



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Numerical Study of the Influence of the Raft-Soil Stiffness Ratio on the Behavior of the Piled Raft Foundation Located on Sandy Soil

Masoud Yousefi ^a, Loghman Rahimi ^{a,*}, Hadi Azizian ^a

^a Department of Civil Engineering, Mahabad Branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-11-21

Revised: 2025-03-06

Accepted: 2025-04-08

Keywords:

Raft-Soil stiffness ratio;
Pile group;
Sandy soils;
Bearing capacity;
Settlement;
3D finite elements method.

ABSTRACT

The Piled raft foundation (PRF) is a combination of pile and raft that provides adequate bearing capacity under the allowable settlement. In this article, finite element method and PLAXIS 3D software is used to investigate the behavior of piled raft foundation system located on sandy soils under vertical load. In the finite element program 27 numerical models simulated and analyzed for rafts without piles and reinforced with piles. The effect of raft-soil stiffness, number, spacing, and piles arrangement on the general load- displacement behavior, improvement of bearing capacity, reduction of settlement and the Share of load distribution between raft and piles group discussed. The results shown that increasing the soil- raft stiffness and the number of piles has the least effect on the general mechanism of the load-settlement curve. Increasing the raft-soil stiffness improved the bearing capacity and settlement reduction ratio by an average of 19% and 23%, respectively, and the share of load carried by the raft by about 5% reduced. In addition, increasing the number of piles improved the bearing capacity and settlement reduction ratio by about 71% and 55%, respectively, and the share of load carried by the raft by an increasing amount of 41% reduced. Also, the arrangement and spacing of piles had a small effect of about 4% on the general load-settlement behavior, the share of load sharing between rafts and piles, improving the bearing capacity and reducing settlement.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.36009.2761>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: l.rahimi@iau-mahabad.ac.ir

How to cite this article:

M. Yousefi , L. Rahimi and H. Azizian, "Numerical study of the influence of the raft-soil stiffness ratio on the behavior of the piled raft foundation located on sandy soil," Journal of Modeling in Engineering, 23 82 (2025): 267-279, doi: 10.22075/jme.2025.36009.2761

مطالعه عددی تأثیر نسبت سختی رافت- خاک بر رفتار فونداسیون رافت شمعی واقع بر خاک ماسه ای

مسعود یوسفی^۱، لقمان رحیمی^{۱*} و هادی عزیزیان^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۶ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹	فونداسیون رافت شمعی (PRF) ترکیبی از شمع و رافت است که ظرفیت باربری کافی را در زیر نشست مجاز فراهم می کند. در این مقاله جهت بررسی رفتار سیستم فونداسیون رافت شمعی واقع بر خاک های ماسه ای تحت بار عمودی، از روش المان محدود و از نرم افزار PLAXIS 3D استفاده شده است. در برنامه المان محدود ۲۷ مدل عددی برای رافت بدون شمع و مسلح به شمع شبیه سازی و آنالیز گردید. تأثیر سختی رافت- خاک، تعداد، فاصله و آرایش بندی شمع ها بر رفتار کلی بار- نشست، بهبود ظرفیت باربری، کاهش نشست و سهم تقسیم بار بین رافت و گروه شمع مورد بحث قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش سختی رافت- خاک و تعداد شمع ها کمترین تأثیر را بر مکانیسم کلی منحنی بار- نشست دارد. افزایش سختی رافت- خاک ظرفیت باربری و نسبت کاهش نشست را به ترتیب به طور متوسط ۱۹٪ و ۲۳٪ بهبود بخشید و سهم بار حمل شده توسط رافت را حدود ۵٪ کاهش داد. علاوه بر آن افزایش تعداد شمع ها ظرفیت باربری و نسبت کاهش نشست را به ترتیب در حدود ۷۱٪ و ۵۵٪ بهبود بخشید و سهم بار حمل شده توسط رافت را بطور فزاینده و به میزان ۴۱٪ کاهش داد. همچنین آرایش بندی و فاصله شمع ها تأثیر اندکی در حدود ۴٪ بر رفتار کلی بار- نشست، سهم تقسیم بار بین رافت و شمع، بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست داشت.

واژگان کلیدی:

نسبت سختی رافت- خاک،
گروه شمع،
خاک ماسه ای،
ظرفیت باربری،
نشست،
روش المان محدود سه بعدی.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.36009.2761>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

در دهه های اخیر، رشد سریع شهرها در سراسر جهان منجر به افزایش سریع تعداد و ارتفاع ساختمان های بلند و به دنبال آن تعداد پل ها و کارخانجات صنعتی شده است. اخیراً به طور فزاینده ای تشخیص داده شده است که برای پشتیبانی از این گونه سازه ها در انواع مختلف خاک ها نظیر توده های رسی و ماسه ای ضخیم با سطح آب بالا، جهت بهبود عملکرد نشست، افزایش ظرفیت باربری و ضخامت مورد نیاز رافت، استفاده از فونداسیون های شمعی می تواند منجر به صرفه جویی قابل توجهی شود. روش های طراحی

فعلی برای گروه های شمع تحت بارگذاری عمودی تقریباً رفتار کلی آنها را تخمین می زند و به طور کلی برآوردهای محافظه کارانه از ظرفیت گروه به دست می دهد. رویکرد طراحی متداول این است که اطمینان حاصل شود بار کل سازه فوقانی تا حد زیادی توسط شمع ها حمل شود. در نتیجه ضریب ایمنی کلی می تواند در عمل بسیار بالا باشد. تحقیقات قابل توجه و مشارکت های برجسته توسط محققین در زمینه تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار فونداسیون های رافت شمعی صورت گرفته است. روش های مختلفی برای تجزیه و تحلیل فونداسیونهای رافت شمعی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: l.rahimi@iau-mahabad.ac.ir

۱. گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد، مهاباد، ایران

استناد به این مقاله:

مسعود یوسفی، لقمان رحیمی و هادی عزیزیان، "مطالعه عددی تأثیر نسبت سختی رافت-خاک بر رفتار فونداسیون رافت شمعی واقع بر خاک ماسه ای"، مدل سازی در مهندسی، ۸۲ (۱۴۰۴): ۲۶۷-۲۷۹، doi: 10.22075/jme.2025.36009.2761

توسط نویسندگان متعدد ارائه شده است.

کوک [۱]، از طریق آزمایش‌های مدلی بر روی فونداسیون رفت شمع، رفتار سیستم فونداسیون رفت شمع را با گروه شمع و رفت بدون شمع مقایسه کرد. او دریافت که تقسیم بار بین شمع‌ها در رفت شمع‌بندی شده به فاصله شمع‌ها و تعداد شمع‌ها بستگی دارد. او همچنین مشاهده کرد که نشست مرکزی رفت بزرگتر از محل لبه‌های رفت است.

هوریکوشی و راندولف [۲ و ۳]، یک آزمایش سانتریفیوژ بر روی سیستم فونداسیون رفت شمع روی خاک رسی انجام دادند و دریافتند که حتی یک گروه کوچک از شمع‌ها در زیر رفت می‌تواند نشست‌های غیریکنواخت رفت را کاهش دهد. همچنین آنها نشان دادند که یک سرشمع کوچک روی یک شمع می‌تواند ظرفیت حمل بار سیستم را افزایش دهد. علاوه بر آن هوریکوشی و همکاران [۴]، آزمایش سانتریفیوژ را بر روی سیستم فونداسیون رفت شمع بر روی خاک ماسه ای تحت بارگذاری افقی و عمودی انجام دادند و نشان دادند که ظرفیت شمع در تماس با خاک به دلیل افزایش تنش محدود کننده در اطراف شمع افزایش می‌یابد.

