

بررسی آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی ظرفیت باربری پی های حلقوی و دایره‌یی قرارگرفته بر روی ماسه‌ی مسلح

عرفان نادری (ره‌یی)

گروه عمران، واحد نورآباد ممسنی، دانشگاه آزاد اسلامی، نورآباد ممسنی

نادر هاتف* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه شراز

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۶ (۱۳۹۶)
دوره ۲، شماره ۱، ص ۶۳-۷۱

پی حلقوی برای برج‌های مخابراتی، مخازن نفتی، منابع آب هوایی، و به‌طورکلی برای بیشتر سازه‌های با تقارن محوری نسبت به محور مرکزی قائم بر پی، یک پی مناسب و اقتصادی است، و در صورت توجه به استفاده‌ی عملی از آن نسبت به پی دایره‌یی بسیار مقرون به صرفه است. در این پژوهش، به مطالعه‌ی عددی و آزمایشگاهی پی‌های دایره‌یی و حلقوی قرارگرفته روی بستر ماسه‌یی غیرمسلح و همچنین بستر ماسه‌ی مسلح شده با یک لایه‌ی ژئوگرید پرداخته شده است. مطالعه‌ی آزمایشگاهی با استفاده از مدل‌های با ابعاد کوچک انجام شده است. همچنین مدل‌سازی عددی با به‌کارگیری پارامترهای حاصل از آزمایش‌ها و با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS ۳D Foundation انجام شده است. نهایتاً آنالیز تحلیلی انجام و نتایج آن با نتایج عددی و آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج حاکی از تأثیر چشم‌گیر ژئوگرید در افزایش ظرفیت باربری پی‌ها و کاهش نشست آن‌ها بوده است. همچنین مشاهده شده است که ظرفیت باربری پی حلقوی بالاتر از پی دایره‌یی با ابعاد مشابه است.

واژگان کلیدی: پی دایره‌یی، پی حلقوی، ظرفیت باربری، ماسه‌ی مسلح.

۱. مقدمه

فصل مشترک بین زمین و سازه، پی نامیده می‌شود. وظیفه‌ی پی انتقال بار از سازه به زمین قرارگرفته در زیر آن است. ظرفیت باربری خاک در طراحی پی، نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. در نظر گرفتن ظرفیت باربری به میزان بیشتر از مقدار واقعی می‌تواند منجر به وارد آمدن خسارت‌های سنگین به سازه‌ها یا حتی زوال کلی آن‌ها شود. از طرف دیگر، در نظر گرفتن آن به میزان کمتر از مقدار واقعی، باعث بزرگ شدن بیش از حد ابعاد پی می‌شود و پی را غیراقتصادی می‌سازد. به صورت خیلی ساده، ظرفیت باربری نهایی بیشینه‌ی فشار قابل تحمل توسط خاک است، که می‌تواند از طرف سازه به خاک وارد شود. بسته به شکل پی، نحوه‌ی توزیع فشار و گسیختگی خاک تغییر خواهد کرد؛ در حقیقت مسئله‌ی ظرفیت باربری برای هر پی از لحاظ شکل، اصطکاک با خاک، عمق، و سایر پارامترهای اطراف پی باید به طور جداگانه بررسی شود. تاکنون افراد مختلفی، رابطه‌ی ظرفیت باربری نهایی خاک برای پی‌های نوری، مستطیلی، و دایره‌یی ارائه کرده‌اند، که در همه‌ی آن‌ها اهمیت شکل پی کاملاً مشهود است. به عبارتی دیگر، شکل نواحی گسیختگی زیر پی با شکل پی ارتباط

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱۲/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۴/۳/۲۵، پذیرش ۱۳۹۴/۵/۱۰.

کیفیت خواص گوناگون خاک دارند. پس از شروع کارهای خاکی مسلح در سال ۱۹۶۶،^[۱] مسئله‌ی تسلیح خاک به

طور عملی تر دنبال شده و جای خود را در رشته‌ی خاک به عنوان یکی از روش‌های اصلاح خاک باز کرده است. یکی از شاخه‌های علم تسلیح خاک، استفاده از مسلح‌کننده‌ها برای افزایش ظرفیت باربری پی‌های سطحی است. این مقوله، که یکی از جدیدترین موضوعات استفاده از مسلح‌کننده‌ها جهت اصلاح خاک است، نخستین بار در سال ۱۹۷۵ مطرح شده است.^[۳]

۲. ظرفیت باربری پی‌های سطحی روی خاک مسلح

برای اولین بار در سال ۱۹۷۵، بررسی ظرفیت باربری پی نواری روی خاک ماسه‌یی مسلح به طور سامان‌مند شروع و نشان داده شده است که ظرفیت باربری پی نواری روی خاک مسلح در یک عمق خاص قرارگیری مسلح‌کننده، به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد.^[۴]

سپس به‌طور هم‌زمان با تهیه‌ی انواع مسلح‌کننده‌های پلیمری، پژوهش‌های مفصل‌تری در این زمینه و برای پی‌های مختلف بر روی خاک‌های متفاوت انجام شده است.^[۵-۸]

در سال ۱۹۸۱، مطالعات آزمایشگاهی بر روی پی‌های مربعی روی خاک مسلح انجام و از نوارهای بافته‌شده به‌عنوان مسلح‌کننده استفاده شده است.^[۹] سپس در سال ۱۹۸۵، مطالعاتی با آزمایش‌هایی برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های مربعی واقع بر ماسه‌ی سست با تراکم نسبی حدود ۰/۵۰٪، که توسط لایه‌های ژئوتکستایل بافته‌شده مسلح شده بود، دنبال شده است.^[۱۰] در ادامه و برای تکمیل کار و لزوم بررسی برای پی‌های مختلف، آزمایش‌هایی بر روی مدل مستطیلی واقع شده بر لایه‌های مسلح‌کننده (ژئوگرید) انجام و سپس نتایج با تحلیل اجزاء محدود مقایسه شده است.^[۱۱] در تمام آزمایش‌های قبلی لزوم بررسی پی‌های با ابعاد بزرگ‌تر برای اطمینان از نتایج به دست‌آمده و استفاده از آن نتایج در عمل مشهود بوده است، تا اینکه در مطالعاتی در سال ۱۹۹۷، از پی‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است.^[۱۲]

در همه‌ی مطالعات مذکور ثابت شده است که مسلح‌کننده‌های ژئوستتیک قرار داده‌شده زیر یک پی، می‌توانند هم ظرفیت باربری نهایی و هم تنش مجاز در یک نشست داده‌شده را افزایش دهند.

۳. رفتار پی‌های حلقوی و دایره‌یی روی ماسه

همان‌گونه که در مقدمه ذکر شده است، پی‌های حلقوی برای برج‌های مخابراتی، مخازن، برج‌های تلوویزیون و رآکتورهای اتمی کاربرد ویژه دارند، چرا که بار وارده از طرف سازه‌های مذکور، تقارن محوری نسبت به محور تقارن سازه دارند. بسته به مقدار نسبت قطر داخلی به خارجی، شکل پی حلقوی از حالت تیر دایره‌یی باریک (پی حلقوی با رفتار پی نواری) تا پی دایره‌یی تغییر می‌کند. مطالعات تئوری محدودی بر روی رفتار این پی‌ها و برای پیش‌بینی نشست آن‌ها در گذشته انجام شده است.

