

Parametric Study on the Differential Settlement of Piled Raft Foundations

Sanaz Shahbazi¹, Fariba Behrooz Sarand², Naseraldin Shahbazi^{3*}, Vahid Akrami⁴

1- M.Sc. graduate, Civil engineering department, Islamic Azad university Tabriz Branch, Tabriz, Iran

2- Assistant Professor, Civil engineering department, Islamic Azad university Tabriz Branch, Tabriz, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

4- Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

Differential settlement in pile foundations can adversely affect pile heads, foundations, and the structures resting on them. This article investigates the influence of various parameters such as pile length, diameter, spacing, and cap thickness on the differential settlement of wide pile foundations through finite element analysis. For this purpose, a raft foundation was modeled with varying numbers of piles and subjected to a distributed load using Abaqus software. The results showed that using a single pile at the center of the cap reduces settlement by 36%, and increasing the number of piles to 16 can reduce the foundation settlement by 68% compared to the raft foundation without piles. Furthermore, results showed that increasing the pile diameter from 60 to 100 centimeters has little impact on the amount of settlement, but it reduces the stresses developed in the body of the pile. Additionally, increasing pile length from 12 to 18 meters reduced immediate settlement at the center of the foundation by 33%. However, constant settlement at the edges caused a slight increase in differential settlement. Finally, it was observed that increasing the thickness of the cap is an effective solution for reducing differential settlement in pile foundations. With the increase in cap thickness, the load distribution becomes more uniform across the piles, leading to a reduction in differential settlement and an overall improvement in foundation performance. Investigations showed that the amount of uneven settlement in the foundation has a direct relationship with the ratio of the free distance between the last row of piles and the edge of the cap to the thickness of the cap, such that for samples with a ratio of less than 2.5, the uneven settlement is almost negligible. These findings can also result in a more efficient parameter selection process, and prevention of uneven differential settlement.

ARTICLE INFO

Receive Date: 20 November 2024

Revise Date: 18 January 2025

Accept Date: 07 February 2025

Keywords:

Raft pile foundation

Pile group

Differential settlement

Finite element analysis

ABAQUS software

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.470873.3554

*Corresponding author: Naseraldin Shahbazi

Email address: n_shahbazi@uma.ac.ir

مطالعه پارامتریک نشست نامساوی در پی‌های شمع‌ی

ساناز شاهبازی^۱، فریبا بهروز سرند^۲، ناصرالدین شاهبازی^{۳*}، وحید اکرمی^۴

۱- دانش آموخته کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۴- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

بروز نشست‌های نامساوی در پی‌های شمع‌ی می‌تواند اثرات مخربی بر روی سر شمع‌ها، پی‌ها و سازه‌های مستقر بر روی آنها داشته باشد. در همین راستا، مقاله حاضر به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف نظیر طول، قطر و فاصله شمع‌ها و همچنین ضخامت کلاهک بر روی نشست نامساوی پی‌های گسترده شمع‌ی به صورت المان محدود می‌پردازد. بدین منظور، ابتدا پی گسترده (کلاهک) بدون شمع و سپس با تعداد مختلف شمع تحت بار گسترده در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و تحلیل گردید. نتایج نشان داد که استفاده از تک شمع در مرکز کلاهک باعث کاهش نشست به میزان ۳۶٪ و افزایش تعداد شمع‌ها به ۱۶ عدد می‌تواند نشست پی را تا ۶۸٪ نسبت به حالت کلاهک بدون شمع کاهش دهد. در ادامه، بررسی تاثیر قطر شمع‌ها نشان داد که افزایش قطر از ۶۰ به ۱۰۰ سانتی‌متر تاثیر چندانی بر میزان نشست ندارد، اما تنش‌های شکل‌گرفته در بدنه شمع را کاهش می‌دهد. همچنین، در بررسی طول شمع، افزایش آن از ۱۲ به ۱۸ متر موجب ۳۳٪ کاهش در نشست آنی مرکز پی گردید. این در حالی است که ثابت ماندن میزان نشست در لبه‌های پی باعث افزایش اندک نشست تفاضلی شد. نهایتاً، ملاحظه شد که افزایش ضخامت کلاهک یک راهکار مؤثر برای کاهش نشست تفاضلی در پی‌های شمع‌ی می‌باشد. با افزایش ضخامت کلاهک، توزیع بار به‌طور یکنواخت‌تری بر روی شمع‌ها صورت می‌گیرد و این امر منجر به کاهش نشست تفاضلی و بهبود عملکرد کلی پی می‌شود. بررسی‌ها نشان داد که میزان نشست نامساوی پی رابطه مستقیم با نسبت فاصله آزاد بین آخرین ردیف شمع و لبه کلاهک به ضخامت کلاهک دارد، به‌طوری‌که برای نمونه‌های با نسبت کمتر از ۲/۵، نشست نامساوی تقریباً ناچیز می‌باشد. نتایج این تحقیق مهندسين طراح را در درک رفتار اندرکنش پی، شمع و خاک و انتخاب صحیح پارامترهای طراحی برای مقابله با نشست‌های نامساوی کمک خواهد کرد.

کلمات کلیدی: پی گسترده شمع‌ی، گروه شمع، نشست نامساوی، تحلیل المان محدود، نرم‌افزار آباکوس.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.470873.3554	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.470873.3554	۱۴۰۴/۰۹/۳۰	۱۴۰۳/۱۱/۱۹	۱۴۰۳/۱۱/۱۹	۱۴۰۳/۱۰/۲۹	۱۴۰۳/۰۸/۳۰
ناصرالدین شاهبازی					*نویسنده مسئول	
n_shahbazi@uma.ac.ir					پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

شمع‌ها یا پی‌های عمیق عناصر ستونی نسبتاً لاغری هستند که به صورت قائم یا کمی شیب‌دار در زیر سازه‌ها بکار می‌روند، تا بار سازه‌های فوقانی را به لایه‌های مناسب‌تر خاک در اعماق پایین‌تر منتقل کنند. طول یا عمق قرارگیری شمع در خاک، سطح مقطع، جنس، روش اجرا و چگونگی عملکرد شمع‌ها از متغیرهای اصلی در طراحی این اجزای سازه‌ای می‌باشند که با توجه به نیازهای پروژه تعیین می‌گردند. به طور کلی، شمع‌ها می‌توانند اتکایی، اصطکاکی یا ترکیبی از این دو بوده باشند. استفاده از سیستم پی عمیق زمانی توصیه می‌شود که حداقل یکی از شرایط زیر برقرار باشد:

- لایه سطحی خاک فاقد مقاومت کافی بوده و لایه‌های مقاوم‌تر خاک در اعماق پایین‌تر یافت شوند. به عبارت دیگر، حتی اگر از پی‌های گسترده استفاده شود، ظرفیت باربری لازم توسط لایه‌های سطحی تامین نگردد.
- لایه یا لایه‌های سطحی نشست پذیر، تورم‌زا و فرو ریزی باشند یا سازه به نشست غیرمتقارن بسیار حساس باشد.
- بارهای متمرکز بزرگی باید از سازه به خاک منتقل شوند بطوریکه تحمل این نیروها توسط پی سطحی امکان‌پذیر نباشد.

در صورت وجود هر کدام از دلایل فوق، برای انتقال بارها و کنترل نشست‌های یکنواخت و غیریکنواخت سازه می‌توان از شمع‌ها استفاده نمود. نشست شمع‌ها شامل نشست به علت تغییر شکل الاستیک تنه شمع، نشست الاستیک خاک در نوک شمع و نشست الاستیک خاک در اطراف شمع می‌باشد. معمولاً نشست‌های یکنواخت آسیب‌های جدی به سازه فوقانی نمی‌رسانند. هرچند این نشست نیز در مبحث هفتم مقررات ملی ساختمانی بسته به نوع خاک، نوع پی و سیستم سازه‌ای محدود می‌گردد. اما نشست‌های نسبی یا غیریکنواخت می‌توانند آسیب‌های جدی بر روی سازه فوقانی داشته باشند. در این حالت، چرخش به مقدار 0.0033 رادیان حد ایجاد ترک سازه‌ای و چرخش به مقدار 0.0067 رادیان حد ایجاد خرابی در اسکلت سازه را بیان می‌کند. در نتیجه نشست غیریکنواخت یکی از عوامل مهم خرابی و بلااستفاده شدن روسازه بوده و حتماً در روند طراحی باید مدنظر قرار گیرد.

تحقیقات متعددی بر روی رفتار پی‌های شمعی و گروه شمع‌ها انجام شده است. از جمله، هوریکوشی و راندولف^۱ [۱] در مقاله‌ای به بررسی طراحی بهینه پی‌های شمع‌دار پرداخته‌اند. در تحقیق مشابهی، پراکوسو و کوله‌اوی^۲ [۲] در مقاله‌ای به بررسی طراحی پی‌های شمع‌دار پرداخته‌اند که هدف از اضافه کردن شمع‌ها به پی‌ها، کنترل و کاهش جابجایی نامتقارن سیستم پی و شمع است. دو روش برای طراحی بهینه‌ی شمع‌ها به منظور کاهش جابجایی‌ها توسعه یافته‌اند که اولی بر روی کاهش میانگین جابجایی و دومی بر روی کاهش جابجایی نامتقارن تمرکز دارد. مک‌کابه و لهانه^۳ [۳] در مقاله‌ای به بررسی رفتار گروه شمع‌های کوبیده شده در سیلت رس‌دار تحت بارمحوری پرداخته‌اند. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داده است که عملکرد گروه شمع‌ها در حین بارگذاری به شدت تحت تاثیر اندرکنش بین نیروی برشی وارد بر بدنه و نیروی قائم وارد بر نوک شمع بوده است. در ادامه، مک‌کابه و شیل^۴ [۴] به بررسی ضرایب اندرکنش غیرخطی گروه شمع‌ها به صورت المان محدود و مقایسه آن با نتایج به دست آمده از مکانیک محیط پیوسته پرداختند. ژان و همکاران^۵ [۵] در مقاله‌ای به مدل‌سازی ظرفیت باربری قائم پی شمعی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداخته‌اند که در این مقاله برخی جنبه‌های تحلیل عددی با جزئیات مورد بررسی قرار گرفته است. از دیگر تحقیقات می‌توان به مطالعات سینها و هانا^۶ [۶] بر روی رفتار عددی پی‌های گسترده شمعی اشاره نمود. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که هندسه شمع‌ها تاثیر چندانی بر روی نتایج نخواهد داشت و همچنین مشاهده گردید که با افزایش فاصله شمع‌ها، نشست افزایش می‌یابد. مالی و سینگ^۷ [۷] در مطالعه‌ای بر روی پی‌های سکوه‌ای شناور فراساحل به این نتیجه رسیدند که با افزایش فاصله شمع‌ها بین ۵ تا ۶ برابر قطر شمع، نشست‌ها در پی عمدتاً یکنواخت خواهد بود. این محققین همچنین ملاحظه کردند که با کاهش صلبیت کلاهک نشست نسبی افزایش می‌یابد. حجازی‌راد و همکاران [۸] با

¹ Horikoshi and Randolph

² Prakoso and Kulhawy

³ McCabe and Lehane

⁴ McCabe and Lehane

⁵ Zhan et al.

