) (2018) 117-130.
- [15] M.R. Mahmood, M.Y. Fattah, A. Khalaf, Experimental investigation on the bearing capacity of skirted foundations on submerged gypseous soil, Marine Georesources & Geotechnology, 38(10) (2020) 1151-1162.
- [16] M.Y. Al-Aghbari, Y. Mohamedzein, H. Al-Nasseri, Potential use of structural skirts towards improving the bearing capacity of shallow footings exposed to inclined loadings, International Journal of Geotechnical Engineering, 15(10) (2021) 1278-1283.
- [17] S. Moghadas Tafreshi, A. Sharifpour, A. Ghanbari,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Mohammadzadeh, B. Nadi, A. Hajiannia, E. Mahmoudi, Laboratory and Numerical Study of the Behavior of Skirted Foundation Located on a Buried Pipe under Static Axial Loading, Amirkabir J. Civil Eng., 55(1) (2023) 3-18.

DOI: 10.22060/mej.2019.15465.6128