راه حلی نیز در سال ۱۹۵۷ برای تعیین نشست یک پی حلقوی روی یک محیط کشسان (به‌صورت نیم‌فضا) مبتنی بر اصل جمع آثار^۲ ارائه شده است.^[۱۳] همچنین در ادامه، در سال ۱۹۶۵ با استفاده از معادلات انتگرالی، نشست و فشار تماسی زیر پی صلب حلقوی محاسبه شده است.^[۱۴] در سال ۱۹۹۷، با انجام آزمایش‌هایی بر روی یک سیستم دولا به متشکل از یک لایه‌ی ماسه‌ی ساحلی، که بر روی یک لایه‌ی ماسه‌ی مترکم قرار گرفته بود، نتایجی جالب برای ظرفیت باربری پی حلقوی

به دست آمده است.^[۱۵] پی‌های آن‌ها از جنس نوعی چوب ساخته شده بود، که روی آن را با ورق فلزی پوشانده بودند. قطر داخلی پی‌ها بین صفر تا ۶/۴ سانتی‌متر و قطر خارجی آن‌ها نیز بین ۸ تا ۱۰/۲۵ سانتی‌متر تغییر می‌کرد. نسبت قطر داخلی به خارجی پی‌ها نیز از مقدار صفر تا مقدار $\frac{5}{8}$ متفاوت بود. آن‌ها تعدادی آزمایش بارگذاری بر روی پی‌های حلقوی با سطح مقطع یکسان، اما با قطرهای داخلی و خارجی مختلف انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که در نسبت قطر داخلی به

خارجی برابر $\frac{3}{8}$ ، ظرفیت باربری نهایی به بیشینه‌ی مقدار خود می‌رسد. پس از کار ایشان مطالعاتی در مورد ظرفیت باربری پی حلقوی دنبال شده است،^[۱۶] که در آن ابتدا در آزمایشگاه و با ساخت یک مخزن استوانه‌یی و همچنین تعدادی پی حلقوی و یک سیستم بارگذاری ساده، ظرفیت باربری پی حلقوی به دست آورده شده است، سپس با استفاده از برنامه‌ی اجزاء محدود NISA-II موضوع بررسی و در آخر نیز با یک سری ساده‌سازی در انتخاب پوش گسیختگی زیر پی حلقوی و از طریق روابط ریاضی، ظرفیت باربری پی حلقوی محاسبه شده است. از مهم‌ترین نتایج پژوهش مذکور، افزایش حدود ۰/۲۵٪ ظرفیت باربری پی حلقوی با نسبت قطر داخلی به خارجی بین ۰/۲ تا ۰/۴ نسبت به پی دایره‌یی با همان قطر خارجی بوده است. همچنین براساس مطالعات مذکور مشخص شده است که برای نسبت قطر داخلی به خارجی بزرگ‌تر از ۰/۷، پی حلقوی مشابه به یک پی نواری عمل خواهد کرد. و در نهایت اینکه با یک مقایسه‌ی اقتصادی بین پی حلقوی و دایره‌یی، حدود ۱۵٪ صرفه‌جویی در مصالح برای پی حلقوی نسبت به پی دایره‌یی با همان قطر خارجی برآورد شده است. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۳،^[۱۷] به بررسی ظرفیت باربری پی دایره‌یی و حلقوی روی ماسه‌ی مسلح با استفاده از آزمایش‌های مدل آزمایشگاهی، به همراه آنالیزهای عددی پرداخته شده و اثرات عمق لایه‌ی اول مسلح‌کننده، تعداد لایه‌ها، و فاصله‌ی عمودی بین لایه‌ها در ظرفیت باربری پی مورد مطالعه قرار گرفته است. در سال ۲۰۰۶، نیز به مطالعه‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی ظرفیت باربری پی‌های حلقوی پرداخته شده و نمودارها و جدولی برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری این قبیل پی‌ها ارائه شده است.^[۱۸] همچنین در سال ۲۰۰۷، با استفاده از برنامه‌ی تفاضل محدود FLAC، به بررسی ظرفیت باربری پی‌های حلقوی پرداخته شده است.^[۱۹] در ادامه، نیز در سال ۲۰۰۸ به بررسی ظرفیت باربری پی‌های حلقوی روی رس مسلح پرداخته شده است.^[۲۰] همچنین در سال ۲۰۱۰، با به‌کار بردن برنامه‌ی PLAXIS به مطالعه‌ی ظرفیت باربری و نشست پی حلقوی پرداخته شده است، که با استفاده از نتایج مطالعات ژئوتکنیکی برج‌های خنک‌کننده‌ی نیروگاه کازرون صورت پذیرفته است.^[۲۱] در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۲، نیز به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی ظرفیت باربری، نشست، و کج‌شدگی پی دایره‌یی و مربعی مجاور مستقر بر ماسه‌ی مسلح و غیرمسلح پرداخته شده است.^[۲۲] همچنین در همان سال به‌صورت آزمایشگاهی، رفتار پی حلقوی مدل تحت بار خارج از مرکز و بر روی بستری از ماسه‌ی مترکم که زیر آن ماسه‌ی شل قرار داشت، بررسی شده است.^[۲۳] در سال ۲۰۱۳، نیز به آزمایش مدل‌هایی با ابعاد آزمایشگاهی در مورد اثر تداخلی بین دو پی دایره‌یی مجاور روی ماسه‌ی خشک Ennore پرداخته شده است.^[۲۴] پس از آن در پژوهش دیگری در همان سال، آنالیز تحلیلی در مورد ظرفیت باربری نهایی یک پی دایره‌یی قرار گرفته بر خاک‌های دانه‌یی و چسبنده‌ی مسلح انجام شده است.^[۲۵] اخیراً نیز به‌صورت عددی و آزمایشگاهی به بررسی اثر تداخل پی‌های حلقوی و دایره‌یی مجاور قرار گرفته بر ماسه‌ی مسلح و غیرمسلح پرداخته شده است.^[۲۶]

پی‌های حلقوی هنوز به‌طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته‌اند و پژوهش‌ها روی

اصطکاک نمونه به دست آورده شده است. ماسه‌ی مورد استفاده طبق سیستم طبقه‌بندی متحد^۵، از نوع ماسه‌ی خوب دانه‌بندی شده (SW) طبقه‌بندی شده است.

۲.۴. دستگاه آزمایش و پی‌های مدل

برای انجام آزمایش‌ها از محفظه‌ی مکعبی شکل با ابعاد $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ و با عمق 1 m استفاده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، برای مشاهده‌ی تغییرات، دو طرف مخزن قسمت‌های شیشه‌ی در نظر گرفته شده و بالای آن، سازه‌ی برای انتقال بار از سیستم بارگذاری به خاک طراحی شده است، که با استفاده از ۲ بازو به ۲ طرف مخزن متصل شده‌اند. برای به دست آوردن ابعاد پی‌های مدل، ۲ نکته در نظر گرفته شده است:

۱. تعیین قطر خارجی پی‌ها: قطر خارجی پی‌ها باید به گونه‌ی در نظر گرفته شود که اثر دیواره‌های محفظه روی پی‌ها ناچیز باشد. برای این منظور مدل‌سازی‌های عددی اولیه‌ی از پی‌ها انجام و اندازه‌ی قطر خارجی پی‌ها به گونه‌ی در نظر گرفته شده است که تنش‌های منتجه به بدنه‌ی مخزن نرسد. با توجه به این نکته و طبق نتایج اولیه‌ی نرم‌افزار PLAXIS ۳D Foundation، قطر خارجی ۱۲ سانتی‌متر، هم برای پی‌های حلقوی و هم دایره‌ی مناسب تشخیص داده شده است.