کونته و همکاران [۵]، یک آزمایش سانتریفیوژ بر روی سیستم پایه رفت شمع برای تعیین سختی فونداسیون رفت شمع به دلیل تأثیر تغییر در شمع‌ها و هندسه رفت انجام دادند.

لی و چانگ [۶]، یک تست آزمایشگاهی بر روی سیستم فونداسیون رفت شمع در خاک ماسه ای انجام دادند و رفتار پی رفت شمع را به دلیل تأثیر نصب شمع و اندرکنش بین رفت و شمع را بررسی نمودند. آنها گزارش دادند که اندرکنش سیستم فونداسیون رفت شمع تحت تأثیر محل شمع‌ها و فاصله شمع‌ها قرار می‌گیرد.

باجد و شاو [۷]، یک آزمایش مدل یک گرمی را بر روی فونداسیون رفت شمع واقع بر روی خاک رس نرم با رفت به ضخامت‌های مختلف روی شمع‌های ۴، ۹ و ۱۶ تایی انجام دادند و تأثیر طول و تعداد شمع‌ها بر نحوه تقسیم بار بین شمع و رفت و کاهش نشست را بررسی نمودند.

فیوروانته و همکاران [۸]، یک آزمایش سانتریفیوژ را بر روی رفت دایره ای صلب بدون شمع و با شمع‌های ۱، ۳، ۷ و ۱۳ تایی بر روی خاک ماسه ای انجام دادند، تا نقش شمع‌ها به‌عنوان کاهش‌دهنده نشست و نحوه تقسیم بار بین رفت و شمع‌ها را بررسی کنند. آنها مشاهده کردند که با افزایش

تعداد شمع‌ها، نشست رفت کاهش می‌یابد. همچنین نشان دادند که شمع‌های جابجایی در کاهش نشست رفت نسبت به شمع‌های بدون جابجایی موثرتر هستند. کو و همکاران [۹]، یک تحلیل اندرکنش سه بعدی از سازه فوقانی و سیستم فونداسیون رفت شمع پیشنهاد کردند. آنها دریافتند که تحلیل پیشنهادی در مقایسه با تحلیل اجزای محدود، نتایج مشابهی از نشست و لنگر خمشی رفت را به دست می‌دهد.

سینها و هانا [۱۰]، یک تحلیل عددی جهت مطالعه تأثیر پارامترهای کلیدی و موثر بر رفتار سیستم فونداسیون رفت شمع و واقع بر خاک همگن انجام دادند و سهم توزیع بار مشترک بین شمع‌ها و رفت بررسی نمودند.

مویدی و همکاران [۱۱]، یک تحقیق تحلیلی در مورد عملکرد رفت‌های شمع شناور بر روی لایه‌های خاک تراکم پذیر جهت کنترل اعوجاج زاویه ای مطالعه کرده اند. آنها دریافتند اعوجاج زاویه ای زمانی کمتر است، که از شمع‌های شناور با طول‌های مختلف به جای طول‌های یکنواخت استفاده گردد.

برناردس و همکاران [۱۲]، با انجام تحلیل‌های عددی، استفاده از سیستم فونداسیون رفت شمع‌ها برای کنترل نشست در خاک‌های دانه را مورد مطالعه قرار دادند و یک راه حل بهینه برای کاهش نشست‌های تفاضلی و کلی را پیشنهاد نمودند.

ایرساو و آشانگو [۱۳]، ۲۸ مدل عددی از سیستم فونداسیون رفت شمع برای ساختمان ۴۸ طبقه بانک مرکزی تجاری در آدیس آبابای اتیوپی را با استفاده از نرم افزار 3D FLAC بصورت پارامتریک مطالعه نمودند. تأثیر پارامترهای قطر، طول و فاصله شمع‌ها را بر ظرفیت باربری، نشست و تقسیم بار بین رفت و شمع‌ها را بررسی نمودند. دو مدل بهینه را جهت طراحی فونداسیون رفت شمع پیشنهاد دادند که در آن بیشترین ظرفیت باربری، کمترین نشست و توزیع مناسب سهم بارگیری رفت و گروه شمع‌ها در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، تحقیقات قابل توجهی برای درک چگونگی پاسخ سیستم فونداسیون رفت شمع به بارهای استاتیک با استفاده از روش‌های عددی [۱۴، ۱۵، ۱۷، ۱۸ و ۲۰]، و تجربی [۱۶، ۱۹ و ۲۱]، انجام شده است. با این وجود اهمیت رفت به عنوان یک المان باربر در طراحی سنتی حفظ شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که نسبت بار حمل شده توسط رفت به طور قابل

ملاحظه ای بیشتر از ۲۰٪ است [۱۶ و ۲۱].

از آنجائیکه خاک یک ماده چند فازه است، همچنین با توجه به رفتار غیر خطی و نسبتاً پیچیده ی خاک، دستیابی به یک راه حل تحلیلی که در برگیرنده پارامترهای متعدد باشد، مشکل و در برخی موارد غیر ممکن است. لذا کاربردهای ژئوتکنیکی نیازمند مدل‌های پیوسته و پیشرفته برای شبیه سازی رفتار غیرایزوتروپیک و غیرخطی وابسته به زمان خاک می باشد. توسعه نرم افزارهای اجزای محدود و افزایش توانایی آنها در سالهای اخیر موجب شده است تا کاربرد بیشتری در زمینه تحلیل سازه های خاکی پیدا کنند. به کمک این نرم افزارها میتوان علاوه بر دستیابی به سرعت، دقت بیشتر و صرفه جویی در هزینه ها، تأثیر پارامترهای مختلفی را مورد بررسی قرار داد که بررسی آنها با انجام آزمایشات تجربی علاوه بر هزینه ی زیاد دستگاهها و ابزارهای دقیق، همواره در دسترس نمی باشند.

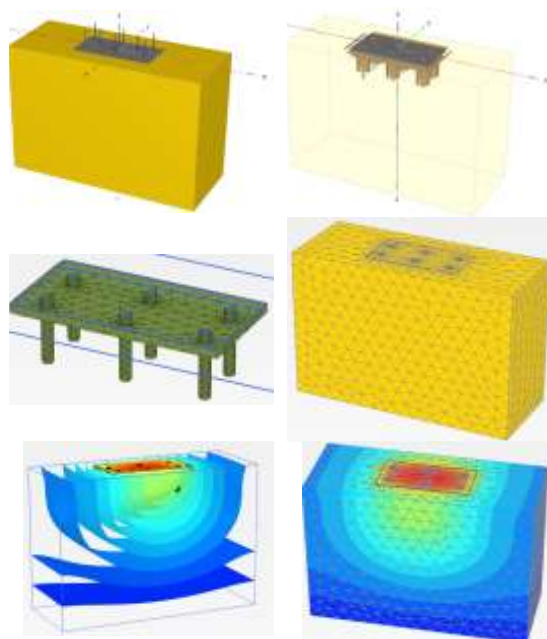
از بررسی متون مشخص گردید که تحقیقات محدودی در مورد رفتار فونداسیون رافت شمعی با در نظر گرفتن تأثیر سختی رافت- خاک انجام شده است و مطالعات عددی بسیار محدودی در این زمینه با استفاده از نرم افزارهای المان محدود سه بعدی صورت گرفته است. این مقاله نتایج تحلیل المان محدود سه بعدی با استفاده از نرم افزار Plaxis 3D [۲۳]، را برای درک بهتر رفتار فونداسیونهای رافت شمعی در خاکهای ماسه ای باتوجه به تأثیر پارامترهای مختلفی نظیر: سختی رافت-خاک، تعداد، فاصله و نحوه آرایش بندی شمعها ارائه می کند.