⁶ Sinha and Hanna

⁷ Mali and Singh

انجام آزمایش‌های بارگذاری کششی و فشاری رفتار شمع‌های پیچشی را به صورت میدانی و آزمایشگاهی بررسی نموده و ظرفیت آن‌ها را مناسب گزارش کرده‌اند. ملک‌خانی و بلوری بزاز [۹] ظرفیت باربری پی رادیه شمعی را به صورت آزمایشگاهی بررسی نموده و نتایج را با مدل هایپرپولیک اصلاح شده مقایسه کرده‌اند. در ادامه برای انطباق مناسب بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی، مدل مزبور با استفاده از روش‌های محاسباتی تصحیح شده است. شوش‌پاشا و شرفخواه [۱۰] طی مطالعه آزمایشگاهی به بررسی رفتار پی‌های گسترده دارای شمع در خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری قائم پرداختند. این محققین با مقایسه ظرفیت پی گسترده تنها با نتایج پی گسترده دارای شمع دریافتند که به ازای تعداد شمع برابر، ظرفیت باربری نهایی پی‌های گسترده دارای شمع به مراتب بیشتر از پی گسترده تنه می‌باشد. با توجه به تاثیر نوع پی بر رفتار روسازه، نورعلیزاده و همکاران [۱۱] رفتار سازه فولادی قاب خمشی متکی بر سه نوع پی عمیق را تحت اثر حرکت نسبی حاصل از شکست گسل نرمال بررسی نموده و ملاحظه کردند که نشست کلی و تفاضلی سازه متکی بر گروه شمع کمتر از پی گسترده می‌باشد. اسدی نیا و همکاران [۱۲] در مقاله‌ای برای به دست آوردن سهم باربری کلاهدک از بار کل به این نتیجه رسیده‌اند که هر چه فاصله شمع‌ها بیشتر و همچنین قطر شمع کمتر شود، سهم باربری کلاهدک بیشتر خواهد شد. بر اساس این مطالعه سهم باربری کلاهدک از بار کل وارد بر پی، بین ۱۵ تا ۴۲ درصد است. سوسیلا و همکاران^۸ [۱۳] طی یک تحقیق المان محدود به بررسی تعامل بین پی‌های شمعی و کلاهدک در سیستم‌های شمع-کلاهدک در خاک‌های رسی پرداخته و مکانیزم انتقال بار و تغییر شکل این سیستم را مورد تحلیل قرار داده‌اند. در تحقیق مشابهی، بهارتی و همکاران^۹ [۱۴] رفتار بار-نشست پی‌های شمعی بر روی شن را تحت بارگذاری عمودی بررسی کرده‌اند. نتایج تحقیق شامل یک نمودار راهنما برای انتخاب پیکربندی‌های مناسب پی‌های شمعی با توجه به ایمنی و جنبه‌های اقتصادی طراحی است. جمیل و همکاران [۱۵] طی تحقیقی عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود Plaxis 3D به بررسی تأثیر حفره‌ها بر نشست پی‌های شمعی تحت بارهای زلزله در خاک‌های شنی خشک پرداخته و نشان دادند که نزدیکی حفره به لبه شمع‌ها و افزایش قطر حفره باعث افزایش نشست گروه شمع‌ها در اثر زلزله می‌شود. مداک و سینگ^{۱۰} [۱۶] در مطالعه‌ای به بررسی رفتار پی‌های شمعی بزرگ بر روی خاک‌های رسی سخت پرداخته‌اند و تأثیر پارامترهایی نظیر تعداد و فاصله شمع‌ها و شدت بارگذاری را مورد تحلیل قرار داده‌اند. فتاح و همکاران [۱۷] در مطالعه‌ای به بررسی رفتار و عملکرد پی‌های شمعی غیرمتصل (UCPR) در خاک‌های رسی تحت بارگذاری عمودی پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از روش المان محدود سه‌بعدی، تأثیر پارامترهایی نظیر طول شمع‌ها و ضخامت بالشتک را بر روی نشست و نسبت تنش کلاهدک تحلیل کرده و نشان داده‌اند که افزایش ضخامت بالشتک می‌تواند به کاهش نشست و بهبود نسبت تنش کلاهدک کمک کند. از دیگر تحقیقات انجام گرفته در سال‌های اخیر می‌توان به مطالعات جسیم و همکاران [۱۸] بر روی رفتار بار-جایجایی شمع مارپیچ در ماسه مرطوب و مطالعات محمد-علی نژاد و همکاران [۱۹] بر روی گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای اشاره نمود.

مطابق توضیحات ارائه شده در بخش مرور مطالعات، در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی بر روی رفتار پی‌های شمعی صورت گرفته است که هر کدام از آنها تاثیر برخی از پارامترهای موثر را بررسی نموده و عمدتاً بر روی کنترل نشست کلی مجموعه و تعیین سهم باربری شمع‌ها و کلاهدک متمرکز بوده‌اند. از آنجاکه بروز نشست‌های نامساوی در پی‌های گسترده متکی بر شمع می‌تواند باعث ایجاد اثرات مخرب بر روی رفتار سازه فوقانی شود، لذا انجام تحقیقات بیشتر بر روی انواع پی‌های شمعی با هندسه و شرایط متفاوت برای شناخت میزان تاثیر پارامترهای مختلف ضروری می‌باشد. در همین راستا، در این مقاله سعی شده است تا با انجام یک بررسی المان محدود جامع، تاثیر پارامترهای مختلف نظیر طول، قطر و فاصله شمع‌ها و همچنین ضخامت کلاهدک بر روی نشست نامساوی پی‌های گسترده شمعی مورد مطالعه قرار گیرد. برای این منظور، ابتدا هندسه نمونه‌های مورد بررسی و نحوه مدل‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار آباکوس شرح داده می‌شود. در ادامه نتایج مربوط به بررسی تاثیر هر پارامتر به صورت جداگانه ارائه شده و در نهایت نتایج به صورت کلی جمع‌بندی و مقایسه خواهد شد.

⁸ Susila et al.

⁹ Bhartiya et al.

¹⁰ Modak and Singh

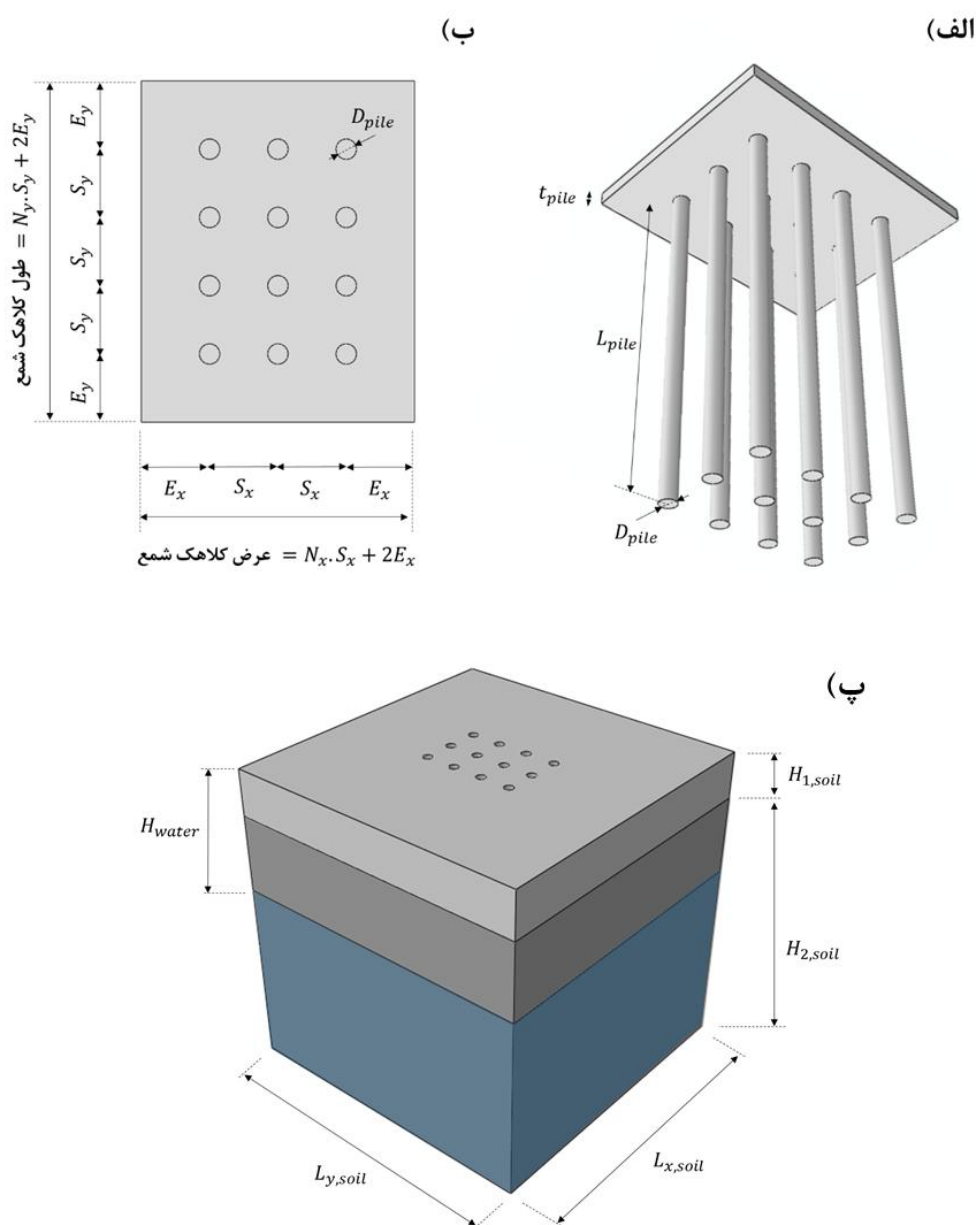
۲- مدل سازی المان محدود

نرم افزار آباکوس، یکی از قدرتمندترین نرم افزارهای شبیه سازی به روش المان محدود می باشد و از تحلیل های ساده تا پیشرفته را به نحو شایانی انجام می دهد. از مهم ترین قابلیت های نرم افزار آباکوس، نسبت به سایر نرم افزارهای مشابه، امکان ایجاد سریع مدل های با هندسه پیچیده، داشتن رویه های حل صریح و ضمنی و دارا بودن مدل های رفتاری پیشرفته می باشد. در این پژوهش از نرم افزار آباکوس برای مدل سازی و تحلیل مسئله مورد بررسی استفاده شده است.

۳- هندسه نمونه ها

با توجه به اینکه مطالعات صورت گرفته در این پژوهش به صورت پارامتریک می باشد، لذا هندسه مورد استفاده باید انعطاف پذیری مناسبی برای در نظر گرفتن تاثیر پارامترهای مختلف (نظیر تعداد، قطر و فاصله شمع ها) را داشته باشد. شکل ۱ (الف) و (ب) نمایی از هندسه گروه شمع و کلاک آن را برحسب پارامترهای مربوطه نمایش می دهد. این مدل مشتمل بر یک گروه شمع با چینش مستطیلی می باشد. تعداد شمع ها در راستای x با پارامتر N_x و تعداد شمع ها در راستای y با N_y نشان داده می شود. قطر شمع ها با پارامتر D_{pile} ، طول شمع با پارامتر L_{pile} و ضخامت کلاک شمع با پارامتر t_{pile} مشخص شده است.





شکل ۱: هندسه مدل مورد بررسی؛ الف) نمای سه بعدی گروه شمع و کلاهک آن؛ ب) نمای بالای گروه شمع و کلاهک آن؛ پ) هندسه محیط خاک

فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها در راستای x با S_x و فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها در راستای y با S_y تعریف شده است. همچنین فاصله از وسط شمع انتهایی تا لبه کلاهک شمع در راستای x با E_x و فاصله از وسط شمع انتهایی تا لبه کلاهک شمع در راستای y با E_y تعیین می‌شود. در نتیجه طول و عرض کلاهک شمع‌ها از روابط زیر تعیین می‌گردد:

$$\text{طول کلاهک شمع‌ها} = N_x \times S_x + 2 \times E_x \quad (1)$$

$$\text{عرض کلاهک شمع‌ها} = N_y \times S_y + 2 \times E_y \quad (2)$$

محیط خاک به صورت مکعبی با طول، عرض و ارتفاعی برابر با L_x, soil ، L_y, soil و H_{soil} مدل سازی شده است. همچنین ارتفاع خاک به دو لایه با ضخامت $H_{1, \text{soil}}$ و $H_{2, \text{soil}}$ تقسیم شده است. تراز سطح آب در ارتفاع H_{water} از سطح زمین در نظر گرفته شده است. شکل ۱(پ)

نمایی از محیط خاک را که در نرم افزار آباکوس مدل سازی شده است به همراه پارامترهای مربوطه نمایش می دهد. محل چاهک های شمع در نظر گرفته شده بر روی محیط خاک باید انطباق دقیق با هندسه مجموعه شمع داشته باشد تا این دو مدل بتوانند بر روی هم قرار گرفته و تشکیل مدل اصلی را بدهند.