۲. تعیین اندازه‌ی قطر داخلی مناسب برای پی حلقوی: با توجه به تشابه ماسه مورد استفاده در این آزمایش‌ها با ماسه‌ی استفاده‌شده‌ی هاتف و رضوی^[۱۲] و حاجیانی بوشهریان و هاتف^[۱۳] از نتایج پژوهش‌های مذکور در این آزمایش‌ها استفاده شده است. هاتف و رضوی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، نسبت قطر داخلی به خارجی برای داشتن بیشینه‌ی ظرفیت باربری پی حلقوی را بین ۰/۲ و ۰/۴ به دست آورده‌اند. همچنین حاجیانی بوشهریان با استفاده از نتایج برنامه‌ی اجزاء محدود PLAXIS ۲D برای قطرهای داخلی متفاوت، نسبت قطر داخلی به خارجی برابر ۰/۴ را برای بیشینه‌ی شدن ظرفیت باربری پی حلقوی به دست آورده است. بنابراین در آزمایش‌های این پژوهش نیز از پی‌های حلقوی مدل با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۴، که منجر به بیشینه‌ی ظرفیت باربری می‌شوند، استفاده شده است. در نتیجه، پی‌های دایره‌ی و حلقوی با قطر خارجی برابر ۱۲۰ میلی‌متر و پی حلقوی با قطر داخلی برابر ۴۸ میلی‌متر ساخته شده است.

برای ساختن پی‌های مدل از جنس پلاستیک سخت (صلب) استفاده و ضخامت



شکل ۲. محفظه‌ی خاک دستگاه آزمایش

آن‌ها ادامه دارد. در این نوشتار سعی شده است به روش‌های مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی، مقایسه‌ی بین رفتار پی حلقوی و دایره‌ی در شرایط یکسان و در حالت بستر ماسه‌ی مسلح و غیرمسلح انجام شود. همچنین با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده روی مدل‌های فیزیکی و عددی به صحت‌سنجی روابط پیشنهادی حیب و شیرینی^[۲۳] در معادلات ظرفیت باربری پرداخته شده و نتایج با هم مقایسه و ارزیابی شده‌اند.

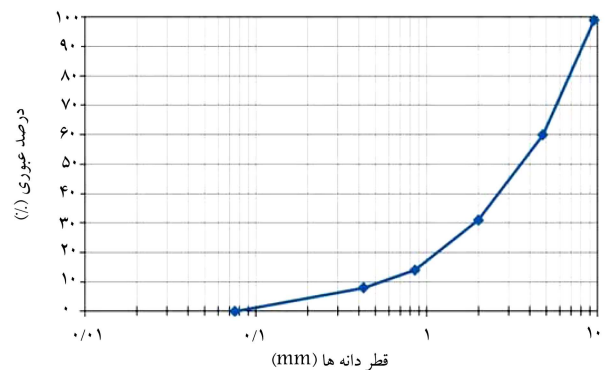
۴. روش پژوهش آزمایشگاهی

در این پژوهش ابتدا با استفاده از نتایج اولیه‌ی مدل‌سازی عددی، ابعاد پی‌های نمونه به دست آمده و سپس با ساخت آن‌ها، یک سری آزمایش اولیه برای به دست آوردن پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی‌های عددی بعدی انجام شده است. هم‌زمان با انجام آزمایش‌ها اصلی، مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS نیز انجام شده است و در نهایت با مقایسه‌ی نتایج، آزمایش‌هایی که نتیجه‌ی آن‌ها مشکوک به نظر می‌رسید، برای اطمینان بیشتر مجدداً انجام شده‌اند.

۱.۴. خاک مورد استفاده

برای انجام آزمایش‌ها از ماسه استفاده شده است. با توجه به ابعاد پی، ماسه‌ی استفاده شده است که خیلی درشت نباشد و نسبت به ابعاد پی و با در نظر گرفتن اثر مقیاس^۳، دانه‌بندی قابل قبولی داشته باشد. آزمایش آنالیز الک روی ماسه‌ی استفاده شده انجام و نمودار دانه‌بندی ماسه رسم شده است. در شکل ۱، نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی مورد استفاده و در جدول ۱، پارامترهای ماسه نشان داده شده است.

ماسه‌ی مورد استفاده خشک بوده و برای به دست آوردن زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی آن، ۳ بار آزمایش برش مستقیم^۴، و از روی نتایج به دست آمده زاویه‌ی



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی استفاده شده در آزمایش‌ها.

جدول ۱. پارامترهای ماسه‌ی استفاده شده در آزمایش‌ها.

مقدار	پارامتر
۸/۶۴	ضریب یکنواختی (Cu)
۱/۴۸	ضریب انحنای (Cc)
۱۶	وزن مخصوص خشک (kN/m^3)
۴۳	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (درجه)



شکل ۵. نحوه قرارگیری گیج‌ها، تیرها، و پی‌ها در آزمایش‌ها.



شکل ۶. نحوه قرارگیری لایه‌ی مسلح‌کننده زیر خاک.



شکل ۳. پی‌های مدل حلقوی و دایره‌یی استفاده‌شده در آزمایش‌ها.



شکل ۴. دستگاه آزمایش.

۵. نحوه انجام آزمایش‌ها

برای هر مرحله از آزمایش، ابتدا خاک موجود در مخزن تا عمقی که تنش به آن عمق برسد (حدود ۴۰ سانتی‌متر) خالی شده است. سپس با استفاده از شیوه‌ی بارانی^۶، خاک در لایه‌های ۱۰ سانتی‌متری ریخته شده است. در این روش، لایه‌های خاک با استفاده از یک قیف و از ارتفاع ثابت ۲۰ سانتی‌متر روی سطح ریخته شده است. این روش باعث پخش شدن یکنواخت دانه‌های خاک در سطح مخزن می‌شود. پس از ریختن هر لایه، با استفاده از یک وزنه‌ی کوبش، خاک کوبیده شده است. وزنه‌ی کوبش مخصوص، یک ورق فولادی با ضخامت ۵ میلی‌متر و ابعاد $۰/۴۵m \times ۰/۴۵m$ است، که در شکل ۷ نشان داده شده است. روش کوبیدن هر لایه‌ی خاک ۱۰ سانتی‌متری بدین گونه بوده است که هر لایه با ۱۰ بار رها کردن وزنه از ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری روی سطح خاک متراکم شده است. سپس لایه‌ی ۱۰ سانتی‌متری بعدی با روش بارانی ریخته شده و به همین نحو کوبیده شده است. این کار تا رسیدن خاک به تراز مورد نظر ادامه یافته است. تراکم نسبی با استفاده از این روش $۵ \pm ۵\%$ درصد است.