۲- اعتبارسنجی مدل‌های عددی

به منظور ارزیابی دقت و اعتبار نتایج تحلیل های عددی، از داده های تجربی یوسفی و همکاران [۲۲]، استفاده شده است. در مطالعه یوسفی و همکاران، رفتار پی گسترده غیر مسلح و مسلح به گروه شمع واقع بر خاک ماسه ای غیر اشباع مورد آزمایش بارگذاری یکنواخت قرار گرفت و تأثیر قطر، طول و تعداد شمع ها بر ظرفیت باربری و نشست بررسی گردید. در مجموع ۱۹ نمونه شامل: ۱ نمونه بدون شمع، ۶ نمونه دارای ۶ شمع، ۶ نمونه دارای ۹ شمع و ۶ نمونه دارای ۱۵ شمع بررسی شده است. در تمام نمونه ها از خاک ماسه ای با دانه بندی یکنواخت و تراکم ثابت، پی از صفحه فولادی با ابعاد $1/5 \times 20 \times 40$ سانتی متر و شمع ها از آرماتورهای ساده با قطر (d=10, 12mm) و طول های مختلف (H=10d, 15d, 20d) استفاده شده است.

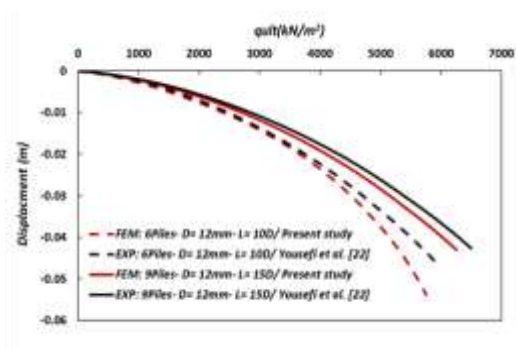
نمونه های آزمایشگاهی در یک جعبه فلزی به طول ۱۰۰ سانتیمتر، عرض ۴۰ سانتیمتر و ارتفاع ۷۵ سانتیمتر تحت بارگذاری یکنواخت قرار گرفتند (ابعاد مدل طوری انتخاب شدند که شرایط مرزی بر روی نتایج کمترین اثر ممکن را داشته باشد). جعبه فلزی از سه طرف بسته شده که توسط سخت کننده های قائم و افقی صلب شده و در جلو جعبه ورقه ی شفاف پلیمری از جنس پلی کربنات جهت رویت وضعیت توده خاک در جریان بارگذاری تعبیه شده و توسط درپوش فلزی مشبک صلب مهار گردیده است. باتوجه به صلیبت جعبه و روغن کاری محیط داخلی آن به هدف محدود کردن جابجایی خاک در امتداد قائم مرز مشترک خاک و جعبه، همچنین انتخاب ابعاد مدل که به منظور به حداقل رسانیدن تأثیر شرایط مرزی بر روی نتایج صورت گردیده، مسئله اندرکنش بین خاک و جعبه منتفی و اثر آن در مدل های عددی لحاظ نشده است. به منظور بارگذاری از یک سیستم هیدرولیکی استفاده گردیده که توسط سیستم کامپیوتری قابل کنترل است. یک ترانسفورماتور تفاضلی متغییر خطی (LVDT) با کورس ۱۰۰ میلیمتر و دقت ۰/۰۱ میلیمتر به فک جک بارگذاری متصل شده و جابجایی قائم نقطه میانی سطح پی نواری در طول آزمایش اندازه گیری شده است. بار اعمال شده بر پی نواری به تدریج با سرعت ۰/۴ کیلو نیوتن بر ثانیه افزایش یافته تا جایی که اولین شکستگی در منحنی بار- جابجایی ایجاد گردیده است. نتایج بار- جابجایی بصورت خودکار توسط نرم افزار نصب شده ی دستگاه روی کامپیوتر ذخیره گردید (شکل (۱)). در شکل (۲) یکی از دو نمونه شبیه سازی شده ی داده های تجربی یوسفی و همکاران [۲۲]، در نرم افزار المان محدود Plaxis 3D [۲۳]، نشان داده شده است. برای ایجاد مدل‌های عددی مشابه با نمونه های آزمایشگاهی از هندسه کامل مسئله، مدل کرنش صفحه ای، المانهای مثلثی شکل ۱۵ گرهی با مش بندی ریز پیوسته در اطراف پی و مش بندی بسیار ریز در اطراف شمع ها استفاده گردید (سایز مش ها طوری انتخاب شد که کمترین تأثیر را بر نتایج تحلیل مسئله داشته باشد). به منظور شبیه سازی رفتار خاک از مدل الاستو- پلاستیک و معیار گسیختگی موهر- کولمب و برای پی و شمع ها از مدل الاستیک خطی استفاده شده است. خصوصیات هندسی و مهندسی خاک در مدل های المان محدود مشابه نمونه های فیزیکی اعمال گردید.

نیروی بدست آمده در این مرحله ظرفیت باربری نهایی (q_{ult}) پی و گروه شمع خواهد بود.



شکل ۲- مراحل شبیه سازی عددی یک نمونه از داده های تجربی یوسفی و همکاران [۲۲]، در نرم افزار المان محدود Plaxis 3D [۲۳]

در شکل (۳) نتایج حاصل از مدلسازی عددی با داده های تجربی یوسفی و همکاران [۲۲]، بصورت منحنی بار- جابجایی با هم مقایسه گردید. این منحنی تقریب و همگرایی نسبتاً خوبی بین نتایج شبیه سازی عددی با نتایج تجربی یوسفی و همکاران [۲۲]، نشان می دهد. و بیانگر این مطلب است که مدل های اجزای محدود دارای دقت مناسبی در پیش بینی رفتار واقعی نمونه های آزمایشگاهی هستند و می توان به نتایج حاصل از شبیه سازی عددی اعتماد نمود.



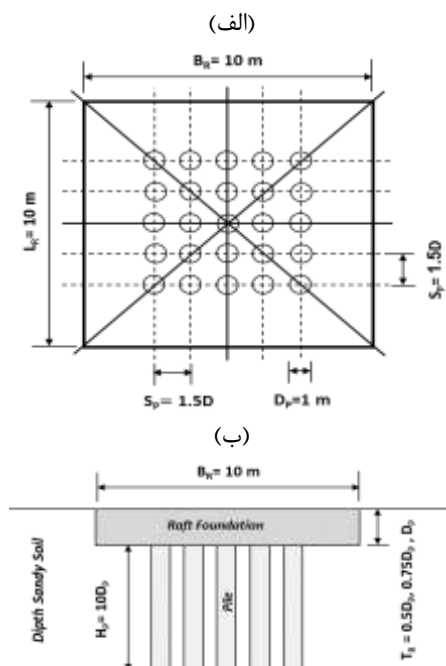
شکل ۳- مقایسه نمودار تغییرات ظرفیت باربری (q_{ult}) بر حسب جابجایی قائم (Δ) دو نمونه تجربی یوسفی و همکاران [۲۲]، با مدل های عددی المان محدود متناظر



شکل ۱- مدل واقعی سیستم بارگذاری و دو نمونه از داده های تجربی یوسفی و همکاران [۲۲]

با توجه به اینکه مسئله در حالت شرایط مرطوب تعریف گردیده است، بنابراین سطح آب زیرزمینی در پایین ترین سطح زیر پی و شمع ها قرار گرفته تا هیچ فشاری در اثر آب زیرزمینی بوجود نیاید. برای ایجاد شرایط مرزی مشابه نمونه های آزمایشگاهی، اطراف مدل در برابر حرکت افقی و پایین مدل در مقابل حرکت در هر دو جهت افقی و قائم محدود شده و اثر اندرکنش بین خاک و جعبه صرفنظر گردیده است. اثر اندرکنش خاک و سازه برای پی رادیه و جدار و کف شمع ها بصورت ضریب 0.67 در بسته نرم افزاری در نظر گرفته شده است. تحلیل غیر خطی و به روش کنترل- نیرو صورت گرفته است، به این صورت که افزایش نیروی قائم بصورت یکنواخت رو به پایین اعمال شده تا جایی که منحنی بار- جابجایی مسطح یا شکسته شود.

