

مطالعه آزمایشگاهی رفتار پی‌های گسترده بر روی شمع در ماسه تحت بارگذاری قائم

عیسی شوش‌پاشا*^۱، مهدی شرف‌خواه^۲

^۱دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(دریافت: ۹۷/۳/۹، پذیرش: ۹۸/۶/۱۷، نشر آنلاین: ۹۸/۶/۱۷)

چکیده

برای تحلیل پی‌های گسترده بر روی شمع تحقیقات تئوری و عددی بسیاری انجام شده ولی مطالعات آزمایشگاهی در این خصوص بسیار اندک است. تحقیقات آزمایشگاهی موجود نیز عمدتاً بر روی شمع‌های فولادی انجام شده است. در این مقاله با کمک مدل‌سازی فیزیکی در آزمایشگاه، رفتار پی‌های گسترده بر روی شمع در ماسه بررسی شده است. در آزمایش‌ها از شمع‌ها و پی بتنی درجاریز استفاده گردید. آزمایش‌ها بر روی شمع منفرد، شمع منفرد در بین شمع‌های دیگر، پی گسترده، پی گسترده بر روی شمع انجام شده است. اثر تعداد شمع، نحوه احداث شمع و همچنین اندرکنش میان اجزا مختلف بر روی نتایج موردبررسی قرار گرفته شد. نتایج نشان داد که به ازای تعداد شمع برابر، ظرفیت باربری نهایی پی‌های گسترده بر روی شمع به مراتب بیشتر از پی گسترده بوده است. با قرارگیری شمع منفرد در بین شمع‌های دیگر، ظرفیت باربری و سختی شمع افزایش و با احداث شمع در زیر پی گسترده، ظرفیت باربری پی گسترده کاهش یافت. میزان افزایش ظرفیت باربری در شمع‌های گوشه، لبه و مرکزی واقع در پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۳×۳ نسبت به شمع منفرد، ۱۶٪، ۶۴٪ و ۲۶۴٪ می‌باشد. با به‌کارگیری شمع در زیر پی گسترده، ظرفیت باربری پی گسترده به کم‌تر از نصف ظرفیت باربری پی گسترده بدون شمع کاهش یافت. همچنین طراحی پی‌های گسترده بر روی شمع بدون در نظر گرفتن سهم باربری خاک، ظرفیت باربری مجاز را بیش از دو برابر دست پایین تخمین زد. با افزایش فاصله شمع‌ها این خطا بیشتر نیز شد.

کلیدواژه‌ها: پی‌های گسترده بر روی شمع، شمع‌های بتنی درجا، روش احداث شمع، اندرکنش، ماسه.

همکاران ۲۰۱۰؛ Samanta و Bhowmik ۲۰۱۴؛ Comodromos

و همکاران ۲۰۱۶؛ Oh و همکاران ۲۰۰۸؛ Huangab و همکاران ۲۰۱۷؛ Raut و همکاران ۲۰۱۴؛ فخاریان و خانمحمدی ۲۰۱۸). ولی مطالعات آزمایشگاهی در این خصوص بسیار اندک است. به همین دلیل گاهی این نوع پی‌ها را در آزمایشگاه و با مقیاس کوچک تحت بارگذاری قرار داده و آن‌ها را مورد مطالعه قرار می‌دهند. این اقدام می‌تواند راهکار مؤثری در کنترل روش‌های عددی و تحلیلی باشد. در همین راستا مقایسه‌ای آزمایشگاهی بین گروه شمع آزاد و پی‌های گسترده بر روی شمع در رس دستکار^۱ لندن انجام شد (Cooke, ۱۹۸۶). در این پژوهش اختلاف بین دو دیدگاه سنتی و جدید در طراحی پی‌های گسترده بر روی شمع بررسی گردید. در پژوهشی دیگر هم آزمایشی مشابه بر روی پی گسترده و پی‌های گسترده بر روی یک، چهار و نه شمع در ماسه انجام شد (Patil و همکاران، ۲۰۱۶).

۱- مقدمه

مطابق دیدگاه سنتی برای طراحی پی‌های گسترده بر روی شمع (Piled Raft) از سهم باربری خاک صرف‌نظر می‌شود و فرض می‌شود که شمع‌ها کل بار سازه را تحمل می‌نمایند. این دیدگاه در اغلب موارد محافظه‌کارانه بوده و به طرح‌هایی غیراقتصادی منجر خواهد شد. تنها زمانی که کلاهک در گروه شمع از خاک فاصله داشته باشد (گروه شمع آزاد)، این روش طراحی صحیح می‌باشد. امروزه ظرفیت باربری پی گسترده بر روی شمع برابر با مجموع ظرفیت باربری گروه شمع و پی گسترده در نظر گرفته می‌شود (Davis و Poulos، ۱۹۸۰). از این روش در مقاله به‌عنوان روش "جدید" یاد شده است. پی‌های گسترده بر روی شمع از سه جزء شمع، خاک و پی گسترده تشکیل شده است (Reul و Randolph، ۲۰۰۴). باوجود این‌که مطالعات تحلیلی و عددی فراوانی در ارتباط با این نوع پی‌ها انجام شده است (Dung و

1. Remolded clay

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۱۱۱۲۳۱۷۰

آدرس ایمیل: shooshpasha@nit.ac.ir (ع. شوش‌پاشا)، mehdisharafkhan@gmail.com (م. شرف‌خواه).

در پژوهشی دیگر با کمک انجام آزمایش بر روی پی‌های گسترده بر روی شمع در ماسه خشک، نشان داده شد که در ابتدای بارگذاری به علت سختی بیشتر شمع نسبت به خاک، عمده بار وارده به شمع‌ها منتقل می‌شود (Giretti و Fioravante، ۲۰۱۰). بنابراین در این مرحله شیب منحنی بار-نشست پی گسترده بر روی شمع از پی گسترده بیشتر است. بعد از گسیختگی شمع‌ها در نوک و جداره، سختی پی گسترده بر روی شمع حدوداً با سختی پی گسترده برابر شده و منحنی بار-نشست از شیب تقریباً یکسانی تبعیت می‌کنند. در یک نتیجه‌گیری مشابه نیز در پژوهش Poulos و Davis (۱۹۸۰) رفتار پی‌های گسترده بر روی شمع با یک منحنی ساده‌شده ارائه گردید.

در یک مطالعه آزمایشگاهی رفتار پی‌های گسترده بر روی شمع در حالت‌های متصل و بدون اتصال بررسی شد (EISawwaf، ۲۰۱۰). پی گسترده از فولاد نرمه ساخته شده بود. در این پژوهش نیز نشان داده شد که استفاده از شمع در زیر پی گسترده باعث افزایش سختی می‌شود. هرچه نسبت طول به قطر شمع‌ها زیاد گردد، این افزایش سختی بیشتر خواهد شد. در این مطالعه نسبت BPI^۲ یا بهبود فشار باربری معرفی گردید که برابر است با نسبت بار مقاوم در پی‌های گسترده بر روی شمع به بار مقاوم در پی گسترده در یک نشست برابر. این نسبت در ابتدای بارگذاری بیشتر است و با افزایش نشست کاهش می‌یابد. در پژوهشی دیگر تعدادی آزمایش کوچک‌مقیاس در ماسه بر روی شمع منفرد، پی گسترده و پی‌های گسترده بر روی شمع با شمع‌های مرکزی انجام شد (El-Garhy و همکاران، ۲۰۱۳). پژوهشگران در این مطالعه اثر ضخامت و درواقع صلبیت پی گسترده را نیز مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داده که افزایش صلبیت بر روی باربری و نشست متوسط پی گسترده اثر چندانی نداشته ولی در عوض نشست‌های نامتقارن را کاهش می‌دهد.

در یک مدل‌سازی فیزیکی 1g بر روی پی گسترده بر روی شمع در ماسه خشک، منحنی‌های بار-نشست حاصل از آزمایش با نتایج مدل‌سازی عددی و روش تحلیلی مقایسه گردید (Bazyar و همکاران، ۲۰۰۹). پژوهشگران در این مطالعه نشان دادند که با توجه به عدم اطمینان نتایج تحلیلی و عددی، آزمایش بر روی مدل فیزیکی در شرایطی مشابه با محل، می‌تواند بهترین روش کنترل نتایج طراحی باشد.

بدون در نظر گرفتن اثر اندازه در یک مدل آزمایشگاهی، نتایج به‌دست‌آمده تنها محدود به همان مدل خواهد بود. باین‌وجود در بسیاری از مدل‌های فیزیکی هیچ اشاره‌ای به این موضوع نشده است. طبق نتایج حاصل از مطالعه Sedran و همکاران (۲۰۰۱)،

در یک مطالعه آزمایشگاهی با انجام آزمایش بارگذاری بر روی شمع منفرد، شمع منفرد در بین شمع‌های دیگر، پی گسترده، گروه شمع آزاد و پی‌های گسترده بر روی شمع، رفتار پی‌های گسترده بر روی شمع در آزمایشگاه بررسی گردید (Lee و Chung، ۲۰۰۵). در این پژوهش شمع‌ها از جنس آلومینیوم بوده‌اند. پژوهشگران در این تحقیق اثر اندرکنش میان کلاهک-خاک-شمع را بررسی نمودند. طبق نتایج حاصل از این تحقیق وقتی فاصله شمع‌ها کم است، تنش‌ها و کرنش‌ها در خاک اطراف شمع با هم همپوشانی پیدا کرده و باعث می‌شود که رفتار باربری آن با شمع‌های منفرد متفاوت باشد. این پژوهشگران نشان دادند که این اندرکنش‌ها می‌تواند ظرفیت باربری گروه شمع را افزایش و یا کاهش دهد. اندرکنش در جهت نامطلوب به این علت است که تنش‌ها در اطراف شمع و کلاهک با هم تداخل پیدا کرده و در نتیجه سبب کاهش سختی خاک و افزایش نشست می‌شود. در جهت مطلوب، تنش‌های زیر پی گسترده موجب افزایش تنش‌های قائم و افقی در اطراف شمع شده و ظرفیت باربری آن‌ها را افزایش می‌دهد. این پژوهشگران نشان دادند که کوبیدن شمع در هنگام اجرای آن باعث افزایش دانسیته خاک مجاور شمع‌ها تا فاصله سه برابر قطر می‌شود. این عمل منجر به افزایش باربری جداره و نوک شمع‌ها می‌شود. در فواصل دورتر این اثر ناچیز است. از آنجایی که این اندرکنش‌ها در شمع‌های گوشه نسبت به شمع‌های مرکزی کم‌تر است، رفتار باربری شمع‌های گوشه تغییر قابل توجهی با شمع منفرد ندارد.

Hemsley (۲۰۰۰)، نشان داد که در پی‌های گسترده شمعی این اندرکنش شامل اندرکنش خاک-شمع، خاک-پی گسترده و شمع-شمع می‌باشد. او رفتار شمع‌های به‌کار رفته در زیر پی گسترده برج Westend 1 Tower را با شمع منفرد و نیز گروه شمع مقایسه نمود. طبق این مطالعه بیشترین سختی مربوط شمع منفرد است و کم‌ترین سختی مربوط به شمع قرار گرفته در پی گسترده شمعی می‌باشد. شمع قرار گرفته در گروه شمع آزاد در بین این دو دسته قرار گرفته است.

Hemsley (۲۰۰۰)، دلیل کاهش سختی شمع در گروه شمع آزاد نسبت به شمع منفرد را اندرکنش میان تنش‌های ناشی از بارگذاری در شمع‌های مجاور می‌داند. در شمع‌های واقع در پی گسترده شمعی علاوه بر عامل اخیر، اثر اندرکنش تنش‌های ناشی از پی گسترده نیز موجب کاهش بیشتر سختی در این شمع‌ها گردیده است. همچنین شمع‌های واقع در پی گسترده شمعی نسبت به شمع منفرد، دارای ظرفیت باربری بیشتری می‌باشند. این مشاهده نیز به علت افزایش تنش در جداره و نوک شمع در اثر فشار زیر پی گسترده است.

