

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

مهدی یزدی نسب^۱، محمود یزدانی^۲

چکیده

مطالعات زیادی بر روی پی های شناور شمعی صورت گرفته است. با این حال تأثیر عامل نوع اتصال بین شمع ها 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 می گیرد. در این پژوهش تأثیر نوع اتصال بین شمع و پی در عملکرد کل سیستم بخصوص 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 های استاتیکی قائم و جانبی در حالت مفصل دارای کمترین مقدار و در حالت اتصال گیردار بیشترین مقدار می باشد. دو حالت اتصال گیردار و مفصلی قبل از رسیدن شمع ها به حداکثر ظرفیت باربری خود (نقطه تسلیم) رفتار مشابهی دارند. پس از نقطه تسلیم شمع ها، در حالت اتصال مفصلی لنگر خمشی کمتری نسبت به حالت اتصال گیردار در پی ایجاد می شود، اما نشست ایجاد شده در پی در حالت اتصال مفصلی بیشتر از حالت اتصال گیردار خواهد بود.

واژگان 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

M. Yazdi nasab¹, M. Yazdani²

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.

Keywords: Piled raft foundation, Bearing capacity, Non-connected between pile and foundation, Rigid and hinged connected between pile and foundation, Settlement of raft foundation,

^۱ نویسنده مسئول، کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس Email: Mahdi_yazdinasab@modares.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

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

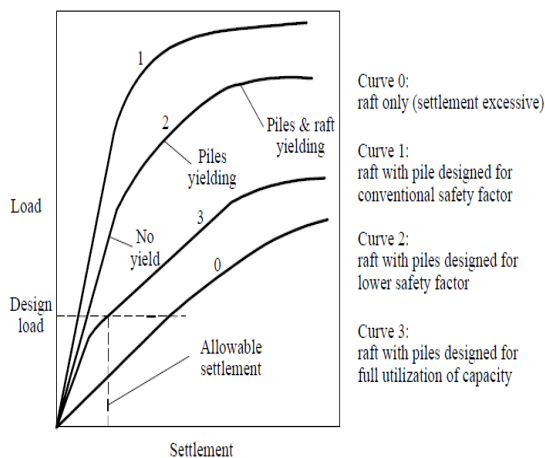


Fig. 1. Load- Settlement curve pile raft foundation Based on design philosophies [6,7]

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 منتقل‌شده 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، به‌ویژه 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

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 می‌باشد که در آن بار سازه به‌صورت 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 به‌ویژه 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 می‌باشد. منحنی ۱ نشان دهنده طراحی با ضریب اطمینان بالا می‌باشد. در منحنی ۲ طراحی با ضریب اطمینان کمتر نسبت به منحنی ۳ انجام شده و از ظرفیت باربری شمع بیشتر استفاده شده و در نهایت منحنی ۳ که از حداکثر ظرفیت باربری شمع استفاده شده و کمترین ضریب اطمینان طراحی را دارد.

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

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

P_t : کل بار وارده بر پی شناور شمعی

k_p و k_r به ترتیب برابر با سختی پی و سختی شمع می باشد. باتوجه به رابطه ذکر شده، در حالتی که ضریب اندرکنش بین شمع و پی در کمترین مقدار قرار دارد، سهم باربری پی در پی های شناوری شمع بیشترین مقدار می باشد و پی رادیه نسبت به شمع ها صلب تر است و بار به صورت تقریباً یکنواخت بین شمع ها توزیع می شود. همچنین مشارکت رادیه در باربری بیشتر خواهد بود (رفتار گسترده تر).

در حالت ماکزیمم مقدار ضریب اندرکنش بین شمع و پی، شمع ها نسبت به پی صلب ترند و سیستم شبیه به گروه شمع با کلاهک نازک رفتار می کند. بار بیشتر توسط شمع ها تحمل شده و نشست موضعی در رادیه رخ می دهد. پولوس پیشنهاد می کند که برای دستیابی به توزیع مناسب نیرو بین شمع ها و پی، باید این نسبت در طراحی بررسی شود.

در مواردی که صلبیت پی زیاد است (به خصوص در سازه های سنگین)، نقش انتقال بار توسط پی بسیار پررنگ می شود. [10]

شکل ۲. حالت اتصال صلب

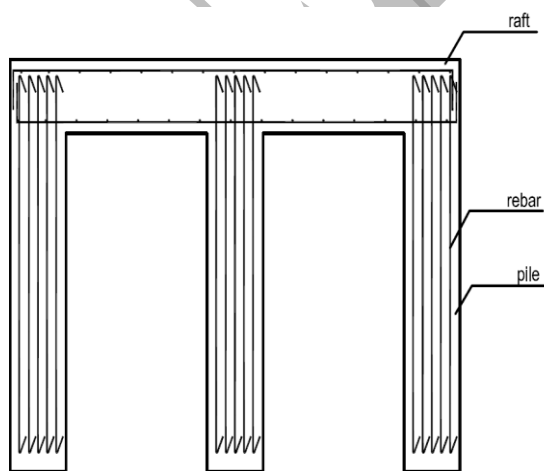


Fig. 2. Rigid connection mode

مدل های واقعی، پی گسترده تا بیش از ۵۰٪ بار قائم را تحمل می کند، به شرطی که اندرکنش ها به درستی مدل سازی شوند. [9]

ضریب اندرکنش پی - شمع (α_{cp})

در تحلیل اندرکنش پی و شمع ها در فونداسیون مرکب شناور شمع، پولوس نشان داد که سهم باربری پی در پی شناور شمعی وابسته به ضریب اندرکنش پی - شمع و سختی های پی و شمع می باشد.

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

تابع لگاریتمی نسبت شعاع موثر به شعاع شمع $\xi: \ln(r_m/r_o)$

r_c : شعاع متوسط پی (برابر با مساحت پی تقسیم بر تعداد شمع)

r_o : شعاع شمع

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

شعاع موثر تاثیر 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

ν : 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 پی های شناور شمعی در رابطه ۲ ذکر شده است.

شکل ۳. حالت اتصال مفصلی

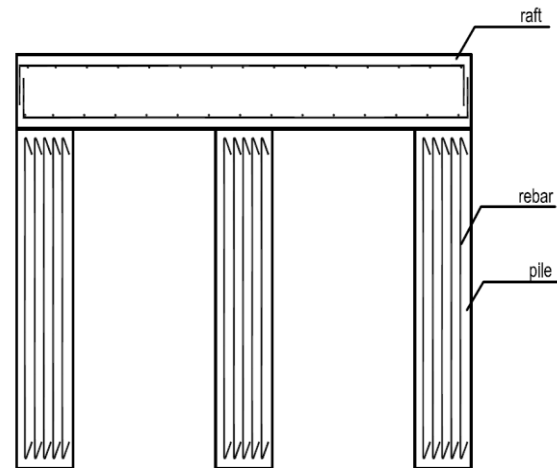


Fig. 3. Hinge connection mode

همانطور 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 داشته و امکان انتقال لنگر خمشی بین شمع و پی فراهم می‌گردد.

در حالت اتصال مفصلی، انتقال لنگر 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 داشته و سپس قطع می‌شوند، بنابراین هیچگونه انتقال لنگر خمشی بین شمع و پی وجود ندارد.

شمع و پی ظرفیت باربری سازه‌ای شمع‌ها عامل تعیین کننده در طراحی خواهد بود.

