

## بررسی ظرفیت باربری نهایی پی مرکب حلقوی پوسته‌ای در خاک دانه‌ای

مجید کاظمی، جعفر بلوری بزاز\*

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه عمران، مشهد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۷ اسفند ۱۳۹۵  
بازنگری: ۳ اردیبهشت ۱۳۹۶  
پذیرش: ۱۶ خرداد ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۲۳ خرداد ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

ظرفیت باربری  
پی مرکب  
پی پوسته‌ای  
پی حلقوی  
ماسه

**چکیده:** شکل پی به علت نحوه گسترش تنش در خاک زیر پی و تغییر در مکانیزم گسیختگی خاک، نقش تعیین‌کننده‌ای در ظرفیت باربری یک سیستم شالوده دارا است. محدودیت منابع جهت‌گیری طراحی‌ها را به استفاده از روش‌های نوین به منظور بهره‌گیری از حداقل مصالح برای دستیابی به حداکثر کارایی سوق داده است. هدف این تحقیق مطالعه و بررسی رفتار ژئوتکنیکی پی مرکب حلقوی پوسته‌ای و مقایسه آن با پی‌های حلقوی است. برای رسیدن به این منظور تعدادی آزمایش بر روی پی‌های مرکب حلقوی پوسته‌ای با زوایای پوسته مختلف به صورت مدلسازی آزمایشگاهی در سه حالت ماسه سست، متوسط و متراکم انجام شده است. برای بررسی اثر وجود تیر لبه و همچنین محل قرارگیری آن بر روی ظرفیت باربری پی مرکب، از دو نوع پی با زاویه پوسته ۱۲۰ درجه با تیر لبه در دو ناحیه محیطی و میانی استفاده شده است. در حین انجام آزمایش‌ها و با کمک ابزار دقیق، داده‌های بار-نشست به دقت ثبت شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که بارنهایی پی‌های مرکب بیشتر از پی حلقوی است و با افزایش زاویه پوسته، مقدار بارنهایی کاهش یافته است. همچنین بازدهی پوسته‌ها در خاک‌های با تراکم کمتر مطلوب‌تر است. یک رابطه جهت پیش‌بینی ظرفیت باربری نهایی پی مرکب ارائه شده است. با افزودن تیر محیطی به پی مرکب ضمن رفتار بهتر این پی‌ها در نشست‌های لحظه گسیختگی، افزایش بازدهی پوسته در همه تراکم‌ها نسبت به پی مرکب فاقد تیر محیطی مشاهده شده است. بنابراین وجود پوسته و تیر لبه در پی حلقوی باعث بهبود و تقویت ظرفیت باربری نهایی می‌گردد.

### ۱- مقدمه

ایجاد بیشترین کارایی با استفاده از کمترین مصالح، یکی از مهمترین اهداف علوم مهندسی است. با توجه به اهمیت شالوده و نقش تعیین‌کننده آن در پایداری سازه‌ها، محققان و پژوهشگران جهت ساخت پی‌های امن‌تر و اقتصادی‌تر به ارائه طرح‌های جدید روی آورده‌اند که از جمله می‌توان به فونداسیون شالوده‌های حلقوی و پوسته‌ای اشاره کرد.

پی حلقوی برای اکثر سازه‌های با هندسه تقارن محوری و بار قائم، یک پی مناسب و اقتصادی بوده و استفاده عملی از آن نسبت به پی دایره‌ای بسیار با صرفه‌تر است [۱]. در ادبیات فنی مطالعات متعدد آزمایشگاهی برای بدست آوردن ظرفیت باربری نهایی پی حلقوی تحت بار محوری و بار خارج از مرکز بر روی خاک ماسه‌ای مسلح و غیرمسلح وجود دارد. از نتایج مهم این مطالعات، افزایش حدود ۲۰ تا ۲۵ درصدی ظرفیت باربری پی حلقوی با نسبت قطر داخلی به خارجی بین ۰/۲ تا ۰/۴، نسبت به پی دایره‌ای با همان قطر خارجی بوده است [۲-۵]. افزایش ظرفیت باربری می‌تواند مربوط به پدیده قوس‌زدگی در خاک داخل حفره پی حلقوی باشد که با افزایش این نسبت به بیشتر از ۰/۴ این پدیده از بین می‌رود به طوری‌که برای نسبت بیشتر از ۰/۶ پی حلقوی به صورت دو پی نواری مستقل عمل می‌کند [۶].

کارولف<sup>۱</sup> با مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی ظرفیت باربری پی‌های حلقوی، نمودارها و جداولی برای محاسبه ظرفیت باربری این پی‌ها ارائه نموده است [۷]. همچنین ظرفیت باربری پی‌های حلقوی با استفاده از روش‌های تحلیلی مختلف مانند تحلیل خطوط مشخصه، تحلیل تفاضل محدود و تحلیل اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است [۸-۱۱].

پی پوسته‌ای به خاطر شکل مورب، سطح تماس بیشتری با خاک داشته و قادر به تحمل بار بیشتری نسبت به پی تخت متناظر با آن است. پژوهش‌های آزمایشگاهی و عددی زیادی در سال‌های اخیر بر روی پی‌های پوسته‌ای با شکل‌های مختلف انجام پذیرفته است [۱۲-۱۷]. هنا و عبدالرحمن<sup>۲</sup> رفتار ژئوتکنیکی پی‌های پوسته‌ای مثلثی، مخروطی و هرمی را با دو رویکرد ظرفیت باربری و نشست مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که پی پوسته‌ای عملکرد بهتر و قابل قبول‌تری نسبت به پی مسطح دارد. همچنین سطوح گسیختگی برای پی پوسته‌ای عمیق‌تر از پی مسطح بود که نشان از ظرفیت باربری بیشتر پی‌های پوسته‌ای نسبت به نمونه‌های مسطح است [۱۸]. اسماعیلی و هاتف<sup>۳</sup> هشت نمونه‌ی مخروطی و هرمی بر روی ماسه‌ی تقویت شده و تقویت نشده را مورد آزمایش قرار داده و با نتایج تحلیل عددی

1 Karaulov

2 Hanna and Abdel-Rahman

3 Esmaili and Hataf

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: bolouri@um.ac.ir

باشد. این تفاوت‌ها در درجه اول به دلیل اختلاف در سطح تنش بین مدل و شرایط واقعی است، به طوری که سطح تنش در مدل کوچک مقیاس بسیار کوچک‌تر از تنش در زیر پی‌های بزرگ مقیاس است. در خاک‌های دانه‌ای زاویه اصطکاک داخلی با سطح تنش ارتباط معکوس دارد؛ بنابراین متوسط مقاومت برشی بسیج شده در طول خطوط لغزش در زیر پی با افزایش عرض پی کاهش می‌یابد [۵].

به دلیل رابطه مستقیم میزان ظرفیت باربری با عرض پی‌های مدل و نیاز به ایجاد یک سیستم عکس‌العمل بزرگ، مطالعات متعددی که تاکنون برای بررسی رفتار پی‌های سطحی صورت گرفته بر روی نمونه‌های کوچک بوده است. بررسی اثر مقیاس در تمامی آزمایش‌ها با مدل کوچک مقیاس به‌ویژه در خاک ماسه‌ای، امری ضروری است. تحقیق پیش‌رو بر روی مدل فیزیکی کوچک مقیاس انجام شده است. لذا برای چنین مدلی باید تأثیر برخی از پارامترهای مهم شامل اندازه ذرات خاک، روش ساخت، شرایط مرزی و ... بر نتایج، مورد مطالعه بیشتر قرار گیرد.

در این پژوهش مجموعه‌ای آزمایشگاهی طراحی و اجرا شده است تا امکان اعمال نیرو به پی مرکب روی خاک دانه‌ای با تراکم معین فراهم شود. چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایشگاه شامل مخزن خاک، دستگاه تهیه نمونه ماسه با تراکم مورد نظر، پی، قاب عکس‌العملی صلب، جک هیدرولیکی، نیروسنج، تغییر مکان سنج و دستگاه ثبت اطلاعات است. انتخاب صحیح این اجزا بر عملکرد مناسب مجموعه موثر است. در طول آزمایش مقدار بار وارده و نشست متناظر پی اندازه‌گیری و ثبت شده است. در ادامه مشخصات فنی هریک از قسمت‌های این سیستم ارائه شده است.

