مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲ - ۲۶، شماره‌ی ۱، ص. ۲۹-۳۵

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

**سیدناصر مقدس‌تفرشی (دانشیار)**
**دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی**
**امین شریف‌پور (کارشناس ارشد)**
**علی قنبری (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 درکنار نتایج تجربی حاصل از یک مدل فیزیکی می‌تواند خلاء اطلاعات را به‌خوبی پوشش دهد و شناسایی کامل‌تری را مقدور سازد. از آنجا که روش اجزاء محدود با موفقیت نسبتاً قابل‌قبولی برای مطالعه‌ی بسیاری از مسائل ژئومکانیک به‌کار رفته است، از این‌رو برای تجزیه و تحلیل عددی باربری پی نواری واقع بر یک حفره‌ی طویل از برنامه‌ی اجزاء محدود در حالت دوبُعدی 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 دوبُعدی که با استفاده از نرم‌افزار Plaxis انجام شده‌است 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 قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و باید این اثر در ظرفیت باربری پی درنظر گرفته شود.

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

nas_moghaddas@kntu.ac.ir
a_sharifpour@tmu.ac.i
ghanbari@tmu.ac.ir

## 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 درنظرگرفته 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 قابل‌قبول، 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 پیشنهادهای 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 بیشینه‌ی متحمل پی علاوه‌برکاهش، در نشستِ کمتری اتفاق می‌افتد. برخی دیگر نیز یک برنامه کامپیوتری با استفاده از روش اجزاء محدود به‌صورت سه‌بُعدی تهیه کردند و با آن ضمن بررسی رفتار پی‌های منفرد مربع واقع بر خاک‌رس 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

*تاریخ: دریافت ۱۳۸۶/۵/۹، داوری ۱۳۸۷/۲/۱۰، پذیرش ۱۳۸۷/۳/۸.*

Archive of SID
www.SID.ir

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

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 بار کاهش 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 برحسب عمق مدفون حفره و خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره وجود داردکه 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 ۲۲۰ mm × ۱۰۰۰ × ۱۰۰۰ ساخته و صلبیت وجه پشتی تانک با استفاده از ورق فولادی به ضخامت ۲۰ mm تأمین شد. برای مشاهده و کنترل آزمایش و همچنین آماده‌سازی نمونه، وجه جلویی تانک از جنس پلاستیک شفاف[۱] به ضخامت ۲۰ 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.

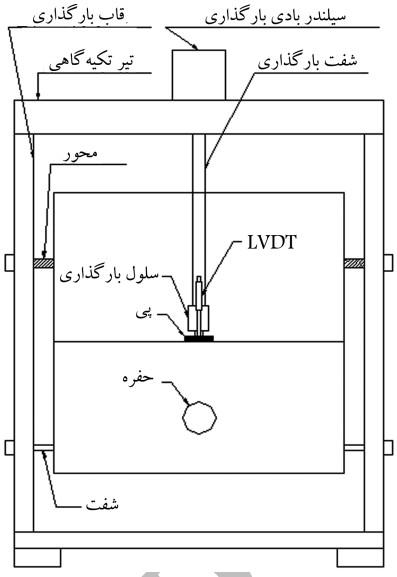
قاب اصلی از دو ستون با مقطع قوطی به ارتفاع ۱۶۰۰ mm و یک تیر صلب در بالا به طول ۱۲۷۰ mm تشکیل شده است. ستون‌های قائم بر روی دو تیر افقی مستقر بر زمین از همان مقطع به طول ۱۳۰۰ mm قرارگرفتند تا پایداری سیستم تأمین شود. تیر افقی بالایی، تکیه‌گاه سیلندرهای بارگذاری محسوب می‌شود و دو سیلندر بارگذاری با قطرهای مؤثر ۸۰ و ۱۶۰ میلی‌متر که با یک سیستم ساده (ماریپچ و فلکه) قابلیت جابجایی در طول تیر را دارند، برای بارگذاری در محدوده‌های مختلف بار بر روی تیر افقی قرار گرفته‌اند.