در حالت مفصل پی به صورت مستقیم با شمع اتصال ندارد و یک لایه خاک بین شمع و پی قرار می‌گیرد (شکل ۴). این شمع‌ها عمدتاً برای کاهش نشست تفاضلی استفاده می‌شوند و بار از طریق لایه بالشتکی به طور غیرمستقیم به شمع‌ها منتقل می‌شود. در این حالت، تنش‌ها از طریق تماس جانبی خاک اطراف منتقل می‌شوند و توزیع یکنواخت فشار روی شمع‌ها صورت می‌گیرد.

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 می‌تواند به صورت درشت دانه یا ریزدانه باشد و معمولاً دارای سختی بالاتری نسبت به لایه زیر پی می‌باشد. سختی بالاتر این لایه نسبت به لایه زیر پی می‌تواند باعث افزایش سهم باربری پی از بار کل وارده و افزایش کارایی مجموعه شناور شمعی گردد.

شکل ۴. نمایی از مدل‌سازی پی شناور شمعی در حالت مفصل

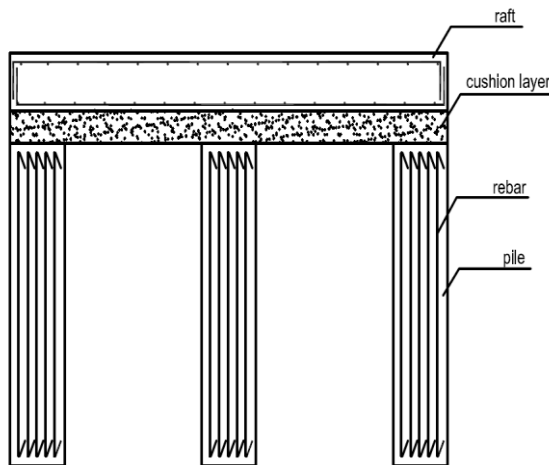


Fig. 4. View of modeling of pile raft foundation in non- connected

این روش در ابتدا توسط وانگ و همکاران (Wong et al [11]) بررسی شده است و نشان می‌دهد که در حالت مفصل بین شمع و پی، شمع‌های زیر پی بر خلاف حالت متصل نقش سازه‌ای 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 پی‌های شناور شمعی در

گرچه پی شناور شمعی گزینه‌ای بسیار مناسب جهت کاهش نشست و افزایش ظرفیت باربری پی می‌باشد، اما تحت بارهای وارده از سازه به پی، در محل اتصال سازه‌ای سر شمع و پی تمرکز تنش محوری و لنگر به وجود می‌آید. در این وضعیت جهت جلوگیری از وقوع گسیختگی و یا آسیب سازه‌ای در سر

همچنین به دلیل جدا بودن شمع‌ها از پی و برخلاف حالت متصل حداکثر تنش محوری در بالای شمع به وجود نمی‌آید. [16]

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

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

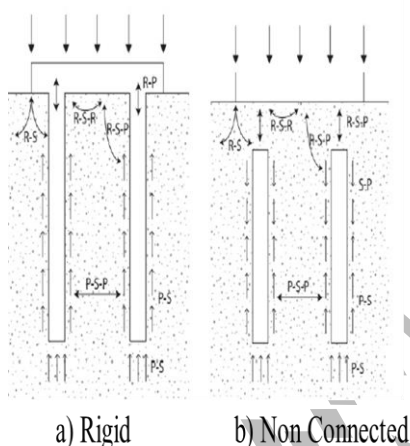


Fig. 5. View of load transfer in the pile raft foundation in the two modes of rigid and hinge connection [18]

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

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

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

در مطالعات انجام شده توسط وانگ و همکاران [11] نحوه اعمال نیروهای جانبی و مقاومت اعضای سازه‌ای در مقابل نیروهای جانبی بیان شده است که به شرح شکل ۶ می‌باشد.

حالت منفصل تحت بار استاتیکی را انجام داد. طبق نتایج بدست آمده از تحلیل انجام شده، مقادیر نیروی محوری ایجاد شده در طول شمع در حالت منفصل کمتر از حالت متصل است.

مانا و هالدر (۲۰۲۴) با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و آزمایش‌های تجربی نشان دادند که فونداسیون‌های شناور شمعی در حالت منفصل ۳۰-۳۵٪ از بار قائم توسط شمع‌ها تحمل شده و اصطکاک منفی شدیدتری در طول شمع‌ها ایجاد می‌شود. آن‌ها تأکید دارند که رفتار نشست و توزیع بار در سیستم‌های متصل و منفصل به‌طور چشمگیری متفاوت است؛ در حالی که اتصال گیردار، انتقال مستقیم بار و تشکیل لنگر در سر شمع را تقویت می‌کند و عملکرد پیش‌بینی‌شده‌ای را تضمین می‌کند. [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. تحلیل‌هایی 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 سازه‌ای پی و شمع‌ها بررسی شده است. مکانیسم انتقال بار در دو حالت اتصال گیردار و منفصل در شکل (۵) نشان می‌دهد که در حالت متصل، نشست پی گسترده، شمع و خاک اطراف با یکدیگر برابر هستند و به دلیل اتصال بین شمع و پی، عملکرد یکپارچه‌ای دارند. در پی شناور شمعی منفصل برخلاف حالت متصل، به دلیل عدم اتصال شمع‌ها به پی، سختی بیشتر شمع نسبت به خاک بستر و نیز قابلیت فشردگی لایه میانی، نشست شمع، خاک بستر و پی با یکدیگر برابر نبوده و نشست غیریکنواخت بین شمع و خاک بستر در تراز نوک شمع به وجود می‌آید. همچنین به دلیل نشست بیشتر خاک بستر نسبت به شمع، اصطکاک پوسته‌ای منفی در قسمت بالایی شمع بسیج می‌گردد. [15]

کائو و همکاران با تغییر طول، تعداد و آرایش شمع‌ها، توزیع لنگر خمشی در پی گسترده و مکانیزم انتقال نیرو در شمع‌ها در پی شناور شمعی غیرمتصل بررسی نمودند. افزایش طول و تعداد شمع‌ها منجر به کاهش نشست و لنگر خمشی پی می‌گردد.

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

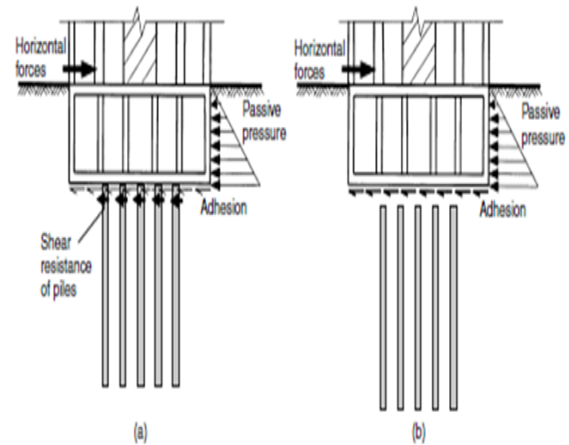


Fig. 6. View of lateral load transfer in the pile raft foundation a) Piles connected to a raft foundation b) Piles non-connected to a raft foundation

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.

همانطور که بیان شد در پی رادیه شمع متصل نشست شمع‌ها با پی برابر می‌باشد 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 می‌باشد. [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 می‌باشد.

