

تحلیل عددی اثر حفره‌ی دایره‌یی بر ظرفیت باربری پی نواری بر روی خاک دانه‌یی

سیدناصر مقدس تفرشی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

امین شریف‌پور (کارشناس ارشد)

علی قبری (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه خوارزمی

وجود حفره زیر یک پی می‌تواند پایداری و باربری آن را به‌نحو بسزایی تحت تأثیر قرار دهد. انجام آزمایش‌های محلی در مقیاس بزرگ و حتی آزمایش در مقیاس کوچک آزمایشگاهی پر هزینه است و انجام آزمایش در شرایط مختلف و دسترسی به تمامی اطلاعات ممکن نیست، لذا برای بررسی اثر حفره در ظرفیت باربری پی انجام یک تجزیه و تحلیل عددی مناسب در کنار نتایج تجربی حاصل از یک مدل فیزیکی می‌تواند خلاء اطلاعات را به‌خوبی پوشش دهد و شناسایی کامل‌تری را مقدر سازد. از آنجا که روش اجزاء محدود با موفقیت نسبتاً قابل قبولی برای مطالعه‌ی بسیاری از مسائل ژئومکانیک به‌کار رفته است، از این رو برای تجزیه و تحلیل عددی باربری پی نواری واقع بر یک حفره‌ی طویل از برنامه‌ی اجزاء محدود در حالت دوبعدی استفاده شده است. تجزیه و تحلیل عددی مدل خاک - حفره در شرایط بارگذاری استاتیکی قائم برای بررسی اثر پارامترهای عمق مدفون حفره، خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره انجام شد. نتایج تجزیه و تحلیل عددی دوبعدی که با استفاده از نرم‌افزار Plaxis انجام شده است در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی انطباق خوبی دارند. براساس نتایج حاصل 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، پایداری و ظرفیت باربری پی به میزان قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و باید این اثر در ظرفیت باربری پی در نظر گرفته شود.

nas_moghaddas@kntu.ac.ir
a.sharifpour@tmu.ac.ir
ghanbari@tmu.ac.ir

واژگان کلیدی: حفره‌ی زیرزمینی، ظرفیت باربری، پی نواری سطحی، عمق مدفون حفره، خروج از مرکزیت پی، تجزیه و تحلیل عددی.

مقدمه

امروزه در حفاری‌های موردنیاز برای احداث سازه‌های مختلف به حفره‌های قدیمی فعال یا غیرفعال برخورد می‌شود. شکل ۱ نمونه‌یی از وجود حفره در زیر یک ساختمان قدیمی را نشان می‌دهد. وجود حفره‌ها از میزان ظرفیت باربری پی‌های نزدیک به خود خواهد کاست. این مسئله باید در محاسبه‌ی ظرفیت باربری پی‌ها در نظر گرفته شود و یا اینکه با روشی مناسب از اثر آن در ظرفیت باربری جلوگیری کرد. در این خصوص مهندسان ژئوتکنیک ممکن است راه‌های مختلفی را بدین صورت در نظر بگیرند: (۱) پرکردن حفره با مصالح قابل قبول، (۲) استفاده از شمع برای انتقال بار پی به خاک مناسب زیر حفره، (۳) حفاری و قراردادن کف پی در زیر حفره، (۴) اجرای پی در خارج از محدوده‌ی بحرانی تحت تأثیر پی. تمامی این روش‌ها بر حسب شرایط موجود و فضای کافی می‌توانند عملی و

قابل اجراء باشند. در هر صورت برای حصول پایداری یک پی روی یک حفره و ارائه‌ی پیشنهادها، لازم، تجزیه و تحلیل پایداری پی واقع بر حفره ضروری است. برخی پژوهشگران پایداری پی نواری را بر روی یک حفره‌ی طویل با مقطع دایره‌یی در یک لایه‌ی خاک همگن رسی با استفاده از روش اجزاء محدود و مدل آزمایشگاهی بررسی کردند.^[۱] در این مطالعات، ظرفیت باربری و نشست پی‌های نواری واقع بر روی حفره‌های استوانه‌یی، برای بررسی اثر عمق مدفون حفره تجزیه و تحلیل شدند. بر این اساس نتیجه گرفتند که وقتی حفره به پی نزدیک است، تنش پیشینیه‌ی متحمل پی علاوه بر کاهش، در نشست کمتری اتفاق می‌افتد. برخی دیگر نیز یک برنامه کامپیوتری با استفاده از روش اجزاء محدود به صورت سه‌بعدی تهیه کردند و با آن ضمن بررسی رفتار پی‌های منفرد مربع واقع بر خاک رس شامل حفره‌ی پیوسته‌ی دایره‌یی، اثر شکل پی و اندازه‌ی آن، ابعاد حفره و موقعیت آن نسبت به محور پی را بر روی رفتار پی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که برای یک عمق مدفون



شکل ۱. نمونه‌یی از حفره‌های واقع در زیر پی ساختمان.

ساخته و صلبیت وجه پشتی تانک با استفاده از ورق فولادی به ضخامت 20 mm تأمین شد. برای مشاهده و کنترل آزمایش و همچنین آماده‌سازی نمونه، وجه جلویی تانک از جنس پلاستیک شفاف 1 به ضخامت 20 mm انتخاب شد که قابلیت جداشدن از تانک را داشته باشد. تأمین صلبیت کافی در وجه جلویی با استفاده از نصب پشت‌بندی فلزی در وسط آن ایجاد شد. بنابراین با کمینه‌سازی حرکت وجه‌های جلویی و پشتی تانک آزمایش شرایط کرنش مسطح به‌نحو قابل‌قبولی فراهم شد. از آنجا که آماده‌سازی نمونه برای ایجاد یکنواختی خاک اطراف حفره با قراردادن تانک آزمایش در حالت افقی انجام می‌شود، تانک آزمایش از طریق دو محور افقی متصل شده به قاب اصلی، قابلیت قرارگیری در دو حالت افقی و قائم را دارد.