آماده‌سازی ترانشه‌ی خاکی دربرگیرنده‌ی حفره، با تراکم یکنواخت و مشخص و قابلیت تکرار در تانک آزمایش با روش بارش انجام می‌شود. مخزن بارش به ابعاد مقطع ۳۰۰ × ۳۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴۵۰ میلی‌متر است که در قسمت پایینی آن قیفی به‌صورت مایل با ابعاد انتهایی ۱۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر تعبیه شده است تا امکان پرکردن قسمت‌های میانی تانک آزمایش در هنگام بارش ماسه فراهم شود. در قسمت انتهایی قیف مذکور دریچه‌یی کشویی به ابعاد ۱۰۰ × ۱۰۰ 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 ۱۰۰ میلی‌متر استفاده می‌شود (با توجه به جنس و ضخامت کم این لوله‌ها که حدود ۰٫۱ میلی‌متر است، می‌توان از سختی خمشی و محوری آنها صرف‌نظر کرد و وضعیت حاصل را مانند حفره درنظر 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 تماس‌نداشتن 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. درنهایت تانک آزمایش به‌آرامی دوران داده می‌شود و به حالت قائم در می‌آید. سپس با قراردادن مدل پی (صفحه فولادی) به عرض ۱۰۰ میلی‌متر، طول ۲۱۰ میلی‌متر (در امتداد محور حفره) و ضخامت ۲۰ میلی‌متر در محل موردنظر، سیستم آماده‌ی بارگذاری می‌شود. شکل ۲ شمای کلی دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد.

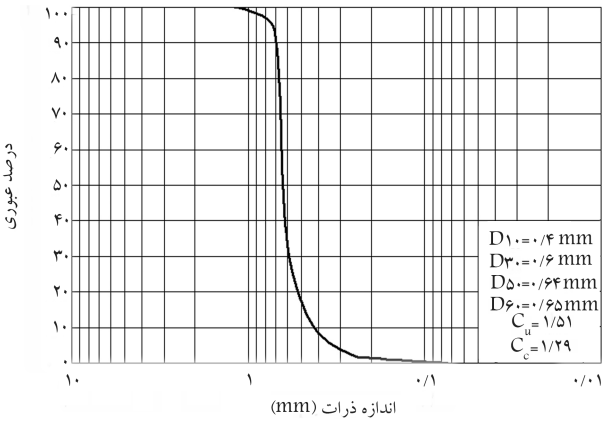


Archive of SID

www.SID.ir




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 $C_c = ۱/۲۹$ و $C_u = ۱/۵۱$، توده‌ی ویژه $G_s = ۲/۶۷$ و تخلخل بیشینه و کمینه‌ی به‌دست 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.