با این تفاوت که شمع‌های مورد نظر، بتنی درجا بود و نیز پی گسترده با مصالح بتنی مسلح ساخته شد. انواع پی‌هایی که در این پژوهش مورد آزمایش قرار گرفت، شامل پی گسترده، شمع منفرد، شمع منفرد در بین شمع‌های دیگر، پی‌های گسترده بر روی چهار و نه شمع بود. به مدل‌ها بار قائم وارد شد و با کمک نیروسنج سهم نیروی وارد به شمع‌ها و پی گسترده اندازه‌گیری شد. در این مطالعه اثر احداث شمع‌ها در گروه بر روی یکدیگر و همچنین اثر تعداد و فاصله شمع‌ها بر روی نشست و باربری پی تحقیق گردید.

۲- برنامه‌ریزی پژوهش

شمع‌های به‌کار رفته در آزمایش‌ها بتنی درجا بودند. ابعاد شمع‌ها بعد از خارج نمودن از خاک اندازه‌گیری شد. قطر شمع‌ها برابر ۲۸/۴ میلی‌متر و طول مدفون آن‌ها برابر ۲۵۳ میلی‌متر و به این ترتیب نسبت طول به قطر شمع‌ها برابر با ۸/۹۱ بود. فرض شد که شمع‌ها صلب بودند یعنی نشست در بالا و پایین شمع‌ها با هم برابر بود. پی گسترده مورد استفاده در مدل، مربعی بوده و طول و عرض آن برابر ۲۰ سانتی‌متر و ضخامت آن برابر سه سانتی‌متر بود. پی گسترده نیز بتن مسلح بود و به‌صورت درجا اجرا شد. انواع پی‌های مورد آزمایش در این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است. نسبت فاصله به قطر شمع‌ها (s/d) در مدل دارای چهار شمع و نه شمع به ترتیب برابر ۵/۲ و ۲/۶ بود.

مدل‌های مورد آزمایش و نحوه نام‌گذاری آن‌ها به این صورت است. پی گسترده (#) R، شمع منفرد (#) S، شمع منفرد در بین شمع‌های دیگر (#) SG، پی‌های گسترده بر روی چهار و نه شمع به ترتیب (#) PR-4 و (#) PR-9 که # شماره تکرار هر آزمایش را نشان می‌دهد.

۳- مصالح مورد آزمایش

خاک مورد آزمایش ماسه ریزدانه خشک بود. این خاک از مناطق ساحلی دریای مازندران و از شهرستان بابلسر تهیه گردید. طبق طبقه‌بندی یونیفاید^۳ این خاک در طبقه SP^۴ قرار می‌گیرد. منحنی دانه‌بندی ماسه مورد آزمایش در شکل (۲) نشان داده شده است. مشخصات مصالح مورد آزمایش در جدول (۱) نشان داده شده است.

طبق نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش Altaee و Felleniu (۱۹۹۴) خاک مورد آزمایش می‌بایست به‌اندازه کافی سست باشد. در این صورت رفتار کیفی مدل آزمایشگاهی می‌تواند برای پی‌های با مقیاس واقعی قابل تعمیم باشد. بنابراین در این پژوهش از ماسه با دانسیته نسبی ۳۰٪ استفاده شد.

اگر نسبت بعد فونداسیون به قطر دانه‌ها بزرگ‌تر از ۳۰ باشد، می‌توان از اثر مقیاس اندازه دانه‌ها صرف‌نظر نمود. در پژوهشی دیگر، با آزمایش سنتریفیوژ بر روی مهار کششی مدفون، اثر مقیاس در خاک بررسی گردید (Tagaya و همکاران، ۱۹۸۸). طبق این تحقیق اگر نسبت قطر مهار به‌اندازه متوسط دانه‌ها بزرگ‌تر از ۲۵ باشد، اثر مقیاس اندازه دانه‌ها بر روی نتایج ناچیز است. آن‌ها همچنین با مروری بر پژوهش‌های گذشته برای نسبت عرض فونداسیون به قطر دانه‌ها بین ۳۶ تا ۲۸۶، به نتیجه مشابهی دست یافتند.

مطابق نتایج پژوهش Altaee و Felleniu (۱۹۹۴) رفتار خاک در حالت کلی به تنش محصورشدگی اولیه و نسبت منافذ اولیه خاک بستگی دارد. به‌همین دلیل مدل 1g که دارای تنش‌های متفاوت و نسبت منافذی برابر با سازه واقعی باشد نمی‌تواند رفتار واقعی سازه را نمایش دهد. از طرفی پژوهشگران در این مطالعه با بهره‌گیری از مبانی «نسبت منافذ بحرانی» و نیز «خط حالت پایا» نشان دادند که رفتار خاک به‌جای این‌که تابع نسبت منافذ اولیه باشد، به فاصله نسبت منافذ اولیه از خط حالت پایا بستگی دارد. بنابراین اگرچه از نظر پژوهشگران این مطالعه تفاوت سطح تنش در مدل‌های 1g و سازه واقعی، موجب تفاوت در رفتار آن‌ها می‌گردد، ولی طبق نظر آن‌ها با انتخاب نسبت منافذ مناسب برای مدل می‌توان رفتار سازه واقعی را در مدلی 1g پیش‌بینی نمود. طبق توصیه آن‌ها خاک مورد استفاده در مدل‌های فیزیکی 1g می‌بایست به‌اندازه کافی سست باشد تا این شرایط را فراهم آورد.

شرف‌خواه (۱۳۹۷)، در مطالعه آزمایشگاهی خود اثر مقیاس مدل‌های فیزیکی 1g برای پی‌های گسترده بر روی شمع را در ماسه بررسی نمود. در پژوهش مذکور از تحلیل عددی اجزاء محدود استفاده شد و روشی جهت به‌کارگیری نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش برای مقیاس بزرگ‌تر ارائه گردید.

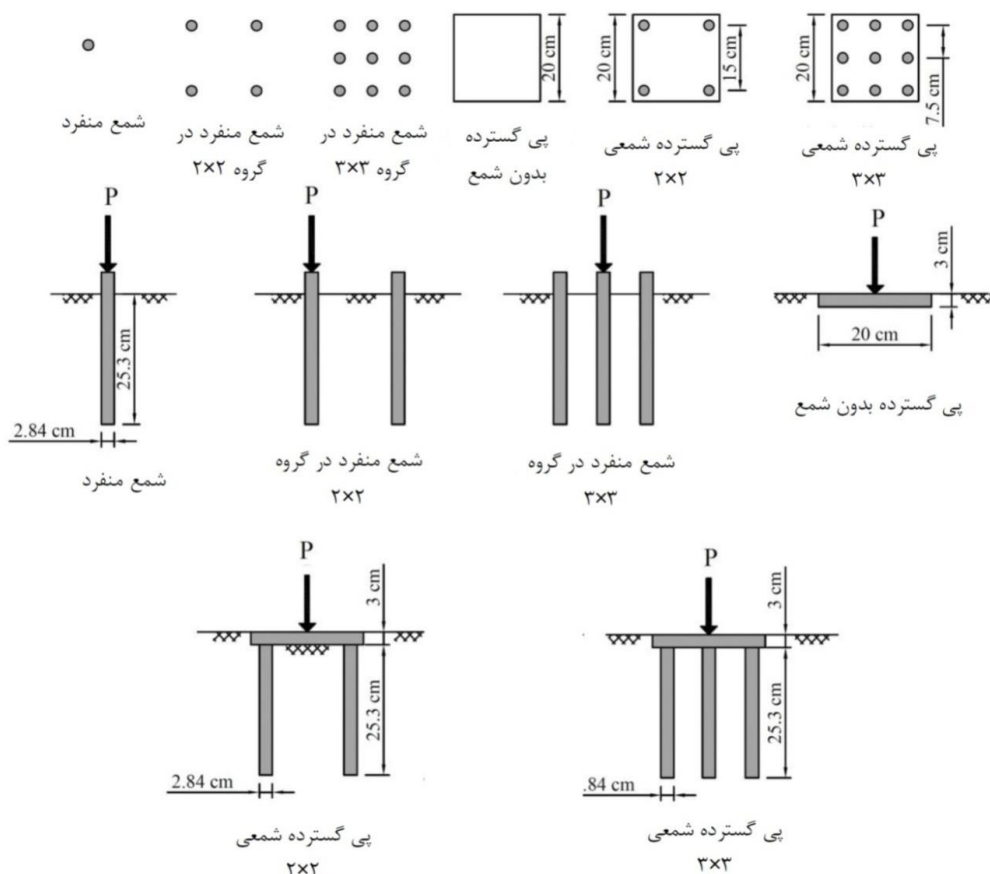
در پژوهش‌های آزمایشگاهی فوق، از شمع‌های فلزی آلومینیومی و یا فولادی استفاده گردید. شمع‌ها اغلب به‌صورت کوبشی و یا توسط جک به درون خاک هدایت شده‌اند. این در حالی است که در بسیاری از پروژه‌ها از شمع‌های بتنی درجا ریز استفاده می‌گردد. زاویه اصطکاک بین جداره شمع و خاک (δ) در شمع‌های بتنی درجا و شمع‌های فولادی متفاوت می‌باشد. برخلاف شمع‌های بتنی درجا، در شمع‌های کوبشی، دانسیته طبیعی خاک در هنگام کوبیدن شمع افزایش می‌یابد. بنابراین برای ارزیابی رفتار پی‌های گسترده بر روی شمع با شمع‌های بتنی درجا، مدل‌سازی این شمع‌ها با شرایط مشابه در آزمایشگاه ضروری است.

با توجه به توضیحات فوق، مطالعه حاضر بر روی مدل‌سازی فیزیکی پی‌های گسترده بر روی شمع در آزمایشگاه متمرکز شد.

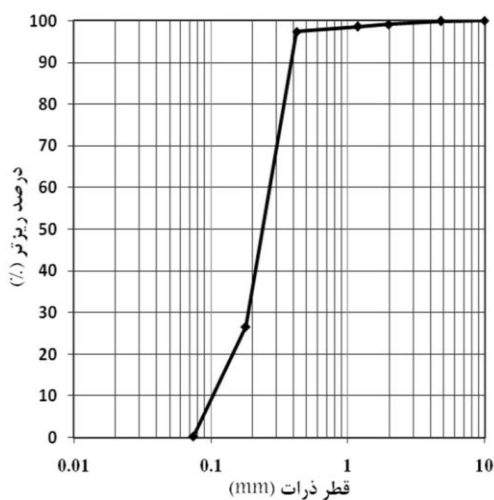
۴- جعبه آزمایش و تجهیزات بارگذاری

جهت انجام آزمایش از یک مخزن مربعی استفاده شد. دیواره مخزن مجهز به شبکه فلزی بود تا صلبیت آن افزایش یابد. ابعاد داخلی این جعبه $1/3 \times 1/3$ متر و ارتفاع آن حدود $1/0$ متر بود. مخزن بر روی یک پاشنه بتن‌آرمه صلب به ابعاد $2/2 \times 2/2$ متر و

ضخامت 30 سانتی‌متر قرار گرفت. پوشش دیواره اطراف مخزن از جنس پلکسی شفاف بود تا سطح خاک در هنگام خاکریزی قابل‌رؤیت بوده باشد. عکس‌عمل‌های لازم برای بارگذاری توسط یک قاب فلزی فراهم گردید. این قاب از پایین به پاشنه بتنی و از بالا به یک تیرورق با ممان اینرسی زیاد متصل شد.



