

مقایسه‌ی رفتار عددی و آزمایشگاهی گونه‌هایی از پی‌های نواری پوسته‌یی تاشده بر روی خاک ماسه‌یی

جعفر بلوری بزاز* (دانشیار)

کیهان ساجدی (دانشجوی دکتری)

حامد علومی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۷)
دروزی ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۱۱-۳

پی‌های پوسته‌یی، نمونه‌های آشکار استفاده‌ی بهینه از مصالح بتن و فولاد برای باربری بیشتر هستند. در پژوهش حاضر، رفتار گونه‌هایی از پی‌های نواری پوسته‌یی تاشده بر روی خاک ماسه‌یی، بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی و تحلیل عددی بررسی شده است. ۴ الگوی هندسی متفاوت از پی‌های نواری پوسته‌یی تاشده با عمق‌های مدفون متفاوت بر روی خاک ماسه‌یی با تراکم کم و زیاد (ماسه‌ی شل و متراکم) انتخاب شده است. به منظور مقایسه‌ی رفتار پی‌های پوسته‌یی با پی‌های نواری مسطح، آزمایش‌هایی نیز روی پی‌های نواری تخت هم‌عرض معادل پی‌های پوسته‌یی انجام و نتایج مقایسه شده است. همچنین از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS ۶/۹-۱ برای مدل‌سازی پی‌های مذکور استفاده شده است. پارامترهای مقاومتی ماسه با مدل رفتاری دراگر - پراگر به نرم‌افزار معرفی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، در شرایط یکسان عمق مدفون پی و تراکم خاک، ظرفیت باربری نوعی پی پوسته‌یی تاشده‌ی ۴ وجهی (نوع D پژوهش حاضر) نسبت به پی‌های نواری تخت و گونه‌های دیگر پی‌های نواری پوسته‌یی پژوهش حاضر برتری دارد. از طرف دیگر، با افزایش عمق مدفون و تراکم خاک، ظرفیت باربری پی‌های پوسته‌یی نیز افزایش می‌یابد. همچنین نتایج تحویل عددی بیانگر تطبیق مناسب رفتار پیش‌بینی شده‌ی این گونه پی‌ها با نتایج آزمایشگاهی است.

واژگان کلیدی: پی پوسته‌یی تاشده، پی نواری، تنش، خاک ماسه‌یی، ظرفیت باربری، نگره‌ی دراگر - پراگر.

bolouri@um.ac.ir
ms_keyhan@yahoo.com
eghlimhashtom@yahoo.com

۱. مقدمه

در یک سطح، نسبت بار حمل شده به مقدار مصالح مصرفی برای پی‌های پوسته‌یی بیشتر از پی‌های تخت است. زیرا از یک سو، پوسته‌ها سازه‌های نازک و مؤثری هستند و از سوی دیگر، چون پی‌های پوسته‌یی روی سطح خاک اجرا می‌شوند، کمانش‌های محلی ندارند. پی‌های پوسته‌یی تأمین‌کننده‌ی پایداری بیشتری در برابر واژگونی و در آمدن از جا نسبت به پی‌های تخت معمول هستند. اهمیت ویژگی ذکر شده در خاک‌های سست لجنی و نشست‌پذیر مشخص می‌شود. شکل پی‌های پوسته‌یی به گونه‌یی است که گیرداری بیشتری برای خاک ایجاد می‌کند. تیرهای محیطی و لبه‌ها، که سخت‌کننده‌ها به شمار می‌آیند، از عامل‌های مهم این افزایش پایداری محسوب می‌شوند.^[۱]

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری بر روی پی‌های پوسته‌یی با شکل‌های مختلف انجام شده است. در سال ۱۹۹۰، به بررسی رابطه‌های سنتی ظرفیت باربری پی پوسته‌یی تاشده بر روی ماسه پرداخته و با تغییر زاویه‌ی رأس، رابطه‌یی برای ظرفیت باربری پی‌های پوسته‌یی ۸ شکل پیشنهاد شده است.^[۲] در سال ۱۹۹۸، نیز اثرهای ژئوتکنیکی پوسته‌های مخروطی و شکسته‌ی صاف بر روی ماسه با تراکم‌های مختلف

برای نخستین بار در میانه‌ی دهه‌ی ۱۹۵۰ میلادی از یک پی پوسته‌یی در شهر مکزیکو استفاده شده است.^[۱] پی‌های پوسته‌یی، گزینه‌ی اقتصادی و مناسبی برای بارهای سنگین وارده به خاک‌های سست و پوک هستند و استفاده از آن‌ها در مقایسه با پی‌های سطحی در حالت تقارن محوری به هزینه‌ی کمتر و صرفه‌جویی در مصالح منجر می‌شود. تفاوت ویژگی‌های این دو گونه پی در ظرفیت باربری آنهاست.^[۱] پی‌های پوسته‌یی به خاطر شکل مورب، سطح تماس بیشتری با خاک دارند. در نتیجه، این گونه پی‌ها بار بیشتری نسبت به پی تخت را تحمل می‌کنند. شکل ۱، این ویژگی پی پوسته‌یی را نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۱، بین نیروهای این دو گونه پی برقرار است:

$$P_s = \int (P_n \cos \varphi) \cdot dA > P_f = \int P_n dA \quad (1)$$

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۲/۲، اصلاحیه ۱۳۹۵/۳/۵، پذیرش ۱۳۹۵/۶/۱۶

DOI:10.24200/J30.2018.1334

با FRP و تأثیر زاویه‌ی پوسته و ضخامت بر روی هر دو حالت بررسی شده و نتایج به دست آمده نشان داده است که استفاده از FRP، ۴۲ تا ۴۵ درصد ظرفیت باربری پی پوسته‌ی واقع بر روی خاک ماسه را افزایش می‌دهد و سطوح شکست با افزایش ضخامت و زاویه‌ی پوسته عمیق‌تر می‌شوند. همچنین ظرفیت باربری پی معکوس تا ۲۸٪ بیشتر از پی مستقیم با همان هندسه است. و نیز نتیجه گرفته شده است که با افزایش زاویه‌ی پوسته و ضخامت پی پوسته‌ی معکوس، ظرفیت باربری بیشتر می‌شود و تمرکز تنش در پی پوسته‌ی معکوس بسیار کمتر از پی پوسته‌ی ایستاده است.^[۱۱]

در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۳) نیز تأثیر عمق مدفون و زاویه‌ی رأس بر روی پی پوسته‌ی مخروطی با استفاده از تحلیل عددی غیرخطی با نتایج سایر پژوهشگران مقایسه و نتیجه گرفته شده است که فرضیات مطالعه‌ی مذکور با نتایج آزمایشگاهی ۱۰ تا ۱۴ درصد تفاوت دارد و همچنین اضافه کردن تیر لبه و کاهش زاویه‌ی رأس باعث افزایش باربری در پی پوسته‌ی می‌شود.^[۱۲] همچنین در سال ۲۰۱۴، ظرفیت باربری پی پوسته‌ی بر روی ماسه‌ی مسلح بررسی شده و این نتیجه به دست آمده است که با مسلح کردن خاک زیر پی، می‌توان ظرفیت باربری را در خاک ماسه‌ی متراکم تا ۲/۵ برابر و در حالت شل تا ۲/۸ برابر افزایش داد و همچنین با مسلح کردن خاک، ظرفیت باربری پی پوسته‌ی بیشتر می‌شود.^[۱۳]