## ۲-۱- مخزن و پی

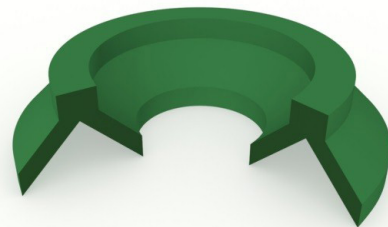
مخزن خاک باید علاوه بر نگهداری نمونه خاک، شرایط مورد نظر در مدل‌سازی را ایجاد نماید. همچنین باید دیواره‌های آن صلب و دارای کمترین میزان اصطکاک باشد. ابعاد مخزن با توجه به تحلیل اجزای محدود با در نظر گرفتن بعد پی و مشاهده حوزه تأثیر تنش‌ها، برای جلوگیری از وارد شدن اثر دیواره‌ها در مقدار ظرفیت باربری حاصل گردیده است. مطالعات قبلی استفاده از مخزنی با حداقل قطر پنج برابر قطر پی را توصیه نموده است. همچنین در شالوده‌های غیرمسلح، در صورتیکه عمق لایه صلب از کف پی بیش از دو برابر عرض پی باشد، ارتفاع مخزن تأثیری روی ظرفیت باربری ندارد [۲۳]. در این پژوهش با توجه به وجود تقارن در پی‌های مدل‌سازی شده، از یک مخزن استوانه‌ای به عنوان مخزن خاک استفاده شده است تا در هنگام آزمایش محور تقارن پی و مخزن در یک راستا قرار گیرد. دیواره‌های داخلی مخزن به منظور کاهش هرگونه اصطکاک با ماسه تا حد امکان صاف و هموار شده است.

بنابراین با توجه به ابعاد مدل، محفظه استوانه‌ای به قطر ۱۵۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متر با ورق فولادی به ضخامت ۴ میلی‌متر ساخته شده است. این مخزن به منظور جلوگیری از هرگونه تغییر شکل جانبی جداره‌ها،

مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت باربری شالوده‌های پوسته‌ای نسبت به انواع مسطح بیشتر است [۱۹].

کالمنارس و همکاران<sup>۱</sup> رفتار ژئوتکنیکی پی‌های پوسته‌ای مخروطی را با دو روش تحلیل تئوری و آزمایشگاهی بررسی نمودند. ایشان با کمک داده‌های حاصل از مکانیزم گسیختگی آزمایش‌ها، پارامترهای ظرفیت باربری پی سطحی را جهت استفاده در برآورد ظرفیت باربری پی پوسته‌ای مخروطی اصلاح نمودند [۲۰]. استفاده از المان‌های پوسته‌ای در سیستم تکرار شونده مانند پی‌های گسترده دارای صرفه اقتصادی بیشتری نسبت به پی‌های تخت معمولی است [۲۱]. سایر مطالعات در خصوص پی‌های پوسته‌ای با تمرکز بر سازه پوسته انجام شده است [۲۲].

پی پوسته‌ای مرکب به استفاده همزمان بیش از یک پوسته با شکل یکسان و یا غیر یکسان و با لحاظ اثرات اندرکنشی آن‌ها بر روی یکدیگر اطلاق می‌گردد. ترکیب یک مخروط ناقص معکوس در قسمت خارجی و یک مخروط ناقص روبه بالا در قسمت داخلی، پدیدآور یک پی نوین است که همزمان دارای ویژگی‌های صفحات تا شده<sup>۲</sup>، پی پوسته<sup>۳</sup> و پی حلقوی<sup>۴</sup> است. این سیستم «پی مرکب حلقوی پوسته‌ای»<sup>۵</sup> نامیده شده است (شکل ۱). هدف این تحقیق مطالعه و بررسی رفتار ژئوتکنیکی پی مرکب حلقوی پوسته‌ای و مقایسه آن با پی‌های حلقوی در خاک دانه‌ای است. برای رسیدن به این منظور ظرفیت باربری و نشست نهایی نمونه‌های مختلف این پی‌ها با مدلسازی آزمایشگاهی بررسی شده است.



شکل ۱: نمای شماتیک پی مرکب حلقوی پوسته‌ای

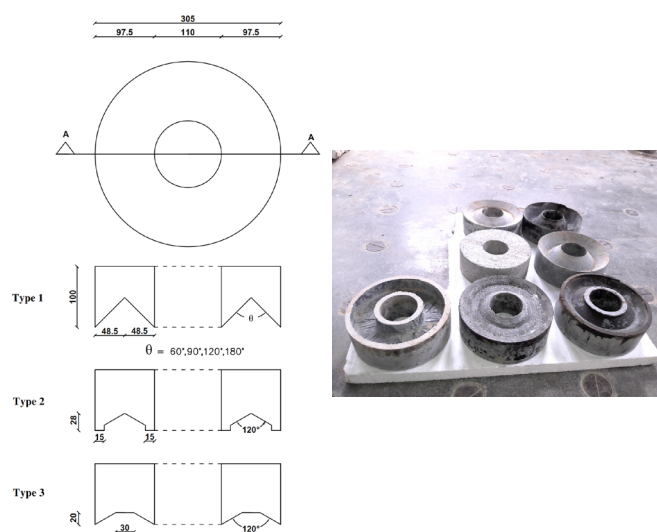
Fig. 1. Schematic view of composite shell annular foundation

## ۲-۲ مدل‌سازی آزمایشگاهی

اثر مقیاس در مدلسازی آزمایشگاهی یکی از مهمترین عواملی است که بر نتایج آزمایش تأثیرگذار است. مطالعات قبلی نشانگر آن است که خاک نمی‌تواند در مدل آزمایشگاهی و نمونه واقعی رفتار یکسانی داشته

- 1 Colmenares et al.
- 2 Folded Plate
- 3 Shell Foundation
- 4 Annular Foundation
- 5 Composite Shell Annular Foundation

به منظور تأمین صلبیت و سهولت در قالب‌بندی و ساخت مدل‌ها و ایجاد بستری جهت بارگذاری یکنواخت در سرتاسر پی، پی‌های بتنی با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر مطابق شکل ۲ طراحی و اجرا گردیده است. شش مدل مورد استفاده در سه گروه طبقه‌بندی شده‌اند به طوریکه نوع یک، پی مرکب حلقوی با پوسته‌هایی با زوایای متفاوت است. نوع دو پی مرکب با زاویه پوسته ۱۲۰ درجه و دو تیر لبه محیطی است. نوع سه پی مرکب با زاویه پوسته ۱۲۰ درجه و یک تیر لبه در ناحیه میانی است. شایان ذکر است پی نوع یک با زاویه پوسته ۱۸۰ درجه همان پی حلقوی است. صلب بودن تمام مدل‌های پی توسط تحلیل‌های عددی کنترل و مشخص شد که تمام نقاط پی در بازه نیروی گسیختگی خاک که از روابط تئوری بدست می‌آید، نشست یکنواخت دارند.



شکل ۲: ابعاد مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق (همه واحدها بر حسب میلی‌متر است).

Fig. 2. The utilized models in this work

#### ۲-۲- خاک مصرفی و آماده‌سازی نمونه

در پژوهش حاضر از ماسه فیروزکوه استفاده شده است. رنگ این ماسه سفید مایل به زرد است که به مقدار زیاد برای استفاده‌های صنعتی تولید می‌شود و می‌توان تا حدود زیادی بر استمرار تولید آن اعتماد کرد. بر اساس نمودار دانه‌بندی شکل ۳، مقادیر  $C_u$  و  $C_c$  به ترتیب برابر با ۱/۵۸ و ۱/۱۳ است. این خاک در سیستم طبقه‌بندی متحد، با نام ماسه بدانه‌بندی شده نام‌گذاری شده است.

کاساکابه<sup>۴</sup> در سال ۱۹۹۵ با تحلیل داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که تأثیر اندازه ذرات بر روی ظرفیت باربری پی کم است. این تأثیر با نسبت D

بوسیله چهار مقطع ناودانی عمودی و دو مقطع ناودانی افقی سرتاسری در بالا و پایین به ابعاد  $300 \times 600$  میلی‌متر تقویت شده است.

