

عملکرد سیستم صفحه و پایه فولادی و کاربرد آن در پی‌های سریع‌الاحداث

فریدون خسروی^{۱*}، رضا طاهرخانی^۲، سید حامد خلیل‌پور^۳

۱- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین^(ع)، ۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، ۳- کارشناس ارشد، دانشگاه تربیت مدرس
(دریافت: ۹۷/۰۵/۱۳، پذیرش: ۹۷/۱۰/۲۶)

چکیده

پی‌های سریع‌الاحداث به دلیل کاربرد در شرایط بحرانی باید قابلیت حمل و نصب مجدد، وزن کم، مقاومت بالا را دارا باشند. از این رو، در این مطالعه، ساخت پی فولادی به دلیل مقاومت و قابلیت شکل‌پذیری بالا مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش سیستم صفحه و پایه فولادی با استفاده از نرم‌افزار پلکسیز سه‌بعدی ارزیابی گردید و پارامترهای طول (L)، تعداد پایه فولادی (N)، ضخامت (t) و ابعاد صفحه (B) مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه از مدل رفتاری موهر کولمب برای مدل‌سازی رفتار خاک استفاده شده است و شم‌ها و پی‌های فولادی به طول‌های ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر ارزیابی گردید. نتایج مطالعات عددی نشان داد که نسبت مساحت پایه به صفحه (AS) در افزایش ظرفیت باربری پی (q) و کاهش نشست (S) پی بسیار تأثیرگذار است. در این مطالعه، هنگامی که مقدار AS از ۵ درصد بیشتر باشد، نسبت ظرفیت باربری (BPI) با توجه به افزایش طول، قطر و تعداد شم افزایش می‌یابد به نحوی که مقدار BPI برای پی با ابعاد ۲۰۰ در ۲۰۰ میلی‌متر و پی با ابعاد ۵۰۰ در ۵۰۰ میلی‌متر در حالت تک شم نسبت به حالت ۴ شم به ترتیب از ۱/۰۱ به ۱/۸ و از ۱/۰۱ تا ۱/۱۵ افزایش یافته است.

کلیدواژه‌ها: پی، سازه سریع‌الاحداث، پی فولادی، ظرفیت باربری، نشست، مدل‌سازی سه‌بعدی

Performance of the Steel Plate and Pile and its Application for Rapid Foundations

F. Khosravi*, R. Taherkhani, S. H. Khalilpour

Imam Hossein University

(Received: 04/08/2018; Accepted: 16/01/2019)

Abstract

Rapid foundation should be movable, low weight and high strength to be used in critical situations. In this study, steel foundation is discussed due to high ductile and strength. Thus, steel plate and pile system is evaluated by plaxis 3d foundation and parameters of length (L), number of steel piles (N), thickness (t) and dimensions of plate (B) are studied. The Mohr Coulomb was used to model soil behavior and steel piles and plates in dimension of 200, 300 and 500 mm were evaluated. The results show that area ratio of pile to plate (AS) is affected by bearing capacity and settlement reducing. In this study, while the area ratio of pile to plate is more than 5%, the bearing capacity ratio (BPI) has increased with increasing length, diameter and number of piles. Whereas, the BPI of plate in dimension of 200*200 mm and 500*500 mm in single pile mode to four pile mode ratio is increased from 1.01 to 1.8 and 1.01 to 1.15, respectively.

Keywords: Rapid Foundations, Steel Foundation, Bearing Capacity, Settlement, 3D Modeling

۱. مقدمه

علت استفاده از این سیستم شامل صفحه و پایه فولادی، عملکرد مناسب آن در افزایش ظرفیت باربری خاک و جلوگیری از بلندشدگی سیستم فونداسیون به دلیل مدفون شدن در خاک است. عملکرد این سیستم مشابه عملکرد سیستم پی-شمع فولادی است. به منظور بررسی ظرفیت باربری و میزان نشست این سیستم، مطالعات سیستم پی-شمع صورت گرفته در آزمایشگاه و مطالعات عددی که عملکرد متناسب و نزدیک تری به این سیستم دارند، مورد بررسی قرار گرفت.

کاربرد شمع به عنوان کاهنده نشست، اولین بار توسط بولرند و همکاران [۱] پیشنهاد گردید. سپس مفهوم سیستم پی-شمع توسط دیویس و پلوس [۲] مطرح شد. پس از آن کوک [۳]، گزارش کرد که ۳۰ درصد بار کل سازه می تواند توسط پی و مابقی توسط شمع تحمل شود. هریکوشی [۴] طی یک مطالعه عددی نشان داد که هراندازه فاصله شمع ها بیشتر شود، نشست بیشتری رخ می دهد. همچنین نتایج مطالعات وی نشان می دهد که تغییرات مدول الاستیسیته شمع و ضریب پواسون تأثیر ناچیزی بر تغییر نشست پی دارند. پولوس [۵] به بررسی سیستم پی-شمع با تحلیل عددی بر روی مطالعه موردی پرداختند. پولوس و همکاران [۶] دریافتند که افزایش تعداد شمع منجر به کاهش نشست و افزایش ضریب اطمینان طراحی می گردد و افزایش ضخامت پی و مدول الاستیسیته پی منجر به افزایش ظرفیت باربری پی می گردد.

لیانگ [۷] در یک مطالعه عددی به بررسی شمع های کوتاه و بلند پرداخت. نتایج مطالعات وی نشان می دهد که استفاده از شمع های کوتاه منجر به افزایش ظرفیت باربری پی و شمع های بلند منجر به کاهش نشست پی می شوند. کائو و همکاران [۸] به بررسی تأثیر ضخامت و ابعاد پی در یک مطالعه آزمایشگاهی در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی پرداختند.

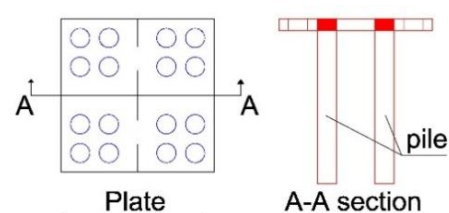
سانستیک [۹] با مطالعه سیستم پی-شمع در خاک رسی دریافت که افزایش ابعاد پی فاکتور مهمی در افزایش ظرفیت باربری سیستم پی-شمع خواهد داشت. هوانگ و همکاران [۱۰] با مدل سازی سیستم پی-شمع با نرم افزار plaxis اثر افزایش فاصله بین شمع ها بر افزایش نشست را مورد بررسی قرار دادند.

او و همکاران [۱۱] به بررسی رفتار سیستم پی-شمع در خاک های رسی و ماسه ای پرداخت و تأثیر ضخامت پی، طول و فاصله شمع بر ظرفیت باربری را مورد بررسی قرار داد. ضیایی و موید [۱۲] به تأثیر قطر شمع بر افزایش ظرفیت باربری سیستم پی-شمع پرداختند و به منظور جلوگیری از نشست نامتقارن و افزایش ظرفیت باربری پی استفاده از یک لایه متراکم در زیر شمع را پیشنهاد نمودند. فیورانتی و گریستی [۱۳] تأثیر افزایش تعداد شمع در افزایش ظرفیت باربری مورد مطالعه قرار دادند.