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

نتایج تحلیل‌ها نشان داد که استفاده از این لایه‌ی 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، نشست فونداسیون تا بیش از ۳۰٪ کاهش یافته 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 لایه‌ی واسط و ترکیبات تقویتی می‌توانند نقش بسزایی 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 می‌باشد. 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 می‌باشد. 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 می‌باشد.

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

شکل ۷. مقادیر حداکثر نیروی محوری در پلان برج خلیفه

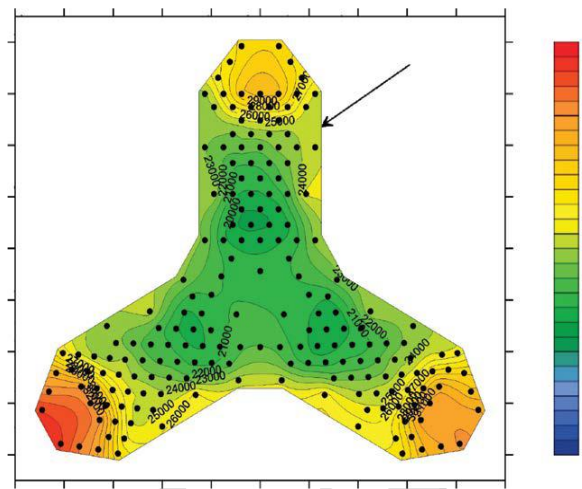


Fig. 7. Contours of maximum axial load (kN)

در حالت اتصال گیردار چندین نمونه دیگر شامل: برج های شانگهای چین، برج های دوقلو اداری امارات نیز اجرا شده 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 شمع 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 شمع ها و پی.
- ۳- ارزیابی لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در شمع ها.
- ۴- تحلیل نسبت بار منتقل شده به شمع ها و پی گسترده.
- ۵- ارائه پیشنهاد کاربردی برای انتخاب نوع اتصال بهینه در پروژه های واقعی.

روش مدل سازی عددی مورد استفاده

روش اجزای محدود

در این روش که یکی از روش های محیطی یا دیفرانسیلی می باشد درون توده خاکی یا سنگی، به عناصر ساده مهندسی تفکیک

می شود که هر یک ویژگی های خاص خود را دارند و مجموعه این عناصر فرعی، رفتار کلی توده خاک یا سنگ را بیان می کنند. اصولاً زمین به صورت پیوسته مدل می شود و ناپوستگی ها را می توان به صورت جداگانه مدل کرد. محیط مسئله به تعداد محدودی المان تقسیم می شود 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 المان های مجاورش اثرگذار است. این رابطه پیچیده بین المان های متصل به هم مسئله بسیار پیچیده ریاضی را ایجاد می کند. سیستم معادلاتی که مقادیر مجهول را به مقادیر معلوم مرتبط می کند، برحسب یک ماتریس سختی عمومی بیان می شود.

معرفی نرم افزار مورد استفاده

در حال حاضر تعداد زیادی نرم افزار برای تحلیل محیط ژئوتکنیکی وجود دارد که از میان آن ها نرم افزار PLAXIS 2020 با قابلیت های گوناگون از جمله در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، محاسبه تغییر شکل های بزرگ، مدل های رفتاری مختلف خاک و سازه و در نظر گرفتن فشار آب حفره ای دارای دقت بالایی می باشد. نرم افزار PLAXIS 2020 برنامه ای رایانه ای المان محدود سه بعدی می باشد که با استفاده از یک محیط گرافیکی، کاربر را قادر به ساختن یک شبکه بندی واقعی سه بعدی بر اساس ترکیبی از لایه های مختلف می کند. به دلیل سه بعدی بودن شبکه بندی می توان رفتار سازه و خاک و همچنین رفتار اندرکنش آن ها را بدون به کارگیری فرضیات و به صورت کلی و دقیق مورد بررسی قرار داد.

صحت سنجی مدل سازی انجام شده توسط نرم افزار

PLAXIS

برای بررسی درستی مدل سازی های انجام شده در این پژوهش مقایسه با نتایج پژوهش های انجام شده توسط پارک و لی (Park & Lee) [21] صورت گرفت. تحلیل انجام شده توسط پارک و لی با یک آنالیز عددی دیگری که توسط هالدر

جدول ۱. پارامترهای مصالح مورد استفاده در تحلیل صحت سنجی [14]

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

Table 1. Mechanical parameters of materials used in validation analysis [14]

نتایج مقایسه منحنی بار - جابجایی در دو حالت پی گسترده تنها و پی شناور شمعی به شرح شکل‌های (۹) و (۱۰) می‌باشند.

شکل ۹. نمودار صحت سنجی نرم‌افزار در حالت پی گسترده تنها

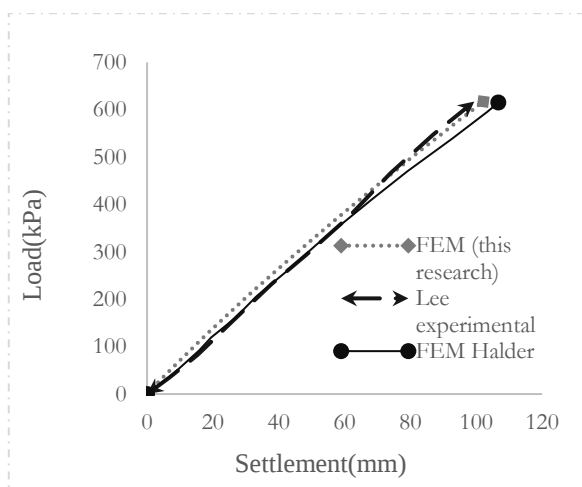


Fig. 9. Software validation diagrams in raft foundation mode

(Halder) [22] انجام شده است، مقایسه گردیده که در این پژوهش مقایسه با هر دو سری نتایج انجام شده است. آرایش شمعی ها ۴×۴، قطر D، ۰/۶ متر و طول L_p برابر ۱۵ متر می‌باشند. یک پی گسترده مربعی با عرض B، ۹ متر و ضخامت ۱/۲ متر مورد نظر است. یک شبکه بندی نسبتاً ریز در اطراف شمعی و پی گسترده ارائه شده، درحالی که یک شبکه بندی 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 شمعی در نظر گرفته شد. در تحلیل‌های انجام شده توسط نرم افزار PLAXIS به‌جای 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 صحت سنجی استفاده شده ضریب کاهنده مقاومت برابر ۰/۶۷ در نظر گرفته شده است.

شکل ۸. پلان مدل‌سازی پی و نحوه آرایش شمعی‌ها

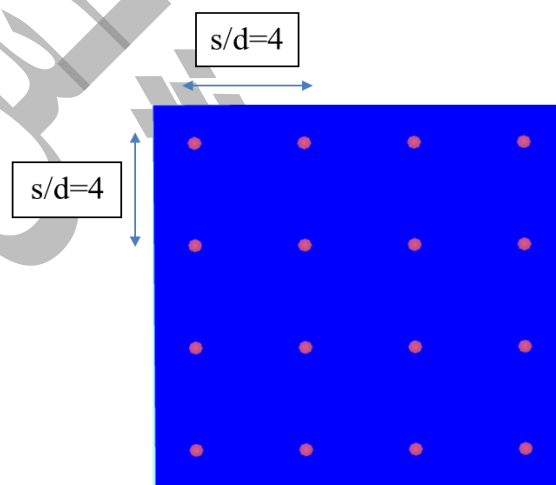


Fig. 8. The Model of foundation and piles in horizontal plane

مشخصات مکانیکی خاک و اجزای سازه‌ای همچون شمعی و پی به شرح جدول (۱) می‌باشد.

