



## بررسی عملکرد شمع‌ها در خاک و محیط‌های نشست پذیر

امیرحسین رضایی فرعی<sup>۱\*</sup>، علی اکبر احترامی<sup>۲</sup>

<sup>۱\*</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران (rezaei.ah@azaruniv.ac.ir)

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۹/۳۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۲/۱۰)

### چکیده

در نواحی شمال شرقی تبریز به دلیل وجود لایه‌های ریزدانه و بالا بودن تراز آب زیرزمینی، تعدادی از سازه‌ها دچار آسیب شده‌اند. کوی فرشته تبریز در شهرک باغمیشه از جمله مناطقی می‌باشد که در سال‌های اخیر نشست غیرمجاز ساختمان‌های تازه احداث شده در آن به علت عدم رعایت اصول طراحی و اجرا به وفور مشاهده شده است. با توجه به اهمیت استفاده از پی‌های گسترده متکی بر شمع یا پی-شمع (Pile-Raft foundation)، در این تحقیق با استفاده از نتایج حاصل از دو گمانه ماشینی و دستی مشخصات ژئوتکنیکی خاک بخشی از منطقه کوی فرشته شمالی تبریز مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه به وسیله نرم‌افزار المان محدود پلکسیس مدل‌های عددی اندرکنش مستقیم خاک، پی و سازه، مدل‌سازی شده و نتایج آن‌ها بررسی گردیده‌اند. براساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، حداقل طول لازم شمع‌ها در سیستم فونداسیون پی-شمع جهت تغییر وضعیت آئین‌نامه‌ای نشست سازه‌ها از غیر مجاز به مجاز، برای سازه ۴ و ۶ طبقه ۶ متر و برای سازه ۸ طبقه ۸ متر می‌باشد. باتوجه به اینکه در سازه‌های ۴، ۶ و ۸ طبقه به ترتیب در صورت استفاده از شمع‌هایی به طول ۸، ۱۰ و ۱۲ متر نشست حداکثر پی به حدود ۱۹-، ۲۱- و ۲۰- میلی‌متر می‌رسد، بنابراین برای سیستم پی-شمع فونداسیون این سازه‌ها، افزایش طول شمع‌ها به ترتیب بیش از ۸، ۱۰ و ۱۲ متر انتخابی مناسب و بهینه نخواهد بود.

### کلمات کلیدی

پی سطحی متکی بر شمع، خاک ضعیف، نشست سازه‌ها، روش اجزاء محدود، مطالعه موردی.



# Analysis of Piles Performance in Soil and Settlement Able Mediums

Amir Hasan Rezaei Farie <sup>1\*</sup>, Ali Akbar Ehterami <sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Madani Azerbaijan University, Tabriz, Iran(rezaei.ah@azaruniv.ac.ir)

<sup>2</sup>M.Sc. of Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Madani Azerbaijan University, Tabriz, Iran

(Date of received: 21/12/2018, Date of accepted: 30/04/2019)

## ABSTRACT

The Tabriz city, as one of the metropolises of Iran, has a special geotechnical condition. In the northeastern part of Tabriz, due to the fine-grained soil layers and high groundwater level, a number of structures have been damaged. The Fereshteh town is one of the areas where in recent years unbalanced settlement of newly constructed buildings has been observed. With considering the importance of using pile-raft foundations, in this research by using the results of two boreholes in the Fereshteh area of Tabriz, the geotechnical characteristics of the soil have been evaluated. Subsequently, direct soil-structure interaction numerical models have been studied by Plaxis software. Based on the obtained results in this study, the minimum required length of piles in the pile-raft foundation system to change the status of the designation of structures from unauthorized to authorized, for 4 and 6-floor buildings is 6 meters and for the 8-story building is 8-meters. Also, in the 4, 6 and 8-floor buildings, respectively using 8, 10 and 12 meters for piles length is an optimal choice.

## Keywords:

Pile-raft foundation, Settlement able soil, Buildings settlement, FEM, Case study.



## ۱- مقدمه

افزایش جمعیت شهرها و نیاز روزافزون به محل کار و زندگی، بلندمرتبه سازی را به یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسی عمران در عرصه ساخت و ساز تبدیل کرده است. از مهم‌ترین اجزای هر سازه سیستم فونداسیون آن می‌باشد که وظیفه انتقال ایمن بار از سازه به خاک را بر عهده دارد. سیستم فونداسیون برای سازه‌های بلند و سنگین متفاوت از سیستم فونداسیون برای ساختمان‌های معمولی بوده و نیازمند تمهیداتی در زمینه کنترل نشست و افزایش ظرفیت باربری با توجه به شرایط خاک موجود است. از این رو شناخت سیستم‌های فونداسیون و ارزیابی رفتار آن‌ها و بررسی نقاط قوت و ضعف هر کدام از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. در مواردی که کارایی فونداسیون رادیه به تنهایی نمی‌توانست ملزومات طراحی را تحقق بخشد ایده استفاده از پی‌های عمیق جهت کنترل و کاهش نشست مطرح گردید. پی‌های عمیق سنتی برای ضریب اطمینان بزرگ و با فرض تحمل کل بار سازه توسط شمع‌ها طراحی می‌شدند و با اینکه سرشمع با خاک در تماس بود ولی سهمی از باربری کل برای آن در نظر گرفته نمی‌شد [۱].

