



Ferdowsi
University of
Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of
Iran

Numerical Study of the Effect of the Type of Connection between the Pile and the Foundation on the Bearing Capacity and the Settlement Created in the Pile raft Foundations

Research Article

Mahdi Yazdi Nasab¹, Mahmoud Yazdani² 

DOI: [10.22067/jfcej.2025.90657.1328](https://doi.org/10.22067/jfcej.2025.90657.1328)

1- Introduction

Pile Raft Foundations are considered one of the effective systems for transferring the loads of heavy and high-rise structures onto soft and compressible soils. In this system, both the piles and the foundation simultaneously participate in load transfer, which increases load-bearing capacity and controls both Total and differential settlements. Despite extensive research on Pile Raft Foundations, the effect of the type of connection between the foundation and the piles (including fixed, hinged, and non- Connected) has received less attention. In a fixed connection, a complete moment transfer occurs between the pile head and the foundation, while in a hinged connection, the bending moment at the connection between the pile head and the foundation is zero. In the non- connected state, a layer of soil is placed between the foundation and the pile, and load transfer occurs indirectly through the soil.

2- Methodology and Numerical Modeling

In this study, a three-dimensional numerical analysis was conducted using PLAXIS 2020 software to investigate the effect of the type of connection between the piles and the foundation on the mechanical behavior of pile raft foundations under vertical and lateral static loading. To validate the software, the numerical model was compared with experimental and analytical results from the studies of Park and Lee (2015) and Halder (2020). In the validated model, the pile arrangement was 4×4, with a pile diameter $D=0.6$ m and pile length $L=15$ m. A square raft foundation with width $B=9$ m and thickness 1.2 m was considered. The comparison of the load-displacement curves for the two cases, the raft foundation alone and the pile raft foundation, showed a good agreement.

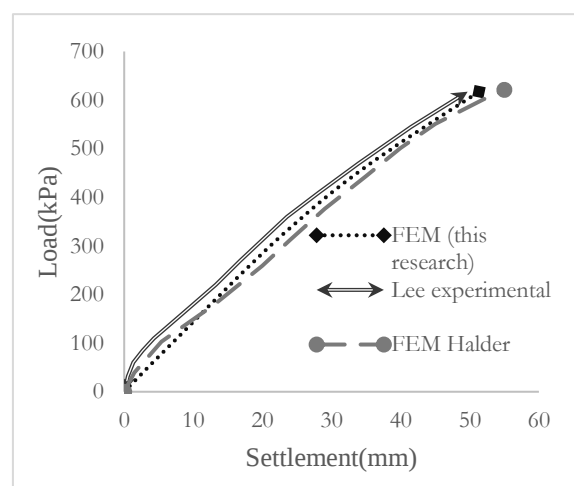


Fig. 1. Software validation diagram in pile raft foundation mode

The numerical model used in this study consists of a square foundation with dimensions 12 m and a thickness of 1.5 meters, supported by 9 piles arranged in a 3×3 pattern. The diameter of each pile is 0.5 meters, and the pile length is 20 m. The underlying soil is modeled as homogeneous sand using the Mohr-Coulomb failure criterion, and the foundation and pile components are modeled elastically. Three different connection types between the foundation and the piles were considered: fixed, hinged, and non-connected state (with a 1-meter thick soil layer between the foundation and pile head).

3- Results and Discussion

The results of the analysis indicated that the type of connection has a significant impact on the Total settlement, axial load distribution, and bending moments in both the foundation and piles.

* Manuscript received June 07, 2024, Revised June 10, 2025, Accepted November 29, 2025 .

¹ Master's Degree, Faculty of Civil Engineering and Environmental Studies, Tarbiat Modares University

² Corresponding Author, Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering and Environmental Studies, Tarbiat Modares University.

Email: myazdani@modares.ac.ir

Under vertical static loading, the fixed connection resulted in the least settlement but led to an increase in the bending moments in the piles and foundation. In the hinged connection, a greater settlement occurred in the foundation, but the bending moments were reduced compared to the fixed connection, displaying a more flexible behavior. In the non- connected state, due to the presence of a soil layer between the pile and the foundation, the bending moments were minimized, and the axial load distribution between the piles was more uniform, although the Total settlement slightly increased.

The bending moments along the pile were also examined. At the pile head, which is the connection point between the pile and the raft foundation, only the fixed connection produced a bending moment, whereas the hinged and non- connected state resulted in zero bending moments at this location. Among the three connection types, the bending moments along the pile were the smallest in the non- connected case compared to the other two connection types.

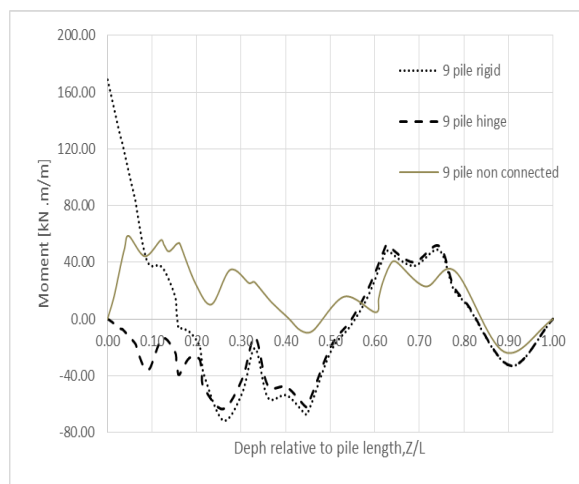


Fig. 2. Comparison of the bending moment created in the pile under the 100 kPa Static Vertical Load at different connection type

The shear force generated in the foundation under vertical static loading in the hinged and fixed connection cases is similar, although the shear force is slightly higher in the hinged connection compared to the fixed connection. The non- connected state exhibits the lowest shear force among the three connection types. Under lateral static loading, the bending moment and shear force developed in both the piles and the foundation are greatest in the fixed connection case and smallest in the non- connected state. The horizontal displacement of the foundation under lateral loading is smallest in the hinged connection case and greatest in the non- connected state.

4- Conclusions

Based on the numerical modeling results, the type of connection between the foundation and the piles plays a crucial role in controlling the deformations and internal forces in pile raft foundations. The fixed connection is the best choice for structures that need to with stand heavy vertical and lateral loads; however, it comes with higher costs and design complexity. The hinged connection is a

balanced system that is suitable for bearing vertical and lateral loads while offering greater flexibility. The non-connected state is a more cost effective option for reducing differential settlements and better controlling stresses in projects that do not require resistance to heavy lateral forces. Overall, the results indicate that the design details of the pile-foundation connection have a significant impact on the system's ultimate performance, and optimizing this aspect can increase efficiency while reducing material usage and costs.



مطالعه عددی تأثیر نوع اتصال بین شمع و پی در ظرفیت باربری و نشست ایجاد شده در پی‌های شناور شمعی*

مقاله پژوهشی



محمود یزدانی^(۲)

مهدی یزدی نسب^(۱)

DOI: 10.22067/jfpei.2025.90657.1328

چکیده مطالعات زیادی بر روی پی‌های شناور شمعی صورت گرفته است. با این حال تأثیر عامل نوع اتصال بین شمع‌ها و پی گسترده، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در حالت اتصال گیردار لنگر خمشی در محل اتصال بین شمع و پی وجود دارد اما در حالت اتصال مفصلی بر خلاف حالت اتصال گیردار، لنگر خمشی در محل اتصال بین شمع و پی صفر است. در حالت مفصل هم پی گسترده به صورت مستقیم با شمع اتصال ندارد و یک لایه خاک بین شمع و پی قرار می‌گیرد. در این پژوهش تأثیر نوع اتصال بین شمع و پی در عملکرد کل سیستم به خصوص نشست پی و همچنین توزیع لنگر خمشی در پی و شمع تحت بارگذاری استاتیکی قائم و جانبی مورد مطالعه قرار گرفت. مقدار لنگر خمشی ایجاد شده در شمع و پی تحت بارگذاری استاتیکی قائم و جانبی در حالت مفصل دارای کمترین مقدار و در حالت اتصال گیردار بیشترین مقدار است. دو حالت اتصال گیردار و مفصلی قبل از رسیدن شمع‌ها به حداکثر ظرفیت باربری خود (نقطه تسلیم) رفتار مشابهی دارند. پس از نقطه تسلیم شمع‌ها، در حالت اتصال مفصلی لنگر خمشی کمتری نسبت به حالت اتصال گیردار در پی ایجاد می‌شود، اما نشست ایجاد شده در پی در حالت اتصال مفصلی بیشتر از حالت اتصال گیردار خواهد بود.

واژه‌های کلیدی پی شناور شمعی، ظرفیت باربری، حالت مفصل بین شمع و پی، اتصال گیردار و مفصلی بین شمع و پی، نشست پی گسترده.

Numerical Study of the Effect of the Type of Connection between the Pile and the Foundation on the Bearing Capacity and the Settlement Created in the Pile Raft Foundations

Mahdi Yazdani

Mahmoud Yazdani

Abstract Many studies have been done on the pile raft foundations. However, the effect factor of the type of connection between the piles and the raft foundation has been less studied. The type of rigid connection is a state in there is a bending moment between the pile and the foundation. But in the case of a hinged connection, unlike a rigid connection, the bending moment at the connection between the pile and the foundation is zero. In the non-connected state, the raft foundation is not directly connected to the pile, and a layer of soil is placed between the pile and the foundation. In this research, the effect of the type of connection between the pile and the raft foundation on the performance of the entire system, especially the settlement of the raft foundation, as well as the distribution of the bending moment in the foundation and pile under vertical and lateral static loading was studied. The amount of bending moment created in the pile and foundation under vertical and lateral static loading is the lowest in the detached state and the highest in the rigid connection state. The two states of rigid and hinged connection before the piles reach their maximum bearing capacity (yield point) have a similar behavior. After the yield point of the piles, a lower bending moment is created in the hinged connection state than in the rigid connection state. But the settlement created in the hinged connection mode will be more than the rigid connection.

Key words Piled raft foundation, Bearing capacity, Non-connected between pile and foundation, Rigid and hinged connected between pile and foundation, Settlement of raft foundation.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۸/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۹/۸ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

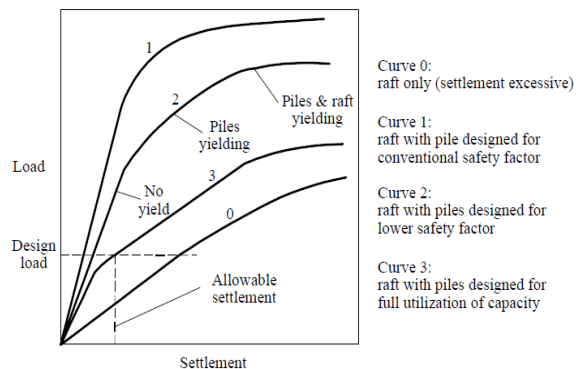
(۲) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

مقدمه

پی‌های شناور شمعی که نخستین بار در سال ۱۹۷۲ توسط پولوس و دیویس ارائه شد، یکی از سیستم‌های رایج در طراحی پی برای سازه‌های سنگین است که در آن بار سازه به صورت همزمان توسط پی گسترده و شمع‌ها به زمین منتقل می‌شود. مزیت اصلی این سیستم در مقایسه با پی‌های تنها یا گروه شمع، بهبود عملکرد نشست و افزایش ظرفیت باربری با استفاده بهینه از مصالح است. این روش به ویژه در خاک‌های ضعیف، کاربرد گسترده‌ای دارد.

