

# ارزیابی ظرفیت باربری قائم و نشست پی‌های باکت مستقر بر ماسه‌ی اشباع

سعید آقاداتاشی (کارشناس ارشد)

عبدالحسین حداد\* (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان

سید محمدحسین خاتمی (مربی)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌یی، تهران

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۱ (دوره ۲ - شماره ۱/۴، ص. ۳-۱۱، پژوهشی)

نیاز روزافزون به انرژی‌های نو در جهان و گسترش ساخت‌وسازهای مورد نیاز در این رابطه در مناطق فراساحلی به منظور دست‌یابی به انرژی‌های نو، مانند انرژی باد، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود معطوف کرده است. یکی از انواع پی‌هایی که برای احداث سازه‌های فراساحلی استفاده می‌شود، پی باکت یا سطلی است. مطالعه و بررسی ارتباط بین نیروی قائم وارد بر پی و جابه‌جایی قائم در اندرکنش خاک و پی ضروری است. در نوشتار حاضر، پی‌ها تحت بارگذاری قائم در خاک اشباع قرار گرفته‌اند. با مطالعه بر روی رفتار پی باکت و پی سطحی مشخص شد که ظرفیت باربری پی باکت تا بیش از دو برابر پی سطحی قابل دست‌یابی است. با افزایش دامنه‌ی پی باکت، ظرفیت باربری افزایش پیدا می‌کند. افزون بر آن، با افزایش فشار آب منفذی ظرفیت باربری پی باکت و سطحی به یک نسبت کاهش می‌یابد. نتایج نشان داده است که عملکرد پی باکت مستقر بر خاک در شرایط روان‌گرایی در مقایسه با پی سطحی بهتر است.

واژگان کلیدی: ظرفیت باربری قائم، پی‌های باکت، ماسه‌ی اشباع، سازه‌های فراساحلی.

sdaghadadashi@semnan.ac.ir  
ahadad@semnan.ac.ir  
mkhatami@tvu.ac.ir

## ۱. مقدمه

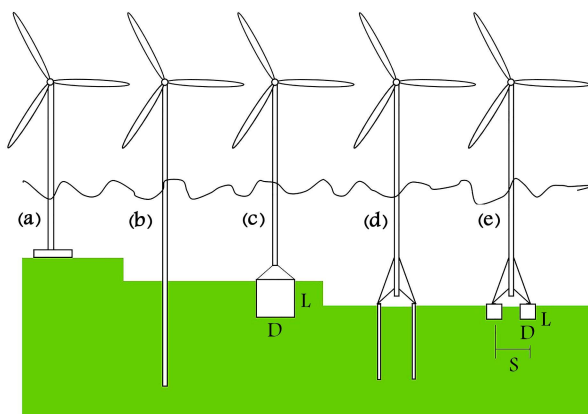
پی باکت در سازه‌های ساحلی و فراساحلی به دلیل ظرفیت باربری قابل توجه آن و رفتارش در برابر بارهای جانبی نسبت به سایر انواع پی‌های سطحی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است. پی باکت، که بسته به کاربرد و ابعاد آن، شمع مکشی، شالوده‌ی سطلی، مهار مکشی و یا شالوده‌ی حاشیه‌یی نیز خوانده می‌شود، یک نمونه از پی‌های سطحی است، که با این‌که پیدایش اولیه‌ی مفهوم آن به اواخر دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی بر می‌گردد، به دلیل نیاز کمی که در آن زمان به پی باکت بوده است، عملاً مطالعه و استفاده از آنها از اواسط دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی صورت جدی به خود گرفته است. استفاده از پی‌های باکت به دلیل مزایایی که نسبت به سایر انواع پی‌ها دارند، به سرعت در حال افزایش بوده و به جای شمع‌های معمولی استفاده شده‌اند. پی باکت، استوانه‌ی فلزی توخالی با قطر زیاد است، که از پایین باز و از بالا توسط ورقه‌ی مسطح و یا گنبدی‌شکل، بسته است. همان گونه که از نامشان پیداست، با اعمال مکش مختصری از درون آنها و پمپ آب درون آنها به بیرون، در حالی که به اندازه‌ی کافی آب‌بندی شده باشند، نصب می‌شوند. این سیستم جدید پی سازه‌های دریایی را می‌توان در کمتر از یک روز

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۵/۲۳، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۳/۱۳، پذیرش ۱۴۰۰/۶/۲۰

DOI:10.24200/J30.2022.58608.2986

در ابتدا، صندوقه‌های مکشی به طور وسیعی برای سکوه‌های نفت و گاز به عنوان نگه‌دارنده‌ی سکوه‌های شناور و یا تکیه‌گاهی برای ژاکت‌ها استفاده می‌شدند. در طول دهه‌ی گذشته، به پی‌های باکتی تک‌پایه به عنوان پی مناسب برای توربین‌های دریایی توجه شده است. در نوامبر ۲۰۰۲، اولین پی باکتی برای استفاده در توربین بادی در یک تأسیسات آزمایشی فراساحلی در فردریشکاون<sup>۱</sup> در بخش شمالی دانمارک نصب شده است.<sup>[۱]</sup> پی باکتی مکشی، شامل یک استوانه‌ی جدار نازک با قطر D، ژرفای دامنه‌ی L و ضخامت جداره‌ی t با رویه‌ی بسته و انتهای باز است، که تحت اثر وزن خود و مکش اعمالی به داخل بستر دریا نفوذ می‌کنند. بخش



شکل ۱. انواع گوناگون پی‌های توربین‌های بادی فراساحلی با اعماق گوناگون آب.

استوانه‌یی آن، دامنه‌ی باکت و صفحه‌ی بالایی آن، کلاهک باکت نامیده می‌شود. پی‌های باکتی استفاده شده در توربین‌های بادی فراساحلی معمولاً از جنس فولاد هستند. نسبت ژرفا ( $L/D$ ) در پی باکتی، معمولاً کمتر از ۱ است.<sup>[۴]</sup> گورونک و رندولف<sup>۲</sup> (۲۰۰۲)، نتایج تحلیل‌های اجزاء محدود دو و سه بُعدی بارگذاری ترکیبی پی‌های نواری و دایره‌یی دامنه‌دار واقع بر رس همگن و غیرهمگن را ارائه کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که هندسه‌ی پی دایره‌یی در مقایسه با پی نواری بر روی رس همگن، ظرفیت قائم نهایی را افزایش می‌دهد.<sup>[۳]</sup> ونگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۹)،<sup>[۴]</sup> تعدادی آزمایش سانتریفیوژ را برای تعیین ظرفیت باربری قائم پی‌های باکت قرار گرفته بر روی ماسه در حالت زهکشی شده انجام دادند و دریافته‌اند که پی‌ها معمولاً دچار شکست برشی شده و میزان ظرفیت باربری با افزایش نسبت ضخامت به قطر افزایش یافته است. همچنین در پوش باکت، بیشترین سهم را در ظرفیت باربری پی بر عهده داشته است. یان<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۲۰)،<sup>[۵]</sup> نیز نشان دادند پی‌های باکت قرار گرفته بر روی ماسه، عموماً به صورت برشی دچار شکست می‌شوند. آنها در مطالعه‌ی خود، یک پی باکت ترکیبی متشکل از یک مکندهی باکت و پی گسترده را پیشنهاد دادند و دریافته‌اند که پی پیشنهادی، ظرفیت باربری بیشتری نسبت به پی معمولی دارد.