شامل رافت مسلح به چهار شمع و رافت مسلح به هشت شمع با آرایش بندی و فواصل مختلف).



شکل ۴ - سیستم فونداسیون رافت شمعی (الف) پلان افقی (ب) نمای جانبی

۳- مشخصات مدل های مطالعاتی

۳-۱- ابعاد و مشخصات هندسی مدل ها

در شکل (۴) یک سیستم فونداسیون رافت شمعی واقع بر یک لایه خاک ماسه ای با عمق نامحدود نشان داده شده است. این سیستم شامل یک دال بتن آرمه با ابعاد 10×10 متر با ضخامت های مختلف ($T_R = 0.5, 0.75, 1m$) و یک گروه شمع بتن آرمه با طول ۱۰ متر و قطر ۱ متر می باشد. در این تحقیق به منظور انجام یک مطالعه پارامتریک، یک سری مدل های عددی با در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای مختلف نظیر: آرایش بندی شمع ها (مربع و مثلثی)، فاصله شمع ها ($S_p = 1.5, 3, 6D_p$)، تعداد شمع ها (۱، ۴ و ۸ تایی) و نسبت های مختلفی از سختی رافت- خاک ($K_{rs} = 0.4, 3, 10$) بر ظرفیت باربری و نشست تحلیل گردید. مطابق جدول ۱ و شکل (۵)، مدل المان محدود در برنامه نرم افزاری Plaxis 3D [۲۳]، شبیه سازی گردید که در ۴ تیپ طبقه بندی شده اند (مدل های تیپ O و A به ترتیب شامل رافت بدون شمع و رافت مسلح به تک شمع با سه ضخامت مختلف و مدل های تیپ B و C به ترتیب

جدول ۱- ابعاد و مشخصات هندسی مدلها

Models		Model raft dimensions (m x m x m)	H _p /D _p	S _p /D _p	Arrangement	^a K _{rs}	K _{rs} Flexibility of raft
Unpiled raft	O ₁	10 x 10 x 0.5	-	-	-	0.40	Flexible
	O ₂	10 x 10 x 0.75	-	-	-	3	Stiff
	O ₃	10 x 10 x 1	-	-	-	10	Very stiff
Raft + 1 pile	A ₁	10 x 10 x 0.5	10	-	-	0.40	Flexible
	A ₂	10 x 10 x 0.75	10	-	-	3	Stiff
	A ₃	10 x 10 x 1	10	-	-	10	Very stiff
Raft + 4 pile	B _{1-3S}	10 x 10 x 0.5	10	3	Square	0.40	Flexible
	B _{2-3S}	10 x 10 x 0.75	10	3	Square	3	Stiff
	B _{3-3S}	10 x 10 x 1	10	3	Square	10	Very stiff
	B _{1-6S}	10 x 10 x 0.5	10	6	Square	0.40	Flexible
	B _{2-6S}	10 x 10 x 0.75	10	6	Square	3	Stiff
	B _{3-6S}	10 x 10 x 1	10	6	Square	10	Very stiff
	B _{1-3T}	10 x 10 x 0.5	10	1.5	Triangle	0.40	Flexible
	B _{2-3T}	10 x 10 x 0.75	10	1.5	Triangle	3	Stiff
	B _{3-3T}	10 x 10 x 1	10	1.5	Triangle	10	Very stiff
	B _{1-6T}	10 x 10 x 0.5	10	3	Triangle	0.40	Flexible
	B _{2-6T}	10 x 10 x 0.75	10	3	Triangle	3	Stiff
	B _{3-6T}	10 x 10 x 1	10	3	Triangle	10	Very stiff
Raft + 8 pile	C _{1-3S}	10 x 10 x 0.5	10	1.5	Square	0.40	Flexible
	C _{2-3S}	10 x 10 x 0.75	10	1.5	Square	3	Stiff
	C _{3-3S}	10 x 10 x 1	10	1.5	Square	10	Very stiff
	C _{1-6S}	10 x 10 x 0.5	10	3	Square	0.40	Flexible
	C _{2-6S}	10 x 10 x 0.75	10	3	Square	3	Stiff
	C _{3-6S}	10 x 10 x 1	10	3	Square	10	Very stiff
	C _{1-3T}	10 x 10 x 0.5	10	1.5	Triangle	0.40	Flexible
	C _{2-3T}	10 x 10 x 0.75	10	1.5	Triangle	3	Stiff
	C _{3-3T}	10 x 10 x 1	10	1.5	Triangle	10	Very stiff

^aRaft-Soil Stiffness Ratio

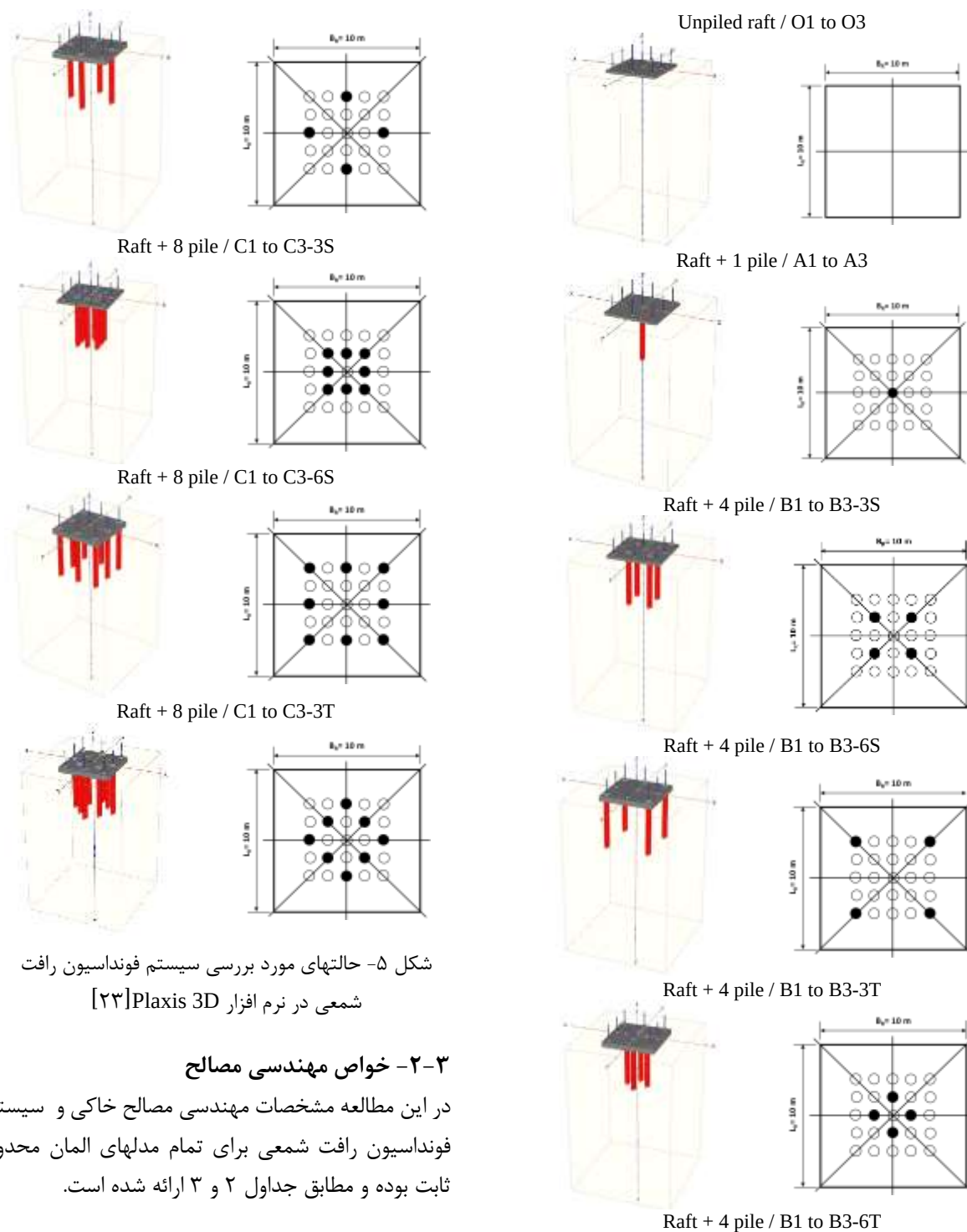
Hain and Lee [24] proposed the following equation to estimate the relative flexibility of rafts.