به طور معمول شمع‌ها برای تحمل تمام بارهای خارجی طراحی می‌شوند. راندولف و کلانسی [1] در نظر گرفته‌اند که برای طراحی پی با شمع‌های کاهنده نشست، فرض بر این است که ۸۰ درصد ظرفیت شمع بسیج می‌شود. در این راستا ضریب اطمینان کمتری می‌تواند برای ظرفیت ژئوتکنیکی شمع‌ها اعمال شود و ظرفیت باربری پی به تنهایی کافی است. در پی گسترده تنها نیز به دلیل سختی پایین خاک، نشست‌های زیادی در سیستم پی ایجاد می‌شود [2-4].

اثرات توأم افزایش ظرفیت باربری و نیز کاهش نشست، توسط پولوس [5] در شکل (۱) نشان داده شده است. با توجه به فلسفه‌های مختلف طراحی، منحنی صفر نشان دهنده طراحی در حالت پی گسترده بدون شمع است. منحنی ۱ نشان دهنده طراحی با ضریب اطمینان بالا است. در منحنی ۲ طراحی با ضریب اطمینان کمتر نسبت به منحنی ۳ انجام شده است و از ظرفیت باربری شمع بیشتر استفاده گردیده و در نهایت، منحنی ۳ از حداکثر ظرفیت باربری شمع استفاده کرده است و کمترین ضریب اطمینان طراحی را دارد.



شکل ۱ منحنی بار - نشست پی‌های شناور شمعی بر اساس فلسفه‌های مختلف طراحی [6,7]

در مطالعه‌ای عددی توسط Singh و همکاران (۲۰۲۴) عملکرد فونداسیون‌های مرکب رادیه - شمع در خاک‌های چسبنده مورد ارزیابی قرار گرفت. با بهره‌گیری از مدل‌سازی اجزای محدود سه‌بعدی، اثر پارامترهایی مانند ضخامت پی، نسبت طول به قطر شمع (L/D)، نسبت فاصله بین شمع‌ها به قطر شمع (S/D) و سختی خاک بر توزیع بار و نشست ایجاد شده بررسی شد.

نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش سختی خاک و پارامترهای هندسی، ظرفیت باربری سیستم افزایش می‌یابد و در این حالت نسبت بار منتقل شده به شمع‌ها بین ۳۸ تا ۶۲ درصد متغیر است. همچنین مشخص شد که زمان فعال شدن اصطکاک جانبی شمع‌ها به شرایط نشست ایجاد شده وابسته است و در خاک‌های سفت، بار شمع‌ها سریع‌تر فعال می‌شود. این یافته‌ها اهمیت تحلیل دقیق اندرکنش بین شمع، پی و خاک را در طراحی فونداسیون‌های مرکب برجسته می‌سازد، به ویژه در شرایط خاک چسبنده که تأخیر در فعال‌سازی اصطکاک جانبی می‌تواند بر نشست نهایی تأثیرگذار باشد [8].

نادیده گرفتن اندرکنش شمع - پی و شمع - خاک منجر به برآورد بیش از حد سختی سیستم و برآورد کمتر نشست نهایی می‌شود. نسبت فاصله شمع‌ها به قطر آن‌ها (s/d) و نسبت سختی پی به شمع (K_r/K_p) نقش کلیدی در توزیع بار و نشست دارد. در مدل‌های واقعی، پی گسترده تا بیش از ۵۰٪ بار قائم را تحمل می‌کند، به شرطی که اندرکنش‌ها به درستی مدل‌سازی شوند [9].

ضریب اندرکنش پی - شمع (α_{cp})

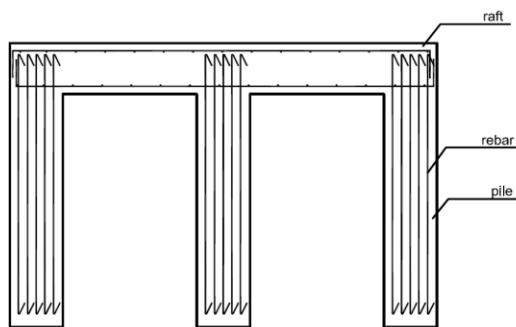
در تحلیل اندرکنش پی و شمع‌ها در فونداسیون مرکب شناور شمع، پولوس نشان داد که سهم باربری پی در پی شناور شمعی وابسته به ضریب اندرکنش پی - شمع و سختی‌های پی و شمع می‌باشد.

$$\alpha_{cp} = 1 - \frac{\ln(r_c/r_o)}{\zeta} \quad (1) \quad (\text{ضریب اندرکنش شمع - پی})$$

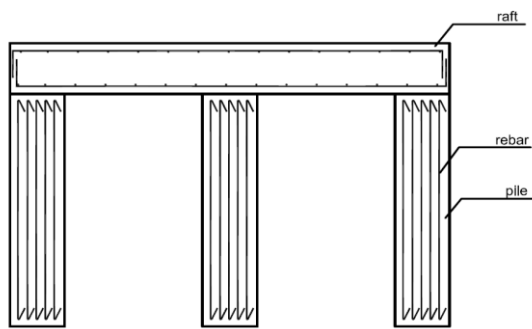
تابع لگاریتمی نسبت شعاع مؤثر به شعاع شمع $\zeta: \ln(r_m/r_o)$
 r_c : شعاع متوسط پی (برابر با مساحت پی تقسیم بر تعداد شمع)

r_o : شعاع شمع

همان طور که تصاویر (۲) و (۳) نشان می‌دهند، در حالت اتصال گیردار شمع‌ها به صورت مستقیم به پی متصل می‌شوند و به عنوان یک سیستم یکپارچه با پی عمل می‌کنند. در این حالت شمع‌ها تمام تنش‌ها (محوری، خمشی، برشی) را مستقیماً به زمین منتقل می‌کنند. همچنین آرماتورهای طولی شمع تا داخل پی ادامه دارند و امکان انتقال لنگر خمشی بین شمع و پی فراهم می‌گردد.



شکل ۲ حالت اتصال صلب



شکل ۳ حالت اتصال مفصلی

در حالت اتصال مفصلی، انتقال لنگرخمشی حذف شده ولی انتقال نیروی محوری و برشی حفظ شده است. شمع‌ها به صورت مفصلی به پی متصل می‌شوند و این اتصال اجازه می‌دهد که شمع‌ها تحت نیروی جانبی و خمشی حرکت کنند و تنش‌های برشی و خمشی را کاهش دهند. این سیستم برای مقاومت در برابر بارهای جانبی مانند زلزله و باد بهینه‌سازی شده است. آرماتورهای شمع فقط تا زیر پی ادامه دارند و سپس قطع می‌شوند، بنابراین هیچ گونه انتقال لنگر خمشی بین شمع و پی وجود ندارد.

گرچه پی شناور شمعی گزینه‌ای بسیار مناسب برای کاهش نشست و افزایش ظرفیت باربری پی است، اما تحت بارهای

$$r_m = \{0.25 + \xi [2.5 \rho (1 - v) - 0.25] \times L\};$$

شمع مؤثر تأثیر شمع در خاک

$$\xi = E_{sl} / E_{sb}$$

نسبت مدول الاستیسیته خاک در نوک شمع به مدول

الاستیسیته لایه باربر زیر آن

$$\rho = E_{sav} / E_{sl}$$

نسبت مدول الاستیسیته متوسط خاک در طول شمع به

مدول الاستیسیته در نوک شمع

v : ضریب پواسون خاک

L : طول شمع

E_{sl} : مدول الاستیسیته خاک در تراز نوک شمع

E_{sb} : مدول الاستیسیته لایه باربر زیر نوک شمع

E_{sav} : مدول الاستیسیته متوسط خاک در امتداد طول شمع

میزان سهم باربری پی گسترده در پی‌های شناور شمعی در

رابطه (۲) ذکر شده است.

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{k_r (1 - \alpha_{cp})}{k_p + k_r (1 - \alpha_{cp})} \quad (2)$$

P_r : سهم باربری پی از کل بار وارد بر پی شناور شمعی

P_t : کل بار وارد بر پی شناور شمعی

k_p و k_r به ترتیب برابر با سختی پی و سختی شمع هستند.

با توجه به رابطه ذکر شده، در حالتی که ضریب اندرکنش بین شمع و پی در کمترین مقدار قرار دارد، سهم باربری پی در پی‌های شناوری شمع بیشترین مقدار است و پی رادیه نسبت به شمع‌ها صلب‌تر است و بار به صورت تقریباً یکنواخت بین شمع‌ها توزیع می‌شود. همچنین مشارکت رادیه در باربری بیشتر خواهد بود (رفتار گسترده‌تر).

در حالت ماکزیم مقدار ضریب اندرکنش بین شمع و پی، شمع‌ها نسبت به پی صلب‌ترند و سیستم شبیه به گروه شمع با کلاهک نازک رفتار می‌کند. بار بیشتر توسط شمع‌ها تحمل می‌شود و نشست موضعی در رادیه رخ می‌دهد. پولوس پیشنهاد می‌کند که برای دستیابی به توزیع مناسب نیرو بین شمع‌ها و پی، باید این نسبت در طراحی بررسی شود.

در مواردی که صلبیت پی زیاد است (به خصوص در سازه‌های سنگین)، نقش انتقال بار توسط پی بسیار پررنگ می‌شود [10].

ایجاد شده در طول شمع در حالت منفصل کمتر از حالت متصل است.

مانا و هالدر (۲۰۲۴) با استفاده از مدل سازی سه بعدی و آزمایش های تجربی نشان دادند که فونداسیون های شناور شمعی در حالت منفصل ۳۰ - ۳۵٪ از بار قائم توسط شمع ها تحمل شده و اصطکاک منفی شدیدتری در طول شمع ها ایجاد می شود. آن ها تأکید دارند که رفتار نشست و توزیع بار در سیستم های متصل و منفصل به طور چشمگیری متفاوت است؛ در حالی که اتصال گیردار، انتقال مستقیم بار و تشکیل لنگر در سرشمع را تقویت می کند و عملکرد پیش بینی شده ای را تضمین می کند [13].