در مطالعات آزمایشگاهی نسبت قطر داخلی به خارجی برای داشتن حداکثر ظرفیت باربری پی حلقوی بین ۰/۲ و ۰/۴ به دست آمده است [۵-۲]. بنابراین در این آزمایش‌ها از پی‌های حلقوی از جنس بتن با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۳۶ که منجر به حداکثر ظرفیت باربری می‌شوند، استفاده شده است. پی‌های مرکب با قطر خارجی ۳۰۵ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۱۰ میلی‌متر اجرا گردیده است. به منظور امکان وجود مقایسه بین نتایج و تمرکز بر مطالعه اثرات پوسته، ابعاد مدل‌ها در تمام آزمایش‌ها ثابت است.

در مطالعه رفتار خاک زیر پی‌های سطحی در آزمایشگاه، لازم است به منظور حذف تغییر شکل‌های سازه‌های احتمالی پی تا زمان گسیختگی خاک، از نمونه‌های کاملاً صلب استفاده شود [۲ و ۲۳]. استفاده از مدل پی بتنی منجر به شبیه‌سازی بهتر شرایط برجا در شالوده‌های بتنی واقع بر روی خاک است [۲۲]. بتن مورد استفاده بتن فوق توانمند<sup>۱</sup> با طرح اختلاط و خصوصیات مکانیکی مندرج در جدول ۱ و ۲ است.

#### جدول ۱: طرح اختلاط بتن فوق توانمند ۲۴

Table 1. the mix design of the concrete used to prepare the specimen

مقدار مصرفی (kgf)	مصالح
۶۷۰	سیمان
۲۰۰	میکرو سیلیس
۲۸۵	پودر کوارتز
۱۰۲۰	ماسه سیلیسی
۲۰/۱	فوق روان‌کننده
۱۷۸ لیتر	آب

نکته: مقادیر مصرفی برای یک متر مکعب بتن است.

#### جدول ۲: خصوصیات مکانیکی بتن فوق توانمند بر اساس نتایج آزمایشگاهی

Table 2. Mechanical properties of ultra high performance concrete based on the results of the experiments

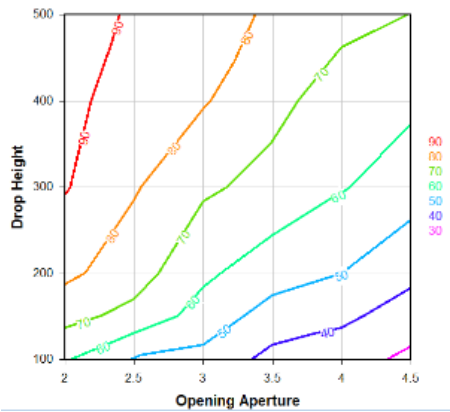
مقدار	خصوصیات مکانیکی
۱۳۲	مقاومت فشاری (MPa)
۴۱/۳۲	مدول الاستیسیته (GPa)
۲۱۲۰	وزن حجمی (kgf/m <sup>3</sup> )

1 Ultra High Performance Concrete (UHPC)

2 Unified Soil Classification System (USCS)

3 poorly graded sand (SP)

4 Kusakabe



شکل ۴: خطوط تراکم نسبی یکسان با ترکیبات مختلف ارتفاع بارش و عرض پرده (همه واحدها بر حسب میلی‌متر است) [۲۵].

Fig. 4. Relative density contours with different combinations of drop height and opening aperture

جدول ۳: مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه

Table 3. Physical and mechanical characteristics of the used sand

حالت ماسه	تراکم نسبی (%)	زاویه اصطکاک داخلی (°)	وزن مخصوص (kN/m <sup>3</sup> )
شل سست	۴۰	۳۱	۱۴/۰۷
متوسط	۵۵	۳۳	۱۴/۵۵
متراکم	۷۵	۳۶	۱۵/۱۰

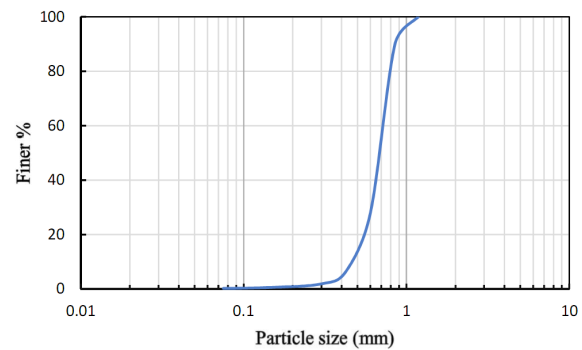
۲-۳- سیستم بارگذاری و اعمال نیرو

برای اعمال نیرو به پی از یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰ تن و با سرعت بارگذاری ۲ میلی‌متر جابه‌جایی فک در دقیقه استفاده شده است. به این ترتیب بارگذاری در هنگام آزمایش با نرخ ثابت نشست و کمترین سرعت ممکن انجام شده است. این جک روی یک قاب عکس‌العملی صلب نصب شده است که بیشینه مقدار صلیبیت را دارا و در برابر بارهای وارد شده هیچگونه تغییر مکانی ندارد.

قرائت صحیح کلیه اطلاعات مورد نیاز و ثبت آن برای تحلیل رفتار و رخدادهای یکی از مهمترین مراحل در هر آزمایش است. برای اندازه‌گیری بار و تغییر مکان پی به ترتیب از یک نیروسنج<sup>۲</sup> S شکل با ظرفیت ۵ تن و دو عدد تغییر مکان‌سنج<sup>۳</sup> استفاده شده است. اطلاعات خروجی از نیروسنج و تغییر مکان‌سنج توسط کارت جمع‌آوری داده‌ها<sup>۴</sup> قرائت و به کمک نرم‌افزار

B/۵۰ یا کمتر از ۱/۱۰۰ قابل تعریف است. اعظم و نصر<sup>۱</sup> در مطالعات خود بر روی نمونه‌ای با عرض ۱۵۰ میلی‌متر، مقدار تأثیر اندازه ذرات را ۰/۰۹۲ گزارش نمودند [۱۷]. در این تحقیق این نسبت برابر ۰/۰۰۲ است که حاکی از عدم تأثیر اندازه ذرات خاک بر نتایج آزمایش‌ها است.

آماده‌سازی لایه‌های ماسه به صورت یکنواخت و تکرارپذیر با وزن مخصوص مورد نیاز، قطعاً پیش‌نیاز انجام آزمایش‌های قابل اعتماد بر روی نمونه‌های بازسازی‌شده ماسه در آزمایشگاه است. در این تحقیق یک روش جدید بارش ماسه به نام سیستم متحرک بارش پرده‌ای برای بازسازی نمونه‌های بزرگ در مطالعات آزمایشگاهی توسعه یافته است. این دستگاه یک سیستم ساده و کم‌هزینه است که عملکرد آن بر مبنای بارش ماسه در هوا بوده و با کنترل سرعت حرکت پرده، ارتفاع بارش و ضخامت پرده، توانایی تولید نمونه‌هایی با دامنه وسیعی از تراکم نسبی و یکنواختی بالا را دارد. این دستگاه شامل اجزا انتقال‌دهنده ماسه از قیف اصلی تا نمونه است و نرخ بارش به وسیله یک روزنه مستطیلی کنترل می‌گردد [۲۵].



شکل ۳: نمودار دانه‌بندی مصالح مصرفی

Fig. 3. Grain size distribution curve

با استفاده از مطالعات کالیبراسیون سیستم می‌توان برای تهیه یک نمونه با تراکم نسبی دلخواه، ترکیبات متفاوت ارتفاع بارش و عرض پرده در سرعت ثابت حرکت پرده را رسم نمود (شکل ۴). بهتر است این شکل که شامل خط‌هایی با تراکم نسبی یکسان است، مطابق با سیستم بارش و خاک مصرفی قبل از شروع هر مدل‌سازی آزمایشگاهی و به منظور سهولت در تصمیم‌گیری جهت کاهش زمان بازسازی نمونه، تهیه گردد.

مطالعات انجام شده در این تحقیق در سه حالت ماسه سست، متوسط و متراکم با تراکم‌های نسبی به ترتیب ۴۰، ۵۵ و ۷۵ درصد است. پارامترهای مقاومتی ماسه با آزمایش برش مستقیم بدست آمده است. در جدول زیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه ارائه شده است.