^aRaft-Soil Stiffness Ratio

Hain and Lee [24] proposed the following equation to estimate the relative flexibility of rafts.

$$K_{rs} = \frac{4E_r(1 - \nu_s)Bt_r^3}{3\pi E_r L^4} \quad (1)$$

Where L and B are the length and width of raft, respectively; t_r is the raft thickness. E_r and E_s are the raft's Young's modulus and soil Young modulus, respectively and ν_s is the Poisson's ratio of soil. The Poisson's ratio of tested sand was taken as 0.3 as recommended. The value of K_{rs} ranging from 0.01 to 10 covers very flexible to very stiff raft [25].



شکل ۵- حالت‌های مورد بررسی سیستم فونداسیون رافت
شمعی در نرم افزار Plaxis 3D [۲۳]

۳-۲- خواص مهندسی مصالح

در این مطالعه مشخصات مهندسی مصالح خاکی و سیستم فونداسیون رافت شمعی برای تمام مدل‌های المان محدود ثابت بوده و مطابق جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.

۴- برنامه مدل سازی عددی

در این تحقیق به منظور انجام یک مطالعه پارامتریک، از تحلیل غیر خطی به روش اجزای محدود سه بعدی و از نرم افزار Plaxis 3D [۲۳]، استفاده گردیده است. این نرم افزار یک برنامه المان محدود برای تحلیل سه بعدی تغییر شکل و پایداری در مهندسی ژئوتکنیک می باشد. جزئیات و روند کامل شبیه سازی مدل های عددی مطالعاتی مطابق بخش ۲ اعتبار سنجی مدل های عددی می باشد.

جدول ۲- مشخصات پارامترهای الاستو- پلاستیک خاک ماسه ای [۲۲]

Parameter	Name	Value	Unit
		SP	
Material Mode	Mode	Mohr-Coulomb	-
Type of material behavior	Type	Drained	-
Unit weight	γ	18	kN/m ³
Young's modulus	E	35000	kN/m ²
Poisson's ratio	ν	0.25	-
cohesion	c	1	kN/m ²
Friction angle	ϕ	38	°
Dilatancy angle	ψ	8	°

جدول ۳- مشخصات پارامترهای الاستیک سیستم فونداسیون رافت شمعی

Parameter	Name	Value	Unit
Material mode	Mode	Elastic	-
Type of material behavior	Type	Drained	-
compressive strength of concrete	f'_c	35	MPa
Young's modulus	E	23500	MPa
Poisson's ratio	ν	0.15	-
Unit weight	γ	25	kN/m ³

۵- بحث و تفسیر نتایج تحلیل های عددی

در این تحقیق ۲۷ مدل عددی با استفاده از نرم افزار المان محدود Plaxis 3D [۲۳]، شبیه سازی و آنالیز گردید. تأثیر پارامترهای مختلف نظیر: سختی رافت- خاک، تعداد

فاصله و آرایش بندی شمع ها بر رفتار کلی بار- نشست، سهم تقسیم بار بین رافت و گروه شمع، بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست در نظر گرفته شد. نتایج این تحقیق بصورت منحنی بار- نشست در شکل (۶) ارائه شده است. تفسیر نتایج در ادامه ارائه شده است.

۵-۱- تأثیر نسبت سختی رافت- خاک

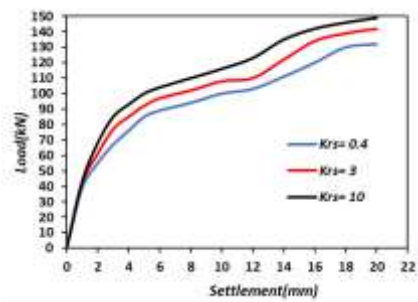
۵-۱-۱- رفتار بار- نشست

با توجه به اینکه رفتار بار- نشست به خواص مهندسی مصالح وابسته است و از آنجائیکه خواص مهندسی مصالح (رافت، شمع و خاک) در تمام مدل های عددی ثابت بوده، بنابراین مکانیسم کلی منحنی بار- نشست تغییر چندانی نداشته و سختی رافت- خاک نیز کمترین تأثیر را بر آن داشته است (شکل (۶)).

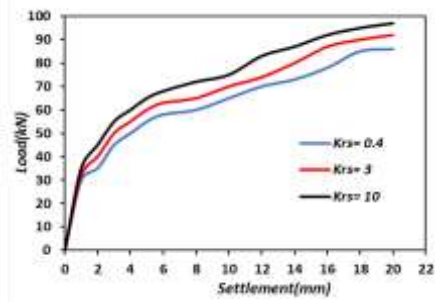
۵-۱-۲- نسبت بهبود ظرفیت باربری

نسبت بهبود ظرفیت باربری (رابطه ۲) یک پارامتر بدون بعدی است که مکانیسم تقسیم بار بین رافت و شمع ها را توضیح می دهد و به عنوان نسبت بار حمل شده توسط رافت شمع بندی شده و رافت بدون شمع در نشست معینی تعریف شده است. در رابطه ۲، q_r و q_{pr} به ترتیب نشان دهنده ظرفیت باربری رافت بدون شمع و رافت با شمع برای یک نشست معین است. شکل (۷) تغییرات نسبت بهبود ظرفیت باربری با افزایش سختی رافت- خاک برای رافت غیر مسلح و مسلح به شمع های ۱، ۴ و ۸ تایی در نشست ۲۰ میلی متر را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که برای رافت بدون شمع ظرفیت باربری با افزایش سختی رافت- خاک بطور متوسط ۱۴٪ بهبود یافته و برای رافت مسلح به تک شمع و گروه شمع ۴ و ۸ تایی بهبود ظرفیت باربری به ترتیب در حدود ۱۶٪، ۱۸٪ و ۲۹٪ بوده است. باتوجه به اینکه افزایش تعداد شمع خود به تنهایی باعث افزایش سختی رافت- خاک خواهد شد، بنابراین در رافت مسلح به گروه شمع، افزایش سختی رافت- خاک نقش زیاد موثری بر بهبود ظرفیت باربری ندارد.