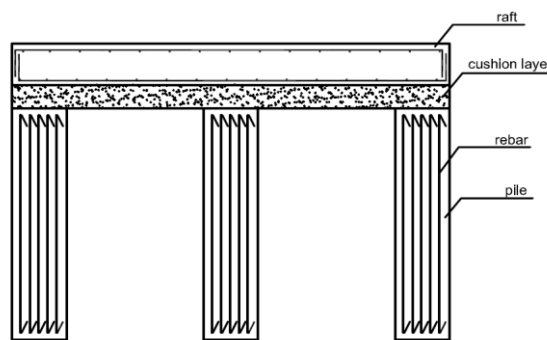
مقادیر نشست ایجاد شده در پی گسترده در حالت منفصل به نوع جنس لایه بین شمع و پی و میزان ضخامت آن بستگی دارد. تحلیل هایی توسط اسلامی و همکاران [14] برای به دست آوردن حالت بهینه چینش و تعداد و نوع شمع در دو حالت اتصال گیردار و منفصل انجام شد و سپس توسط سعیدی عزیز کندی و همکاران [2] موضوع مکانیسم انتقال بار و سهم باربری اعضای سازه ای پی و شمع ها بررسی شده است. مکانیسم انتقال بار در دو حالت اتصال گیردار و منفصل در شکل (۵) نشان می دهد که در حالت متصل، نشست پی گسترده، شمع و خاک اطراف با یکدیگر برابر هستند و به دلیل اتصال بین شمع و پی، عملکرد یکپارچه ای دارند. در پی شناور شمعی منفصل بر خلاف حالت متصل، به دلیل عدم اتصال شمع ها به پی، سختی بیشتر شمع نسبت به خاک بستر و نیز قابلیت فشرده گی لایه میانی، نشست شمع، خاک بستر و پی با یکدیگر برابر نیستند و نشست غیر یکنواخت بین شمع و خاک بستر در تراز نوک شمع به وجود می آید. همچنین به دلیل نشست بیشتر خاک بستر نسبت به شمع، اصطکاک پوسته ای منفی در قسمت بالایی شمع بسیج می گردد [15].

کائو و همکاران با تغییر طول، تعداد و آرایش شمع ها، توزیع لنگر خمشی در پی گسترده و مکانیزم انتقال نیرو در شمع ها را در پی شناور شمعی غیر متصل بررسی کردند. افزایش طول و تعداد شمع ها منجر به کاهش نشست و لنگر خمشی پی می گردد. همچنین به دلیل جدا بودن شمع ها از پی و برخلاف حالت متصل حداکثر تنش محوری در بالای شمع به وجود نمی آید [16].

وارده از سازه به پی، در محل اتصال سازه ای سر شمع و پی تمرکز تنش محوری و لنگر به وجود می آید. در این وضعیت به منظور جلوگیری از وقوع گسیختگی و یا آسیب سازه ای در سر شمع و پی ظرفیت باربری سازه ای شمع ها عامل تعیین کننده در طراحی خواهد بود.

در حالت منفصل پی به صورت مستقیم با شمع اتصال ندارد و یک لایه خاک بین شمع و پی قرار می گیرد (شکل ۴). این شمع ها عمدتاً برای کاهش نشست تفاضلی استفاده می شوند و بار از طریق لایه بالشتکی به طور غیر مستقیم به شمع ها منتقل می شود. در این حالت، تنش ها از طریق تماس جانبی خاک اطراف منتقل می شوند و توزیع یکنواخت فشار روی شمع ها صورت می گیرد.

لایه بالشتکی نقش مهمی در انتقال بار و به طور کلی رفتار بار - نشست در پی شناور شمعی دارد. مصالح مورد استفاده در این لایه می تواند به صورت درشت دانه یا ریزدانه باشد و معمولاً دارای سختی بالاتری نسبت به لایه زیر پی است. سختی بالاتر این لایه نسبت به لایه زیر پی می تواند باعث افزایش سهم باربری پی از کل بار وارده و افزایش کارایی مجموعه شناور شمعی گردد.



شکل ۴. نمایی از مدل سازی پی شناور شمعی در حالت منفصل

این روش در ابتدا توسط وانگ و همکاران (Wong et al) [11] بررسی شده است و نشان می دهد که در حالت منفصل بین شمع و پی، شمع های زیر پی بر خلاف حالت متصل نقش سازه ای ندارند و ضریب اطمینان در نظر گرفته شده برای طراحی شمع در این حالت کمتر از حالت اتصال گیردار است. پس از آن فیورانتیه (Fioravante) [12] تحلیل پی های شناور شمعی در حالت منفصل تحت بار استاتیکی را انجام داد. طبق نتایج به دست آمده از تحلیل انجام شده، مقادیر نیروی محوری

نیروهای جانبی بیان شده است که به شرح شکل (۶) می‌باشد.

تعیین سهم باربری شمع‌ها

نسبت سهم باربری شمع‌ها (α_{pr}) در پی رادیه شمع برابر است با:

$$\alpha_{pr} = \frac{Q_p}{Q_{pr}} \quad (5)$$

که در آن Q_p و Q_{pr} به ترتیب بیانگر بار تحمل شده توسط شمع‌ها و پی رادیه شمع می‌باشد.

همان طور که بیان شد در پی رادیه شمع متصل نشست شمع‌ها با پی برابر است و در این حالت نسبت سهم باربری شمع‌ها برابر است با:

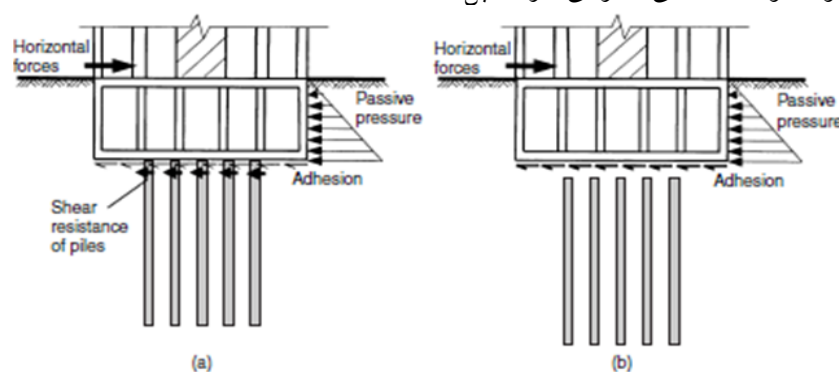
$$\alpha_{pr} = \frac{Q_p}{Q_{pr}} = \frac{k_p w_p}{(k_r + k_p) w_r} = \frac{1}{\frac{k_r}{k_p} + 1} \quad (6)$$

در حالت غیر متصل و با توجه به یکسان نبودن نشست شمع و پی نسبت سهم باربری شمع‌ها به شرح ذیل است [19]:

$$\alpha_{pr} = \frac{Q_p}{Q_{pr}} = \frac{k_p w_p}{(k_r + \frac{k_p w_p}{w_{pr}}) w_{pr}} = \frac{w_p}{\frac{k_r}{k_p} (w_{pr} + w_p)} \quad (7)$$

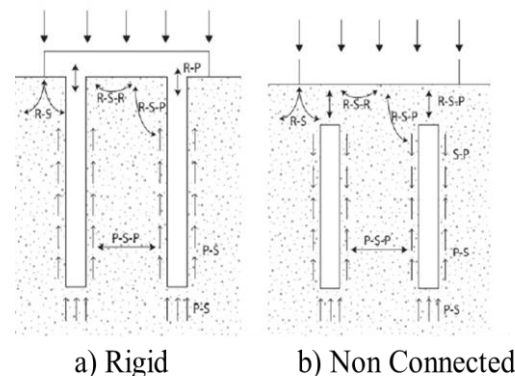
با توجه به روابط (۶) و (۷) میزان سهم باربری شمع در حالت متصل و منفصل وابسته به سختی پی رادیه و شمع و میزان نشست پی، شمع و مجموعه پی شناور شمعی است.

در مطالعه‌ای تجربی و عددی توسط ساتیام و همکاران (۲۰۲۵)، عملکرد سیستم پی شناور شمعی منفصل با به‌کارگیری لایه پلی‌استایرن به همراه ترکیب ژئودرین - ژئوتکستایل مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف از این پژوهش، بهینه‌سازی انتقال بار بین پی و شمع‌ها و کاهش نشست کل فونداسیون بود.



شکل ۶: نمایشی از مکانیسم انتقال بار جانبی به پی رادیه - شمع: (a) شمع‌های متصل به پی گسترده (b) شمع‌های منفصل به پی گسترده

ترادیکو اندرکنش‌ها در پی شناور شمعی منفصل را به کمک روش تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی و با تغییر تعداد و چینش شمع‌ها و ضخامت لایه میانی بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهند که حداکثر نیروی محوری ایجاد شده در طول شمع، در نقطه‌ای پایین‌تر از سر شمع و محل صفحه خشی به وجود می‌آید. این نقطه با افزایش ضخامت لایه میانی به سمت عمق خاک حرکت می‌کند [17].



شکل ۵: نمایشی از مکانیسم انتقال بار در پی شناور شمعی در حالت اتصال گیردار و منفصل [18]

مقایسه نشست ایجاد شده در دو حالت متصل و منفصل به شرح روابط (۳) و (۴) می‌باشد.

$$W_r = W_s = W_p \quad (3) \quad \text{حالت اتصال گیردار}$$

$$W_r > W_s > W_p \quad (4) \quad \text{حالت منفصل}$$

در مطالعات انجام شده توسط وانگ و همکاران [11] نحوه اعمال نیروهای جانبی و مقاومت اعضای سازه‌ای در مقابل

است [8].

هدف اصلی این پژوهش، بررسی عددی تأثیر نوع اتصال بین شمع و پی (گیردار، مفصلی و منفصل) بر رفتار کلی سیستم پی شناور شمعی تحت بارهای قائم و جانبی است.

اهداف جزئی تحقیق شامل موارد زیر است:

۱. مقایسه نشست کلی پی در هر سه نوع اتصال.
۲. تحلیل نحوه توزیع نیروی محوری بین شمع‌ها و پی.
۳. ارزیابی لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در شمع‌ها.
۴. تحلیل نسبت بار منتقل شده به شمع‌ها و پی گسترده.
۵. ارائه پیشنهاد کاربردی برای انتخاب نوع اتصال بهینه در پروژه‌های واقعی.

