

گزارش فنی:

اثر چیدمان شمع بر عملکرد پی - شمع

رضا پورحسینی^{۱*}، پرهام شرف زاده^۲

۱- دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه یزد

(دریافت: تیر ۱۳۹۵، پذیرش: مهر ۱۳۹۷)

چکیده

شمع‌ها ضمن مشارکت در باربری پی - شمع، نشست را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند. در این پژوهش با مدلسازی سه‌بعدی پی - شمع‌ها در نرم‌افزار اجزا محدود PLAXIS 3-D Foundation در دو نوع خاک رس متوسط و ماسه متراکم، تاثیر چیدمان شمع‌ها و شکل رادیه بر عملکرد مجموعه پی مطالعه شد. نتایج مدل‌ها مشخص کرد که در دو پی همجوار و متقارن در ماسه که تحت بارگذاری یکنواخت هستند با انتقال شمع‌های گوشه‌ای و جایگذاری شمع‌های بلندتر در نزدیکی محور تقارن بین آنها، می‌توان نشست و دوران پی را بیش از ۵۰ درصد کاهش داد. همچنین برای پی‌های مربعی با نشست کلی ۱۵۴ میلی‌متر در دو نوع خاک رسی و ماسه‌ای، اثر چیدمان‌های مختلف شمع بررسی شد. بر اساس نتایج عددی، در خاک رسی با چینش شمع‌های بلندتر در مرکز پی و در خاک ماسه‌ای با تمرکز شمع‌ها در هسته مرکزی پی، بیش‌ترین کاهش نشست حاصل می‌شود. در مدل‌ها حجم شمع‌ها باهم مساوی است.

کلمات کلیدی

پی - شمع، نشست، چیدمان شمع، خاک، تحلیل عددی

*عهده دار مکاتبات: r_porhoseini@yazd.ac.ir

۱- مقدمه و سابقه موضوع تحقیق

نشست از عوامل مؤثر بر طراحی پی است. بسته به نوع خاک، استفاده از روش‌های مختلف بهسازی خاک مانند تراکم خاک، تزریق، ستون سنگی و یا استفاده از شمع برای پی‌سازی بر روی خاک سست نیاز است [۱]. از روش‌های مؤثر برای افزایش باربری پی‌های گسترده، استفاده از شمع‌های کاهنده نشست است که طراحی اقتصادی نیاز به تعیین سهم باربری شمع‌ها و پی گسترده دارد [۲، ۳]. تلفیق پی گسترده و شمع‌ها و یا پی شمع- رادیه^۱ (پی- شمع) از دهه ۱۹۷۰ میلادی مطرح شد. استفاده از دیدگاه شمع‌های کاهنده نشست^۲ به کاهش حجم شمع‌ها می‌انجامد [۴]. در سال ۱۹۹۴ در مفهوم بهینه طراحی پی- شمع گفته شد که شمع‌ها با نقش اصلی کاهش نشست طراحی شده به نحوی که باعث افزایش ظرفیت باربری نیز می‌شوند [۵]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تأثیر شمع بر کاهش نشست، بیش‌تر از افزایش ظرفیت باربری است [۶]. کائو^۳ و همکاران با مدل آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله طول شمع‌ها، تعداد شمع‌ها و ضخامت پی بر روی نشست پی را بررسی کردند [۷]. الوکیل و همکاران نسبت نشست به عرض برابر ۰/۰۰۷ را مناسب‌ترین مقدار برای طراحی در خاک ماسه‌ای پیشنهاد دادند، در این حالت سهم باربری پی ۳۹ درصد از کل بار خواهد بود [۸]. باجاد^۴ نشان داد که با جایگذاری شمع‌ها در قسمت مرکزی پی، نشست تفاضلی نسبت به حالت جایگذاری یکنواخت شمع‌ها ۳۰ درصد کاهش پیدا می‌کند [۹]. زهکشی و نشست زیاد رس نرم منجر به فاصله گرفتن رادیه از خاک و اعمال کل بار به شمع‌ها می‌شود [۱۰]. با این وجود نمونه‌های موفق اجرای پی- شمع در خاک‌های نرم نیز وجود دارد [۱۱، ۱۲].

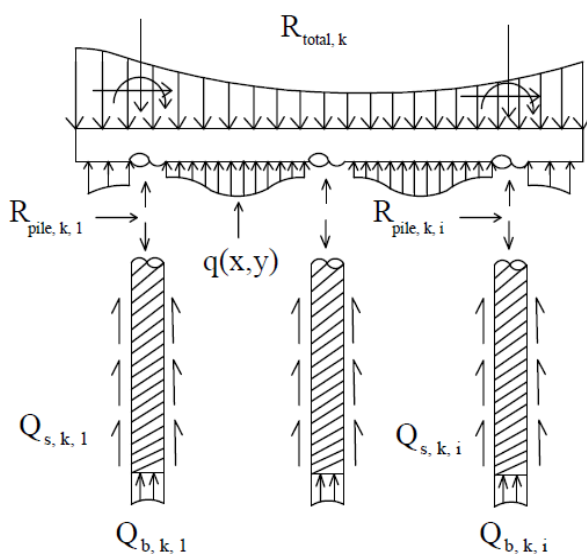
رندولف [۵] و پولس [۱۰] سه فلسفه طراحی را ارائه کردند: الف: "روش مرسوم"، شمع‌ها برای تحمل بخش عمده بار طراحی می‌شوند، در حالی که تا حدودی اجازه مشارکت به پی داده می‌شود، ب: "روش شمع خزشی"، شمع‌ها برای بارهای بهره‌برداری به نحوی طراحی می‌شوند تا در ۷۰ ~ ۸۰ درصد مقاومت نهایی شروع به حرکت کنند. در این روش شمع‌های کافی وجود دارد تا فشار تماس خالص بین رادیه و خاک زیرین را به مقدار کم‌تر از فشار

پیش‌تحکیمی خاک کاهش دهند، ج: "روش محدودیت نشست غیریکنواخت"، که شمع‌ها به عنوان کاهنده نشست طراحی می‌شوند.

تأثیر چیدمان شمع‌ها و همچنین سهم باربری شمع‌ها و پی کم‌تر بررسی شده است. در اینجا با مدلسازی سه‌بعدی به روش اجزاء محدود، اثر چیدمان شمع‌ها در کاهش نشست و سهم باربری شمع‌ها و پی، تحت بارگذاری قائم مطالعه شده است. چیدمان بهینه شمع‌های کاهنده نشست در خاک ماسه‌ای متراکم و خاک رس متوسط با شمع‌های هم‌قطر و با طول‌های متفاوت (حجم ثابت شمع)، از اهداف مطالعه اخیر است. همچنین چیدمان بهینه شمع‌ها برای کاهش نشست تفاضلی در پی‌های همجوار با دو الگوی بارگذاری مورد توجه قرار گرفته است.