قاب اصلی از دو ستون با مقطع قوطی به ارتفاع 1600 mm و یک تیر صلب در بالا به طول 1270 mm تشکیل شده است. ستون‌های قائم بر روی دو تیر افقی مستقر بر زمین از همان مقطع به طول 1300 mm قرار گرفتند تا پایداری سیستم تأمین شود. تیر افقی بالایی، تکیه‌گاه سیلندرهای بارگذاری محسوب می‌شود و دو سیلندر بارگذاری با قطرهای مؤثر 80 و 160 میلی‌متر که با یک سیستم ساده (مارپیچ و فکله) قابلیت جابجایی در طول تیر را دارند، برای بارگذاری در محدوده‌های مختلف بار بر روی تیر افقی قرار گرفته‌اند.

آماده‌سازی ترانشه‌ی خاکی در بزرگ‌رنده‌ی حفره، با تراکم یکنواخت و مشخص و قابلیت تکرار در تانک آزمایش با روش بارش انجام می‌شود. مخزن بارش به ابعاد مقطع $300 \times 300 \times 300$ میلی‌متر و ارتفاع 450 میلی‌متر است که در قسمت پایینی آن قیفی به‌صورت مایل با ابعاد انتهایی 100×100 میلی‌متر تعبیه شده است تا امکان برگردن قسمت‌های میانی تانک آزمایش در هنگام بارش ماسه فراهم شود. در قسمت انتهایی قیف مذکور دریچه‌ی کشویی به ابعاد 100×100 میلی‌متر طراحی شد تا امکان نصب صفحات مشبک مختلف برای کنترل نرخ بارش ماسه و همچنین نصب درب تحتانی مخزن فراهم شود. سیستم بارش، بر حسب ارتفاع بارش و نوع صفحات مشبک، برای آماده‌سازی ترانشه با تراکم‌های مختلف کالیبره شده است. برای ایجاد ترانشه‌ی موردنظر قبل از انجام عمل بارش ماسه، تانک آزمایش به حالت افقی در می‌آید، سپس ضمن قراردادن مدل حفره در تانک، با استفاده از یک تخته‌ی چوبی، ارتفاع ترانشه‌ی خاک که تابعی از عمق مدفون برای حفره‌ی موردنظر است، تنظیم می‌شود. برای ایجاد حفره نیز از یک لوله‌ی پلاستیکی بسیار نازک و با انعطاف‌پذیری زیاد به قطر 10 میلی‌متر استفاده می‌شود (با توجه به جنس و ضخامت کم این لوله‌ها که حدود 0.1 میلی‌متر است، می‌توان از سختی خمشی و محوری آنها صرف‌نظر کرد و وضعیت حاصل را مانند حفره در نظر گرفت)، که قبل از بارش ماسه به‌صورت قائم در داخل تانک و در محل موردنظر قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه امتداد بارش در امتداد محور حفره است، بنابراین نحوه‌ی بارش برای آماده‌سازی ترانشه، اثر محسوسی در تغییر شکل حفره ندارد. این تذکر لازم است که برای تماس نداشتن دو انتهای لوله با دو طرف تانک، از داخل به دو انتهای آن نوار فوم چسبانده می‌شود. همچنین برای جلوگیری از پُرشدن حفره در زمان بارش ماسه، قسمت باز بالای آن با یک نایلون پلاستیکی پوشانده می‌شود. پس از بارش ماسه و پُرشدن تانک، روی نمونه با یک خط‌کش فلزی صاف شده و وجه شیشه‌یی در محل خود نصب می‌شود. در نهایت تانک آزمایش به آرامی دوران داده می‌شود و به حالت قائم در می‌آید. سپس با قراردادن مدل پی (صفحه فولادی) به عرض 100 میلی‌متر، طول 210 میلی‌متر (در امتداد محور حفره) و ضخامت 20 میلی‌متر در محل موردنظر، سیستم آماده‌ی بارگذاری می‌شود. شکل ۲ شمای کلی دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد.

مشخص برای حفره، با افزایش خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره، میزان ظرفیت باربری افزایش می‌یابد.^[۲] همچنین تأثیر خروج از مرکزیت هنگام نزدیکی حفره به کف پی (عمق مدفون کمتر حفره)، بیشتر است. همچنین در مطالعات آزمایشگاهی بار نهایی یک پی نواری واقع بر حفره در خاک رس لای‌دار بر حسب اندازه‌ی حفره و موقعیت قرارگیری آن نسبت به پی به‌دست آمد.^[۳] در سال ۱۹۹۱ نیز اثر حفره در ظرفیت باربری پی تحت بار خارج از مرکز و یا مایل با استفاده از روش اجزاء محدود به‌دست آمد.^[۴] که ظرفیت باربری پی با افزایش خروج از مرکزیت و شیب بارکاهش می‌یابد. در سال ۱۹۹۴ نیز با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی بهبود ظرفیت باربری پی واقع بر خاک ماسه‌یی مستقر بر خاک رسی شامل حفره‌ی چهارگوش با قراردادن یک لایه‌ی مسلح‌کننده در مرز دو لایه، بررسی شد.^[۵] براساس نتایج به‌دست آمده قرار دادن لایه‌ی مسلح‌کننده در مرز دو لایه می‌تواند ظرفیت باربری پی را به نحو مؤثری افزایش دهد. پژوهشگران ایرانی نیز با طراحی و ساخت یک مدل فیزیکی، آزمایش‌های مختلفی را برای مطالعه‌ی نحوه‌ی تأثیر عوامل مختلف نظیر چگالی نسبی خاک، عمق مدفون حفره و خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره بر ظرفیت باربری تحت شرایط بار استاتیکی وارد بر پی انجام دادند.^[۶] آن‌ها نتیجه گرفتند که زیر پی یک ناحیه‌ی بحرانی بر حسب عمق مدفون حفره و خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره وجود دارد که در صورت قرارگیری حفره خارج این ناحیه، حفره اثری در ظرفیت باربری پی نخواهد داشت.