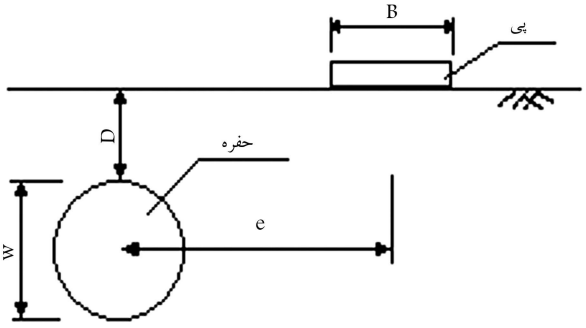
# تجزیه و تحلیل اجزاء محدود

## شبکه‌ی اجزاء محدود و شرایط مرزی

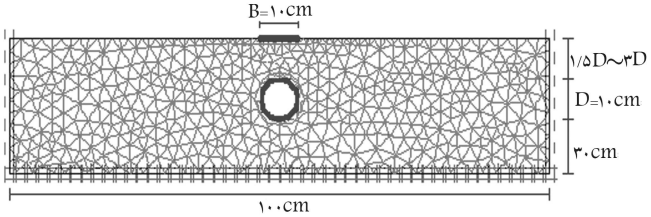
برای تحلیل عددی ظرفیت باربری پی واقع بر حفره، یک شبکه‌ی اجزاء محدود دوبُعدی در حالت کرنش مسطح به طول ۱۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع متغیر (با توجه به عمق مدفون حفره) شامل خاک و حفره با استفاده از برنامه‌ی Plaxis ۸ و با مدل موهر-کولمب برای خاک انجام شده‌است.[۷] پی و حفره به‌صورت کشسانی و به‌صورت المان تیر با صلبیت خمشی EI و سختی محوری EA مدل شده است. همچنین اندرکنش بین پی و خاک و همچنین حفره و خاک با درنظرگرفتن 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 هرگره، دو درجه‌ی آزادی انتقالی بوده و از درجات آزادی چرخشی صرف‌نظر شده است. این تذکر لازم است که استفاده از تحلیل کرنش مسطح[۴] با توجه به سطوح صلب و صاف در وجوه جلو و پشت مدل فیزیکی برای حرکت‌نکردن در امتداد طولی پی و حفره، به‌طوری که آثار انتهایی دخالتی بر رفتار آزمایش در مقطع میانی نداشته باشند، توجیه‌پذیر است. برای شبیه‌سازی سطح تماس خاک با حفره، از المان‌های مناسبی در محل تماس آن دو با تعریف پارامترهای اضافی برای توصیف لغزش و جداشدگی بین خاک وحفره استفاده شد. در مدل عددی حرکت مرزهای کناری درجهت 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. به‌دلیل انتخاب ابعاد مناسب تانک (۳ تا ۴ برابر قطر لوله از مرکز تانک تا جداره‌ها) مرزهای صلب هیچ‌گونه اثری در پاسخ سیستم ندارند، از این‌رو شبیه‌سازی مرزها به‌صورت صلب اشکالی ایجاد نمی‌کند و از گره‌های مرزی به بعد، تغییراتی در اثر بارهای اعمال‌شده 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 2D و بدون خروج از مرکزیت نسبت به پی را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود منحنی حاصل از تحلیل عددی با انتخاب



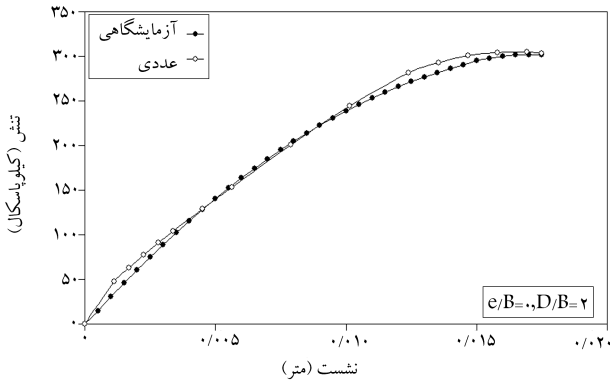

شکل ۴. طرح کلی آزمایش‌های انجام شده (W/B=۱) برای تمامی آزمایش‌ها).




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



www.SID.ir




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

**جدول ۱. پارامترهای تطبیق داده شده‌ی مدل.**

| پارامتر مورد استفاده در تحلیل عددی | خاک | حفره | پی |
|---|---|---|---|
| زاویه‌ی اصطکاک داخلی (درجه) | ۴۲ | —— | —— |
| چسبندگی (کیلو پاسگال) | ۷٫۶ | —— | —— |
| مدول کشسانی (کیلو پاسگال) | ۳۵۰۰۰ | —— | —— |
| ضریب پواسن | ۰٫۳ | —— | —— |
| وزن مخصوص خاک (کیلو نیوتن بر مترمکعب) | ۱۷ | —— | —— |
| زاویه‌ی اتساع (درجه) | ۱۲ | —— | —— |
| $R_{int.}$ ضریب کاهش تماسی | —— | ۰٫۷ | ۰٫۷ |
| EI (کیلو نیوتن متر مربع بر متر) | —— | ۰٫۳۷ | ۱۴ |
| EA (کیلو نیوتن بر متر) | —— | ۳۰۸ | ۴۲۰۰۰۰ |

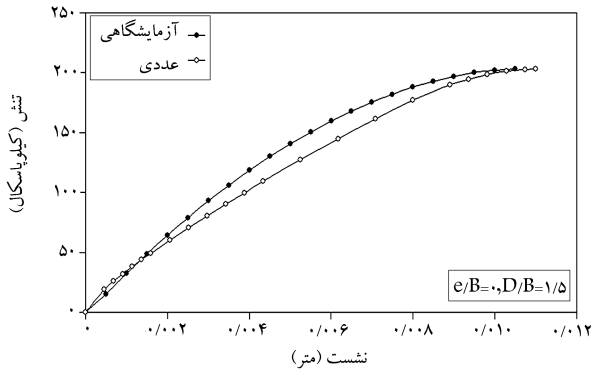
پارامترهای مناسب برای مدل، با دقت خوبی رفتار واقعی پی واقع بر خاک با حفره را شبیه‌سازی کرده است. جدول ۱ پارامترهای تطبیقی مدل را نشان می‌دهد. این تذکر لازم است که چگالی نسبی خاک در آزمایش‌های مورد نظر برای تحلیل عددی ۷۲٪ است.