شکل ۱- انواع مدل‌های مورد آزمایش در این مطالعه



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی ماسه مورد آزمایش

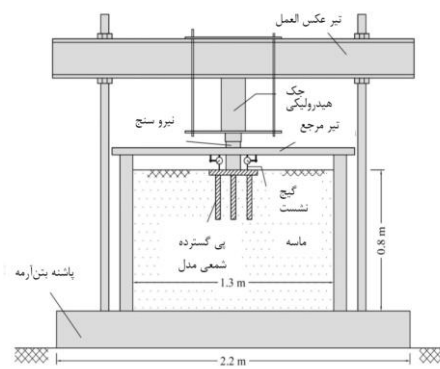
در زیر تیر آهن جک هیدرولیکی قرار گرفت و بارگذاری توسط میله رابط به نیروسنج و سپس به مدل وارد گردید. جهت نگه داشتن جک در بالای پی و زیر تیرورق، از دو صفحه فلزی استفاده شد. یکی از آن‌ها روی تیرورق و دیگری در زیر آن قرار گرفت. در صفحه زیرین یک سوراخ به قطر 100 میلی‌متر تعبیه شد تا شفت جک در هنگام بارگذاری از داخل سوراخ خارج شود و بار اعمال گردد. از آنجایی‌که یکی از اهداف پژوهش اندازه‌گیری نشست نامتقارن و چرخش پی بود، از این رو یک گیج در مرکز، دو گیج در گوشه و دو گیج نیز در وسط اضلاع پی گسترده قرار گرفت. برای شمع منفرد از دو گیج در دو طرف شمع استفاده شد. گیج‌ها بر روی دو تیر مرجع نصب شدند. تیرهای مرجع بر روی لبه‌های جعبه قرار گرفت. این تجهیزات در شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح مورد آزمایش

۲/۷۹	توده ویژه
۱۴/۹	وزن مخصوص کمپنه، (kN/m ³)
۱۷/۶	وزن مخصوص بیشینه، (kN/m ³)
۰/۱۱	اندازه مؤثر دانه‌ها، D ₁₀ (mm)
۲/۶۰	ضریب یکنواختی، C _u
۱/۰۹	ضریب انحناء، C _c
۳۷	زاویه اصطکاک داخلی خاک، ϕ _(peak) °
۳۴	زاویه اصطکاک داخلی خاک در حجم ثابت، ϕ _(cv) °
۲۵	مقاومت فشاری بتن پی گسترده بر روی شمع، (mPa)
۱۰	مقاومت فشاری بتن شمع‌ها، (mPa)
۲۲/۶	وزن مخصوص پی گسترده، (kN/m ³)
۲۰/۸	وزن مخصوص شمع، (kN/m ³)

(۲۰۰۹) آن را برابر با دو و Giretti و Fiorvante، (۲۰۱۰) فاصله نوک شمع‌ها از کف مخزن را ۲۰ برابر قطر شمع‌ها و عرض مخزن را سه برابر عرض پی گسترده پیشنهاد نمودند. طبق پیشنهاد استاندارد BS 1377:Part9 در مورد آزمایش بارگذاری صفحه، در صورتی که فاصله تکیه‌گاه‌ها از محور صفحه بیش از سه برابر عرض صفحه باشد، از اثر آن‌ها بر روی نتایج می‌توان صرف نظر نمود. همان طوری که ملاحظه می‌شود، از آنجایی که ابعاد پی گسترده ۲۰×۲۰ سانتی‌متر و طول شمع‌ها ۲۵۳ میلی‌متر بوده است، لذا ابعاد انتخابی برای مخزن و ارتفاع خاک در مطالعه حاضر بیش از مقادیر پیشنهاد شده توسط پژوهشگران فوق و در حدود مقدار پیشنهادی در مورد آزمایش بارگذاری صفحه بود.

طبق این توضیحات از اثر جداره بر روی نتایج صرف نظر شد. هم‌زمان لوله‌ها به سمت پایین هدایت شدند و درون آن حفاری گردید. حفاری شمع‌های آزمایش توسط اوگر^۵ انجام گردید. هم‌زمان با پیشرفت حفاری، غلاف نیز با آرامی به درون خاک هدایت گردید. به این ترتیب برای احداث هر مدل ابتدا تمامی لوله‌ها در درون خاک جای گرفتند و سپس درون آن‌ها به ترتیب حفاری شد. بعد از حفاری شمع‌ها ارتفاع داخل لوله‌ها که تقریباً با طول شمع‌ها برابر است، اندازه‌گیری شد. سپس بتن‌ریزی انجام گردید. لوله‌های فولادی در هنگام بتن‌ریزی از درون خاک خارج شدند. این کار دقیقاً همانند ورود لوله‌ها به آرامی انجام شد که منجر به دست‌خوردگی زیاد خاک نشود. سپس شابلون بیرون آورده شد.



شکل ۳- تجهیزات مورد استفاده در آزمایش بارگذاری

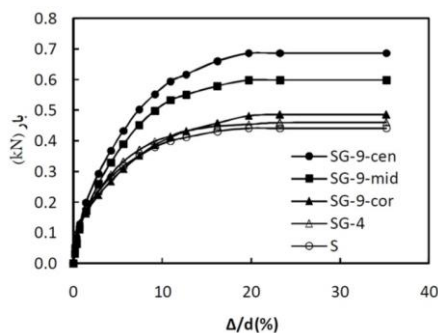
به منظور اندازه‌گیری توزیع تنش‌ها و نیروها، تعدادی نیروسنج بر روی شمع‌ها و نیز تعدادی فشارسنج در خاک قرار گرفت. محل قرارگیری نیروسنج‌ها بر حسب نوع پی و آرایش شمع‌ها متفاوت بودند. این ابزار در حالت کلی در گوشه، وسط لبه، مرکز پی گسترده و نیز در مجاورت شمع‌ها کار گذاشته شدند. شکل (۴) نحوه نصب این ابزار را نشان می‌دهد. برای احداث پی گسترده بر روی شمع تراز بالای شمع با تراز خاک اطراف آن برابر گردید و سپس پی گسترده بر روی آن اجرا شد. در مرحله بعد یک ردیف شبکه ۲×۲ میلگرد نمره شش با رعایت پوشش بتنی در داخل گود قرار داده شد و سپس بتن‌ریزی انجام شد. در نهایت پس از پایان بتن‌ریزی پی گسترده، بالای پی با خاک اطراف آن هم‌تراز شد. در هنگام بتن‌ریزی در مرکز پی گسترده و بر روی بتن تازه صفحه نشیمن فولادی به قطر ۹۰ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر قرار داده شد. این صفحه برای کاهش تمرکز تنش استفاده شد. سپس غلاف فلزی مربعی از اطراف پی گسترده به آرامی بیرون آورده شد. بعد از ساخت مدل، به بتن فرصت داده شد تا به مقاومت لازم برسد. ابعاد هر مدل بعد از انجام آزمایش بارگذاری و تخلیه مخزن اندازه‌گیری گردید.

۵- روش انجام آزمایش

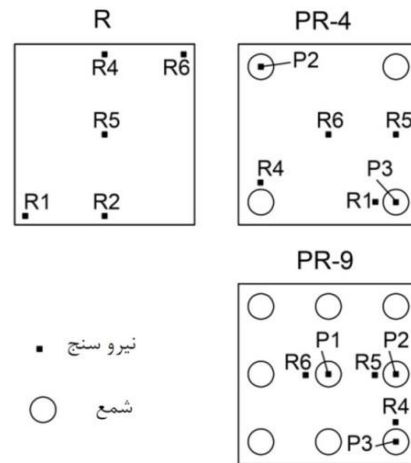
ابتدا ماسه مورد نظر به صورت بارشی به درون جعبه ریخته شد. جهت فراهم آوردن خاکی یکنواخت ماسه به صورت لایه لایه و با وزن و دانسیته یکسان برای هر لایه ریخته شد. به این ترتیب ضخامت هر یک از لایه‌های ماسه‌ای بعد از تراکم برابر ۱۰ سانتی‌متر و دانسیته نسبی خاک برابر ۳۰٪ شد. ارتفاع خاک در پایان خاکریزی برابر ۸۰ سانتی‌متر بود که بیش از دو برابر ارتفاع شمع بود. جهت انجام عملیات تراکم از صفحه و میله چوبی به ابعاد ۲۰×۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. برای احداث پی گسترده بر روی شمع ابتدا یک غلاف با ابعاد داخلی ۲۰×۲۰ سانتی‌متر و به عمق پنج سانتی‌متر به درون خاک هدایت شد. سپس خاک درون غلاف تخلیه گردید. یک شابلون چوبی درون غلاف قرار داده شد و سپس لوله‌های فولادی درون شابلون و روی خاک قرار گرفت. شابلون چوبی جهت تعیین محل دقیق شمع‌ها و نیز هدایت قائم شمع‌ها به کار رفت. قطر خارجی لوله و طول آن به ترتیب ۲۵ و ۲۵۰ میلی‌متر بود. به جهت این‌که اثر شرایط انتهایی بر روی نتایج ناچیز شود، Lee و Chung، (۲۰۰۵) نسبت ارتفاع خاک به طول شمع را برابر با چهار و El-Garhy و همکاران (۲۰۱۳)، Bazyar و همکاران

۶- نتایج آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل آن‌ها

میانگین نتایج آزمایش بارگذاری بر روی شمع منفرد و شمع منفرد در بین شمع‌ها با آرایش ۲×۲ و ۳×۳ در شکل (۶) نشان داده شده است. ظرفیت باربری نهایی شمع برابر ۰/۴۴ کیلو نیوتن به دست آمده است. بار نهایی شمع‌ها، محل تقاطع دو خط مماس بر منحنی بار-نشست در شروع و انتهای بارگذاری در نظر گرفته شده است (Tomlinson, ۲۰۰۴). با قرارگیری شمع منفرد در بین شمع‌های دیگر، ظرفیت باربری و سختی شمع‌ها افزایش پیدا کرده است. افزایش ظرفیت باربری در شمع‌های مرکزی، لبه و گوشه واقع در بین شمع‌ها با آرایش ۳×۳ به ترتیب ۵۷٪، ۳۶٪ و ۱۱٪ می‌باشد. این مقدار برای شمع‌های گوشه واقع در بین شمع‌ها با آرایش ۲×۲، ۵٪ است. شمع منفرد کم‌ترین سختی و ظرفیت باربری را دارد. شمع واقع در بین شمع‌ها با آرایش ۲×۲ رفتاری مشابه با شمع گوشه واقع در بین شمع‌ها با آرایش ۳×۳ را نشان می‌دهد. افزایش سختی و ظرفیت باربری شمع‌های مرکزی به دلیل محصورشدگی شمع توسط شمع‌های دیگر و نیز به دلیل افزایش دانسیته ناشی از نفوذ لوله می‌باشد. به نظر می‌رسد که محصورشدگی شمع توسط شمع‌های دیگر باعث افزایش سختی متوسط در خاک اطراف شمع می‌شود. این افزایش سختی متوسط سبب کاهش تغییر شکل خاک اطراف شمع و در نتیجه کاهش نشست شمع می‌شود. همچنین به دلیل وقوع آرچینگ، تنش همه‌جانبه در اطراف شمع و در نتیجه ظرفیت باربری نهایی شمع افزایش می‌یابد. به منظور بررسی رفتار پی‌های گسترده بر روی شمع، آزمایش بارگذاری به ترتیب بر روی پی گسترده و پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۲×۲ و ۳×۳ انجام شده است. هر آزمایش به منظور کنترل صحت نتایج یک بار تکرار شده است. شکل (۷) مقایسه بین منحنی‌های بار-نشست را در شمع‌های زیر پی گسترده بر روی شمع نشان می‌دهد. Δ_{max} نشست ماکزیمم شمع و d قطر شمع می‌باشد. شمع‌های گوشه در پی‌های گسترده بر روی شمع با آرایش ۲×۲ و ۳×۳ انطباق زیادی دارند.