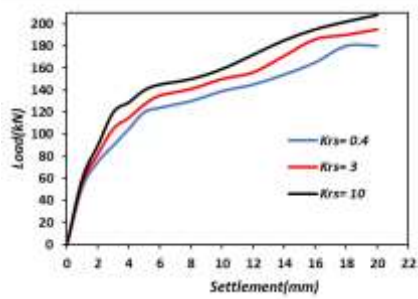
$$\text{Load Capacity Improvement Ratio} = \frac{|q_r - q_{pr}|}{q_r} \quad (2)$$



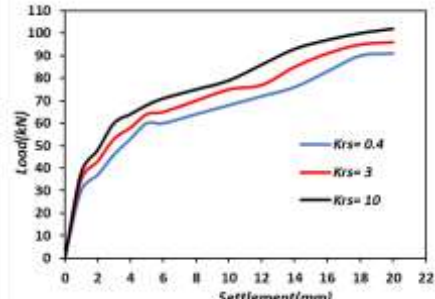
(الف)



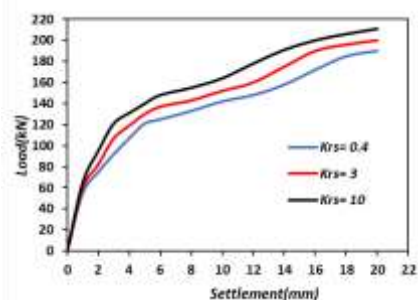
(ب)



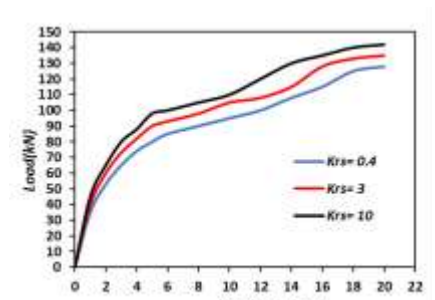
(ج)



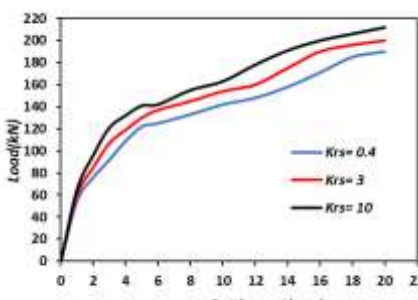
(د)



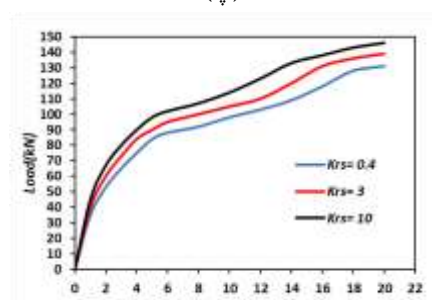
(ه)



(و)

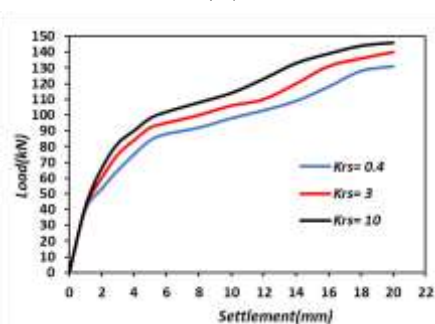


(ز)



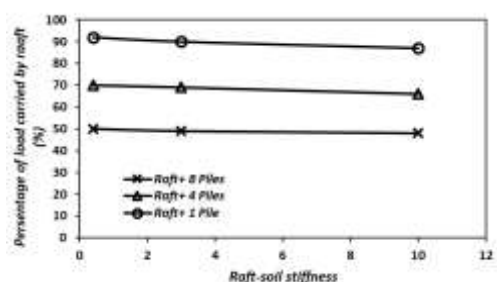
(ح)

شکل ۶ - نمودار بار - جابجایی (الف) مدل های عددی O1
 الی O3 (ب) A1 الی A3 (پ) B1-3S الی B3-3S (ت)
 B1-6S الی B3-6S (ج) B1-3T الی B3-3T (ح)
 6T الی B3-6T (خ) C1-3S الی C3-3S (چ)
 C1-6S الی C3-6S (د) C1-3T الی C3-3T



(ط)

افزایش سختی رافت-خاک، سهم بار حمل شده توسط رافت اندکی و به میزان ۰.۵٪ کاهش یافته است. به طور کلی رافت صلب هیچ مزیت قابل توجهی در تقسیم بار ندارد. زیرا در شروع بارگذاری، شمع ها بخش عمده ای از بار را حمل می کنند و چون رافت انعطاف پذیر بیشتر از رافت صلب تمایل به تغییر شکل دارد، بنابراین با افزایش تدریجی نشست و تغییر شکل فزاینده رافت انعطاف پذیر، تماس بین رافت و خاک زیر آن بیشتر شده و بار بیشتری به رافت منتقل می گردد.



شکل ۹- تأثیر سختی رافت-خاک بر سهم بار بین رافت و شمع

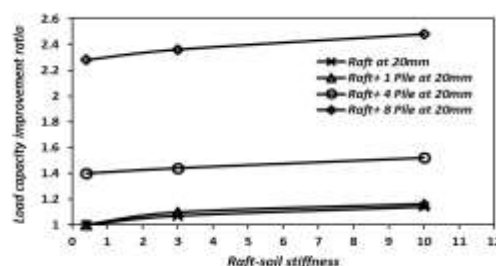
۵-۲-۲- تأثیر تعداد شمع ها

۵-۲-۱- رفتار بار- نشست

شکل (۱۰) رفتار بار- نشست رافت بدون شمع و رافتی که توسط ۱، ۴ و ۸ شمع با یک سختی مشخصی پشتیبانی می شود نشان می دهد. مشاهده می گردد که سه مرحله در رفتار رافت مسلح به شمع وجود دارد. در مرحله اول، رابطه بار- نشست خطی است، زیرا هم شمع ها و هم رافت ها هنوز الاستیک هستند. در مرحله دوم، رابطه بار- نشست غیرخطی است، زیرا ظرفیت شمع به طور کامل متحرک است، اما رافت هنوز الاستیک است. در مرحله سوم رابطه بار- نشست خطی است، زیرا رافت تا حد اکثر بار اعمال شده به حالت ارتجاعی خود ادامه می دهد. همانطور که پیشتر (بخش ۵-۱-۱) توضیح داده شد، رفتار بار- نشست به خواص مهندسی مصالح وابسته است. بنابراین تعداد شمع ها کمترین تأثیر را بر مکانیسم کلی منحنی بار- نشست داشته است.

۵-۲-۲- نسبت بهبود ظرفیت باربری

شکل (۱۱) تغییر نسبت بهبود ظرفیت باربری با تعداد شمع ها در نشست ۲۰ میلی متر برای سختی های مختلف رافت- خاک را نشان می دهد. مشاهده می گردد که با افزایش تعداد شمع ها از ۱ به ۴ و از ۴ به ۸ تایی، نسبت بهبود ظرفیت



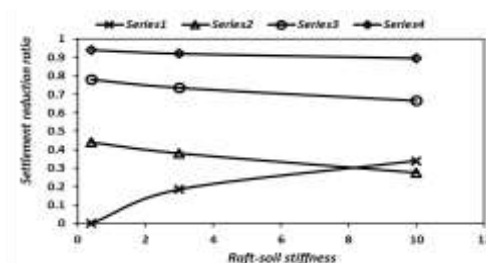
شکل ۷- تغییر نسبت بهبود ظرفیت باربری با افزایش سختی رافت-خاک برای رافت غیر مسلح و مسلح به شمع های ۱، ۴ و ۸ تایی در نشست ۲۰ میلی متر

۵-۱-۳- نسبت کاهش نشست

نسبت کاهش نشست (رابطه ۳) یک پارامتر بدون بعدی است که به عنوان نسبت نشست رافت شمع بندی شده و رافت بدون شمع در یک بار معین تعریف می شود. در رابطه ۳، δ_{pr} نشان دهنده نشست رافت بدون شمع و رافت با شمع برای یک بار معین است. شکل (۸) تغییر نسبت کاهش نشست با سختی رافت-خاک را برای رافت غیر مسلح و مسلح به شمع های ۱، ۴ و ۸ تایی نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که با افزایش سختی رافت-خاک، نسبت کاهش نشست برای رافت بدون شمع بطور متوسط ۳۴٪ و رافت مسلح به شمع های ۱، ۴ و ۸ تایی به ترتیب ۳۸٪، ۱۵٪ و ۵٪ بوده است. این مطلب بیانگر اینست که اضافه شدن بیشتر شمع ها باعث تداخل تنش در محیط اطراف شمع ها شده، بنابراین افزایش سختی رافت-خاک تأثیر چندانی بر کاهش نشست در رافت مسلح به گروه شمع ندارد.