۲- باربری پی- شمع

شکل ۱، توزیع بار بین شمع‌ها و پی را نشان می‌دهد. بار وارد بر یک شمع به موقعیت آن، گیرداری پی و شمع و عمق پی وابسته است.



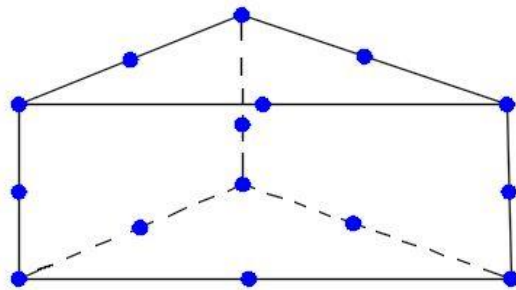
شکل ۱: اندرکنش بین شمع، خاک و پی [۱۳]

باربری پی- شمع از سه عنصر باربر شامل شمع، پی و خاک زیرین تشکیل شده و از رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۳].

$$R_{total,k} = R_{raft,k} + \sum_{i=1}^n R_{pile,k,i} \quad (1)$$

که $R_{raft,k}$ و $R_{pile,k,i}$ به ترتیب مقاومت پی و مقاومت شمع هستند. مقاومت پی از رابطه (۲) و مقاومت شمع از رابطه (۳) تعیین می‌شود:

مدلسازی پی-شمع به صورت سه‌بعدی در محیط نرم‌افزار اجزا محدود PLAXIS 3-D Foundation انجام پذیرفت. از المان منشوری ۱۵ گرهی برای خاک مطابق شکل ۴ و از المان مثلثی ۶ گرهی Floor برای دال پی استفاده شد. امکان انتخاب المان‌های Volume Piles و Embedded Piles برای شمع‌ها موجود است [۱۸]. مقاومت دیواره و نوک شمع با المان Embedded Piles مدل شد.



شکل ۴: المان منشوری ۱۵ گرهی

به منظور رسیدن به نتایج دراز مدت، تحلیل‌ها در شرایط زهکشی‌شده انجام شد. اندرکنش خاک-سازه به صورت لغزش بین جدار شمع و خاک بر اساس قانون اصطکاک موهر-کولمب با جزء فصل مشترک شبیه‌سازی شد. پارامترهای مقاومتی این جزء توسط ضریب کاهنده R_{inter} با رابطه‌های ۴ و ۵ به پارامترهای مقاومتی خاک، c و φ از مدل موهر-کولمب مرتبط می‌گردند:

$$c_i = R_{inter}c \quad (۴)$$

$$\tan\varphi_i = R_{inter}\tan\varphi \quad (۵)$$

که c_i و φ_i به ترتیب مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک در جزء فصل مشترک هستند.

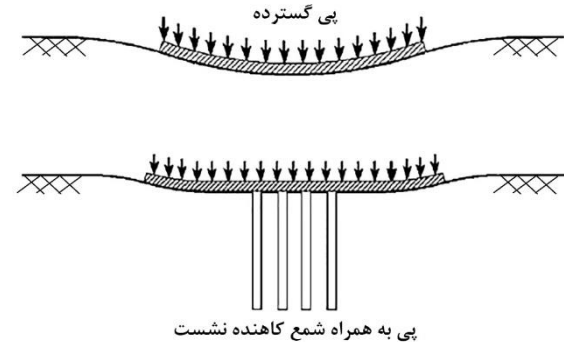
به منظور صحت‌سنجی نتایج عددی، پی ساختمان ۳۰ طبقه Messe-Torhaus (۱۹۸۲-۱۹۸۴) مدلسازی و تحلیل شد. این ساختمان ۴۰۰ مگانیوتن وزن و ۱۳۰ متر ارتفاع دارد. عبور خیابان پی را به دو بخش تقسیم کرده است. پی در عمق ۳ متر از سطح زمین با ضخامت ۲/۵ متر و ۴۲ شمع درجا با فاصله مرکز به مرکز ۳ ~ ۳/۵ متر است. مقطع و پی ساختمان در شکل ۵ نشان داده شده است [۱۹].

نشست پی گسترده حدود ۲۵۰ میلی‌متر تخمین زده شد که با توجه به نشست زیاد و همچنین نسبت لاغری ۵/۴ برج و حساسیت آن به چرخش، از شمع‌های به طول

$$R_{raft,k} = \iint q(x,y)dx dy \quad (۲)$$

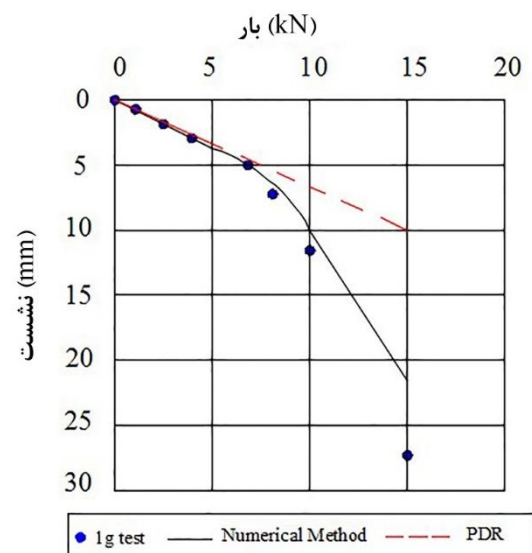
$$R_{pile,k,i} = Q_{b,k,i} + Q_{s,k,i} \quad (۳)$$

شکل ۲ تاثیر شمع‌ها را برای کاهش نشست تفاضلی نشان می‌دهد [۱۴].



شکل ۲: کاهش نشست تفاضلی با اضافه کردن شمع [۱۴]

هوری‌کوشی^۵ و رندولف^۶ باربری پی-شمع را با مدل سانتریفیوژ بر روی خاک‌های رسی متراکم مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. پولس^۷ و دیویس^۸ با در نظر گرفتن رفتار خطی برای خاک و صلبیت پی، روش تحلیلی ساده شده‌ای برای رفتار پی-شمع ارائه دادند [۱۶]. بازیار^۹ و همکاران نتایج روش‌های تحلیلی پولس-دیویس-رندولف (PDR)، تحلیل عددی و آزمایش سانتریفیوژ (1g) روی پی-شمع‌ها را مقایسه کردند که نتایج آن مطابق شکل ۳ است [۱۷]. این مقایسه محافظه‌کاری روش PDR را نشان می‌دهد.