از مزایای فونداسیون مکشی می‌توان به قابلیت استفاده در آب‌های ژرف (۵۰ متر) (ینگ لی و همکاران ۲۰۱۶)،<sup>[۶]</sup> فرایند ساخت آسان و تجهیزات نصب ساده، جابه‌جایی آسان، سادگی در نصب از طریق استفاده از مکش، اعمال فوری بار، قابلیت نگهدارندگی زیاد در همه‌ی جهت‌ها، توانایی پیش‌بینی بهتر بارهای گسیختگی نسبت به مهارها، قابلیت استفاده‌ی مجدد، امکان استفاده در اعماق گوناگون، هزینه‌ی کم و صرفه‌ی اقتصادی و مقاومت زیاد در برابر بار افقی در نتیجه‌ی مقاومت دامنه‌ی غلاف محیطی اشاره کرد. این فونداسیون‌های مکشی در مقایسه با فونداسیون‌های شمعی سنتی، موجب صرفه‌جویی به میزان نصف وزن فولاد می‌شوند. نصب آنها آسان‌تر است و هنگام خراب شدن توربین بادی به آسانی برچیده می‌شوند. در مقایسه با شمع‌ها، که مشکلات اجرایی در بر دارند و نیاز به ماشین‌های کوبش شمع دارند، فونداسیون‌های مکش فقط نیاز به یک دستگاه پمپاژ نسبتاً ساده دارند، تا آب را به خارج از محفظه‌ی فونداسیون پمپاژ کنند. به عنوان مثال، یک فونداسیون باکتی با قطر ۲ متر و ارتفاع ۳ متر، با استفاده از یک پمپ، فقط ظرف مدت ۱ تا ۳ ساعت نصب می‌شود. از مزایای دیگر فونداسیون باکتی، بسیج کردن باربری انتهایی معکوس یا مکش مقاوم در برابر نیروی بالابرنده است. روش‌های طراحی معمول مطابق آیین‌نامه‌ی مؤسسه‌ی نفت

آمریکا (API)، فونداسیون‌های باکتی تحت بارگذاری جانبی را پوشش نمی‌دهند؛ بنابراین، اندرکنش خاک - سازه و رفتار آنها باید با استفاده از الگوسازی عددی ارزیابی شود (عبدالرحمان و همکاران (۲۰۱۱)).<sup>[۷]</sup> در حالت بارگذاری قائم، فرض می‌شود که فونداسیون باکتی مشابه با فونداسیون دایره‌یی فرو رفته عمل می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود که خاک محصور شده داخل باکت مشابه یا نزدیک به یک توده‌ی فشرده‌ی صلب عمل کند. دامنه‌ی فونداسیون باکتی، که به طور جانبی خاک زیر فونداسیون را احاطه می‌کند، از ایجاد تغییرشکل‌های بزرگ زیر باکت جلوگیری می‌کند.

کسیدی و همکاران (۲۰۰۲)، هولسی و کسیدی (۲۰۰۲) و کسیدی (۲۰۰۷) یک مدل رفتاری خمیری سخت‌شونده برای رفتار پی‌های دایره‌یی صلب روی ماسه‌ی کربناتی سست ارائه کرده‌اند. این مدل رفتاری برآیند نیروهای قائم، لنگر افقی و جابه‌جایی‌های متناظر پی را ترکیب می‌کند و پاسخ ایجاد شده برای هر ترکیب بار و جابه‌جایی را پیش‌بینی می‌کند.<sup>[۸-۱۰]</sup> کلی<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۶)، آزمایش‌های آزمایشگاهی با اعمال بارهای قائم و لنگر به صندوقه‌های مکشی قرار گرفته در ماسه و رس، برای شبیه‌سازی مجموعه‌های معادل آزمایش‌های میدانی انجام داده‌اند. صندوقه‌های استفاده شده در آزمایشگاه قطرهای ۱۵/۰، ۲۰/۰ و ۳۰/۰ متر داشته و نتایج آزمایش‌ها به شکل داده‌های بی‌بعد ارائه شده است.<sup>[۱۱]</sup> براری<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۷)،<sup>[۱۲]</sup> نیز ظرفیت باربری پی‌های باکتی را برای استفاده در توربین‌های بادی ساحلی به صورت فیزیکی و عددی بررسی و بر اساس مدل‌های شبیه‌سازی شده، روابطی برای پیش‌بینی ظرفیت باربری ارائه کردند و دریافته‌اند که مقدار تغییر شکل، تأثیر به‌سزایی در رابطه‌ی بین ظرفیت باربری و چگالی نسبی دارد. همچنین ظرفیت باربری در پی‌هایی که عمق جاگذاری کمتری داشته و به صورت پی صلب بر روی خاک با مقاومت یکنواخت مدل شده‌اند، کمتر از انتظار است. تأثیر شرایط بارگذاری و نوع خاک در رفتار پی‌های باکت توسط دینگ<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، بررسی شده است.<sup>[۱۳]</sup> شبیه‌سازی‌های المان محدود نشان داده است زمانی که خاک با مقاومت بالا و ورق‌های محفظه وجود داشته باشد، رفتار پی توسط درپوش کنترل می‌شود. در حالت دیگر، زمانی که ورق‌های محفظه وجود نداشته باشند، دیوارهای باکت، ظرفیت باربری را کنترل می‌کنند.

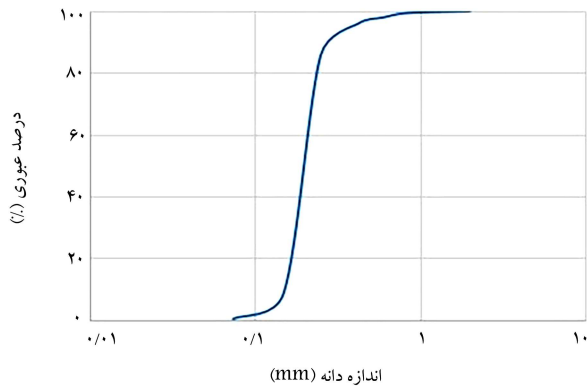
ایسن و همکاران (۲۰۱۴)، بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی، رفتار و ظرفیت باربری پی‌ها بر روی ماسه‌ی اشباع در معرض بارگذاری ترکیبی را تجزیه و تحلیل کردند و با کالیبراسیون معیار گسیختگی و به کارگیری داده‌ها از آزمایش‌های کوچک مقیاس بر روی پی‌های باکتی در معرض بارهای استاتیکی، یک معیار سخت‌شوندگی کرنش جدید را توسعه دادند و دریافته‌اند که شکل سطح تسلیم، سطح پتانسیل و سطح گسیختگی به نسبت ژرفا (ارتفاع دامنه به قطر) و مسیر بار وابسته است. برای الگوهای آزمایش شده، در سطوح شعاعی، جریان وابسته و در صفحات محور قائم، جریان غیروابسته مشاهده شده است.<sup>[۱۴]</sup> پارک و همکاران (۲۰۱۶)،<sup>[۱۵]</sup> نیز ظرفیت باربری قائم پی‌های باکت قرار گرفته بر روی ماسه را ارزیابی کردند و دریافته‌اند که نسبت ضخامت به قطر پی و زاویه‌ی اصطکاک می‌تواند تا ۷ برابر یک شمع در ظرفیت باربری پی‌های باکت تأثیر بگذارد. عملکرد بلندمدت پی‌های باکت به ندرت بررسی شده است. لیان و همکاران (۲۰۲۱)،<sup>[۱۶]</sup> تأثیر بارهای چرخه‌یی افقی را در عملکرد پی‌های باکت در بلندمدت بررسی کردند و دریافته‌اند که بیش از ۸۰٪ دوران در پی در ۱۰۰ چرخه‌ی اول اتفاق می‌افتد. همچنین مقدار بسامد طبیعی در ابتدای چرخه‌ها کاهش، سپس به صورت پایدار و نهایتاً کمی افزایش می‌یابد. در حالی که میرایی ابتدا کاهش و سپس پایدار می‌شود. به



شکل ۳. مدل هلی پی باکت استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر.



شکل ۴. قاب بارگذاری.



شکل ۵. دانه‌بندی ماسه‌ی بابلسر.

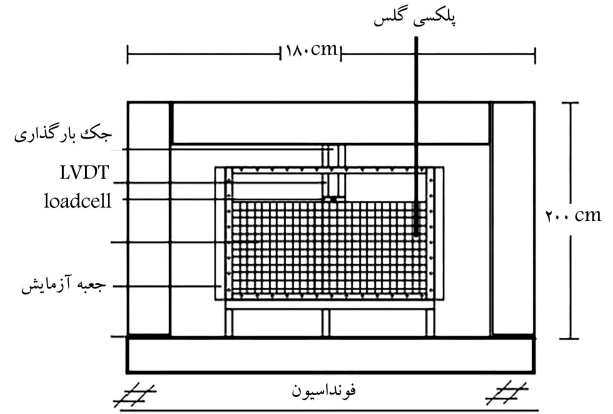
جدول ۱. مشخصات شاخصی ماسه‌ی بابلسر.

| $e_{max}$ | $e_{min}$ | Gs   | D <sub>50</sub> (mm) | C <sub>u</sub> |
|-----------|-----------|------|----------------------|----------------|
| ۰/۸۰۴     | ۰/۵۷۳     | ۲/۷۳ | ۰/۲۴                 | ۱/۸            |

## ۲.۲. ماسه‌ی مصرفی

در مطالعه‌ی حاضر، خاک استفاده شده، ماسه‌ی تمیز بابلسر بوده است، که بخش وسیعی از سواحل جنوبی دریای خزر را پوشانده است. ماسه‌ی بابلسر بر طبق سیستم طبقه‌بندی متحد، در گروه ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) قرار دارد و منحنی توزیع دانه‌بندی آن در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

تمامی مشخصات شاخصی ماسه‌ی بابلسر در آزمایشگاه تعیین و در جدول ۱ ارائه شده است:



شکل ۲. جعبه‌ی آزمایش، قاب فولادی و جک هیدرولیکی.