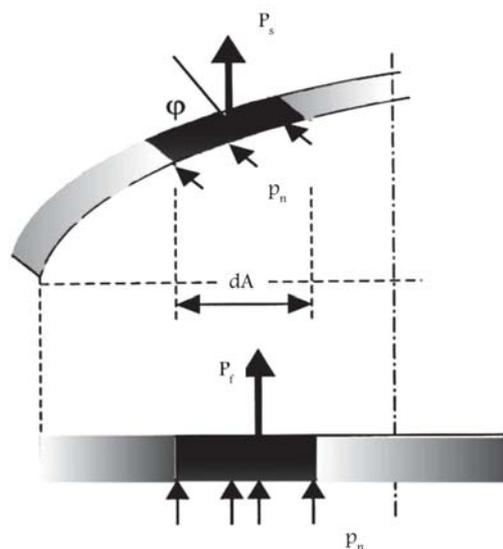
بر پایه‌ی پژوهش‌های انجام شده می‌توان دریافت که بیشتر مطالعات در باره‌ی رفتار کشسان پی‌های پوسته‌ی بوده و بررسی رفتار کشسان - مومسان پی‌های مذکور، نیاز به پژوهش بیشتری دارد. در پژوهش حاضر، مقایسه‌ی رفتار کشسان - مومسان خاک ماسه‌ی واقع در زیرگونه‌هایی از پی نواری پوسته‌ی ناشده بررسی شده است.

۲. مشخصه‌های پی پوسته‌ی

با توجه به مطالعات و پژوهش‌های انجام شده‌ی پیشین و همچنین بررسی‌های انجام شده بر روی انواع شکل‌های پی‌های پوسته‌ی و همچنین کاربردی بودن و امکان پذیر بودن ساخت و اجرای آن‌ها، آزمایش‌های طراحی شده در پژوهش حاضر بر روی ۴ نوع پی پوسته‌ی و یک نوع پی تخت انجام شده است. ۴ الگوی هندسی (پی‌های نوع: A, B, C, D) با عمق‌های مدفون متفاوت، شامل: صفر، B/۵ (معادل نصف عرض پی)، و B (معادل هم عرض پی) بر روی خاک ماسه‌ی شل و متراکم ارزیابی شده است. نتایج تحلیل انجام شده با پی نواری تخت هم عرض معادل خود (پی نوع E) مقایسه و میزان نشست خاک زیر پی با رفتار کشسان - مومسان ارزیابی شده است. مشخصه‌های هندسی الگوی پی‌های مورد آزمایش در پژوهش حاضر در جدول ۱ ارائه شده است، که در آن A_L و A_H به ترتیب سطح مقطع تصویر سطح افق عمود بر نیرو و سطح مقطع عرضی پی بر حسب سانتی‌متر مربع است.

۳. مشخصه‌های خاک زیر پی

برای انجام آزمایش‌ها، ماسه‌ی فیروزکوه با چگالی ویژه $G_s = 2/71$ به عنوان مصالح دانه‌ی زیر پی انتخاب شده است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه‌ی مذکور در جدول ۲ و همچنین نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به وزن مخصوص ماسه در پژوهش حاضر (جدول ۲)، تراکم نسبی (D_r) این خاک در حالت شل ۶۵٪ و در حالت متراکم ۷۸٪ است.



شکل ۱. سطح تماس بیشتر با خاک در پی پوسته‌ی در مقایسه با پی تخت.

بررسی و اثر افزایش عمق پی در افزایش ظرفیت باربری مطالعه شده و این نتیجه به دست آمده است که افزایش عمق پی باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود.^[۵] همچنین در سال ۲۰۰۰، در مطالعه‌ی اثر ترکیبی پی پوسته‌ی و شمع، اندرکنش خاک و سازه، و اثر افزایش ضریب کشسانی خاک بررسی و نگره‌ی تسلیم دراکر - پراگر در حالت کشسان - مومسان استفاده شده است. در مطالعه‌ی مذکور با افزایش ضریب کشسانی خاک، ظرفیت باربری افزایش یافته و استفاده‌ی ترکیبی پی پوسته‌ی و شمع باعث افزایش ظرفیت باربری شده است.^[۶] در مطالعات دیگری (۲۰۰۵) نیز اثر نوع بارگذاری با خروج از محوریت در شکل‌های مختلف پوسته بر روی خاک‌های اصطکاکی و چسبیده بررسی شدند و پی‌ها به صورت کروی، مخروطی و سهمی گونه بودند که به صورت سخت، الگوسازی آزمایشگاهی و عددی شده بودند. در پژوهش مذکور، از رفتار کشسان - مومسان کامل مصالح و نگره‌ی موهر - کلمب استفاده شده است. کاهش ظرفیت باربری در اثر نوع بارگذاری با خروج از محوریت از نتایج مطالعه‌ی مذکور بوده است.^[۷]

در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۰۶)، تحلیل ناخطی کشسان برای پی‌های نواری و منفرد بر روی خاک ماسه‌ی اشباع انجام و افزایش ظرفیت باربری پی در اثر اضافه شدن لبه به انتهای پی پوسته‌ی با روش اجزاء محدود بررسی شده است. اضافه شدن لبه به انتهای پی پوسته‌ی باعث افزایش ظرفیت باربری پی شده است.^[۸] همچنین در سال ۲۰۰۸، اثر خاک مسلح ماسه‌ی و نیز افزایش ارتفاع پی در خاک مسلح در افزایش ظرفیت باربری پی پوسته‌ی بررسی و نتیجه گرفته شده است که افزایش ارتفاع پی و استفاده از خاک مسلح باعث افزایش ظرفیت باربری پی پوسته‌ی می‌شود.^[۹]

مطالعات جامع‌تری نیز بر روی پی‌های پوسته‌ی ناشده در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ انجام شده و تأثیر عمق مدفون ژئوتکتایل در تغییرات ظرفیت باربری پی نواری مثلثی بر روی ماسه‌ی لایه بندی شده‌ی مسلح بررسی و نتیجه گرفته شده است که استفاده از پی مثلثی با زاویه‌ی رأس ۶۰ درجه و قرار دادن ژئوتکتایل در مجاورت پی و در ناحیه‌ی برش شعاعی پارتال، بهترین تأثیر را در افزایش ظرفیت باربری دارد.^[۱۰] همچنین در سال ۲۰۱۲، عملکرد پی پوسته‌ی معکوس و مستقیم در خاک ماسه‌ی با تحلیل آزمایشگاهی و عددی و نیز تأثیر پی پوسته‌ی ترکیب شده