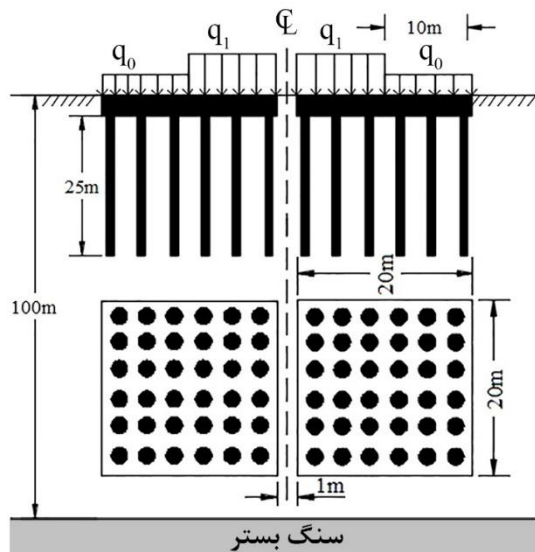
شکل ۳: مقایسه باربری پی-شمع با روش عددی و آزمایشگاهی [۱۷]

۳- مدلسازی عددی

در ادامه با تحلیل عددی اثر چیدمان شمع، شکل بارگذاری و نوع خاک بر اندرکنش شمع-خاک-پی بررسی می‌شود.

۴- پی- شمع‌های هم‌جوار

دو پی هم‌جوار با ضخامت ۰/۶ متر و ۳۶ شمع به شعاع ۰/۵ متر، طول ۲۵ متر و فاصله مرکز به مرکز ۳/۲ متر از هم، واقع بر خاک ماسه به صورت مدل مبنا در شکل ۶ نشان داده شده است. با مقادیر شدت بار q_0 و q_1 حالت بارگذاری مشخص می‌شود. در دو حالت ۱- ($q_0 = q_1 = 500 \text{ kPa}$) به عنوان بارگذاری ۱ و ۲- ($q_0 = q_1 = 750 \text{ kPa}$) اثر چیدمان شمع‌ها مطالعه می‌شوند. نتایج دو پی هم‌جوار را نیز می‌توان به پی‌های مستطیلی شکل تعمیم داد.

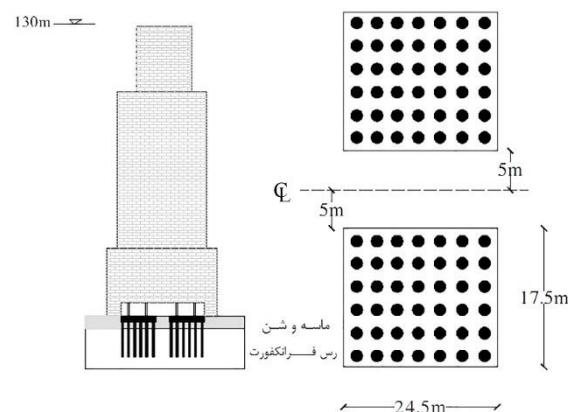


شکل ۶: الگو پی- شمع مبنا در دو پی هم‌جوار و شدت بار وارده با تحلیل حساسیت، عمق مدل δB (عرض پی) برابر ۱۰۰ متر در نظر گرفته شد. مشخصات خاک ماسه‌ای در جدول ۲ از کتاب‌های مرجع انتخاب شد تا معرف وضعیت عمومی خاک در یک رده خاص باشد.

جدول ۲: مشخصات خاک ماسه‌ای

واحد	مقدار	پارامتر
kN/m^3	۱۸	وزن مخصوص
MPa	۵۰	مدول الاستیسیته
kPa	۰	چسبندگی
deg.	۳۷	زاویه اصطکاک

۲۰ متر و قطر ۰/۹ متر کمک گرفته شد. لایه ماسه و شن تا عمق ۵/۵ متر و در زیر آن تا عمق ۱۰۰ متر رس فرانکفورت قرار دارد. سنگ‌آهک فرانکفورت، خارج از منطقه تأثیر فونداسیون و سطح آب زیرزمینی زیر تراز پی است.



شکل ۵: پی- شمع برج [Messe-Torhaus ۱۹]

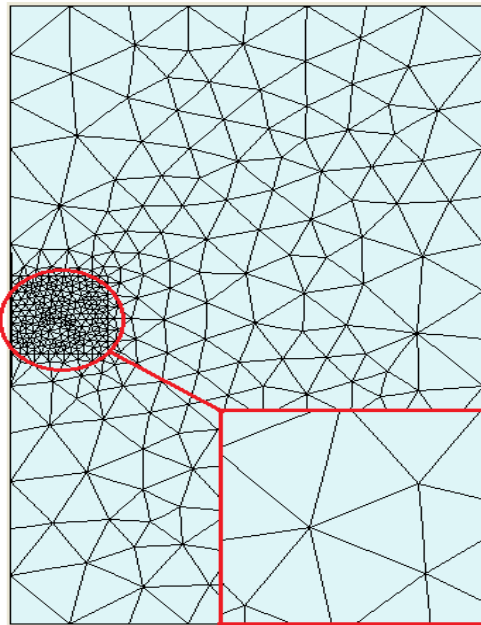
با مدلسازی در نرم‌افزار ABAQUS مقدار بیشینه نشست پی- شمع ۱۵۸ میلی‌متر محاسبه شد. نشست واقعی پی- شمع ۱۵۰ میلی‌متر گزارش گردیده است [۱۸]. بتن پی و شمع با رفتار کشسان خطی و ماسه و رس فرانکفورت با مدل موهر- کلمب مدلسازی شد که پارامترهای آن در جدول ۱ آمده است. ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون با K_0 داده شده است.