بررسی کارهای قبلی نشان می‌دهد که مطالعات در زمینه‌ی رفتار پی‌ها واقع بر حفره‌های بسیار محدود و عمدتاً بر روی خاک‌های رسی متمرکز است و نیاز به توسعه‌ی مطالعات در بررسی پایداری پی‌ها واقع بر حفره به خصوص در خاک‌های دانه‌یی دارد. به همین دلیل در مطالعه‌ی حاضر برای توسعه‌ی نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده،^[۶] یک تحلیل عددی جامع برای مطالعه‌ی نحوه‌ی تأثیر عمق مدفون حفره و میزان خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره بر ظرفیت باربری پی تحت شرایط بار استاتیکی و دست‌یابی به یک فاصله‌ی ایمن برای پایداری پی انجام شد.

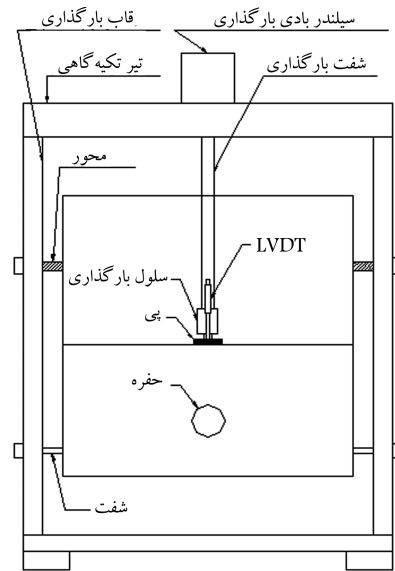
توصیف مدل آزمایشگاهی دستگاه آزمایش

تانک آزمایش به‌صورت صلب و از مصالح فولادی به ابعاد $1000 \times 1000 \times 220\text{ mm}$

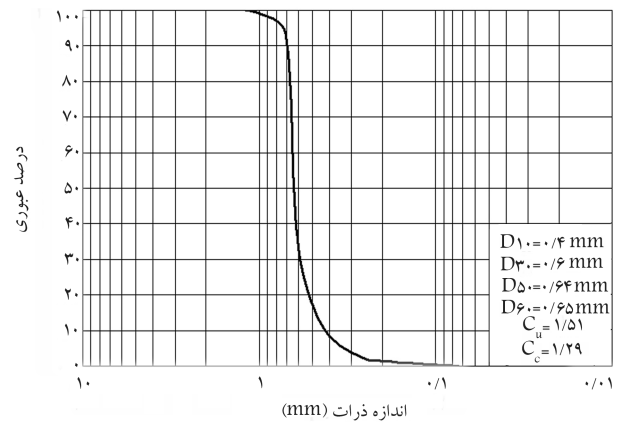
به عمق مدفون حفره) شامل خاک و حفره با استفاده از برنامه‌ی Plaxis ۸ و با مدل موهر-کولمب برای خاک انجام شده است. [۷] پی و حفره به صورت کشسانی و به صورت المان تیر با صلیب خمشی EI و سختی محوری EA مدل شده است. همچنین اندرکش بین پی و خاک و همچنین حفره و خاک با در نظر گرفتن المان واسطه^۲ با ضریب کاهش R_{int} منظور می‌شود. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر از شبکه‌بندی ریز^۳ و المان‌های ۱۵ گره‌یی استفاده شد. تعداد درجات آزادی در هر گره، دو درجه‌ی آزادی انتقالی بوده و از درجات آزادی چرخشی صرف نظر شده است. این تذکر لازم است که استفاده از تحلیل کرنش مسطح^۴ با توجه به سطوح صلب و صاف در جبهه جلو و پشت مدل فیزیکی برای حرکت نکردن در امتداد طولی پی و حفره، به طوری که آثار انتهایی دخالتی بر رفتار آزمایش در مقطع میانی نداشته باشند، توجیه‌پذیر است. برای شبیه‌سازی سطح تماس خاک با حفره، از المان‌های متناسبی در محل تماس آن دو با تعریف پارامترهای اضافی برای توصیف لغزش و جداسدگی بین خاک و حفره استفاده شد. در مدل عددی حرکت مرزهای کناری در جهت محور x و حرکت مرز پایینی در هر دو جهت x و y کاملاً محدود شده است. شکل ۵ شبکه‌ی اجزاء محدود در صفحه‌ی x-y، شرایط مرزی و ابعاد مدل بر اساس مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. به دلیل انتخاب ابعاد مناسب تانک (۳ تا ۴ برابر قطر لوله از مرکز تانک تا جداره‌ها) مرزهای صلب هیچ‌گونه اثری در پاسخ سیستم ندارند، از این رو شبیه‌سازی مرزها به صورت صلب اشکالی ایجاد نمی‌کند و از گره‌های مرزی به بعد، تغییراتی در اثر بارهای اعمال شده در محیط صورت نخواهد گرفت.