2 Load Cell

3 Linear Variable Differential Transformer

4 Data Acquisition System

1 Azzam and Nasr



## ۲-۴- برنامه آزمایش‌ها

در این تحقیق تعداد ۲۲ آزمایش بر روی پی‌های مرکب حلقوی پوسته‌ای در سه حالت ماسه سست، متوسط و متراکم انجام شده است. در هر آزمایش، بارگذاری تا مقدار حدود ۱۵ درصد نسبت نشست به قطر پی ادامه یافته است. در انتهای هر آزمایش، همه خاک موجود در مخزن تخلیه و مجدداً نمونه بعدی به کمک سیستم بارش آماده آزمایش بعدی گردیده است. کنترل‌های لازم بعد از هر آزمایش به منظور بررسی هرگونه تغییر در جداره پی انجام شد و هیچگونه ترک و تغییر قابل توجه در ابعاد قطرهاى داخلی و خارجی هر پی قبل و بعد از آزمایش مشاهده نگردید. بنابراین نتیجه گرفته شده است که برای مدل با ابعاد مورد استفاده، فشار زیر پی هیچ اثری بر سازه پی نداشته و امکان استفاده مجدد آن در آزمایش‌های بعدی وجود دارد. کلیه آزمایش‌ها در سه گروه صحت سنجی سیستم بارگذاری، بررسی اثر پوسته بر رفتار پی و تأثیر تیرهای لبه محیطی یا داخلی قابل تفکیک است.

به منظور حذف تأثیر پارامتر عمق پی بر ظرفیت باربری نهایی، کلیه آزمایش‌ها در تراز سطح زمین انجام گردیده است. در جدول ۴ خلاصه‌ای از تعداد آزمایش‌ها در هر گروه ارائه شده است.

صحت سنجی سیستم بارگذاری در دو بخش بررسی تکرارپذیری نتایج با انجام مجدد برخی از آزمایش‌ها و مقایسه نتایج با روابط ارائه شده در ادبیات فنی جهت پیش‌بینی ظرفیت باربری پی‌های حلقوی مورد ارزیابی قرار گرفته است. اثرات شکل پوسته بر رفتار پی مرکب در سه شکل متفاوت پی با زاویه‌های پوسته ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه در خاک ماسه با سه تراکم سست، متوسط و متراکم بررسی شده است. نسبت ارتفاع پوسته به نصف عرض پی حلقوی متناظر با این زوایا به ترتیب ۰/۶، ۱ و ۱/۵ است. برای بررسی اثر وجود تیر لبه و همچنین محل قرارگیری آن بر روی ظرفیت باربری پی مرکب، از دو نوع پی با زاویه پوسته ۱۲۰ درجه با تیر لبه در دو ناحیه محیطی و میانی استفاده شده است. به منظور امکان وجود مقایسه بین نتایج، مجموع سطح مقطع افقی تیرها در دو پی ثابت است.

## ۳- نتایج و تحلیل

به منظور تحلیل رفتار سیستم پی مرکب حلقوی پوسته‌ای باید به بررسی همزمان نحوه تغییر شکل خاک زیر پی و نیروی متناظر با آن در هر لحظه از بارگذاری و تعیین نیروی گسیختگی یا نهایی خاک پرداخت. بدین منظور در حین انجام آزمایشات، داده‌های بار-نشست به دقت ثبت و برای هر آزمایش نمودار آن جداگانه رسم شده است. شکل ۶ نمودارهای بار-نشست پی حلقوی و پی مرکب با زاویه پوسته ۶۰ درجه در سه تراکم مختلف خاک را نمایش داده است. با توجه به این نمودارها می‌توان دریافت که با افزایش تراکم نسبی خاک، رفتار پی‌ها سخت‌تر و ظرفیت باربری افزایش یافته است.

موجود بر روی رایانه ثبت گردید. شایان ذکر است که در این تحقیق بار با دقت ۱ کیلوگرم و جابه‌جایی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و در فواصل زمانی ۵۰۰ میلی‌ثانیه اندازه‌گیری و ثبت شده است.

با توجه به حلقوی بودن مدل‌ها، از یک صفحه صلب آلومینیومی به شکل دایره و قطر ۳۰۵ میلی‌متر جهت پخش یکنواخت بار بر روی تمام سطح پی استفاده شده است. در مرکز این صفحه، فرورفتگی کروی جهت قرارگیری یک گوی فلزی وجود دارد. بار اعمالی از جک بوسیله دو عدد پیستون در دو طرف نیروسنج به گوی فلزی منتقل شده است. این گوی فلزی درون فرورفتگی کروی موجود در قسمت مرکزی و فوقانی صفحه آلومینیومی قرار دارد. بدین ترتیب نحوه اعمال بار به نحوی است که پی به راحتی قابلیت دوران داشته و هرگونه لنگر احتمالی حذف گردد. یک نمای کلی از سیستم بارگذاری در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: نمای کلی از سیستم بارگذاری و اعمال نیرو

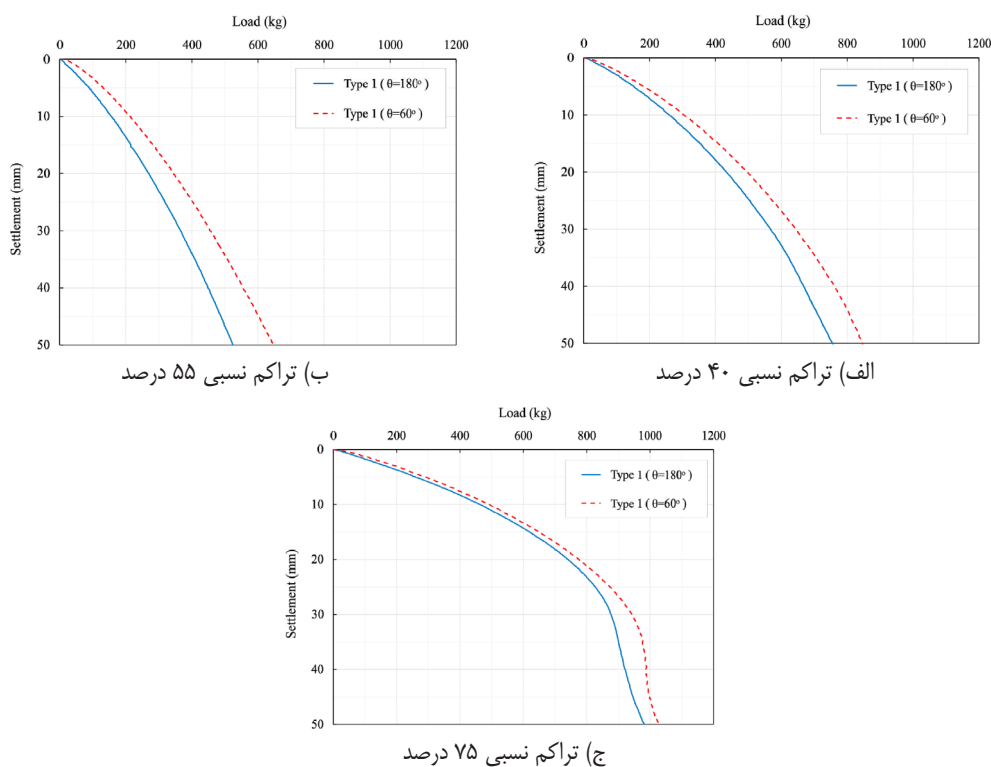
Fig. 5. overall view of experimental setup

به منظور آماده‌سازی هسته خاکی زیر مدل، فضای زیر پوسته مطابق تراکم مورد نظر به کمک سیستم بارش پیشنهادی با ماسه پر شده است. سپس با قرار دادن یک صفحه نازک فلزی بر روی آن، مدل معکوس شده و دقیقاً در مرکز جک هیدرولیکی و روی بستر آماده قرار گرفته است. این صفحه نازک فلزی قبل از شروع آزمایش به آرامی و به صورت افقی از زیر پی بیرون کشیده شده است. توجه کافی در هنگام نصب پی‌ها بر روی ماسه جهت به حداقل رساندن تغییرات تراکم نسبی قبل از بارگذاری ضروری است [۱۷ و ۱۸].