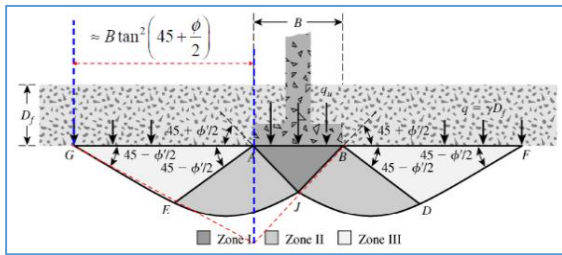
امروزه نیاز به سازه های سریع الاحداث، با توجه به اهمیت زمان و هزینه در ساخت سازه ها احساس می گردد. از سوی دیگر، با توجه به وقوع بلایای طبیعی نظیر زلزله و سیل نیاز به ساخت سازه های انبوه در مدت زمان کم وجود دارد. یکی از مشکلات این سازه ها این است که بعد از استفاده قابلیت کاربری قبل را ندارند و بدون استفاده باقی می ماندند. از این رو، ساخت سازه هایی که با سرعت بالا اجرا شوند و قابلیت جابه جایی و استفاده مجدد آن ها وجود داشته باشد از نظر اقتصادی و اجرایی حائز اهمیت است. به دلیل نیاز به نصب سریع این نوع سازه ها، استفاده از اجزای سبک و قابلیت حمل بالا حائز اهمیت است. با توجه به اجزای سبک، این سازه ها به طور معمول جز سازه های سبک محسوب می شوند.

تحقیقات بسیاری پیل های نصب سریع و یا ستون های سریع النصب صورت گرفته است. امروزه تجربیات اجرایی بسیاری در خصوص مواد و مصالح پیش ساخته به منظور ساخت سازه ها وجود دارد، این در حالی است که تحقیقات اندکی در خصوص سیستم فونداسیون این نوع سازه ها صورت گرفته است. یکی از فاکتورهای مهم طراحی در سازه های سریع الاحداث، ساخت سیستم فونداسیون با قابلیت اجرا و نصب سریع و با قابلیت استفاده مجدد است. اهمیت فونداسیون این نوع سازه ها از آن جهت است که هراندازه یک سازه در کمترین زمان ممکن اجرا و ساخته شود ولی بر روی یک پی نامناسب قرار گیرد، به نتیجه مطلوب نخواهد رسید.

با توجه به این که میزان بار وارده بر این سازه ها نسبت به ساختمان های معمولی کمتر است، می توان از مصالح و اجزای مختلف به نحوی استفاده نمود که از احداث پی به صورت بتن مسلح اجتناب ورزید. در بین مواد و مصالح قابل استفاده، فولاد به دلیل مقاومت بالا، دوام بالا و قابلیت ایجاد شکل های مختلف، از امتیاز ویژه ای برخوردار است. در این مطالعه، سیستم پی فولادی به همراه پایه فولادی به دلیل مقاومت و استحکام بالا و قابلیت شکل پذیری فولاد انتخاب شده است. سیستم پی فولادی به همراه پایه فولادی به دلیل مقاومت، استحکام بالا و قابلیت شکل پذیری فولاد انتخاب شده است. سیستم این پی ها به نحوی است که یک صفحه بارگذاری مطابق با شکل (۱) در زیر ستون های پی قرار می گیرد و صفحه بار انتقالی را از طریق یک یا چند پایه فولادی همانند شمع به زمین منتقل می کند.

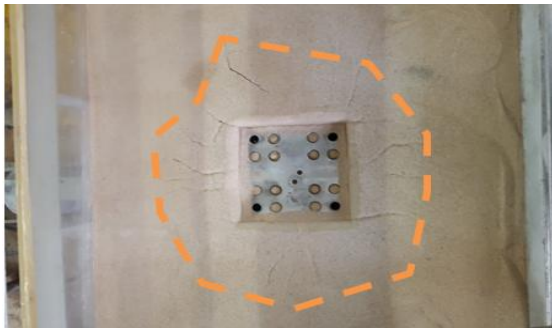


شکل ۱. سیستم صفحه و پایه فولادی



شکل ۲. نحوه تشکیل گوه گسیختگی مطابق با رابطه (۱) [۲۳]

با توجه به این‌که بزرگ‌ترین بعد پی در حالت مدل‌سازی شده، برابر ۵۰۰ میلی‌متر است، ابعاد مدل ۲×۲ متر تعیین شد. همچنین به‌منظور عدم تأثیرپذیری رفتار شمع از سختی کف مدل [۲۴]، ارتفاع مدل ۲ برابر طولانی‌ترین شمع برابر ۲ متر در نظر گرفته شد. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که تغییرات نشست و تنش ناشی از بارگذاری تحت تأثیر مرزهای مدل نیست. همچنین سطح گسیختگی در مدل آزمایشگاهی نیز نشان می‌دهد که رابطه (۱) محافظه‌کارانه بوده و سطح گسیختگی به مرزهای مدل آزمایشگاهی برخورد نکرده است (شکل ۳). المان‌های مدل‌سازی شده به شکل مثلثی ۵ وجهی با شش‌گره است. تعداد گره‌ها و المان‌ها در هر حالت مدل‌سازی متفاوت است (شکل ۴-الف و ۴-ب و ۵). در شکل (۵) شرایط و ابعاد مدل در نرم‌افزار plaxis 3d foundation نشان داده شده است.

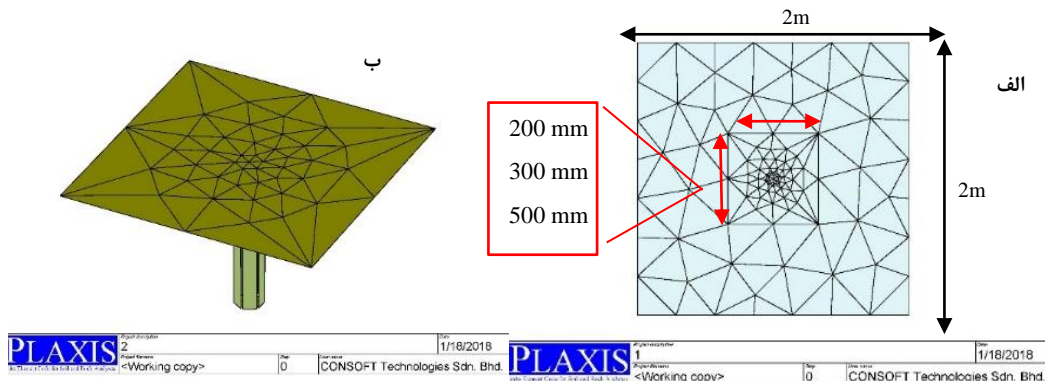


شکل ۳. گوه گسیختگی حاصل از نتایج آزمایش

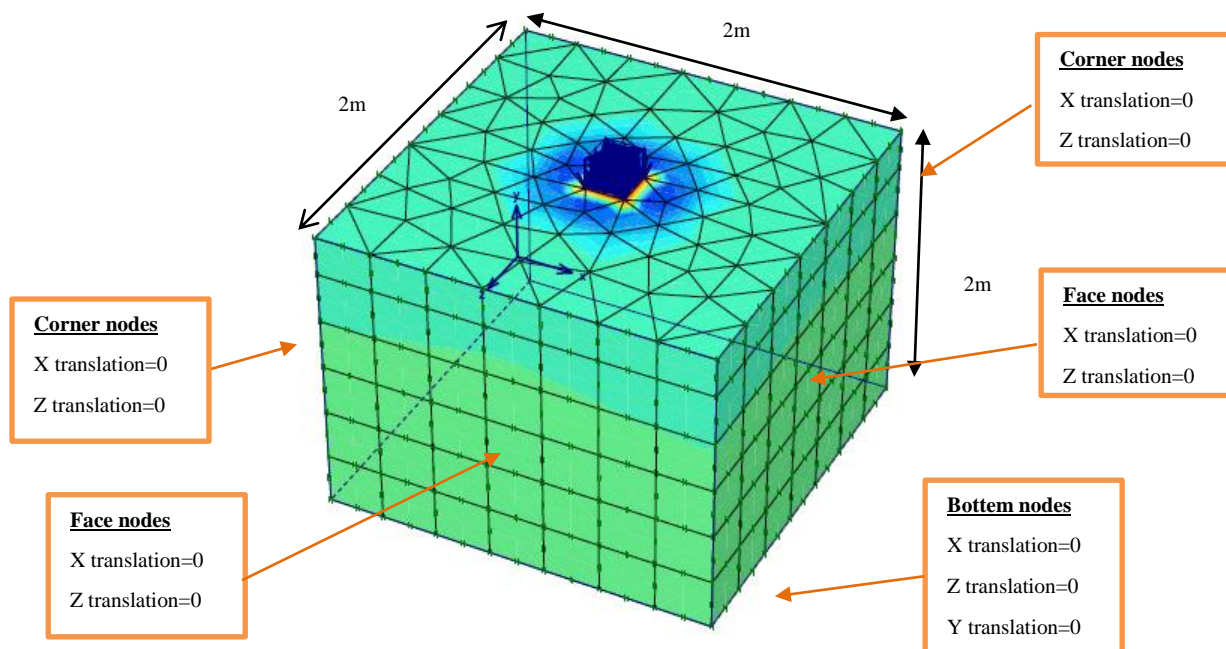
مصطفی‌الساووف [۱۴] به‌منظور مقایسه عملکرد سیستم پی-شمع متصل و منفصل پارامترهای طول شمع، چیدمان شمع و میزان خروج از محوریت را بررسی نمود. نتایج مطالعات او نشان می‌دهد که هر اندازه خروج از محوریت افزایش یابد میزان ظرفیت باربری پی کاهش و میزان نشست آن افزایش می‌یابد.