شکل ۱۰. نمودار صحت سنجی نرم افزار در حالت پی رادیه- شمع

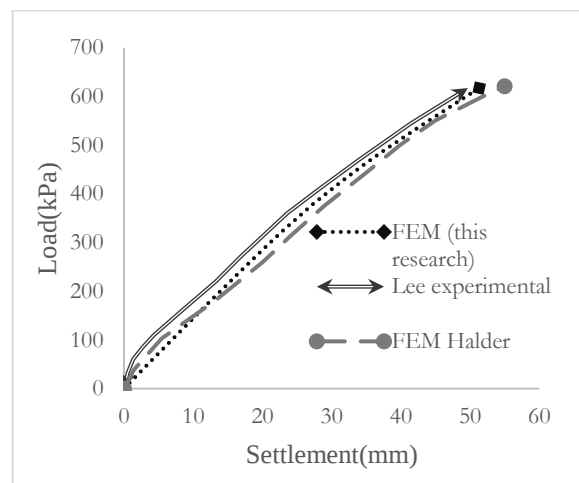


Fig. 10. Software validation diagram in pile raft foundation mode

بررسی نتایج

مشخصات ابعاد مدل سازی

پی مربعی به ابعاد B، ۱۲ متر و ضخامت پی ۱/۵ متر می باشد. شمع ها با آرایش ۳×۳، برای تحلیل مدل سازی شده اند. مشخصات شمع مورد استفاده شامل قطر شمع D، ۰/۵ متر و طول شمع L، ۲۰ متر می باشد. پارامترهای مورد استفاده در این تحلیل مطابق جداول (۲) و (۳) می باشند. 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 سازه ای و خاک قرار می گیرد، 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 شمع های 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

Table 2. The mechanical parameters of soil and cushion layer used in model

جدول ۳. مشخصات پارامترهای المان های سازه ای 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

Table 3. The mechanical parameters of structural elements used in the model

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 یکنواخت تر شود، نشست کلی کاهش یابد، لنگر در پی و شمع ها 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 سازه های ژئوتکنیکی متداول در خاک ماسه ای کاربرد فراوان دارد. شمع ها و پی با رفتار الاستیک خطی مدل شدند تا تمرکز بر بررسی تأثیر نوع اتصال حفظ شود.

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.

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

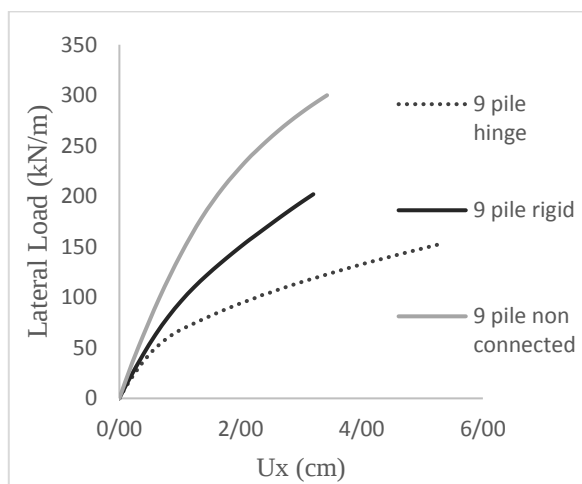


Fig. 12. Load diagram– horizontal displacement of the center of the foundation under a lateral load of 300 kPa with 9 piles in three modes of rigid connection, hinged connection and non- connected

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 جابجایی افقی کمتری در این حالت در پی رخ داده است.

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 جابجا 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

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 شده تا تأثیر اتصال‌ها بدون تداخل پارامترهای دیگر بررسی شود.

مقایسه نمودارهای مختلف بار- جابجایی نسبی مرکز

پی تحت بارگذاری استاتیکی قائم و جانبی

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

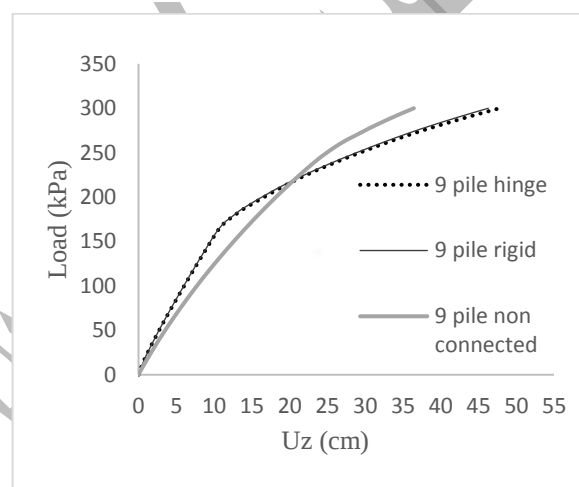


Fig. 11. Load diagram– vertical displacement of the center of the foundation under a vertical load of 300 kPa with 9 piles in three modes of rigid connection, hinged connection and non- connected

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

طبق نتایج شکل (۱۱) در حالت اتصال گیردار نمودار دوطبقی است و پس از رسیدن شمع‌ها به نقطه تسلیم و حداکثر ظرفیت باربری خود نمودار غیرخطی شده و شیب نمودار کاهش پیدا می‌کند. در حالت مفصل شمع‌ها به حداکثر ظرفیت خود نرسیده و همچنان نمودار در این حالت خطی است، بنابراین در حالت اتصال گیردار تا قبل از رسیدن شمع‌ها به حداکثر ظرفیت خود عملکرد بهتری نسبت به حالت مفصل دارند. دو حالت اتصال

مقدار ضریب یکنواختی تقریباً برابر یک است. تنها در حالت منفصل، مقدار نیروی محوری شمع میانی کمتر از شمع های گوشه است.

شکل ۱۴. مقادیر حداکثر و حداقل نیروهای محوری ایجاد شده در شمع ها در حالت ۹ شمع تحت بار جانبی ۲۴۰ کیلو نیوتن بر متر در انواع مختلف اتصال شمع و پی برای تعیین پارامتر ضریب یکنواختی ($R_N = \frac{N_{max}}{N_{min}}$)

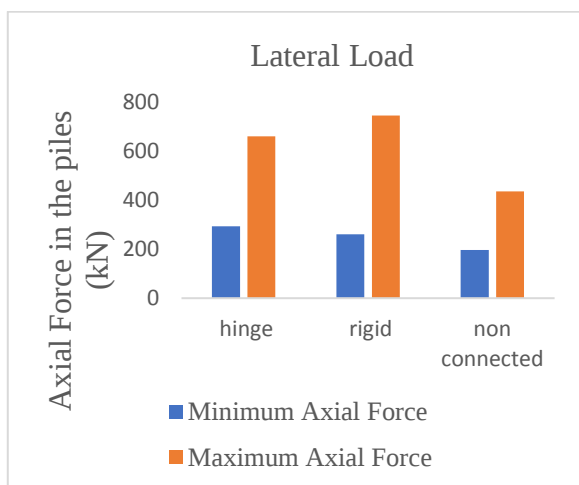


Fig. 14. The maximum and minimum axial forces occurred in piles in the case of 9 piles under 240 kN/m Lateral Load at different type of connections to determine the parameter of non-uniformity coefficient ($R_N = \frac{N_{max}}{N_{min}}$)

نتایج شکل (۱۴) نشان می دهد 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 منفصل رخ داده است.