روش مدل‌سازی عددی مورد استفاده

روش اجزای محدود

در این روش که یکی از روش‌های محیطی یا دیفرانسیلی است درون توده خاکی یا سنگی، به عناصر ساده مهندسی تفکیک می‌شود که هر یک ویژگی‌های خاص خود را دارند و مجموعه این عناصر فرعی، رفتار کلی توده خاک یا سنگ را بیان می‌کنند. اصولاً زمین به صورت پیوسته مدل می‌شود و ناپیوستگی‌ها را می‌توان به صورت جداگانه مدل کرد. محیط مسئله به تعداد محدودی المان تقسیم می‌شود که در نقاط گرهی به هم متصل هستند. هر المان، محدود است یعنی هندسه مشخص و اندازه محدودی دارد. تنش، کرنش و تغییر شکل ایجاد شده در یک المان بر رفتار المان‌های مجاورش اثرگذار است. این رابطه پیچیده بین المان‌های متصل به هم مسئله بسیار پیچیده ریاضی را ایجاد می‌کند. سیستم معادلاتی که مقادیر مجهول را به مقادیر معلوم مرتبط می‌کند، برحسب یک ماتریس سختی عمومی بیان می‌شود.

معرفی نرم‌افزار مورد استفاده

در حال حاضر تعداد زیادی نرم‌افزار برای تحلیل محیط ژئوتکنیکی وجود دارد که از میان آن‌ها نرم‌افزار PLAXIS 2020 با قابلیت‌های گوناگون از جمله در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، محاسبه تغییر شکل‌های بزرگ، مدل‌های رفتاری مختلف خاک و سازه و در نظر گرفتن فشار آب حفره‌ای دارای دقت بالایی است. نرم‌افزار PLAXIS 2020

نتایج تحلیل‌ها نشان داد که استفاده از این لایه واسط، موجب بهبود توزیع تنش، کاهش تمرکز نیرو در سر شمع‌ها و همچنین افزایش عملکرد باربری فونداسیون شد. در حالتی که لایه واسط با ژئوسنتتیک تقویت شده باشد، نشست فونداسیون تا بیش از ۳۰٪ کاهش یافت و رفتار سیستم پایدارتری مشاهده شد.

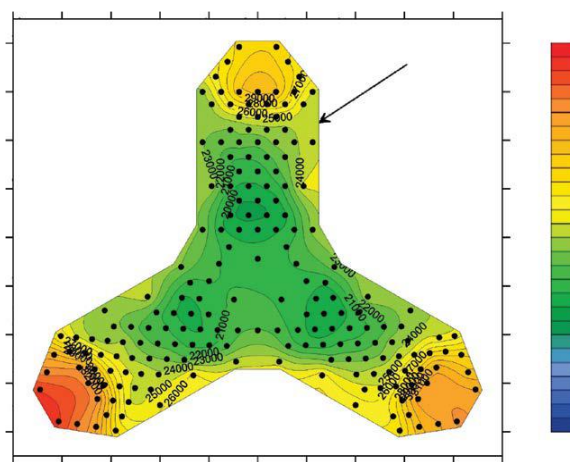
این مطالعه بر اهمیت طراحی مناسب اتصال شمع و پی حتی در مدل‌های منفصل، تأکید دارد و نشان می‌دهد که لایه واسط و ترکیبات تقویتی می‌توانند نقش به‌سزایی در افزایش عملکرد سیستم ایفا کنند [20].

نمونه‌های اجرا شده پی‌های شناور شمعی

برج خلیفه، دبی، امارات متحده عربی

فونداسیون این برج که ۸۲۸ متر طول دارد، شامل فونداسیون شمعی به همراه پی گسترده است. ضخامت فونداسیون گسترده ۳/۷ متر و تعداد ۱۹۷ شمع درجا ریز با قطر ۱/۵ متر در زیر پی گسترده به کار رفته است. طول تقریبی شمع‌ها بین ۴۳ تا ۴۷ متر است. ظرفیت باربری تقریبی هر شمع ۳۰ مگانیوتن برآورد شده است. نوع اتصال به کار رفته در بین شمع و فونداسیون در این پروژه از نوع گیردار است.

شکل پلان ساختمان به صورت "Y" در نظر گرفته شده تا باعث کاهش اثر نیروی باد به سازه و کمک به ساخت‌پذیری سازه شود.



شکل ۷ مقادیر حداکثر نیروی محوری در پلان برج خلیفه

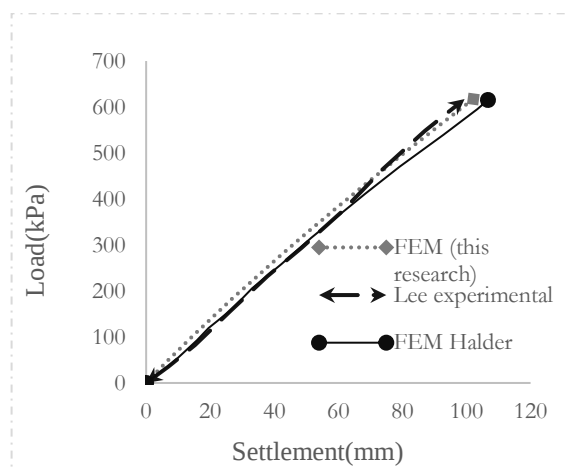
در حالت اتصال گیردار چندین نمونه دیگر شامل برج‌های شانگهای چین، برج‌های دوقلوی اداری امارات نیز اجرا شده

مشخصات مکانیکی خاک و اجزای سازه‌ای همچون شمع و پی به شرح جدول (۱) است.

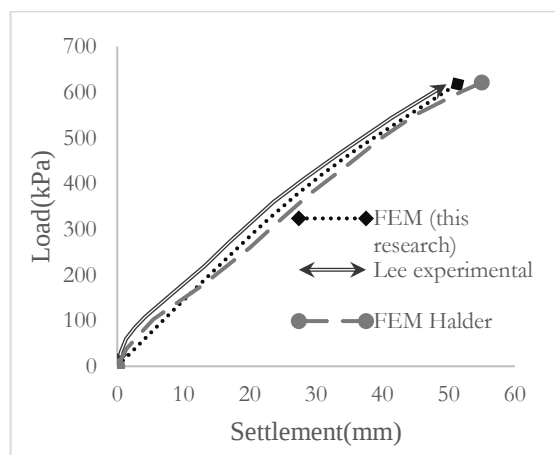
جدول ۱ پارامترهای مصالح مورد استفاده در تحلیل صحت‌سنجی [14]

Parameter	Unit	Soil	Pile& Raft
Elastic modulus, E	$\left(\frac{\text{MN}}{\text{m}^2}\right)$	50	30000
Internal friction angle, ϕ	(Degree)	43	-
Cohesion, C	$\left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right)$	0	-
Poisson ratio, ν		0.3	0.2
Unit weight, γ	$\left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^3}\right)$	18	25
Dilation angle, ψ	(Degree)	13	-

نتایج مقایسه منحنی بار - جابه‌جایی در دو حالت پی گسترده تنها و پی شناور شمع به شرح شکل‌های (۹) و (۱۰) هستند.



شکل ۹ نمودار صحت‌سنجی نرم‌افزار در حالت پی گسترده تنها

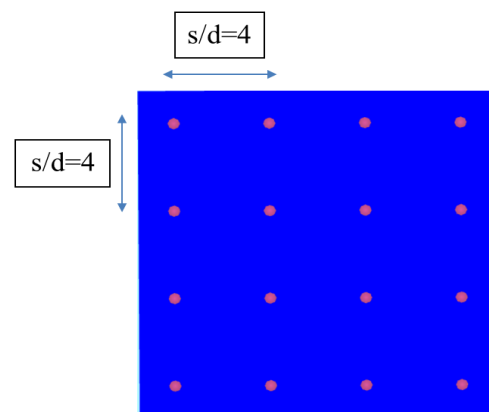


شکل ۱۰ نمودار صحت‌سنجی نرم‌افزار در حالت پی رادیه - شمع

برنامه‌ی رایانه‌ای المان محدود سه‌بعدی است که با استفاده از یک محیط گرافیکی، کاربر را قادر به ساختن یک شبکه‌بندی واقعی سه‌بعدی بر اساس ترکیبی از لایه‌های مختلف می‌کند. به دلیل سه‌بعدی بودن شبکه‌بندی می‌توان رفتار سازه و خاک و همچنین رفتار اندرکنش آن‌ها را بدون به‌کارگیری فرضیات و به صورت کلی و دقیق مورد بررسی قرار داد.

صحت‌سنجی مدل‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار PLAXIS

برای بررسی درستی مدل‌سازی‌های انجام شده، مقایسه‌ای بین این پژوهش با نتایج پژوهش‌های انجام شده توسط پارک و لی (Park & Lee) [21] صورت گرفت. تحلیل انجام شده توسط پارک و لی نیز با یک آنالیز عددی دیگری که توسط هالدر (Halder) [22] انجام شده است، مقایسه گردیده است. در این پژوهش مقایسه با هر دو سری نتایج انجام شده است. آرایش شمع‌ها ۴×۴، قطر D، ۰/۶ متر و طول L_p برابر ۱۵ متر هستند. یک پی گسترده مربعی با عرض B، ۹ متر و ضخامت ۱/۲ متر مورد نظر است. یک شبکه‌بندی نسبتاً ریز در اطراف شمع و پی گسترده ارائه شده، در حالی که یک شبکه‌بندی نسبتاً درشت‌تر از آن در سایر نقاط استفاده شده است. مرزهای کناری در نظر گرفته شده در اطراف پی تا ۲/۵ برابر عرض پی و عمق تا ۲ برابر طول شمع در نظر گرفته شد. در تحلیل‌های انجام شده توسط نرم‌افزار PLAXIS به جای المان فصل مشترک که در محل اندرکنش بین المان سازه‌ای و خاک قرار می‌گیرد، از ضریب کاهنده مقاومت (R_{inter}) استفاده شده است. در تحلیل صحت‌سنجی استفاده شده ضریب کاهنده مقاومت برابر ۰/۶۷ در نظر گرفته شده است.



شکل ۸ پلان مدل‌سازی پی و نحوه آرایش شمع‌ها

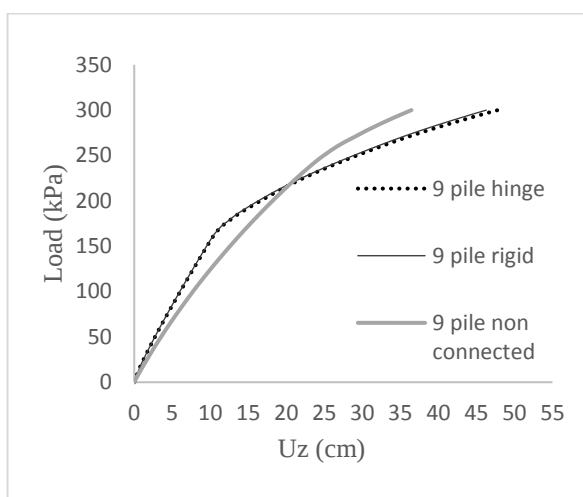
متداول در خاک ماسه‌ای کاربرد فراوان دارد. شمع‌ها و پی با رفتار الاستیک خطی مدل شدند تا تمرکز بر بررسی تأثیر نوع اتصال حفظ شود.