ژنگ و همکاران [۱۵] و شارما و همکاران [۱۶] به بررسی اضافه نمودن یک لایه شنی به‌عنوان بالشتک در زیر سیستم پی-شمع بر افزایش ظرفیت باربری پی پرداختند. سعیدی و همکاران [۱۷] نیز با استفاده از مدل سانتیفریوژ به بررسی تأثیر فواصل و تعداد شمع بر عملکرد سیستم پی-شمع پرداختند. پاتیل و همکاران [۱۸] نیز تأثیر چیدمان و طول شمع برای شمع‌های بلند را مورد بررسی قرار دادند. خداپرست و همکاران [۱۹] به تحلیل عددی گروه شمع، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و به‌وسیله روش کوپل اوپلری-لاگرانژی (CEL) پرداخته‌اند. با توجه به نتایج اتخاذشده مشخص گردید که افزایش فاصله عرضی یا طولی شمع‌ها در گروه شمع، موجب بهبودی وضعیت گروه شمع در برابر بارگذاری انفجار خواهد شد. سینها و همکاران [۲۰] یک مطالعه عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس بر روی سیستم پی شمع پرداخته‌اند و تأثیر هندسه پی، فاصله شمع‌ها در حالت گروه شمع، طول و قطر شمع‌ها پرداخته‌اند. لو و همکاران [۲۱] یک مطالعه عددی بر روی پارامترهای مؤثر بر میزان نشست سیستم پی-شمع بر روی خاک رس شامل شرایط خاک، قطر شمع و چسبندگی خاک و شمع انجام داده‌اند. ویکاس و آرویند کومار [۲۲] به مطالعه آزمایشگاهی رفتار سیستم پی-شمع تحت بارهای عمودی پرداختند و تأثیر قطر، طول و تعداد شمع را بررسی نمودند.

$$\text{model size} = B + 2B \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)^2 \quad (1)$$



شکل ۴. نمایی از مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار plaxis 3d foundation (الف) پلان کلی مدل و موقعیت قرارگیری پی در آن (ب) نمایی از مدل پی با تک شمع



شکل ۵. شرایط و ابعاد مدل در نرم افزار plaxis 3d foundation

مقدار مدول الاستیسیته پایه و صفحه سیستم پی، برابر ۲۰۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون برابر ۰٫۲ فرض گردید. به منظور ارزیابی اثر بعد و ضخامت پی و طول، قطر و تعداد شمع، مدل سازی در حالت های مختلف مطابق جدول (۲) صورت گرفته است.

در بین مطالعات صورت گرفته مطالعه پارامتریک در خصوص تأثیر پارامترهای شمع و پی پرداخته نشده است (جدول ۳).

جدول ۱. پارامترهای مقاومتی خاک

مدل رفتاری	$\phi(^{\circ})$	$c(\frac{Kg}{cm^2})$	$E(\frac{Kg}{cm^2})$	$\gamma(\frac{Kg}{cm^3})$	ν
موهر کولمب	۳۰	۰/۰۵	۳۰۰	۰/۰۰۱۸	۰/۳

جدول ۲. تعداد حالات مدلسازی

پارامتر	تعداد شمع	طول شمع (mm)	قطر شمع (mm)	ضخامت صفحه پی (mm)	بعد صفحه (mm)
۱	۱	۲۰۰	۲۵	۵	۲۰۰
۲	۲	۳۰۰	۵۰	۱۰	۳۰۰
۳	۴	۵۰۰	۷۵	۱۵	۵۰۰
حالات	۳	۳	۳	۳	۳

با توجه به کاربرد و بار وارد بر فونداسیون های سریع الاحداث، اغلب این فونداسیون ها سطحی می باشند. از این رو می بایست در مدل سازی خاک بستر این پی ها از ویژگی های خاک بکر که در سطح قرار دارند، استفاده گردد. با توجه به مدل رفتاری خاک که الاستوپلاستیک می باشد، استفاده از مدل رفتاری موهر کولمب به منظور تعیین ویژگی های خاک مناسب می باشد. به منظور تعیین پارامترهای مدل رفتاری موهر کولمب دو پارامتر چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک خاک تعیین گردد. علاوه بر این موارد میزان مدول الاستیسه خاک و وزن مخصوص خاک، در تعیین میزان نشست و ظرفیت باربری خاک بسیار حائز اهمیت است.

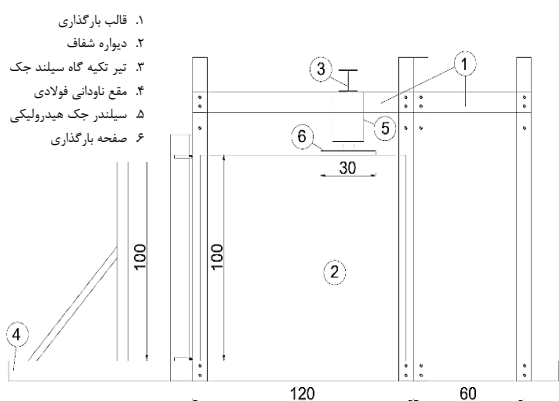
با توجه به اینکه سازه های سریع الاحداث حداکثر در دو طبقه ساخته می شوند، حداکثر بار وارد ستون بر پی در این مطالعه ثابت و برابر ۸ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در نظر گرفته می شود. میزان اندرکنش خاک با صفحه و پایه فولادی برابر ۰/۷ در نظر گرفته شده است [۲۵]. همچنین سازه های سریع الاحداث در زمین هایی با ویژگی های متفاوت ساخته می شوند، پارامترهای خاک در مدلسازی های مختلف ثابت فرض گردید. در این مطالعه پارامترهای مقاومتی خاک بر اساس ویژگی های خاک تهران (خاک آبرفتی کنگلومرایی شامل درشت دانه به همراه ریزدانه) که بر اساس مقالات و مراجع تدقیق گردید، به شرح جدول (۱) استفاده شده است [۲۵، ۲۳، ۲۶].

پی مدل سازی شده از جنس فولاد و صلب در نظر گرفته شد.