به منظور بررسی پارامترهای مختلف در این پژوهش و مقایسه نتایج تحلیل های انجام شده در نرم افزار آباکوس، ابتدا یک مدل مرجع در نظر گرفته شده است. ابعاد این مدل بر اساس محدوده های معمول مورد استفاده در مطالعات پیشین و ادبیات علمی انتخاب شده است. در مطالعات پیشین محیط خاک به صورت مکعبی با ابعادی بین ۲۰ تا ۱۷۵ متر با یک یا دو لایه خاک فرض شده است [۱۳-۱۷]. همچنین استفاده از کلاهک با ابعادی بین ۱۲ تا ۳۸ متر و ضخامت بین ۰/۵ تا ۳/۰ متر معمول می باشد [۱۳-۱۷]. طول شمع های مورد بررسی در مطالعات پیشین در محدوده ۸ تا ۲۰ متر و قطر آنها در محدوده ۰/۵ تا ۱/۵ متر متغیر بوده است [۱۳-۱۷]. در همین راستا، ابعاد محیط خاک در تحقیق حاضر برابر با $30 \times 30 \times 30$ متر و ستون خاک به صورت دو لایه در نظر گرفته شده است. خاک لایه اول خاک کم مقاومت با عمق ۵ متر و خاک لایه دوم خاک با مقاومت بالاتر به عمق ۲۵ متر فرض شده است. همچنین خط تراز آب ۱۰ متر پایین تر از سطح زمین و خاک فاقد جریان آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است. ابعاد کلاهک 15×15 متر و ضخامت آن برابر با ۱ متر، طول اولیه شمع برابر با ۱۲ متر و قطر آن برابر با ۰/۶ متر فرض شده است. مشخصات مدل های مورد بررسی در تحقیق حاضر در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات مدل های مورد بررسی در تحقیق حاضر

شماره نمونه	پارامتر مورد بررسی	ضخامت کلاهک	تعداد شمع	قطر شمع	طول شمع
۱		۱ متر	-	۰/۶ متر	۱۲ متر
۲		۱ متر	تک شمع	۰/۶ متر	۱۲ متر
۳	تعداد شمع	۱ متر	۴ تایی	۰/۶ متر	۱۲ متر
۴		۱ متر	۹ تایی	۰/۶ متر	۱۲ متر
۵		۱ متر	۱۶ تایی	۰/۶ متر	۱۲ متر
۶	قطر شمع	۱ متر	۹ تایی	۰/۸ متر	۱۲ متر
۷		۱ متر	۹ تایی	۱ متر	۱۲ متر
۸	طول شمع	۱ متر	۹ تایی	۰/۶ متر	۱۵ متر
۹		۱ متر	۹ تایی	۰/۶ متر	۱۸ متر
۱۰		۱/۲۵ متر	۹ تایی	۰/۶ متر	۱۲ متر
۱۱	ضخامت کلاهک	۱/۵۰ متر	۹ تایی	۰/۶ متر	۱۲ متر
۱۲		۲/۰ متر	۹ تایی	۰/۶ متر	۱۲ متر

۴- مشخصات مصالح

در تحقیق حاضر مصالح شمع با استفاده از مدل الاستیک با مدول الاستیسیته برابر با ۲۰ گیگاپاسکال شبیه سازی شده است. محیط خاک به صورت دولایه در نظر گرفته شده است که خاک لایه بالا خاک کم مقاومت با ظرفیت باربری 1 kg/cm^2 و خاک لایه پایین خاک با مقاومت بالاتر با ظرفیت باربری 10 kg/cm^2 فرض شده است. برای مدل سازی رفتار خاک در محدوده الاستیک، از مدل رفتاری الاستیک متخلخل استفاده شده است. همچنین برای مدل سازی رفتار در محدوده غیرخطی، از مدل رفتاری دراکر-پراگر اصلاح شده استفاده شده است. مدل دراکر-پراگر به طور گسترده ای در برنامه های تحلیل اجزاء محدود برای انواع مختلف کارهای مهندسی استفاده شده است. مدل کلاهک برای رفتار خاک مناسب است، چرا که قابلیت در نظر گرفتن اثر تاریخچه تنش، مسیر تنش، اتساع و اثر تنش اصلی متوسط را داراست. این مدل قادر است رفتار غیرخطی مواد را به خوبی شبیه سازی کند و دارای سطوح تسلیم پیچیده تری است که می تواند رفتار مواد را در شرایط مختلف بارگذاری بهتر توصیف کند. علاوه بر این، رویه تسلیم این مدل به دلیل پیوستگی و عدم دارا بودن گوشه های تیز، از نظر ریاضی پایدارتر است و می تواند به راحتی در تحلیل های عددی پیاده سازی شده و حصول همگرایی را تسهیل نماید.

سطح تسلیم مدل خمیری اصلاح شده دراکر-پراگر شامل سه بخش است: (۱) مخروط گسیختگی برشی دراکر-پراگر، (۲) کلاهدک بیضی شکل که با زاویه قائمه محور تنش موثر متوسط را قطع می‌کند و (۳) یک ناحیه انتقال ملایم بین سطح گسیختگی برشی و کلاهدک. مشخصات رفتاری خاک مورد استفاده در تحلیل‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است با توجه به اینکه داده‌های گزارش شده توسط آسانابانی و همکاران [۲۰] برای مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در صحت‌سنجی عددی مبتنی بر مدل موهر-کولمب بوده است، لذا برای حفظ سازگاری بین دو مدل رفتاری^{۱۱} از روابط ارائه شده در مرجع [۲۲] برای تعیین رویه تسلیم مدل دراکر-پراگر استفاده شده است. مطابق جدول، زاویه اصطکاک داخلی برای خاک مورد استفاده در تحلیل‌ها برابر با 40° (مطابق با گزارش آسانابانی و همکاران [۲۰]) بوده است که با جایگذاری آن در روابط مدل DP4 مرجع [۲۲]، شیب مخروط دراکر-پراگر برابر با $\beta=50^\circ$ محاسبه شده است.

جدول ۲: مشخصات خاک مورد استفاده در تحلیل‌ها

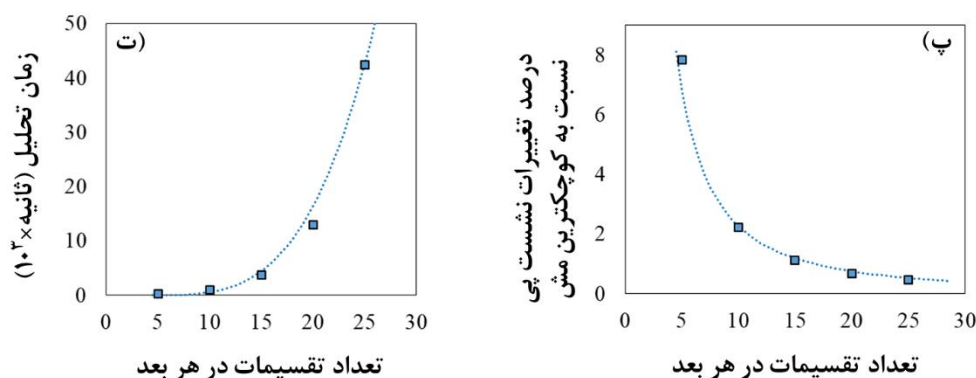
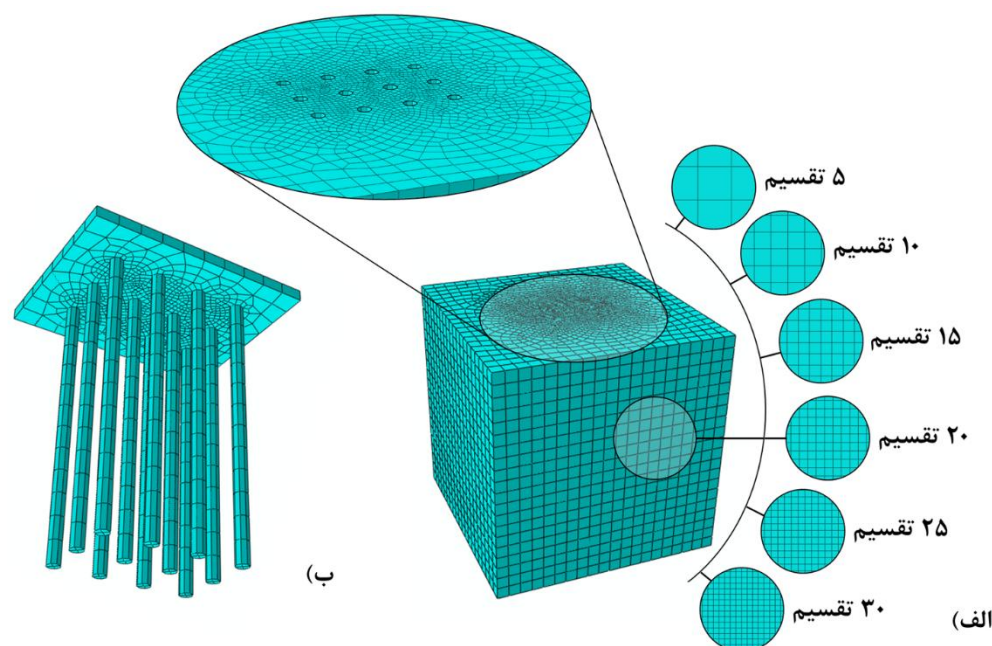
نام پارامتر	نماد	واحد	لایه بالا	لایه پایین
چگالی خاک اشباع	γ_{sat}	N/m^3	۱۸۵۰۰	۱۸۰۰۰
تراوایی	K	m/s	۶۰	۶۰
نسبت تخلخل	e	-	۱٫۵	۱٫۰
چگالی آب	γ_f	N/m^3	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰
مدول بالک لگاریتمی	K	-	۰٫۲	۰٫۲
ضریب پواسون	ν	-	۰٫۳۵	۰٫۴۵
حد کشش	p_t^{el}	N/m^2	۰٫۰	۰٫۰
چسبندگی	d'	N/m^2	۱۰۰٫۰	۱۰۰٫۰
زاویه اصطکاک	ϕ	$^\circ$	۴۰	۴۰
شیب مخروط دراکر-پراگر	β'	$^\circ$	۵۰	۵۰
پارامترهای رویه تسلیم	R	-	۰٫۴	۰٫۴
	$\epsilon_{vol}^{pl(0)}$	-	۰٫۰	۰٫۰
	α	-	۰٫۱	۰٫۱
	K	-	۰٫۷۷۸	۱٫۰
سخت‌شوندگی سطح تسلیم	$\sigma_{\epsilon=0}$	N/m^2	۱۰۵	۱۰۶
	$\sigma_{\epsilon=0.01}$	N/m^2	2×10^5	2×10^6

۵- مش‌بندی نمونه‌ها

برای انواع مسائل مختلف، طیف وسیعی از المان‌ها در نرم‌افزار آباکوس قابل استفاده است. در تحقیق حاضر از المان‌های مکعبی ۸ گرهی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (C3D8R) برای شبیه‌سازی مجموعه شمع و کلاهدک استفاده شده است. مدل‌سازی محیط خاک با

^{۱۱} ر.ک. بند ۲۳-۳-۱ راهنمای آباکوس در خصوص مدل رفتاری دراکر-پراگر و انطباق آن با مدل موهر-کولمب [۲۱]