منظور طراحی پی‌ها، باید به دو عامل ظرفیت باربری و نشست ایجاد شده توجه کرد. هر سازه‌ی در نهایت بارهای موجود را به خاک منتقل می‌کند. از این رو تعیین ظرفیت باربری، یکی از کلیدی‌ترین گام‌های طراحی در هر نوع سازه‌ی به منظور تأمین ایمنی و خدمت‌دهی است. بنا به توسعه‌ی پی‌های باکت و عملکرد مناسب آنها، لزوم تعیین ظرفیت باربری و نشست آنها بیش از پیش احساس می‌شود.

با توجه مطالعات محدود صورت پذیرفته (به ویژه درون کشور)، پژوهش حاضر به تعیین رفتار پی‌های باکت اختصاص یافته است. بدین منظور، آزمایش‌هایی بر روی پی‌های باکت دایره‌ی با قطرهای و عمق‌های گوناگون صورت پذیرفته است، تا تأثیر آنها در ظرفیت باربری قائم، نشست، نسبت بهبود رفتار و مدول عکس‌العمل بسترازیابی شود. همچنین بررسی دقت روابط موجود برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های باکت، از دیگر اهداف پژوهش حاضر است.

## ۲. مطالعات آزمایشگاهی

### ۱.۲. تجهیزات و ابزار آزمایش

برای انجام آزمون‌ها، یک جعبه‌ی آزمایش به طول ۱۲۰ سانتی‌متر، عرض ۹۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر ساخته شد، که شامل: چهار قاب فلزی بود که از نبشی نمره ۵ ساخته شده بودند. سطح دو قاب ۹۰ × ۹۰ با ورق‌های فلزی به ضخامت ۲ میلی‌متر و سطح یکی از دو قاب ۹۰ × ۱۲۰ توسط ورق‌های پلکسی‌گلس به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و سطح دیگر توسط یک ورق به ضخامت ۲ میلی‌متر پوشیده شده است.

در مطالعه‌ی حاضر، از یک سیستم بار استاتیکی شامل قاب و جک بارگذاری استاتیکی مستقر بر قاب فولادی، جعبه‌ی آزمایش با یک وجه شفاف، ابزار اندازه‌گیری، دستگاه جمع‌آوری داده‌ها و مدل پی باکت استفاده شده است، که در شکل ۲ مشاهده می‌شوند. همچنین در شکل‌های ۳ و ۴، به ترتیب انواع پی‌ها و قاب بارگذاری نمایش داده شده‌اند.

همچنین از سه نوع ابزار اندازه‌گیری مختلف جهت محاسبه‌ی مقدار نیرو، جابه‌جایی و فشار آب حفره‌ی استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر، از ۱ عدد لودسل<sup>۸</sup> (یا حسگر وزن) جهت اندازه‌گیری نیروی قائم، ۲ عدد LVDT<sup>۹</sup> جهت اندازه‌گیری نشست دو سر پی و ۵ عدد پیزومتر جهت اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ی در ارتفاع‌های مختلف زیر پی استفاده شده است.

جدول ۲. ابعاد و آزمایش‌های انجام گرفته بر پی‌ها.

| شماره | D (cm) | L/D | r <sub>u</sub> |
|-------|--------|-----|----------------|
| ۱     | ۵      | ۰   | ۰              |
| ۲     | ۵      | ۰/۵ | ۰              |
| ۳     | ۵      | ۱   | ۰              |
| ۴     | ۱۰     | ۰   | ۰/۱            |
| ۵     | ۱۰     | ۰/۵ | ۰/۱            |
| ۶     | ۱۰     | ۱   | ۰/۱            |
| ۷     | ۱۵     | ۰   | ۰              |
| ۸     | ۱۵     | ۰/۵ | ۰              |
| ۹     | ۱۵     | ۱   | ۰              |
| ۱۰    | ۲۰     | ۰   | ۰/۱            |
| ۱۱    | ۲۰     | ۰/۵ | ۰/۱            |
| ۱۲    | ۲۰     | ۱   | ۰/۱            |

روش مذکور تا حدودی شبیه‌سازی شرایطی مشابه با روان‌گرایی خاک، به عبارتی بالا بردن فشار آب منفذی و شبیه‌سازی شرایط زلزله مقدور خواهد بود. برخی از پژوهشگران از روش اخیر برای بررسی رفتار پس از روان‌گرایی مستقر بر خاک‌های اشباع استفاده کرده‌اند. [۲۰، ۲۱]

در حالتی که  $r_{ue}$  برابر با ۱ است، خاک به شرایط روان‌گرایی نزدیک می‌شود و با ثابت نگه‌داشتن مقدار آن، می‌توان وضعیت خاک پس از روان‌گرایی را بررسی و شرایط آن را شبیه‌سازی کرد؛ که هدف از آن، تعیین ظرفیت باربری در خاک‌های روان‌گراست. این امر از طریق ایجاد تراوش رو به بالا و افزایش فشار آب منفذی صورت گرفته است. در سیستم مذکور، رویه‌ی کار به این صورت است که از طریق پمپ آب با یک دبی ثابت از طریق منافذ کف، گرازیان هیدرولیکی رو به بالا در محفظه ایجاد می‌شود. جهت دستیابی به شرایط ذکر شده با توجه به ضخامت لایه‌ی ماسه‌یی، سرعت و فشار آب ورودی تنظیم می‌شود.

#### ۴.۲. مراحل انجام آزمایش

برای انجام آزمایش‌های مرتبط، احتیاج به ساخت نمونه با قابلیت تکرارپذیری و ثابت ماندن مشخصات عمومی است. در این جا، روند نمونه‌سازی و کار با جعبه‌ی آزمایش، گام‌به‌گام توضیح داده شده است:

- ماسه‌ی تهیه شده از ساحل بر یک سطح تمیز و صاف زمین پخش شد، تا توسط هوا خشک شود.
- ماسه‌ی خشک شده از الک شماره‌ی ۱۶ گذرانده شد، تا مواد اضافی نظیر مواد زائد موجود در ساحل و همچنین صدف‌ها از ماسه جدا شود، تا این‌که ماسه‌ی تمیز حاصل شود.
- جعبه‌ی آزمایش زیرقاب فولادی قرارگرفت و جک هیدرولیکی توسط اتصال‌های تعبیه شده بر روی تیر فولادی افقی مستحکم شد. در هنگام اتصال جک به تیر فولادی، به این نکته توجه شود که فاصله‌ی مرکز جک از دیواره‌های متناظر جعبه‌ی آزمایش به یک اندازه باشد، تا بار اعمالی در وسط سطح خاک اعمال شود. این امر توسط شاقول و متر انجام‌پذیر است.
- جعبه‌ی پی‌زومتر در محل مناسب نصب و ارتفاع آن نسبت به سطح مینا، که کف جعبه‌ی آزمایش است، تنظیم شد؛ سپس، شلنگ‌های شفاف ارتباطی بین پی‌زومترها و خروجی‌های روی بدنه‌ی باکس متصل شدند.
- جعبه‌ی آزمایش تا ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر از آب پر و پی‌زومترهای متصل هواگیری شدند. در این قسمت باید توجه شود که لوله‌ی سرریز و شیر ورودی آب از زهکش بسته باشد.
- ماسه‌ی در هوا خشک شده وزن و سپس از ارتفاع صفر سطح آب به صورت پاششی در داخل جعبه‌ی آزمایش به صورت یکنواخت پخش شد.
- روند ماسه‌ریزی به قدری ادامه یافت تا ارتفاع لایه‌ی خاک به ۱۰ سانتی‌متر برسد. لوله‌ی ارتباطی بین پی‌زومتر تا زیر پی از داخل جعبه‌ی آزمایش وصل و لایه‌ی بعدی ماسه ریخته شد.
- در زمان ریختن ماسه، لوله‌های ارتباطی باید در فواصل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر از کف جعبه‌ی آزمایش متصل شوند. ماسه تا ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر از کف جعبه‌ی آزمایش ریخته و مازاد آب از سرریز تخلیه شد و محیط ماسه‌یی با تراکم حدود ۳٪ پدید آمد. مقدار چگالی ماسه با اندازه‌گیری وزن ماسه‌ی ریخته شده