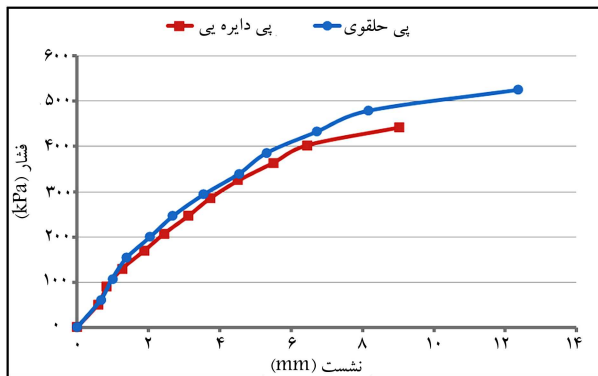
پی‌های مدل در آزمایش‌های انجام‌شده با استفاده از یک جک هیدرولیکی و به روش کنترل تنش^۷ بارگذاری شده‌اند. بدین ترتیب که در هر مرحله، باری استاتیکی به پی‌ها وارد و نشست مربوط اندازه‌گیری شده است. سپس فشار مایع درون جک با استفاده از شیرهای فشارشکن^۸ جک هیدرولیکی، به اندازه‌ی ۱ bar افزایش یافته است، که منجر به افزایش بار روی پی‌ها شده است و مجدداً صبر شده است تا حرکت عقربه‌های گیج متوقف و نشست پی‌ها مقداری ثابت شود. وقتی که گیج‌ها از حرکت ایستادند، نشست ثبت شده و باز فشار مایع درون جک به اندازه‌ی ۱ bar

آن‌ها برابر با ۷۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده و برای اینکه سطح زیر پی‌ها زبر باشد، لایه‌هایی از سباده به کف آن‌ها چسبانده شده است (شکل ۳). سیستم بارگذاری مورد استفاده در آزمایش‌ها، شامل یک جک هیدرولیکی بوده است، که با استفاده از یک قطعه‌ی ۸۵ سانتی‌متری تیر IPE۱۶، بار به پی منتقل شده است (شکل ۴). دلیل استفاده از تیر آهن، قرارگرفتن دو گیج در دو طرف پی و دقت بیشتر در اندازه‌گیری نشست‌ها بوده است. همچنین وزن تیر مذکور در محاسبه‌ی بار وارد بر پی‌ها در نظر گرفته شده است. برای اندازه‌گیری نشست‌ها از دو گیج با دقت ۰/۱ میلی‌متر، که به فاصله‌ی مساوی از دو لبه‌ی جک هیدرولیکی قرار گرفته بودند، استفاده و متوسط نشست اندازه‌گیری‌شده توسط گیج‌ها، که برابر با متوسط نشست پی‌است، به عنوان مقدار نشست پی در نظر گرفته شده است. در شکل ۵، نحوه قرارگیری گیج‌ها، تیرها، و پی‌ها نشان داده شده است.

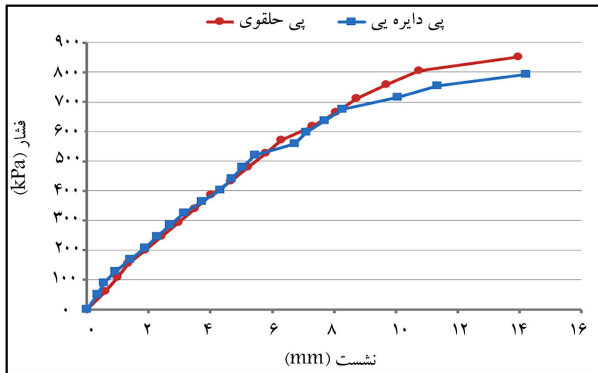
۳.۴. مسلح‌کننده

مسلح‌کننده‌ی که برای انجام آزمایش‌ها از آن استفاده شده است، از نوع ژئوگرید دوحوره و از جنس پلی‌پروپیلین (PP) بوده است. این ژئوگرید ساخت کشور آلمان بوده و طبق جدول مربوط به آن، سختی کششی (EA) برابر با ۳۰ کیلو نیوتن بر متر و بازشدگی‌هایی با ابعاد $۳۲cm \times ۳۲cm$ داشته است.

برای مسلح‌کردن ماسه در آزمایش‌ها از یک لایه‌ی ژئوگرید با ابعاد $۰/۹۵m \times ۰/۹۵m$ استفاده شده است. این ژئوگرید در عمق ۰/۵D (که D قطر خارجی پی‌های مدل و برابر با ۶ میلی‌متر است)، که قبلاً توسط قضاوی و لواسان^{۱۸} به عنوان عمق بهینه برای پیشینه‌ساختن ظرفیت باربری پی به دست آمده بود، قرار داده شده است. نحوه قرارگیری این لایه‌ی مسلح‌کننده زیر خاک در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۸. نمودار فشار - نشست برای پی‌های دایره‌یی و حلقوی روی ماسه‌ی غیرمسلح.



شکل ۹. نمودار فشار - نشست برای پی‌های دایره‌یی و حلقوی روی ماسه‌ی مسلح.

۸۴٪ افزایش داشته است. همچنین ظرفیت باربری پی حلقوی روی ماسه‌ی مسلح برابر با ۷۲۸ kPa به دست آمده است، که این مقدار در مقایسه با ظرفیت باربری پی مشابه روی ماسه‌ی غیرمسلح ۶۸٪ افزایش داشته است. مشاهده می‌شود در هر دو حالت پی دایره‌یی و حلقوی قراردادن لایه‌ی ژئوگرید زیر پی‌ها منجر به افزایش چشم‌گیر ظرفیت باربری شده است، ولی تأثیر آن در ظرفیت باربری پی دایره‌یی بیش از پی حلقوی بوده است. در شکل ۹، قاعدتاً باید در فشار یکسان، نشست زیر پی دایره‌یی بیشتر از حلقوی باشد، اما تا فشار حدود ۷۰۰ کیلوپاسکال چنین پدیده‌یی مشاهده نشده است. دلیل این رفتار می‌تواند ناشی از تأثیر مسلح‌کننده باشد، که با توزیع تنش در مقادیر ذکرشده، تفاوت این دو نوع پی را از این منظر کمتر کرده است. همچنین با مقایسه‌ی مقادیر نشست در حالت‌های خاک مسلح و غیرمسلح این نتیجه به دست آمده است که در اثر استفاده از مسلح‌کننده، مقادیر نشست در یک تنش خاص در حالت پی قرارگرفته روی خاک مسلح نسبت به همان پی روی خاک غیرمسلح کاهش یافته است. همچنین مقادیر نشست در لحظه‌ی گسیختگی در پی‌های قرارگرفته روی خاک مسلح بیشتر از پی‌های روی خاک غیرمسلح است.

۷. آنالیز عددی

برای آنالیز مدل‌ها از برنامه‌ی سه بُعدی PLAXIS ۳D Foundation نسخه‌ی ۱/۱ برای آنالیز عددی استفاده شده است. مدل رفتاری خاک در برنامه‌ی مذکور، موهرکلمب در نظر گرفته شده و از المان‌های مثلثی ۱۵ گره‌یی برای مدل کردن پی‌ها استفاده شده است. در مدل کردن این پی‌ها به دلیل محدودیت‌های برنامه از دو روش ابتکاری استفاده شده است. اولاً به دلیل اینکه برنامه‌ی Foundation



شکل ۷. وزنه‌ی کوبش خاک.