شکل ۶- مقایسه منحنی‌های بار-نشست شمع منفرد در بین شمع‌های دیگر

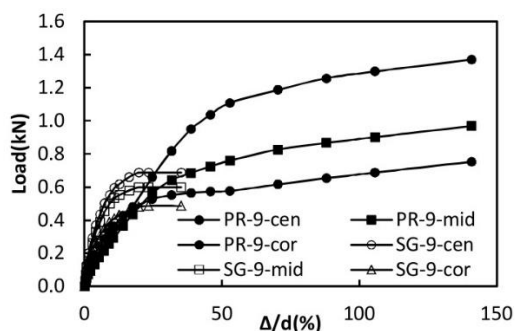


شکل ۴- جانمایی ابزارگذاری زیر پی گسترده قرار گرفته بر روی شمع‌ها

جهت اندازه‌گیری نشست قائم پی در این پژوهش از پنج گیج عقربه‌ای به دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و با حداکثر دامنه ۵۰ میلی‌متر بر روی کلاهک استفاده شد. آزمایش به صورت گام‌به‌گام و به روش بار ثابت انجام شد. در هر گام بار وارده ثابت نگه داشته شد تا زمانی که آهنگ نشست به کم‌تر از ۰/۰۳ میلی‌متر در دقیقه در ۳ دقیقه متوالی در پی گسترده و پی گسترده بر روی شمع و ۰/۲۵ میلی‌متر در ساعت در شمع منفرد برسد. بار اعمال شده توسط نیروسنج اندازه‌گیری شد. در هنگام آزمایش بر روی شمع منفرد بارگذاری تا لحظه‌ای که نشست شمع به حداقل ۱۵ درصد قطر آن برسد ادامه داده شد. پایان بارگذاری در پی گسترده بر روی شمع لحظه‌ای بود که نشست به ۱۵٪ عرض پی گسترده برسد و یا این که بدون افزایش بار نشست به میزان قابل توجهی افزایش یابد. هر آزمایش یک بار تکرار شد تا صحت نتایج کنترل گردد. شکل (۵) پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۳×۳ را در هنگام تخلیه مخزن نمایش می‌دهد.



شکل ۵- پی گسترده بر روی شمع در هنگام تخلیه مخزن



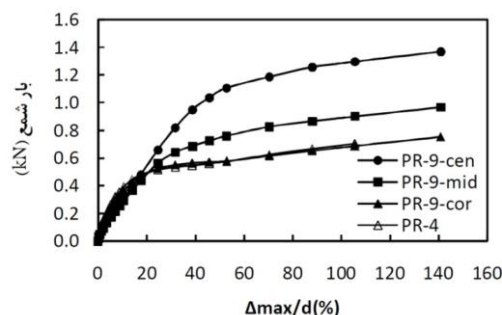
شکل ۹- مقایسه منحنی‌های بار- نشست شمع‌های منفرد در بین شمع‌های دیگر با آرایش ۳×۳ و شمع‌های زیر پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۳×۳

در سایر شمع‌ها به علت اثر بیشتر فشار خاک زیر پی و اصطکاک منفی ناشی از آن، سختی شمع‌های زیر پی گسترده کم‌تر شده ولی در عوض ظرفیت باربری به میزان چشمگیری افزایش یافته است. افزایش ظرفیت باربری در شمع‌های گوشه، لبه و مرکزی در پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۳×۳ نسبت به شمع منفرد به ترتیب حدود ۱۶٪، ۶۴٪ و ۲۶۴٪ تخمین زده شده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد، این نتایج با نتایج حاصل از مطالعه Hemsley (۲۰۰۰)، منطبق است.

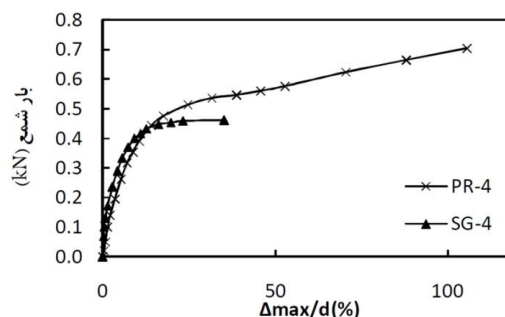
میانگین نتایج اندازه‌گیری نیروسنج‌های نصب‌شده در زیر پی گسترده در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در پی گسترده، اولویت پلاستیک شدن نواحی در زیر پی گسترده به ترتیب در گوشه، لبه و مرکز پی است. از طرفی با نزدیک شدن به مرکز پی بار نهایی افزایش می‌یابد. در واقع به علت محصورشدگی نواحی مرکزی تسلیم شدن در این نواحی نسبت به لبه و گوشه در تنش‌های بزرگ‌تری رخ می‌دهد. در محدوده بار مجاز پی تنش‌ها به یکدیگر نزدیک می‌باشند.

در پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۲×۲ با نزدیک شدن نیروسنج مجاور شمع به فشارسنج لبه، منحنی‌های این دو به یکدیگر نزدیک شده‌اند. در حالت کلی از آنجایی که شمع‌های گوشه به‌طور متقارن بخشی از بار را تحمل می‌کنند، فشار زیر پی یکنواخت‌تر شده است. در پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۳×۳ در ابتدای بارگذاری عمده بار توسط شمع‌ها تحمل می‌شود و از این‌رو افزایش فشار زیر پی به آهستگی اتفاق می‌افتد. بعد از گسیختگی شمع‌ها فشار زیر پی شروع به افزایش می‌کند. فشار زیر پی از گوشه به سمت مرکز پی افزایش می‌یابد. در شمع مرکزی به علت اندرکنش تنش‌ها سختی شمع کم‌تر است و فشار خاک در نواحی مرکزی بیشتر است.

در ابتدای بارگذاری، سختی شمع‌های گوشه از سایر شمع‌ها بیشتر است. شکل (۸) مقایسه بین منحنی بار- نشست شمع منفرد گوشه در گروه شمع و شمع گوشه در پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۲×۲ را نشان می‌دهد. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود تا مرحله گسیختگی شمع‌ها، منحنی‌ها انطباق زیادی دارند. در پی-های گسترده بر روی شمع بعد از گسیختگی شمع، به علت افزایش فشار ناشی از پی گسترده در اطراف شمع، در رفتار شمع سخت‌شدگی مجدد رخ می‌دهد. در شمع‌های مرکزی و لبه به‌علت آن که اثر اصطکاک منفی ناشی از نشست خاک بیشتر است، افزایش ظرفیت باربری ناشی از فشار پی گسترده به تدریج رخ می‌دهد. در شمع‌های گوشه اثر فشار خاک ناشی از پی گسترده بر روی رفتار شمع کم‌تر است. شکل (۹) مقایسه‌ای بین منحنی‌های بار- نشست شمع‌ها را در پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۳×۳ و شمع‌های منفرد در بین شمع‌ها با آرایش ۳×۳ نشان می‌دهد. رفتار شمع‌های گوشه تقریباً مشابه است. نقطه گسیختگی در شمع‌های گوشه تقریباً منطبق است، با این تفاوت که در پی گسترده بر روی شمع به علت فشار ناشی از پی گسترده مقداری افزایش در ظرفیت باربری شمع رخ می‌دهد.

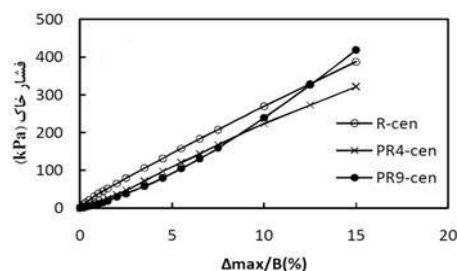


شکل ۷- مقایسه منحنی‌های بار- نشست شمع‌های زیر پی گسترده بر روی شمع در انواع مدل‌های آزمایش

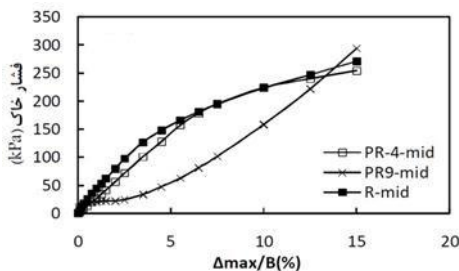


شکل ۸- مقایسه منحنی‌های بار- نشست شمع‌های منفرد در بین شمع‌های دیگر با آرایش ۲×۲ و شمع‌های زیر پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۲×۲

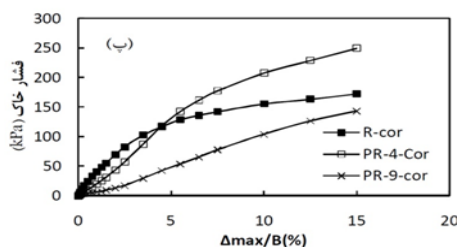
به‌ترتیب بار نهایی و مجاز شمع، S_{Pu} و S_{Pa} به‌ترتیب نشست متناظر با بار نهایی و مجاز شمع می‌باشد. بار نهایی شمع‌ها، محل تقاطع دو خط مماس بر منحنی بار-نشست در شروع و انتهای بارگذاری می‌باشد (Tomlinson, ۲۰۰۴). ضریب اطمینان در محاسبه بار مجاز برابر ۳ در نظر گرفته شده است. در طراحی گروه شمع‌ها، معمولاً از اثر محل قرارگیری شمع‌ها در محاسبه ظرفیت باربری شمع‌ها صرف‌نظر می‌گردد.



(الف)

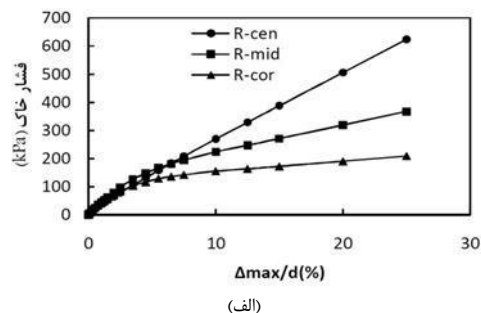


(ب)

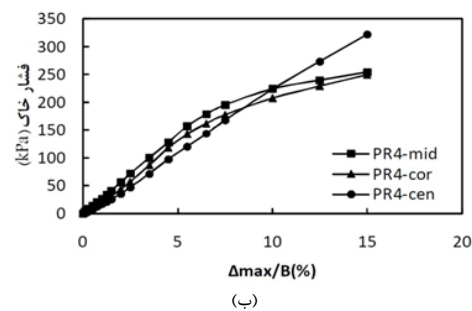


(ج)

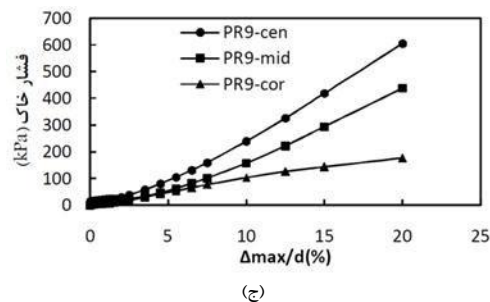
شکل ۱۱- مقایسه میانگین منحنی‌های فشار-نشست در نقاط متناظر در: (الف) مرکز، (ب) وسط لبه، (ج) گوشه در زیر پی گسترده و پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۲×۲ و ۳×۳