Settlement Improvement Ratio

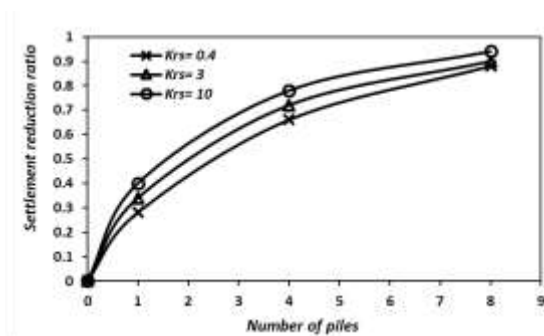
$$= \left| \frac{\delta_r - \delta_{pr}}{\delta_r} \right| \quad (3)$$



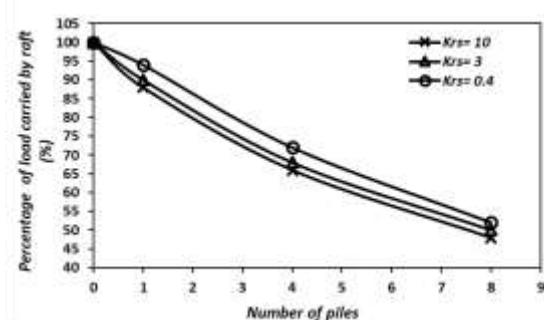
شکل ۸- تغییر نسبت کاهش نشست با سختی رافت-خاک برای رافت غیر مسلح و مسلح به شمع های ۱، ۴ و ۸ تایی

۵-۱-۴- سهم تقسیم بار بین رافت و شمع

شکل (۹) سهم بار حمل شده توسط رافت را با افزایش سختی رافت-خاک نشان می دهد. مشاهده می گردد که با



شکل ۱۲- تغییر نسبت کاهش نشست با افزایش تعداد شمع ها برای سختی های مختلف رافت-خاک



شکل ۱۳- تأثیر تعداد شمع ها بر سهم بار بین رافت و شمع برای سختی های مختلف رافت-خاک

۳-۵- تأثیر نحوه آرایش بندی و فاصله شمع ها

مطابق شکل (۶)، نتایج این بررسی نشان می دهد آرایش بندی از مربع به مثلث و افزایش فاصله ($S^P/D_P = 1.5 \sim 6$) در گروه شمع های ۴ و ۸ تایی، تأثیر زیاد محسوسی بر رفتار بار- نشست، سهم تقسیم بار بین رافت و شمع، بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست ها نداشته است. این تأثیرات اندکی و در حدود ۴٪ بوده است.

۶- نتیجه گیری

این تحقیق یک مطالعه عددی از طریق تحلیل های المان محدود سه بعدی بر روی سیستم فونداسیون رافت بدون شمع و مسلح به گروه شمع واقع بر خاک ماسه ای تحت بارگذاری استاتیکی را ارائه می کند. تأثیر پارامترهای مختلفی نظیر: سختی رافت-خاک، تعداد، نحوه آرایش بندی و فاصله شمع ها بر رفتار کلی بار- نشست، نحوه تقسیم بار بین شمع و رافت، بهبود ظرفیت باربری و نسبت کاهش نشست بصورت پارامتریک مطالعه گردید. نتایج اصلی این تحقیق در زیر ارائه شده است:

- افزایش سختی رافت-خاک و تعداد شمع ها کمترین تأثیر را بر مکانیسم کلی منحنی بار- نشست داشته است.

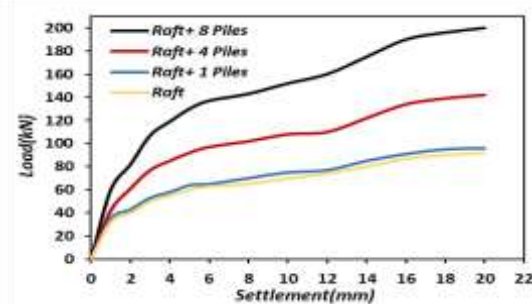
باربری افزایشی به ترتیب در حدود ۳۵٪ و ۳۶٪ داشته است. دلیل امر این است که افزایش تعداد شمع های زیر رافت، سطح بارگیری و سختی را افزایش داده و به دنبال آن بازده ظرفیت باربری افزایش می یابد.

۵-۲-۳- نسبت کاهش نشست

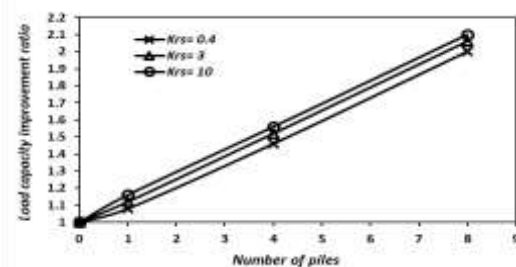
شکل (۱۲) تغییر نسبت کاهش نشست با افزایش تعداد شمع ها را برای سختی های مختلف رافت-خاک نشان می دهد. ملاحظه می گردد که با افزایش تعداد شمع های زیر رافت از ۱ به ۴ و از ۴ به ۸ تایی، نسبت کاهش نشست بطور متوسط به ترتیب ۳۸٪ و ۱۹٪ بوده است. علت این است که افزایش تعداد شمع های زیر رافت، باعث تداخل تنش در محیط اطراف شمع ها شده و بنابراین نرخ کاهش نشست بطور فزاینده کاسته شده، تا اینکه به مقدار ثابتی می رسد.

۵-۲-۴- سهم بار بین رافت و شمع

شکل (۱۳) نسبت بار تحمل شده توسط رافت را با افزایش تعداد شمع های زیر رافت برای سختی های مختلف رافت-خاک نشان می دهد. مشاهده می گردد که با افزایش تعداد شمع ها در زیر رافت از ۱ به ۸ تایی، بار حمل شده توسط رافت بطور متوسط ۴۱٪ کاهش یافته است. زیرا که با افزایش تعداد شمع ها، مقاومت اضافی ایجاد شده توسط شمع ها با افزایش اصطکاک پوسته شمع ایجاد می شود.



شکل ۱۰- تأثیر تعداد شمع ها بر رفتار بار-نشست برای یک نسبت معین از سختی رافت-خاک



شکل ۱۱- تغییر نسبت بهبود ظرفیت باربری با افزایش تعداد شمع ها در نشست ۲۰ میلی متر برای سختی های مختلف رافت-خاک

مدل های اجزای محدود در پیش بینی رفتار واقعی نمونه های آزمایشگاهی هستند و می توان به نتایج حاصل از شبیه سازی عددی اعتماد نمود.

- این مطالعه مرجع مفیدی برای طراحی PRF برای سازه ها در شرایط خاکی مشابه است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام میکنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد میشوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده اند.