جدول ۳. خلاصه مطالعات صورت گرفته

ردیف	نام نویسنده	سال	نوع مقاله	نوع خاک	نتیجه مرتبط با مقاله
۱	بورلند و همکاران	۱۹۷۷	تحلیلی	رس + ماسه	افزافه کردن شمع به پی موجب کاهش نشست می‌شود.
۲	دیویس و پولوس	۱۹۸۰	تحلیلی	رس + ماسه	ظرفیت باربری و نشست سیستم پی- شمع مورد بررسی قرار گرفت.
۳	کوک	۱۹۸۶	آزمایشگاهی	رس	ظرفیت باربری پی- شمع بیشتر از گروه شمع است.
۴	هریکوشی	۱۹۹۸	عددی	رس	هر چه فاصله شمع بیشتر شود، نشست پی بیشتر می‌شود، تغییر سختی و ضریب پواسون در میزان نشست تأثیری ندارد.
۵	پولوس	۲۰۰۱	عددی	رس + ماسه	افزایش تعداد شمع موجب کاهش نشست و افزایش ضریب اطمینان می‌گردد. افزایش ضخامت پی و سختی پی موجب افزایش ظرفیت باربری پی می‌گردد.
۶	پولوس و همکاران	۲۰۰۲	آزمایشگاهی	رس	افزایش تعداد شمع موجب افزایش ظرفیت باربری می‌گردد.
۷	لیانگ	۲۰۰۳	عددی	ماسه	افزایش تعداد شمع موجب افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست می‌گردد.
۸	کانو و همکاران	۲۰۰۴	آزمایشگاهی	ماسه	افزایش طول و ضخامت پی موجب افزایش ظرفیت باربری پی و کاهش نشست می‌گردد.
۹	سانستیک	۲۰۰۶	عددی	رس	افزایش ابعاد پی موجب افزایش ظرفیت باربری می‌گردد.
۱۰	هوانگ و همکاران	۲۰۰۸	عددی	ماسه + رس	افزایش فاصله شمع موجب افزایش نشست می‌گردد.
۱۱	او و همکاران	۲۰۰۹	عددی	ماسه + رس	افزایش ضخامت پی تأثیر زیادی در خاک رسی ندارد ولی در خاک ماسه منجر به افزایش ظرفیت باربری می‌گردد. افزایش طول و فاصله شمع‌ها بر ظرفیت باربری مؤثر است.
۱۲	ضیایی و موید	۲۰۱۰	عددی	ماسه + رس	فونداسیون سیستم پی- شمع در صورتی که از یک لایه متراکم در زیر پی استفاده کنند، راه‌حل مناسبی جهت کاهش نشست کلی پی خواهد بود.
۱۳	فیورانتی و گیریتی	۲۰۱۰	آزمایشگاهی	ماسه	به‌منظور مقایسه عملکرد سیستم پی با شمع متصل و پی با شمع منفصل، دریافتند که افزایش تعداد شمع در هر دو حالت منجر به افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست می‌گردد.
۱۴	مصطفی‌الساووف	۲۰۱۰	آزمایشگاهی	ماسه	افزایش طول شمع، تغییر چیدمان شمع، تعداد شمع منجر به افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست می‌گردد. همچنین هر اندازه میزان خروج از محوریت بار کمتر باشد، میزان نشست کمتر و ظرفیت باربری افزایش می‌یابد.
۱۵	زهنک و همکاران	۲۰۱۱	تحلیلی	ماسه	افزافه نمودن یک لایه سنگی در زیر پی موجب افزایش ظرفیت باربری شمع می‌گردد.
۱۶	شارما و همکاران	۲۰۱۳	عددی	ماسه	وجود یک لایه متراکم در زیر پی منجر به افزایش ظرفیت باربری پی می‌گردد.
۱۷	سعیدی و همکاران	۲۰۱۳	آزمایشگاهی	ماسه	ظرفیت باربری پی- شمع بیشتر از ظرفیت باربری گروه شمع است.
۱۸	پاتیل و همکاران	۲۰۱۶	آزمایشگاهی	ماسه	افزایش تعداد و طول شمع موجب افزایش ظرفیت و کاهش نشست می‌گردد.
۱۹	سینها و همکاران	۲۰۱۶	عددی	ماسه	افزایش طول، فاصله و قطر شمع منجر به کاهش نشست می‌گردد.
۲۰	لو و همکاران	۲۰۱۸	عددی	رس	با افزایش سختی خاک به ازای ضرایب اطمینان بالاتر از ۳، میزان نشست کاهش یافت
۲۱	ویکاس و آرویند کومار	۲۰۱۸	آزمایشگاهی	ماسه	بیشترین کاهش نشست، در حالت $RD=70\%$ ، $L/B=2$ ، $S/B=0.1$ و $NP=9$ رخ داد.

۲۵ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۹ میلی‌متر می‌باشند. شمع‌ها به طول ۴۱۵ میلی‌متر ساخته شده است که ۱۵ میلی‌متر انتهایی هر شمع رزوه شده است و در پی قرار می‌گیرد (شکل ۷).



شکل ۶. مشخصات باکس مدل‌سازی آزمایش

۳. صحت سنجی نتایج

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی عددی، یک مدل از سیستم پی و شمع فولادی در آزمایشگاه دانشگاه علم و صنعت ایران مورد آزمایش قرار گرفت. به‌منظور مدل‌سازی شرایط آزمایشگاهی، از یک باکس فلزی به ابعاد ۰/۸ متر در ۱/۲ متر و ارتفاع ۱ متر استفاده شده است (شکل ۶). به‌منظور اعمال نیرو به پی از یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع استفاده گردید. پی مربعی مدل‌سازی شده از جنس فولاد و به ابعاد ۲۰۰ × ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۵ میلی‌متر ساخته شده است. دورویه پی به‌آرامی جلا داده شده است تا اثر اصطکاک به حداقل برسد. به‌منظور اتصال شمع به پی، ۱۶ سوراخ رزوه شده تعبیه شده است. در این مطالعه، شمع‌های مدل از جنس لوله‌های فولادی توخالی ($E=2 \times 10^5 \text{ MPa}$) دارای قطر خارجی

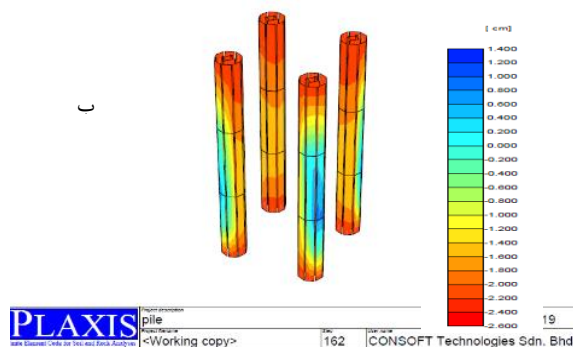
جدول ۴. پارامترهای خاک

ماسه	G_s	γ_{max} ($\frac{kn}{m^3}$)	γ_{min} ($\frac{kn}{m^3}$)	$D_{50}(mm)$	C_u	C_c	UCS
ماسه فیروزکوه ۱۶۱	۲/۶۸	۱۶/۵	۱۳/۲	۰/۲	۲/۵۸	۰/۹۷	SP

جدول ۵. پارامترهای صفحه و شمع فولادی مدل‌سازی و آزمایشگاه

پارامتر	بعد صفحه (mm)	بعد شمع (mm)	E(GPa)	γ ($\frac{Kg}{m^3}$)	ν
مقدار	۲۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۷۸۵۰	۰/۲

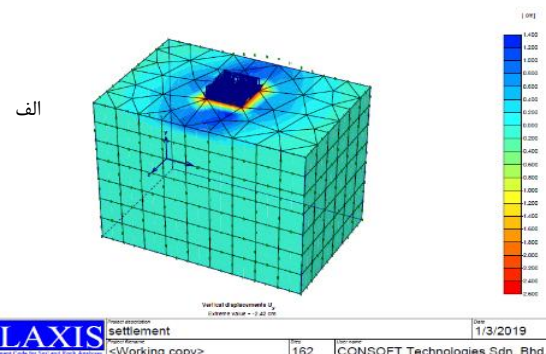
به منظور صحت‌سنجی نتایج، نمودار بار-نشست حاصل از انجام آزمایش و مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار plaxis 3d foundation مورد مقایسه قرار گرفت. در شکل (۸-الف) میزان نشست مدل بر اساس بار اعمال‌شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. در شکل (۸-ب) نیز تغییرات نشست در شمع‌های متصل به پی را نشان می‌دهد. مطابق با شکل (۹) نمودار بار-نشست حاصل از آزمایش و مدل‌سازی عددی با اختلاف ناچیز (کمتر از ۵ درصد) که قابل صرف‌نظر کردن است، بر هم منطبق بودند.