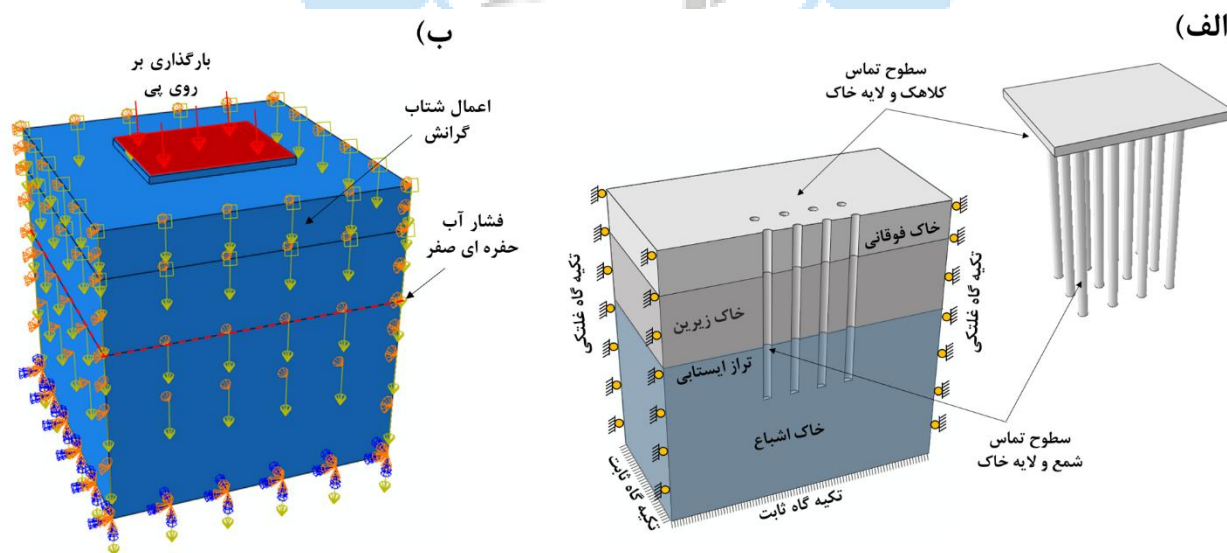
استفاده از المان‌های مکعبی ۸ گرهی گسترش یافته برای تحلیل تنش در مصالح متخلخل (C3D8P) انجام گرفته است. این نوع المان علاوه بر درجات آزادی جابجایی، دارای درجات آزادی از نوع فشار آب حفره‌ای بوده و استفاده از آن برای در نظر گرفتن نیروی تراوش ناشی از تغییرات فشار آب حفره‌ای در خاک ضروری می‌باشد. لازم به ذکر است که استفاده از المان‌های هرمی ۴ گرهی، زمان تحلیل را به شدت بالا برده و باعث بروز مشکلاتی از جنس واگرایی در روند تحلیل می‌شود. برای انتخاب ابعاد مش بندی، از تحلیل حساسیت مش بر روی نمونه‌ای تک شمعی استفاده شده است. نتایج این تحلیل در نمودارهای شکل ۲ ارائه شده است. مطابق این نمودارها، با افزایش تقسیمات مش (کاهش اندازه مش) از درصد تغییرات نشست پی کاسته شده و دقت تحلیل افزایش می‌یابد. این درحالی است که زمان مورد نیاز برای تحلیل به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. برای حفظ دقت مناسب و در عین حال دستیابی به زمان منطقی برای تحلیل، تعداد تقسیمات در مش بندی نمونه‌ها برابر با ۱۵ انتخاب شده است. ابعاد مش‌های مورد استفاده با نزدیک شدن به شمعی‌ها و چاهک‌های شمعی کاهش و با دور شدن از این نواحی افزایش می‌یابد. شکل ۲ نمونه‌ای از مش بندی مورد استفاده برای محیط خاک و مجموعه شمعی را نمایش می‌دهد.



شکل ۲: مش بندی مدل عددی؛ الف) محیط خاک؛ ب) مجموعه شمعی؛ پ) درصد تغییرات در نشست پی بر حسب اندازه مش؛ ت) زمان تحلیل بر حسب اندازه مش

۶- قیدها، شرایط اولیه و شرایط مرزی

پس از مدل سازی گروه شمع و محیط خاک حاوی چاه ها، بایستی مجموعه شمع بر روی خاک مربوطه قرار گیرد. در این مرحله سه نوع قید باید بر روی مدل شمع-خاک مورد استفاده، اعمال گردد. قیدهای نوع اول، از نوع شرایط تکیه گاهی برای مقید نمودن مکانیکی مرزهای توده خاک مورد نظر می باشد. برای این منظور گره های موجود در مرز زیرین توده خاک در راستای تمامی درجات آزادی مقید (شرایط گیردار) شده اند. همچنین، دو صفحه جانبی مقابل هم که محور x بردار نرمال آن ها می باشد، در راستای x و دو صفحه جانبی مقابل هم که محور y بردار نرمال آن ها می باشد، در راستای y مقید شده اند. برای این صفحات، جابجایی در راستای دو محور دیگر آزاد می باشد (شکل ۳). قیدهای نوع دوم، شرایط مرزی برای تعیین فشار آب حفره ای^{۱۲} در سطح خاک و سطح ایستابی می باشد. برای این منظور، مقدار فشار آب حفره ای در سطح خاک برابر با صفر قرار داده شده است. همچنین در لبه های سطح ایستابی (چهار خط در لبه سطح ایستابی) که شرایط آن معادل سطح آزاد آب می باشد، مقدار فشار آب حفره ای برابر با صفر قرار داده شده است. لازم به ذکر است که با بارگذاری گروه شمع، مقدار فشار آب حفره ای در زیر پی و بر روی سطح محصور با لبه های یاد شده به صورت مقطعی می تواند افزایش یابد. لیکن شرایط لبه ها، در هر حال مشابه سطح آزاد آب بوده و فشار آب حفره ای در آن ها برابر با صفر خواهد بود. آخرین نوع از قیدهای تعریف شده، شبیه سازی تماس بین سطوح شمع و خاک می باشد. این قید در برگیرنده تماس بین سطح زیر کلاهک شمع با سطح رویی خاک و تماس بین رویه شمع ها با داخل چاه شمع خواهد بود. رفتار تماسی سطح بین شمع و خاک شامل مکانیسم انتقال بار در هر دو راستای قائم و مماسی می شود. برای شبیه سازی تماس قائم از گزینه ی تماس سخت^{۱۳} در نرم افزار استفاده شده است. رفتار مماسی بین شمع و خاک را می توان حالتی بین دو محدوده ی شمع با تماس زبر و بدون لغزش تا شمیعی با لغزش بدون اصطکاک مدل کرد. برای مدل سازی سطح تماسی بین این دو حالت ایده آل از مدل اصطکاک کلمب که در نرم افزار آباکوس موجود است استفاده شده و ضریب اصطکاک برابر با تانژانت زاویه اصطکاک بین خاک و شمع فرض شده است. علاوه بر قیدها و شرایط مرزی یاد شده، دو نوع شرایط اولیه نیز بر روی مدل اعمال شده است. شرط اولیه نخست، تنش های داخلی خاک را که باید نیروهای ثقلی ناشی از ستون خاک را خنثی نماید، بیان می نماید. این تنش ها به صورت تابعی از عمق بیان شده و در محدوده ارتفاع مورد نظر به صورت خطی بین دو مقدار داده شده تغییر می نمایند. این شرط، با استفاده از گزینه تنش های اولیه خاک^{۱۴} تعریف شده است. شرط اولیه بعدی، مربوط به نسبت تخلخل خاک در ابتدای تحلیل می باشد. در مطالعه حاضر این شرط، با استفاده از گزینه نسبت تخلخل اولیه^{۱۵} تعریف شده است.



12 Pore pressure

13 Hard contact

14 Geostatic stress

15 Initial void ratio

شکل ۳: اعمال قیدها و شرایط مرزی در فضای نرم افزار؛ الف) برش خاک؛ ب) نمای کلی مدل در نرم افزار

۷- بارگذاری و تحلیل

برای تحلیل نمونه‌ها از ۳ گام تحلیل استفاده شده است. اولین گام، انجام تحلیل از نوع ژئواستاتیک^{۱۶} می‌باشد که هدف از ایجاد آن برقراری تعادل در داخل خاک می‌باشد. به‌طور معمول، تحلیل ژئواستاتیک به‌عنوان اولین گام از تحلیل‌های مکانیک خاک انجام می‌گیرد. در این نوع تحلیل، بارهای ثقلی خاک بر روی آن اعمال می‌شوند. بارهای ثقلی اعمال‌شده در این مرحله بایستی با تنش‌های اولیه داخل خاک در تعادل باشد تا هندسه خاک در حالت تغییر شکل صفر باقی بماند. گام دوم، یک تحلیل از نوع استاتیک^{۱۷} می‌باشد که طی آن مجموعه شمع بر روی خاک قرار گرفته و اصطکاک بین سطوح شمع و چاهک‌ها فعال می‌گردد (از طریق گزینه تغییر مدل^{۱۸}). گام سوم تحلیل، شبیه‌سازی تحکیم خاک طی یک تحلیل گذرای مخصوص خاک^{۱۹} می‌باشد. مدت‌زمان مورد استفاده برای این گام ۳۶۵ روز (۱ سال) بوده است که برحسب ثانیه در نرم‌افزار وارد شده است. بارگذاری مدل مورد بررسی در دو مرحله انجام شده است. مرحله اول شامل اعمال بارهای ثقلی مجموعه می‌باشد که در گام اولیه^{۲۰} به مدل اعمال شده است. برای این کار، یک میدان شتاب گرانش در راستای عکس محور قائم ایجاد و به کل مجموعه خاک تخصیص داده شده است. مرحله دوم بارگذاری شامل اعمال بار گسترده بر روی فونداسیون می‌باشد که در ابتدای گام تحکیم و طی مدت‌زمان اندک بر سطح رویی کلاهک وارد شده است. بار اعمالی بر روی پی برابر با 2 kg/cm^2 بوده است که طی ۱۰ ثانیه نخست تحلیل بر روی آن اعمال شده است. در ادامه، مرحله تحکیم به مدت یک سال تحلیل شده است.

۸- صحت سنجی نتایج عددی

برای صحت‌سنجی مدل‌های عددی مورد استفاده در تحقیق حاضر از داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده در تحقیق آلسانابانی و همکاران [۲۰] استفاده شده است. برای نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی در این تحقیق قطر شمع برابر با ۳۵ سانتی‌متر و طول آن برابر با ۱۲ متر بوده است. خاک به‌صورت دو لایه بوده است که ضخامت لایه نخست ۳ متر و ضخامت لایه پایین ۲۲ متر بوده است. تراز آب زیرزمینی در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین بوده است. مشخصات خاک گزارش شده برای هر دو لایه خاک مطابق جدول ۳ بوده است. مقدار بار وارد بر شمع برابر با ۲/۸۵ MN گزارش شده است. شکل ۴ نحوه مدل‌سازی عددی نمونه یادشده، مطابق با جزئیات تحقیق و همچنین توزیع تنش‌های مایسز در انتهای تحلیل را نمایش می‌دهد. همچنین، مقایسه نمودارهای بار-نشست برای مدل حاضر و نمونه آزمایشگاهی در شکل ۵ ارائه شده است.

جدول ۳: مشخصات خاک گزارش شده برای مدل آزمایشگاهی آلسانابانی و همکاران [۲۰]

z (m)	ψ (°)	ϕ (°)	v	c (kPa)	E (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	لایه خاک
۳	۰	۳۰	۰/۳۲	۱	۲۴۰۰۰	۱۷/۵	بالا
۲۲	۴	۴۰	۰/۲۶	۱	۲۷۵۰۰۰-۳۷۵۰۰۰	۱۹/۵	پایین

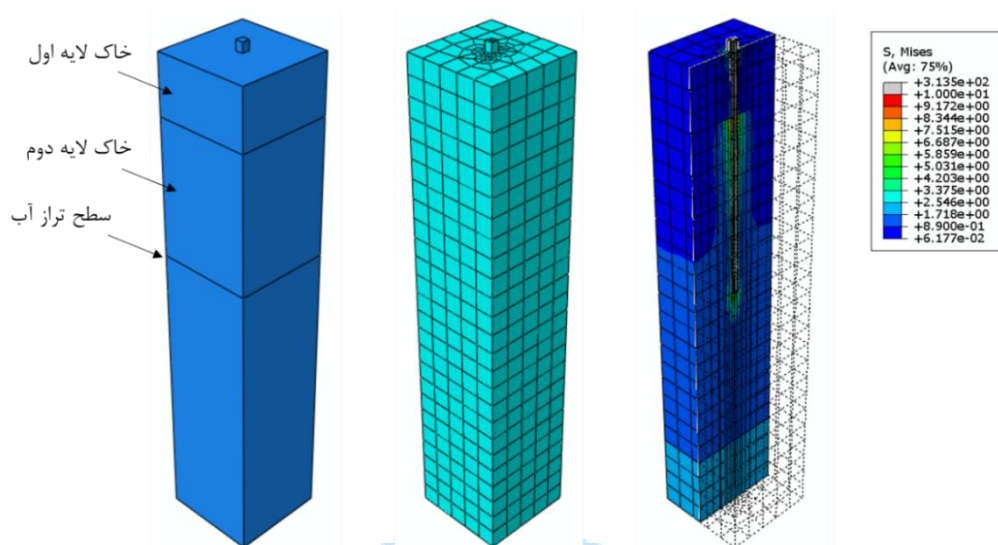
¹⁶ Geostatic

¹⁷ Static general

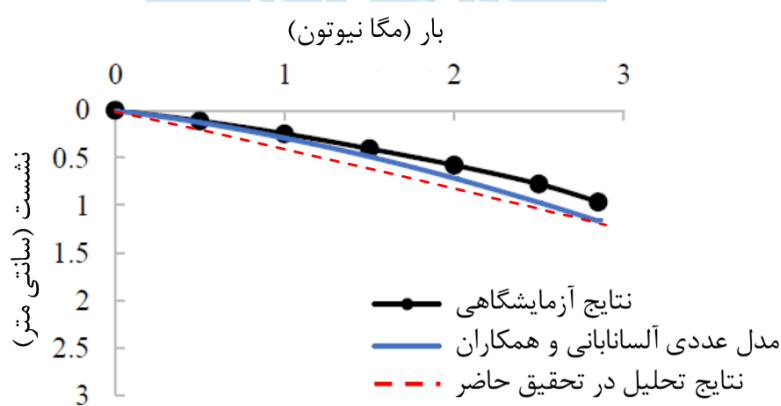
¹⁸ Model change

¹⁹ Soils (transient)

²⁰ Initial step



شکل ۴: مدل سازی نمونه آزمایشگاهی آلسانابانی و همکاران [۲۰]



شکل ۵: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی آلسانابانی و همکاران [۲۰] با تحقیق حاضر

چنانچه از مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی آلسانابانی و همکاران [۲۰] با تحقیق حاضر مشخص است، مدل عددی مورد استفاده در تحقیق حاضر از دقت مناسبی در تخمین مقدار نشست شمع در خاک برخوردار می باشد.