جدول ۱: خصوصیات مصالح پی در مدل [۱۹]

مصالح	E (MPa)	ν	C (kPa)	φ°	γ kN/m^3	K_0
بتن پی	۳۷۰۰۰	۰/۲	-	-	۲۵	-
شمع	۲۳۵۰۰	۰/۲	-	-	۲۵	-
ماسه	۷۵	۰/۲	۰	۳۵	۱۹	۰/۴۲۶
رس فرانکفورت	۵۰	۰/۲	۲۰	۲۰	۲۰	۰/۸

نشست بیشینه از نرم‌افزار PLAXIS 3-D Foundation، ۱۶۲ میلی‌متر به دست آمد که هماهنگی خوبی با نشست پی و نتایج تحلیل سه‌بعدی ABAQUS دارد. به دلیل تقارن فقط نیمی از پی در مدل سه‌بعدی وارد شد. با تحلیل حساسیت، فاصله مرزهای مدل تا لبه پی ۶۰ متر انتخاب شد. گام‌های محاسباتی عبارتند از: ۱- ایجاد تنش‌های اولیه در خاک، ۲- ساخت پی، شمع‌ها و سطح مشترک آنها با خاک ($R_{inter}=1$)، ۳- بارگذاری قائم با شدت یکنواخت ۴۶۷ کیلوپاسکال روی پی.

نتایج عددی نشان می‌دهد که در بارگذاری‌های ۱ و ۲ نشست بیشینه پی گسترده بدون شمع ۳۵۰ میلی‌متر و ۲۹۹ میلی‌متر ولی نشست تفاضلی ۱۶۶ میلی‌متر و ۲۰۴ میلی‌متر به وجود می‌آید. میزان چرخش پی در راستای محور AB به ازای بارگذاری‌های ۱ و ۲ به ترتیب ۰/۰۰۵ و ۰/۰۸۸ رادیان است که در محدوده مجاز در مبحث هفتم از مقررات ملی قرار نمی‌گیرد. به منظور کاهش نشست، چیدمان شمع‌ها با چهار حالت در شکل‌های ۹ و ۱۰ برای بارگذاری‌های ۱ و ۲ در نظر گرفته شد، در این چیدمان‌ها حجم بتن شمع‌ها مساوی است. شمع‌ها به قطر (D)، فاصله مرکز تا مرکز (S) و به حالت متصل به پی با ضخامت (t) هستند. در شکل ۹ ضخامت پی ۰/۶ متر است.

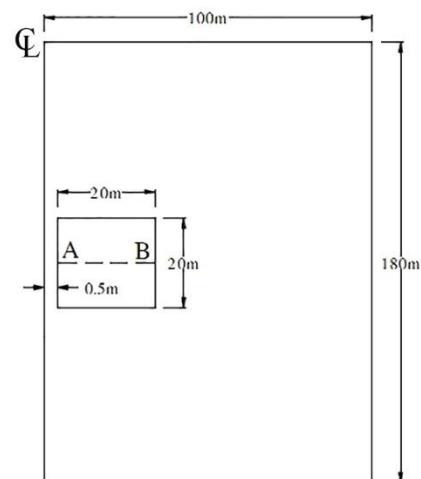


شکل ۸: شبکه‌بندی اجزا محدود

زاویه اتساع	γ	deg.
نسبت پواسون	۰/۳	-
ضریب فشار جانبی در حالت سکون	۰/۴	-

به علت تقارن مساله نیمی از پی تحلیل شد. در اندرکنش خاک-شمع از مدل موهر-کولمب با ضریب جزء فصل مشترک ۰/۸ استفاده شد. ضریب فشار جانبی خاک ماسه در حالت سکون از رابطه $K_0 = 1 - \sin \varphi$ محاسبه شد. بتن شمع و پی با مدول الاستیسیته ۳۰۰۰۰ مگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۲ و وزن مخصوص ۲۵ کیلونیوتن بر مترمکعب است.

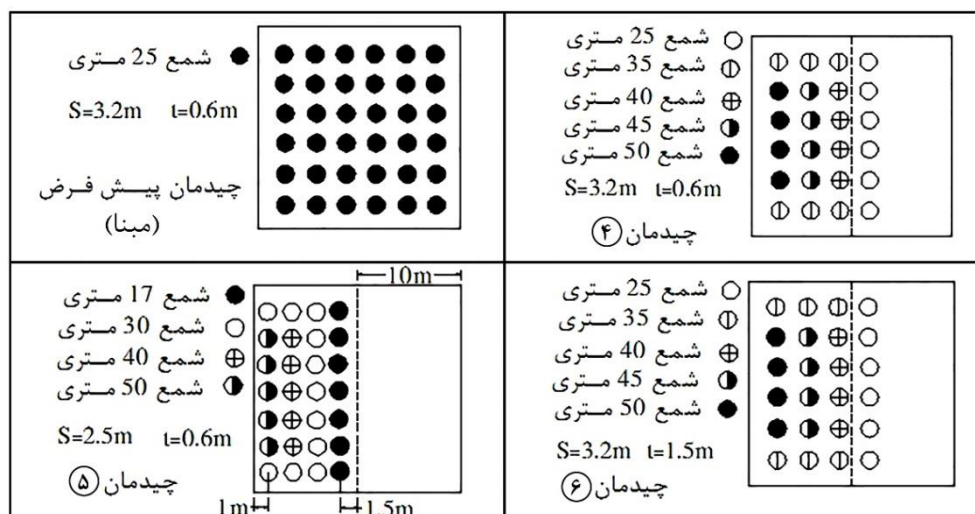
شکل ۷ ابعاد مدل و شکل ۸ پلان شبکه‌بندی اجزا محدود با تغییر تدریجی در ابعاد اجزاء را نشان می‌دهد. در نقاطی که تمرکز تنش بیشتر است، شبکه‌بندی ریزتر شده است.



شکل ۷: ابعاد مدل اجزا محدود برای تحلیل دو پی-شمع هم‌جوار

شمع ۲۵ متری $D=0.5m$ چیدمان پیش فرض (مبنا)	شمع ۱۰ متری $D=0.8m$ چیدمان ①
شمع ۲۰ متری شمع ۲۵ متری شمع ۳۰ متری شمع ۴۰ متری شمع ۵۰ متری $D=0.5m$ چیدمان ②	شمع ۱۵ متری شمع ۳۰ متری شمع ۳۷.۵ متری $D=0.5m$ چیدمان ③

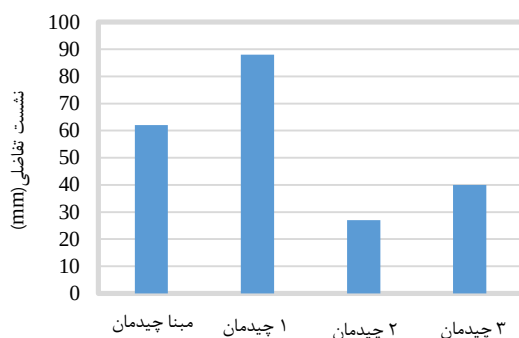
شکل ۹: چیدمان‌های پیشنهادی برای بارگذاری ۱



شکل ۱۰: چیدمان‌های پیشنهادی برای حالت بارگذاری ۲

یکنواخت‌تر شده و در نتیجه نشست تفاضلی و چرخش به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که نشست تفاضلی در چیدمان ۲ نسبت به چیدمان پیش‌فرض ۵۸ درصد کاهش داشته و در این حالت پی-شمع چرخش ۰/۰۱۳ رادیان و کمتر از حد ایجاد ترک در ساختمان دارد.