در مجموع در صورتی که شمع ها تحت بارگذاری صورت گرفته با اتصال های 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 شمع های انتخابی می گردد.

ضخامت لایه بین شمع و پی در مقدار نشست یکنواخت ایجاد شده در حالت منفصل نسبت به دو حالت گیردار و مفصلی اثر زیادی دارد.

بررسی اثر نوع اتصال بین شمع و پی بر پارامتر ضریب عدم یکنواختی

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

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

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

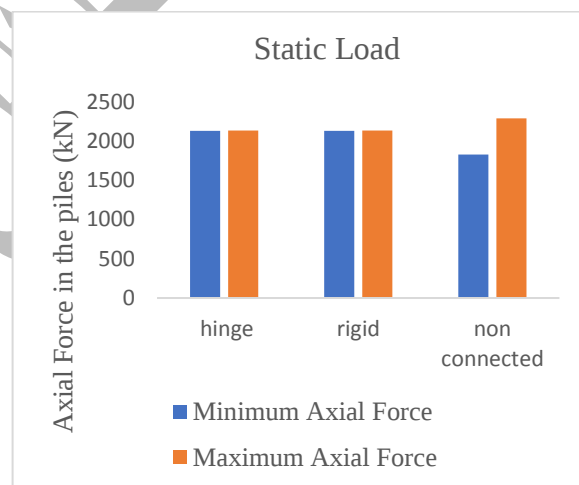


Fig. 13. The maximum and minimum axial forces occurred in piles in the case of 9 piles under 300 kPa static vertical load at different type of connections to determine the parameter of Non uniformity coefficient ($R_N = \frac{N_{max}}{N_{min}}$)

نتایج شکل (۱۳) نشان می دهد تحت بارگذاری استاتیکی قائم مقدار ضریب عدم یکنواختی در حالت منفصل بیشتر از دو حالت اتصال گیردار و مفصلی است. در دو حالت اتصال گیردار و مفصلی مقدار نیروی محوری در تمام شمع ها به دلیل رسیدن تمام شمع ها به حداکثر ظرفیت باربری خود، یکسان است و

فقط نیروی محوری و برشی را می‌گیرند. در حالت مفصل، 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.

مقایسه توزیع لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع در

سه حالت اتصال گیردار، مفصلی و مفصل

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

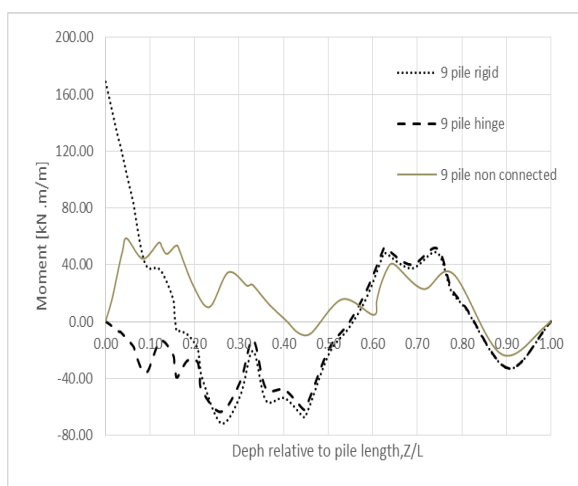


Fig. 17. Comparison of the bending moment created in the pile under the 100 kPa Static Vertical Load at different connection type

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 مفصل مقادیر لنگر خمشی در انتهای شمع صفر می‌باشد. 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 مفصل، مقادیر لنگر خمشی ایجاد شده در آن‌ها صفر است. در سه حالت بررسی شده، مقادیر لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع در حالت مفصل کمتر از دو حالت دیگر است.

مقایسه حداکثر لنگر خمشی ایجاد شده در شمع در سه

حالت اتصال گیردار، مفصلی و مفصل

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

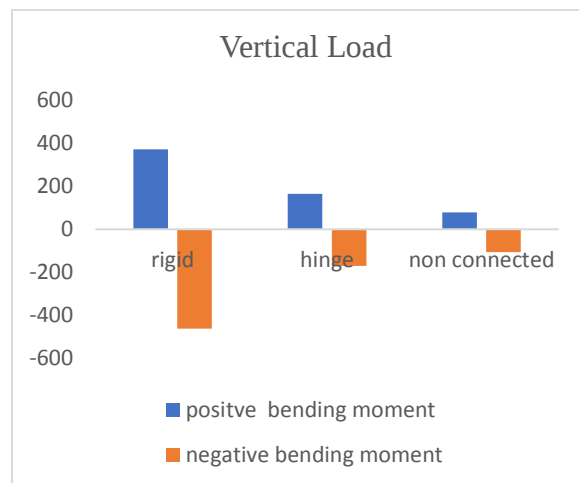


Fig. 15. Comparison of the maximum positive and negative bending moment created in the pile under the 300 kPa Static Vertical Load at different connection type

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

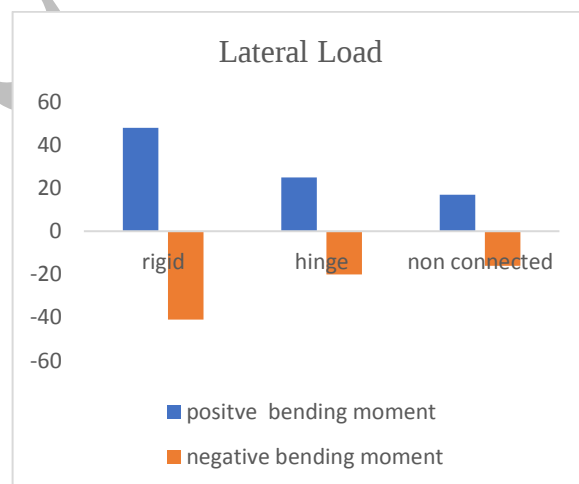


Fig.16. Comparison of the maximum positive and negative bending moment created in the pile under 240 kN/m Lateral Load at different connection type

با توجه به نتایج شکل‌های (۱۵) و (۱۶) مقدار بیشینه لنگر ایجاد شده در طول شمع در حالت اتصال گیردار رخ می‌دهد، به دلیل آن که در این حالت پی لنگر خمشی را به‌طور کامل به شمع منتقل می‌کند. در حالت مفصلی، لنگر خمشی کاهش یافته، چون شمع‌ها

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

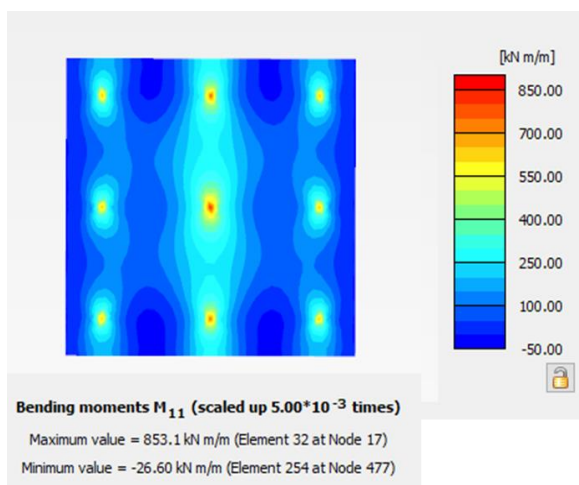


Fig. 19. Bending moment created in the raft foundation under the 300 kPa static vertical load in hinge connection case