جدول ۴: برنامه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق

Table 4. Experimental testing program

گروه	نوع پی	تراکم	تعداد آزمایش‌ها	مجموع آزمایش‌ها
۱	$\theta$ Type 1=180°	متوسط	۱	۴
	$\theta$ Type 1=120°	سست	۱	
	$\theta$ Type 1=90°	متوسط	۱	
	$\theta$ Type 1=60°	متراکم	۱	
۲	$\theta$ Type 1=180°	سست - متوسط - متراکم	۳	۱۲
	$\theta$ Type 1=120°	سست - متوسط - متراکم	۳	
	$\theta$ Type 1=90°	سست - متوسط - متراکم	۳	
	$\theta$ Type 1=60°	سست - متوسط - متراکم	۳	
۳	Type 2	سست - متوسط - متراکم	۳	۶
	Type 3	سست - متوسط - متراکم	۳	



شکل ۶: نمودارهای بار-نشست پی حلقوی و پی مرکب با زاویه پوسته ۶۰ درجه در سه تراکم مختلف خاک

Fig. 6. Load- settlement curves of the ring foundation and composite foundation with shell of angle 60 degree

جدول ۵: مقادیر بار نهایی و نشست متناظر با آن

Table 5. Ultimate load and settlement

نشست نهایی (mm)			بار نهایی (kg)			نوع پی
متراکم	متوسط	شل	متراکم	متوسط	شل	
۲۶	۲۶	۱۹,۵	۸۳۰	۵۱۰	۲۶۰	θType 1=180°
۲۷	۲۶	۱۹	۸۷۰	۵۶۰	۲۹۰	θType 1=120°
۲۹	۲۸	۲۰	۹۳۰	۶۲۵	۳۳۰	θType 1=90°
۳۰	۲۸	۱۹	۹۵۰	۶۳۵	۳۴۰	θType 1=60°
۲۵/۵	۲۵	۱۹,۵	۹۴۰	۶۰۰	۳۱۰	Type 2
۲۵	۲۶	۱۹	۸۹۰	۵۸۰	۳۰۰	Type 3

$$F_{\delta} = \frac{\delta_u \times \gamma \times A_h}{Q_u} \quad (2)$$

که در آن:

$\delta_u$ : مقدار نشست در لحظه گسیختگی

$\gamma$ : وزن مخصوص خاک

$A_h$ : تصویر مساحت پی بر روی صفحه افقی

$Q_u$ : بار نهایی پی

مقادیر نسبت بازدهی پوسته و نسبت نشست مربوط به هر یک از پی‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.

۳-۱- صحت سنجی سیستم بارگذاری

به منظور بررسی تکرارپذیری و یکنواختی نتایج، آزمایش‌ها در هر یک از حالت‌های مختلف خاک حداقل دو بار مطابق برنامه گروه ۱ در جدول ۴ تکرار شده است. روند نمودار بار-نشست در دو آزمایش تکراری مشابه و اختلاف ظرفیت باربری نهایی کمتر از ۳ درصد بدست آمد که حاکی از دقت و صحت روش آزمایش است.

از آنجا که مطالعات انجام شده بر روی پی‌های حلقوی بسیار محدود است، راه حل مستقیم و واضحی در مطالعات قبلی برای تعیین ظرفیت باربری و نشست این پی‌های ارائه نشده است و هر یک از روابط پیشنهادی دارای فرضیات متفاوت و محدودیت‌هایی است. به منظور ارزیابی روش‌های پیشنهادی مختلف، نتایج ظرفیت باربری نهایی پی حلقوی در این تحقیق با مقادیر پیش بینی شده با استفاده از روابط تئوری، روش تحلیل خطوط مشخصه و روش تحلیل تفاضل محدود در جدول ۷ ارائه شده است. در این مطالعات رفتار محل تماس پی با خاک به دو صورت صاف و زبر در نظر گرفته شده است.

در شکل ۷ ضمن مقایسه روش‌های مختلف برآورد ظرفیت باربری پی حلقوی مشاهده می‌شود با توجه به اینکه فرضیات هر یک از روش‌ها با یکدیگر متفاوت است، بنابراین پراکندگی بین آن‌ها نسبتاً زیاد است. ظرفیت باربری نهایی پی حلقوی در این تحقیق، همگرایی خوبی با دو روش پیشنهادی در مراجع [۱] و [۱۱] در شرایط رفتار زبر کف پی دارد.

با توجه به شرایط بارگذاری و تراکم خاک، در کلیه آزمایش‌ها کاهش تنش وارده بر پی بعد از گسیختگی مشاهده نگردیده است. این نوع گسیختگی به نام «گسیختگی برشی موضعی یا سوراخ کننده» مشهور است [۲۶]. روش‌های متعددی برای بدست آوردن ظرفیت باربری نهایی از روی نمودار بار-نشست وجود دارد. مقادیر بار نهایی و نشست متناظر با آن با استفاده از روش تقاطع مماس‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. در این روش ظرفیت باربری نهایی از تقاطع خطوط مماس بین ناحیه ابتدایی، سخت و مستقیم نمودار و همچنین ناحیه با شیب تندتر و مستقیم بدست آمده است [۴ و ۲۷]. به منظور مقایسه نحوه رفتار پی‌های مرکب با پی حلقوی، سطح مقطع افقی کلیه نمونه‌ها برابر با سطح مقطع پی حلقوی است.

یکی از روش‌های مقایسه و تحلیل داده‌ها، استفاده از متغیرهای بدون بعد است تا بتوان تأثیر موارد مختلف را به صورت کلی بررسی نمود. در این تحقیق از دو پارامتر  $\eta$  و  $F_{\delta}$  که اولین بار توسط هنا و عبدالرحمن [۱۸] معرفی و سپس توسط سایر محققین بکار برده شد، استفاده گردیده است. افزایش بار نهایی یک پی مرکب در مقایسه با پی حلقوی نظیر آن بوسیله متغیر «نسبت بازدهی پوسته»<sup>۱</sup> مورد ارزیابی قرار گرفته است. این متغیر مطابق رابطه ۱ به صورت نسبت اختلاف بارهای نهایی پی مرکب و پی حلقوی به بار نهایی پی حلقوی تعریف شده است.

$$\eta = \frac{Q_{uc} - Q_{ur}}{Q_{ur}} \quad (1)$$

که در آن:

$Q_{uc}$ : بار نهایی پی مرکب حلقوی پوسته‌ای

$Q_{ur}$ : بار نهایی پی حلقوی

به منظور بررسی نشست پی مرکب در مقابل پی حلقوی، متغیر بدون بعد «نسبت نشست»<sup>۲</sup> در رابطه ۲ تعریف شده است. شایان ذکر است که مقادیر کمتر این نسبت، بیان‌کننده رفتار نشست بهتر پی در لحظه گسیختگی است.

- 1 Shell efficiency
- 2 Settlement factor

جدول ۶: مقادیر نسبت بازدهی پوسته و نسبت نشست

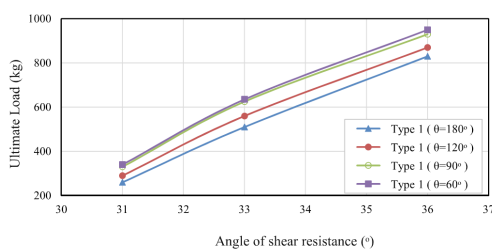
Table 6. Shell efficiency factor and settlement ratio

نسبت نشست ( $\times 10^{-3}$ )			نسبت بازدهی پوسته (%)			نوع پی
متراکم	متوسط	شل	متراکم	متوسط	شل	
۳/۰۱	۴/۷۱	۶/۷۱	---	---	---	$\theta$ Type 1=180°
۲/۹۸	۴/۲۹	۵/۸۶	۱۴/۸۲	۹/۸۰	۱۱/۵۴	$\theta$ Type 1=120°
۲/۹۹	۴/۱۴	۵/۴۲	۱۲/۰۵	۲۲/۵۵	۲۶/۹۲	$\theta$ Type 1=90°
۳/۰۳	۴/۰۸	۵/۰۰	۱۴/۴۶	۲۴/۵۱	۳۰/۷۷	$\theta$ Type 1=60°
۲/۶۰	۳/۸۵	۵/۶۳	۱۳/۲۵	۱۷/۶۵	۱۹/۲۳	Type 2
۲/۷۰	۴/۱۵	۵/۶۶	۷/۲۳	۱۳/۷۳	۱۵/۳۸	Type 3