## مقایسه‌ی پیش‌بینی‌های مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی

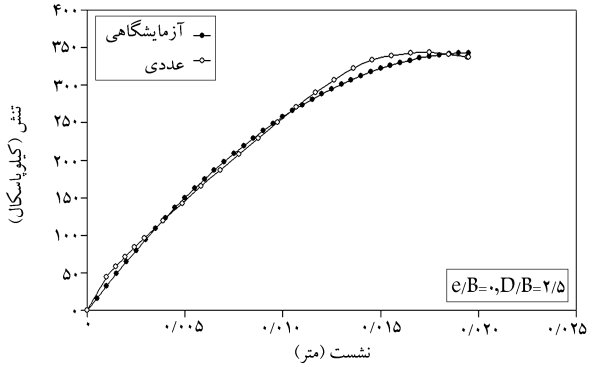
برای بررسی دقت و صحت مدل عددی در مواردی به غیر از حالت انطباق داده شده در شکل ۶، نتایج تحلیل عددی به‌صورت منحنی تنش-نشست پی برای حالات مختلف از عمق مدفون حفره و خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره در شکل‌های (۷الف) تا (۷د) نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشخص است بیشینه‌ی خطا برای تمامی حالات از ۱۰٪ تجاوز 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

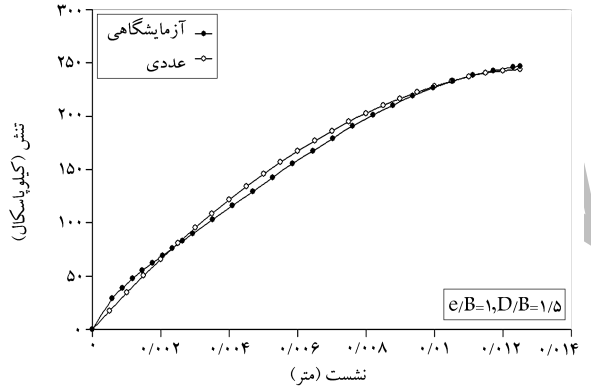
مکانیزم گسیختگی خاک زیر پی در صورت‌نبودن حفره تابعی از نوع خاک و تراکم آن است، اما در صورت وجود حفره با ابعاد مشخص، این مکانیزم به عمق مدفون حفره و خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره نیز بستگی دارد. برای درک بهتر از