عمق کل مدل برابر ۶۰ متر و ابعاد افقی حداقل ۲/۵ برابر عرض پی لحاظ شد. لبه‌های جانبی مدل در راستای افقی مقید و سطح پایین مدل کاملاً گیردار در نظر گرفته شد. لایه زیر پی به صورت خاک همگن فرض شد تا تأثیر اتصال‌ها بدون تداخل پارامترهای دیگر بررسی شود.

مقایسه نمودارهای مختلف بار - جابه‌جایی مرکز پی

تحت بارگذاری استاتیکی قائم و جانبی

نمودار بار - جابه‌جایی مرکز پی شناور شمعی در حالت بهینه $s/d = 9$ در سه حالت اتصال گیردار، مفصلی و منفصل در شکل (۱۱) ارائه شده است. در این نمودار منظور از U_z مقدار نشست قائم ایجاد شده در مرکز پی است.



شکل ۱۱ نمودار بار - جابه‌جایی قائم مرکز پی تحت بار استاتیکی قائم ۳۰۰ کیلو پاسکال با تعداد ۹ شمع در سه حالت اتصال گیردار، مفصلی و منفصل

طبق نتایج شکل (۱۱) در حالت اتصال گیردار نمودار دوخطی است و پس از رسیدن شمع‌ها به نقطه تسلیم و حداکثر ظرفیت باربری خود نمودار غیر خطی می‌شود و شیب نمودار کاهش پیدا می‌کند. در حالت منفصل شمع‌ها به حداکثر ظرفیت خود نمی‌رسند و همچنان در این حالت، نمودار خطی است. بنابراین در حالت اتصال گیردار تا قبل از رسیدن شمع‌ها به حداکثر ظرفیت خود عملکرد بهتری نسبت به حالت منفصل

بررسی نتایج مشخصات ابعاد مدل‌سازی

پی مربعی به ابعاد B، ۱۲ متر و ضخامت پی ۱/۵ متر است. شمع‌ها با آرایش ۳×۳، برای تحلیل مدل‌سازی شده‌اند. مشخصات شمع مورد استفاده عبارتند از قطر شمع D، ۰/۵ متر و طول شمع L، ۲۰ متر. پارامترهای مورد استفاده در این تحلیل مطابق جدول‌های (۲) و (۳) هستند. تأثیر تغییر اتصال بین شمع و پی از حالت گیردار به مفصلی و منفصل مورد بررسی قرار گرفت. به جای المان فصل مشترک که در محل اندرکنش بین المان سازه‌ای و خاک قرار می‌گیرد، از ضریب کاهنده مقاومت (R_{inter}) برابر ۰/۶۷ استفاده شده است. رفتار شمع و پی گسترده هم الاستیک در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ پارامترهای خاک و لایه بین پی و شمع‌های مورد استفاده در مدل

Parameter	Unit	Soil	Cushion Layer
Elastic modulus, E	($\frac{MN}{m^2}$)	10	100
Internal friction angle, ϕ	(Degree)	25	30
Cohesion, C	($\frac{kN}{m^2}$)	0	50
Poisson ratio, ν	-	0.25	0.3
Saturated Unit weight, γ	($\frac{kN}{m^3}$)	17	22

جدول ۳ مشخصات پارامترهای المان‌های سازه‌ای مورد استفاده در مدل

Parameter	Unit	Pile	Raft
Elastic modulus, E	($\frac{MN}{m^2}$)	25000	30000
Poisson ratio, ν	-	0.15	0.15
Saturated Unit weight, γ	($\frac{kN}{m^3}$)	24	24

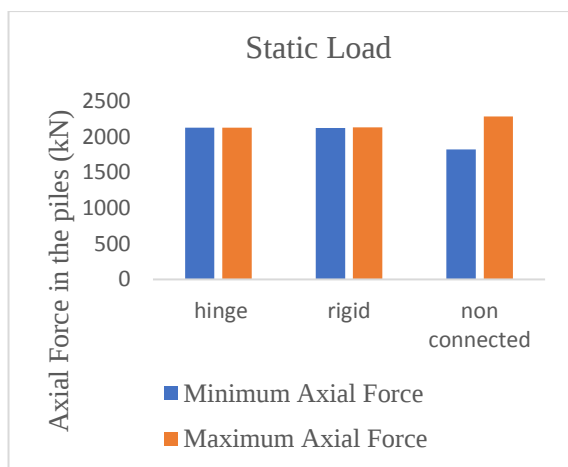
با توجه به ضریب اندرکنش بین شمع و پی (α_{cp}) اشاره شده در این تحقیق، مطابق روابط پولوس، پی رادیه نسبت به شمع دارای صلبیت بیشتری بوده و این موضوع باعث شده است که توزیع نیرو یکنواخت‌تر شود، نشست کلی کاهش یابد و لنگر در پی و شمع‌ها بیشتر ظاهر شود ولی قابل کنترل باشد.

ضخامت لایه بین شمع و پی گسترده یک متر در نظر گرفته شده است. برای خاک از مدل رفتاری موهر - کولمب استفاده شد که علی‌رغم سادگی، برای تحلیل سازه‌های ژئوتکنیکی

بررسی اثر نوع اتصال بین شمع و پی بر پارامتر ضریب

$$R_N = \frac{N_{\max}}{N_{\min}} \text{ عدم یکنواختی}$$

ضریبی به عنوان ضریب عدم یکنواختی تعریف می‌شود که حاصل نسبت حداکثر نیروی محوری ایجاد شده در بین شمع‌ها به حداقل نیروی محوری ایجاد شده در بین آن‌ها است که به صورت رابطه $R_N = \frac{N_{\max}}{N_{\min}}$ تعریف می‌شود. هر چقدر این نسبت بزرگ‌تر باشد، نشان دهنده متفاوت بودن نیروهای وارده بر شمع‌ها و تیپ‌های متفاوت شمع‌ها است.



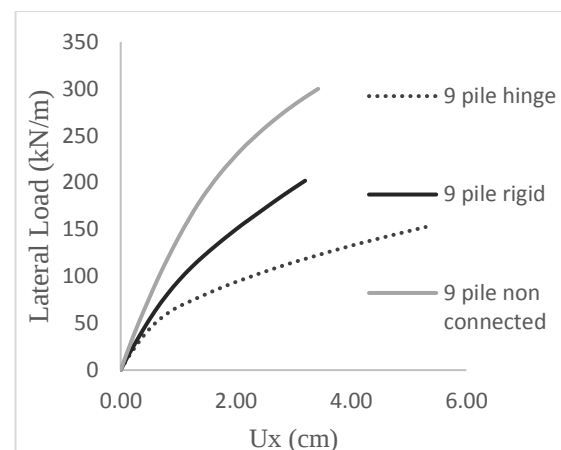
شکل ۱۳ مقادیر حداکثر و حداقل نیروهای محوری ایجاد شده در شمع‌ها در حالت ۹ شمع تحت بار استاتیکی قائم ۳۰۰ کیلو پاسکال در انواع مختلف اتصال شمع و پی برای تعیین پارامتر ضریب یکنواختی ($R_N = \frac{N_{\max}}{N_{\min}}$)

نتایج شکل (۱۳) نشان می‌دهد تحت بارگذاری استاتیکی قائم مقدار ضریب عدم یکنواختی در حالت مفصل بیشتر از دو حالت اتصال گیردار و مفصلی است. در دو حالت اتصال گیردار و مفصلی مقدار نیروی محوری در تمام شمع‌ها به دلیل رسیدن تمام شمع‌ها به حداکثر ظرفیت باربری خود، یکسان است و مقدار ضریب یکنواختی تقریباً برابر یک است. تنها در حالت مفصل، مقدار نیروی محوری شمع میانی کمتر از شمع‌های گوشه است.

نتایج شکل (۱۴) نشان می‌دهد ضریب عدم یکنواختی تحت بارگذاری استاتیکی جانبی در حالت اتصال گیردار بیشترین مقدار را دارد، در حالت اتصال مفصلی این نسبت کمتر از حالت اتصال گیردار است، کمترین مقدار در حالت اتصال مفصل رخ داده است.

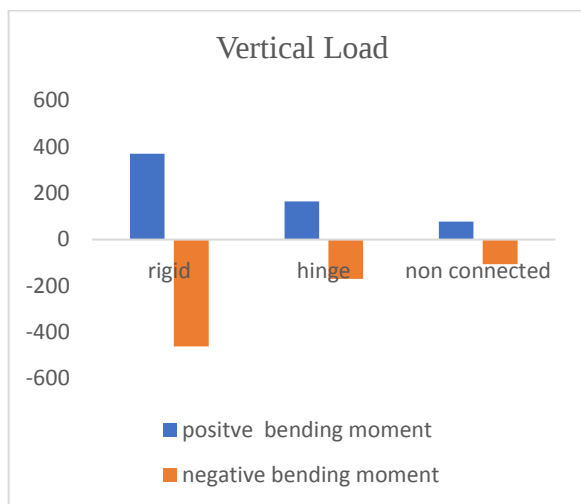
دارند. دو حالت اتصال گیردار و مفصلی هم تحت بارگذاری استاتیکی قائم رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهند. در حالت پی گسترده تنها به دلیل نبود شمع، بیشترین نشست در پی رخ داده است.

نتایج شکل (۱۲) نشان می‌دهد که تحت بارگذاری استاتیکی جانبی وارده بر پی، حالت مفصلی نسبت به دو حالت اتصال گیردار و مفصل عملکرد بهتری دارد و جابه‌جایی افقی کمتری در این حالت در پی رخ داده است.

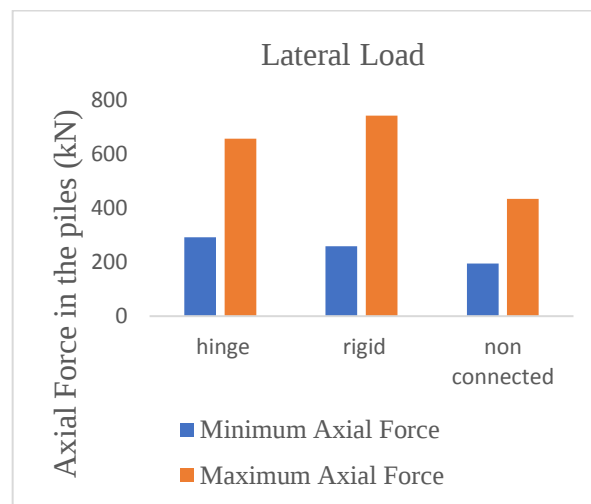


شکل ۱۲ نمودار بار - جابه‌جایی افقی مرکز پی تحت بار استاتیکی جانبی ۲۴۰ کیلو نیوتن بر متر با تعداد ۹ شمع در سه حالت اتصال گیردار، مفصلی و مفصل

در حالت اتصال گیردار، شمع‌ها مستقیماً بارهای عمودی را تحمل می‌کنند و عملکرد خوبی در کاهش نشست کلی دارند. اما ممکن است در برخی موارد نشست‌های تفاضلی بیشتری را تجربه کنند، به دلیل اینکه بار مستقیماً به شمع‌ها منتقل می‌شود. حالت اتصال مفصلی در کاهش نشست کلی و تفاضلی عملکرد خوبی دارد، به خصوص در مناطقی که بارهای جانبی و خمشی بالا هستند. مفصل‌ها اجازه می‌دهند که شمع‌ها بتوانند به راحتی جابه‌جا شوند و نشست را متعادل کنند. حالت مفصل بهترین عملکرد را در کاهش نشست تفاضلی دارد. وجود لایه بالشتکی کمک می‌کند که بارها به طور یکنواخت‌تری توزیع شوند و از ایجاد تمرکز تنش و نشست‌های موضعی جلوگیری شود. نوع و ضخامت لایه بین شمع و پی در مقدار نشست یکنواخت ایجاد شده در حالت مفصل نسبت به دو حالت گیردار و مفصلی اثر زیادی دارد.