جدول ۷: نتایج ظرفیت باربری پی حلقوی در این تحقیق و سایر مطالعات

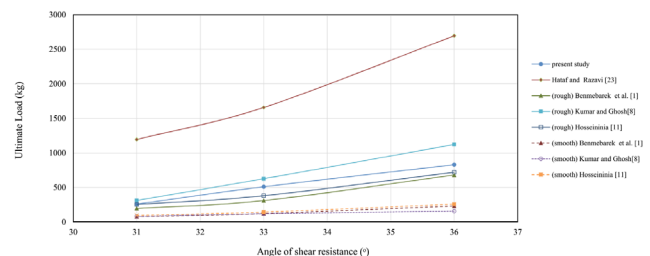
Table 7. comparison of ultimate load from this study with other works

زاویه اصطکاک داخلی	تحقیق حاضر	Hataf and Razavi [۲۳]	رفتار صاف کف پی			رفتار زبر کف پی		
			Kumar and Ghosh [۸]	Hosseininia [۱۱]	Benmebarek et al [۱]	Kumar and Ghosh [۸]	Hosseininia [۱۱]	Benmebarek et al [۱]
۳۱	۲۶۰	۱۱۹۴	۸۲	۹۷	۷۸	۳۱۳	۲۵۴	۱۹۶
۳۳	۵۱۰	۱۶۵۸	۱۲۰	۱۴۴	۱۲۲	۶۲۷	۳۸۱	۳۱۱
۳۶	۸۳۰	۲۶۹۴	۱۵۷	۲۵۹	۲۳۲	۱۱۲۲	۷۲۰	۶۸۰



شکل ۸: نمودار تغییرات ظرفیت باربری نهایی پی مرکب با زاویه اصطکاک داخلی

Fig. 8. Variation of ultimate load versus angle of shear resistance



شکل ۷: مقایسه نتایج ظرفیت باربری پی حلقوی در این تحقیق و سایر مطالعات

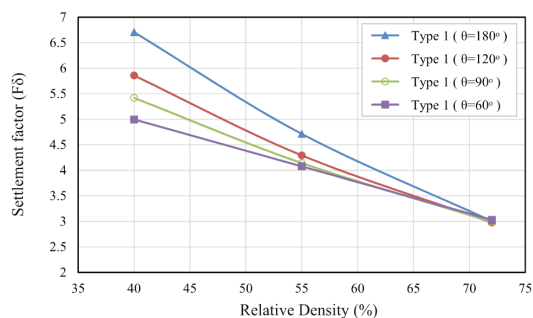
Fig. 7. comparison of ultimate load from this study with other works

مشاهده می شود که در همه پی ها ظرفیت باربری نهایی با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش یافته است. همچنین بار نهایی پی های مرکب در تراکم های مختلف خاک بیشتر از پی حلقوی است و با افزایش زاویه پوسته مقدار بار نهایی کاهش می یابد؛ بنابراین وجود پوسته در پی حلقوی

۳-۲- بررسی اثر پوسته بر رفتار پی

به منظور بررسی اثر پوسته بر رفتار پی، از پی نوع یک با زوایای پوسته متفاوت (۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه) استفاده شده است. شکل ۸ نمودار تغییرات ظرفیت باربری نهایی و زاویه پوسته با زاویه اصطکاک داخلی را نشان داده است.





شکل ۱۰: نمودار نسبت نشست پی مرکب در حین گسیختگی با تغییرات تراکم

Fig. 10. Variation of settlement factor versus relative density

که در آن:

$A'$ : سطح پی پوسته ای که در تماس با خاک است.

$A$ : سطح پی حلقوی که در تماس با خاک است.

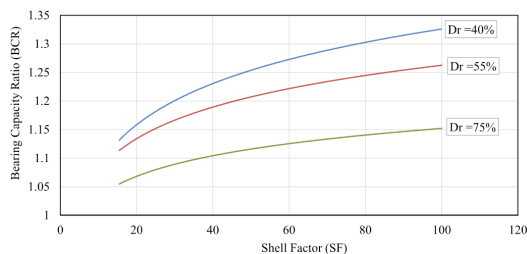
مقدار ضریب پوسته برای پی‌های با زاویه پوسته ۱۲۰، ۹۰ و ۶۰ به ترتیب برابر با ۱۵، ۴۱ و ۱۰۰ درصد است. همچنین نسبت ظرفیت باربری<sup>۲</sup> از تقسیم ظرفیت باربری پی پوسته‌ای حلقوی به ظرفیت باربری پی حلقوی بدست آمده است. تغییرات نسبت ظرفیت باربری در برابر ضریب پوسته در شکل ۱۱ رسم شده است. مطابق شکل با افزایش ضریب پوسته نسبت ظرفیت باربری افزایش یافته است.

با توجه به اینکه رفتار تغییرات نسبت ظرفیت باربری و ضریب پوسته در تراکم‌های مختلف تقریباً یکسان است، بنابراین می‌توان یک رابطه جهت تعیین ظرفیت باربری پی‌های پوسته‌ای حلقوی با زوایای پوسته متفاوت پیشنهاد نمود.

$$BCR = C_1 \ln \left( \frac{A'}{A} - 1 \right) + C_2 \quad (4)$$

که در آن:

$C_1$  و  $C_2$  متغیرهایی هستند که به تراکم نسبی خاک بستگی دارند (جدول ۸).



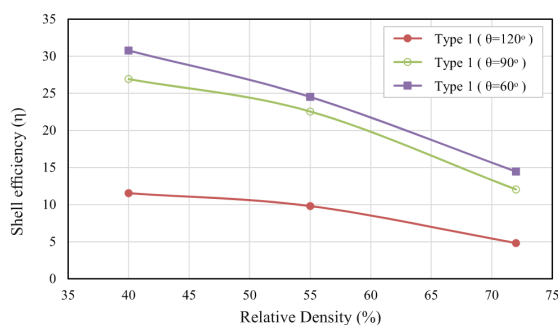
شکل ۱۱: نمودار تغییرات نسبت ظرفیت باربری در مقابل ضریب پوسته

Fig. 11. Variation of bearing capacity ratio versus shell factor

2 Bearing Capacity Ratio (BCR)

باعث بهبود و تقویت ظرفیت باربری نهایی شده است.

به منظور مقایسه اثر زاویه پوسته بر رفتار پی از دو متغیر  $F_\delta$  و  $\eta$  استفاده شده است. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که بیشترین متغیر بازدهی پوسته مربوط به پی پوسته‌ای با زاویه پوسته ۶۰ درجه در خاک با تراکم سست با حدود ۳۰ درصد و کمترین متغیر بازدهی پوسته مربوط به پی پوسته‌ای با زاویه پوسته ۱۲۰ درجه در خاک با تراکم متراکم با حدود ۵ درصد است. بدین ترتیب با افزایش زاویه پوسته مقدار راندمان پوسته کاهش یافته است. همچنین مقدار متغیر بازدهی پوسته با افزایش تراکم نسبی خاک کاهش یافته که حاکی از رفتار مطلوب‌تر پوسته‌ها در خاک‌های با تراکم کمتر است. این موضوع با مطالعات قبلی در خصوص پی‌های پوسته‌ای همخوانی دارد [۱۷، ۱۸ و ۲۸].