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

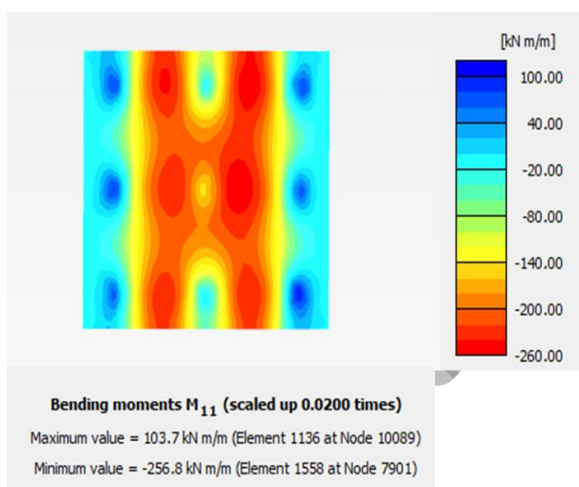


Fig. 20. Bending moment created in the raft foundation under the load of 300 kPa in Non-connected case

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٪ پایینی طول شمع، رفتار شمع به صورت گیردار است و به نوعی عمق گیرداری محسوب می‌شود اما در ۵۰٪ بالایی طول شمع تاثیر نوع اتصال وجود دارد و مقادیر لنگر خمشی با یکدیگر متفاوت هستند. بنابراین تاثیر 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

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

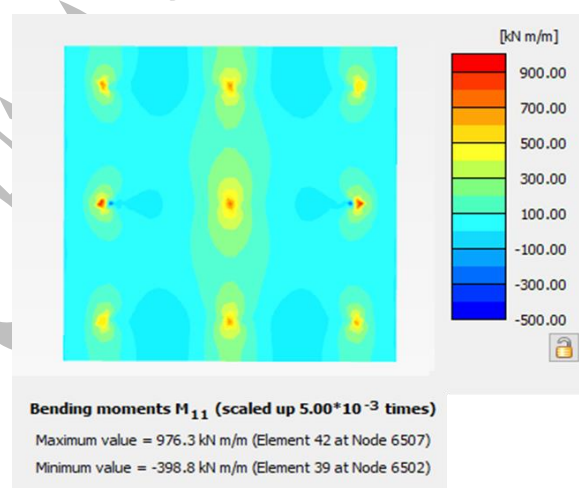


Fig. 18. Bending moment created in the raft under the 300 kPa static vertical load in rigid connection case

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

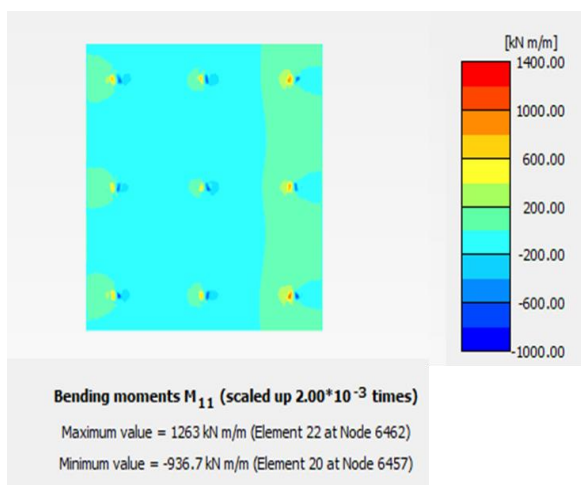


Fig. 22. Bending moment created in the raft foundation under 240 kN/m Lateral Load in rigid connection case

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

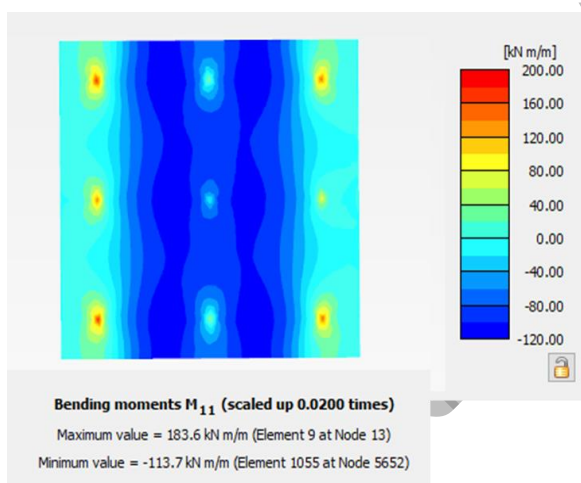


Fig. 23. Bending moment created in the raft foundation under 240 kN/m Lateral Load in hinge connection case

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

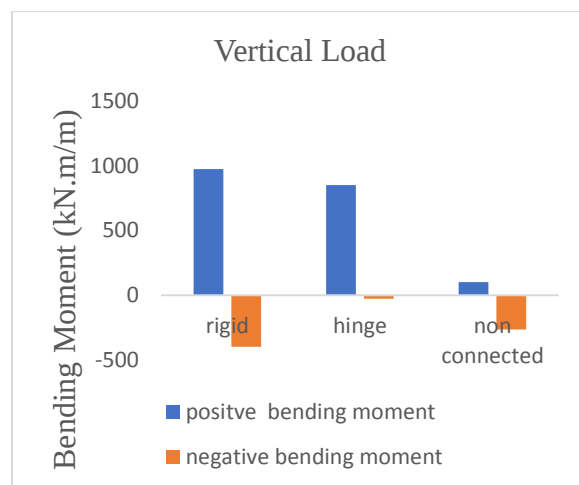


Fig. 21. Comparison of the maximum positive and negative bending moment created in the raft under the 300 kPa Static Vertical Load at different connection type

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 بدست 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.

مقدار و در حالت اتصال گیردار بیشترین مقدار می‌باشد. اتصال گیردار بهترین انتخاب برای سازه‌هایی است که نیاز به تحمل نیروهای عمودی و جانبی سنگین دارند، اما هزینه بالا و پیچیدگی طراحی را نیز به همراه دارد. اتصال مفصلی یک سیستم متعادل است که برای تحمل بارهای عمودی و جانبی مناسب است و انعطاف‌پذیری بیشتری دارد. اتصال مفصل گزینیه‌ای اقتصادی‌تر برای کاهش نشست‌های تفاضلی و کنترل بهتر تنش‌ها در پروژه‌هایی است که نیازی به تحمل نیروهای جانبی شدید ندارند.