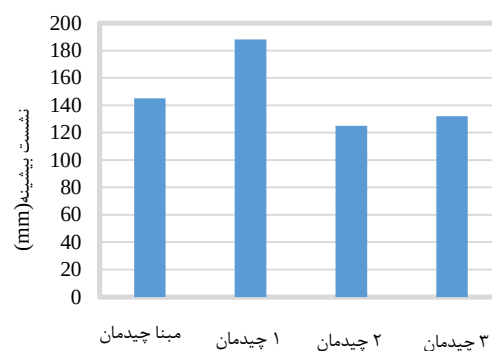
شکل ۱۱، نشست بیشینه پی-شمع را با چیدمان‌های مختلف شمع در حالت بارگذاری ۱ نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، نشست حداکثر در چیدمان ۱ نسبت به چیدمان پیش‌فرض، ۲۳ درصد بیش‌تر است و در چیدمان ۲ نشست حداکثر ۱۲ درصد نسبت به چیدمان پیش‌فرض کاهش دارد.



شکل ۱۲: نشست تفاضلی به ازای چیدمان‌های مختلف، حالت بارگذاری ۱

سهم بارگیری شمع‌ها نسبت به کل بار در چیدمان‌های مینا، ۱، ۲، ۳ به ترتیب ۶۶، ۶۱، ۵۴، ۶۳ درصد است.

شکل ۱۳، نشست بیشینه پی-شمع را با چیدمان‌های مختلف شمع‌ها تحت بارگذاری ۲ نشان می‌دهد. در چیدمان ۵، با متمرکز شدن شمع‌ها در محدوده شدت بار ۷۵۰ کیلوپاسکال و تقویت شمع‌های لبه پی در مجاورت محور تقارن دو پی، نشست بیشینه نسبت به آرایش پیش‌فرض ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. مقایسه چیدمان ۶ با



شکل ۱۱: نشست بیشینه به ازای چیدمان‌های مختلف، حالت بارگذاری ۱

مقدار نشست تفاضلی با چیدمان‌های مختلف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در چیدمان ۱ با شمع‌های کوتاه‌تر نسبت به ۳ چیدمان دیگر، نشست تفاضلی بیش‌تر مشاهده می‌شود. بنابراین افزایش طول شمع‌ها نسبت به افزایش قطر شمع‌ها تأثیر بیش‌تری بر روی عملکرد پی-شمع و کاهش نشست و دوران پی دارد. در چیدمان ۲ با حذف شمع‌های گوشه که نقش کم‌تری در باربری دارند و تقویت شمع‌های مجاور محور تقارن، نشست پی-شمع

دو نوع خاک رس متوسط و ماسه متراکم با ویژگی‌های جدول ۳ انتخاب شد. از مدل الاستوپلاستیک موه-کولمب در حالت زهکشی شده استفاده شده است که نشست‌های دراز مدت (نهایی) با پارامترهای زهکشی شده از این مدل محاسبه می‌شود. در خاک رسی سطح آب زیرزمینی دقیقاً زیر تراز پی لحاظ گردید. بتن شمع و پی با مدول الاستیسیته ۳۰۰۰۰ مگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۲ و وزن مخصوص ۲۵ کیلونیوتن بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. ضریب فشار جانبی در حالت سکون برای رس‌ها به نسبت بیش تحکیمی، OCR نیز وابسته بوده و غالباً از ۰/۵ بیش‌تر است.

جدول ۳: مشخصات خاک رس و ماسه

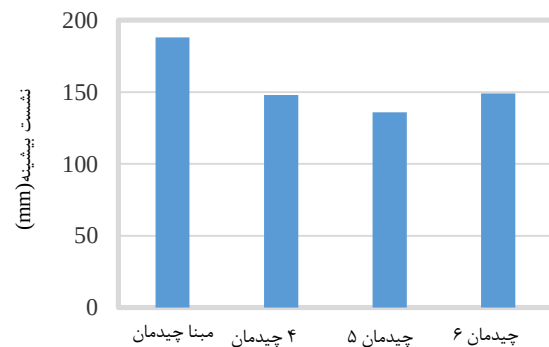
پارامتر	رس	ماسه	واحد
وزن مخصوص	۱۶	۱۸	kN/m ³
وزن مخصوص اشباع	۱۸	۲۰	kN/m ³
مدول الاستیسیته	۸	۵۰	MPa
چسبندگی	۱۵	۰	kPa
زاویه اصطکاک داخلی	۱۵	۳۷	deg.
زاویه اتساع	۰	۷	deg.
نسبت پواسون	۰/۴	۰/۳	-
ضریب فشار جانبی در حالت سکون	۰/۶	۰/۳۳	-

با هدف ایجاد نشست بیشینه برابر در پی‌های گسترده بدون شمع در دو نوع خاک، بار وارد بر پی‌ها محاسبه شد. با شدت بار ۶۰ و ۴۳۵ کیلوپاسکال به ترتیب در خاک رس و ماسه متراکم، نشست بیشینه از مدلسازی در نرم‌افزار ۱۵۴ میلی‌متر تعیین شد. در شرایط یاد شده نشست تفاضلی در خاک رس و ماسه به ترتیب ۸۳ و ۵۸ میلی‌متر است. با استفاده از نظریه مایرهوف و اعمال ضریب اطمینان برابر ۳، ظرفیت باربری مجاز پی‌های گسترده در خاک رس ۸۰ کیلوپاسکال و در ماسه متراکم بیش از ۷۵۰ کیلوپاسکال، بدون محدودیت نشست به دست می‌آید.

در چیدمان پیش‌فرض تعداد ۲۵ شمع با طول ۱۵ متر و قطر ۵۰ سانتی‌متر مطابق شکل ۱۵ در زیر پی جایگذاری شدند. برای خاک رس و ماسه R_{inter} به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۰/۹ فرض شد.

چهار چیدمان مطابق شکل ۱۶ در دو نوع خاک رس و ماسه متراکم انتخاب شد. با تحلیل حساسیت، ابعاد مدل ۱۶۰×۱۶۰ و عمق ۸۰ متر تعیین گردید.