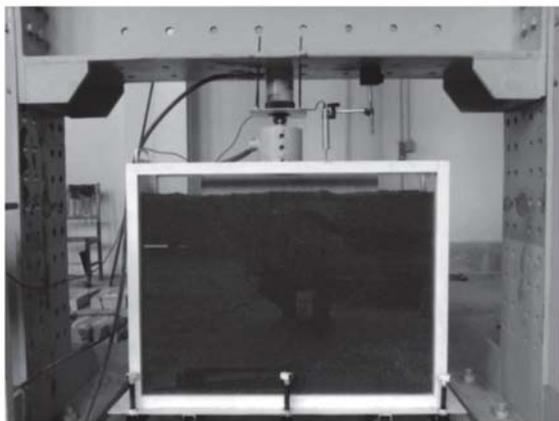
۴. مشخصات دستگاه مورد آزمایش

برای انجام آزمایش‌های طراحی شده بر روی پی‌های پوسته‌پی، دستگاهی ساخته شد تا قادر باشد نیروهای لازم را به پی پوسته‌پی که بر روی خاک قرار دارد، اعمال کند. از این رو چیدمان آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل ۳، برای انجام آزمایش‌های پی‌های پوسته‌پی در نظر گرفته شده است. اجزاء و بخش‌های مختلف دستگاه مذکور، شامل: قاب عکس‌العمل صلب، مخزن نگهدارنده‌ی خاک، جک هیدرولیکی، نیروسنج، تغییر مکان‌سنج و دستگاه قرائت است. قاب عکس‌العمل مورد استفاده، صلبیت بالایی دارد، به گونه‌یی که در برابر بارهای وارده هیچ‌گونه تغییر مکان قابل توجهی نمی‌دهد. مخزن نگهدارنده‌ی خاک به گونه‌یی طراحی شده است که وجه مقابل آن از دیواره‌های شیشه‌یی تشکیل شده است تا بتوان تغییر شکل لایه‌های خاک را در حین انجام آزمایش مشاهده و ثبت کرد.

از آنجایی که گوهی گسیختگی تشکیل شده در زیر پی ۳ تا ۴ برابر عرض پی به طرفین گسترش می‌یابد و با توجه به عرض پی‌های مورد آزمایش، که ۱۰ سانتی‌متر انتخاب شده است، لذا طول مخزن ۱۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع آن بر اساس عمق تأثیر پی‌ها، که حدود ۵ برابر عرض پی است، ۸۵ سانتی‌متر انتخاب شده است. از آنجایی که آزمایش‌های طراحی شده در پژوهش حاضر بر روی پی‌های پوسته‌یی نواری انجام شده است، بنابراین باید شرایط نواری بودن پی یا به وجود آمدن کرنش‌های صفحه‌یی تأمین شود. از این رو، عرض مخزن نگهدارنده‌ی خاک ۲۱ سانتی‌متر و تقریباً برابر با طول پی‌ها در نظر گرفته شده است، تا اجازه‌ی هیچ‌گونه تغییر شکلی در جهت عمود بر صفحه به لایه‌های خاک داده نشود.

جهت اعمال نیرو به پی، از یک جک هیدرولیکی دستی به ظرفیت ۱۰ تن و با بیشینه‌ی دامنه‌ی حرکت پیستون ۳/۵ سانتی‌متر استفاده شده است. از ویژگی مهم جک مذکور، قابلیت اعمال بار با کمینه‌ی سرعت بود که موجب افزایش دقت می‌شد. همچنین یک نیروسنج الکتریکی برای تعیین مقدار نیروی اعمال شده به پی استفاده شده است. جهت ثبت تغییر شکل‌های پی به وجود آمده در لایه‌های خاک زیر پی، یک عدد تغییر مکان‌سنج در مرکز و دو عدد در گوشه‌های پی نصب شد، تا بتوان نشست پی را در نقاط مختلف ثبت کرد.

پی‌های مورد آزمایش از ورق‌های فولادی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر، که به وسیله‌ی جوش‌های سرتاسری به یکدیگر متصل شده‌اند، ساخته شده است تا صلبیت کافی داشته باشند و هیچ‌گونه تغییر شکلی هنگام اعمال بار از خودشان نشان ندهند.



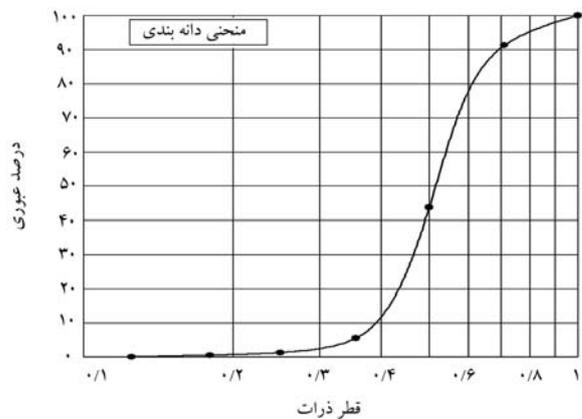
شکل ۳. دستگاه طراحی شده برای انجام آزمایش.

جدول ۱. مشخصه‌های هندسی الگوی پی پوسته‌یی (عرض پی عمود بر صفحه، ۲۰ سانتی‌متر است).

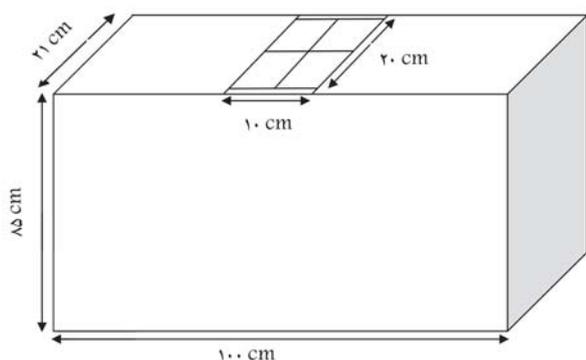
کد پی	A _L	A _H	شکل هندسی پی
A	۱۸	۲۰۰	
B	۱۷	۲۰۰	
C	۱۷	۲۰۰	
D	۲۰	۲۰۰	
E	۱۰	۲۰۰	

جدول ۲. ویژگی‌های ماسه زیر پی.