ارزیابی مدل عددی

برای آزمایش و ارزیابی مدل عددی و همچنین تعیین پارامترهای آن، تطبیق هر چه بیشتر مدل با رفتار حاصل از مطالعات تجربی ضروری است. شکل ۶ منحنی تنش-نشست پی برای حفره با عمق مدفون ۲D و بدون خروج از مرکزیت نسبت به پی را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود منحنی حاصل از تحلیل عددی با انتخاب



شکل ۲. شمای کلی دستگاه آزمایش.



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی ماسه.

ماسه‌ی مورد استفاده

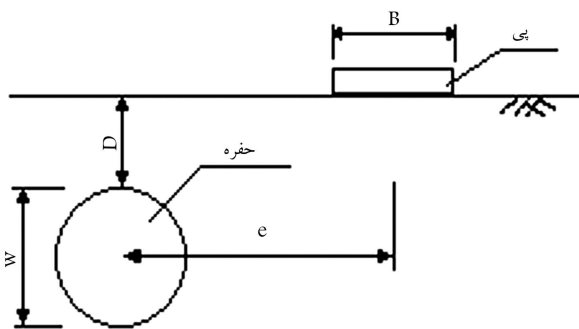
ماسه‌ی مورد استفاده با دانه‌بندی یکنواخت و اندازه‌ی ذرات بین ۰/۲۵ و ۰/۸ میلی‌متر و $D_{50} = ۰/۶۴$ است. ضریب خمیدگی و یکنواختی آن به ترتیب $C_u = ۱/۵۱$ و $C_c = ۱/۲۹$ بوده و ویژه $G_s = ۲/۶۷$ و تخلخل بیشینه و کمینه به دست آمده در آزمایشگاه به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۵۵ هستند. شکل ۳ منحنی توزیع ذرات ماسه را نشان می‌دهد.

برای درک بهتر شرایط آزمایش و تحلیل عددی، شکل ۴ طرح کلی آزمایش‌های انجام شده برای بررسی اثر عمق مدفون حفره (D/B)، خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره (e/B) بر ظرفیت باربری پی را نشان می‌دهد.

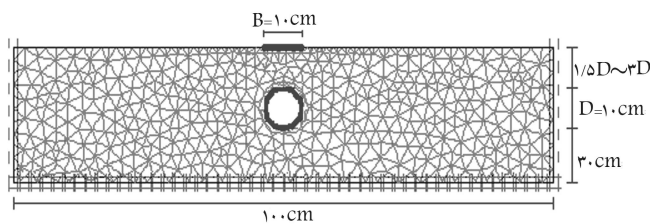
تجزیه و تحلیل اجزاء محدود

شبکه‌ی اجزاء محدود و شرایط مرزی

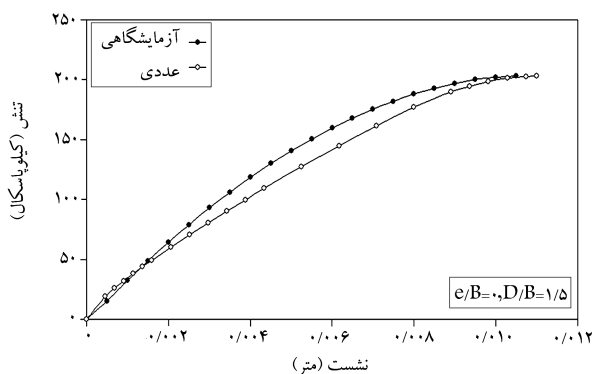
برای تحلیل عددی ظرفیت باربری پی واقع بر حفره، یک شبکه‌ی اجزاء محدود دوبعدی در حالت کرنش مسطح به طول ۱۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع متغیر (با توجه



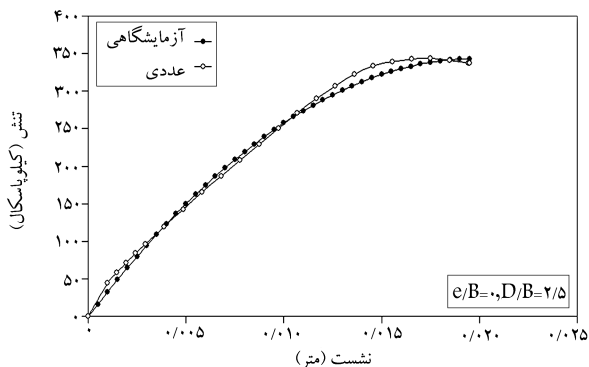
شکل ۴. طرح کلی آزمایش‌های انجام شده ($W/B=۱$) برای تمامی آزمایش‌ها.



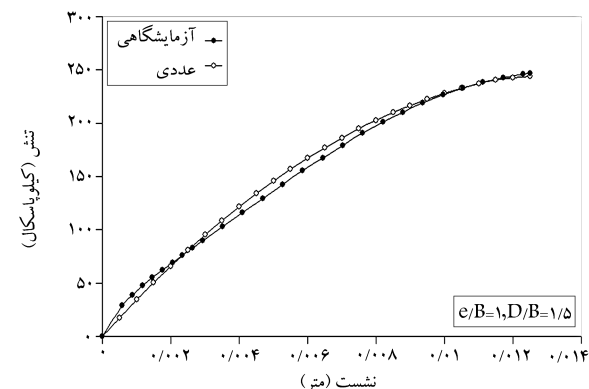
شکل ۵. شبکه‌ی اجزاء محدود و شرایط مرزی در صفحه‌ی (x-y).