۱ افزایش یافته است. این افزایش بار پی‌ها تا گسیختگی خاک زیر آن‌ها ادامه یافته است. نهایتاً نمودار فشار - نشست برای هر کدام از مراحل آزمایش رسم شده و ظرفیت باربری نهایی پی‌ها از روی آن به دست آورده شده است. ظرفیت باربری نهایی پی‌ها، از محل برخورد دو مماس در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی نمودار بار نشست، که نشان‌گر مقدار ظرفیت باربری در یک نشست خاص است، به دست آورده شده است. در اصطلاح به این روش به دست آوردن ظرفیت باربری، «روش مماسی»^۹ گفته می‌شود. روش مماسی توسط اغلب مهندسان برای تعیین باری که متناظر با نقطه‌ی تغییر شیب زیاد در منحنی نشست است، استفاده شده است. در این روش بار متناظر با نقطه‌ی تغییرات بار در نشست به عنوان ظرفیت باربری انتخاب می‌شود.^[۲۵]

پژوهش‌های انجام شده نشان داده است که وقتی ماسه مسلح می‌شود، ظرفیت باربری نهایی پی افزایش می‌یابد. این افزایش معمولاً به صورت یک پارامتر بدون بُعد به نام BCR (نسبت ظرفیت باربری)^{۱۰} تعریف می‌شود (رابطه‌ی ۱):

$$BCR = \frac{q_u(\text{reinforced})}{q_u(\text{unreinforced})} \quad (1)$$

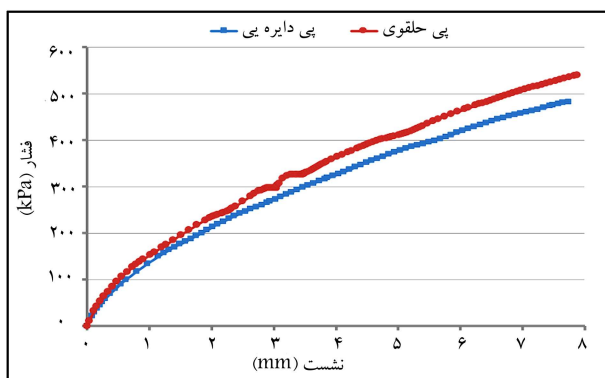
که در آن، $q_u(\text{reinforced})$ ظرفیت باربری نهایی یک پی روی خاک مسلح، $q_u(\text{unreinforced})$ ظرفیت باربری نهایی همان پی روی خاک غیرمسلح.

۶. نتایج آزمایش‌ها و بحث

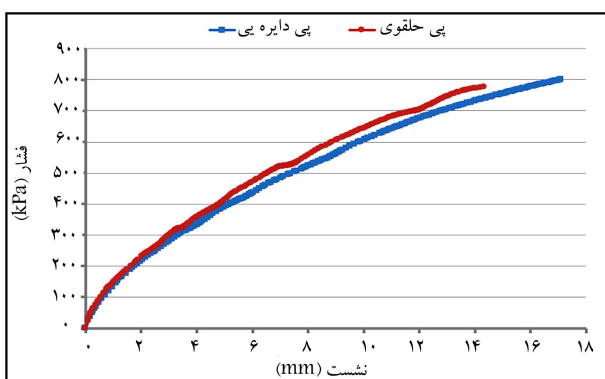
در این بخش، نمودارهای فشار - نشست برای هر کدام از آزمایش‌های انجام شده ارائه و در مورد آن‌ها بحث شده است. ظرفیت باربری هر کدام از نمودارها توسط روش مماسی به دست آمده است. محور افقی نمودارها میانگین نشست ثبت شده توسط گیج‌ها را نشان می‌دهد.

در ابتدا، نمودارهای فشار نشست برای حالت‌های پی دایره‌یی و حلقوی روی ماسه‌ی غیرمسلح در شکل ۸ ارائه شده است. نکته‌یی که در نتایج مشاهده می‌شود، افزایش ۲۱ درصدی ظرفیت باربری پی حلقوی روی خاک غیرمسلح (۴۳۲ kPa) نسبت به ظرفیت باربری پی دایره‌یی روی همان خاک (۳۵۷ kPa) است، که مشابه نتیجه‌یی است که هاتف و رضوی^[۱۲] گزارش کرده‌اند.

در ادامه، نتایج آزمایش‌های مشابه در حالت ماسه‌ی مسلح بررسی شده است. در شکل ۹، نتایج مربوط به پی‌های دایره‌یی و حلقوی روی خاک مسلح ارائه شده است. ظرفیت باربری پی دایره‌یی روی خاک مسلح برابر با ۶۵۶ kPa به دست آمده است، که این مقدار در مقایسه با ظرفیت باربری پی مشابه روی ماسه‌ی غیرمسلح



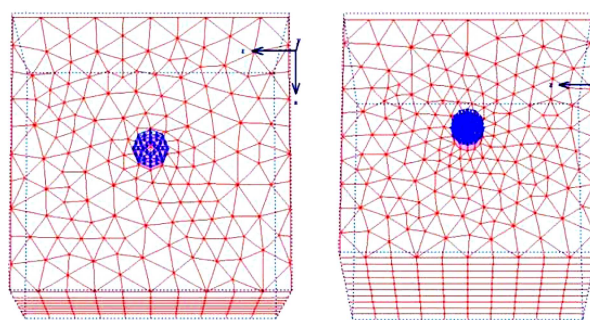
شکل ۱۱. نمودار فشار - نشست برای پی‌های دایره‌یی و حلقوی روی ماسه‌ی غیرمسلح.



شکل ۱۲. نمودار فشار - نشست برای پی‌های دایره‌یی و حلقوی روی ماسه‌ی مسلح.

خاک (۲۸۷ kPa) به دست آورده شده است، که ۶٪ افزایش ظرفیت باربری را در پی حلقوی نسبت به پی دایره‌یی نشان می‌دهد. هر دو مقدار ظرفیت باربری در پی حلقوی و دایره‌یی کمتر از مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها، ولی تا حد خوبی نزدیک به آن بوده است.

در شکل ۱۲، نتایج آنالیز عددی مربوط به پی‌های دایره‌یی و حلقوی فقط روی خاک مسلح ارائه شده است. ظرفیت باربری پی دایره‌یی فقط روی خاک مسلح برابر با ۵۳۱ kPa به دست آمده است، که این مقدار در مقایسه با ظرفیت باربری پی مشابه روی ماسه‌ی غیرمسلح ۸۵٪ افزایش داشته است. همچنین ظرفیت باربری پی حلقوی فقط روی ماسه‌ی مسلح برابر با ۵۳۹ kPa به دست آمده است، که این مقدار در مقایسه با ظرفیت باربری پی مشابه روی ماسه‌ی غیرمسلح ۷۶٪ افزایش داشته است. مشابه نتیجه‌یی که از آزمایش‌ها به دست آمده است، در اینجا نیز مشاهده می‌شود در هر دو حالت پی دایره‌یی و حلقوی، قراردادن لایه‌ی ژئوگرید زیر پی‌ها منجر به افزایش چشمگیر ظرفیت باربری شده است، ولی تأثیر آن در ظرفیت باربری پی دایره‌یی بیش از پی حلقوی بوده است. همچنین با مقایسه‌ی مقادیر نشست در حالت‌های خاک مسلح و غیرمسلح، این نتیجه به دست آمده است که در اثر استفاده از مسلح‌کننده، مقادیر نشست در یک تنش خاص در حالت پی قرارگرفته روی خاک مسلح نسبت به همان پی روی خاک غیرمسلح کاهش می‌یابد. همچنین مقادیر نشست در لحظه‌ی گسیختگی در پی‌های قرارگرفته روی خاک مسلح بیشتر از پی‌های روی خاک غیرمسلح است. آزمایش‌های انجام شده نیز همین نتیجه را نشان داده‌اند. در مقایسه‌ی شکل‌های ۸ و ۹ با شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود که در شکل‌های ۸ و ۹ (مشاهدات تجربی) برگشت منحنی‌ها در



شکل ۱۰. پی‌های مدل شده در نرم‌افزار PLAXIS و بارگذاری آن‌ها.

جدول ۲. مقادیر استفاده شده در آنالیز عددی.