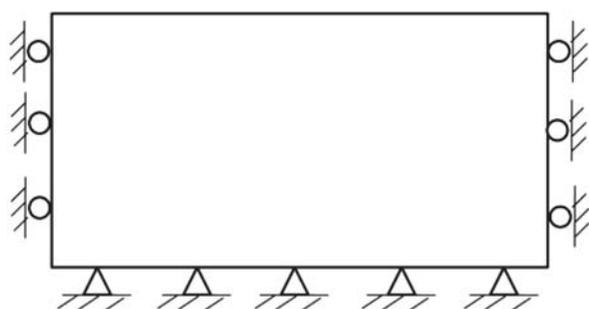
پارامترها	ماسه‌ی شل ماسه‌ی متراکم	
درصد رطوبت	٪۱	٪۱
G _s (چگالی ویژه)	۲٫۷۱	۲٫۷۱
وزن مخصوص خشک بیشینه و کمینه (KN/m ^۳)	۱۳٫۲۳	۱۵٫۸۵
وزن مخصوص خشک در پژوهش حاضر (KN/m ^۳)	۱۳٫۸۹	۱۵٫۱۱
نسبت تخلخل	۱٫۰۴۸	۰٫۷۰۹
زاویه اصطکاک داخلی Φ (درجه)	۲۵	۳۲
زاویه‌ی اتساع ψ (درجه)	۲	۳
نسبت پواسون	۰٫۳	۰٫۳
مدول یانگ (KN/m ^۲)	۳۵	۱۸۰
الگوی رفتار مصالح	دراگر - پراگر	



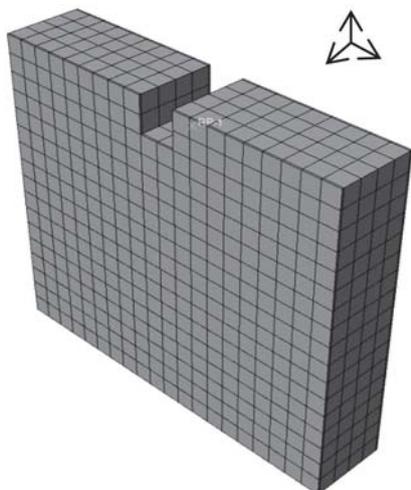
شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه.



شکل ۴. ابعاد به کار رفته در مدل عددی.



شکل ۵. شرایط مرزی مدل‌سازی.



شکل ۶. مش‌بندی مدل خاک و پی.

مش‌بندی خاک و پی در مدل‌سازی عددی در شکل ۶ ارائه شده است. در مدل‌سازی مذکور از شکل المان Hex برای توده‌ی سه بعدی خاک و از شکل المان Quad برای المان صلب پی استفاده شده است.

۶. بحث و بررسی نتایج

در بخش کنونی، در مورد نتایج آزمون‌ها و تحلیل عددی بحث شده است. به منظور تفکیک نتایج، نمودارها با یک کد مشخص شده‌اند، که با یکی از حروف A، B، C،

آزمایش‌های انجام شده، شامل: استقرار پی روی سطح خاک مدفون به مقدار ۵۰٪ و ۱۰۰٪ عرض پی، در دو نوع ماسه‌ی شل و متراکم بوده است. در پژوهش حاضر، آزمایش‌های انجام شده بر روی ۵ نوع پی متفاوت انجام شده است (پی‌های نوع: A، B، C، D، E) برای هر نوع پی، ۶ آزمایش با تغییر در تراکم ماسه و تغییر در عمق مدفون پی انجام شده است. پی‌های نوع: A، B، C، D پی پوسته‌ی پی نوع E از نوع پی‌های تخت و مسطح معمول بوده‌اند. دلیل انجام آزمایش روی پی مسطح، فقط مقایسه‌ی رفتار پی‌های پوسته‌ی پی با پی‌های تخت بوده است.

۵. مدل رفتاری خاک در مدل‌سازی عددی

۱.۵. مدل رفتاری دراکر - پراگر

یک مشخصه‌ی اصلی از مواد دانه‌ی پی، حرکت نسبی بین دانه‌هاست، که منجر به تغییر شکل‌های برگشت ناپذیر در آن‌ها می‌شود. استفاده از تئوری حالت خمیری مناسب در بررسی رفتار مکانیکی این نوع مصالح بسیار تأثیرگذار است. در تحلیل عددی، مدل حالت خمیری دراکر - پراگر برای خاک ماسه‌ی استفاده شده است. مهاراج نیز در تحلیل عددی خود از همین مدل رفتاری استفاده کرده است.^[۶] این معیار تقریبی از قانون کولمب توسط دراکر - پراگر (۱۹۵۲) به عنوان اصلاحی بر معیار ون میسن جهت تأثیر تنش هیدرواستاتیک در تسلیم منظور و تابع تسلیمی به صورت رابطه‌ی ۲ ارائه شده است:^[۱۴]

$$F = 3\alpha\sigma_m + \sqrt{J_2'} - K' = 0 \quad (2)$$

برای تعیین پارامترهای مدل رفتاری دراکر - پراگر (d و β)، از پارامترهای مقاومت برشی خاک مورد آزمایش که بر مبنای معیار موهر-کولمب (C ، ϕ) تعیین می‌شوند، از معادله‌های ۳ و ۴ برای تبدیل پارامترهای مذکور به پارامترهای مدل رفتاری دراکر - پراگر استفاده شده است:^[۱۵]

$$\tan\beta = \frac{6\sin\phi'}{3 - \sin\phi'} \quad (3)$$

$$d = \frac{1.6c\cos\phi'}{3 - \sin\phi'} \quad (4)$$

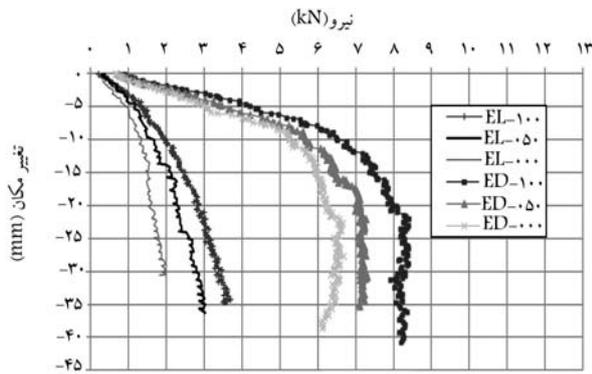
۲.۵. هندسه‌ی مدل

در نرم‌افزار ABAQUS می‌توان مدل‌های سه بعدی مختلف و متنوعی را بر حسب کاربرد و هندسه‌ی مدل ایجاد کرد. شکل ۴، طرح مدل‌سازی انجام شده برای پی E را نشان می‌دهد. مدل از دو قسمت خاک و پی تشکیل شده است.

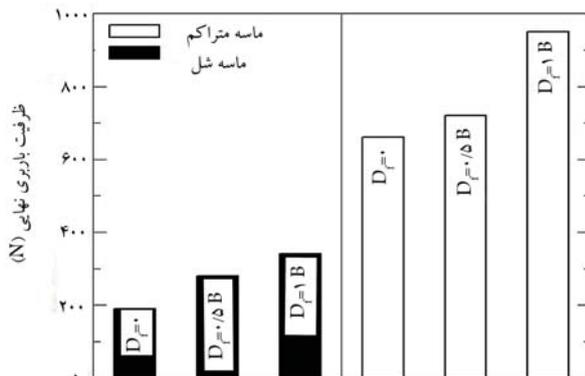
پی با جسم صلب^۱ مدل‌سازی شده و برای هر پی نیز یک نقطه‌ی مرجع^۲ انتخاب و کل پی به نقطه‌ی مرجع خودش مقید شده است. در جسم صلب، نیروها و شرایط مرزی جسم به نقطه‌ی مرجع اعمال می‌شود. همچنین خاک با المان پوسته^۳ مدل‌سازی و تغییر مکان در قسمت بالای پی و به نقطه‌ی مرجع وارد می‌شود.