برای اندازه‌گیری نشست پی‌های مدلسازی‌شده از یک ترانسفورماتور تفاضلی متغیر خطی (LVDT) با دامنه اندازه‌گیری ۱۰۰ میلی‌متر و با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است که به یک دیتالاگر دیجیتالی برای ثبت نشست پی متصل می‌گردد. خاک مورد استفاده از جنس ماسه فیروزکوه است. مشخصات خاک و صفحه و پایه فولادی مورد استفاده در آزمایش‌ها و مدل‌سازی در جدول (۴) و (۵) آمده است.



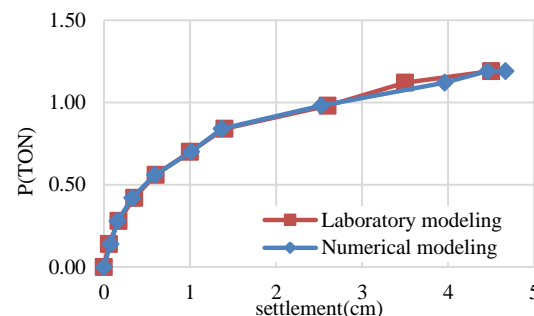
شکل ۷. دستگاه بارگذاری و سیستم پی-شمع مدل‌سازی شده



شکل ۸. نمایی از مدل‌سازی عددی الف) تغییرات میزان نشست، ب) تغییرات نشست در شمع‌های متصل به پی زیر تقسیم‌بندی گردید.

۳-۱. تأثیر افزایش ابعاد پی

شکل (۱۰) تغییرات نمودار بار-نشست برای پی مربعی به ابعاد ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر با ضخامت ۱۰ میلی‌متر با تک شمع به طول‌های ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشخص است با افزایش ابعاد پی ظرفیت باربری پی به ازای نشست ۲۵ میلی‌متر، افزایش می‌یابد. به نحوی که مقدار ظرفیت باربری شمع به ازای نشست ۲۵ میلی‌متر برای پی ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متری به ترتیب برابر ۲۰۰۰، ۳۸۰۰ و ۱۱۰۰۰ کیلوگرم است. همچنین روند تغییرات نمودارها نشان می‌دهد که در حالت تک شمع، افزایش طول شمع در مقابل ابعاد پی، به دلیل سطح تماس پی با خاک، تأثیر کمی نسبت به افزایش بعد پی، در افزایش ظرفیت باربری پی دارد.



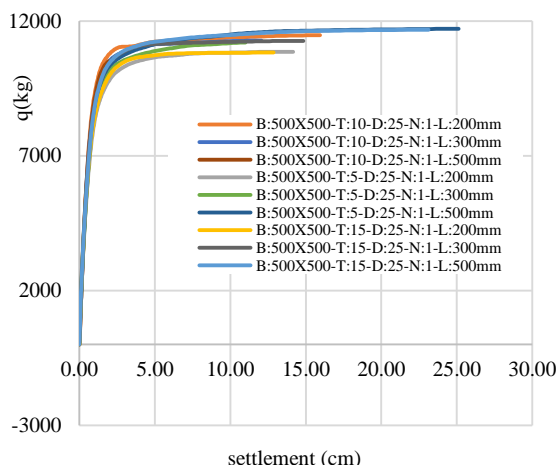
شکل ۹. صحت‌سنجی نتایج با مقایسه نمودار بار-نشست آزمایش و نرم‌افزار plaxis 3d

۳. نتایج و بحث

به منظور بررسی اثر طول، تعداد و قطر شمع و ابعاد و ضخامت پی، حالت‌های مختلف مدل‌سازی تحت بارگذاری برابر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی در حالت‌های مختلف به شرح

۳-۲. تأثیر افزایش ضخامت پی

به‌منظور ارزیابی تأثیر ضخامت پی بر ظرفیت باربری، پی مربعی دارای ابعاد ۲۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر برای ضخامت‌های ۱۰، ۵ و ۱۵ میلی‌متر در حالت تک‌شمع به طول‌های ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر به قطر ۲۵ میلی‌متر به‌ترتیب مطابق شکل (۱۱) و شکل (۱۲) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که در حالت تک شمع، تغییر ضخامت پی، تأثیر ناچیزی در افزایش ظرفیت باربری پی دارد. در حالت ۴ شمع، نیز مانند حالت تک شمع تغییر ضخامت تأثیری در افزایش ظرفیت باربری پی ندارد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که افزایش ضخامت پی منجر به کاهش تنش زیر پی می‌گردد و تأثیری در ظرفیت باربری و نشست پی ندارد.

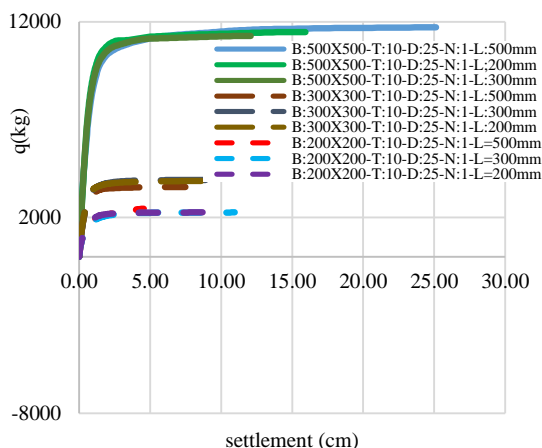


شکل ۱۲. تغییرات ظرفیت باربری برای ضخامت ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر برای حالت تک شمع و پی ۵۰۰×۵۰۰ میلی‌متر

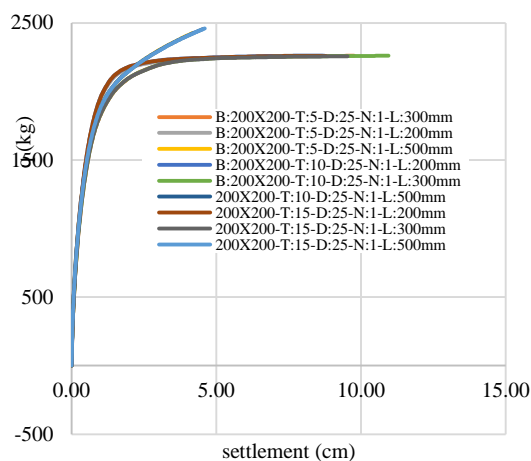
برابر ۳۱۲۶، ۳۷۷۵ و ۳۹۲۲ کیلوگرم است. همان‌طور که روند تغییرات نمودارها نشان می‌دهد، این موضوع به درصد مساحت شمع به مساحت پی مرتبط است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که افزایش طول شمع در درصد‌های بیشتر از ۵ درصد مساحت شمع به پی، در افزایش ظرفیت باربری پی مؤثر است و در درصد‌های کمتر از ۵ درصد افزایش طول تأثیر کمتری در افزایش ظرفیت باربری پی دارد.