شکل ۹: نمودار نسبت بازدهی پوسته پی مرکب با تغییرات تراکم

Fig. 9. Variation of shell efficiency versus relative density

در بررسی رفتار پی‌های مرکب، اثر پوسته در مقدار نشست پی در لحظه گسیختگی یکی از موضوعات تأثیرگذار است. متغیر نسبت نشست پی مرکب با زاویه پوسته متفاوت در تراکم‌های مختلف در شکل ۱۰ رسم شده است. با توجه به اینکه مقادیر کمتر این متغیر بیان‌کننده رفتار بهتر پی در نشست لحظه گسیختگی است، مقایسه بین پی مرکب و پی حلقوی در یک تراکم خاص مشخص می‌نماید که پی مرکب دارای مقدار کمتری نسبت نشست است که این حاکی از رفتار مطلوب‌تر پی‌های مرکب در نشست لحظه گسیختگی است. همچنین این رفتار با کاهش زاویه پوسته بهتر شده است. در حالت کلی، در هر پی نسبت نشست در تراکم‌های بالاتر کاهش یافته است. میزان تغییرات این متغیر از میزان تراکم خاک تأثیرپذیر است. به طوریکه در خاک سست، مقدار بهبود متغیر نسبت نشست پی مرکب با زاویه پوسته ۶۰ درجه حدود ۲۵ درصد پی حلقوی است در حالیکه در خاک متراکم این مقدار در پی مرکب و پی حلقوی تقریباً یکسان است. برای ارائه یک رابطه جهت پیش‌بینی ظرفیت باربری نهایی پی مرکب، ضریب پوسته<sup>۱</sup> تعریف و با رابطه ۳ نشان داده شده است.

$$SF = \left( \frac{A'}{A} - 1 \right) \times 100 \quad (3)$$

1 Shell Factor

زاویه اصطکاک داخلی دارد. این نتایج با یافته‌های سایر محققان مطابقت دارد [۱۸].

زاویه اصطکاک بین سطح پی و خاک زیر آن باعث ارائه رفتارهای گوناگون در پی می‌شود. با در نظر گرفتن دو نوع رفتار در محل تماس پی با خاک (صاف و زبر) کلیه مطالعات قبلی حاکی از افزایش ظرفیت باربری در پی‌های با کف زبر نسبت به پی‌های با کف صاف است. لذا در پی مرکب حلقوی پوسته‌ای به دلیل رفتار یکپارچه خاک داخل هسته با پوسته، اصطکاک بین خاک هسته و خاک زیر شالوده (پی پوسته) بیشتر از اصطکاک بین بتن و خاک زیر فونداسیون (پی معمولی) است که این امر موجب افزایش ظرفیت باربری خواهد شد.

وسیک گزارش نمود که ظرفیت باربری نهایی پی‌های دایره‌ای در نشست بین ۴ تا ۱۰ درصد قطر پی اتفاق می‌افتد [۲۹]. در این تحقیق نیز نشست سطح پی بین محدوده ۶ تا ۱۰ درصد قطر خارجی پی است. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در راندمان و کارایی تکنولوژی بتن‌های پیش‌ساخته بوجود آمده است که قطعاً می‌توان از این تکنولوژی در ساخت پی‌های مرکب استفاده نمود. ترکیب پوسته در پی حلقوی علاوه بر بهبود رفتار نشست و افزایش ظرفیت باربری، مقدار مصالح و هزینه ساخت را در مقایسه با یک پی حلقوی کاهش می‌دهد.

افزودن تیر لبه مطابق پی مرکب نوع دو در ناحیه محیطی با بهبود ظرفیت باربری نهایی و رفتار بهتر نشست حین گسیختگی همراه است. این افزایش ظرفیت باربری نهایی با اضافه نمودن تیر لبه نشان از تأثیر تیر لبه در بهبود نحوه توزیع تنش در زیر پی است [۱۵]. با این وجود نیاز به مطالعات تکمیلی در این خصوص است.

نتایج بدست آمده در این تحقیق محدود به یک نوع ماسه و یک نوع نسبت قطر داخلی به خارجی است. بنابراین آزمایش‌های بیشتر برای سایر پی‌های مرکب حلقوی با نسبت‌های متفاوت قطر داخلی به قطر خارجی واقع بر ماسه لازم است. همچنین مدل با یک نسبت مقیاس کوچک‌تر از مقادیر واقعی است که بی‌شک بر نتایج آزمایشگاهی تأثیرگذار است. کاربرد نتایج آزمایشگاهی برای پیش‌بینی رفتار مدل واقعی منوط به در نظر گرفتن محدودیت‌های ذکر شده است. با این وجود نتایج این تحقیق زمینه‌های

جدول ۸: مقادیر متغیرهای  $C_1$  و  $C_2$  در تراکم نسبی مختلف

Table 8. Values of  $C_1$  and  $C_2$  for different relative density

تراکم نسبی (%)	پارامتر $C_1$	پارامتر $C_2$
۴۰	۰/۱۰۴۱	۰/۸۴۶۷
۵۵	۰/۰۷۹۸	۰/۸۹۵۱
۷۵	۰/۰۵۲۱	۰/۹۱۲۳

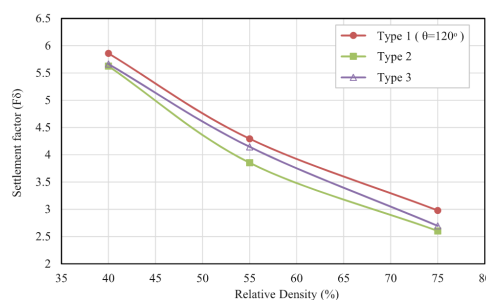
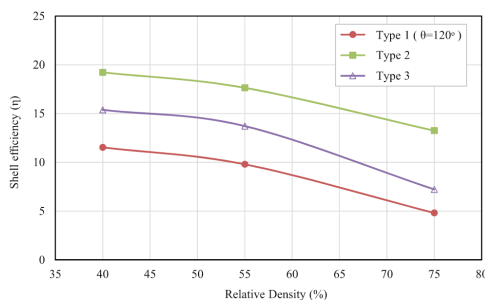
۳-۳- بررسی اثر تیر لبه بر رفتار پی پوسته‌ای

برای بررسی اثر وجود تیر لبه در پی‌های مرکب و همچنین تعیین مکان قرارگیری آن، از پی مرکب نوع دو و نوع سه با مشخصات موجود در شکل ۲ استفاده شده است. با به‌کارگیری تیرهای لبه رفتار نمودار بار-نشست بهبود چشمگیری یافته است. به منظور ارزیابی عملکرد هر یک از پی‌ها، نمودار بازدهی پوسته و نسبت نشست در تراکم‌های مختلف در شکل ۱۲ رسم شده است.

بازدهی پوسته در پی مرکب نوع یک حدود ۴ درصد و در پی مرکب نوع دو حدود ۸ درصد در همه تراکم‌ها نسبت به پی مرکب فاقد تیر لبه افزایش یافته است. همچنین مقدار متغیر نسبت نشست با افزودن تیر لبه کاهش یافته است که حاکی از رفتار بهتر این پی‌ها در نشست‌های لحظه گسیختگی است. این موضوع با مطالعات سایر محققان در خصوص افزودن تیر لبه به پی‌های پوسته‌ای مطابقت دارد [۱۵، ۱۶ و ۲۲].

۳-۴- تفسیر رفتار پی مرکب

وجود پوسته در فونداسیون منجر به انتقال بار به لایه‌های پایین‌تر و یا شکل‌گیری گوه‌های گسیختگی عمیق‌تر است. در پی‌های پوسته‌ای به دلیل اثرات محبوس شدن خاک در پوسته، گوه‌های گسیختگی عمیق‌تر از پی معمولی تشکیل می‌شود که این امر منجر به انتقال بار به لایه‌های پایین‌تر و افزایش ظرفیت باربری خواهد شد [۲۰]. مقدار بهبود در ظرفیت باربری سیستم پیشنهادی بستگی به دو متغیر زاویه پوسته و تراکم خاک یا همان



شکل ۱۲: اثر تیر لبه بر بازدهی پوسته و نسبت نشست در تراکم‌های مختلف

Fig. 12. Effects of edge beam on shell efficiency and settlement factor

#### ۵- فهرست علائم

$Q_{uc}$	بار نهایی پی مرکب حلقوی پوسته‌ای
$Q_{ur}$	بار نهایی پی حلقوی
$u_{\delta}$	مقدار نشست در بار نهایی
$\gamma$	وزن مخصوص خاک
$A_h$	تصویر مساحت پی بر روی صفحه افقی
$A'$	سطح پی پوسته‌ای در تماس با خاک.
$A$	سطح پی حلقوی در تماس با خاک