مقدار	پارامتر	مصالح
۱۶	وزن مخصوص (kN/m^3)	ماسه
۱	چسبندگی (kPa)	
۴۳	زاویه اصطکاک (ϕ)	
۰/۳	ضریب پواسون	
۱۸۰۰۰	مدول کشسان (kPa)	کف
۱	ضخامت (mm)	
۱۷	وزن مخصوص (kN/m^3)	
۱۵۰°	مدول کشسان در جهت X	
۱۵	مدول کشسان در جهت Y	عنوان مسلح کننده)
۱۵۰°	مدول کشسان در جهت Z	
۰/۳	ضریب پواسون	پی
۲۵	وزن مخصوص (kN/m^3)	
۰/۳	ضریب پواسون	
۲E۸	مدول کشسان (kPa)	

PLAXIS 3D، کلاسترهای دایره‌یی و کلاً انحنادار رسم نمی‌کند و پی‌ها به صورت شمع‌های صلبی، که روی سطح زمین قرار می‌گیرند، تعریف شده‌اند. برای تعریف کردن آن‌ها در برنامه از مدل رفتاری Linear-Elastic استفاده شده و مدول کشسان آن‌ها در حد فولاد در نظر گرفته شده است. سپس بارهای وارده نیز روی سطح این شمع‌ها و به صورت گسترده اعمال شده‌اند. نحوه‌ی تعریف و بارگذاری پی‌ها در نرم‌افزار، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

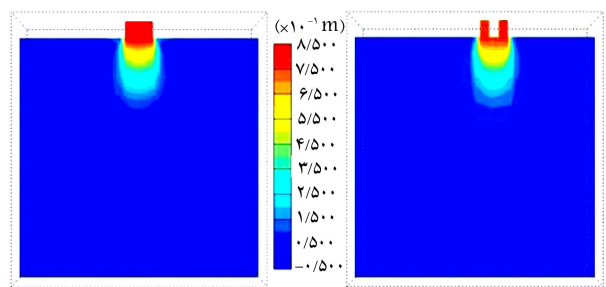
ثانیاً به دلیل اینکه برنامه‌ی PLAXIS 3D Foundation برخلاف نسخه‌ی دو بُعدی آن امکان مدل کردن ژئوگرید را درون برنامه نمی‌دهد، ژئوگرید به صورت یک کف ۱۱ در برنامه تعریف شده است. مسلح‌کننده‌ها فقط می‌توانند نیروی کششی تحمل کنند و مقاومت خمشی ندارند. از این رو برای مدل کردن این رفتار، اولاً کف با ضخامت خیلی کم تعریف شده و ثانیاً مدول کشسان آن در جهت عمودی بسیار کمتر از جهت‌های افقی در نظر گرفته شده است. با استفاده از روش مذکور، رفتار کف تعریف شده در برنامه به رفتار ژئوگرید بسیار نزدیک شده است. در جدول ۲، پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی عددی نشان داده شده است.

نمودارهای فشار - نشست حاصل از آنالیز عددی برای حالت‌های پی دایره‌یی و حلقوی روی ماسه‌ی غیرمسلح در شکل ۱۱ ارائه شده است. ظرفیت باربری پی حلقوی روی خاک غیرمسلح (۳۰۶ kPa) و ظرفیت باربری پی دایره‌یی روی همان

عددی نشست کمتری را نسبت به آزمایش‌ها پیش‌بینی کرده است. همچنین برای خاک‌های مسلح با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود که نمودارهای فشار-نشست در نتایج PLAXIS کمی پایین‌تر از نمودارهای مشابه به‌دست‌آمده در آزمایش‌ها هستند و این بدین معنی است که در حالت ماسه‌ی مسلح و در یک تنش فرضی، مدل‌سازی عددی نشست بیشتری را نسبت به آزمایش‌ها پیش‌بینی کرده است.

در این بخش، نتایج آزمایشگاهی نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای پی‌های دایره‌یی و حلقوی روی خاک مسلح‌شده با یک لایه‌ی مسلح‌کننده با نتایج حاجیانی بوشهریان وهاتف،^[۱۳] مقایسه شده است. مشخصات ماسه و مسلح‌کننده‌ی استفاده‌شده در پژوهش بوشهریان وهاتف و مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی نسبت ظرفیت باربری پی‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که در هر دو پژوهش، BCR در حالت دایره‌یی بیشتر از BCR حالت حلقوی است و این نشان می‌دهد که تأثیر مسلح‌کننده در ظرفیت باربری پی دایره‌یی بیشتر از پی حلقوی بوده است. همچنین دلیل بیشتر بودن مقادیر BCR در تحقیقات فعلی نسبت به پژوهش بوشهریان وهاتف، می‌تواند بیشتر بودن سختی کششی مسلح‌کننده و همچنین تفاوت‌های ماسه‌ی استفاده‌شده و نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها باشد.

در ادامه، ظرفیت باربری پی دایره‌یی و حلقوی با توجه به پارامترهای ارائه‌شده و با استفاده از روابط کلاسیک محاسبه شده است. در این محاسبات قطر خارجی پی‌ها $D = 0.12 \text{ m}$ ، زاویه اصطکاک خاک $\phi = 43^\circ$ ، و چسبندگی خاک $c = 0$ در نظر گرفته شده است. به دلیل کوچک بودن ابعاد پی‌های مدل، نتایج حاصل از روابط کلاسیک تا حد زیادی با نتایج آزمایشگاهی و عددی پژوهش حاضر اختلاف دارد، که می‌توان این اختلاف را تا حدودی با



شکل ۱۳. تغییر مکان‌های کلی پی‌های دایره‌یی و حلقوی.

انتهای آن‌ها تا حدی رخ داده است، اما در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ (مدل‌سازی عددی) این‌گونه نیست. اختلاف در این دو سری شکل مربوط به فرضیات نرم‌افزار است، که بارگذاری علی‌رغم اتفاق افتادن گسیختگی‌های موضعی ادامه یافته و برگشت منحنی‌های بار نشست در انتها رخ نداده است.

در ادامه، به بررسی شکل‌های تغییر مکان کلی پی‌ها که رابطه‌ی مستقیم با تنش زیر پی‌ها دارند، پرداخته شده است. از این رو به جای شکل‌های تنش، تغییر مکان‌ها ارائه شده‌اند، که در این نسخه از برنامه، خروجی‌های تغییر مکان دقیق‌تر و واضح‌تر از شکل‌های خروجی برای تنش‌ها هستند. شکل ۱۳، شامل تغییر مکان‌ها در حالت مقطع گذرنده از مرکز پی است، که در این مقطع، تنش‌های زیر پی به خوبی مشاهده می‌شود.

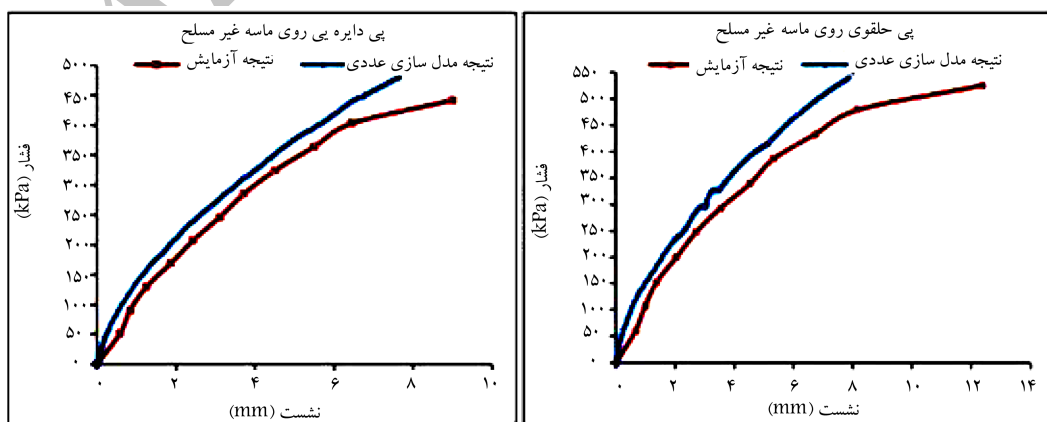
۸. مقایسه‌ی نتایج

در این بخش ابتدا به یک سری مقایسه بین نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایش‌ها پرداخته شده و سپس بعضی از نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش‌ها با نتایج مطالعات انجام‌شده در گذشته مقایسه شده است. نتایج مقایسه‌شده در حالت ماسه‌ی غیرمسلح در شکل ۱۴ و در حالت مسلح در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود. در انتها، نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعات با روش‌های متداول تحلیلی مقایسه شده‌اند.