#### ۳.۲. برنامه‌ی آزمایش‌ها

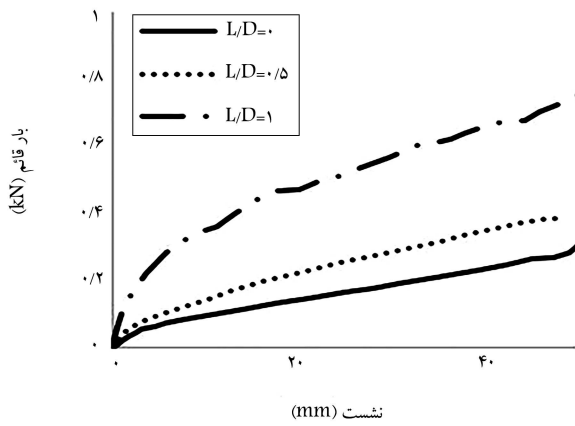
در مطالعه‌ی حاضر از دو نوع پی به شکل‌های باکت و سطحی با سطح مقطع دایره استفاده شده است، که ابعاد و آزمایش انجام گرفته روی آن در جدول ۲ ارائه شده است؛ که در آن، به ترتیب ردیف شماره‌ی آزمایش، قطر پی (D)، نسبت طول به قطر پی (L/D)، و ستون  $r_{ue}$  اطلاعات لازم برای درک آزمون‌های انجام شده ارائه شده است.  $r_{ue}$  از نسبت اضافه فشار آب منفذی ( $\Delta u$ ) بر تنش مؤثر ( $\sigma'$ ) به دست می‌آید و به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود. از این پس  $r_{ue}$  نسبت فشار آب منفذی نامیده می‌شود.

$$r_{ue} = \frac{\Delta u}{\sigma'} \quad (1)$$

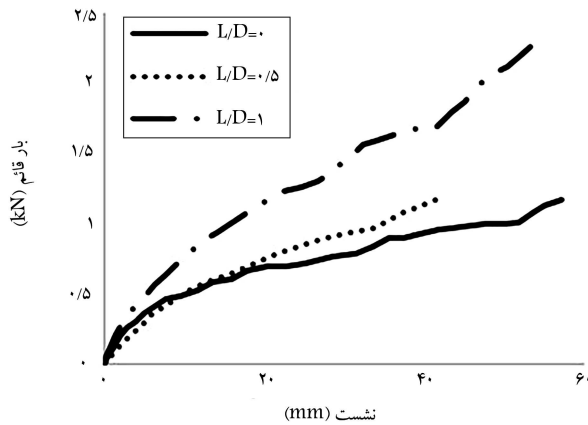
در واقع، هدف از تغییرات نسبت فشار آب منفذی بررسی این موضوع بوده است که ظرفیت باربری به چه میزان به پارامتر مذکور وابسته است. ایشی‌هارا<sup>۱۰</sup> و همکاران (۱۹۹۱)،<sup>[۱۷]</sup> نتایج آزمایش‌های سه‌محوری مونوتونیک و سیکلی - مونوتونیک را روی ماسه‌ی توپورا در شرایط زهکشی نشده مقایسه کردند و نشان دادند که مسیر تنش - کرنش برای کرنش‌های متوسط تا بزرگ در دو بارگذاری اخیر منطبق می‌شود. بنابراین، این فرض منطقی خواهد بود که رفتار خاک پس از بارگذاری لرزه‌یی می‌تواند به خوبی با بررسی مشخصات تغییرشکل‌پذیری خاکی که تحت شرایط بارگذاری مونوتونیک انجام شده است، به دست آید.<sup>[۱۸]</sup>

روان‌گرایی استاتیکی در اصطلاح به شرایطی گفته می‌شود که تنش مؤثر تحت اثر بارگذاری زهکشی‌نشده‌ی استاتیکی صفر شوند. شرایط اخیر که بیان‌گر روان‌گرایی استاتیکی کامل است، فقط در ماسه‌های اشباع بسیار سست و تحت فشارهای همه‌جانبه‌ی بسیار کم، ممکن است رخ دهد. کاسترو<sup>۱۱</sup> (۱۹۶۹)، آزمایش‌های استاتیکی مختلفی روی نمونه‌های تحکیم‌یافته‌ی ناهمسان انجام داد و سه حالت مختلف برای ماسه که به ترتیب شامل: روان‌گرایی، روان‌گرایی محدود و حالت اتساع است را مشخص کرد.<sup>[۱۹]</sup>

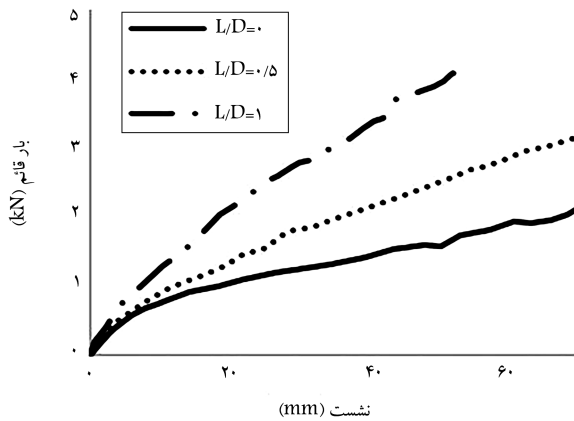
با ایجاد تراوش رو به بالا و افزایش فشار آب منفذی در ماسه‌ی سست، می‌توان شرایطی مشابه با حالت روان‌گرایی کامل در خاک به وجود آورد. از این رو به کمک



شکل ۷. نمودار بار-نشست پی باکت و سطحی با قطر ۱۰ سانتی متر ( $r_{uz} = 0$ ).



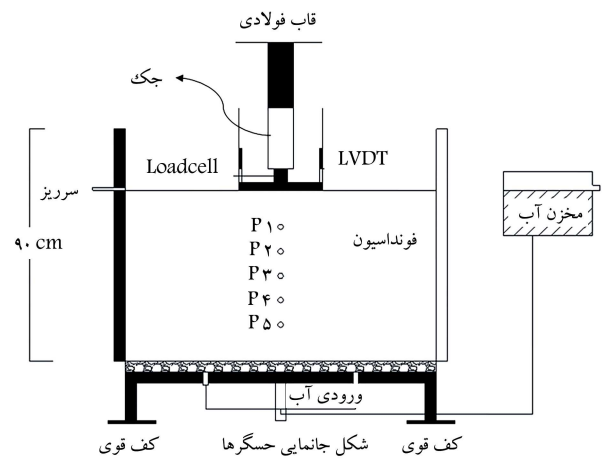
شکل ۸. نمودار بار نشست پی باکت و سطحی با قطر ۱۵ سانتی متر ( $r_{uz} = 0$ ).



شکل ۹. نمودار بار نشست پی باکت و سطحی با قطر ۲۰ سانتی متر ( $r_{uz} = 0$ ).

الی ۹، نمودار بار-نشست برای پی باکت مذکور به ازاء قطرها و دامنه‌های مختلف برای نسبت فشار آب منفذی صفر نشان داده شده است.

با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۷ الی ۹، مشاهده می‌شود که طبق انتظار با افزایش میزان بار اعمالی، نشست پی افزایش یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند و شیب نمودارها متفاوت است. مطابق نمودارهای مذکور تا ۱۰ میلی‌متر نشست، سه منحنی بار-نشست برای سه نوع پی انطباق داشته و با افزایش میزان نشست، عملکرد پی باکت بهبود یافته است؛ به طوری که لبه‌های پی، ظرفیت باربری پی سطحی را با ضریب بیش از ۱/۵ برای  $d/D=0/5$  و



شکل ۶. جانمایی حسگرها.