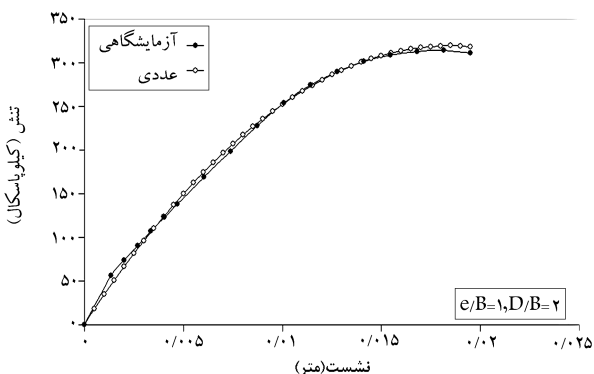
الف) بدون خروج از مرکزیت و با عمق مدفون ۱/۵



ب) بدون خروج از مرکزیت و با عمق مدفون ۲/۵

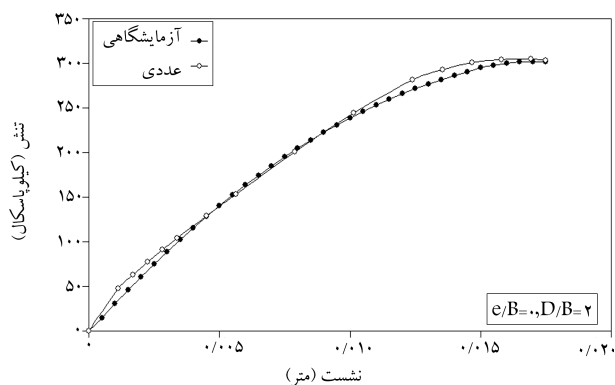


ج) با خروج از مرکزیت ۱ و عمق مدفون ۱/۵



د) با خروج از مرکزیت ۱ و عمق مدفون ۲

شکل ۷. نمودار تنش-نشست پی برای حالات مختلف از عمق مدفون و خروج از مرکزیت برای تأیید صحت مدل عددی.



شکل ۶. نمودار تنش-نشست پی برای عمق مدفون ۲D و بدون خروج از مرکزیت.

جدول ۱. پارامترهای تطبیق داده شده مدل.

پی	حفره	خاک	پارامتر مورد استفاده در تحلیل عددی
---	---	۴۲	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
---	---	۷/۶	چسبندگی (کیلو پاسگال)
---	---	۳۵۰۰۰	مدول کشسانی (کیلو پاسگال)
---	---	۰/۳	ضریب پواسن
---	---	۱۷	وزن مخصوص خاک (کیلو نیوتن بر مترمکعب)
---	---	۱۲	زاویه اتساع (درجه)
---	۰/۷	---	R_{int} ضریب کاهش تماسی
---	۱۴	---	EI (کیلو نیوتن متر مربع بر متر)
---	۴۲۰۰۰۰	۳۰۸	EA (کیلو نیوتن بر متر)

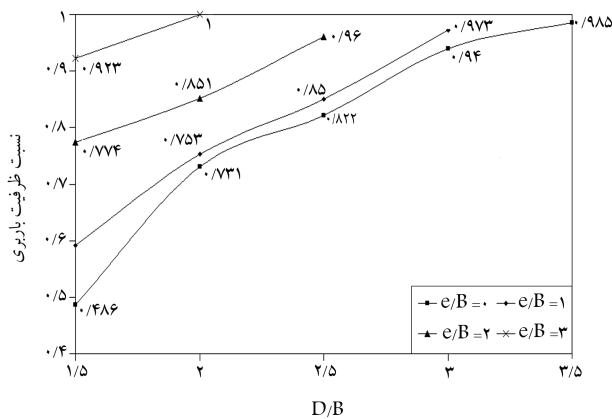
پارامترهای مناسب برای مدل، با دقت خوبی رفتار واقعی پی واقع بر خاک با حفره را شبیه‌سازی کرده است. جدول ۱ پارامترهای تطبیقی مدل را نشان می‌دهد. این تذکر لازم است که چگالی نسبی خاک در آزمایش‌های مورد نظر برای تحلیل عددی ۷۲٪ است.

مقایسه‌ی پیش‌بینی‌های مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی

برای بررسی دقت و صحت مدل عددی در مواردی به غیر از حالت انطباق داده شده در شکل ۶، نتایج تحلیل عددی به صورت منحنی تنش-نشست پی برای حالات مختلف از عمق مدفون حفره و خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره در شکل‌های (الف تا (د) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است بیشینه‌ی خطا برای تمامی حالات از ۱۰٪ تجاوز نمی‌کند. این امر نشان‌دهنده‌ی انطباق مناسب تحلیل عددی با نتایج تجربی است و نتایج تحلیل با دقت مناسبی در بررسی رفتار پی واقع بر حفره در حالاتی که نتایج آزمایشگاهی وجود ندارد، می‌تواند استفاده شود.

نتایج تحلیل عددی

مکانیزم گسیختگی خاک زیر پی در صورت نبودن حفره تابعی از نوع خاک و تراکم آن است، اما در صورت وجود حفره با ابعاد مشخص، این مکانیزم به عمق مدفون حفره و خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره نیز بستگی دارد. برای درک بهتر از



شکل ۹. تغییرات نسبت ظرفیت باربری با تغییرات نسبت D/B برای نسبت‌های مختلف e/B .