۳.۵. شرایط مرزی

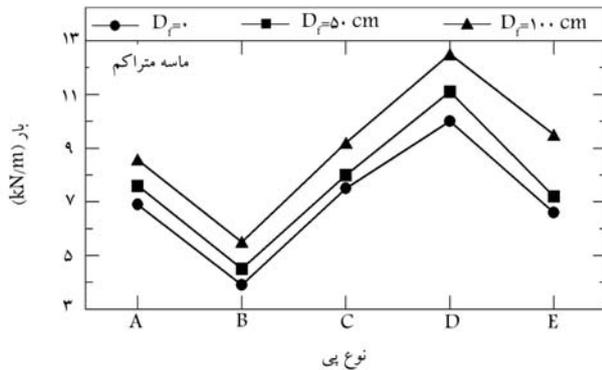
شکل ۵، شرایط مرزی مدل‌سازی را نشان می‌دهد. کف مدل در هر ۳ جهت x، y و z بسته شده است. اطراف مدل در دو جهت x و z بسته شده است تا بتوان تغییرات را در جهت y بررسی کرد. برای همه‌ی پی‌ها، تغییر مکان با سرعت ثابت اعمال و مقادیر نیروی استخراج شده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.



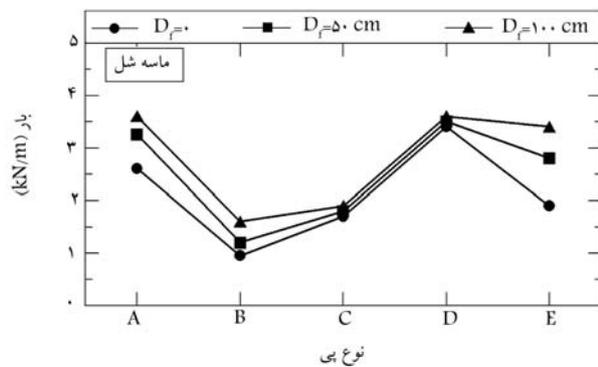
شکل ۷. نمودار نیرو - تغییر مکان برای پی تخت (نوع E).



شکل ۸. تغییرات ظرفیت باربری پی تخت (نوع E) با عمق مدفون.



شکل ۹. تغییرات ظرفیت باربری با عمق قرارگیری انواع پی در ماسه متراکم.



شکل ۱۰. تغییرات ظرفیت باربری با عمق قرارگیری انواع پی در ماسه شل.

D و E، که معرف نوع پی است (جدول ۱)، شروع می‌شود. حرف دوم L و D به ترتیب معرف ماسه‌ی شل و متراکم و اعداد ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ به ترتیب بیان‌گر عمق مدفون پی در ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ درصد معادل عرض پی است. همان‌گونه که بیان شد، آزمون‌های انجام شده روی پی تخت فقط جهت مقایسه با پی‌های پوسته‌یی بوده است. در ادامه، نتایج آزمایش‌ها ارائه شده است.

۱.۶. اثر عمق مدفون و تراکم ماسه در پی تخت (گروه E)

نمودار تغییر مکان نهایی پی تخت (E) در شکل ۷، برای ماسه‌ی شل با پسوند (L) و ماسه‌ی متراکم با پسوند (D) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش عمق مدفون پی و تراکم ماسه تأثیر به‌سزایی در افزایش ظرفیت باربری دارد. با مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی پی نواری تخت نوع E نتیجه شده است که فقط با افزایش تراکم ماسه در عمق مدفون یکسان و در عمق مدفون صفر، ظرفیت باربری در ماسه‌ی متراکم ۳۷/۴۷ برابر و در عمق مدفون معادل ۵۰٪ عرض پی، ظرفیت باربری ۲۷/۵۷ برابر و در عمق مدفون (معادل عرض پی) ظرفیت باربری ۲۷/۹۹ برابر بیشتر از پی مشابه با همان عمق مدفون واقع بر روی ماسه‌ی شل است. همچنین همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش عمق مدفون ظرفیت باربری نیز افزایش می‌یابد، به‌گونه‌یی که افزایش این مقدار تا عمق ۵۰٪ عرض پی در ماسه‌های شل و متراکم به ترتیب باعث افزایش ۴۰٪ و ۹٪ در ظرفیت باربری پی می‌شود.

در صورت افزایش تا عمق معادل ۱۰۰٪ عرض پی، ظرفیت باربری در ماسه‌های شل و متراکم به ترتیب ۷۹٪ و ۴۴٪ نسبت به حالت اولیه افزایش می‌یابد. در شکل ۸، تغییرات ظرفیت باربری نهایی پی تخت (نوع E) برای ماسه‌های شل و متراکم نشان داده شده است. با مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی پی نوع E می‌توان نتیجه گرفت که ظرفیت باربری پی در ماسه‌ی متراکم بدون دفن شدگی ۳۷/۴۷ برابر، در عمق مدفون B ۵۰٪ حدود ۲۷/۵۷ برابر و در عمق مدفون معادل B، حدود ۲۷/۹۹ برابر ظرفیت باربری پی در نمونه‌ی ماسه‌ی شل است.

۲.۶. اثر عمق مدفون و تراکم ماسه در پی‌های پوسته‌یی.

با مطالعه‌ی نتایج به دست آمده از انجام آزمایش‌ها مشخص شد که افزایش عمق مدفون در انواع پی‌های پوسته‌یی در هر دو نوع خاک موجب افزایش ظرفیت باربری می‌شود (شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب برای ماسه‌ی شل و ماسه‌ی متراکم). همچنین افزایش تراکم ماسه و عمق قرارگیری پی در انواع پی‌ها، نیز سبب افزایش ظرفیت باربری این نوع پی‌ها می‌شود.

بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده در حالت‌های مختلف عمق مدفون و تراکم ماسه، می‌توان رفتار ژئوتکنیکی انواع گونه‌های مختلف پی‌های پوسته‌یی را به این شرح دسته‌بندی کرد:

-- در عمق مدفون یکسان، ظرفیت باربری انواع پی‌ها در ماسه‌ی شل از بیشترین مقدار به کمترین مقدار نوع D، نوع A، نوع E، نوع C و نوع B است.

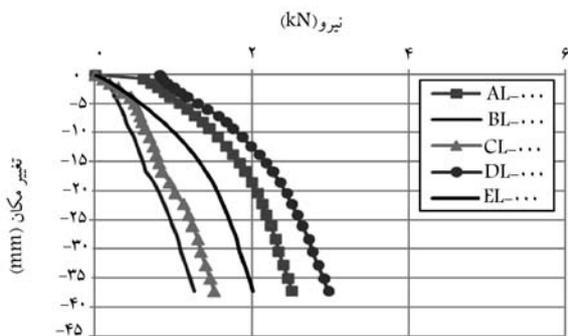
-- در عمق مدفون یکسان، ظرفیت باربری انواع پی‌ها در ماسه‌ی متراکم از بیشترین مقدار به کمترین مقدار نوع D، نوع C، نوع A، نوع E و نوع B است.