و حجم فضای اشغال شده تعیین و مقدار تراکم نسبی با توجه به وزن مخصوص کمینه و بیشینه‌ی ماسه محاسبه شد. محل قرارگیری ابزارها در شکل ۶ مشاهده می‌شود، که در آن،  $P_i$  نشان‌دهنده‌ی لوله‌های پیزومتر،  $L_c$  نشان‌دهنده‌ی ابزار قرائت نیرو یا Load cell است. برای قرائت جابه‌جایی از LVDT استفاده شده است.

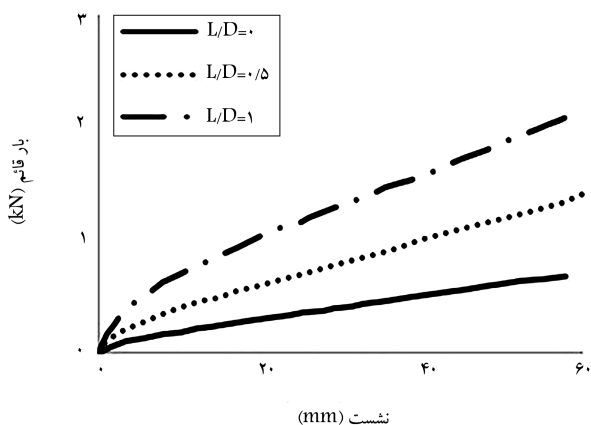
- سطح نهایی خاک به آرامی و توسط یک تخته، صاف و سپس سطوح پی برای قرارگیری بر روی ماسه تمیز شد.
- پی در مرکز جعبه به نحوی قرار گرفت که فاصله‌ی آن از دیواره‌ها به یک اندازه باشد. جهت اطمینان از هم‌مرکز بودن محور جک و آکس پی سطحی، از شاقول استفاده شده است، تا بارگذاری خروج از محوریت نداشته باشد.
- Load cell بین سطح پی و جک هیدرولیکی قرار گرفت. پایه‌ی آهن‌ربایی LVDT ها به بدنه‌ی فلزی یا هر تکیه‌گاه فلزی دیگری متصل و LVDT ها در دو سری یکی از اقطار پی تنظیم شدند.
- در هنگام اتصال و نصب دقت شد که به پی سطحی، ضربه‌یی وارد نشود یا از حالت تراز خارج نشود.
- کابل‌های اتصال حسگرها به دیتالاگر و شیلنگ هیدرولیک جک متصل و پی آماده‌ی بارگذاری شد.
- تنظیمات مربوط به دیتالاگر انجام و ثبت داده‌ها در فاصله‌ی زمانی ۱ ثانیه آغاز شد. پی توسط جک بارگذاری و نتایج حاصل توسط دیتالاگر ثبت و تغییرات فشار آب منفذی توسط پیزومتر مشخص شد.
- بعد از اتمام آزمایش، حسگرها و جک جدا شدند. همچنین جعبه‌ی آزمایش، تخلیه، تمیز و آماده‌ی آزمایش دیگر شد.

### ۳. تجزیه و تحلیل نتایج

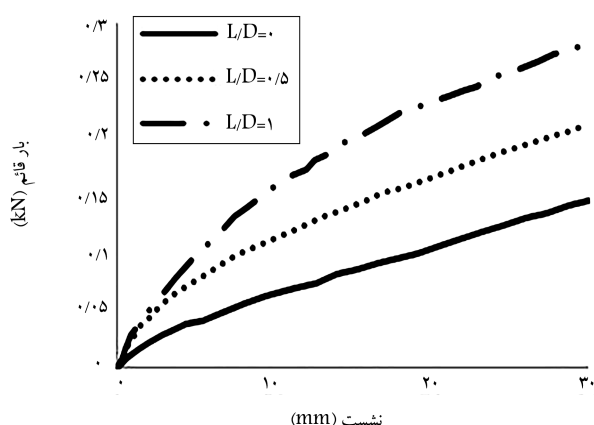
بارگذاری اعمالی بر پی‌ها از نوع استاتیکی و زهکشی شده است. این بدان معناست که بارگذاری، سرعتی ثابت دارد و در عین حال، سرعت بارگذاری با توجه به سرعت نفوذپذیری ماسه، زمان لازم را برای زهکشی خواهد داشت. جهت اطمینان پیدا کردن از نتایج آزمایش‌ها، هر آزمایش ۲ الی ۳ سری تکرار شده است. در شکل‌های ۷

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی ظرفیت باربری.

| نسبت قطر پی<br>(سانتی متر) | نسبت عمق<br>به قطر پی | ظرفیت باربری اندازه گیری شده<br>(مگاپاسکال) | ظرفیت باربری محاسبه شده |       |        |
|----------------------------|-----------------------|---|-------------------------|-------|--------|
|                            |                       |   | مایدروف                 | هانسن | ترزاقی |
| ۱۰                         | ۰                     | ۹/۲۶  | ۱۴/۷۶                   | ۶/۲۲  | ۶/۶۱   |
| ۱۰                         | ۰/۵                   | ۱۳/۷۵                                       | ۵۳/۳۳                   | ۳۲/۰۲ | ۱۷/۶۴  |
| ۱۰                         | ۱                     | ۴۷/۰۴                                       | ۵۳/۱۸                   | ۵۷/۸۲ | ۲۸/۶۶  |
| ۱۵                         | ۰                     | ۴۱/۷۵                                       | ۲۲/۱۴                   | ۹/۳۴  | ۹/۹۲   |
| ۱۵                         | ۰/۵                   | ۴۰/۶۲                                       | ۵۲/۹۹                   | ۴۸/۰۳ | ۲۶/۴۶  |
| ۱۵                         | ۱                     | ۸۵/۸۰                                       | ۷۹/۷۷                   | ۸۶/۷۳ | ۴۲/۱۰  |
| ۲۰                         | ۰                     | ۴۸/۱۴                                       | ۲۹/۵۲                   | ۱۲/۴۵ | ۱۳/۲۳  |
| ۲۰                         | ۰/۵                   | ۷۴/۰۴                                       | ۷۰/۶۶                   | ۶۴/۰۴ | ۳۵/۲۸  |
| ۲۰                         | ۱                     | ۱۳۹/۶۷                                      | ۱۰۶/۳۶                  | ۱۱/۶۴ | ۵۷/۳۳  |



شکل ۱۱. نمودار بار - نشست پی‌های با قطر ۲۰ سانتی متر ( $r_u = 1$ ).



شکل ۱۰. نمودار بار - نشست پی‌های با قطر ۱۰ سانتی متر ( $r_u = 1$ ).

فشار آب منفذی به شدت از ظرفیت باربری کاسته شده است، که به علت اثر افزایش فشار آب منفذی و کاهش تنش مؤثر خاک بوده است.

در پژوهش حاضر، مقایسه‌ی بین مقادیر بارگسیختگی هر آزمون با روش‌های متداول تعیین ظرفیت باربری (ترزاقی<sup>۱۲</sup>، هانسن<sup>۱۳</sup> و مایدروف<sup>۱۴</sup>) انجام شده است. روش‌های اخیر، بر اساس تئوری تعادل حدی با برخی تفاوت‌ها در فرضیات سطح گسیختگی و شرایط بارگذاری، ظرفیت باربری نهایی را پیش‌بینی می‌کنند. خاک درون پی باکت، صلب فرض شده و ظرفیت باربری پی باکت با روش‌های کلاسیک برآورد شده است. در جدول ۳، نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی ظرفیت باربری ارائه شده است.