(الف)



(ب)



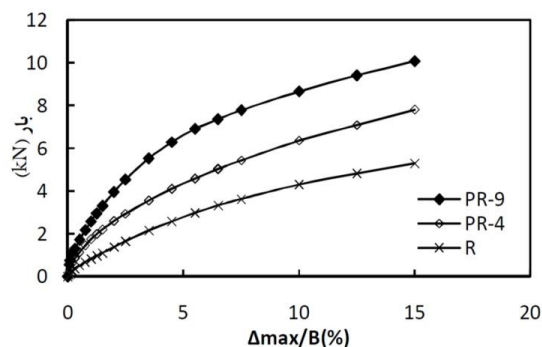
(ج)

شکل ۱۰- مقایسه میانگین منحنی‌های فشار-نشست در زیر پی گسترده: (الف) پی گسترده، (ب) پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۲×۲، (ج) پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۳×۳

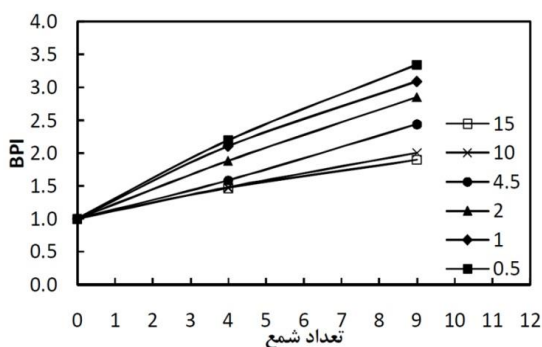
شکل (۱۱) فشار زیر پی را در نقاط متناظر با یکدیگر مقایسه می‌نماید. در مرکز پی منحنی‌ها انطباق بیشتری دارد. در گوشه پی به‌دلیل سختی بیشتر شمع‌های گوشه، در ابتدا فشار خاک کم است و سپس بعد از تسلیم شدن شمع‌ها فشار خاک افزایش می‌یابد. بزرگی مقدار فشار با افزایش تعداد شمع کاهش می‌یابد. جدول (۲) خلاصه نتایج تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها در انواع مدل‌های آزمایش را نشان می‌دهد. در این جدول P_a و P_u

جدول ۲- ظرفیت باربری و نشست شمع‌ها در مدل‌های مورد آزمایش

شمع‌های مدل‌ها	P_u (kN)	P_a (kN)	S_{Pu}/d (%)	S_{Pa}/d (%)	$P_{a(cal)}$ (kN)	$P_a/P_{a(cal)}$
S	۰/۴۴	۰/۱۵	۱۹/۰۵	۱/۱۴	۰/۱۵	۱/۰۰
SG-4	۰/۴۶	۰/۱۵	۱۹/۱۲	۱/۰۸	۰/۱۵	۱/۰۵
SG-9-cor	۰/۴۹	۰/۱۶	۲۰/۹۶	۱/۴۱	۰/۱۵	۱/۱۱
SG-9-mid	۰/۶۰	۰/۲۰	۲۰/۰۱	۱/۸۶	۰/۱۵	۱/۳۶
SG-9-cen	۰/۶۹	۰/۲۳	۲۰/۲۱	۱/۸۸	۰/۱۵	۱/۵۷
PR-4	۰/۴۹	۰/۱۶	۲۰/۶۶	۲/۷۰	۰/۱۵	۱/۱۱
PR-9-cor	۰/۵۱	۰/۱۷	۲۲/۶۴	۲/۸۹	۰/۱۵	۱/۱۶
PR-9-mid	۰/۷۲	۰/۲۴	۴۵/۱۷	۸/۱۷	۰/۱۵	۱/۶۴
PR-9-cen	۱/۱۶	۰/۳۹	۶۴/۷۱	۱۳/۹۳	۰/۱۵	۲/۶۴

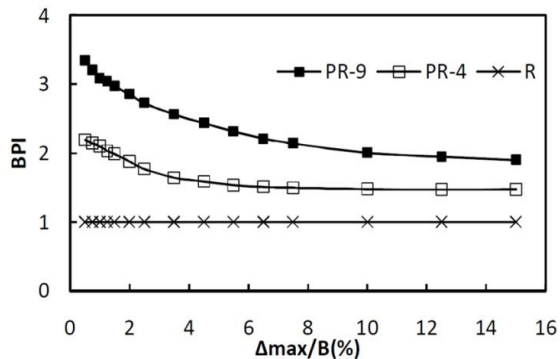


شکل ۱۲- مقایسه میانگین منحنی‌های بار- نشست پی‌های گسترده بر روی شمع با پی گسترده



شکل ۱۳- تغییرات BPI بر حسب تعداد شمع احداث شده در زیر پی گسترده

نسبت BPI در مدل‌های آزمایش در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. این نسبت با افزایش نشست پی کاهش می‌یابد و بعد از گسیختگی شمع‌ها به سمت حد ثابتی میل می‌کند. در بار نهایی پی گسترده بر روی شمع با آرایش 2×2 و 3×3 ، BPI به ترتیب به حدود $1/5$ و 2 میل می‌کند. همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد، این مشاهده با نتایج به دست آمده توسط EISawwaf (۲۰۱۰) مطابقت دارد.



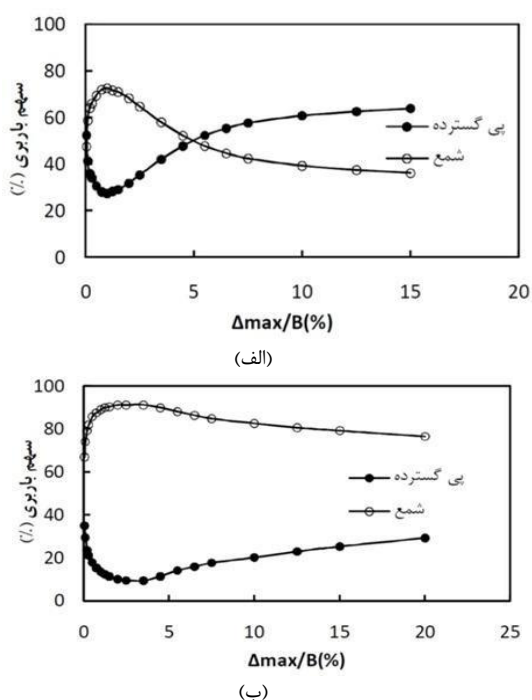
شکل ۱۴- تغییرات BPI بر حسب نشست ماکزیمم پی گسترده

در این مطالعه $Pa(cat)$ بار مجاز محاسباتی مورد استفاده در طراحی می‌باشد و برای تمامی شمع‌ها یکسان و برابر با بار مجاز اندازه‌گیری شده در آزمایش بارگذاری شمع منفرد فرض شده است. $Pa/Pa(cat)$ نسبت بار مجاز اندازه‌گیری شده در هر آزمایش به بار مجاز محاسباتی می‌باشد. این نسبت میزان خطای موجود در محاسبات طراحی شمع را نشان می‌دهد. این نسبت در شمع مرکزی قرار گرفته در زیر پی گسترده بر روی شمع با آرایش 3×3 برابر $2/64$ به دست آمد. به عبارت دیگر باربری شمع مرکزی بیش از دو برابر مقدار طراحی است. در شمع‌های لبه در پی گسترده بر روی شمع نیز این نسبت قابل ملاحظه است. در مجموع برای تمامی شمع‌های قرار گرفته در پی گسترده بر روی شمع ظرفیت باربری واقعی شمع بیش از شمع منفرد است. دلیل آن اندرکنش تنش-های شمع‌های مجاور و فشار زیر پی گسترده می‌باشد.

در شمع منفرد، شمع‌های منفرد در گروه شمع و شمع‌های گوشه در پی گسترده بر روی شمع، اندرکنش تنش‌ها کم‌تر است. این شمع‌ها همگی در نشست حدود 20% قطر شمع به بار نهایی خود می‌رسد. در شمع‌های گوشه در پی گسترده بر روی شمع به علت اندرکنش تنش‌ها نشست متناظر با بار نهایی به نسبت به شمع منفرد به میزان جزئی افزایش می‌یابد. در شمع‌های لبه و مرکزی نیز به علت بروز اصطکاک منفی، نشست متناظر با بار نهایی افزایش می‌یابد. در شمع مرکزی در پی گسترده بر روی شمع با آرایش 3×3 ، نشست متناظر با بار نهایی به طور قابل ملاحظه افزایش یافته و به حدود 64% قطر شمع رسیده است. نشست متناظر با بار مجاز در شمع منفرد کم‌تر از حدود 2% قطر شمع و در شمع مرکزی پی گسترده بر روی شمع با آرایش 3×3 حدود 14% قطر شمع است.

در شکل (۱۲) منحنی بار- نشست پی‌های گسترده بر روی شمع با پی گسترده مقایسه شده است. با افزایش تعداد شمع‌ها مقدار نشست پی گسترده بر روی شمع در بار ثابت به طور قابل ملاحظه کاهش می‌یابد. در ابتدای بارگذاری از آنجایی که سهم بارگذاری بیشتر است. در پی گسترده بر روی ۹ شمع منحنی بارگذاری در ابتدا بیشترین شیب را دارد. بعد از گسیختگی شمع‌ها شیب منحنی بار- نشست تقریباً با پی گسترده شمع برابر می‌شود. همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد، این مشاهده با نتایج به دست آمده توسط (Davis و Poulos، ۱۹۸۰) در خصوص منحنی ساده شده بار- نشست پی گسترده بر روی شمع مطابقت دارد. (Fioravante و Giretti، ۲۰۱۰) هم در مطالعه آزمایشگاهی خود بر روی ماسه به نتایج مشابهی دست یافتند.

گسترده بر روی شمع با آرایش ۳×۳ سهم باربری شمع از حدود ۶۷٪ به حدود ۹۱٪ و سپس در بار نهایی به حدود ۸۰٪ می‌رسد. بنابراین سهم بار پی گسترده بین ۹ تا ۶۱٪ نیز می‌تواند باشد. Hemsley (۲۰۰۰) هم در مطالعه موردی بر روی برج‌های فرانکفورت و همچنین (Davis و Poulos، ۱۹۸۰) در مطالعه تحلیلی خود به نتایج مشابهی اشاره نمودند.