۳-۴. تأثیر افزایش قطر شمع

شکل (۱۵) و شکل (۱۶) به ترتیب تغییرات ظرفیت باربری و نشست پی ۵۰۰ میلی‌متری با طول‌های متفاوت در حالت تک شمع و ۴ شمع با قطرهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشخص است در طول‌های بلندتر شمع‌ها قطر شمع‌ها تأثیرگذارتر هستند و در طول‌های کوتاه شمع‌ها افزایش قطر شمع‌ها تأثیر ناچیزی بر ظرفیت باربری پی دارد. این موضوع در حالت ۴ شمع متفاوت است. همان‌طور که در



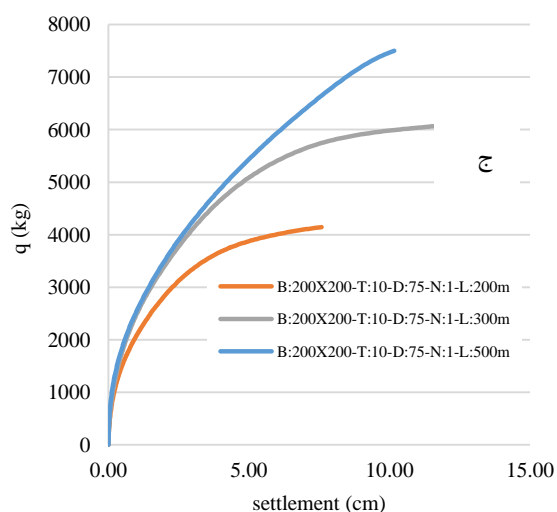
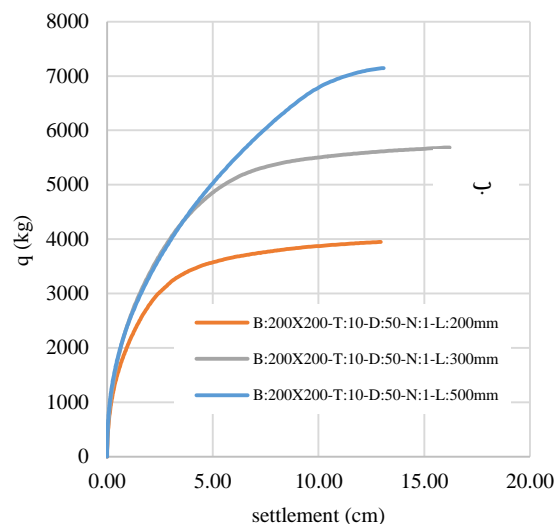
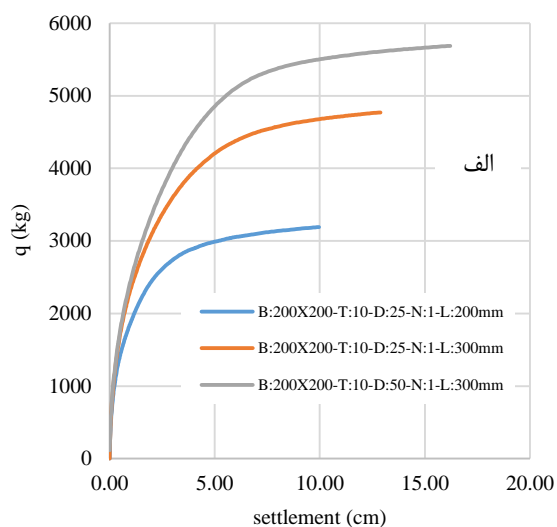
شکل ۱۰. تغییرات ظرفیت باربری پی مربعی با ابعاد ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر به ازای طول‌های مختلف شمع



شکل ۱۱. تغییرات ظرفیت باربری برای ضخامت ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر برای حالت تک شمع و پی ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر

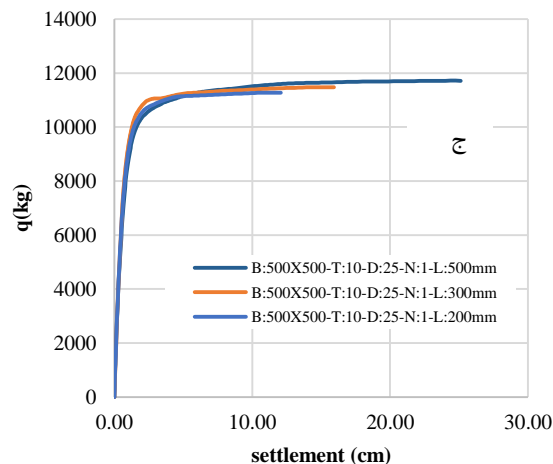
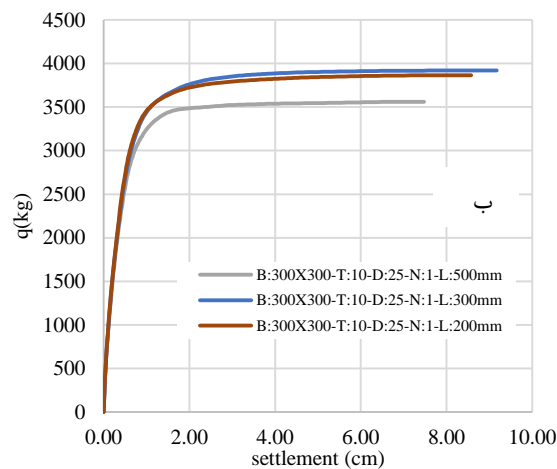
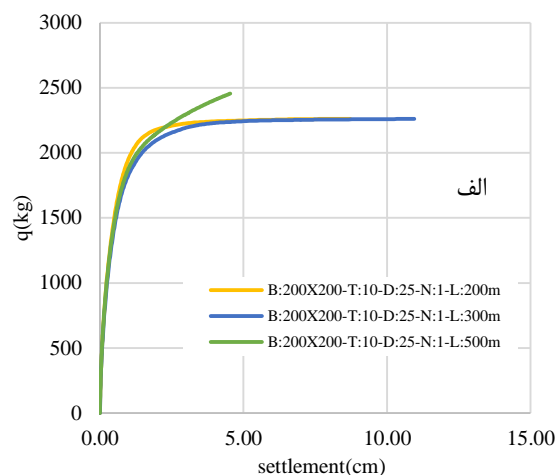
۳-۳. تأثیر افزایش طول شمع

شکل (۱۳) روند تغییرات ظرفیت باربری و نشست پی برای پی مربعی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و تک شمع با قطر ۲۵ میلی‌متر به طول‌های ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۳) مشخص است افزایش طول شمع در هر سه پی مربعی با ابعاد ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر در حالت تک شمع، تأثیر ناچیزی بر افزایش ظرفیت باربری پی دارد. در این حالت برای پی مربعی به ابعاد ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر (برای هر سه طول ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر) میزان ظرفیت باربری پی به‌ازای نشست ۲۵ میلی‌متر برابر ۲۲۰۰، ۳۷۰۰ و ۱۱۰۰۰ کیلوگرم است. این در حالی است که برای حالت ۴ شمع مطابق با شکل (۱۴)، ظرفیت باربری پی با افزایش طول شمع افزایش می‌یابد. مطابق با شکل (۱۴) در حالت پی مربعی به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر برای طول ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر شمع با قطر ۷۵ میلی‌متر به‌ازای نشست ۲۵ میلی‌متر



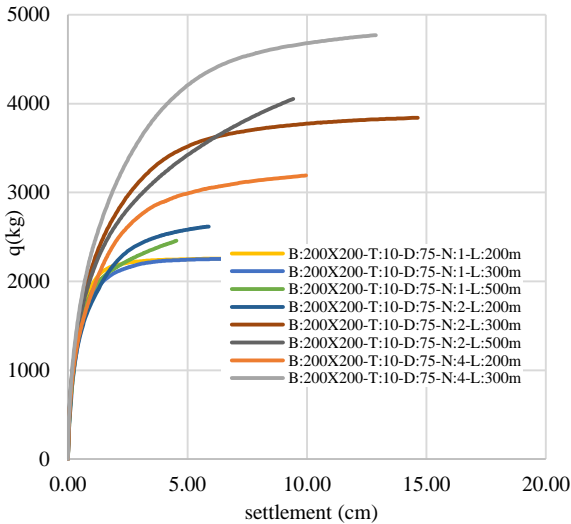
شکل ۱۴. تغییرات ظرفیت باربری پی به ازای طول‌های مختلف برای قطر (الف) ۲۵، (ب) ۵۰ و (ج) ۷۵ میلی‌متر