#### مراجع

- [1] S. Benmebarek, M. Remadna, N. Benmebarek, L. Belounar, Numerical evaluation of the bearing capacity factor of ring footings, *Computers and Geotechnics*, 44 (2012) 132-138.
- [2] M.L. Ohri, D.G.M. Purhit, M.L. Dubey, Behavior of ring footings on dune sand overlaying dense sand, in: *Proceedings of international conference of civil engineers*. Tehran, Iran, 1997.
- [3] F. Zhu, Centrifuge modelling and numerical analysis of bearing capacity of ring foundations on sand, Memorial University, 1998.
- [4] M. Laman, A. Yildiz, Model studies of ring foundations on geogrid-reinforced sand, *Geosynthetics International*, 10(5) (2003) 142-152.
- [5] M. El Sawwaf, A. Nazir, Behavior of eccentrically loaded small-scale ring footings resting on reinforced layered soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(3) (2012) 376-384.
- [6] J.H. Boushehrian, N. Hataf, Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 21(4) (2003) 241-256.
- [7] A. Karaulov, Experimental and theoretical research on the bearing capacity of ring-foundation beds, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 43(2) (2006) 37-40.
- [8] J. Kumar, P. Ghosh, Bearing capacity factor  $N \gamma$  for ring footings using the method of characteristics, *Canadian geotechnical journal*, 42(5) (2005) 1474-1484.
- [9] L. Zhao, J. Wang, Vertical bearing capacity for ring footings, *Computers and Geotechnics*, 35(2) (2008) 292-304.
- [10] A. Choobbasti, S. Hesami, A. Najafi, S. Pirzadeh, F. Farrokhzad, A. Zahmatkesh, Numerical evaluation of bearing capacity and settlement of ring footing; case study of Kazeroon cooling towers, *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 4(2) (2010).

مفیدی برای تحقیقات تکمیلی مدل بزرگ مقیاس، مدل سانتریفیوژ و یا مدل‌سازی عددی فراهم نموده که می‌تواند منجر به فهم بیشتر رفتار واقعی و دقیق در طراحی در پی مرکب باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق پس از انجام مدل‌سازی آزمایشگاهی، نتایج زیر در خصوص عملکرد و رفتار پی‌های مرکب حلقوی پوسته‌ای در خاک ماسه بدست آمده است:

۱. بار نهایی پی حلقوی حاصل از نتایج این تحقیق همگرایی خوبی با دو روش پیشنهادی در مراجع [۱] و [۱۱] جهت پیش‌بینی تعیین ظرفیت باربری پی حلقوی در شرایط رفتار زبر کف پی دارد.
۲. در خاک ماسه‌ای با هر تراکم نسبی، با کاهش زاویه پوسته رفتار پی‌ها سخت‌تر شده و ظرفیت باربری افزایش یافته است. به طوریکه پی مرکب می‌تواند ظرفیت باربری پی حلقوی واقع بر خاک ماسه‌ای را تا ۳۰ درصد بهبود بخشد که این موضوع نشان از برتری کاربرد المان پوسته‌ای در پی حلقوی است.
۳. کاهش زاویه پوسته از ۱۲۰ درجه به ۹۰ درجه در پی‌های مرکب، مقدار ظرفیت باربری را حدود ۱۵ درصد در خاک سست افزایش داده است در حالیکه با کاهش زاویه پوسته از ۹۰ درجه به ۶۰ درجه، ظرفیت باربری تنها ۴ درصد افزایش پیدا کرده است. به عبارت دیگر با افزایش زاویه پوسته مقدار راندمان پوسته کاهش یافته و این روند غیر خطی است.
۴. با کاهش تراکم نسبی خاک، مقدار متغیر بازدهی پوسته در همه پی‌های مرکب افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان دریافت که کارایی پی‌های پوسته‌ای در خاک سست بیشتر از خاک‌های متراکم است.
۵. میزان تغییرات متغیر نسبت نشست در پی مرکب از میزان تراکم خاک تأثیرپذیر است. به طوریکه در خاک سست، مقدار بهبود متغیر نسبت نشست پی مرکب با زاویه پوسته ۶۰ درجه حدود ۲۵ درصد پی حلقوی است در حالیکه در خاک متراکم این مقدار در پی مرکب و پی حلقوی تقریباً یکسان است.
۶. با توجه به نوع رفتار تغییرات نسبت ظرفیت باربری و ضریب پوسته در تراکم‌های مختلف، یک رابطه جهت تعیین ظرفیت باربری پی‌های پوسته‌ای حلقوی با زوایای متفاوت پیشنهاد شده است.
۷. وجود یک تیر لبه در پی مرکب می‌تواند به طور چشمگیری روند نمودار بار-نشست را بهبود و ضمن کاهش پارامتر نسبت نشست، پارامتر راندمان پوسته را تا ۸ درصد پی مرکب هم زاویه افزایش دهد.
۸. نشست سطح پی مرکب در حین گسیختگی بین محدوده ۶ تا ۱۰ درصد قطر خارجی پی است.

- [21] N.P. Kurian, Shell Foundations: Geometry, Analysis, Design and Construction, Alpha Science International, Limited, 2006.
- [22] M.Y. Fattah, W.A. Waryosh, A. AL-HAMDANI, EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES ON BEARING CAPACITY OF CONICAL SHELL FOUNDATIONS COMPOSED OF REACTIVE POWDER CONCRETE, Acta Geodynamica et Geomaterialia, 12(4) (2015) 411-426.
- [23] N. Hataf, M.R. Razavi, Model tests and finite element analysis of bearing capacity of ring footings on loose sand, IRANIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY TRANSACTION B-ENGINEERING, 27(B1) (2003) 0.
- [24] H. Rahdar, M. Ghalehnavi, Post-cracking behavior of UHPC on the concrete members reinforced by steel rebar, Computers and Concrete, 18(1) (2016) 139-154.
- [25] M. Kazemi, A. Tabaroei, J. Bolouri Bazaz, S. Abrishami, Reconstruction of a Large Scale Sand Specimen in: I.P.C. State Organization for Registration of Deeds and Properties (Ed.), Iran, 2016.
- [26] B.M. Das, Principles of foundation engineering, Cengage learning, 2015.
- [27] M.T. Adams, J.G. Collin, Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundations, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(1) (1997) 66-72.
- [28] K. Yamamoto, A.V. Lyamin, A.J. Abbo, S.W. Sloan, M. Hira, Bearing capacity and failure mechanism of different types of foundations on sand, Soils and Foundations, 49(2) (2009) 305-314.
- [29] M. Al-Aghbari, Y.-A. Mohamedzein, Improving the performance of circular foundations using structural skirts, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 10(3) (2006) 125-132.
- [11] E.S. Hosseininia, Bearing Capacity Factors of Ring Footings, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 40(2) (2016) 121-132.
- [12] R.L. Nicholls, M.V. Izadi, Design and testing of cone and hyper footings, Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, (1968).
- [13] A. Hanna, M.A. El-Rahman, Ultimate bearing capacity of triangular shell strip footings on sand, Journal of Geotechnical Engineering, 116(12) (1990) 1851-1863.
- [14] N.P. Kurian, V.M.J. Devaki, Analytical studies on the geotechnical performance of shell foundations, Canadian geotechnical journal, 42(2) (2005) 562-573.
- [15] B.B.K. Huat, T.A. Mohammed, Finite element study using FE code (PLAXIS) on the geotechnical behavior of shell footings, Journal of Computer Science, 2(1) (2006) 104-108.
- [16] R. Rinaldi, Inverted Shell Foundation Performance In Soil, Concordia University, 2012.
- [17] W.R. Azzam, A.M. Nasr, Bearing capacity of shell strip footing on reinforced sand, Journal of advanced research, 6(5) (2015) 727-737.
- [18] A. Hanna, M. Abdel-Rahman, Experimental investigation of shell foundations on dry sand, Canadian Geotechnical Journal, 35(5) (1998) 847-857.
- [19] D. Esmaili, N. Hataf, Experimental and numerical investigation of ultimate load capacity of shell foundations on reinforced and unreinforced sand, Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, 32(B5) (2008) 491-500.
- [20] J. Colmenares, S.-R. Kang, Y.-J. Shin, J.-H. Shin, Ultimate bearing capacity of conical shell foundations, Structural Engineering and Mechanics, 52(3) (2014) 507-523.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Kazemi, J. Bolouri Bazaz, Ultimate bearing capacity of composite shell annular foundations in cohesionless soil, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(4) (2018) 781-792.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12628.5235