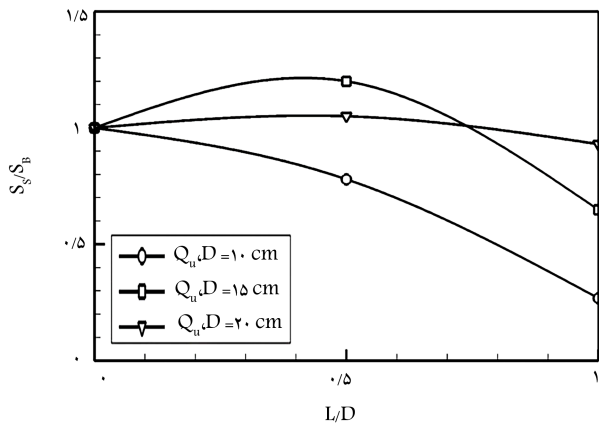
مقایسه‌ی بین نتایج ظرفیت باربری در جدول ۳ نشان می‌دهد که اختلاف بین نتایج تقریباً زیاد است و ظرفیت باربری بین مقادیر برآورد شده با روش‌های هانسن (۱۹۷۰) و مایدروف (۱۹۶۳) قرار دارد. مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که مدل‌سازی آزمایشگاهی با دقت مناسبی انجام پذیرفته است. مطالعات پیشین مشخص می‌سازد که روش مایدروف می‌تواند به عنوان روش مناسبی برای تعیین ظرفیت باربری پی باکت مدنظر قرار گیرد.<sup>[۲۲]</sup>

### ۱.۳. ظرفیت باربری و نسبت بهبود ظرفیت باربری

بررسی نمودارهای تنش - نشست آزمایش‌های صورت پذیرفته در پژوهش حاضر نشان می‌دهد که پیشینه‌ی مقاومت واضح در رفتار مشاهده نشده است. از این رو

۲/۵ برای  $d/D=1$  افزایش داده‌اند. نکته‌ی قابل توجه این است که نشست بیشتر برای پی‌های با عمق مدفون، کمتر است. در تمام نمودارها مشخص است که میزان قطر و دامنه‌ی پی، نقش اساسی در افزایش ظرفیت باربری خاک داشته‌اند؛ زیرا وجود دامنه در پی، باعث ایجاد اندرکنش بین دو سطح دامنه و خاک و همچنین ایجاد مقاومت لبه در پی می‌شود، که در نتیجه موجب افزایش ظرفیت باربری خاک می‌شود. همچنین با افزایش قطر پی، متعاقباً سطح نیز افزایش می‌یابد، که این خود یکی از عوامل اصلی افزایش ظرفیت باربری است. نمودارهای اشاره شده در شرایط نسبت فشار آب منفذی صفر و در حالت اشباع شده در زمانی که فشار نسبی وجود ندارد، به دست آمده‌اند. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نمودارهای بار - نشست در حالت نسبت فشار آب منفذی مساوی ۱، برای پی باکت به ترتیب به ازاء قطرهای ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر مشاهده می‌شود. نتایج نشان دادند که با افزایش فشار آب منفذی، ظرفیت باربری پی‌ها به دلیل کاهش تنش مؤثر بین ذرات خاک کاهش یافته است. نتیجه‌ی مهم قابل ذکر این است که با وجود کاهش محسوس مقاومت خاک نسبت به نتایج آزمایش‌ها، در نسبت فشار آب منفذی صفر، ماسه هنوز مقاومت قابل توجهی دارد و پی‌ها دارای ظرفیت باربری هستند.

با مقایسه‌ی دو دسته‌ی آزمون در شرایط نسبت فشار آب منفذی ۰ و ۱ مشخص می‌شود که در هر دو دسته‌ی آزمون‌ها، بهبود عملکرد پی سطحی با اضافه شدن دامنه در اطراف پی کاملاً مشهود است. در دسته‌ی دوم آزمون‌ها، با افزایش نسبت



شکل ۱۳. نسبت نشست پی باکت به پی سطحی.

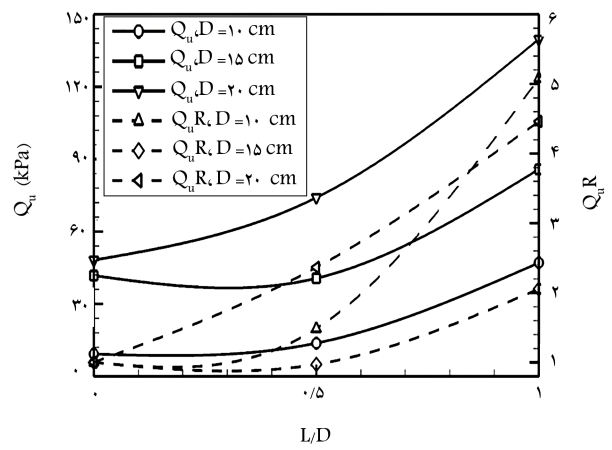
خود شود و پی به همراه خاک درون خود به مانند یک پی واحد عمل کند. در این حالت، پی سطحی رفتاری مشابه با پی نیمه عمیق دارد و در نتیجه می‌توان انتظار رشد بیشتری در افزایش ظرفیت باربری پی داشت. پژوهشگران دیگری نیز مقادیر متفاوتی را برای پی‌های گوناگون ارائه کرده‌اند. اید<sup>۱۵</sup> و همکاران (۲۰۰۹)، آزمایش‌هایی را روی پی مربعی با قطر ۱۰ سانتی‌متر مستقر بر ماسه با تراکم ۰.۵۷٪ انجام داده و برای پی با  $L/D$  برابر ۱، نسبت بهبود ظرفیت باربری را برابر با  $2/7$  گزارش کرده‌اند.<sup>[۲۴]</sup> الاقباری و محمدزین<sup>۱۶</sup> (۲۰۰۴)، با انجام آزمایش‌هایی روی پی دایره‌ای با قطر  $12/5$  سانتی‌متر واقع بر ماسه با تراکم نسبی ۰.۶۴٪ به نسبت بهبود ظرفیت باربری در محدوده‌ی  $1/5$  و  $8/1$  دست یافته‌اند.<sup>[۲۵]</sup> صواف و ناظر<sup>۱۷</sup> (۲۰۰۵)، با انجام آزمایش‌هایی روی پی دایره‌ای با قطر  $7/5$  سانتی‌متر و  $L/D$  برابر ۲ واقع بر ماسه با تراکم نسبی ۰.۷۶٪، نسبت بهبود ظرفیت باربری در حدود ۱۰٪ را گزارش کرده‌اند.<sup>[۲۶]</sup> که دلیل تفاوت نسبت بهبود ظرفیت باربری می‌تواند وابسته به تراکم نسبی متفاوت خاک، قطر گوناگون، و زبری غیریکسان پی‌ها باشد.

در پژوهش حاضر، رابطه‌ی بین منظور تخمین نسبت بهبود ظرفیت باربری برحسب  $L/D$  به صورت رابطه ۲ ارائه شده است:

$$Q_{uR} = 1 - 0.185 \left( \frac{L}{D} \right) + 3.34 \left( \frac{L}{D} \right)^2 \quad (2)$$

### ۲.۳. مقایسه‌ی نشست پی باکت با پی سطحی

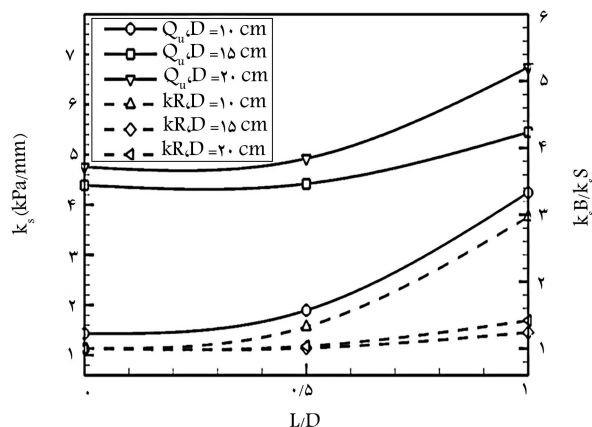
یکی از عوامل تعیین‌کننده‌ی رفتار پی‌ها، نشست است. در طراحی‌های پی به منظور کاهش نشست و همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بارگذاری وارده و مقاومت خاک، ضریب اطمینانی در حدود ۲ تا ۳ در بحث ظرفیت باربری در نظر گرفته می‌شود. از این رو در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی نسبت  $L/D$  بر نشست پی، نشست متناظر با نصف ظرفیت باربری پی سطحی هم‌قطر، برای تمامی پی‌ها محاسبه شده است. در شکل ۱۳، نسبت نشست پی باکت به پی سطحی (در تراز تنشی برابر با نصف ظرفیت باربری پی سطحی) مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، به طور کلی افزایش نسبت  $L/D$  موجب کاهش نشست پی شده است. این موضوع برای پی با قطر ۱۰ سانتی‌متر به وضوح مشاهده می‌شود. برای پی‌ها با قطرهای ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر در یک نسبت عمق به قطر ثابت، احتمال دارد به دلیل شرایط کارگذاری پیچیده‌تر، امکان تماس مناسب کف پی با خاک فراهم نشود. از این رو، شیب اولیه‌ی منحنی بار - نشست در ابتدای بارگذاری



شکل ۱۴. تغییرات ظرفیت باربری (Qu) و نسبت بهبود ظرفیت باربری (QuR): نسبت ظرفیت باربری پی باکت به پی سطحی بر حسب نسبت عمق به قطر پی (۰/۵، ۱ و ۰/۵، ۱).