میزان تأثیر حفره، پارامتر بدون بُعد ظرفیت باربری BCR، مطابق رابطه ۱ بیان شد:

$$BCR = \frac{q_u(void)}{q_u(no void)} \quad (1)$$

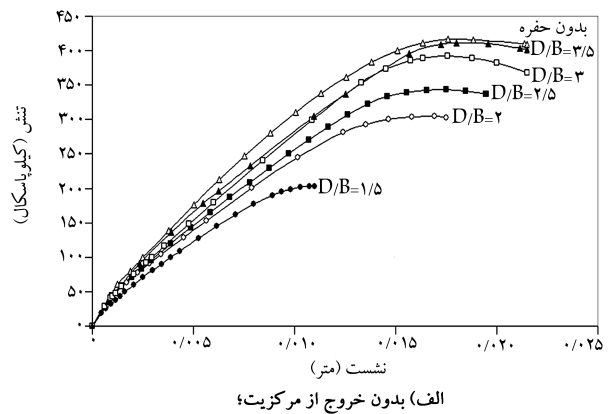
در رابطه ۱، $q_u(no void)$ و $q_u(void)$ به ترتیب ظرفیت باربری پی واقع بر خاک بدون حفره و خاک با حفره هستند.

تأثیر عمق مدفون

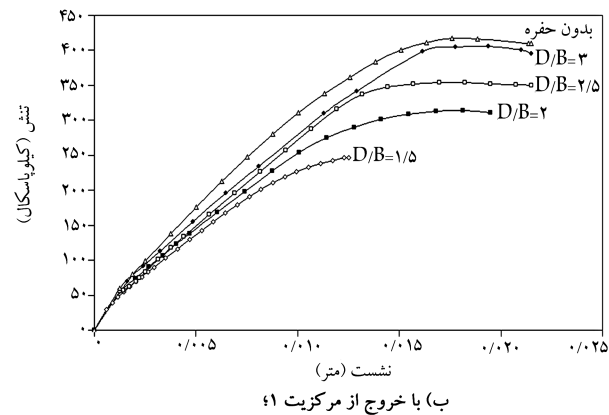
شکل‌های (الف تا د) منحنی‌های تنش-نشست پی واقع بر خاک حفره‌دار با عمق‌های مدفون مختلف ($D/B=1/5, 2, 2/5, 3, 3/5$) را برای خروج از مرکزیت‌های متفاوت نسبت به پی ($e/B=0, 1, 2, 3$) نشان می‌دهد. مطابق (شکل‌های الف تا د) مشاهده می‌شود که وجود حفره، ظرفیت باربری پی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و میزان آن بستگی به فاصله‌ی پی تا حفره دارد، به طوری که وقتی حفره به پی نزدیک است (D/B های کوچک)، بیشینه‌ی تنش قابل تحمل ضمن کاهش، در نشست کمتری نیز اتفاق می‌افتد. همچنین صرف نظر از میزان خروج از مرکزیت با افزایش عمق مدفون حفره ظرفیت باربری پی واقع بر حفره به سمت ظرفیت باربری پی واقع بر خاک بدون حفره میل می‌کند.

شکل ۹ تغییرات نسبت ظرفیت باربری BCR، در مقابل تغییرات نسبت D/B برای مقادیر مختلف e/B را نشان می‌دهد. مطابق شکل ملاحظه می‌شود، برای یک e/B مشخص، ظرفیت باربری با افزایش عمق مدفون حفره افزایش می‌یابد تا با رسیدن عمق مدفون به حدی معین (حدی که بعد از آن حفره از حباب تنش زیر پی خارج می‌شود)، حفره بر ظرفیت باربری پی تأثیر نمی‌گذارد، این امر از یک طرف به علت بسیج بیشتر مقاومت برشی به دلیل افزایش ضخامت لایه‌ی خاک زیر پی و از طرف دیگر به علت عملکرد قوسی^۵ مناسب‌تر خاک اطراف حفره با افزایش عمق مدفون و انتقال تنش به کناره‌هاست. این مقدار از D/B ، به عمق مدفون بحرانی $(D/B)_{cr}$ موسوم است و با افزایش e/B مقدار آن کاهش می‌یابد.

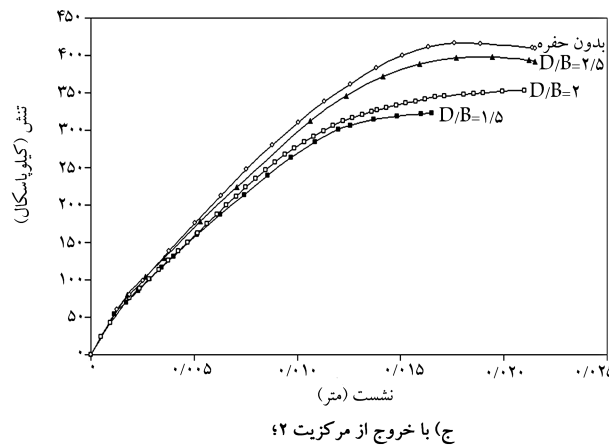
از طرفی ملاحظه می‌شود، روند افزایش BCR، برای مقادیر بالای e/B کندتر است، زیرا در این حالات با توجه به زیادبودن فاصله‌ی افقی پی تا حفره (زیاد بودن e/B)، تأثیر حفره قابل بر ظرفیت باربری کاهش یافته و رفتار پی به سمت رفتار پی واقع بر خاک بدون حفره میل می‌کند. بدیهی است مقدار $(D/B)_{cr}$ مقدار ثابتی نیست و بستگی به خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره دارد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت برای خروج از مرکزیت مشخص در صورتی که عمق مدفون حفره D/B