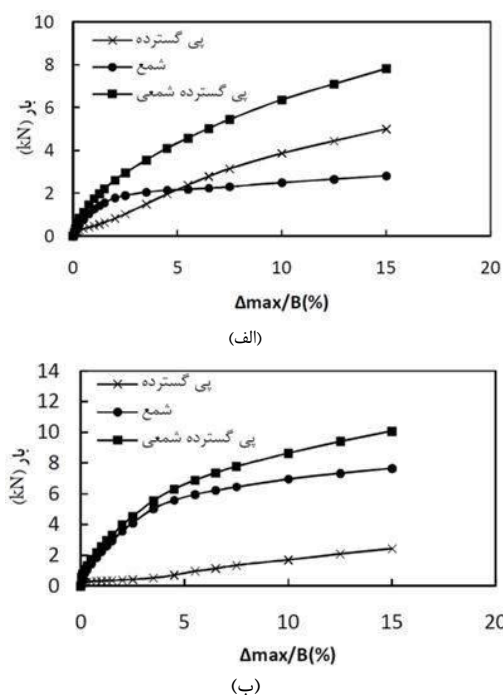
شکل ۱۶- سهم باربری هر یک از مؤلفه‌های باربر (پی گسترده و شمع‌ها): الف) پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۲×۲، ب) پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۳×۳

با به‌کارگیری شمع در زیر پی گسترده، بار مقاوم آن کاهش می‌یابد (شکل ۱۷). از طرفی قبلاً نشان داده شد که بار نهایی شمع نسبت به شمع منفرد افزایش می‌یابد. جداول (۴) و (۵) سهم باربری پی گسترده و شمع را در بار نهایی و مجاز نشان می‌دهد. Q_u و Q_a به ترتیب بار مجاز و نهایی پی گسترده بر روی شمع می‌باشد. R به ترتیب بار وارد به شمع‌ها و پی گسترده در بار مجاز یا نهایی پی می‌باشند. $R_a(ur)$ $R_u(ur)$ بار مجاز (نهایی) در پی گسترده می‌باشد. این بارها در محاسبات طراحی پی‌های گسترده بر روی شمع به‌عنوان بار مقاوم پی در نظر گرفته می‌شود و در واقع کاهش ظرفیت باربری پی گسترده منظور نمی‌گردد. $P_{us}(sum)$ $P_{as}(sum)$ حاصل ضرب بار مجاز (بار نهایی) شمع منفرد در تعداد شمع احداث شده در مدل مورد نظر است. این بار در واقع مجموع بار نهایی شمع‌ها می‌باشد که در محاسبات طراحی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین دو ستون آخر از جداول (۴) و (۵) نشان می‌دهد که مقدار خطای موجود در طراحی هر یک از اجزاء پی

نشست متناظر با نقطه گسیختگی (S_u) و نشست متناظر با بار مجاز (S_a) در انواع مدل‌های آزمایش در جدول (۳) نشان داده شده است. با افزایش تعداد شمع در پی گسترده بر روی شمع، نشست متناظر با بار مجاز کاهش می‌یابد و در مقابل ظرفیت باربری مجاز افزایش می‌یابد.

جدول ۳- ظرفیت باربری مجاز و نهایی مدل‌های آزمایش و نشست متناظر

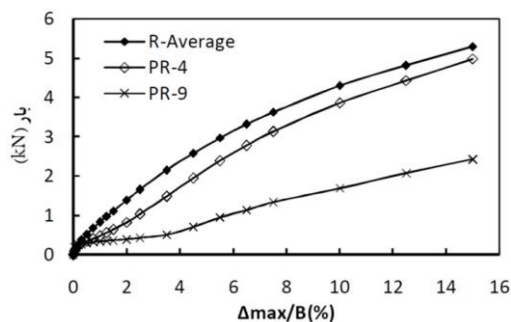
مدل	Q_u (kN)	Q_a (kN)	$S_{Pu/B}$ (%)	$S_{Pa/B}$ (%)
R	۴/۳۷	۱/۴۶	۱۰/۰۰	۲/۰۹
PR-4	۶/۳۷	۲/۱۲	۱۰/۰۰	۱/۴۱
PR-9	۸/۶۴	۲/۸۸	۱۰/۰۰	۱/۲۰



شکل ۱۵- منحنی‌های بار- نشست هر یک از مؤلفه‌های باربر (پی گسترده و شمع‌ها): الف) پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۲×۲، ب) پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۳×۳

شکل (۱۵) منحنی‌های باربری هر یک از مؤلفه‌های مقاوم (پی گسترده و شمع‌ها) را در پی‌های گسترده بر روی شمع نشان می‌دهد. در پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۲×۲ در شروع بارگذاری سهم شمع‌ها از بار کل بیشتر است. با گسیختگی شمع‌ها این توزیع برعکس می‌شود. در پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۳×۳ شمع‌ها همواره بار بیشتری را نسبت به پی گسترده بر روی شمع تحمل می‌کنند. سهم باربری هر یک از این مؤلفه‌های مقاوم در شکل (۱۶) نشان داده شده است. در پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۲×۲ سهم باربری شمع از حدود ۴۷٪ به حدود ۷۲٪ و بعد از گسیختگی در بار نهایی به حدود ۳۹٪ می‌رسد. در پی

برمبنای دیدگاه سنتی و بدون در نظر گرفتن سهم باربری خاک، بیش از ۳ برابر در پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۲×۲ و بیش از ۲ برابر در پی گسترده با آرایش ۳×۳ ظرفیت باربری مجاز را دست پایین تخمین می‌زند. با افزایش فاصله شمع‌ها در زیر پی گسترده، به‌کارگیری دیدگاه سنتی غیراقتصادی‌تر خواهد بود. جدول (۷) نشان می‌دهد که در تراز بار نهایی و مجاز شمع‌های موجود در پی گسترده بر روی شمع چه مقدار به بار نهایی نزدیک شده‌اند. در تراز بار مجاز پی، شمع‌های پی گسترده با آرایش ۲×۲ از بار مجازشان فراتر رفته و به ۷۷٪ بار نهایی رسیده است.



شکل ۱۷- تغییرات سهم باربری پی گسترده بر حسب نشست در انواع مدل‌های آزمایش

گسترده بر روی شمع چقدر است. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود در محدوده بار مجاز این خطا بیشتر است. با افزایش تعداد شمع‌ها خطای محاسبه ظرفیت باربری پی گسترده افزایش می‌یابد. برای پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۳×۳ ظرفیت باربری مجاز پی گسترده در واقعیت حدود ۲۵ درصد بار مجاز پی گسترده است. در شمع‌های این پی، ظرفیت باربری واقعی حدود ۱/۹۱ برابر مقداری است که در طراحی معمولاً در نظر گرفته می‌شود.

اثر خطاهای محاسبات طراحی بر روی ظرفیت باربری مجاز پی در جدول (۶) نشان داده شده است. محاسبه ظرفیت باربری مجاز شمع در دو حالت انجام شده است. $Q_{a(tra)}$ ظرفیت باربری مجاز با صرف‌نظر کردن اثر خاک زیر پی (دیدگاه سنتی طراحی پی‌های گسترده بر روی شمع) و $Q_{a(new)}$ ظرفیت باربری مجاز با احتساب فشار خاک زیر پی می‌باشد. در ظرفیت باربری محاسباتی در هر دو حالت فوق از اثر اندرکنش تنش‌ها بر روی کاهش ظرفیت باربری پی گسترده و افزایش بارنهایی شمع‌ها صرف‌نظر شده است. طبق این جدول ظرفیت باربری مجاز محاسباتی پی گسترده بر روی شمع با در نظر گرفتن فشار خاک با مقادیر اندازه‌گیری شده مطابقت دارد. به‌عبارتی دیگر کاهش ظرفیت باربری پی گسترده و افزایش بارنهایی شمع‌ها اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند. طراحی

جدول ۴- سهم بار شمع‌ها و پی گسترده در تراز بار نهایی مدل‌های مورد آزمایش

مدل	Q_u (kN)	P (kN)	R (kN)	P (%)	R (%)	$R/R_{a(ur)}$	$P/P_{us(sum)}$
R	۴/۳۱	۰/۰۰	۴/۳۱	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱/۰۰	-
PR-4	۶/۳۷	۲/۴۹	۳/۸۷	۳۹/۱۹	۶۰/۸۱	۰/۹۰	۰/۴۲
PR-9	۸/۶۴	۶/۹۵	۱/۶۹	۸۰/۴۶	۱۹/۵۴	۰/۳۹	۱/۷۵

جدول ۵- سهم بار شمع‌ها و پی گسترده در تراز بار مجاز مدل‌های مورد آزمایش

مدل	Q_u (kN)	P (kN)	R (kN)	P (%)	R (%)	$R/R_{a(ur)}$	$P/P_{as(sum)}$
R	۱/۴۴	۰/۰۰	۱/۴۴	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱/۰۰	-
PR-4	۲/۱۲	۱/۵۱	۰/۶۱	۷۱/۱۵	۲۸/۸۵	۰/۴۳	۲/۵۷
PR-9	۲/۸۸	۲/۵۳	۰/۳۵	۸۷/۷۵	۱۲/۲۵	۰/۲۵	۱/۹۱

جدول ۶- مقایسه دیدگاه سنتی و جدید در تخمین ظرفیت باربری پی گسترده بر روی شمع

مدل	Q_u (kN)	Q_a (kN)	$Q_{a(new)}$ (kN)	$Q_{a(tra)}$ (kN)	$Q_a/Q_{a(new)}$	$Q_a/Q_{a(tra)}$
R	۴/۲۱	۱/۴۴	۱/۴۴	۱/۴۴	۱/۰۰	۱/۰۰
PR-4	۶/۳۷	۲/۱۲	۲/۰۲	۰/۵۹	۳/۶۲	۱/۰۵
PR-9	۸/۶۴	۲/۸۸	۲/۷۶	۱/۳۲	۲/۱۸	۱/۰۴

جدول ۷- بار شمع‌ها در تراز بار مجاز و نهایی مدل‌های آزمایش

مدل	تراز بار	P_u (kN)	P (kN)	P/P_u (%)
PR-4	مجاز	۰/۴۹	۰/۳۸	۷۷/۰۳
PR-9-cor		۰/۵۱	۰/۳۲	۶۳/۶۳
PR-9-mid		۰/۷۲	۰/۲۵	۳۴/۳۰
PR-9-cen		۱/۱۶	۰/۲۶	۲۲/۵۰
PR-4	نهایی	۰/۴۹	۰/۶۲	۱۲۷/۲۹
PR-9-cor		۰/۵۱	۰/۶۱	۱۲۰/۵۲
PR-9-mid		۰/۷۲	۰/۸۳	۱۱۴/۷۵
PR-9-cen		۱/۱۶	۱/۱۹	۱۰۲/۲۳

جدول ۸- مقایسه ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده با ظرفیت باربری محاسباتی

روش طراحی	مدل	$Q_{a(new)}$ و $Q_{a(tra)}$	شمع‌های مدل‌ها	P (kN)	R (kN)	P_u (kN)	R_u (kN)	F.S. (pile)	F.S. (raft)	F.S. (piled raft)
سنتی	PR-4	۰/۵۹	PR-4	۰/۰۹	۰/۲۱	۰/۴۹	۳/۸۷	۵/۲۶	۱۸/۰۹	۱۰/۸۵
	PR-9	۱/۳۲	PR-9-cor	۰/۱۵	۰/۲۷	۰/۵۱	۱/۶۹	۳/۵۱	۶/۳۱	۶/۵۴
	PR-9	۱/۳۲	PR-9-mid PR-9-cen	۰/۰۹ ۰/۱۰	۰/۲۷	۰/۷۲ ۱/۱۶	۱/۶۹	۷/۶۹ ۱۲/۵	۶/۳۱	۶/۵۴
جدید	PR-4	۲/۰۲	PR-4	۰/۳۶	۰/۵۸	۰/۴۹	۳/۸۷	۱/۳۶	۶/۷۱	۳/۱۵
	PR-9	۲/۷۶	PR-9-cor	۰/۳۱	۰/۳۵	۰/۵۱	۱/۶۹	۱/۶۷	۴/۸۶	۳/۱۳
	PR-9	۲/۷۶	PR-9-mid PR-9-cen	۰/۳۳ ۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۷۲ ۱/۱۶	۱/۶۹	۳/۰۷ ۴/۶۹	۴/۸۶	۳/۱۳