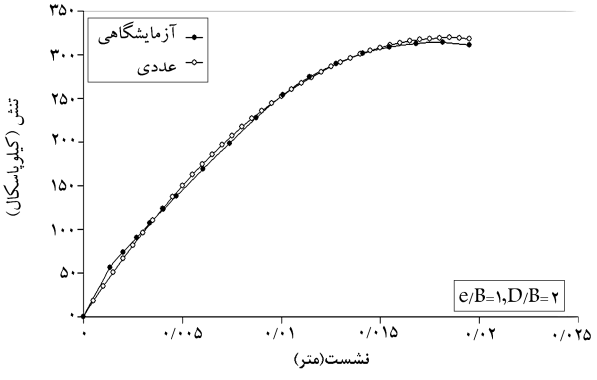

**الف) بدون خروج از مرکزیت و با عمق مدفون ۱/۵؛**




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




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

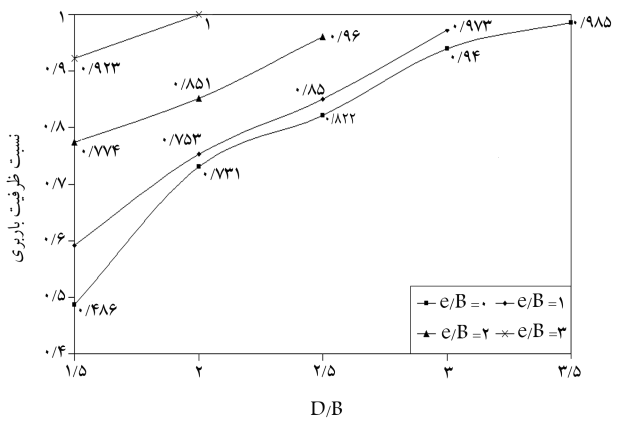



**د) با خروج از مرکزیت ۱ و عمق مدفون ۲.**

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



www.SID.ir




**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 رابطه‌ی ۱ بیان شد:

$$\mathrm{BCR} = \frac{q_{u\,(void)}}{q_{u\,(no\,void)}} \qquad (۱)$$

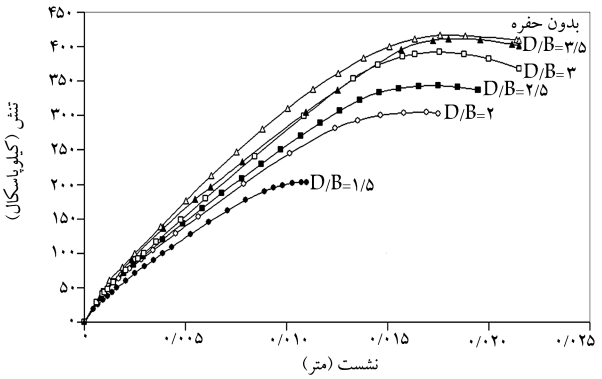
در رابطه‌ی ۱، $q_{u(void)}$ و $q_{u(no\,void)}$ به ترتیب ظرفیت باربری پی واقع بر خاک بدون حفره و خاک با حفره هستند.

## تأثیر عمق مدفون

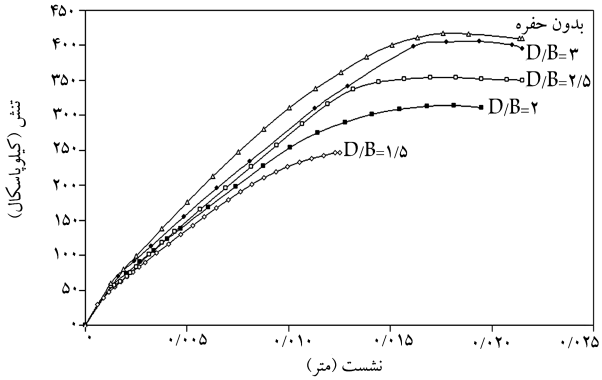
شکل‌های (۸الف تا ۸د) منحنی‌های تنش-نشست پی واقع بر خاک حفره‌دار با عمق‌های مدفون مختلف (D/B=۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵) را برای خروج از مرکزیت‌های متفاوت نسبت به پی (e/B=۰، ۱، ۲، ۳) نشان می‌دهد. مطابق (شکل‌های ۸الف تا ۸د) مشاهده می‌شود که وجود حفره، ظرفیت باربری پی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و میزان آن بستگی به فاصله‌ی پی تا حفره دارد، به‌طوری‌که وقتی حفره به پی نزدیک است (D/Bهای کوچک)، بیشینه‌ی تنش قابل‌تحمل ضمن کاهش، در نشست کمتری نیز اتفاق می‌افتد. همچنین صرف‌نظر 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[5] 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.

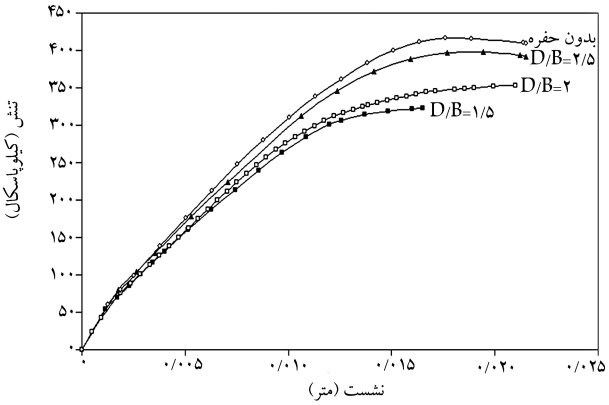
از طرفی ملاحظه می‌شود، روند افزایش BCR، برای مقادیر بالای e/B کندتر است، زیرا در این حالات با توجه به زیادبودن فاصله‌ی افقی پی تا حفره (زیاد بودن e/B)، تأثیر حفره قابل بر ظرفیت باربری کاهش یافته و رفتار پی به سمت رفتار پی واقع بر خاک بدون حفره میل می‌کند. بدیهی است مقدار $(D/B)_{cr}$ مقدار ثابتی نیست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