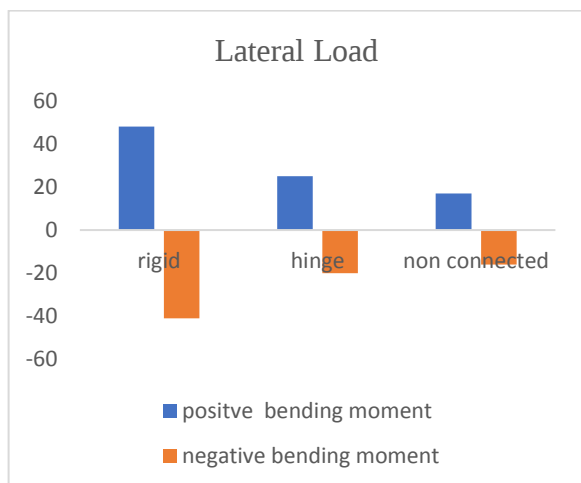


شکل ۱۵ مقایسه حداکثر لنگر خمشی مثبت و منفی ایجاد شده در شمع تحت بار قائم ۳۰۰ کیلو پاسکال در اتصال‌های مختلف بین شمع و پی



شکل ۱۴ مقادیر حداکثر و حداقل نیروهای محوری ایجاد شده در شمع‌ها در حالت ۹ شمع تحت بار جانبی ۲۴۰ کیلو نیوتن بر متر در انواع مختلف اتصال شمع و پی برای تعیین پارامتر ضریب یکنواختی

$$(R_N = \frac{N_{max}}{N_{min}})$$



شکل ۱۶ مقایسه حداکثر لنگر خمشی مثبت و منفی ایجاد شده در شمع تحت بار جانبی ۲۴۰ کیلو نیوتن بر متر در اتصال‌های مختلف بین شمع و پی

مقایسه توزیع لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع در سه حالت اتصال گیردار، مفصلی و منفصل

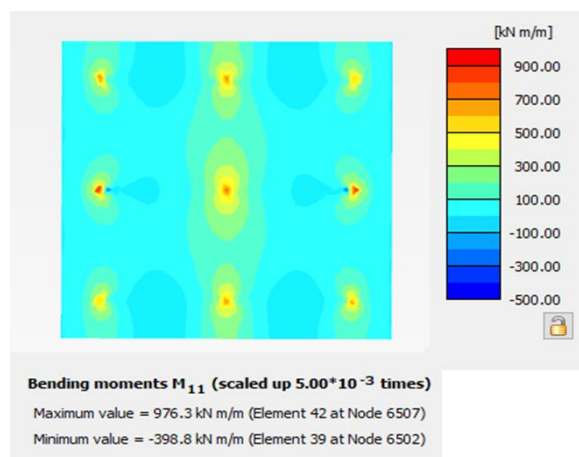
در شکل (۱۷) مقادیر لنگر خمشی ایجاد شده در شمع‌های مورد نظر در طول شمع بررسی شده است که در هر سه حالت اتصال گیردار، مفصلی و منفصل مقادیر لنگر خمشی در انتهای شمع صفر است. در سر شمع یعنی محل اتصال بین شمع و پی گسترده تنها در حالت اتصال گیردار لنگر خمشی وجود دارد و دو حالت مفصلی و منفصل، مقادیر لنگر خمشی ایجاد شده در آن‌ها صفر است. در سه حالت بررسی شده، مقادیر لنگر خمشی

در مجموع در صورتی که شمع‌ها تحت بارگذاری صورت گرفته با اتصال‌های مختلف به حداکثر ظرفیت باربری خود نرسیده باشند، ضریب عدم یکنواختی در حالت منفصل کمتر از حالت اتصال گیردار و مفصلی است و باعث کاهش هزینه و آرماتور مصرفی و یکسان شدن تیپ شمع‌های انتخابی می‌گردد.

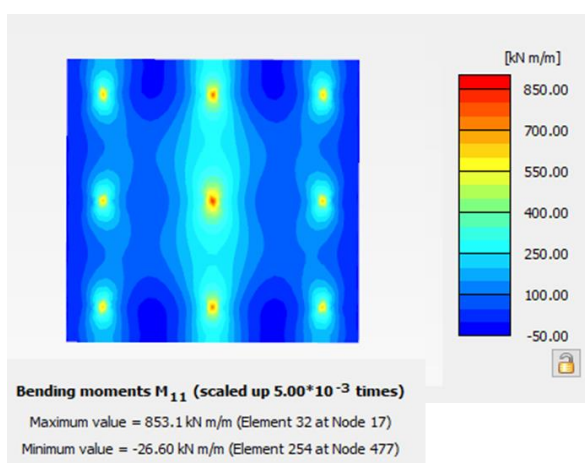
مقایسه حداکثر لنگر خمشی ایجاد شده در شمع در سه حالت اتصال گیردار، مفصلی و منفصل

با توجه به نتایج شکل‌های (۱۵) و (۱۶) مقدار بیشینه لنگر ایجاد شده در طول شمع در حالت اتصال گیردار رخ می‌دهد به این دلیل که در این حالت پی لنگر خمشی را به طور کامل به شمع منتقل می‌کند. در حالت مفصلی، لنگر خمشی کاهش می‌یابد، چون شمع‌ها فقط نیروی محوری و برشی را می‌گیرند. در حالت منفصل، مقدار لنگر خمشی بسیار ناچیز است (عملاً صفر)، چون تماسی بین پی و شمع وجود ندارد.

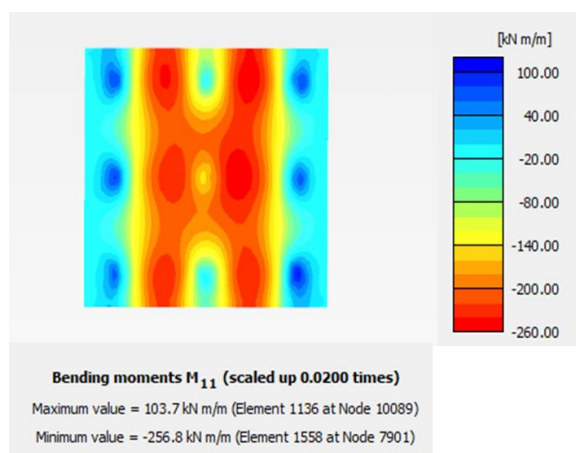
لنگر خمشی مستقیماً وابسته به نوع اتصال و صلبیت پی است. بیشترین لنگر در محل اتصال شمع به پی در حالت گیردار مشاهده شد.



شکل ۱۸ لنگر خمشی ایجاد شده در پی تحت بار قائم ۳۰۰ کیلو پاسکال در حالت اتصال گیردار

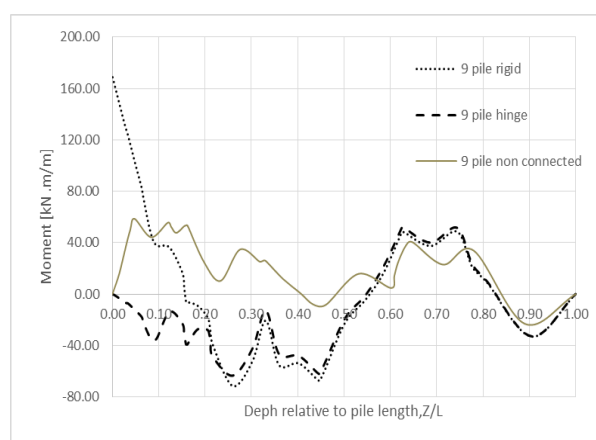


شکل ۱۹ لنگر خمشی ایجاد شده در پی تحت بار قائم ۳۰۰ کیلو پاسکال در حالت اتصال مفصلی



شکل ۲۰ لنگر خمشی ایجاد شده در پی تحت بار قائم ۳۰۰ کیلو پاسکال با در حالت منفصل

ایجاد شده در طول شمع در حالت منفصل کمتر از دو حالت دیگر است.



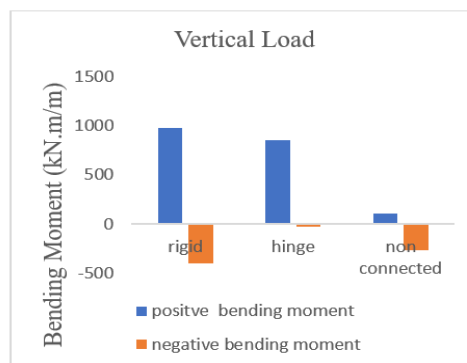
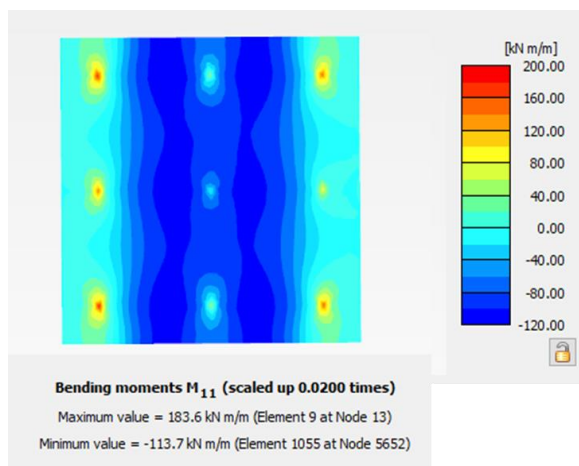
شکل ۱۷ مقایسه لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع تحت بار قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال در اتصال‌های مختلف بین شمع و پی

همچنین نتایج نشان می‌دهد که در طول شمع پس از عمق نسبی ۵۰٪ از طول شمع دو حالت اتصال گیردار و مفصلی مقادیر لنگر خمشی تقریباً یکسانی دارند که علت آن این است که در ۵۰٪ پایداری طول شمع، رفتار شمع به صورت گیردار است و به نوعی عمق گیرداری محسوب می‌شود اما در ۵۰٪ بالایی طول شمع تأثیر نوع اتصال وجود دارد و مقادیر لنگر خمشی با یکدیگر متفاوت هستند. بنابراین تأثیر مقدار بار وارده از سطح زمین در ۵۰٪ بالایی طول شمع در مقادیر لنگر خمشی ایجاد شده در شمع وجود دارد.