مقایسه نیروی برشی ایجاد شده در پی در سه حالت

اتصال گیردار، مفصلی و منفصل

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

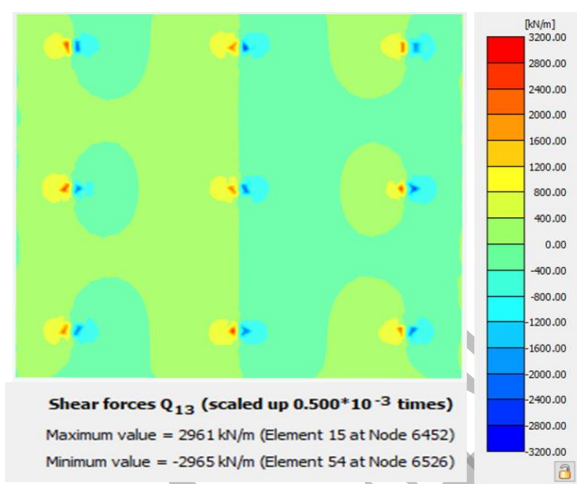


Fig. 26 Shear force created in the pile under the 300 kPa static vertical load in rigid connection case

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

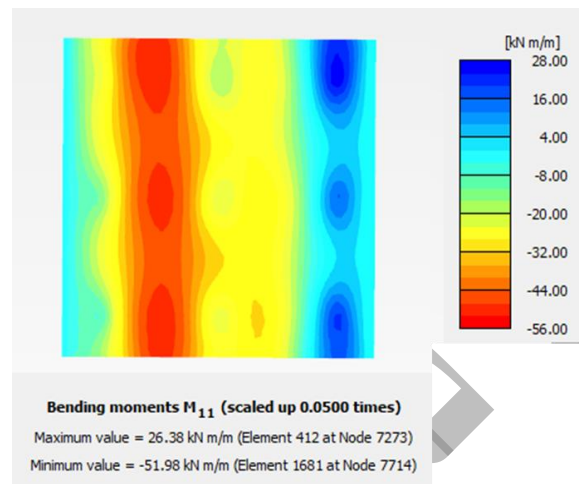


Fig. 24. Bending moment created in the raft foundation under 240 kN/m Lateral Load in Non- connected case

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

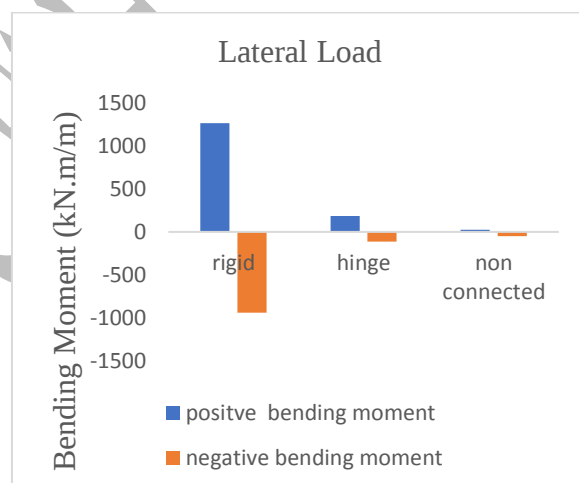


Fig. 25. Comparison of the maximum positive and negative bending moment created in the raft foundation under 240 kN/m Lateral Load at different connection type

نتایج شکل‌های (۲۲) تا (۲۵) نشان می‌دهد، تحت بارگذاری استاتیکی جانبی نیز کمترین مقدار لنگر خمشی مثبت و منفی ایجاد شده در پی در حالت منفصل رخ می‌دهد و بیشترین مقدار لنگر خمشی مثبت و منفی برای حالت اتصال گیردار می‌باشد.

مقدار لنگر خمشی ایجاد شده در شمع و پی تحت بارگذاری‌های استاتیکی قائم و جانبی در حالت منفصل دارای کمترین

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

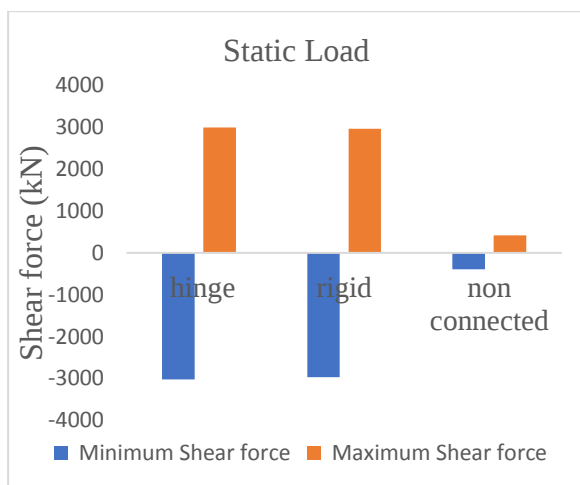


Fig. 29. Comparison of the Shear force created in the raft under the 300 kPa Static Vertical Load at different connection type

مقایسه نیروی برشی ایجاد شده در پی تحت بارگذاری استاتیکی قائم در شکل‌های (۲۶) تا (۲۹) نشان می‌دهد که بیشترین نیروی برشی در حالت اتصال مفصلی دیده می‌شود، زیرا بار منتقل شده به شکل نقطه‌ای از شمع به پی وارد می‌شود. در حالت اتصال گیردار نیز نیروی برشی کمی کمتر از حالت اتصال مفصلی است. در حالت منفصل، توزیع بار گسترده‌تر بوده و نیروی برشی نسبت به دو حالت دیگر کمتر است. کاهش مقدار نیروی برشی باعث کاهش مصرف آرماتور برشی و بهینه تر شدن طرح می‌گردد.

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

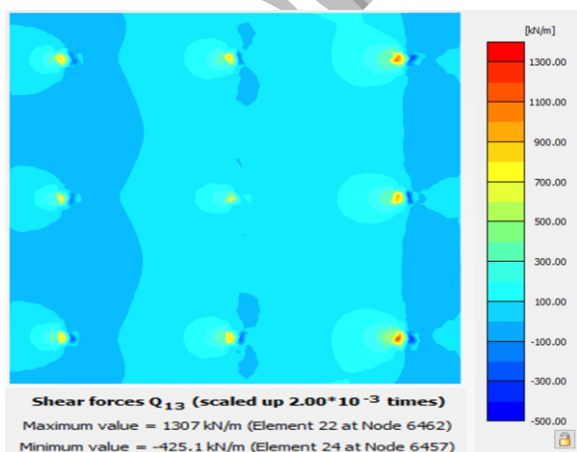


Fig. 30. Shear force created in the raft foundation under 240 kN/m Lateral Load in rigid connection case

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

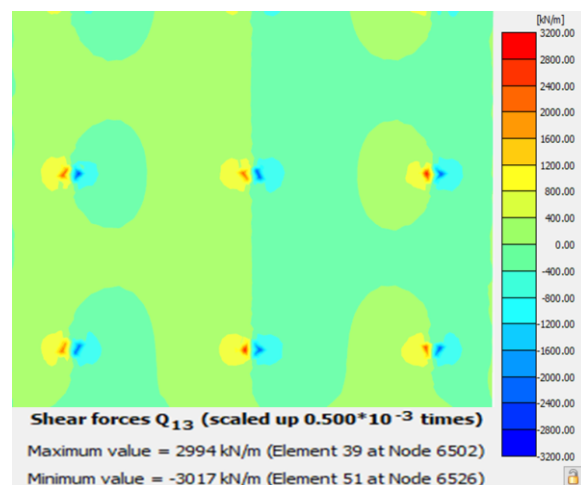


Fig. 27. Shear force created in the raft foundation under the 300 kPa static vertical load in hinge connection case

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

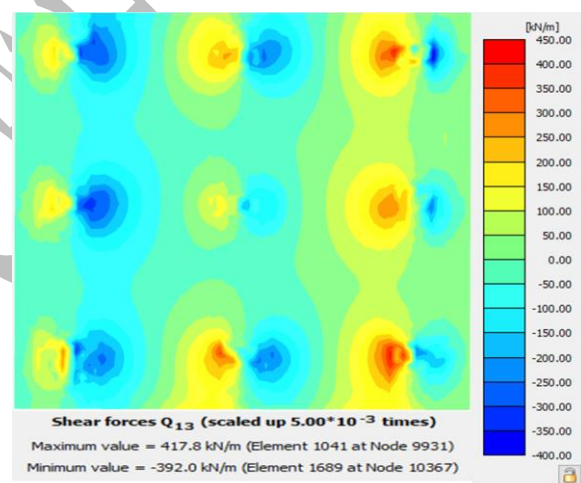


Fig. 28. Shear force created in the raft foundation under the load of 300 kPa in Non-connected case