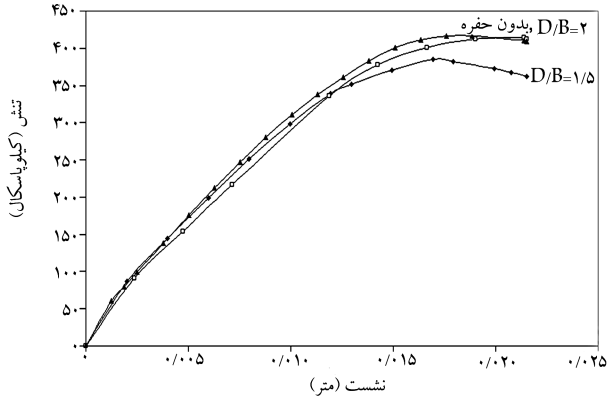

الف) بدون خروج از مرکزیت؛




ب) با خروج از مرکزیت ۱؛




ج) با خروج از مرکزیت ۲؛

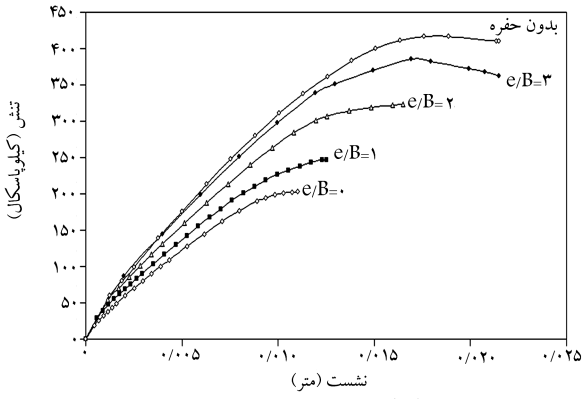



د) با خروج از مرکزیت ۳.

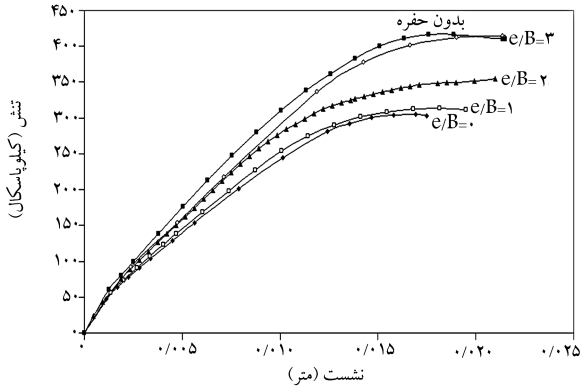
**شکل ۸. تأثیر تغییر عمق مدفون حفره بر ظرفیت باربری پی.**