مقایسه لنگر خمشی ایجاد شده در پی در سه حالت اتصال گیردار، مفصلی و منفصل

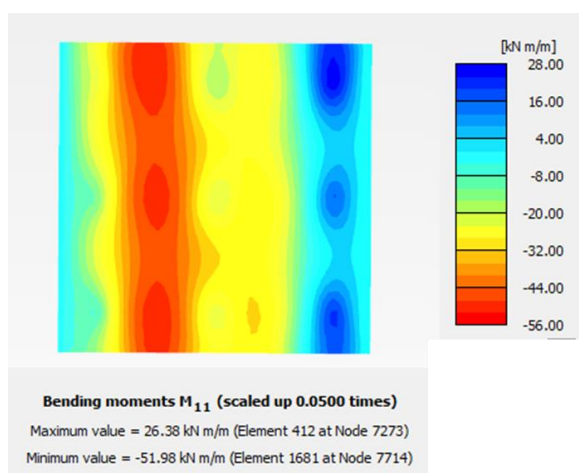
در تحلیل نتایج لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در پی، اثر شمع‌ها در مدلسازی در نظر گرفته شده و نتایج با فرض اثر اندرکنش شمع‌ها با خاک و پی به دست آمده است.

نتایج شکل‌های (۱۸) تا (۲۱) نشان می‌دهد که لنگر خمشی منفی ایجاد شده در پی در حالت اتصال مفصلی دارای کمترین مقدار است. لنگر خمشی مثبت در حالت منفصل دارای کمترین مقدار است. در مجموع تحت بار استاتیکی قائم کمترین لنگر خمشی ایجاد شده در پی در حالت منفصل و بیشترین لنگر خمشی ایجاد شده در حالت اتصال گیردار است.

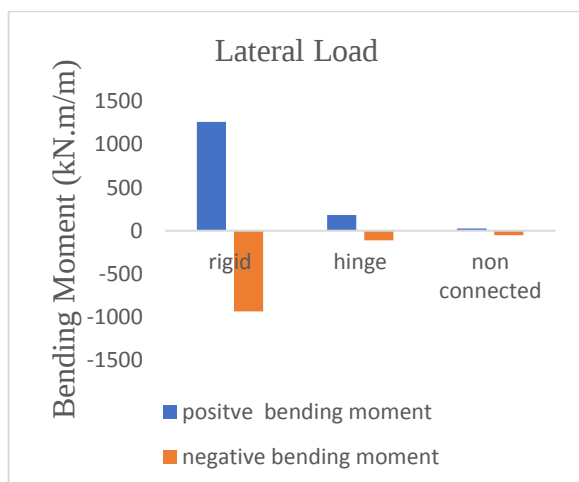


شکل ۲۱ مقایسه حداکثر لنگر خمشی مثبت و منفی ایجاد شده در پی تحت بار قائم ۳۰۰ کیلو پاسکال قائم در اتصالات مختلف بین شمع و پی

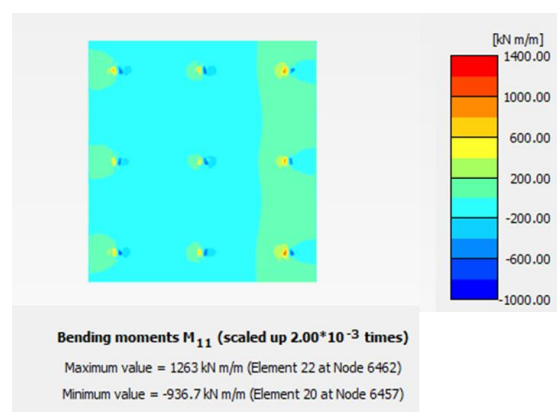
شکل ۲۳ لنگر خمشی ایجاد شده در پی تحت بار جانبی ۲۴۰ کیلونیوتن بر متر در حالت اتصال مفصلی



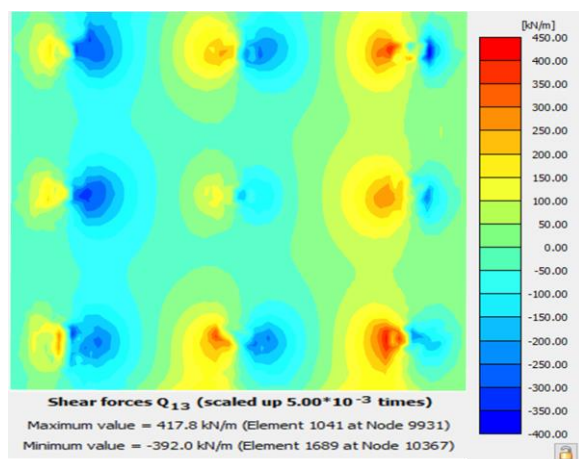
شکل ۲۴ لنگر خمشی ایجاد شده در پی تحت بار جانبی ۲۴۰ کیلونیوتن بر متر در حالت اتصال مفصل



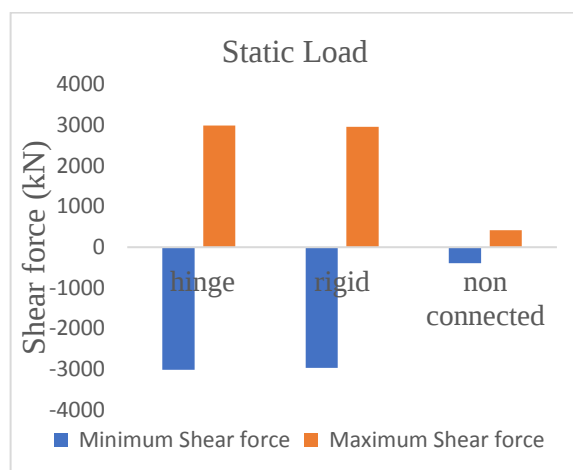
شکل ۲۵ مقایسه حداکثر لنگر خمشی مثبت و منفی ایجاد شده در پی تحت بار جانبی ۲۴۰ کیلونیوتن بر متر در اتصالات مختلف بین شمع و پی



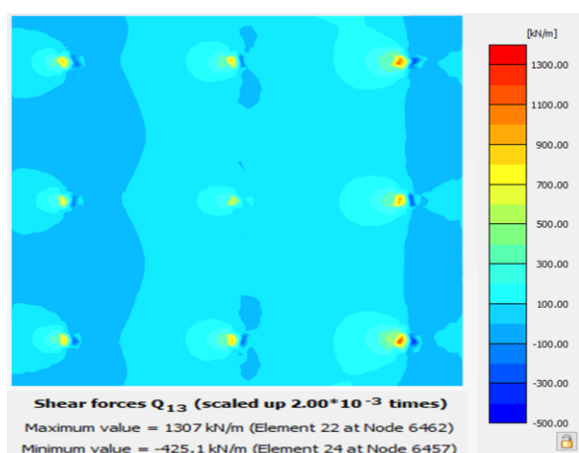
شکل ۲۲ لنگر خمشی ایجاد شده در پی تحت بار جانبی ۲۴۰ کیلونیوتن بر متر در حالت اتصال گیردار



شکل ۲۸ نیروی برشی ایجاد شده در پی تحت بار قائم ۳۰۰ کیلو پاسکال در حالت منفصل



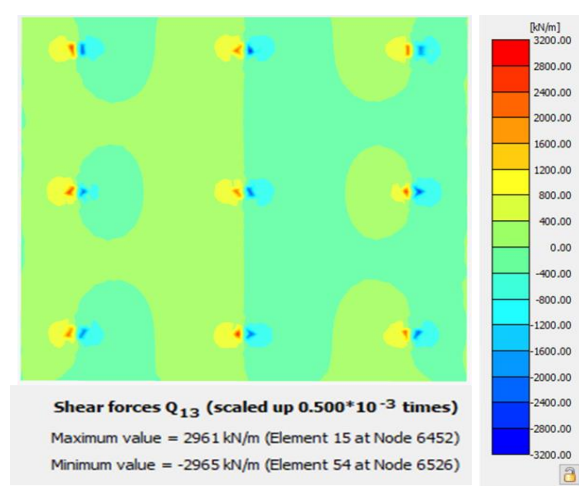
شکل ۲۹ مقایسه نیروی برشی ایجاد شده در پی تحت بار قائم ۳۰۰ کیلو پاسکال در اتصالات های مختلف بین شمع و پی



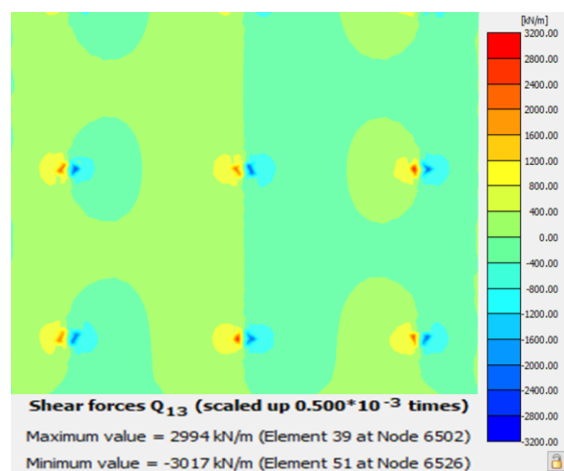
شکل ۳۰ نیروی برشی ایجاد شده در پی تحت بار جانبی ۲۴۰ کیلو نیوتن بر متر در حالت اتصال گیردار

مقایسه نیروی برشی ایجاد شده در پی در سه حالت اتصال گیردار، مفصلی و منفصل

مقایسه نیروی برشی ایجاد شده در پی تحت بارگذاری استاتیکی قائم در شکل های (۲۶) تا (۲۹) نشان می دهد که بیشترین نیروی برشی در حالت اتصال مفصلی دیده می شود، زیرا بار منتقل شده به شکل نقطه ای از شمع به پی وارد می شود. در حالت اتصال گیردار نیز نیروی برشی کمی کمتر از حالت اتصال مفصلی است. در حالت منفصل، توزیع بار گسترده تر است و نیروی برشی نسبت به دو حالت دیگر کمتر است. کاهش مقدار نیروی برشی باعث کاهش مصرف آرماتور برشی و بهینه تر شدن طرح می گردد.