۹- بررسی تاثیر تعداد شمع

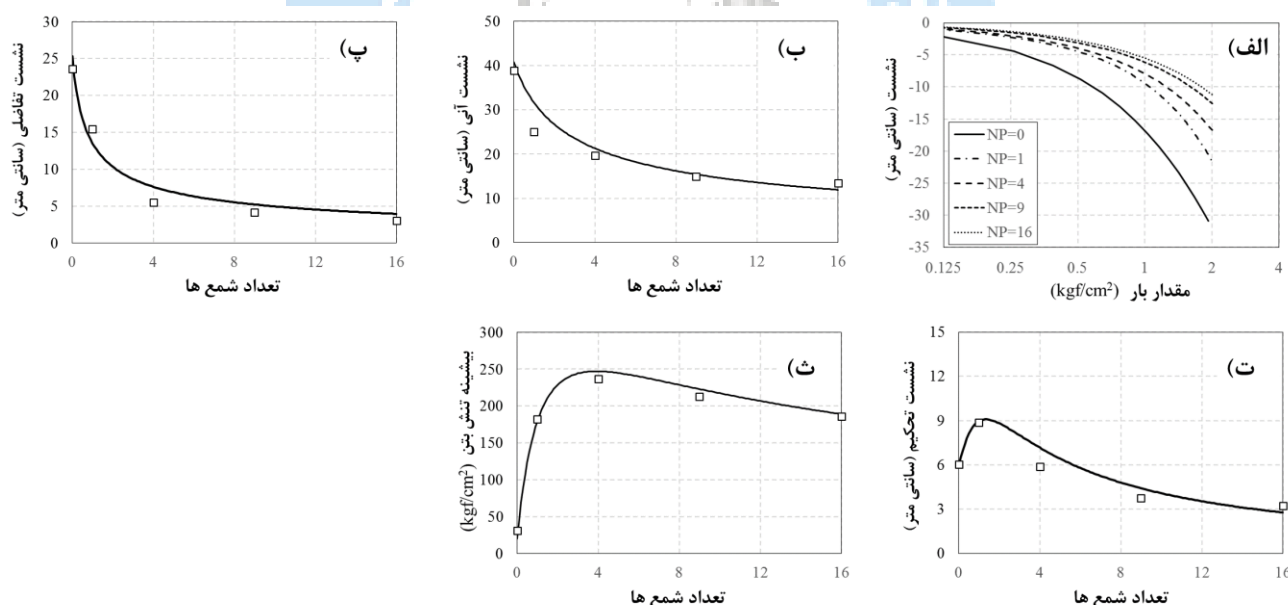
در ادامه مطالب فوق به بررسی تاثیر افزایش تعداد شمعها و تاثیر آن بر نشست نامساوی پی های شمعی پرداخته شده است. در این تحلیلها ابتدا پی گسترده بدون شمع (کلاهک) مورد تحلیل قرار گرفته است. در ادامه، با قرار دادن تک شمع در زیر کلاهک، تحلیل تکرار و نتایج به دست آمده با حالت قبل مقایسه شده است. سپس تحلیل با در نظر گرفتن گروه شمع و افزایش تعداد شمعها به ۴ و ۹ و ۱۶ انجام یافته است. با توجه به اینکه طول و عرض کلاهک توسط شمعها به فواصل مساوی تقسیم می شود (فاصله شمعها برابر فرض شده است)، افزایش تعداد شمعها باعث کاهش فاصله بین آنها نیز خواهد شد. به بیان دیگر تاثیر فاصله بین شمعها نیز در این بند مورد بررسی قرار می گیرد. شکل ۶ تاثیر تعداد شمع بر کانتور تنش و نمودار نشست پی و مجموعه شمع را نمایش می دهد. شکل های ستون نخست، نشان دهنده توزیع تنش های مایسز برای مجموعه پی و خاک و شکل های ستون دوم نشان دهنده تغییر شکل مجموعه شمع در انتهای تحلیل می باشد. نمودارهای ستون سوم، پروفیل نشست بر روی نوار میانی و لبه کناری کلاهک در انتهای فاز بارگذاری (۱۰ ثانیه نخست تحلیل) را نمایش می دهد. در ادامه با از بین رفتن فشار آب حفره ای اضافی در خاک، مرحله تحکیم اتفاق افتاده و مقدار نشست پی افزایش

می‌یابد. نمودارهای ستون آخر، میزان نشست در مرکز پی را در طول بارگذاری و همچنین در مرحله تحکیم نمایش می‌دهد. با توجه به نمونه‌های تحلیل شده در این بخش از تحقیق، نتایج زیر را می‌توان ارائه نمود:

- **کلاhek بدون شمع:** بررسی توزیع تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در نمونه پی تنها، حاکی از تمرکز تنش و تغییر شکل در مرکز پی می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که برای کلاhek‌های انعطاف‌پذیر بهتر است تمرکز شمع در مرکز پی قرار گیرد. در این مدل، به دلیل سخت‌شوندگی تعریف‌شده برای مصالح لایه نخست زمین، خاک توانسته است تنش‌های وارد بر آن را تحمل نماید، لیکن مقدار نشست زیاد پی تنها، لزوم استفاده از شمع را برای بهبود وضعیت باربری نشان می‌دهد.
- **کلاhek با تک شمع:** در این نمونه، تنش‌های تماسی ناشی از اصطکاک باعث افزایش تنش‌ها در بدنه شمع و همچنین در محل اتصال کلاhek به شمع شده است. اجرای تک شمع در وسط کلاhek باعث کاهش نشست پی در مرکز آن به میزان ۳۶٪ نسبت به حالت کلاhek تنها شده است. این در حالی است که افزودن تک شمع، تغییر چندانی در نشست لبه کناری ایجاد نمی‌نماید. همچنین لازم به توضیح است هرچند نشست کلی پی در این نمونه کاهش یافته است، لیکن نشست تحکیم آن نسبت به حالت قبل افزایش داشته است. این مسئله را می‌توان به کاهش نشست آبی پی در اثر استفاده از شمع، و جبران آن در طول زمان از طریق بروز نشست تحکیم مرتبط دانست.



- **کلاhek با نه شمع:** با افزایش تعداد شمع‌ها به ۹ عدد، روند یکنواخت‌تر شدن توزیع تنش‌ها در خاک اطراف و نوک شمع ادامه می‌یابد. این در حالی است که در این نمونه، بیشینه تنش در بتن محل اتصال شمع به پی نیز کاهش یافته است. برای این نمونه، نشست کلی، نشست تحکیم و نشست‌های تفاضلی سیر کاهشی داشته‌اند. در این حالت، میزان نشست پی در مرکز آن نسبت به حالت کلاhek تنها به میزان ۶۲٪ کاهش داشته است.
 - **کلاhek با شانزده شمع:** کاهش تنش‌ها و توزیع یکنواخت آن‌ها در خاک اطراف شمع‌ها برای این نمونه به‌وضوح مشهود می‌باشد. همچنین بیشینه تنش موجود در بتن پی نیز نسبت به حالات قبل سیر کاهشی داشته است. در این نمونه، مقدار نشست در کل سطح پی تقریباً توزیع یکنواختی داشته است. میزان نشست پی در مرکز این نمونه نسبت به حالت کلاhek تنها به میزان ۶۸٪ کاهش داشته است. همچنین مقدار نشست تحکیم نسبت به حالت کلاhek تنها به نصف کاهش پیدا کرده است.
- برای جمع‌بندی نتایج، تغییرات هرکدام از پارامترهای موردبررسی برحسب تعداد شمع در نمودارهای شکل ۷ رسم شده است. مطابق شکل نخست، در کلاhek بدون شمع مقدار نشست پی فاحش بوده که با افزایش تعداد شمع‌ها تا ۶۸٪ مقدار اولیه کاهش یافته است. شکل ۷(ب)، تاثیر تعداد شمع بر میزان نشست آبی پی را نشان می‌دهد. مطابق شکل، افزودن شمع‌ها، ابتدا تاثیر چشمگیری بر کاهش میزان نشست آبی پی داشته، لیکن با افزودن شمع‌های بیشتر، این روند کند تر می‌شود. همین مسئله در خصوص نشست تفاضلی پی نیز صادق می‌باشد. از طرفی، افزودن تعداد شمع‌ها، ابتدا باعث افزایش میزان نشست تحکیم و بیشینه تنش در بتن محل اتصال شمع به پی می‌شود که با افزایش بیشتر تعداد شمع‌ها این مشکل مرتفع می‌گردد. از همین رو، به لحاظ یکنواختی توزیع تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در پی، اجرای تک شمع در زیر پی‌ها توصیه نمی‌شود و بهتر است از مجموعه شمع‌ها استفاده گردد.



شکل ۷: تاثیر تعداد شمع بر؛ (الف) نمودار نیرو-نشست؛ (ب) نشست آبی؛ (پ) نشست تفاضلی؛ (ت) نشست تحکیم؛ (ث) بیشینه تنش.

۱۰- بررسی تاثیر قطر شمع

در بخش قبل تاثیر تعداد شمع بر روی نشست کلاhek و گروه شمع موردبررسی قرار گرفت. همان‌طور که گفته شد، برای این نمونه‌ها قطر شمع برابر با ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده بود. در این بخش هدف بررسی تاثیر قطر شمع بر روی نشست پی می‌باشد. برای