۳.۶. نتایج تحلیل عددی و آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی انواع

پی‌های پوسته‌پی

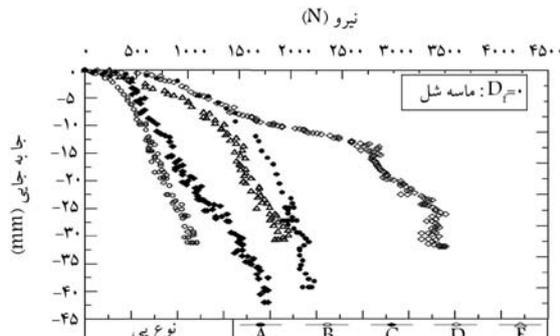
به پی تخت نزدیک بوده و ۵ تا ۱۰ درصد اختلاف دارد. شکل‌های ۹ و ۱۰، بیان‌گر تأثیر شکل پی پوسته‌پی در ظرفیت باربری هستند. شکل‌ها به وضوح نشان می‌دهند ظرفیت باربری پی‌های پوسته‌پی بسته به شکل آنها می‌تواند از ظرفیت باربری پی‌های تخت بیشتر و یا حتی کمتر باشد. به عبارتی، شکل و زاویه پی پوسته‌پی و نوع وارونه بودن یا حالت مستقیم آن، تأثیر به‌سزایی در ظرفیت باربری نهایی دارد. شکل‌های ۱۱ الی ۱۳، بیان‌گر این نکته در ظرفیت باربری نهایی هستند و تأثیر تغییر شکل پی‌ها را بر روی ماسه‌ی شل در عمق‌های مدفون متفاوت نشان می‌دهند.

بر پایه‌ی آزمایش‌ها و مدل‌سازی صورت گرفته، ظرفیت باربری فونداسیون پوسته‌پی نوع D در تمامی آزمایش‌های انجام شده به دلیل شکل آن از همه بیشتر و مقدار آن با پی تخت در حالت متراکم تا حدود ۵۰٪ و در حالت شل تا ۷۵٪ بیشتر بوده است. شکل پی نوع B به گونه‌ی است که ظرفیت باربری آن از پی تخت کمتر است. لذا استفاده از آن در این حالت توصیه نمی‌شود. ظرفیت باربری پی نوع A

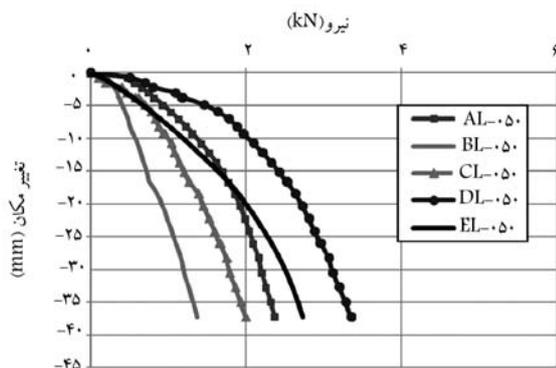


ب) نتایج تحلیل عددی.

شکل ۱۱. نمودار نیرو - تغییر مکان انواع پی در عمق مدفون صفر واقع بر ماسه‌ی شل.

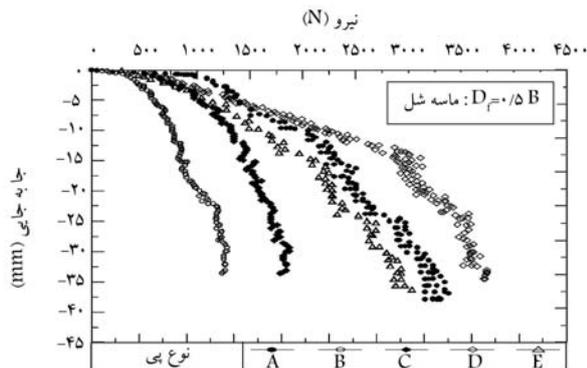


الف) نتایج آزمایشگاهی؛

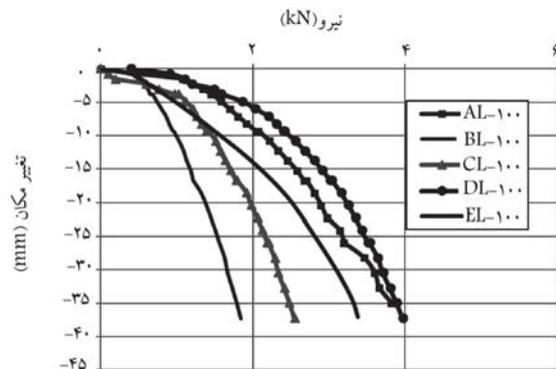


ب) نتایج تحلیل عددی.

شکل ۱۲. نمودار نیرو - تغییر مکان انواع پی در عمق مدفون معادل ۵۰٪ عرض پی واقع بر ماسه‌ی شل.

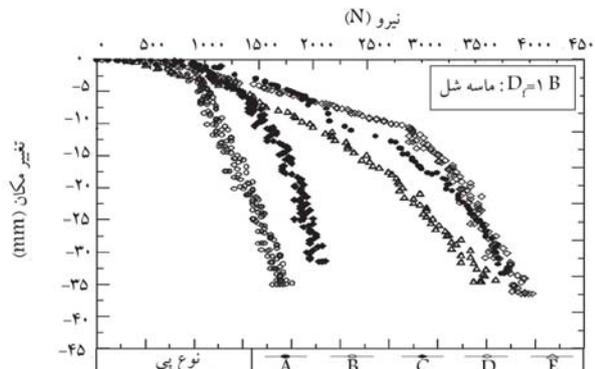


الف) نتایج آزمایشگاهی؛



ب) نتایج تحلیل عددی.

شکل ۱۳. نمودار نیرو - تغییر مکان انواع پی در عمق مدفون معادل ۱۰۰٪ عرض پی واقع بر ماسه‌ی شل.