چیدمان ۴ که تنها ضخامت پی از ۰/۶ متر به ۱/۵ متر افزایش یافته است نشان می‌دهد این افزایش ضخامت پی، تأثیر ناچیزی بر روی نشست بیشینه دارد و با اصلاح چینش شمع‌ها وضع مطلوب‌تری از لحاظ کاهش نشست تفاضلی به دست می‌آید.



شکل ۱۳: نشست بیشینه به ازای چیدمان‌های مختلف و تغییر ضخامت پی، حالت بارگذاری ۲

شکل ۱۴ نشست تفاضلی را در چیدمان‌های ۴، ۵ و ۶ نشان می‌دهد. در چیدمان‌های ۵ و ۶ نشست تفاضلی تقریباً یکسانی ایجاد شده است؛ هر چند ضخامت پی در چیدمان ۶ بیش‌تر است. در چیدمان ۲ با تغییر طول شمع‌ها و متمرکز شدن آنها در محدوده بار ۷۵۰ کیلوپاسکال، نشست تفاضلی کاهش قابل توجهی یافته است؛ در چیدمان ۳ تغییر ضخامت پی از ۰/۶ متر به ۱/۵ متر نقش موثری در کاهش نشست تفاضلی نگذاشت.



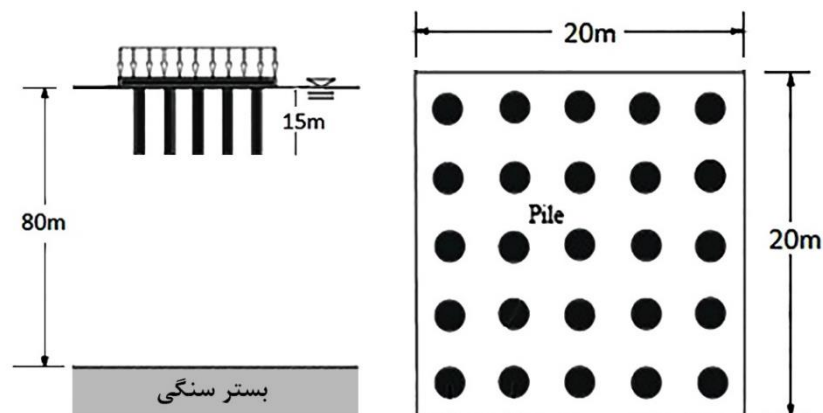
شکل ۱۴: نشست تفاضلی به ازای چیدمان‌های مختلف، حالت بارگذاری ۲

درصد بارگیری شمع‌ها نسبت به کل بار در چیدمان‌های مبنا، ۴، ۵، ۶ به ترتیب ۵۵، ۵۹، ۵۴، ۶۹ است.

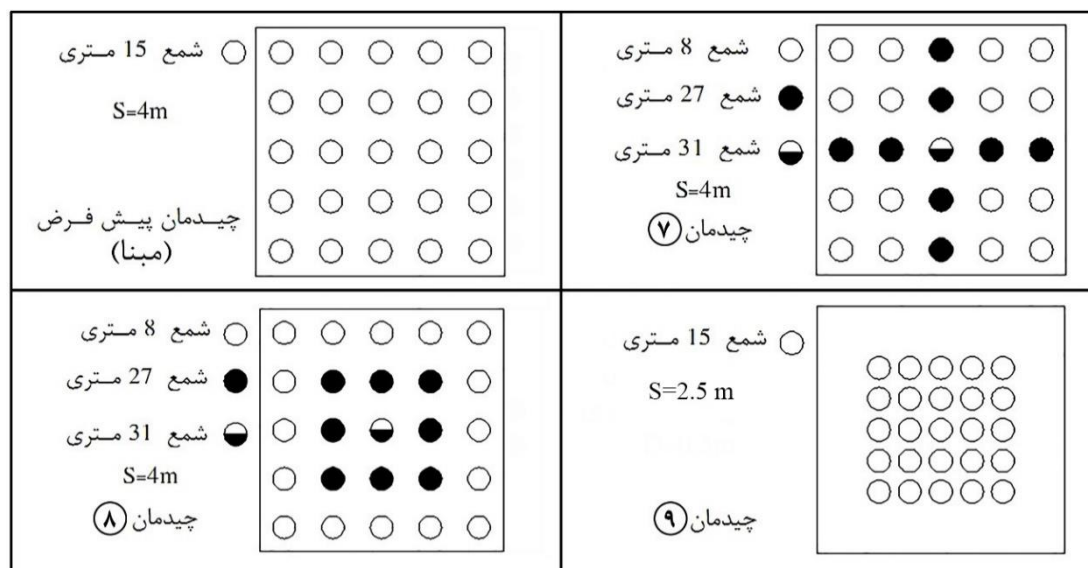
۵- پی-شمع مربعی

کاهش پیدا می‌کند، لذا مقدار نشست تفاضلی پی مستقر در خاک رس از خاک ماسه متراکم بیش‌تر است.

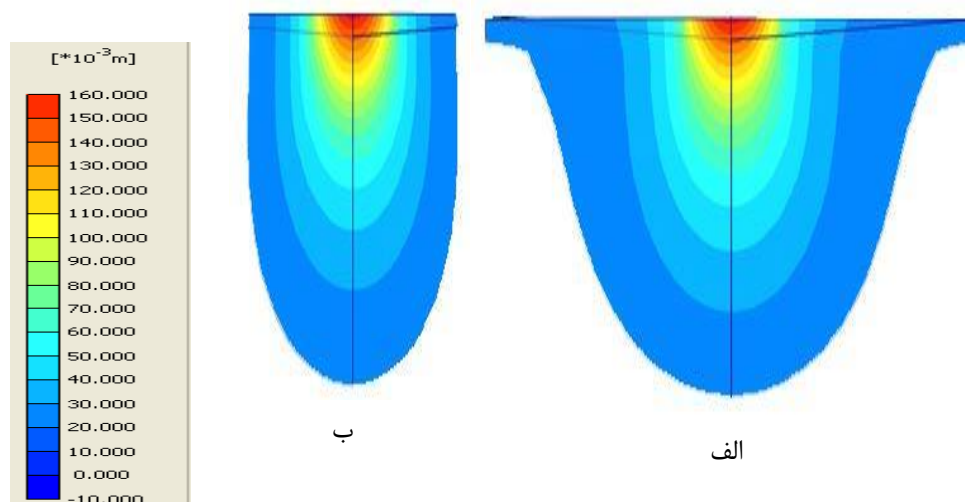
در شکل ۱۷ دیده می‌شود با توجه به ماهیت رفتاری رس و ماسه، نشست پی گسترده با دور شدن از مرکز پی در خاک رس، با شدت بیش‌تری نسبت به خاک ماسه‌ای