شکل (۱۶) مشاهده می‌شود با افزایش قطر شمع ظرفیت باربری پی به ازای نشست یکسان افزایش می‌یابد. این موضوع به این علت است که درصد مساحت شمع نسبت به مساحت پی بسیار ناچیز است و سهم کمی در ظرفیت باربری گروه شمع دارد و هر اندازه طول شمع‌ها افزایش یابد ظرفیت باربری شمع‌ها با توجه به نسبت مساحت شمع در پی، افزایش می‌یابد



شکل ۱۳. تغییرات ظرفیت باربری پی بر اثر افزایش طول در حالت تک شمع برای پی‌های با ابعاد (الف) ۲۰۰، (ب) ۳۰۰ و (ج) ۵۰۰ میلی‌متری

۳ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که در حالت ۴ شمع (نسبت مساحت شمع به پی برابر ۵ درصد)، ظرفیت باربری پی حدود ۶۰ درصد افزایش می‌یابد.



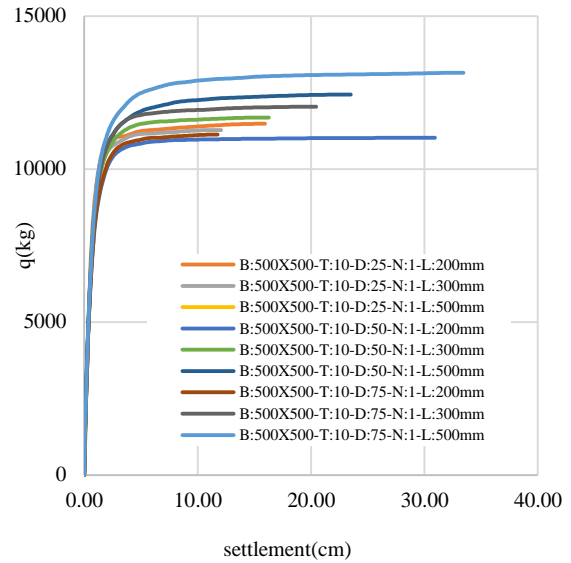
شکل ۱۷. تغییرات ظرفیت باربری پی بر اثر افزایش تعداد شمع به‌ازای طول‌های ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر

۳-۶. تغییرات BPI و a_s

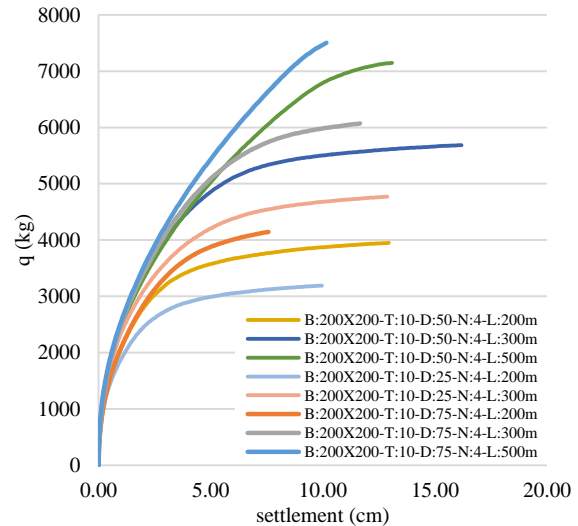
ظرفیت باربری سیستم صفحه و پایه فولادی با توجه به نسبت مساحت شمع به صفحه فولادی (a_s) و نسبت ظرفیت باربری سیستم صفحه به پایه فولادی به صفحه بدون پایه فولادی (BPI) مورد بررسی قرار گرفت.

شکل (۱۸) تغییرات BPI و a_s را برای پی مربعی 200×200 میلی‌متر نشان می‌دهد. همان‌طور که روند تغییرات نمودار نشان می‌دهد هر اندازه مقدار a_s افزایش می‌یابد ظرفیت باربری پی افزایش و میزان تأثیر طول نیز در ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. همان‌طور که شکل (۱۸) نشان می‌دهد هنگامی که مقدار a_s از ۵ درصد بیشتر می‌گردد مقدار BPI با توجه به افزایش طول شمع افزایش چشم‌گیری می‌یابد به‌نحوی که این مقدار از $1/0.1$ در حالت تک شمع به $1/8$ در حالت ۴ شمع با ضخامت پی یکسان می‌رسد.

شکل (۱۹) روند تغییرات BPI و a_s برای پی مربعی 500×500 میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که روند تغییرات نمودار نشان می‌دهد مقدار BPI در بازه $1/0.1$ تا $1/15$ با توجه به تغییرات طول تغییر می‌یابد. مقایسه شکل (۱۸) و شکل (۱۹) نشان می‌دهد که مقدار BPI تابع درصد مساحت شمع



شکل ۱۵. تغییرات ظرفیت باربری و میزان نشست پی در حالت تغییرات قطر شمع در حالت تک شمع



شکل ۱۶. تغییرات ظرفیت باربری و میزان نشست پی در حالت تغییرات قطر شمع در حالت ۴ شمع متصل

۳-۵. تأثیر افزایش تعداد شمع

شکل (۱۷) تغییرات ظرفیت باربری مربعی در برابر نشست پی در حالت تک شمع، ۲ شمع و ۴ شمع را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۷) مشخص است با افزایش تعداد شمع، ظرفیت باربری شمع نیز افزایش می‌یابد. به‌طوری که به ازای نشست ۲۵ میلی‌متر، میزان باربری شمع در حالت بدون شمع، تک شمع، ۲ شمع و ۴ شمع برای شمع‌های به طول ۳۰۰ میلی‌متر برابر ۲۰۹۱، ۲۱۵۴، ۲۹۸۵، ۳۳۶۵ کیلوگرم است. این موضوع نشان می‌دهد که در حالت تک شمع به دلیل نسبت مساحت کمتر شمع نسبت به پی (حدود ۱۲۵ درصد)، ظرفیت باربری پی حدود

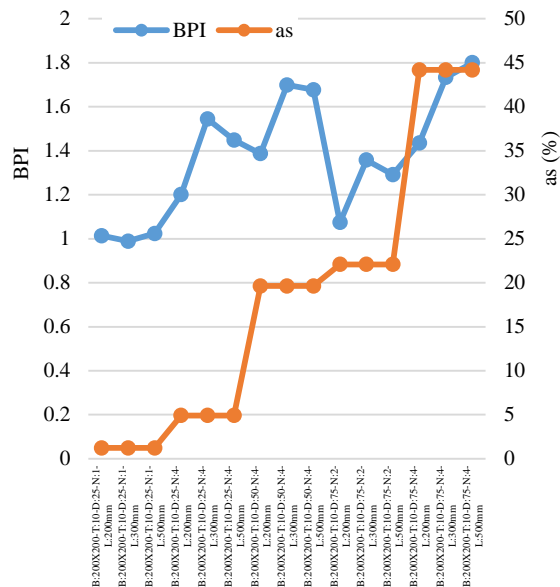
قرار گرفته در زیر شمع است. به همین دلیل می بایست در هنگام طراحی سیستم صفحه و پایه فولادی به مقدار a_s توجه نمود.