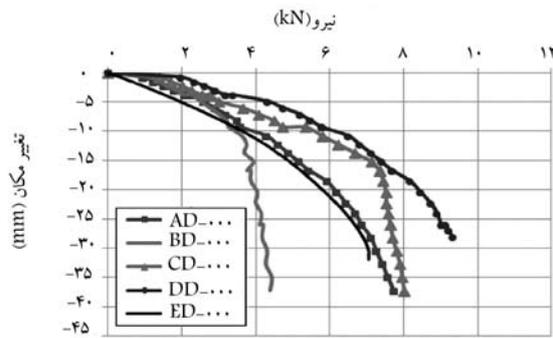


الف) نتایج آزمایشگاهی؛

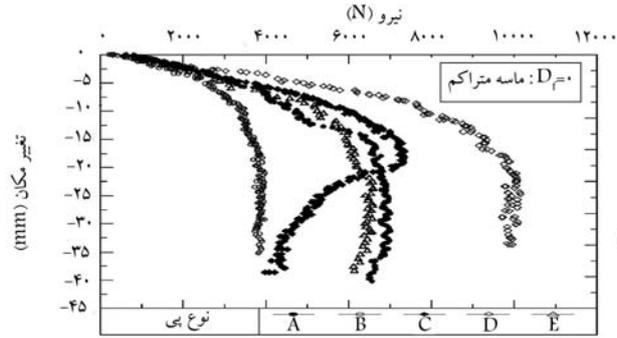
۷. بحث و بررسی نتایج

تا ۱۰٪، ۲۴٪ نتایج اختلاف ۱۰ تا ۲۰ درصد، و ۱۶٪ اختلاف ۲۰ تا ۳۰ درصد دارند. همچنین نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۱ الی ۱۳، بیان‌گر این نکته هستند که در صورت افزایش عمق مدفون معادل ۵۰٪ عرض پی و معادل عرض پی، ظرفیت باربری برای یک نوع پی در ماسه‌ی شل به ترتیب ۵ تا ۵۷ درصد و ۶ تا ۷۹ درصد افزایش می‌یابد. میزان افزایش ظرفیت باربری در ماسه‌ی متراکم اندکی متفاوت است، به گونه‌ی که در صورت افزایش عمق مدفون معادل ۵۰٪ عرض پی و معادل عرض پی، ظرفیت باربری به ترتیب ۱۰ تا ۱۵ درصد و ۲۵ تا ۴۴ درصد افزوده می‌شود. نتایج این موضوع در شکل‌های ۱۴ الی ۱۶ نشان داده شده است. لذا

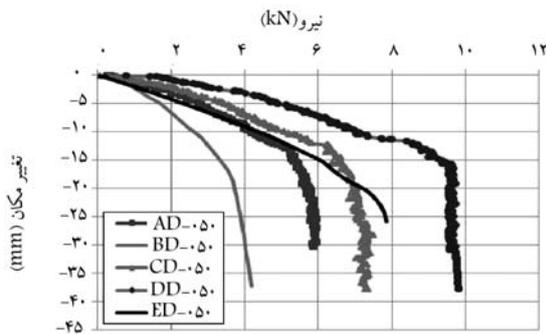
تأثیر شکل پی در ظرفیت باربری پی پوسته‌پی بر روی ماسه‌ی متراکم، مشابه عملکرد آن بر روی ماسه‌ی شل است. همان‌گونه که از نمودارهای ارائه شده مشاهده می‌شود، در مورد انواع مختلف پی‌های پوسته‌پی ارائه شده در پژوهش حاضر می‌توان گفت که به دلیل نوع شکل و قرارگیری آن‌ها، بیشترین ظرفیت باربری را در شرایط یکسان عمق مدفون و تراکم ماسه، پی پوسته‌پی نوع D و کمترین میزان ظرفیت باربری را پی نوع B دارد. مقایسه‌ی آزمون‌های آزمایشگاهی و تحلیل عددی در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ۶۰٪ نتایج به دست آمده اختلاف



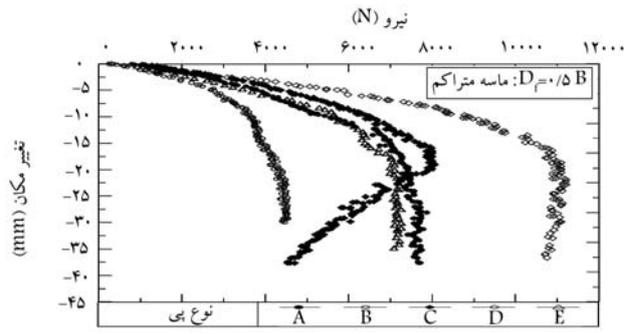
شکل ۱۴. نمودار نیرو - تغییر مکان انواع پی در عمق مدفون صفر واقع بر ماسه‌ی متراکم.



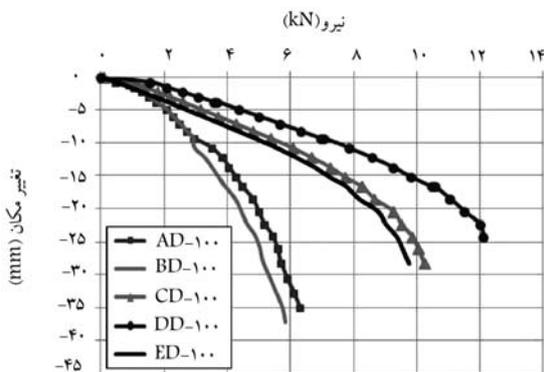
شکل ۱۴. نتایج آزمایشگاهی؛



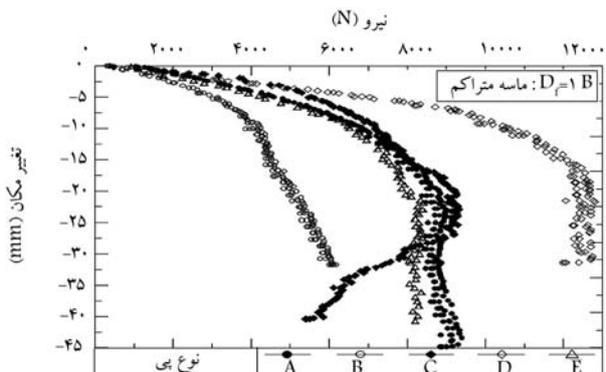
شکل ۱۵. نمودار نیرو - تغییر مکان انواع پی در عمق مدفون معادل ۵۰٪ عرض پی واقع بر ماسه‌ی متراکم.



شکل ۱۵. نتایج آزمایشگاهی؛



شکل ۱۶. نمودار نیرو - تغییر مکان انواع پی در عمق مدفون معادل ۱۰۰٪ عرض پی واقع بر ماسه‌ی متراکم.



شکل ۱۶. نتایج آزمایشگاهی؛

جدول ۳. نتایج آزمایش‌ها و مدل‌سازی عددی ظرفیت باربری پی‌های پوسته‌یی در عمق‌های مدفون مختلف (kN).