شکل ۲۶ نیروی برشی ایجاد شده در پی تحت بار قائم ۳۰۰ کیلو پاسکال در حالت اتصال گیردار



شکل ۲۷ نیروی برشی ایجاد شده در پی تحت بار قائم ۳۰۰ کیلو پاسکال در حالت اتصال مفصلی

نشست کلی و تفاضلی رخ می‌دهد و مناسب برای بارهای جانبی است. در حالت اتصال مفصل بهترین عملکرد در کاهش نشست تفاضلی به دلیل وجود لایه بالشتکی وجود دارد.

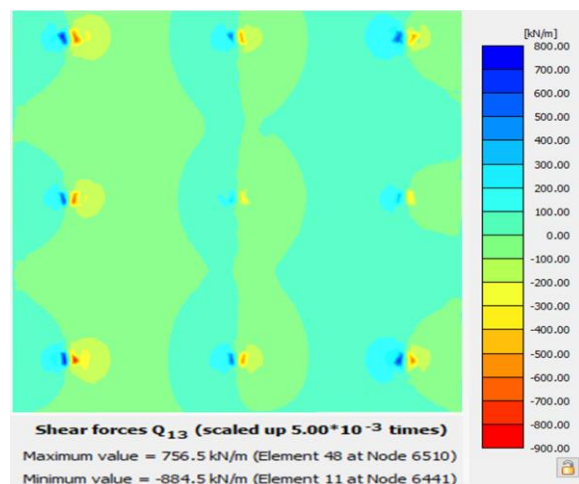
۲. اتصال گیردار نیازمند طراحی دقیق و مصالح قوی‌تر است و نسبت به دو اتصال دیگر پرهزینه‌تر است. اتصال مفصلی طراحی پیچیده دارد و برای اجرا نیاز به مصالح با کیفیت دارد و هزینه اجرای آن از اتصال گیردار کمتر و از اتصال مفصل بیشتر است. اتصال مفصل ساده‌تر از دو حالت دیگر و به کیفیت و جنس مصالح لایه بالشتکی مرتبط است همچنین از دو حالت اتصال دیگر هزینه اجرای آن کمتر است.

۳. اتصال گیردار مناسب برای سازه‌های بلندمرتبه و سنگین در مناطق زلزله‌خیز است. اتصال مفصلی در پروژه‌های نیازمند مقاومت بالا در برابر بارهای جانبی (مثل پل‌ها و ساختمان‌های بلند) کاربرد دارد. اتصال مفصل برای سازه‌های صنعتی یا ساختمان‌ها در خاک‌های ضعیف (تمرکز بر کنترل نشست) مناسب است.

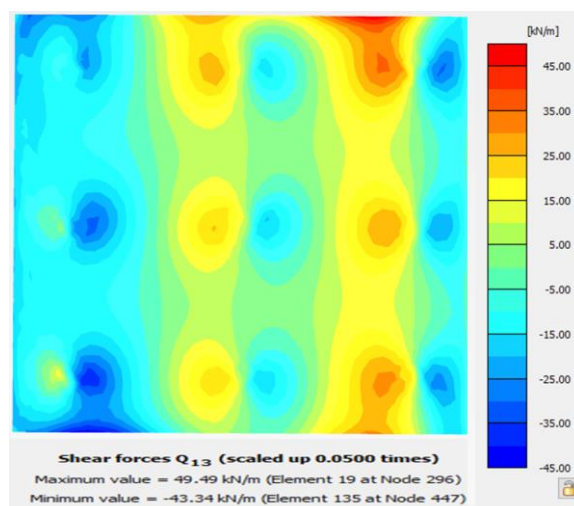
۴. مقدار لنگر خمشی ایجاد شده در شمع و پی تحت بارگذاری‌های استاتیکی قائم و جانبی در حالت مفصل دارای کمترین مقدار و در حالت اتصال گیردار بیشترین مقدار است.

۵. در تحلیل انجام شده، با توجه به وجود خاک ماسه‌ای نرم در زیر پی و استفاده از میان لایه سخت برای حالت مفصل، پی شناور شمعی در صورت استفاده از تعداد کم شمع در حالت اتصال مفصل و در صورت استفاده از تعداد زیاد شمع، اتصال گیردار و مفصلی عملکرد بهتری دارند.

۶. مقایسه نیروی محوری ایجاد شده در شمع در سه حالت اتصال گیردار، مفصلی و مفصل نشان می‌دهد که تحت بارگذاری استاتیکی قائم، مقدار نیروی محوری ایجاد شده در شمع در دو حالت اتصال گیردار و مفصلی تقریباً با یکدیگر برابر است و در حالت مفصل حداکثر نیروی محوری ایجاد شده در شمع بیشتر از دو حالت اتصال گیردار و مفصلی است.



شکل ۳۱ نیروی برشی ایجاد شده در پی تحت بار جانبی ۲۴۰ کیلونیوتن بر متر در حالت اتصال مفصلی



شکل ۳۲ نیروی برشی ایجاد شده در پی تحت بار جانبی ۲۴۰ کیلونیوتن بر متر در حالت اتصال مفصل

با توجه به نتایج شکل‌های (۳۰) تا (۳۲) مقایسه نیروی برشی ایجاد شده در پی تحت بارگذاری جانبی نشان می‌دهد که بیشترین مقدار نیروی برشی ایجاد شده در حالت اتصال گیردار و کمترین مقدار در حالت اتصال مفصل است. اتصال مفصلی تحت بارگذاری جانبی عملکرد بهتری نسبت به حالت بارگذاری استاتیکی قائم دارد.

نتیجه‌گیری

۱. در اتصال گیردار کاهش نشست کلی ولی احتمال نشست تفاضلی بیشتر وجود دارد. در حالت اتصال مفصلی کاهش

واژه‌نامه	مکانیسم انتقال بار	Load Transfer
پی شناور شمعی	ضخامت پی	Raft Thickness
لنگر خمشی	فاصله بین شمع‌ها	Pile Spacing
نیروی برشی	ضریب کاهش مقاومت	R_{inter}
نیروی محوری	سختی خاک	Soil Stiffness
نشست کلی	ضریب اندرکنش	Interaction Factor
لایه بالشتکی	اصطکاک جانبی شمع	Pile Skin Friction
مدل‌سازی عددی		
المان فصل مشترک		
نشست تفاضلی		
نسبت مشارکت باربری		

سپاسگزاری

مراجع

- [1] M. F. Randolph, "Efficient design of piled rafts," in *Proceeding Deep Foundation on Bored and Auger Piles*, Ghent, Belgium, 1993, pp. 199–130.
- [2] J. A. Hemsley, Ed., *Design Applications of Raft Foundations*. London, U.K.: Thomas Telford, 2000.
- [3] A. S. Azizkandi, H. Rasouli, and M. H. Baziar, "Load sharing and carrying mechanism of piles in non-connected pile rafts using a numerical approach," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 17, no. 6, pp. 793–808, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40999-018-0356-2>
- [4] M. F. Randolph, "Design methods for pile groups and piled rafts," *Proceeding International Conference on Smart Finance Economic*, 1994, pp. 61–82.
- [5] H. G. Poulos and E. H. Davis, *Pile Foundation Analysis and Design*. 1980.
- [6] H. G. Poulos, "Methods of analysis of piled raft foundations," Report prepared on behalf of Technical Committee TC18 of Piled Foundations, 2001.
- [7] H. G. Poulos, "Practical design procedures for piled raft foundations," in *Design Applications of Raft Foundations*, Thomas Telford Publishing, 2000, pp. 425–467.
- [8] S. Singh, C. H. Solanki, and S. J. Shukla, "Performance analysis and load sharing of combined piled raft foundations on cohesive soil using finite element approach," *Transportation Infrastructure Geotechnology*, vol. 12, no. 1, pp. 1–33, 2025. <https://doi.org/10.1007/s40515-024-00516-1>
- [9] I. Jamil et al., "Analysis and design of piled raft foundation taking into account interaction factors," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2022, no. 1, p. 1334136, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1334136>
- [10] H. G. Poulos, "Piled raft foundations: design and applications," *Géotechnique*, vol. 51, no. 2, pp. 95–113, 2001. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.2.95>
- [11] I. H. Wong, M. F. Chang, and X. D. Cao, "Raft foundations with disconnected settlement-reducing piles," in *Design Applications of Raft Foundations*, J. A. Hemsley, Ed. London, U.K.: Thomas Telford, 2000, pp. 469–486.
- [12] V. Fioravante and D. Giretti, "Contact versus noncontact piled raft foundations," *Canadian Geotechnical Journal*,

- vol. 47, no. 11, pp. 1271–1287, 2010. <https://doi.org/10.1139/T10-021>
- [13] P. Halder and B. M. Manna, “Connected versus disconnected piled raft systems: A comparative experimental assessment,” *Indian Geotechnical Conference*, 2022, vol. 2, pp. 125–131. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1741-5_12
- [14] A. Eslami, M. Veiskarami, and M. M. Eslami, “Study on optimized piled-raft foundations (PRF) performance with connected and non-connected piles—three case histories,” *International Journal of Civil Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 100–111, 2012.
- [15] V. Fioravante, “Load transfer from a raft to a pile with an interposed layer,” *Géotechnique*, vol. 61, no. 2, pp. 121–132, 2011. <https://doi.org/10.1680/geot.7.00187>
- [16] X.-D. Cao, I. H. Wong, and M.-F. Chang, “Behavior of model rafts resting on pile-reinforced sand,” *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 130, no. 2, pp. 129–138, 2004.
- [17] F. Tradigo, F. Pisanò, C. Di Prisco, and A. Mussi, “Nonlinear soil–structure interaction in disconnected piled raft foundations,” *Computers and Geotechnics*, vol. 63, pp. 121–134, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.08.014>
- [18] F. W. Melese and H. F. Gebregziabher, “Behavior of structurally non-connected settlement reducing piles under raft foundation,” *Journal of Civil Environment Engineering*, vol. 11, pp. 1–8, 2021.
- [19] M. J. MalekKhani and J. Bolouri Bazaz, “Experimental and analytical study of the behavior of connected and disconnected piled raft foundations,” *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 53, no. 12, pp. 5195–5218, 2021. <https://doi.org/10.22060/ceej.2021.18726.6942>
- [20] M. Aaqib and M. Y. Shah, “Performance evaluation of disconnected piled raft foundation incorporated with polystyrene cushion and hybrid geogrid–geotextile base,” *Transportation Geotechnics*, vol. 52, p. 101565, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101565>
- [21] D. Park and J. Lee, “Comparative analysis of various interaction effects for piled rafts in sands using centrifuge tests,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 141, no. 1, p. 04014082, 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001183](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001183)
- [22] P. Halder and B. M. Manna, “Performance evaluation of piled rafts in sand based on load-sharing mechanism using finite element model,” *International Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 1–8, Feb. 2020. <https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1729297>