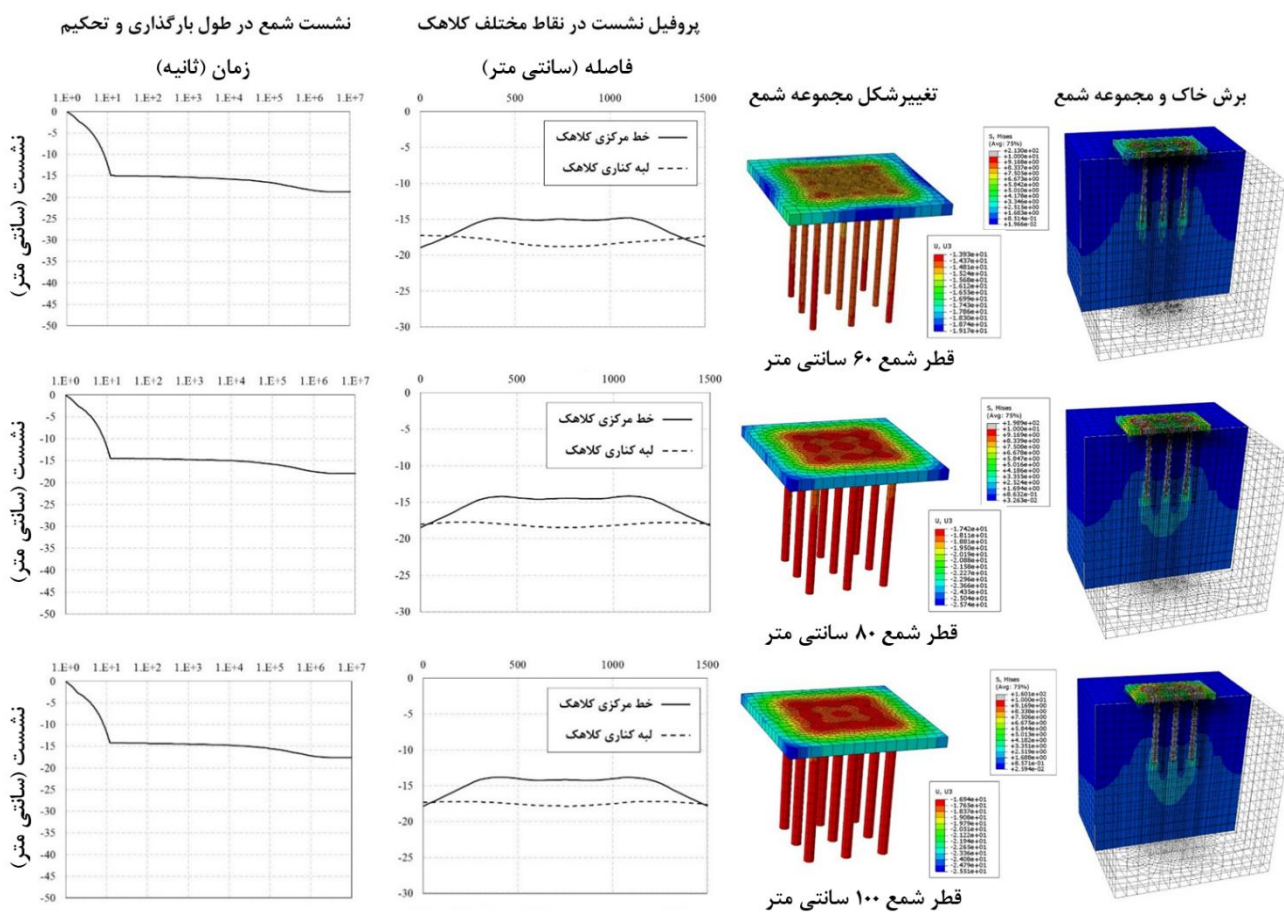
این منظور، از گروه شمع ۹ تایی استفاده شده و قطر شمع برابر با مقادیر ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. شکل ۸ تاثیر قطر شمع بر کانتور تنش و نمودار نشست پی و مجموعه شمع را نمایش می دهد. نتایج تحلیل ها بر روی نمونه دارای شمع با قطر ۶۰ سانتی متر، در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل دو نمونه دیگر به شرح ذیل می باشد:

- **شمع با قطر ۸۰ سانتی متر:** با مقایسه توزیع تنش های مایسز می توان ملاحظه نمود که با افزایش قطر شمع، سهم باربری نوک شمع نسبت به جداره ها افزایش یافته و تنش در خاک زیر نوک شمع بیشتر می شود. همچنین افزایش قطر شمع تا حدودی کاهش تنش در بتن پی را به دنبال دارد. بررسی میزان نشست ها در این نمونه نشان می دهد که نشست کلی و تحکیم در این نمونه نسبت به نمونه با قطر ۶۰ سانتی متر کاهش داشته است. لیکن تاثیر افزایش قطر شمع کمتر از افزایش تعداد آن بوده است.

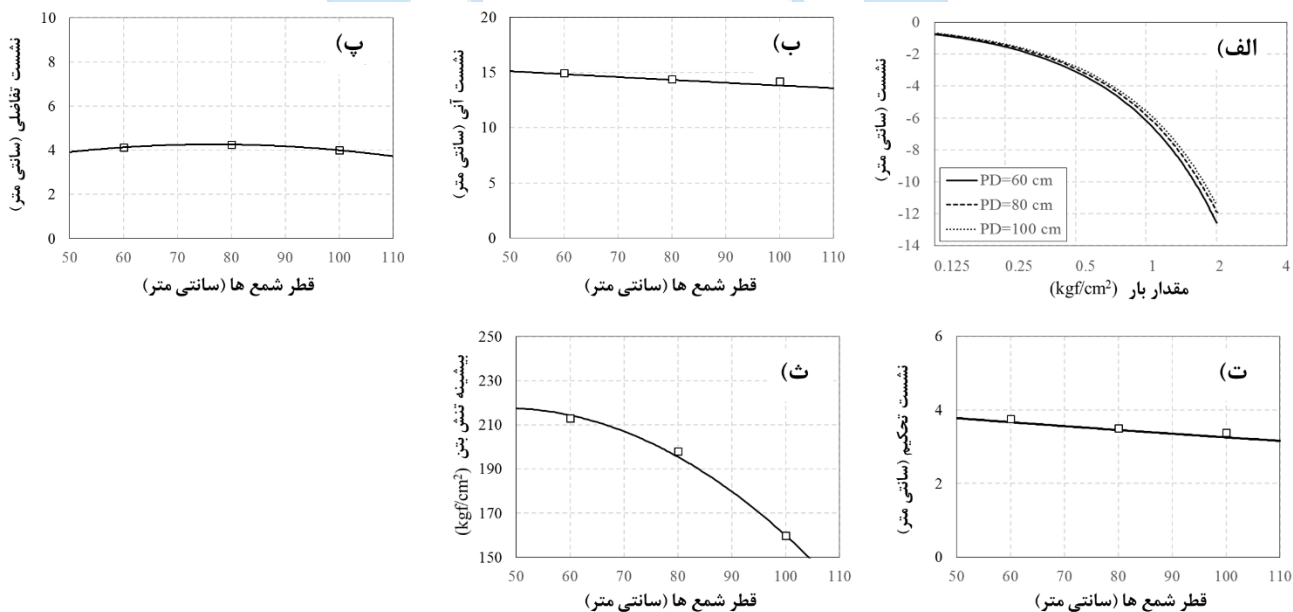
- **شمع با قطر ۱۰۰ سانتی متر:** در این نمونه نیز روند مشاهده شده برای مدل قبلی با قطر شمع ۸۰ سانتی متر حاکم می باشد. لیکن با مقایسه نتایج می توان ملاحظه کرد که افزایش قطر شمع به ۱۰۰ سانتی متر تاثیر بسیار کمتری بر نشست آبی و تحکیم پی داشته است. در مقابل، افزایش قطر شمع به ۱۰۰ سانتی متر تاثیر چشمگیری بر کاهش بیشینه تنش شکل گرفته در بتن شمع داشته است.

برای جمع بندی نتایج، تغییرات هر کدام از پارامترهای مورد بررسی بر حسب قطر شمع در نمودارهای شکل ۹ رسم شده است. در نمودار نخست، مقایسه منحنی های نشست پی تحت بار وارده بر حسب قطر شمع، در نمودارهای دوم تا چهارم تاثیر قطر شمع بر نشست های آبی، تحکیم و تفاضلی پی، و در نمودار آخر بیشینه تنش در بتن پی شمعی بر حسب قطر شمع ارائه شده است. مطابق شکل، ملاحظه می شود که افزایش قطر شمع تاثیر چندانی بر روی نشست پی نداشته و عمده تاثیر آن بر کاهش تنش های شکل گرفته در بدنه و محل اتصال شمع ها به کلاهک می باشد.





شکل ۸: تاثیر قطر شمع بر کانتور تنش و نمودار نشت پی و مجموعه شمع.



شکل ۹: تاثیر قطر شمع بر: الف) نمودار نیرو-نشت؛ ب) نشت آبی؛ پ) نشت تفاضلی؛ ت) نشت تحکیم؛ ث) بیشینه تنش.

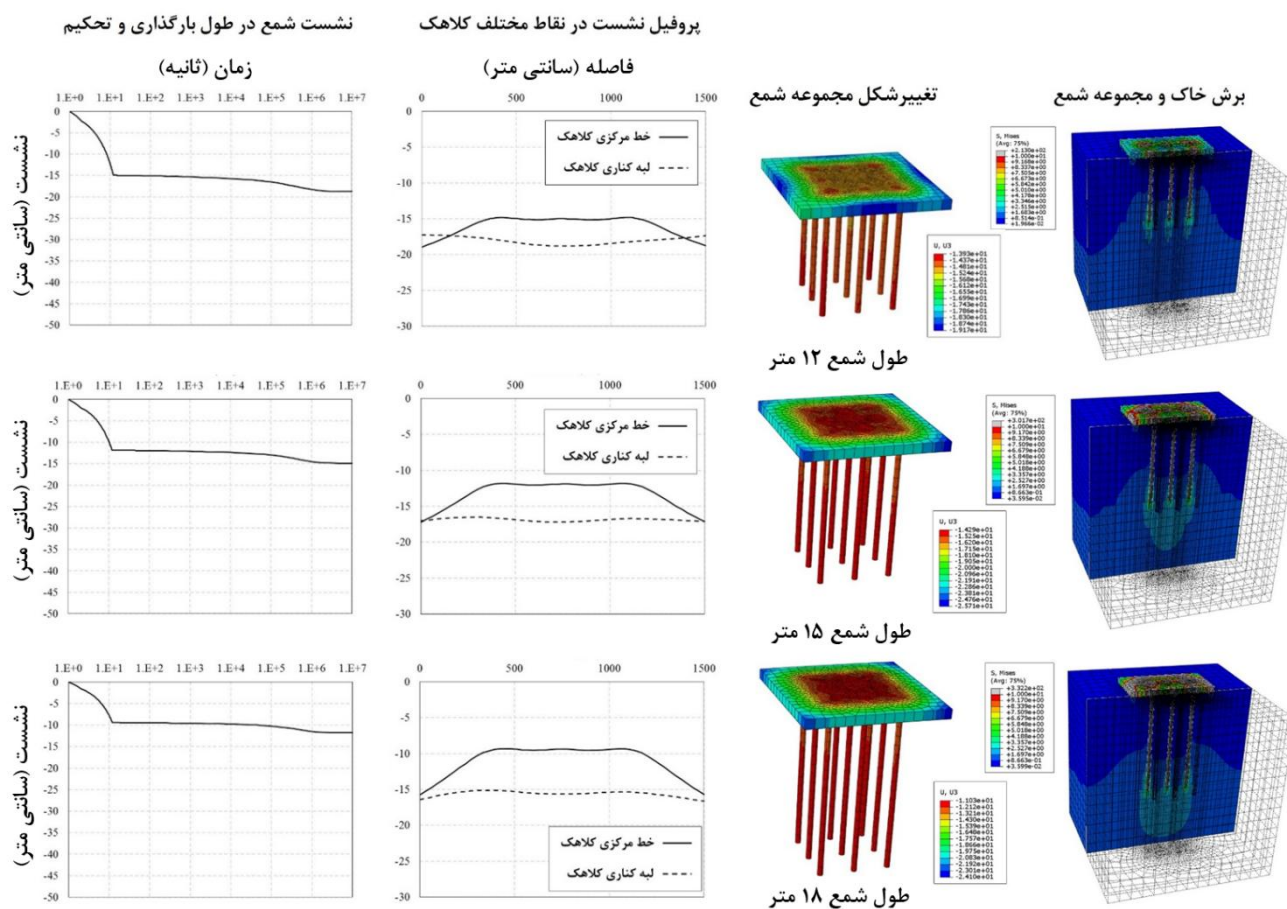
۱۱- بررسی تاثیر طول شمع

در دو بخش قبل، تاثیر تعداد و قطر شمع بر روی نشست کلاhek و گروه شمع مورد بررسی قرار گرفت. مطابق توضیحات قبلی، طول در نظر گرفته شده برای شمع در نمونه مرجع برابر با ۱۲ متر بوده است. در این بخش هدف بررسی تاثیر طول شمع بر روی رفتار پی شمعی از طریق تحلیل نمونه‌هایی با طول شمع ۱۲، ۱۵ و ۱۸ متر می‌باشد. شکل ۱۰ تاثیر طول شمع بر کانتور تنش و نمودار نشست پی و مجموعه شمع را نمایش می‌دهد. نتایج تحلیل‌ها بر روی نمونه دارای شمع با طول ۱۲ متر، در بند ۹ مقاله، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل نمونه‌های با طول شمع ۱۵ و ۱۸ متر به شرح ذیل می‌باشد:

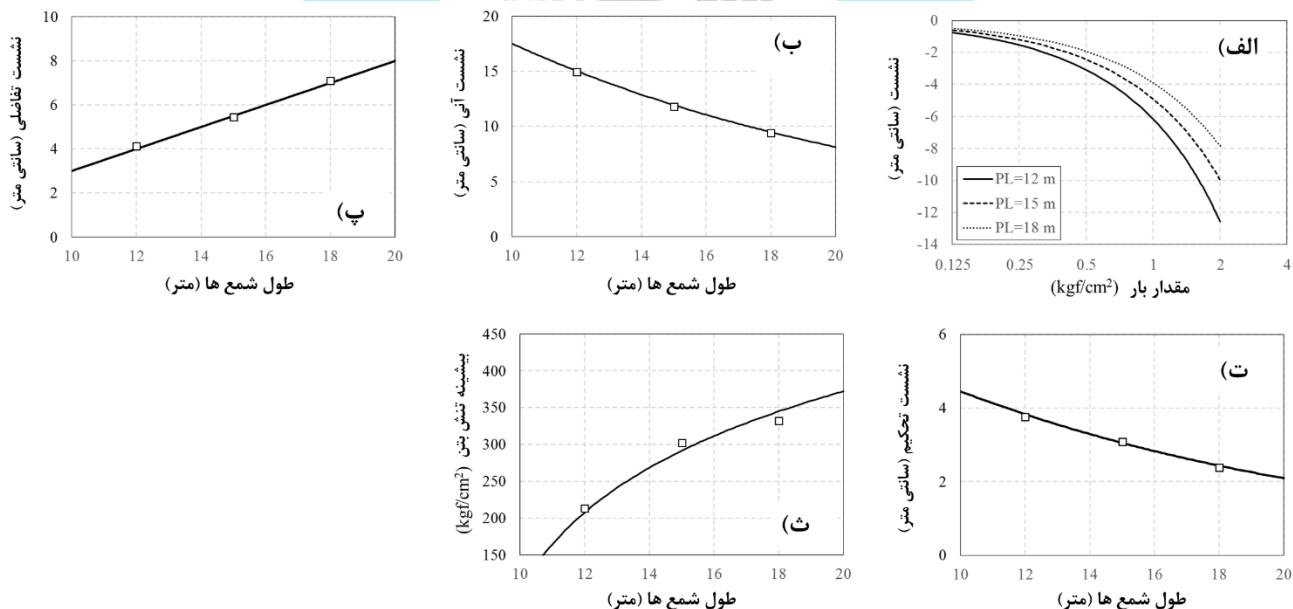
- **شمع با طول ۱۵ متر:** با توجه به افزایش سطح تماس جداره‌های پی با خاک اطراف در اثر افزایش طول شمع، باربری پی در این نمونه بهبود یافته و میزان نشست مرکز پی کاهش یافته است. این در حالی است که نشست لبه‌های پی مشابه حالت قبل بوده (با تغییر اندک) و لذا نشست تفاضلی کمی افزایش یافته است. همچنین با افزایش طول شمع، بیشینه تنش در بتن پی اندکی افزایش یافته است.
- **شمع با طول ۱۸ متر:** روند کاهش نشست آبی و تحکیم پی در اثر افزایش طول شمع و در مقابل افزایش نشست تفاضلی و بیشینه تنش در بتن بدنه پی، در این نمونه نیز تکرار شده است. با این تفاوت که در این نمونه از شدت تغییرات در پارامترهای مذکور کاسته شده است.

تغییرات در هر کدام از پارامترهای مورد بررسی بر حسب طول شمع در نمودارهای شکل ۱۱ خلاصه شده است. مطابق شکل، افزایش طول شمع از ۱۲ متر به ۱۸ متر باعث ۳۳٪ کاهش در نشست آبی پی، ۷۵٪ افزایش در نشست تفاضلی پی، ۴۳٪ کاهش در نشست تحکیم پی و ۵۳٪ افزایش در بیشینه تنش محل اتصال شمع به کلاhek می‌گردد. با توجه به روند ملاحظه شده در نمونه‌های تحلیل شده، می‌توان گفت که افزایش مقاومت شمع (به جز افزایش قطر)، باعث افزایش بیشینه تنش بتن در محل اتصال شمع به کلاhek خواهد شد.





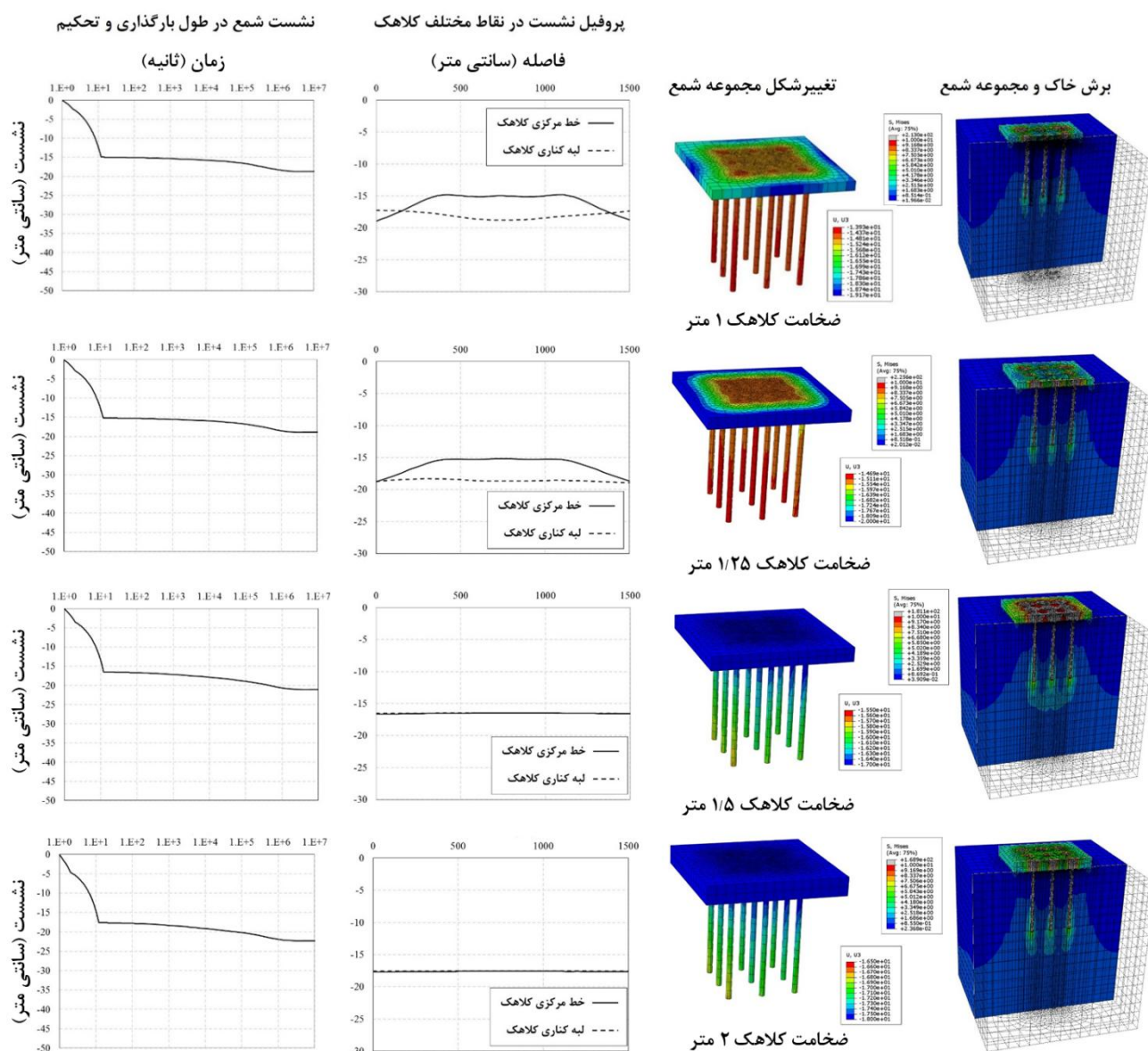
شکل ۱۰: تاثیر طول شمع بر کانتور تنش و نمودار نشست پی و مجموعه شمع.



شکل ۱۱: تاثیر طول شمع بر: (الف) نمودار نیرو-نشست؛ (ب) نشست آبی؛ (پ) نشست تفاضلی؛ (ت) نشست تحکیم؛ (ث) بیشینه تنش.

۱۲- بررسی تاثیر ضخامت کلاهک

در بخش‌های قبل، تاثیر پارامترهای مختلف شمع بر روی نشست کلاهک و گروه شمع مورد بررسی قرار گرفت. در تمامی این بررسی‌ها، ضخامت کلاهک شمع برابر با ۱ متر فرض شده بود. در این بخش هدف بررسی تاثیر ضخامت کلاهک شمع بر روی نشست پی می‌باشد. بدین منظور، از گروه شمع ۹ تایی با ضخامت کلاهک برابر با مقادیر ۱، ۱/۲۵، ۱/۵ و ۲ متر استفاده شده است. نتایج بررسی‌ها بر روی نمونه‌های یادشده، در شکل ۱۲ ارائه شده است. با توجه به اینکه نتایج مربوط به گروه شمع ۹ تایی با ضخامت کلاهک ۱ متر در بخش‌های قبل ارائه شده است، تنها به بررسی نتایج سایر نمونه‌ها بسنده می‌شود.



شکل ۱۲: تاثیر ضخامت کلاهک بر کانتور تنش و نمودار نشست پی و مجموعه شمع.

مطابق نتایج بدست آمده:

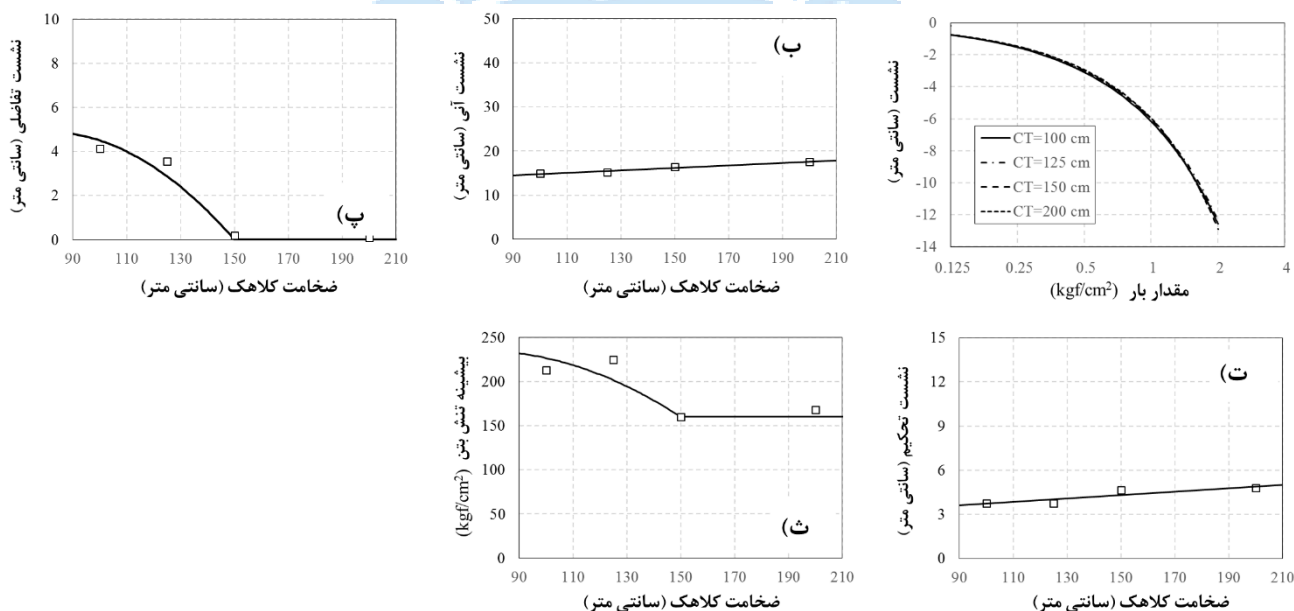
- ضخامت کلاهک ۱/۲۵ متر: با مقایسه توزیع تنش‌های مایسز در این نمونه، ملاحظه شد که با افزایش ضخامت کلاهک صلبیت یا سختی کلاهک افزایش یافته، و در نتیجه سهم باربری شمع مقدار اندکی کاهش یافته است. این در حالی است که

تنش در بتن پی مقداری افزایش داشته است. همچنین با مقایسه پروفیل نشست در نقاط مختلف کلاhek ملاحظه شد که با افزایش ضخامت شمع از ۱ متر به ۱/۲۵ متر مقدار نشست، به خصوص نشست آبی (لحظه‌ای)، کاهش می‌یابد.