مشارکت های نویسندگان

مسعود یوسفی: مفهوم سازی، روش شناسی، اعتبارسنجی، نگارش- پیش نویس اصلی، منابع
لقمان رحیمی: روش شناسی، اعتبارسنجی، نرم افزار، پیاده سازی، نگارش- بررسی و ویرایش، راهنمایی
هادی عزیزیان: روش شناسی، اعتبارسنجی، نگارش- بررسی و ویرایش

منابع مالی

این پژوهش هیچگونه حمایت مالی از سوی سازمانها یا نهادهای دولتی، خصوصی یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

- افزایش سختی رافت- خاک، ظرفیت باربری رافت غیر مسلح را بطور متوسط ۱۴٪ و رافت مسلح به تک شمع و گروه شمع ۴ و ۸ تایی را به ترتیب حدود ۱۶٪، ۱۸٪ و ۲۹٪ بهبود بخشیده است. این در حالیست که افزایش تعداد شمع ها ظرفیت باربری را در حدود ۷۱٪ بهبود بخشیده است.
- افزایش سختی رافت- خاک در رافت بدون شمع باعث بهبود کاهش نشست در حدود ۳۴٪ و در رافت مسلح به گروه شمع های ۱، ۴ و ۸ تایی باعث بهبود کاهش نشست به ترتیب در حدود ۳۸٪، ۱۵٪ و ۵٪ شده است. این در حالیست که با افزایش تعداد شمع های زیر رافت از ۱ به ۸ تایی، نسبت کاهش نشست در حدود ۵۵٪ بهبود یافته است.
- سهم بار حمل شده توسط رافت با افزایش سختی رافت- خاک، اندکی و به میزان ۵٪ و با افزایش تعداد شمع ها در حدود ۴۱٪ کاهش یافته است.
- آرایش بندی و افزایش فاصله در گروه شمع های ۴ و ۸ تایی، تأثیر اندکی در حدود ۴٪ بر رفتار کلی بار- نشست، سهم تقسیم بار بین رافت و شمع، بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست ها داشته است.
- تقریب و همگرایی نسبتا خوب بین نتایج شبیه سازی عددی با نتایج تجربی، بیانگر دقت مناسب

مراجع

- [1] Cooke, R. W. "Piled raft foundations on stiff clays—a contribution to design philosophy." *Geotechnique* 36, no. 2 (1986): 169-203.
- [2] Horikoshi, Kenichi, and Mark F. Randolph. "Centrifuge modelling of piled raft foundations on clay." *Geotechnique* 46, no. 4 (1996): 741-752.
- [3] Horikoshi, Kenichi, and Mark F. Randolph. "Estimation of overall settlement of piled rafts." *Soils and Foundations* 39, no. 2 (1999): 59-68.
- [4] Horikoshi, Kenichi, Tatsunori Matsumoto, Yoshinori Hashizume, Toru Watanabe, and Hideki Fukuyama. "Performance of piled raft foundations subjected to static horizontal loads." *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics* 3, no. 2 (2003): 37-50.
- [5] Conte, G., Alessandro Mandolini, and Mark Randolph. "Centrifuge modelling to investigate the performance of piled rafts." In *Centrifuge modelling to investigate the performance of piled rafts*, pp. 359-366. Millpress, 2003.
- [6] Lee, Su-Hyung, and Choong-Ki Chung. "An experimental study of the interaction of vertically loaded pile groups in sand." *Canadian Geotechnical Journal* 42, no. 5 (2005): 1485-1493.
- [7] Bajad, S. P., and R. B. Sahu. "An experimental study on the behavior of vertically loaded piled raft on soft clay." In: *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. (IACMAG)* (2008): 84-90.

- [8] Fioravante, Vincenzo, Daniela Giretti, and Michele Jamiolkowski. "Physical modelling of raft on settlement reducing piles." In: *From Research to Practice in Geotechnical Engineering*. Reston (2008): 206–239.
- [9] Ko, Junyoung, Jaeyeon Cho, and Sangseom Jeong. "Nonlinear 3D interactive analysis of superstructure and piled raft foundation." *Engineering structures* 143 (2017): 204-218.
- [10] Sinha, Anup, and A. M. Hanna. "3D numerical model for piled raft foundation." *International Journal of Geomechanics* 17, no. 2 (2017): 04016055.
- [11] Moayedi, H., R. Nazir, S. Ghareh, A. Sobhanmanesh, and Yean-Chin Tan. "Performance analysis of a piled raft foundation system of varying pile lengths in controlling angular distortion." *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 55, no. 4 (2018): 265-269.
- [12] Bernardes, Heitor Cardoso, Humberto Laranjeira de Souza Filho, Arthur Duarte Dias, and Renato Pinto da Cunha. "Numerical analysis of piled raft foundations designed for settlement control on steel grain silos in collapsible soils." *International Journal of Civil Engineering* 19, no. 5 (2021): 607-622.
- [13] Yirsaw, Getasew Mare, and Argaw Asha Ashango. "Numerical Study on Optimization of Piled Raft Foundation on Stratified Soil under Static Load." *Advances in Civil Engineering* 2023, no. 1 (2023): 4732353.
- [14] Sheil, Brian. "Numerical simulations of the reuse of piled raft foundations in clay." *Acta Geotechnica* 12, no. 5 (2017): 1047-1059.
- [15] Mangnejo, Dildar Ali, Imtiaz Ali Halepoto, Mukhtiar Ali Soomro, Naeem Mangi, and Israr Ahmed Dahri. "A Parametric Study of Effect On Single Pile Integrity Due to An Adjacent Excavation Induced Stress Release in Soft Clay." *Engineering, Technology & Applied Science Research* 8, no. 4 (2018).
- [16] Fattah, Mohammed Y., Moataz A. Al-Obaydi, and Fouad A. Al-Jalabi. "Effect of number of piles on load sharing in piled raft foundation system in saturated gypseous soil." *Int. J. Civ. Eng. Technol* 9 (2018): 932-944.
- [17] Alhassani, Athraa Mohammed Jawad, and Ala Nasir Aljorany. "Parametric study on unconnected piled raft foundation using numerical modelling." *Journal of Engineering* 26, no. 5 (2020): 156-171.
- [18] Gu, Linlin, Zhen Wang, Qiang Huang, Guanlin Ye, and Feng Zhang. "Numerical investigation into ground treatment to mitigate the permanent train-induced deformation of pile-raft-soft soil system." *Transportation geotechnics* 24 (2020): 100368.
- [19] Hadi, D. H., M. Q. Waheed, and M. Y. Fattah. "Effect of pile's number on the behavior of piled raft foundation." *Engineering and Technology Journal* 39, no. 7 (2021): 1080-1091.
- [20] Deb, Plaban, and Sujit Kumar Pal. "Structural and geotechnical aspects of piled raft foundation through numerical analysis." *Marine Georesources & Geotechnology* 40, no. 7 (2022): 823-846.
- [21] Deb, Plaban, Barnali Debnath, Rai Bahadur Reang, and Sujit Kumar Pal. "Structural analysis of piled raft foundation in soft soil: An experimental simulation and parametric study with numerical method." *Ocean Engineering* 261 (2022): 112139.
- [22] Haydari, Naser, Loghman Rahimi, and Saber Piroti. "An Experimental study of the simultaneous effect of pile geometric parameters and their distances on the bearing capacity of sandy soils (in unsaturated conditions - Impact method)." Master's Thesis, Islamic Azad University, Mahabad, Iran 2024. (in Persian)
- [23] Plaxis 3D. "Plaxis finite element code for soil and rock analyses." Netherlands, Version (2023), 2, 1, 10, 79.
- [24] Fellenius, Bengt H. "Unified design of piled foundations with emphasis on settlement analysis." In *Current practices and future trends in deep foundations*, pp. 253-275. 2004.
- [25] Hain, S. J., and Ian Kenneth Lee. "The analysis of flexible raft-pile systems." *Geotechnique* 28, no. 1 (1978): 65-83.