شکل ۱۵: مدل مبنا پی - شمع مربعی

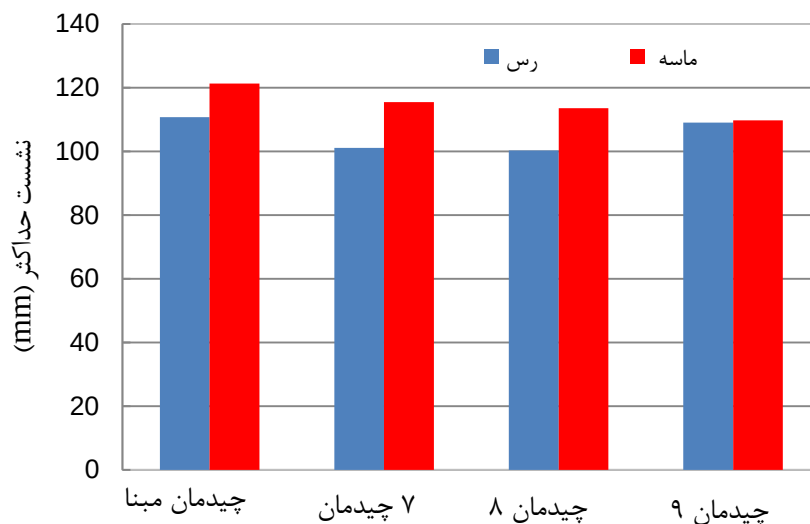


شکل ۱۶: چیدمان‌های شمع بررسی شده در خاک رس و ماسه متراکم



شکل ۱۷: تاثیر نوع خاک بر گسترش نشست زیر پی (الف) خاک رس، (ب) خاک ماسه

به طور یکنواخت و با بیش‌ترین فاصله جایگذاری شده‌اند. در خاک ماسه‌ای، با چیدمان ۸ نشست بیشینه نسبت به چیدمان پیش‌فرض ۹/۵ درصد کاهش نشان می‌دهد. در خاک رس، مناسب‌ترین چینش شمع‌ها برای کاهش نشست بیشینه چیدمان ۹ است که ۹ درصد نسبت به چیدمان پیش‌فرض کاهش دارد.

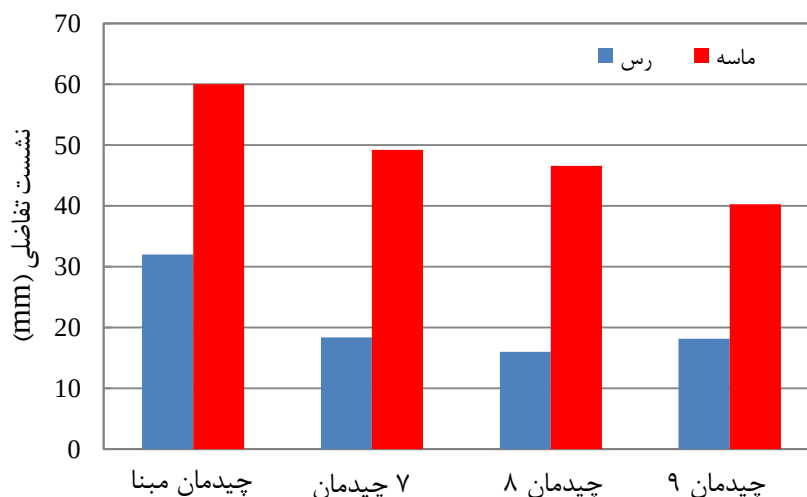


شکل ۱۸: نشست بیشینه پی-شمع مربعی به ازای چیدمان‌های مختلف

تفاضلی نسبت به چیدمان پیش‌فرض ۳۳ درصد کاهش می‌یابد. چینشی از شمع‌ها که بیش‌ترین محصور شدگی در ماسه ایجاد نماید، عملکرد را مطلوب‌تر می‌کند. اما در خاک رسی با چینش پراکنده و جایگذاری شمع‌های بلندتر در مرکز، ضمن جلوگیری از جریان خمیری خاک، عملکرد پی بهبود می‌یابد.

شکل ۱۸، نشست بیشینه پی-شمع‌ها را در خاک رسی و ماسه متراکم نشان می‌دهد. شدت بار وارد بر پی در خاک رس و ماسه متراکم ۶۰ کیلوپاسکال و ۴۳۵ کیلوپاسکال است. بر اساس نتایج عددی، در هر دو نوع خاک نامناسب‌ترین نوع چینش شمع‌ها در بین حالت‌های مقایسه شده، مدل پیش‌فرض است که شمع‌ها با طول‌های برابر و

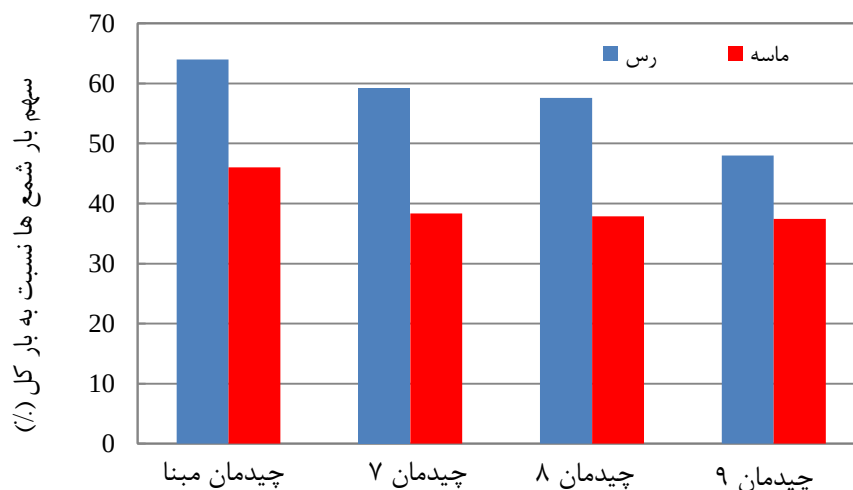
شکل ۱۹ نشست تفاضلی را در چیدمان‌های ۷، ۸ و ۹ نشان می‌دهد. در خاک ماسه‌ای به دلیل نشست کم‌تر در لبه‌های پی انتظار می‌رفت که با تمرکز شمع‌ها در مرکز پی، در آرایش ۹، نشست بیشینه و نشست تفاضلی کاهش یابد. نشست تفاضلی با چیدمان ۸ نسبت به چیدمان پیش‌فرض، ۵۰ درصد در خاک رس متوسط کاهش دارد. چیدمان ۹ مناسب‌ترین چینش شمع‌ها در خاک ماسه‌ای است، نشست



شکل ۱۹: نشست تفاضلی پی-شمع مربعی به ازای چیدمان‌های مختلف

خاک رس و ماسه متراکم نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در خاک رس، به دلیل ظرفیت باربری کمتر نسبت به خاک ماسه‌ای متراکم، سهم بار بیشتری توسط شمع‌ها تحمل می‌شود.