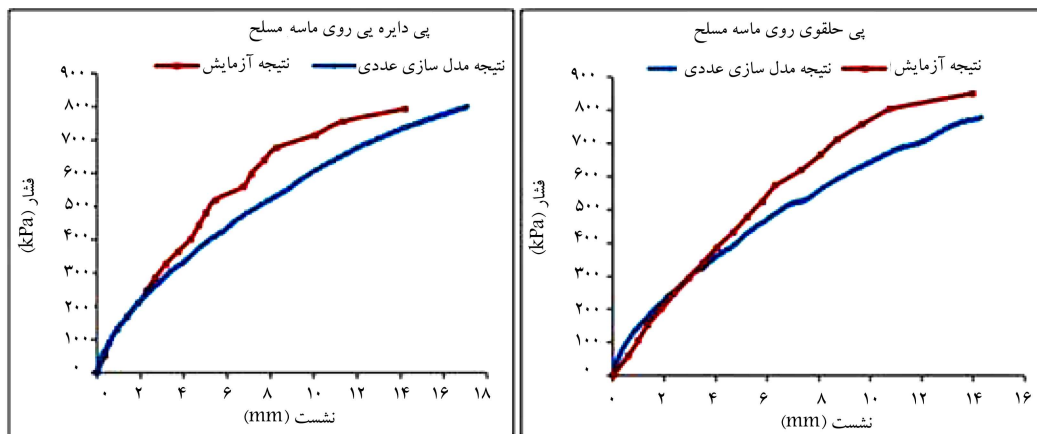
همان‌طور که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود، نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایش‌ها تا حد قابل قبولی به یکدیگر نزدیک هستند. برای خاک‌های غیرمسلح با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود که نمودارهای فشار-نشست در نتایج PLAXIS کمی بالاتر از نمودارهای مشابه به‌دست‌آمده در آزمایش‌ها هستند. این بدین معنی است که در حالت ماسه‌ی غیرمسلح و در یک تنش فرضی، مدل‌سازی

جدول ۳. مقایسه‌ی نسبت ظرفیت باربری پی‌ها (BCR).

مشاهدات	BCR	مرجع	شکل پی
$\phi = 38^\circ, \gamma = 17 \text{ kN/m}^3$, $EA(\text{geonet}) = 28 \text{ kN/m}$, $D = 15 \text{ cm}$, SW	۱٫۶۵ ۱٫۳۲	بوشهریان وهاتف (۲۰۰۳)	دایره‌یی حلقوی
$\phi = 43^\circ, \gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, $EA(\text{geogrid}) = 3 \text{ kN/m}$, $D = 12 \text{ cm}$, SW	۱٫۸۴ ۱٫۶۸	پژوهش حاضر	دایره‌یی حلقوی



شکل ۱۴. مقایسه‌ی نتایج PLAXIS و آزمایش‌ها برای پی‌های دایره‌یی و حلقوی روی ماسه‌ی غیرمسلح.



شکل ۱۵. مقایسه‌ی نتایج PLAXIS و آزمایش‌ها برای پی‌های دایره‌یی و حلقوی روی ماسه‌ی مسلح.

جدول ۴. مقایسه‌ی نتایج تحلیلی، عددی، و آزمایشگاهی ظرفیت باربری.

مقادیر ظرفیت باربری (kPa)			روش	شکل پی
N_{γ}^* (Shirishi)	N_{γ}^* (Habib)	N_{γ}		
۲۳۸٫۸	۱۲۴٫۸	۱۱٫۸۷	ترزاقی	دایره‌یی
۱۹۹٫۹	۱۰۵٫۶	۹٫۸٫۶	مایهوف	
۲۱۸٫۱	۱۱۴٫۶	۱۰٫۷٫۶	وسیک	
۱۶۰	۸۵٫۹	۷٫۸٫۹	هنسن	
	۳۵۷		پژوهش حاضر (آزمایشگاهی)	
	۲۸۷		پژوهش حاضر (عددی)	
مقادیر ظرفیت باربری (kPa)				
	۴۳۲		پژوهش حاضر (آزمایشگاهی)	حلقوی
	۳۰۶		پژوهش حاضر (عددی)	

برای اصلاح N_{γ} با استفاده از نتایج پژوهشگران پیشین به صورت رابطه‌ی ۴ ارائه شده است، که در آن B_i برابر ۱٫۴ متر است:

$$N_{\gamma}^* = \left(1 + \left(\frac{B_i}{B} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \left(1 + \left(\frac{B_i}{B} \right)^{\frac{1}{5}} \right) N_{\gamma} \quad (4)$$

نتایج حاصل از محاسبه‌ی ظرفیت باربری به وسیله‌ی روابط کلاسیک با ضرایب ظرفیت باربری N_{γ} و همچنین با استفاده از ضرایب ظرفیت باربری اصلاح شده N_{γ}^* در جدول ۴ ارائه و با نتایج آزمایشگاهی و عددی پژوهش حاضر مقایسه شده است. در این روابط قطر پی‌ها ۱۲ سانتی‌متر و عمق مدفون پی صفر در نظر گرفته شده است. دلیل اختلاف زیاد نتایج، کوچک بودن ابعاد پی‌های مدل است و مشاهده می‌شود که اصلاح ضرایب ظرفیت باربری به خصوص به روش شیریشی این اختلاف را کمتر و به بهبود نتایج کمک کرده است.

۹. نتیجه‌گیری

- ظرفیت باربری پی حلقوی با نسبت قطر داخلی به قطر خارجی برابر با ۰٫۴، نسبت به پی دایره‌یی با قطر خارجی برابر بالاتر است که نشان‌دهنده‌ی بهینه‌تر و اقتصادی‌تر بودن پی حلقوی نسبت به پی دایره‌یی در شرایط مشابه است.
- مسلح کردن بستر ماسه‌یی زیر پی‌ها با یک لایه‌ی ژئوگرید، در هر دو حالت پی