۴						
۸,۵۷	۷,۶	۶,۹	۳,۶	۳,۲۵	۲,۶	آزمایش
۶,۳	۵,۹	۷,۸	۳,۶	۲,۲	۲,۵	مدل‌سازی
%۲۶	%۲۲	%۱۳	۰	%۳۲	%۴	درصد اختلاف ظرفیت باربری نهایی آزمایشگاهی عددی
۵,۵	۴,۵	۳,۹	۱,۶	۱,۲	۰,۹۵	آزمایش
۵,۹	۴,۱	۴,۳	۱,۹	۱,۲	۱,۲	مدل‌سازی
%۷	%۹	%۱۰	%۱۹	۰	%۲۶	درصد اختلاف ظرفیت باربری آزمایشگاهی و عددی
۹,۲	۸	۷,۵	۱,۹	۱,۷	۱,۷	آزمایش
۱۰,۲	۷	۸	۲,۵	۱,۹	۱,۴	مدل‌سازی
%۱۱	%۱۲	%۷	%۳۱	%۱۲	%۱۷	درصد اختلاف ظرفیت باربری آزمایشگاهی و عددی
۱۲,۵	۱۱,۱	۱۰	۳,۶	۳,۵	۳,۴	آزمایش
۱۲,۱	۹,۶	۸,۹	۴	۳,۳	۲,۹	مدل‌سازی
%۳	%۱۴	%۱۱	%۱۱	%۶	%۱۵	درصد اختلاف ظرفیت باربری آزمایشگاهی و عددی
۹,۵	۷,۲	۶,۶	۳,۴	۲,۸	۱,۹	آزمایش
۹,۸	۷,۹	۷,۱	۳,۳	۲,۶۵	۱,۸۵	مدل‌سازی
%۳	%۹	%۷,۶	%۳	%۵	%۳	درصد اختلاف ظرفیت باربری آزمایشگاهی و عددی

و ماسه‌ی متراکم، ظرفیت باربری پی پوسته‌یی نوع B کمتر از پی تخت نوع E است.

در شرایط یکسان عمق مدفون پی و تراکم خاک، ظرفیت باربری پی پوسته‌یی ناشده‌ی چهاروجهی نوع D نسبت به پی نواری تخت (نوع E) و گونه‌های دیگر پی نواری پوسته‌یی پژوهش حاضر بیشتر است. بیشینه‌ی اختلاف افزایش ظرفیت باربری در حالتی اتفاق افتاده است که پی در سطح ماسه‌ی شل قرار گرفته است. در این حالت ظرفیت باربری در پی پوسته‌یی نوع D، ۷۲٪ بیشتر از پی نوع B است. لذا استفاده از شکل پی پوسته‌یی نوع D به جای سایر پی‌ها توصیه می‌شود.

با افزایش عمق مدفون، ظرفیت باربری پی نواری پوسته‌یی بیشتر می‌شود. به طوری که با افزایش عمق مدفون تا عمق ۵۰٪ عرض پی در ماسه‌ی شل معمولاً بین ۳ تا ۵۷ درصد و در ماسه‌ی متراکم بین ۹ تا ۱۵ درصد باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود. همچنین استقرار پی در عمق معادل عرض پی در ماسه‌ی شل بین ۶ تا ۷۹ درصد و در ماسه‌ی متراکم بین ۲۵ تا ۴۴ درصد ظرفیت باربری افزوده می‌شود.

با افزایش تراکم خاک، ظرفیت باربری پی نواری پوسته‌یی بیشتر می‌شود. به طوری که افزایش تراکم نمونه‌ی ماسه و بهبود پارامترهای مکانیکی آن سبب افزایش ۲,۵ تا ۴,۸ برابری در ظرفیت باربری پی پوسته‌یی می‌شود.

پژوهش حاضر نشان داد که افزایش تراکم نمونه‌ی ماسه و بهبود پارامترهای مکانیکی آن سبب افزایش ۲,۵ تا ۴,۸ برابری در ظرفیت باربری پی پوسته‌یی می‌شود. هانا و عبد الرحمن^[۱۴] هم به نتایج مشابهی در تحلیل ظرفیت باربری پی با افزایش عمق مدفون رسیده‌اند.

۸. نتیجه‌گیری

همان‌گونه که قبلاً بیان شد، برتری‌های پی‌های پوسته‌یی تخت در شکل‌های ظاهری آن‌هاست، به گونه‌یی که می‌توان بیان کرد که بخش‌های زیادی از مقاومت و استحکام ساختارهای پوسته‌یی از هندسه و شکل ظاهری آن‌ها سرچشمه می‌گیرد و نه از جرم و حجم مصالح به کار رفته در آن‌ها. با توجه به آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر، این نتایج در مورد ظرفیت باربری پی‌های پوسته‌یی نواری در خاک‌های ماسه‌یی به دست آمده است:

شکل ظاهری پی‌های پوسته‌یی و میزان تراکم خاک و عمق مدفون در ظرفیت باربری آن‌ها بسیار مؤثر است.

استفاده از پی پوسته‌یی نوع B برای بهبود ظرفیت باربری به جای پی تخت توصیه نمی‌شود. زیرا در شرایط یکسان عمق مدفون و در نمونه‌ی ماسه‌ی شل

پانوشتها

1. rigid body
2. reference point
3. solid

منابع (References)

1. Candela, F. "Structural applications of hyperbolic paraboloidal shell", *Journal of the American Concrete Institute*, **26**, pp. 397-415 (1955).
2. Kurian, N. P., *Shell Foundations*, Alpha Science International Ltd., India (2006).
3. Alraziqi, A.A. "Geotechnical behavior of shell footings", Ph.D. Thesis, University Putra Malaysia (2006).
4. Abdel-Rahman, M. and Hanna, A.M. "Ultimate bearing capacity of triangular shell footings on sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **116**(12), pp. 1851-1863 (1998).
5. Hanna, A.M. and Abdel-Rahman, M. "Experimental investigation on shell foundations on dry sand", *Canadian Geotechnical Journal*, **35**(5), pp. 847-857 (1998).
6. Maharaj, D.K. "Finite element analysis of conical shell foundation", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **9**, p. 348 (2000).
7. Kurian, N.P. and Jayakrishna, D.V.M. "Analytical studies on the geotechnical performance of shell foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, **42**(2), pp. 562-573 (2005).
8. Bujang, B.K.H. and Thamer, A.M. "Finite element study using FE code (PLAXIS) on the geotechnical behavior of shell footing", *Journal of Computer Science*, **2**(1), pp. 104-108 (2006).
9. Esmaili, D. and Hataf, N. "Experimental and numerical investigation of ultimate bearing capacity of shell foundations on reinforced and unreinforced sand", *Iranian Journal of Science and Technology*, **32**(5), pp. 491-500 (2008).
10. Shaligram, P. S. "Behavior of triangular shell strip footing on geo-reinforced layered sand", *International Journal of Advanced Engineering Technology*, **2**(2), pp.192-196 (2011).
11. Rinaldi, R. "Inverted shell foundation performance in soil", Ph.D. Thesis, Concordia University (2012).
12. Al-Azzawi, A. A. "A Study of the behavior of shell footings using Finite element analysis", *Eng. And Tech. Journal*, **31**(19, Part A), pp. 90-102 (2013).
13. Azzam, W. R. and Nasr, A. M. "Bearing capacity of shell strip footing on reinforced sand", *Journal of Advanced Research*, **6**(5), pp. 727-737 (2015).
14. Constitutive Laws Desai, C. S. and Siriwardane, H. J., *for Engineering Materials With Emphasis on Geologic Materials*, Printed in the United States of America, pp. 244-246 (1984).
15. Helwany, S., *Applied Soil Mechanics with ABAQUS Application*, Printed in the United States of America, pp. 61-66 (2007).