جدول ۹- دوران و نشست نامتقارن در بار مجاز و نهایی مدل‌های مورد آزمایش

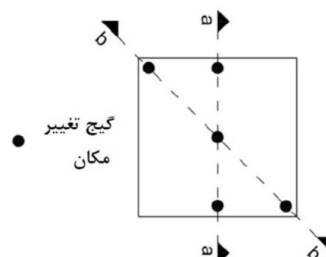
مدل	تراز بار	Δ_{max}/d (%)	$\zeta_{(lat)}$ (%)	$\zeta_{(dia)}$ (%)	δ/L (lat) (%)	δ/L (dia) (%)
R	مجاز	۲/۰۹	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۰۳
PR-4		۱/۴۱	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۶
PR-9		۱/۲۰	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	-۰/۰۴
R	نهایی	۱۰/۰۰	۰/۶۵	۰/۶۲	۰/۰۷	۰/۰۸
PR-4		۱۰/۰۰	۰/۲۴	۰/۳۵	۰/۰۸	۰/۱۴
PR-9		۱۰/۰۰	۰/۱۰	۰/۰۸	-۰/۰۱	-۰/۰۸

جدول ۱۰- دوران و نشست نامتقارن متناظر با بار مجاز پی گسترده

مدل	تراز بار	Δ_{max}/d (%)	$\zeta_{(lat)}$ (%)	$\zeta_{(dia)}$ (%)	δ/L (lat) (%)	δ/L (dia) (%)
R	۱/۴۴	۲/۰۹	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۰۳
PR-4	۱/۴۴	۰/۷۳	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
PR-9	۱/۴۴	۰/۳۶	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۱	-۰/۰۴

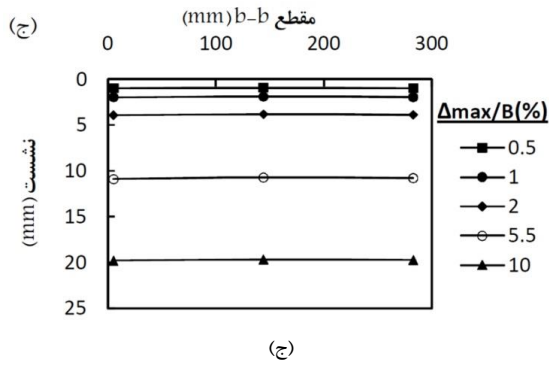
در مورد پی گسترده با آرایش ۳×۳ شمع‌های گوشه، لبه و مرکز به ترتیب به ۶۲، ۳۴ و ۲۲ درصد بار نهایی شمع رسیده‌اند. تنها شمع‌های لبه تقریباً ضرایب اطمینان معمول در طراحی را تأمین کرده‌اند. شمع مرکزی از بار گسیختگی فاصله زیادی دارد. در بار نهایی پی گسترده همه شمع‌ها تسلیم شدند. افزایش بار شمع‌ها نسبت به بار نهایی آن‌ها به علت افزایش فشار خاک زیر کلاهک است. این افزایش در شمع‌های گوشه، لبه و مرکزی به ترتیب حدود ۲۰٪، ۱۵٪ و ۲٪ است. در شمع مرکزی به علت اندرکنش تنش‌ها گسیختگی در بار نهایی پی گسترده بر روی شمع (بار متناظر با نشست ۱۰٪ عرض) رخ داده است.

جدول (۸) مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری با نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی موجود در طراحی پی‌های گسترده بر روی شمع را در بار مجاز محاسباتی نشان می‌دهد. در این جدول ظرفیت باربری نهایی محاسباتی شمع‌ها و پی گسترده به ترتیب برابر با بار نهایی حاصل از آزمایش بارگذاری بر روی شمع منفرد و پی گسترده می‌باشد. ضریب اطمینان جهت محاسبه بار مجاز برابر ۳ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۸- نحوه قرارگیری گنج‌های تغییر مکان در بالای پی گسترده

شکل (۱۸) نحوه قرارگیری گنج‌های تغییر مکان و شکل (۱۹) تغییر مکان اندازه‌گیری شده در دو مقطع عرضی و قطری را در بالای پی گسترده را نشان می‌دهد. جدول (۹) دوران و نشست نامتقارن در بار مجاز و نهایی و جدول (۱۰) دوران و نشست نامتقارن متناظر با بار مجاز پی گسترده را نشان می‌دهد. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود در پی گسترده بر روی شمع‌های با آرایش ۲×۲ از آنجایی که شمع‌ها در گوشه قرار گرفتند، شکل پی به صورت مقعر شد و نشست تفاضلی پی افزایش یافت. دوران و نشست در پی گسترده در بار مجاز بیش از سایر پی‌ها بود. به ازای یک بار ثابت با افزایش تعداد شمع در زیر پی گسترده، تغییر شکل‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافتند.



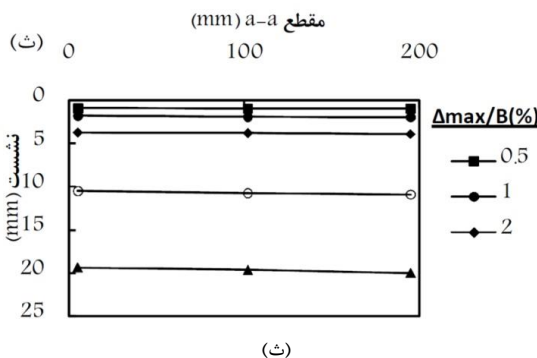
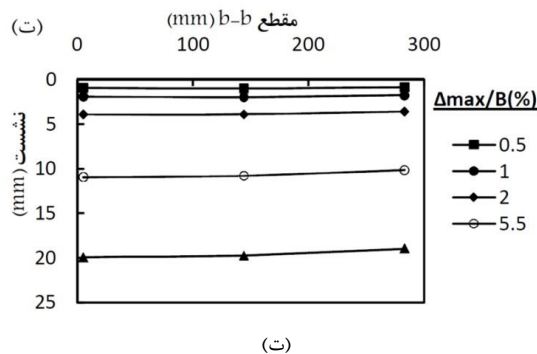
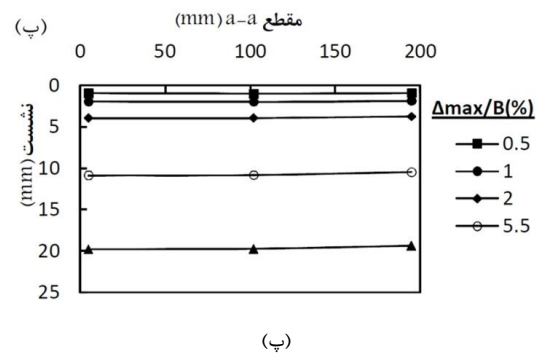
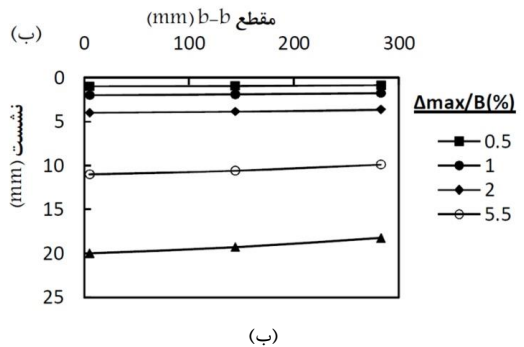
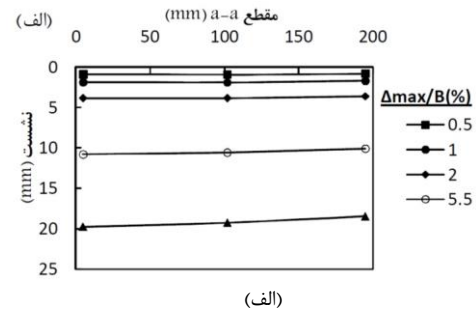
شکل ۱۹- نحوه توزیع تغییر مکان پی گسترده در مقاطع عرضی (a-a) و قطری (b-b): الف) پی گسترده، ب) پی گسترده با آرایش ۲×۲، پ) پی گسترده با آرایش ۳×۳

به ترتیب $Q_{a(new)}$ و $Q_{a(tra)}$ مجاز محاسباتی پی گسترده بر روی شمع بدون در نظر گرفتن فشار خاک و با در نظر گرفتن فشار خاک می‌باشد P و R به ترتیب بار هر یک از شمع‌ها و پی گسترده را زمانی که بارهای مجاز محاسباتی فوق به پی گسترده شمع‌ی وارد می‌شود نشان می‌دهد. طبق این جدول، در صورتی که از فشار زیر پی صرف نظر شود و پی گسترده بر روی شمع همانند گروه شمع آزاد طراحی شود، ضریب اطمینان واقعی شمع‌ها و پی گسترده قابل توجه می‌باشد. با افزایش تعداد شمع و کاهش سهم باربری خاک، ضریب اطمینان پی گسترده کاهش می‌یابد. ضریب اطمینان کلی در پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۲×۲ و ۳×۳ به ترتیب برابر ۱۰/۸۵ و ۶/۵۴ به دست آمده است که مقدار غیراقتصادی بودن زیاد طرح را نشان می‌دهد.

با احتساب فشار خاک زیر پی در طراحی پی گسترده بر روی شمع، ضرایب اطمینان شمع‌ها و پی گسترده کاهش می‌یابد. در شمع‌های گوشه در پی گسترده بر روی شمع با آرایش ۲×۲ و ۳×۳ بار وارده از بار مجاز فراتر رفته و ضریب اطمینان به ترتیب برابر ۱/۳۶ و ۱/۶۷ می‌شود. در مقابل پی گسترده همچنان ضرایب اطمینانی بیش از ۳ دارد. این دو اثر مخالف باعث می‌شود که ضریب اطمینان کلی در هر دو پی به حدود ۳ برسد. بنابراین در نظر گرفتن فشار خاک زیر پی گسترده در نهایت منجر به طرحی اقتصادی گردیده است.

۷- نتیجه‌گیری

آزمایش بارگذاری بر روی مدل‌های شمع منفرد، شمع منفرد در بین شمع‌های دیگر، پی گسترده و پی گسترده بر روی شمع در ماسه بابلسر انجام شد و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه گردید. دقت روش‌های تحلیلی موجود در طراحی پی‌های گسترده بر روی شمع مورد ارزیابی قرار گرفت. پی‌ها و شمع‌های مورد استفاده از



۸- مراجع

- شرف‌خواه م، "مطالعه آزمایشگاهی پی‌های گسترده شمعی در ماسه تحت بارگذاری قائم"، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی عمران، ۱۳۹۷.
- Altaee A, Fellenius BH, "Physical Modeling in Sand", Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31 (3), 420-431.
- Bazyar MH, Ghorbani A, Katzenbach R, "Small-Scale Model Test and Three-Dimensional Analysis of Pile-Raft Foundation on Medium-Dense Sand", International Journal of Civil Engineering, 2009, 7 (3), 170-175.
- Cooke RW, "Piled Raft Foundation on Stiff Clays-a Contribution to Design philosophy", Geotechnique, 1986, 36 (2), 169-203.
- Comodromos EM, Papadopoulou MC, Laloui L, "Contribution to the Design Methodologies of Piled Raft Foundations under Combined Loadings", Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53 (4), 559-577.
- El-Garhy B, Galil AA, Youssef A, Raia MA, "Behavior of Raft on Settlement Reducing Piles: Experimental Model Study", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5 (5), 389-399.
- El Sawwaf M, "Experimental Study of Eccentrically Loaded Raft with Connected and Unconnected Short Piles", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136 (10), 1394-1402.
- Fioravante V, Giretti D, "Contact versus Noncontact Piled Raft Foundations", Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(11), 1271-1287.
- Hemsley JA, "Design applications of raft foundations", Thomas Telford Ltd, 2000.
- Huangab M, Jiu Y, Jiang J, Lie B, "Nonlinear Analysis of Flexible Piled Raft Foundations subjected to Vertical Loads in Layered Soils", Soils and Foundations, 2017, 57 (4), 632-644.
- Khanmohammadi M Fakharian K, "Evaluation of Performance of Piled-Raft Foundations on Soft Clay: A Case Study", Geomechanics and Engineering, 2018, 14 (1), 43-50.
- Lee SH, Chung CK, "An Experimental Study of the Interaction of Vertically Loaded Pile Groups in Sand", Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42 (5), 1485-1493.
- Oh EYN, Huang M, Surarak C, Adamec R, Balasurbamiam AS, "Finite Element Modeling for Piled Raft Foundation in Sand", Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structure Engineering & Construction, TAIWAN, 19-21, 2008.
- Patil JD, Vasanwala SA, Solanki CH, "An Experimental Study on behavior of Piled Raft Foundation", Indian Geotechnical Journal, 2016, 46 (1), 16-24.
- Poulos HG, Davis EH, "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley & Sons, New York, 1980.
- Raut JM, Khadeshwar SR, Bajad SP, Kadu MS, "Simplified Design Method for Piled Raft Foundations", Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering: 2014, 462-471.
- Reul O, Randolph MF, "Design Strategies for Piled Rafts Subjected to Nonuniform Vertical Loading", Journal