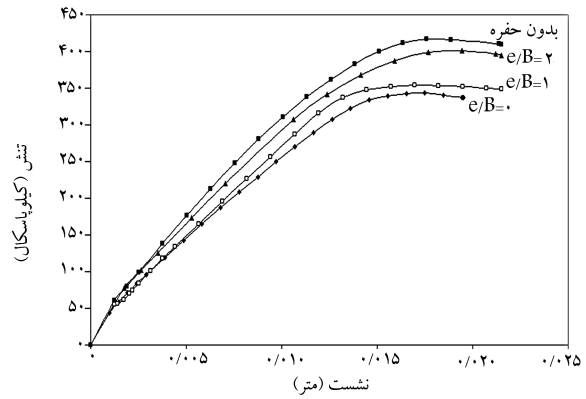
Archive
www.SID.ir



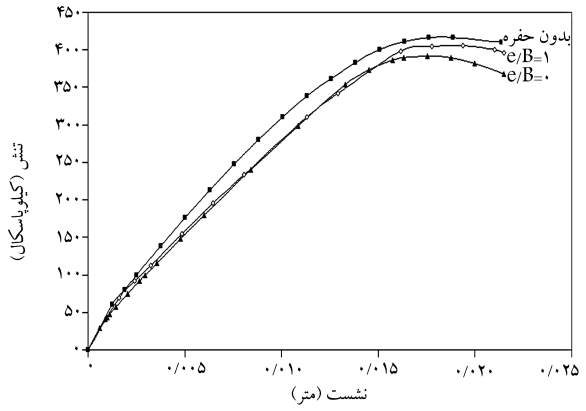

الف) با عمق مدفون ۱/۵۰؛




ب) با عمق مدفون ۲؛

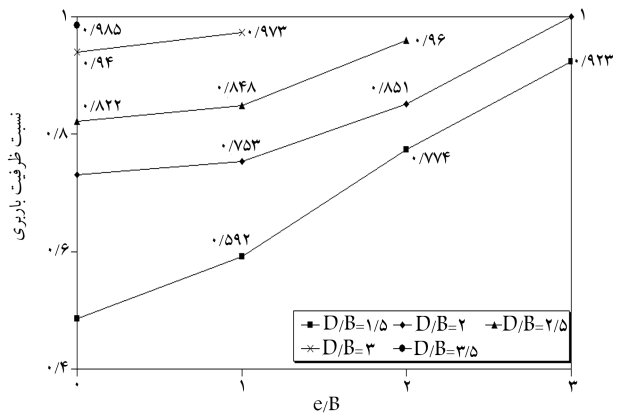



ج) با عمق مدفون ۲/۵؛




د) با عمق مدفون ۳.

شکل ۱۰. تغییرات نسبت 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 حفره بر ظرفیت باربری پی صرف‌نظر کرد.

### تأثیر خروج از مرکزیت حفره

شکل‌های ۱۰الف تا ۱۰د نشان‌دهنده‌ی تغییرات ظرفیت باربری پی واقع بر حفره با خروج از مرکزیت‌های مختلف نسبت به پی (۳، ۲، ۱، ۰=e/B) و عمق‌های مدفون مختلف (۳، ۲/۵، ۲، ۱/۵=D/B) هستند. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، برای یک D/B ثابت، با افزایش خروج از مرکزیت حفره نسبت به پی، مقدار ظرفیت باربری افزایش می‌یابد و به سمت مقدار ظرفیت باربری در حالت بدون حفره میل می‌کند. علت آن است که با افزایش خروج از مرکزیت حفره نسبت به پی، حفره از حوزه‌ی تأثیر پی دور شده است و سطوح گسیختگی خاک زیر پی به حفره نمی‌رسند.

شکل ۱۱ نشان‌دهنده‌ی تغییرات نسبت ظرفیت باربری BCR برای پی واقع بر حفره با نسبت D/B ثابت و e/Bهای مختلف در خاک است. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، تأثیر خروج از مرکزیت در روند افزایش BCR، وقتی که حفره به کف پی نزدیک‌تر است (عمق مدفون کمتر)، قابل‌ملاحظه‌تر است. به عبارت دیگر تأثیر خروج از مرکزیت، برای عمق‌های مدفون کم (D/Bهای کوچک)، بیشتر از عمق‌های مدفون زیاد است. همچنین برای یک D/B ثابت، با افزایش خروج از مرکزیت حفره نسبت به پی، میزان BCR نیز افزایش می‌یابد، تا در نهایت با رسیدن نسبت (e/B) به مقدار $(e/B)_{cr}$، مقدار BCR برابر یک می‌شود. بدیهی‌است مقدار $(e/B)_{cr}$ مقدار ثابتی نیست و بستگی به عمق مدفون حفره دارد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت برای عمق‌مدفون مشخص درصورتی‌که فاصله‌ی مرکز پی تا مرکز حفره e/B، بیش از مقدار $(e/B)_{cr}$ باشد، می‌توان از اثر حفره در ظرفیت باربری پی صرف‌نظر کرد.

## نتیجه‌گیری

با استفاده از تحلیل عددی، بررسی تأثیر حفره‌ی 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 ناحیه‌ی بحرانی زیر پی وجود دارد که در صورت قرارگیری حفره داخل این ناحیه، پایداری پی به میزان قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. میزان این تأثیر (کاهش در ظرفیت باربری) به موقعیت قرارگیری حفره در ناحیه‌ی بحرانی بستگی دارد. بدیهی است اندازه‌ی

Archive



www.SID.ir

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، قابل‌استخراج است. به هر حال، در صورت قرارگرفتن حفره در داخل منطقه‌ی مؤثر، باید میزان اثر آن را در ظرفیت باربری پی در نظرگرفت. 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 نظرگرفت. 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.

Archive of SID

## پانوشت

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).




www.SID.ir