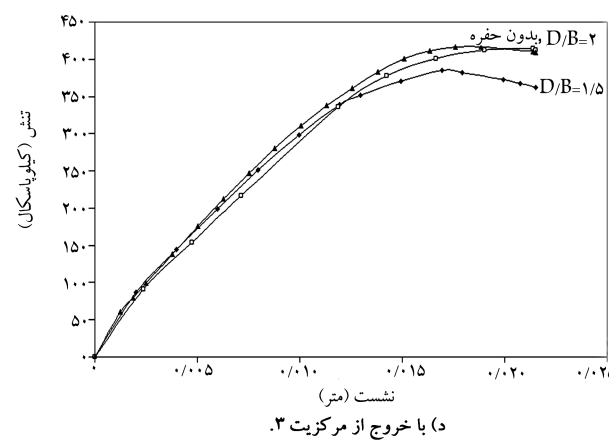
الف) بدون خروج از مرکزیت؛



ب) با خروج از مرکزیت ۱؛

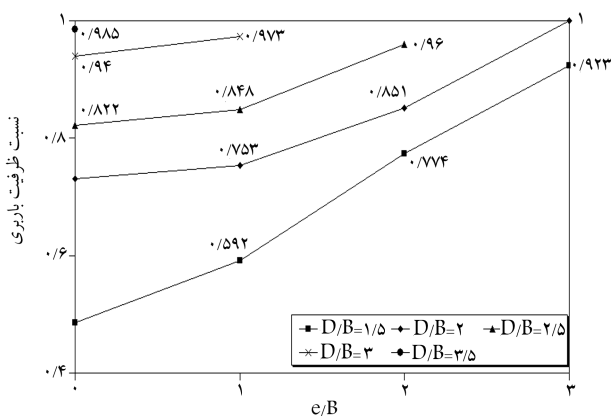


ج) با خروج از مرکزیت ۲؛



د) با خروج از مرکزیت ۳.

شکل ۸. تأثیر تغییر عمق مدفون حفره بر ظرفیت باربری پی.



شکل ۱۱. تغییرات نسبت ظرفیت باربری با تغییرات نسبت e/B برای نسبت‌های مختلف D/B .

بیش از مقدار عمق مدفون بحرانی $(D/B)_{cr}$ باشد، می‌توان از اثر حفه بر ظرفیت باربری پی صرف نظر کرد.

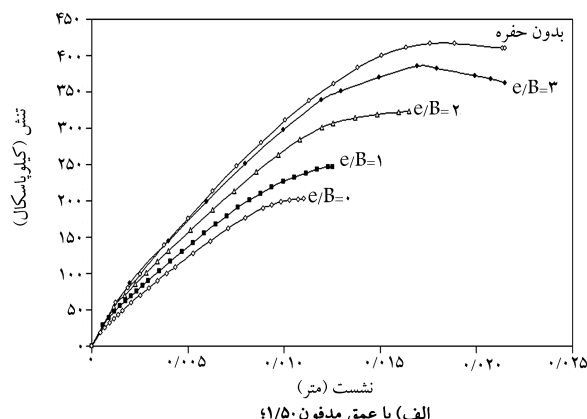
تأثیر خروج از مرکزیت حفه

شکل‌های ۱۰ الف تا ۱۰ د نشان‌دهنده تغییرات ظرفیت باربری پی واقع بر حفه با خروج از مرکزیت‌های مختلف نسبت به پی ($e/B=0, 1, 2, 3$) و عمق‌های مدفون مختلف ($D/B=1.5, 2, 2.5, 3$) هستند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برای یک D/B ثابت، با افزایش خروج از مرکزیت حفه نسبت به پی، مقدار ظرفیت باربری افزایش می‌یابد و به سمت مقدار ظرفیت باربری در حالت بدون حفه میل می‌کند. علت آن است که با افزایش خروج از مرکزیت حفه نسبت به پی، حفه از حوزه تأثیر پی دور شده است و سطوح گسیختگی خاک زیر پی به حفه نمی‌رسند.

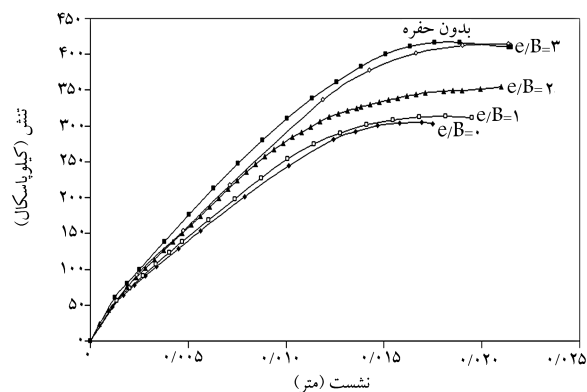
شکل ۱۱ نشان‌دهنده تغییرات نسبت ظرفیت باربری BCR برای پی واقع بر حفه با نسبت D/B ثابت و e/B ‌های مختلف در خاک است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تأثیر خروج از مرکزیت در روند افزایش BCR، وقتی که حفه به کف پی نزدیک‌تر است (عمق مدفون کمتر)، قابل ملاحظه‌تر است. به عبارت دیگر تأثیر خروج از مرکزیت، برای عمق‌های مدفون کم (D/B ‌های کوچک)، بیشتر از عمق‌های مدفون زیاد است. همچنین برای یک D/B ثابت، با افزایش خروج از مرکزیت حفه نسبت به پی، میزان BCR نیز افزایش می‌یابد، تا در نهایت با رسیدن نسبت $(e/B)_{cr}$ به مقدار $(e/B)_{cr}$ مقدار BCR برابر یک می‌شود. بدیهی است مقدار $(e/B)_{cr}$ مقدار ثابتی نیست و بستگی به عمق مدفون حفه دارد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت برای عمق مدفون مشخص در صورتی که فاصله مرکز پی تا مرکز حفه e/B ، بیش از مقدار $(e/B)_{cr}$ باشد، می‌توان از اثر حفه در ظرفیت باربری پی صرف نظر کرد.