• **ضخامت کلاhek ۱/۵ متر:** با افزایش ضخامت کلاhek به ۱/۵ متر، مقدار نشست در نقاط مختلف کلاhek تقریباً یکسان شده و نشست تفاضلی پی تا حد زیادی (نزدیک به صفر) کاهش می‌یابد. این مسئله حاکی از اهمیت صلبیت کلاhek در کنترل نشست‌های تفاضلی می‌باشد. این در حالی است که نشست کلی پی نه‌تنها کاهش نیافته بلکه به دلیل وزن بیشتر کلاhek، مقدار اندکی نیز افزایش یافته است.

• **ضخامت کلاhek ۲/۰ متر:** نتایج حاصل از تحلیل این نمونه، عمدتاً مشابه نمونه با ضخامت کلاhek به ۱/۵ متر، می‌باشد.

مقایسه کلی نتایج به دست آمده از تحلیل نمونه‌های با ضخامت کلاhek متفاوت در شکل ۱۳ ارائه شده است. بررسی منحنی‌های نشست در برابر مقدار بار، نشان می‌دهد تغییر ضخامت کلاhek تأثیر چندانی بر مقدار نشست کلی پی نداشته و تنها به دلیل وزن بیشتر کلاhek، مقدار نشست اندکی بیشتر می‌شود. این در حالی است که به دلیل افزایش صلبیت کلاhek، مقدار نشست تفاضلی کاهش یافته و به مقدار صفر (تقریباً) می‌رسد. همچنین روند کلی ترسیم شده برای بیشینه تنش به وجود آمده در بتن پی حاکی از کاهش این پارامتر با افزایش ضخامت کلاhek می‌باشد.



شکل ۱۳: تأثیر ضخامت کلاhek بر: الف) نمودار نیرو-نشست؛ ب) نشست آبی؛ پ) نشست تفاضلی؛ ت) نشست تحکیم؛ ث) بیشینه تنش.

۱۳- بحث و بررسی نتایج

تأثیر پارامترهای مختلف بر نشست نامساوی پی‌های شمعی در بخش‌های قبل مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. چنانچه ملاحظه گردید، تعداد شمع‌ها (یا فاصله آنها از هم)، طول شمع‌ها و ضخامت کلاhek عمده پارامترهای تأثیر گذار بر نشست نامساوی این نوع پی‌ها می‌باشند. در بخش ۹ ملاحظه گردید که با افزایش تعداد شمع‌ها، نشست نامساوی پی به سرعت کاهش می‌یابد. مطابق نمودارهای شکل ۶، در پی‌های با بیش از دو ردیف شمع، نشست نامساوی در فاصله بین شمع‌ها ناچیز بوده و عمده نشست نامساوی ناشی از فاصله آزاد بین آخرین ردیف شمع و لبه کلاhek (E_x و E_y در شکل ۱) می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت میزان نشست نامساوی پی رابطه مستقیم با این فاصله داشته و با کاهش آن، نشست نامساوی کلاhek کاهش می‌یابد. همچنین در بخش ۱۲ ملاحظه گردید که میزان نشست نامساوی در پی رابطه عکس با ضخامت کلاhek (t_{pile} در شکل ۱) داشته و با افزایش ضخامت کلاhek، نشست نامساوی به شدت کاهش می‌یابد. برای

نمونه‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر، نشست نامساوی کلاهک در نمونه‌های با نسبت $\text{Max}(E_x, E_y)/t_{pile}$ کمتر از ۲/۵ تقریباً برابر با صفر بوده است. لذا رعایت این نسبت با کاهش فاصله E_x و E_y (از طریق تعبیه شمع) و یا افزایش ضخامت t_{pile} قابل توصیه می‌باشد. هر چند پارامترهای دیگری نظیر خواص مکانیکی خاک، هندسه کلاهک، طول شمع و ... می‌تواند بر این نسبت تاثیرگذار باشد که تعیین دقیق تر آن نیازمند انجام مطالعات بیشتر می‌باشد.

۱۴- نتیجه گیری

در این مقاله سعی شد تاثیر پارامترهای طول، قطر و تعداد شمع‌ها (یا فاصله آن‌ها) و همچنین ضخامت کلاهک بر روی نشست پی گسترده شمعی به صورت المان محدود مورد مطالعه قرار گیرد. برای این منظور، ابتدا پی گسترده (کلاهک) بدون شمع و به دنبال آن کلاهک با تک شمع، چهار شمع، نه شمع و شانزده شمع تحت بار گسترده در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و تحلیل گردید. در ادامه، با در نظر گرفتن سه مقدار مختلف برای قطر شمع، تاثیر افزایش قطر شمع در مدل کلاهک با شمع‌های ۹ تایی مورد بررسی قرار گرفت. سپس مدل کلاهک با شمع‌های ۹ تایی با طول مختلف شمع مدل‌سازی شده و مورد تحلیل قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، در خاتمه مدل‌های مختلف با ضخامت کلاهک متفاوت تحلیل شده و نشان داده شد که افزایش ضخامت کلاهک باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در نشست‌های نامساوی پی خواهد شد. به طور کلی می‌توان گفت:

۱. با افزایش تعداد شمع‌ها (کاهش فاصله آن‌ها) مقدار نشست کلی و تفاضلی مجموعه کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که استفاده از تک شمع در مرکز کلاهک باعث کاهش نشست به میزان ۳۶٪ و افزایش تعداد شمع‌ها به ۱۶ عدد می‌تواند نشست پی را تا ۶۸٪ نسبت به حالت کلاهک بدون شمع کاهش دهد. با توجه به بررسی‌های به عمل آمده، افزایش تعداد شمع‌ها بهترین اقدام در راستای کاهش نشست‌های کلی پی می‌باشد.

۲. با افزایش قطر شمع، نشست پی به مقدار اندکی کاهش می‌یابد. به طور مثال، افزایش قطر شمع از ۶۰ سانتی‌متر به ۱۰۰ سانتی‌متر می‌تواند منجر به کاهش حدود ۷٪ در نشست کلی شود، ولی تاثیر آن به اندازه افزایش تعداد شمع نیست. این مسئله نشان می‌دهد که درصد بالایی از مقاومت در برابر نشست را بدنه شمع تحمل می‌کند تا نوک شمع. افزایش قطر شمع، بهترین راهکار برای کاهش بیشینه تنش در بتن محل اتصال شمع‌ها به کلاهک می‌باشد. در خصوص اعمال این راهکار برای شمع‌های درجاریز لازم است شرایط خاص پروژه و محدودیت‌های اجرایی موجود مد نظر قرار گیرد.

۳. افزایش طول شمع تاثیر بسزایی در کنترل نشست‌های شمع دارد. تحلیل‌های انجام شده نشان داد که افزایش طول شمع از ۱۲ متر به ۱۸ متر منجر به کاهش ۳۳٪ در نشست آنی پی می‌شود. در صورتی که افزایش تعداد شمع‌ها یا کاهش فاصله آن‌ها میسر نباشد، افزایش طول شمع‌ها می‌تواند راهکار مناسبی برای کنترل نشست کلی پی باشد.

۴. با بالا رفتن ضخامت کلاهک مقدار نشست در لبه‌های کناری و نوار مرکزی یکنواخت‌تر خواهد شد. افزایش ضخامت کلاهک، راهکار مناسبی برای کاهش نشست‌های تفاضلی می‌باشد. برای نمونه‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر، نشست نامساوی کلاهک در نمونه‌های با نسبت $\text{Max}(E_x, E_y)/t_{pile}$ کمتر از ۲/۵ تقریباً برابر با صفر بوده است. هر چند، ضخامت مناسب کلاهک برای جلوگیری از نشست‌های نامساوی با توجه به پارامترهایی نظیر شدت بار گسترده، مشخصات خاک، تعداد و مشخصات شمع‌ها تعیین می‌شود.

نتایج این تحقیق مهندسیین طراح را در درک رفتار اندرکنش پی، شمع و خاک و در انتخاب درست و بهینه پارامترهای طراحی و همچنین مقابله با نشست‌های نامساوی کمک خواهد کرد.

مراجع

- [1] Horikoshi, K., and Randolph, M.F. (1998). A contribution to optimum design of piled rafts. *Geotechnique*, 48(3), 301-317.
- [2] Prakoso, W.A., and Kulhawy, F. H. (2001). Contribution to piled raft foundation design. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(1), 17-24.
- [3] McCabe, B.A., and Lehane, B.M. (2006). Behavior of axially loaded pile groups driven in clayey silt. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(3), 401-410.
- [4] McCabe, B.A., and Sheil, B.B. (2015). Pile group settlement estimation: suitability of nonlinear interaction factors. *International Journal of Geomechanics*, 15(3), 04014056.
- [5] Zhan, Y. G., Wang, H., & Liu, F. C. (2012). Modeling vertical bearing capacity of pile foundation by using ABAQUS. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17(M), 1855-1865.
- [6] Sinha, A., and Hanna, A.M. (2017). 3D numerical model for piled raft foundation. *International Journal of Geomechanics*, 17(2), 04016055.
- [7] Mali, S., and Singh, B. (2018). Behavior of large piled-raft foundation on clay soil. *Ocean Engineering*, 149, 205-216.
- [8] Hejazirad, S., Ghareh, S., Eslami, A., & Ganjian, N. (2021). Comparison of behavior of Drilled Displacement piles in laboratory and field (Case study; Anzali sand). *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(8), 49-68. doi: 10.22065/jsce.2021.255307.2281
- [9] Malekkhani, M. J., & Bolouri Bazzaz, J. (2021). An investigation on the bearing capacity of piled raft foundations experimentally and comparison with modified hyperbolic model results. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(1), 307-326. doi: 10.22065/jsce.2019.171280.1779
- [10] Shooshpasha, I., and Sharafkhah, M. (2021). Experimenta Lstudy of Behavior of Piled Raft Foundations under Vertical Loading in Sand. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 51.3(104), 87-101. doi: 10.22034/jcee.2019.9256
- [11] Nooralizadeh, O., Rahimi, S., Hoseinzadeh, M., & Ebadi Jamkhaneh, M. (2022). Investigation of steel moment-resisting frame relies on deep foundation under normal fault rupture. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(2), 152-171. doi: 10.22065/jsce.2021.292098.2477
- [12] Asadinia, A., Amirafshari, S., & Ghanbari, A. (2022). New equation to determine the load percentage carried by raft in piled raft foundations. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(8), 3139-3154. doi: 10.22060/ceej.2022.20051.7329
- [13] Susila, E., Syahputra, M. Y., Sahadewa, A., & Eka Putri, K. M. (2019). An Evaluation of Pile-Raft Interaction in Cohesive Soils using 3D Finite Element Method. *Journal of Engineering & Technological Sciences*, 51(5). doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.5.5
- [14] Bhartiya, P., Chakraborty, T., & Basu, D. (2022). Load-settlement response of piled raft foundations in sand. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(4), 1260-1283. doi: 10.1080/17486025.2021.1928767
- [15] Jameel, M. M., & Ahmed, B. A. (2021). Response of Piles Group embedded in Sandy Soil with Cavities to Seismic Loading. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 856, No. 1, p. 012017). IOP Publishing. doi: 10.1088/1755-1315/856/1/012017
- [16] Modak, R., & Singh, B. (2022). A parametric study of large piled raft foundations on clay soil. *Ocean Engineering*, 262, 112251. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112251
- [17] Fattah, M. Y., Salim, N. M., & Khalifa, K. R. (2023). Parametric study of unconnected piled rafts in clayey soil using finite element method. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1), 16. doi: 10.1007/s41062-022-00987-6
- [18] Jassim, A., Ganjian, N., & Eslami, A. (2023). Investigation of Load-Displacement Behavior of Helical Pile in Wet and Saturated Sand with FCV Apparatus. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 10(5), 25-42. doi: 10.22065/jsce.2022.350470.2869

- [19] Mohammad-Alinejad, R., Bayat, M., Nadi, B., & Pakbaz, M. S. (2023). Effect of degree of freedom of movement on the bearing capacity and efficiency coefficient of pile group adjacent to sandy slope. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 10(1), 95-113. doi: 10.22065/jsce.2022.321897.2678
- [20] Alsanabani, N., T. AL-Refeai, and A. Alshenawy, Simplified Method for Designing Piled Raft Foundation in Sandy Soils. *Geotechnical Engineering*, 2017. 48(4): p. 122-128.
- [21] Hibbitt, Karlsson, & Sorensen. (2016). Abaqus/CAE User's Manual. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Incorporated.
- [22] Su, K., & Li, Y. (2009). Discussion of extended drucker-prager yield criterion in slope stability analysis. In *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference* (pp. 1-4). IEEE. doi: 10.1109/APPEEC.2009.4918285