به منظور تعیین ظرفیت باربری بر طبق «راهنمای آزمایش بارگذاری صفحه‌ی روی خاک و سنگ نرم»، روش‌های دیگری باید استفاده شود. در پژوهش حاضر، بنا به توصیه‌ی راهنمای یاد شده، از روش تقاطع مماس‌ها یا شیب مماسی منحنی برابر با صفر (یا دست‌یابی به شیب تقریباً ثابت) استفاده شده است. با توجه به نزدیک بودن مقادیر نتایج دو روش یاد شده، از شیوه‌ی صفر یا ثابت شدن شیب مماسی منحنی تنش - نشست (صفر شدن یا ثابت شدن تغییرات تنش بر تغییرات نشست) استفاده شده است. در نمودارهای بار - نشست با افزایش بار، میزان نشست افزایش یافته است و نقطه‌ی بیشینه‌ی واضحی وجود ندارد، که بیانگر تراکم کم خاک است. لذا، نتیجه گرفته می‌شود که پی‌ها در وضعیت برشی پانچ دچار گسیختگی شده‌اند. در این حالت، وسیک<sup>[۲۳]</sup> پیشنهاد کرده است نقطه‌ی از منحنی که شیب منحنی تقریباً ثابت می‌شود، به عنوان ظرفیت باربری نهایی در نظر گرفته شود. با استفاده از پیشنهاد وسیک و راهنمای آزمایش بارگذاری صفحه‌ی نقطه‌ی منحنی‌پی که در آن شیب منحنی تقریباً ثابت شده است، به عنوان ظرفیت باربری نهایی در نظر گرفته شده است.

در شکل ۱۴، نسبت ظرفیت باربری پی باکت به پی سطحی بر حسب نسبت عمق به قطر پی (۰/۵، ۱ و ۰/۵، ۱) برای حالت نسبت فشار آب منفذی برابر ۰ مشاهده می‌شود. بررسی نمودار ارائه شده پیرامون ظرفیت باربری مشخص می‌سازد که افزایش نسبت عمق به قطر پی، موجب افزایش ظرفیت باربری برای تمامی پی‌ها با قطرهای گوناگون شده است. به طور مثال، برای پی با قطر ۲۰ سانتی‌متر، افزایش نسبت عمق به قطر پی از ۰ به ۱ موجب افزایش ظرفیت بار از ۰/۷۶ کیلوپاسکال به ۲/۲ کیلوپاسکال شده است، که یکی از دلایل آن، قرار گرفتن عمق تراز پی در نقاط پایین‌تر و همچنین نیروی اصطکاک بیشتر بسیج شده در پیرامون قسمت مدفون پی باکت است. از سوی دیگر، ارزیابی نسبت بهبود ظرفیت باربری مشخص می‌سازد که افزایش نسبت عمق به قطر پی، موجب افزایش غیرخطی در بهبود ظرفیت باربری شده است. به طور مثال، برای پی با قطر ۱۰ سانتی‌متر و نسبت اضافه فشار آب منفذی ۰، نسبت بهبود ظرفیت باربری برای حالت‌های  $L/D$  برابر با ۰/۵، ۱ و به ترتیب برابر با ۱، ۱/۴۸ و ۵/۰۸ شده است؛ که این موضوع، افزایش غیرخطی در نسبت بهبود مقاومت در اثر افزایش عمق پی را نشان می‌دهد. دلیل رفتار اخیر را می‌توان در پدیده‌ی محصورشدگی پی جستجو کرد. در حقیقت، افزایش عمق پی باکت موجب می‌شود تا لبه‌های پی باکت، موجب محصورشدگی ماسه‌ی درون



شکل ۱۴. مدول عکس‌العمل بستر در زمان گسیختگی.

ناشی از جوشش و تحکیم ناشی از زوال فشار آب حفره‌ی اضافی در نشست‌های ناشی از جوشش اثرگذارند. نشست فونداسیون‌های سطحی و سازه‌های روی آن می‌تواند به علت کمبود جزئی یا کلی ظرفیت باربری یا نشست‌های تجمعی ناشی از نوسان سازه (اندرکنش خاک - سازه) رخ دهد. مدل‌هایی که در کاربردهای مهندسی استفاده می‌شوند، فقط نشست‌های سطح آزاد را به عنوان نشست‌های ناشی از جوشش گزارش می‌کنند و بر اساس مشاهده‌ی رفتار خاک در آزمایشگاه و مطالعات موردی، نشست‌های ناشی از جوشش را تخمین می‌زنند. به علت تعداد محدود مطالعات موردی، تخمین این نسبت‌ها با عدم قطعیت بالایی همراه است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، روش مدل‌سازی فیزیکی با شرایط تراوش رو به بالا در خاک ماسه‌یی بابل‌سراستفاده شده است. پی باکت تحت بارافزایشی قائم در نسبت فشار آب منفذی ۰ و ۱ قرار گرفته است. از سه نسبت مختلف برای عمق مدفون‌شدگی پی استفاده شده است، که عبارت‌اند از: ۰/۵، ۰ و ۱. در این دسته از آزمایش‌ها از پی باکت با قطرهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر استفاده شده است. خلاصه‌ی نتایج به دست آمده به این شرح است:

- افزایش نسبت عمق به قطر پی، موجب افزایش ظرفیت باربری برای تمامی پی‌ها می‌شود. برای پی با قطر ۲۰ سانتی‌متر افزایش نسبت عمق به قطر پی از ۰ به ۱ موجب افزایش ظرفیت باربری از ۷۶/۰ کیلوپاسکال به ۲/۲ کیلوپاسکال شده است.
- افزایش نسبت عمق به قطر پی موجب افزایش غیرخطی در بهبود ظرفیت باربری شده است. برای پی با قطر ۱۰ سانتی‌متر، نسبت بهبود ظرفیت باربری برای حالت‌های  $L/D$  برابر با ۰/۵، ۱ و ۱ به ترتیب مساوی با ۱/۴۸، ۱ و ۵/۰۸ شده است. این موضوع افزایش غیرخطی در نسبت بهبود مقاومت در اثر ایجاد محصورشدگی با افزایش عمق پی را نشان می‌دهد.
- به طورکلی افزایش نسبت عمق به قطر پی موجب کاهش نشست شده است. در حقیقت، با افزایش عمق پی باکت، نیروی مقاوم ناشی از افزایش اصطکاک خاک با لبه‌های پی افزایش یافته است، که منجر به کاهش نشست شده است. بنابراین در شرایطی که عامل نشست، معیار کنترل‌کننده در ظرفیت باربری باشد، استفاده از پی‌های باکت می‌تواند موجب دست‌یابی به ظرفیت مشابه با پی سطحی و نشست بسیار کمتر از آن شود.
- مقدار بهبود ضریب عکس‌العمل بستر در پی باکت وابسته به قطر پی و نسبت عمق به قطر پی در محدوده‌ی ۱ تا ۳ تغییر کرده است. افزایش نیروی اصطکاک بسیج شده و ایجاد محصورشدگی در ماسه‌ی زیر پی و همچنین کاهش نشست، دلیل رفتار اخیر است.
- مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی ظرفیت باربری مشخص می‌سازد که روش مایرهورف می‌تواند به عنوان روشی مناسب برای تعیین ظرفیت باربری پی باکت مد نظر قرار گیرد.
- با توجه به عملکرد بهتر پی باکت نسبت به پی سطحی می‌توان از این شالوده‌ی نوآورانه به صورت تک‌پایه و یا چندپایه برای استقرار توربین‌های بادی در مناطق فراساحلی استفاده کرد.