قرار گرفت. نتایج مطالعات نشان داد که ابعاد پی عامل مهمی در ظرفیت باربری پی است به نحوی که افزایش ابعاد پی منجر به افزایش ظرفیت باربری پی می گردد به طوری که افزایش دو برابری بعد پی منجر به افزایش بیش از دو برابری ظرفیت باربری در پی گردید. افزایش ضخامت پی تأثیر ناچیزی در ظرفیت باربری پی دارد و تنها منجر به کاهش تنش زیر خاک می گردد. افزایش طول شمع در حالتی که نسبت مساحت شمع نسبت به مساحت پی کمتر از ۵ درصد باشد تأثیر ناچیزی در افزایش ظرفیت باربری پی دارد. این در حالی است که در مطالعات صورت گرفته تأثیر افزایش طول شمع را به دلیل نسبت بالای ۵ درصد مساحت شمع به پی همواره در جهت افزایش ظرفیت باربری پی می دانستند. افزایش قطر شمع در جهت افزایش نسبت مساحت شمع به پی منجر به افزایش ظرفیت پی می گردد. همچنین نتایج مطالعات نشان می دهد که افزایش تعداد شمع منجر به افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست می گردد. به صورت کلی در نسبت مساحت شمع به پی بالای ۵ درصد، افزایش طول، قطر و تعداد شمع منجر به افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست می گردد.

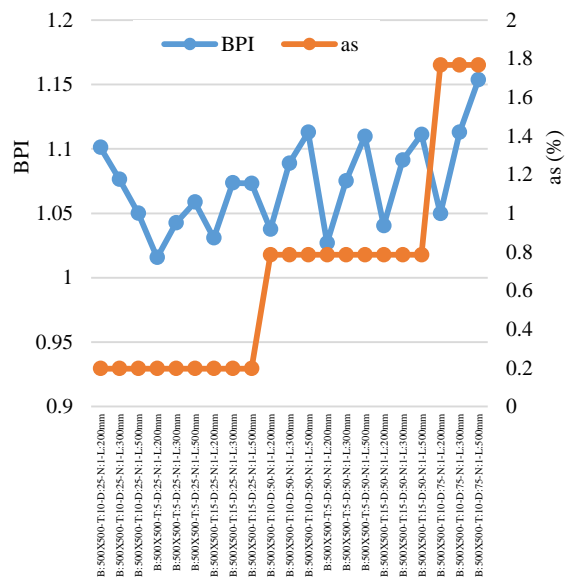
۵. مراجع ها

- [1] Burland, J. B.; Broms, B. B.; de Mello, V. F. "Behavior of Foundations and Structures"; Proc. Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Eng. 1977.
- [2] Poulos, H. G.; Davis, E. H. "Pile Foundation Analysis and Design"; Transport Research Laboratory, 1980.
- [3] Cooke, R. W. "Piled Raft Foundation on Stiff Clays a Contribution to Design Philosophy"; Geotechnique 1986, 36, 169-203.
- [4] Horikoshi, K.; Randolph, M. F. "A Contribution to Optimum Design of Piled Rafts"; Geotechnique 1998, 48, 301-317.
- [5] Poulos, H. G. "Piled Raft Foundations: Design and Applications"; Geotechnique 2001, 51, 95-113.
- [6] Poulos, H. G. "Simplified Design Procedure for Piled Raft Foundation"; Deep Foundations, An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance 2002, 441-458.
- [7] Liang, F. Y; Chen, L. Z.; Shi, X. G. "Numerical Analysis of Composite Piled Raft with Cushion Subjected to Vertical Load"; Comput. Geotech. 2003, 443-453.
- [8] Cao, X. D.; Wong, I. H.; Chang, M. F. "Behavior of Model Rafts Resting on Pile-Reinforced Sand"; J. Geotech. Geoenviron. 2004, 130, 129-138.
- [9] Sanctis, L.; Mandolini, A. "Bearing Capacity of Piles Rafts on Soft Clay Soils"; J. Geotech. Geoenviron. 2006, 132, 1600-1610.
- [10] Oh, E. Y. N.; Huang, M.; Surarak, C.; Adamec, R.; Balasubramaniam, A. S. "Finite Element Modeling for Piled Raft Foundation in Sand"; 11th East Asia-Pacific Conf. Structural Engineering & Construction, EASEC-11, 2008.
- [11] Oh, E. Y. N.; Lin, D. G.; Bui; Q. M., Huang; M., Surarak, C.; Balasubramaniam, A. S. "Numerical Analysis of Piled Raft Foundation in Sandy and Clayey Soils"; Proc. 17th Int. Conf. Soil Mech. Geotechnical Eng. 2009, 1159-1162.

قرار گرفته در زیر شمع است. به همین دلیل می بایست در هنگام طراحی سیستم صفحه و پایه فولادی به مقدار a_s توجه نمود.



شکل ۱۸. تغییرات مقدار BPI و a_s در حالات مختلف مدل سازی برای پی مربعی به ابعاد 200×200 میلی متر



شکل ۱۹. تغییرات مقدار BPI و a_s در حالات مختلف مدل سازی برای پی مربعی به ابعاد 500×500 میلی متر

۴. نتیجه گیری

به منظور بررسی ظرفیت باربری سیستم صفحه و پایه فولادی، پارامترهای بعد و ضخامت پی و طول، تعداد و قطر شمع مورد بررسی با استفاده از نرم افزار plaxis 3d foundation مورد بررسی

- [19] Khodaparast, M.; Hosseini, S. H. "Effect of Pile space in Pile Group under Explosive Loading"; *J. Adv. Defence Sci. & Technol.* 2018, 9, 393-404.
- [20] Sinha, A.; Hanna, A. M. "3D numerical Model for Piled Raft Foundation"; *Int. J. Geomechanics* 2016, 17.
- [21] Luo, R.; Yang, M.; Li, W. "Normalized Settlement of Piled Raft in Homogeneous Clay"; *Comput. Geotech.* 2018, 103, 165-178.
- [22] Kumar, V.; Kumar, A. "An Experimental Study to Analyze the Behavior of Piled-Raft Foundation Model under the Application of Vertical Load"; *Innovative Infrastructure Solutions* 2018, 3, 1-17.
- [23] Das, B. M.; Sobhan, K. "Principles of Geotechnical Engineering"; Cengage Learning, 2013.
- [24] Horikoshi, K.; Randolph, M. F. "Estimation of Overall Settlement of Piled Rafts"; *Soils and Foundations* 1999, 39, 59-68.
- [25] Brinkgreve, R. B. J. "Tutorial Manual PLAXIS 3D Foundation"; Delft University of Technology & Plaxis Bv. Netherland, 2013, 665.
- [26] Look, B. G. "Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables"; CRC Press, 2014.
- [12] Ziaie-Moayed, R.; Kamalzare, M.; Safavian, M. "Evaluation of Piled Raft Foundations Behavior with Different Dimensions of Piles"; *J. Appl. Sci.* 2010, 10, 1320-1325.
- [13] Fioravante, V.; Giretti, D. "Contact versus Noncontact Piled Raft Foundations"; *J. Can. Geotech.* 2010, 47, 1271-1287.
- [14] El Sawwaf, M. "Experimental Study of Eccentrically Loaded Raft with Connected and Unconnected Short Piles"; *J. Geotech. Geoenviron.* 2010, 136, 1394-1402.
- [15] Zhang, H.; Shi, M. L. "Mechanical Performance of Settlement-Reducing Pile Foundation with Cushion"; *Advanced Materials Research* 2012, 368, 2545-2549.
- [16] Sharma, V. J.; Vasanvala, S. A.; Solanki, C. H. "Recent Studies on Piled Raft Foundation: State of Art"; *Journal of Information, Knowledge and Research in Civil Engineering* 2011, 1, 38-46.
- [17] Saeedi Azizkandi, A.; Baziar, M. H.; Rasouli, H., Modarresi, M.; Shahnazari, H. "Centrifuge Modeling of Non-Connected Piled Raft System"; *Int. J. Civil Eng.* 2015, 13, 114-123.
- [18] Patil, J.; Vasanwala, S. A.; Solanki, C. H. "An Experimental Study of Eccentrically Loaded Piled Raft"; *Int. J. Geotechnical Eng.* 2016, 10, 40-45.