شکل ۲۰ درصد بارگیری شمع‌ها را به ازای چیدمان‌های مختلف شمع‌ها در زیر پی مربعی در دو نوع



شکل ۲۰: سهم بارگیری شمع‌ها نسبت به بار کل

در خاک ماسه متراکم با کاهش فاصله بین شمع‌ها و متمرکز کردن آنها در مرکز پی، تأثیر بیشتری بر روی کاهش نشست دارد.

۵- در پی- شمع مربعی، سهم بارگیری شمع‌های کاهنده نشست در خاک رس، نسبت به خاک ماسه‌ای متراکم بیشتر است.

مراجع

- [1] Haghbin, M. (2014). Study on behavior of soil reinforcing pile in piled raft systems. International Journal of Civil Engineering, Vol. 12, No. 4, Transaction B: Geotechnical Engineering.
- [2] Eslami, A., Veiskarami, M., & Eslami, M. M. (2010). Piled-raft foundation (PRF) optimization design with connected and disconnected piles. Proceedings of the 33rd Annual and 11th International Conference on Deep Foundations, Deep Foundations Institute (DFI), New York, NY, USA, pp. 201-211.
- [3] Seo, Y. K., Lee, H. J., & Kim, T. H. (2006). Numerical analysis of piled raft foundation considering sand cushions effects. Proceedings of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA, pp. 608-613.

۶- نتیجه‌گیری

با تحلیل عددی تأثیر چیدمان شمع‌ها بر عملکرد پی-شمع‌ها در خاک رس متوسط و ماسه‌ای مطالعه شد. بر اساس نتایج عددی به دست آمده می‌توان گفت:

۱- نحوه چیدمان شمع‌ها در زیر پی، تأثیر زیادی بر عملکرد پی- شمع دارد؛ به گونه‌ای که می‌توان با چیدمان مناسب شمع‌ها، میزان نشست بیشینه و تفاضلی را به میزان چشم‌گیری کاهش داد.

۲- برای پی- شمع‌های هم‌جوار با بارگذاری یکنواخت، استقرار شمع‌های بلندتر در مرز محور تقارن دو پی و حذف شمع‌های گوشه، چیدمان مطلوب به دست می‌آید. نتایج نشان داد که در این حالت نشست تفاضلی و چرخش پی، به میزان قابل توجه ۵۶ و ۸۰ درصد کاهش می‌یابد.

۳- با حجم و چیدمان ثابت شمع‌ها، افزایش طول شمع‌ها تأثیر بیشتری بر روی کاهش نشست دارد.

۴- برای یک پی- شمع مربعی در خاک رسی با جایگذاری شمع‌های بلندتر در مرکز پی (۶۶ درصد از حجم شمع‌ها) مناسب‌ترین چیدمان به دست می‌آید، در حالی که

Dubai. Journal of Geotechnical, Vol. 6, No. 42, pp. 716-730.

[17] Baziar, M. H., Ghorbani, A., & Ghiassian, H. (1999). Finite element and simplified analysis of piled-raft system, Proceedings of 4th International Conference on Deep Foundation Practice, Singapore, pp. 125-133.

[18] Ryltenius, A. (2011). FEM modelling of Pile raft foundation in two and three dimensions. Geotechnical Engineering, LTH, Sweden.

[19] Reul, O., & Randolph, M. F. (2003). Piled rafts in over consolidated clay: comparison of in situ measurements and numerical analyses. Geotechnique, Vol. 53, No. 3, 301-315

¹ Piled Raft

² Settlement reducing piles

³ Cao

⁴ Bajad

⁵ Horikoshi

⁶ Randolph

⁷ Poulos

⁸ David

⁹ Bazyar

[4] Oh, E., Bolton, M., & Balasubramaniam, A. S. (2013). A design method for piled raft foundations. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, pp. 2671-2674.

[5] Randolph, M. F. (1994). Design methods for pile groups and piled rafts. State-of-the-art report, 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, 5, pp. 61-82.

[6] Reul, O., & Randolph, M. F. (2004). Design strategies for piled rafts subjected to non-uniform vertical loading. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 1, pp. 1-13.

[7] Cao, X. D., Wong, M. F., & Chang, M. F. (2004). Behavior of model rafts resting on pile-reinforced sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 2, pp. 129-138.

[8] Elwakil, A. Z. and Azzam, W.R. (2016). Experimental and numerical study of piled raft system. Alexandria Engineering Journal, Vol. 55, pp. 547-560.

[9] Bajad, S. P., & Sahu, R. B. (2009). Optimum design of piled raft in soft clay- a model study", Geotide, India Geotechnical Society, pp. 131-134.

[10] Poulos, H. G. (2001). Piled-raft foundation: Design and applications. Geotechnique, Vol. 51, No. 2, pp. 95-113.

[11] Poulos, H. G. (2005). Piled raft and compensated piled raft foundations for soft soil sites. Geotechnical Special Publication, Vol. 129, pp. 214-234.

[12] Tan, Y. C., Chow, C. M., & Gue, S. S. (2005). Piled raft with deferent pile length for medium-rise buildings on very soft clay. 16th International Conference ICSMGE, Osaka, pp. 2045- 2048.

[13] Ibanez, L., & Cunha, R. (2013). Spreadsheets for the analysis of piled raft foundations. Revista Ingenieria de Construction RIC, Vol.28, No.2, pp. 207-216.

[14] El-Garhy, B., Abdel Galil, A., Abdel-Fattah Youssef, A. F., & Abo Raia, M. (2013). Behavior of raft on settlement reducing piles: Experimental model study, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 5.

[15] Horikoshi, K., & Randolph, M. F. (1994). Settlement of Piled Raft Foundations on Clay, Centrifuge 94, Balkema, Rotterdam, pp. 449-454.

[16] Poulos, H. G., & Davis, A. J. (2005). Foundation design for the emirates twin tower,