قدری کمتر از شیب پی سطحی است. این موضوع با ادامه‌ی بارگذاری و ایجاد تماس کامل کف پی با خاک مرتفع شده است (مطابق با شکل‌های ۷ الی ۱۱). در ادامه‌ی بارگذاری همان‌طور که مشاهده می‌شود، به ازاء یک سطح تنش اعمالی مشخص، در پی سطحی نشست بیشتری ایجاد شده است. این در حالی است که افزایش نسبت  $L/D$  موجب کاهش نشست شده است. در حقیقت، با افزایش عمق پی باکت و بسیج نیروی پیرامونی در دامنه‌های پی، کاهش نشست نسبت به پی‌های سطحی مشاهده می‌شود. بنابراین در مسائلی که عامل نشست، نسبت به گسیختگی، در ظرفیت باربری تأثیرگذار هستند، استفاده از پی‌های باکت می‌تواند موجب دست‌یابی به ظرفیت مشابه با پی سطحی و نشست بسیار کمتر از آن شود.

#### ۳.۳. مدول عکس‌العمل بستر

یکی از پارامترهایی که رابطه‌ی فشار - نشست در شالوده‌ها را مرتبط می‌سازد، مدول عکس‌العمل بستر است، که از تقسیم فشار بر سطح مورد نظر بر نشست متناظر با آن به دست می‌آید. در پژوهش حاضر، مدول عکس‌العمل بستر در زمان گسیختگی پی باکت برای حالت‌های مختلف آزمایش، در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. همچنین در شکل اخیر، نسبت مدول عکس‌العمل بستر پی باکت ( $k_p B$ ) به مدول عکس‌العمل بستر پی سطحی ( $k_p S$ )، به صورت  $k_R = k_p B / k_p S$  نیز ارائه شده است. بررسی نتایج به دست آمده مشخص می‌سازد که افزایش قطر پی و همچنین نسبت  $L/D$  موجب افزایش مدول عکس‌العمل بستر و همچنین نسبت  $k_p B / k_p S$  شده است. مقدار بهبود مدول عکس‌العمل بستر وابسته به قطر پی و نسبت  $L/D$  در محدوده‌ی ۱ تا ۳ تغییر می‌کند. پیرامون تبیین این رفتار می‌توان به دو عامل اشاره کرد: (۱) افزایش عمق پی باکت به دلیل بیشتر شدن سطح تماس پی با خاک و در نتیجه افزایش نیروی اصطکاک بسیج شده موجب افزایش ظرفیت باربری می‌شود. (۲) مطابق نمودار بار - نشست، به دلیل افزایش دامنه‌ی پی و ایجاد محصورشدگی بیشتر در ماسه‌ی زیر پی باکت، سختی بیشتر شده است. به عبارت دیگر، نفوذ پی به عمق بیشتر موجب کاهش نشست ایجاد شده به ازاء یک سطح مشخص می‌شود. بنابراین دو عامل ذکر شده، افزایش ظرفیت باربری با افزایش نسبت  $L/D$  منطقی است. عوامل مختلفی چون تغییرشکل‌های ناشی از تنش‌های برشی، خروج ماسه



## پانویسها

1. Frederikshavn
2. Gourvenec & Randolph
3. Wang
4. Yan
5. Kelly
6. Barari
7. Ding
8. Loadcell
9. linear variable differential transformer
10. Ishihara
11. Castro
12. Terzaghi
13. Hansen
14. Meyerhof
15. Eid
16. Al-Aghbari & Mohamedzein
17. Sawwaf & Nazer

## منابع (References)

1. Hammar, L., Andersson, S., Rosenberg, R. and et al. "Adapting offshore wind power foundations to local environment", *Naturvardsverket* (2010).
2. Larsen, K.A. "Static behaviour of bucket foundations", *DCE Thesis, Dep. Civ. Eng. Aalborg Univ. Denmark* (2008).
3. Gourvenec, S. and Randolph, M. "Effect of strength non-homogeneity on the bearing capacity of circular skirted foundations subjected to combined loading", *In: 12<sup>th</sup> Int. Offshore Polar Eng. Conf., International Society of Offshore and Polar Engineers* (2002).
4. Wang, X., Zeng, X. and Li, J. "Vertical performance of suction bucket foundation for offshore wind turbines in sand", *Ocean Eng.* **180**, pp. 40-48 (2019).
5. Yan, Z., Fu, D.F., Zhang, B.H. and et al. "Large-scale laboratory tests of a new type of bucket foundation in sand subjected to vertical loading", *Appl. Ocean Res.*, **97**, 102072 (2020).
6. Li, Y., Yang, S. and Zou, X. "Advanced concept design and numerical study of suction bucket foundation in deep ocean," *Ocean Eng.* **54**, pp. 142-149 (2012).
7. Abdel-Rahman, K. and Achmus, M. "Behaviour of monopile and suction bucket foundation systems for offshore wind energy plants," *in Proceedings of 5th International Engineering Conference*, **12**(July), pp. 317-321 (2006).
8. Cassidy, M.J., Byrne, B.W. and Houlsby, G.T. "Modelling the behaviour of circular footings under combined loading on loose carbonate sand," *Gotechnique*, **52**(10), pp. 705-712 (2002).
9. Houlsby, G.T. and Cassidy, G.T. "A plasticity model for the behaviour of footings on sand under combined loading," *Gotechnique*, **52**(2), pp. 117-129, (2002).
10. Cassidy, M.J. "Experimental observations of the combined loading behaviour of circular footings on loose silica sand," *Gotechnique*, **57**(4), pp. 397-401 (2007).
11. Kelly, R.B., Houlsby, G.T. and Byrne, B.W. "A comparison of field and laboratory tests of caisson foundations in sand and clay" *Gotechnique*, **56**, pp. 617-626 (2006).
12. Barari, A., Ibsen, L.B., Taghavi Ghalesari, A. and et al. "Embedment effects on vertical bearing capacity of offshore bucket foundations on cohesionless soil", *Int. J. Geomech.*, **17**, 4016110 (2017).
13. Ding, H., Hu, R., Zhang, P. and et al. "Load bearing behaviors of composite bucket foundations for offshore wind turbines on layered soil under combined loading", *Ocean Eng.*, **198**, 106997 (2020).
14. Ibsen, L.B., Larsen, K.A. and Barari, A. "Calibration of Failure Criteria for Bucket Foundations on Drained Sand under General Loading", *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* **140**(7), p. 4014033, Jul. (2014).
15. Park, J.-S., Park, D. and Yoo, J.-K. "Vertical bearing capacity of bucket foundations in sand", *Ocean Eng.*, **121**, pp. 453-461 (2016).
16. Lian, J., Zhao, Y., Dong, X. and et al. "An experimental investigation on long-term performance of the wide-shallow bucket foundation model for offshore wind turbine in saturated sand", *Ocean Eng.*, **228**, 108921 (2021).
17. Ishihara, K., Verdugo R. and Acacio, A.A. "Characterization of cyclic behavior of sand and postseismic stability analysis", *Proc., 9<sup>th</sup> Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **2**, London, pp. 45-70 (1991).
18. Ishihara, K. "Liquefaction and flow failure during earthquakes", *Geotechnique*, **43**(3), pp. 349-415 (1993).
19. Castro, G. "Liquefaction of sand", *PhD thesis, Division of Engineering and applied Physics*, Harvard University (1969).
20. Calvetti, F., Prisco, C. and Nova, R. "Experimental and numerical analysis of soil-pipe interaction", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **130**, pp. 1292-1299 (2004).
21. Jafarian Y., Haddad, A. and Mehrzad, B. "Load-settlement mechanism of shallow foundations rested on saturated sand with upward seepage", *International Journal of Geomechanics*, **17**(3), 04016076 (2017).
22. Meyerhof, G.G. "Some recent research on the bearing capacity of foundations", *Can. Geotech. J.*, **1**, pp. 16-26 (1963).
23. Vesic, A.S. "Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations," *J. Soil Mech. Found. Div.*, **99**(1), pp. 45-73 (1973).
24. Eid, H.T., Alansari, O.A., Odeh, A.M. and et al. "Comparative study on the behavior of square foundations resting on confined sand", *Can. Geotech. J.*, **46**, pp. 438-453 (2009).
25. Al-Aghbari, M.Y. and Mohamedzein, Y.E.A. "Bearing capacity of strip foundations with structural skirts", *Geotech. Geol. Eng.*, **22**, pp. 43-57 (2004).
26. El Sawwaf, M. and Nazer, A. "Behavior of circular footings resting on confined granular soil", *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, **131**, pp. 359-366 (2005).
27. El Sawwaf, M. and Nazer, A. "Behavior of circular footings resting on confined granular soil," *J. Geotech Geoenvironmental Eng.*, **131**, pp.359-366 (2005).