بتن درجا ساخته شده‌اند. نتایج اصلی زیر در این مقاله ارائه شده است:

با قرارگیری شمع منفرد در بین شمع‌های دیگر به دلیل محصورشدگی شمع‌ها و افزایش دانسیته خاک در هنگام احداث شمع‌ها، ظرفیت باربری و سختی شمع افزایش پیدا نمود. افزایش ظرفیت باربری در شمع‌های مرکزی، لبه و گوشه واقع در بین شمع‌ها با آرایش 3×3 ($s/d=2.6$) به ترتیب 57% ، 36% و 16% می‌باشد. این مقدار برای شمع‌های گوشه واقع در بین شمع‌های با آرایش 2×2 ($s/d=5.2$)، 5% است. ظرفیت باربری در شمع مرکزی پی گسترده بر روی شمع ($s/d=2.6$) نسبت به شمع منفرد حدوداً $2/64$ برابر شد. با به‌کارگیری شمع در زیر پی گسترده، بار مقاوم پی گسترده در s/d های برابر $5/2$ و $2/6$ به 43% و 25% به ترتیب کاهش یافت. در طراحی‌های متعارف از این افزایش و کاهش‌ها صرف‌نظر می‌گردد.

با افزایش تعداد شمع‌ها مقدار نشست پی گسترده بر روی شمع به‌طور قابل‌ملاحظه کاهش یافت. در ابتدای بارگذاری از آنجایی که سهم باربری شمع نسبت به خاک بیشتر بود، از این‌رو شیب منحنی بارگذاری بیشتر بود. بعد از گسیختگی شمع‌ها شیب منحنی بار- نشست تقریباً با پی گسترده برابر شد.

در پی گسترده بر روی شمع s/d برابر با $2/6$ و $5/2$ ، سهم باربری شمع‌ها از بار کل به ترتیب برابر با 87% و 71% در بار مجاز شد.

طراحی بر مبنای دیدگاه سنتی و بدون در نظر گرفتن سهم باربری خاک، بیش از 3 برابر در پی گسترده بر روی شمع با s/d برابر $5/2$ و بیش از 2 برابر در s/d برابر $2/6$ ظرفیت باربری مجاز را دست پایین تخمین زد. با کاهش تعداد شمع در زیر پی گسترده، به‌کارگیری دیدگاه سنتی غیراقتصادی‌تر بود. در مقابل در صورتی- که فشار خاک زیر پی در طراحی در نظر گرفته می‌شد و از اثر تغییرات ظرفیت باربری شمع‌ها و پی گسترده نسبت به شمع منفرد و پی گسترده صرف‌نظر شود، اختلاف بین نتایج محاسباتی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری ناچیز بود.

در بار مجاز پی بار شمع‌های پی گسترده با s/d برابر $5/2$ از بار مجاز فراتر رفته و به 77% بار نهایی رسید. در مورد پی گسترده بر روی شمع با s/d برابر $2/6$ شمع‌های گوشه، لبه و مرکز به ترتیب به 62% ، 34% و 22% درصد بار نهایی شمع رسیدند.

در شمعی با آرایش 2×2 از آنجایی که شمع‌ها در گوشه قرار گرفتند، شکل پی به‌صورت مقعر شد و نشست تفاضلی پی افزایش یافت. دوران و نشست در پی گسترده در بار مجاز بیش از سایر پی‌ها بود. به ازای یک بار ثابت با افزایش تعداد شمع در زیر پی گسترده، تغییر شکل‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافتند.

- of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering: 2004, 1-13.
- Samanta M, Bhowmik R, "3D Numerical Analysis of Piled Raft Foundation in Stone Column Improved Soft Soil", International Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 9 (1) 101-112.
- Sedran G, Stolle DFE, Horvath RG, "An Investigation of Scaling and Dimensional Analysis of Axially Loaded Piles", Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38 (3), 530-541.
- Tagaya K, Scott RF, Aboshi H, "Scale Effect in Anchor Pullout Test by Centrifugal Technique", Soil and Foundations, 1988, 28 (3), 1-12.
- Tomlinson MJ, "Pile Design and Construction Practice", 4nd Edition, E & FNS pon, 2004.

EXTENDED ABSTRACT

Experimental Study of Behavior of Piled Raft Foundations under Vertical Loading in Sand

Issa Shooshpasha*, Mehdi Sharafkhah

Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran

Received: 31 May 2018; Accepted: 09 September 2019

Keywords:

Piled raft, Interaction, Physical modeling, Cast-in-place concrete piles, Sand fatigue, Stress.

1. Introduction

Several numerical studies have been carried out to analyze the behavior of piled raft foundations, but very few experimental studies are reported in literatures (Cooke RW, 1986). The conventional approach for the design of piled raft foundations ignores the raft load sharing, and it has been assumed that the piles carry the whole of structural loads (Hemsley JA, 2000). This approach is unduly conservative and leads to an uneconomic design. Only when the pile's cap is elevated from the ground level, this design method is valid. In a piled raft foundation, pile-soil-raft interaction is complicated. The available laboratory studies are mainly focused on steel piles. The present study aimed to evaluate the behavior of piled raft foundations in the sand, using experimental physical models.

2. Methodology

Cast-in-place concrete piles and concrete rafts were used for the tests. The test models in this research included: single pile, single piles in pile group, unpiled raft, and piled rafts with 4 and 9 piles. Some instruments measured the load contribution between the piles and the raft. The instruments are shown in Fig. 1. The effect of the pile's installation in the group was also investigated. By comparing the measured load capacities for piled rafts, the differences between the traditional and new approaches in the piled raft design were studied. The effects of the number of piles and spacing on the settlement and load capacity of the foundation were also evaluated.

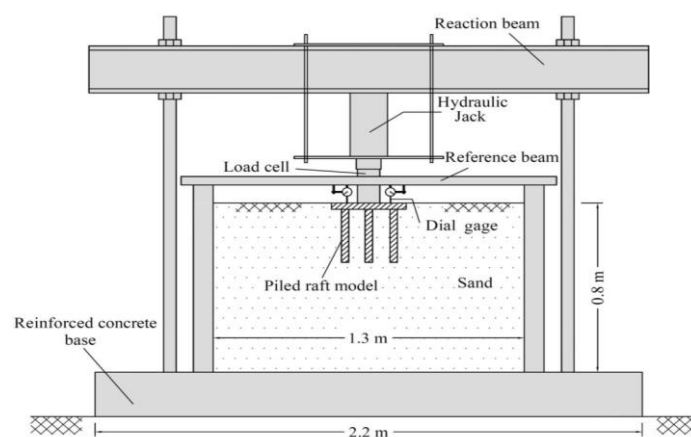


Fig. 1. Schematic of the test setup

* Corresponding Author

E-mail addresses: shooshpasha@nit.ac.ir (Issa Shooshpasha), msharafkhah@stu.nit.ac.ir (Mehdi Sharafkhah).

3. Results and discussion

3.1. Single pile in a group

By the installation of a single pile in a group, the pile bearing capacity and stiffness increase. The bearing capacities in the center, middle side, and corner piles in the 3×3 group are increased by 57%, 36% and 11%, respectively. This value is about 5% for corner piles located in the 2×2 group. Corner piles have lower stiffness and bearing capacity than others. The piles located in the 2×2 group show similar behavior as the corner piles in the 3×3 group. Increasing stiffness and bearing capacity of the center pile are due to pile confinement generated by adjacent piles and an increase of soil density caused by casing penetration. In fact, the confinement increases equivalent stiffness of the soil-pile composition around the pile that decreases soil deformation and pile settlement. Furthermore, due to arching, the stress around the pile increases and as a result, the pile ultimate bearing capacity increases.

3.2. Piled raft

Comparison of load-settlement curves of piles in piled raft foundation and piles in the group show the behaviors of the corner piles are approximately similar. Yielding points in corner piles coincide. The slight difference is due to the raft pressure in the piled rafts that increases the pile bearing capacity. In the other piles, due to greater raft pressure and associated negative friction, the pile stiffness decreases and the bearing capacity increases significantly. In the corner, edge and center piles in the 3×3 piled raft, the increases in pile bearing capacity in comparison to the single pile are approximately 16%, 64%, and 264%, respectively.

In Fig. 2, the load-settlement curve of the piled rafts is compared with that of the unpiled raft. In this figure, Δ_{max} is the maximum settlement, and B is the widths of the raft. By increasing the number of piles, the settlement of the foundation decreases significantly. At the beginning of the loading, due to the higher stiffness of the piles than the soil, the slope of load-settlement curves for the piled raft is greater. The piled raft with 9 piles has a steeper initial slope in the loading curve. After pile failure, the loading curve reduces and becomes parallel to that of the unpiled raft.

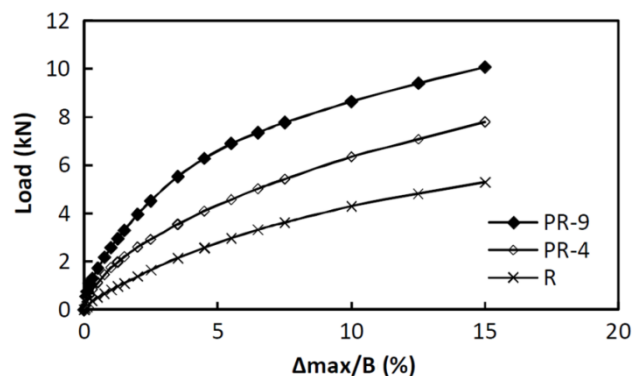


Fig. 2. Average load-settlement relations of the unpiled raft, 2×2 and 3×3 piled rafts

4. Conclusions

By installing a single pile in a group, the bearing capacity and stiffness of the pile are increased due to the adjacent pile confinement and increased soil density during pile installation.

By increasing the number of piles, the settlement of the piled raft decreases significantly. At the initial steps of the loading test, the pile bearing contribution is greater than that of the raft, thus the slope of the load-settlement curve is steeper. After pile failure, the curve is nearly parallel to the load-settlement curve of the unpiled raft.

By designing a piled raft based on the conventional approach in which the raft load-sharing is not considered, the allowable bearing capacity of the piled raft is underestimated by more than 300% and 200% for s/d of 5.2 and 2.6, respectively. On the other hand, with decreasing number of piles and increasing pile spacing, the conventional method is uneconomic. In contrast, when the raft bearing contribution is considered in the design calculations and the effect of the pile installation on the bearing capacities of the piles and raft is ignored, the difference between the calculated and measured results is insignificant.

5. References

- Cooke RW, "Piled Raft Foundation on Stiff Clays-a Contribution to Design philosophy", *Geotechnique*, 1986, 36 (2), 169-203.
- Hemsley JA, "Design applications of raft foundations", Thomas Telford Ltd, 2000.