نتیجه گیری

۱- در اتصال گیردار کاهش نشست کلی ولی احتمال نشست تفاضلی بیشتر وجود دارد، در حالت اتصال مفصلی کاهش نشست کلی و تفاضلی رخ می دهد و مناسب برای بارهای جانبی می باشد. 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 قوی تر می باشد و نسبت به دو اتصال دیگر پرهزینه تر است. اتصال مفصلی طراحی پیچیده دارد و برای اجرا نیاز به مصالح با کیفیت می باشد و هزینه اجرای آن از اتصال گیردار کمتر و از اتصال مفصل بیشتر است. اتصال مفصل ساده تر از دو حالت دیگر و به کیفیت و جنس مصالح لایه بالشتکی مرتبط می باشد، همچنین از دو حالت اتصال دیگر هزینه اجرای آن کمتر است.

۳- اتصال گیردار مناسب برای سازه های بلندمرتبه و سنگین در مناطق زلزله خیز می باشد. اتصال مفصلی در پروژه های نیازمند مقاومت بالا در برابر بارهای جانبی (مثل پل ها و ساختمان های بلند) کاربرد دارد. اتصال مفصل برای سازه های صنعتی یا ساختمان ها در خاک های ضعیف (تمرکز بر کنترل نشست) مناسب می باشد.

۴- مقدار لنگر خمشی ایجاد شده در شمع و پی تحت بارگذاری های استاتیکی قائم و جانبی در حالت مفصل دارای کمترین مقدار و در حالت اتصال گیردار بیشترین مقدار می باشد.

۵- در تحلیل انجام شده، با توجه به وجود خاک ماسه ای 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 تحت بارگذاری های وارده نشان می دهد که تحت بارگذاری استاتیکی قائم، مقدار نیروی محوری ایجاد شده در شمع در دو حالت اتصال گیردار و مفصلی تقریباً

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

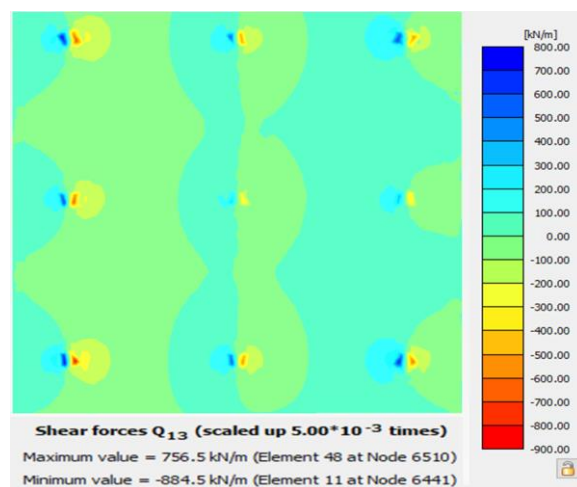


Fig. 31. Shear force created in the raft foundation under 240 kN/m Lateral Load in hinge connection case

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

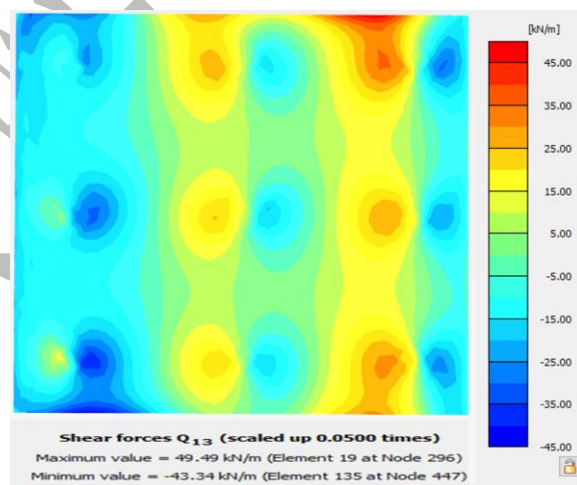


Fig. 32. Shear force created in the raft foundation under 240 kN/m Lateral Load in Non- connected case

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

Interface	المان فصل مشترک	با یکدیگر برابر است و در حالت منفصل حداکثر نیروی محوری
Differential Settlement	نشست تفاضلی	ایجاد شده در شمع بیشتر از دو حالت اتصال گیردار و مفصلی است.
Load Sharing Ratio	نسبت مشارکت باربری	
واژه نامه		
Load Transfer	مکانیسم انتقال بار	Piled Raft Foundation
Raft Thickness	ضخامت پی	پی شناور شمعی
Pile Spacing	فاصله بین شمع ها	Bending Moment
R_{inter}	ضریب کاهنده مقاومت	لنگر خمشی
Soil Stiffness	سختی خاک	Shear Force
Interaction Factor	ضریب اندرکنش	نیروی برشی
Pile Skin Friction	اصطکاک جانبی شمع	Axial Force
		نیروی محوری
		Total Settlement
		نشست کلی
		Cushion Layer
		لایه بالشتکی
		Numerical Model
		مدلسازی عددی

مراجع

- [1] M. F. Randolph, "Efficient design of piled rafts," in Proc. 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," Int. J. Civ. Eng., vol. 17, no. 6, pp. 793–808, 2019.
- [4] M. F. Randolph, "Design methods for pile groups and piled rafts," in Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 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, J. A. Hemsley, Ed. London, U.K.: Thomas Telford, 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," Transp. Infrastruct. Geotech., vol. 12, no. 1, pp. 1–33, 2025.
- [9] I. Jamil et al., "Analysis and design of piled raft foundation taking into account interaction factors," Adv. Civ. Eng., vol. 2022, no. 1, p. 1334136, 2022. doi: 10.1155/2022/1334136.
- [10] H. G. Poulos, "Piled raft foundations: design and applications," Géotechnique, vol. 51, no. 2, pp. 95–113, 2001.
- [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," Can. Geotech. J., vol. 47, no. 11, pp. 1271–1287, 2010. doi: 10.1139/T10-021.

- [13] P. Halder and B. M. Manna, "Connected versus disconnected piled raft systems: A comparative experimental assessment," in *Proc. Indian Geotech. Conf.*, 2022, vol. 2, pp. 125–131. doi: 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," *Int. J. Civ. Eng.*, 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.
- [16] X.-D. Cao, I. H. Wong, and M.-F. Chang, "Behavior of model rafts resting on pile-reinforced sand," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 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," *Comput. Geotech.*, vol. 63, pp. 121–134, 2015. doi: 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," *J. Civ. Environ. Eng.*, 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. (In Persian) doi: 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," *Transp. Geotech.*, vol. 52, p. 101565, 2025.
- [21] D. Park and J. Lee, "Comparative analysis of various interaction effects for piled rafts in sands using centrifuge tests," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 141, no. 1, p. 04014082, 2015.
- [22] P. Halder and B. M. Manna, "Performance evaluation of piled rafts in sand based on load-sharing mechanism using finite element model," *Int. J. Geotech. Eng.*, pp. 1–8, Feb. 2020.