استفاده از روابط اثر مقیاس در ظرفیت باربری پی‌ها برطرف کرد. رابطه‌ی ظرفیت باربری پی‌های سطحی اولین بار توسط ترزاقی (۱۹۴۳) برای یک شالوده‌ی دایره‌یی به صورت رابطه‌ی ۲ بیان شده است:

$$q_{ult} = 1/3cN_c + qN_q + 0/3\gamma BN_{\gamma} \quad (2)$$

که در آن، c چسبندگی خاک، γ وزن مخصوص خاک، q تنش ناشی از سربار، و B عرض پی است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ضریب ظرفیت باربری N_{γ} فقط تابعی از زاویه‌ی اصطکاک خاک نیست و در مصالح دانه‌یی با افزایش اندازه‌ی فونداسیون کاهش می‌یابد. این موضوع توسط دی بر [۲۶] اثر مقیاس ۱۲ نام نهاده شده است. به‌طورکلی، عوامل مؤثر در N_{γ} شامل: زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک، وزن مخصوص، چگالی نسبی، اندازه‌ی دانه‌ها، و اندازه‌ی فونداسیون می‌شود. برای حساب کردن اثر مقیاس تعدادی از پژوهشگران از قبیل حبیب [۲۳] و شیریشی [۲۴] N_{γ} را اصلاح کرده‌اند. رابطه‌ی حبیب، که براساس تأثیر اندازه‌ی دانه‌ها نتیجه شده است، به صورت رابطه‌ی ۳ عنوان شده است: [۲۳]

$$N_{\gamma}^* = N_{\gamma} + 400/n \quad (3)$$

که در آن، N_{γ} ضریب ظرفیت باربری، N_{γ}^* ضریب ظرفیت باربری اصلاح شده، n نسبت عرض پی به میانگین اندازه‌ی دانه‌ها (B/δ) است، که در آن B عرض پی و δ میانگین اندازه‌ی دانه‌ها $(\delta = D_{50})$ است. پس از آن رابطه‌ی شیریشی [۲۴]

یک لایه ی ژئوگرید، مقدار نتایج ظرفیت باربری آنالیز عددی کمتر از مقادیر نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است، ولی نتایج تا حد قابل قبولی نزدیک به نتایج آزمایشگاهی بوده است.

-- به دلیل کوچک بودن ابعاد پی های مدل، نتایج حاصل از آنالیز تحلیلی کمتر از نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی عددی به دست آمده است، که با لحاظ کردن اثر مقیاس در آنالیز تحلیلی، اختلاف بین نتایج کمتر شده است.

حلقوی و دایره یی موجب افزایش چشمگیر ظرفیت باربری و کاهش نشست پی ها شده است، که با قراردادن یک لایه ی ژئوگرید در عمق $0.5D$ (که در آن D قطر خارجی پی های مدل و برابر با ۶ میلی متر است)، تأثیر مسلح کننده در ظرفیت باربری پی دایره یی بیشتر از پی حلقوی مشابه بوده است.

-- در هر دو حالت پی دایره یی و حلقوی روی ماسه ی غیرمسلح و مسلح شده با

پانوشت ها

1. Geosynthetic
2. superposition
3. scale factor
4. direct shear test
5. unified soil classification system
6. rainfall
7. stress control
8. relief valve
9. tangent method
10. bearing capacity ratio
11. floor
12. scale effect

منابع (References)

1. Vidal, H. "La terre Armee", Anales de l'Institute Technique du Batiment et des Travaux Publiques, France, pp. 888-938 (July-August 1966).
2. Binquet, J. and Lee, K.L. "Bearing capacity tests on reinforced earthslabs", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **101**(2), pp. 1241-1255 (1975a).
3. Binquet, J. and Lee, K.L. "Bearing capacity analysis of reinforced earthslabs", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **101**(12), pp. 1257-1276 (1975b).
4. Akinmusuru, J.O. and Akinboladeh, J.A. "Stability of loaded footings on reinforced soil", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **107**(6), pp. 819-827 (1981).
5. Guido, V.A., Biesiadecki, G.L. and Sullivan, M.J. "Bearing capacity of geotextile reinforced foundation", *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation of Engineers*, San Francisco, CA, pp. 1777-1780 (1985).
6. Yetimuglu, T., Wu, J.T.H. and Saglamar, A. "Bearing capacity of rectangular footings on geogridreinforced sand", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **120**(12), pp. 2083-2099 (1994).
7. Adams, M.T. and Colin, J.G. "Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundation", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **123**(1), pp. 66-73 (1997).
8. Hataf, N. and Baziar, A. "Use of tire shreds for bearing capacity improvement of shallow footings on sand", *Proceedings of the 3ed International Conference on Ground Improvement Techniques*, Singapore, pp. 189-194 (2000).
9. Fisher, K. "Zur Berechnung der setzung Von Fundamenten in der form einer Kreisformigen Ringflache", *Der Bauingenieur*, Berlin, Germany, **32**(5), pp. 172-174 (in German) (1957).
10. Egorov, K.E. "Calculation of bed for foundation withring footing", *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanical Foundation of Engineers*, Montreal, **2**, pp. 41-45 (1965).
11. Ohri, M.L., Purhit, D.G.M. and Dubey, M.L. "Behavior of ring footings on dune sand overlaying dense sand", *Pres. International Conference of Civil Engineers*, Tehran, Iran (1997).
12. Hataf, N. and Razavi, M.R. "Behavior of ring footing on sand", *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B*, **27**, pp. 47-56 (2003).
13. Hajiani Boushehrian, J. and Hataf, N. "Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand", *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, **21**(4), pp. 241-256 (2003).
14. Karaulov, A. "Experimental and theoretical research on the bearing capacity of ring foundation beds", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **43**(2), pp. 37-40 (2006).
15. Zhao, L. and Wang, J.H. "Vertical bearing capacity for ring footings", *Computers and Geotechnics*, **35**(2), pp. 292-304 (2007).
16. Boushehrian, A.H. and Hataf, N. "Bearing capacity of ring footings on reinforced clay", *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, Goa, India (1-6 October 2008).
17. Choobbasti, A.J., Hesami, S., Najafi, A., Pirzadeh, S., Farrokhzad, F. and Zahmatkesh, A. "Numerical evaluation of bearing capacity and settlement of ring footing: Case study of Kazeroon cooling towers", *Int. J. Res. Rev. Appl. Sci.*, **4**, pp. 263-271 (August 2010).
18. Ghazavi, M. and Lavasan, A. "Alimardani behavior of closely spaced square and circular footings on reinforced sand", *J. Soils Found.*, **52**(1), pp. 160-157 (2012).
19. El Sawwaf, M. and Nazir, A. "Behavior of eccentrically loaded small-scale ring footings resting on reinforced lay-

- ered soil", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **138**(3), pp. 376-384 (2012).
20. Srinivasana, V. and Ghosh, P. "Experimental investigation on interaction problem of two nearby circular footings on layered cohesionless soil", *Geomech. Geoeng.*, **8**(2), pp. 97-106 (2013).
 21. Chakraborty, D. and Kumar, J. "Bearing capacity of circular footings on reinforced soils", *Int. J. Geomech.*, **15**(1), pp.1-9 (2014).
 22. Naderi, E. and Hataf, N. "Model testing and numerical investigation of interference effect of closely spaced ring and circular footings on reinforced sand", *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, **42**(3), pp. 191-200 (2014).
 23. Habib, P.A. "Scale effect for shallow footings on dense sand", *J. Geotech. Engrg. Div.*, **100**(1), pp. 95-99 (1974).
 24. Shiraishi, S. "Variation in bearing capacity factors of dense sand assessed by model loading tests", *Soils Found.*, **30**(1), pp. 17-26 (1990).
 25. Trautmann, C.H. and Kulhawy, F.H. "Uplift load-displacement behavior of Spread foundations", *J. Geotech. Eng., ASCE*, **144**(2), pp. 168-183 (1988).
 26. De Beer, E.E. "The scale effect on the phenomenon of progressive rupture in cohesionless soils", *6th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, Canada, **2**(3-6), pp. 13-17 (1965).

Archive of SID