نتیجه‌گیری

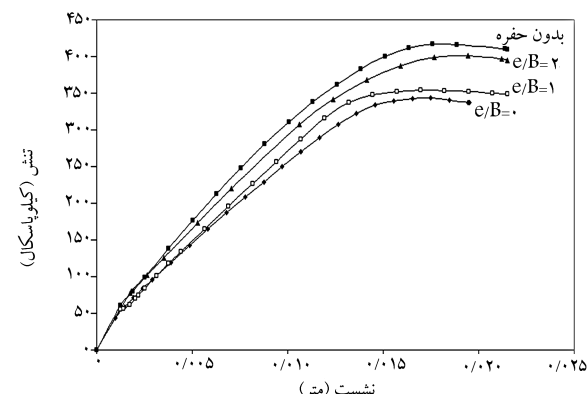
با استفاده از تحلیل عددی، بررسی تأثیر حفه‌های زیرزمینی در ظرفیت باربری پی‌های سطحی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. براساس نتایج حاصل، یک ناحیه بحرانی زیر پی وجود دارد که در صورت قرارگیری حفه داخل این ناحیه، پایداری پی به میزان قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. میزان این تأثیر (کاهش در ظرفیت باربری) به موقعیت قرارگیری حفه در ناحیه بحرانی بستگی دارد. بدیهی است اندازه‌ی



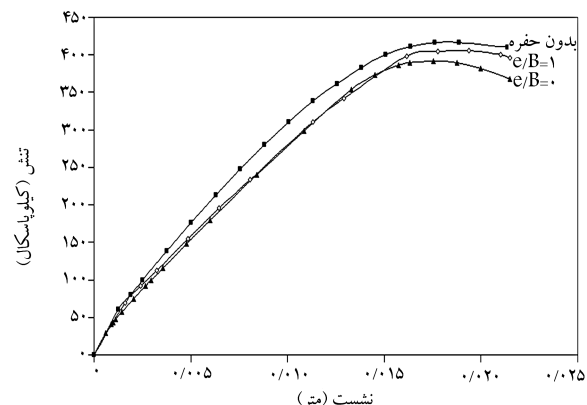
الف) با عمق مدفون ۱/۵



ب) با عمق مدفون ۲



ج) با عمق مدفون ۲/۵



د) با عمق مدفون ۳

شکل ۱۰. تغییرات نسبت ظرفیت باربری پی.

داخل منطقه‌ی مؤثر، باید میزان اثر آن را در ظرفیت باربری پی در نظر گرفت. اما به‌عنوان یک توصیه‌ی کلی برای مؤثرنبودن حفره در ظرفیت باربری می‌توان مقادیر D/B یا e/B را دست‌کم برابر ۳ و یا ترکیب دیگری از این پارامترها را با توجه به نمودارهای مربوط در نظر گرفت. شایان ذکر است که نتایج حاصل برای پی و حفره با ابعاد مشخص و یکسان است و انجام آزمایش‌های بیشتر همراه با تحلیل‌های عددی می‌تواند نتایج گسترده‌تری را ارائه دهد.

این ناحیه‌ی بحرانی به عواملی نظیر تراکم خاک، نوع خاک، قطر حفره و عرض پی وابسته خواهد بود. محدوده‌ی این ناحیه‌ی بحرانی با دو پارامتر بدون بُعد عمق مدفون بحرانی $(D/B)_{cr}$ و خروج از مرکزیت بحرانی $(e/B)_{cr}$ بیان می‌شود. میزان خروج از مرکزیت بحرانی به عمق مدفون حفره و همچنین میزان عمق مدفون بحرانی به خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره بستگی دارد که مقدار آن‌ها از روی نمودارهای موردنظر، قابل استخراج است. به هر حال، در صورت قرارگرفتن حفره در

پانویس

1. plexy glass
2. interface element
3. fine
4. plain strain
5. arching

منابع

1. Baus, R.L., and Wang, M.C., "Bearing capacity of strip footings above void", *Journal of Geotechnical eng*, **109**(1), pp. 1-14 (1983).
2. Badie, A., and Wang, M.C., "Stability of spread footings above void in clay", *Journal of Geotechnical eng.*, **110**(11), pp. 1591-1604 (1984).
3. Wang, M.C., and Hsieh, C.W., "Collapse load of strip footing above circular void", *Journal of Geotechnical eng*, **113**(5), pp. 511-515 (1987).
4. Wang, M.C.; Yoo, C.S., and Hsieh, C.W., "Effect of void on footing behavior under eccentric and inclined loads", *Foundation Engineering journal, ASCE*, pp. 1226-1239 (1991).
5. Das, B.M., and Khing, K.H., "Foundation on layered soil with geogrid reinforcement effect of a void", *Geotextiles and Geomembranes*, **13**, pp. 545-553 (1994).
6. Moghaddas Tafreshi, S.N., and Heydari, B., "Experimental study on effect of void on bearing capacity of shallow foundation above sand", *International Journal of Science & Technology, AMIRKABIR, Iran*, **17**(65-C2), Winter (2007).
7. Brinkgreve, R.; Vermeer, P. PLAXIS, "Finite element code for soil and rock analysis", *Version 8 Plaxis B. V., the Netherlands* (2002).