در چند دهه اخیر مهندسی دریافتند که استفاده از گروه‌های شمع در حالتی که رادیه با خاک در تماس باشد علاوه بر حفظ ایمنی و عملکرد پی دارای صرفه اقتصادی می‌باشد. در این سیستم هم از ظرفیت رادیه و هم از ظرفیت شمع‌ها به نحو مناسب‌تری استفاده می‌شود که آن را سیستم پی-شمع (رادیه-شمع) نامیده‌اند. پی-شمع یک سازه مرکب ژئوتکنیکی است که شامل سه المان شمع، پی گسترده و خاک می‌باشد و در محیط‌هایی که اجرای پی سطحی به تنهایی نیازهای طراحی را برآورده نمی‌کند به عنوان گزینه‌ای اقتصادی مطرح است. این نگرش طراحی پی‌های عمیق را بهینه نموده و تعداد شمع‌ها به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این شرایط با استفاده از اضافه کردن تعداد محدودی شمع علاوه بر ظرفیت باربری نهایی عملکرد پی در نشست کلی، نشست نسبی و نیز ضخامت مورد نیاز پی گسترده بهبود می‌یابد. بررسی‌ها نشان داده است که ترکیب پی گسترده و گروه شمع قابلیت تحمل بارهای بسیار بزرگ را دارا می‌باشد زیرا مشارکت همزمان سختی و مقاومت پی رادیه و شمع‌ها در تحمل بارهای وارده لحاظ می‌گردد. شمع‌ها بیشتر در جهت اطمینان برای کاهش نشست در سیستم پی استفاده می‌شوند زیرا معمولاً نیروی ناشی از اصطکاک شمع‌ها برای کاهش میزان نشست کافی است و ظرفیت باربری جدار شمع در نشست‌های بسیار کم تجمیع شده و تقریباً ثابت می‌ماند [۲]. پی گسترده متکی بر شمع، علاوه بر تأمین سرویس دهی و عملکرد مناسب در باربری، حدود ۳۰٪ نسبت به گروه شمع که بر روی خاک بستر واقع شده صرفه اقتصادی دارد. در این نوع فونداسیون‌ها، نقش پی گسترده، تأمین ظرفیت باربری و نقش اصلی شمع‌ها، کاهش نشست می‌باشد. به دلیل ترکیب شمع با پی گسترده در این نوع فونداسیون‌ها سیستم مورد نظر بسیار پیچیده است، و این پیچیدگی ناشی از اندرکنش‌های مختلف به وجود آمده بین شمع‌ها، شمع با پی گسترده و سیستم فونداسیون با خاک می‌باشد [۳]. تحلیل و طراحی سیستم‌های پی-شمع نیازمند درک جدیدی از اندرکنش بین خاک و سازه است، زیرا برای تعیین ظرفیت باربری نهایی و سرویس پذیری کل سیستم هم رادیه و هم شمع‌ها هم‌زمان در نظر گرفته می‌شوند.

هیروکوشی و رندولف [۴] یک مدل سانتریفیوژی از پی گسترده متکی بر شمع روی خاک رس را در حالتی مورد بررسی قرار داده‌اند که مدل در معرض بارگذاری قائم و افقی بوده است. آن‌ها اثر صلبیت اتصال شمع‌ها به پی گسترده را با رفتار پی گسترده متکی بر شمع بررسی کرده‌اند. یکی از نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ظرفیت باربری شمع زمانی که کلاhek در تماس با خاک است، افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل افزایش تنش فشار محبوس در اطراف شمع به وجود آمده است. السواف [۵] یک آزمایش تجربی به منظور بررسی اثر استفاده از شمع‌های کوتاه در پشتیبانی پی گسترده در خاک ماسه‌ای تحت اثر بارگذاری خارج از محور طراحی نموده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تأثیر استفاده از شمع‌های کوتاه در نزدیکی لبه پی گسترده، منجر به کاهش نشست و بهبود ظرفیت باربری پی گسترده می‌شود. همچنین براساس این مطالعه مشخص گردید که اثر شمع‌های کوتاه بر بهبود عملکرد پی گسترده متکی بر شمع، به نحوه چینش شمع‌ها و نسبت خارج از محوریت بار بستگی دارد. ماتسوموتو و همکاران [۶]



یک مطالعه آزمایشگاهی برای پی گسترده متکی بر شمع در معرض با قائم و افقی به منظور بررسی اثر اتصال سر شمع به پی گسترده بر عملکرد این نوع فونداسیون‌ها انجام داده‌اند. آن‌ها دریافته‌اند که اتصال سرشمع اثر کمی بر رفتار پی گسترده متکی بر شمع تحت بار قائم دارد. این در حالی است که در بار افقی سهم پی گسترده در تحمل بار با کاهش صلبیت اتصال سر شمع کاهش می‌یابد. فیورانتی [۷] یک سری آزمایش سانتریفیوژ برای مدلسازی یک سیستم پی گسترده متکی بر شمع بر روی خاک ماسه‌ای به منظور بررسی نقش شمع‌ها به عنوان کاهش دهنده نشست و تعیین سهم باربری بار اعمالی بین پی گسترده و شمع‌ها انجام داده است. بر اساس نتایج حاصل از این آزمایشات مشاهده می‌گردد که با افزایش تعداد شمع‌ها، نشست پی گسترده کاهش یافته است. همچنین زمانی که شمع‌ها به ظرفیت باربری خود نزدیک می‌شوند، پی گسترده وارد پروسه باربری سیستم می‌شود.

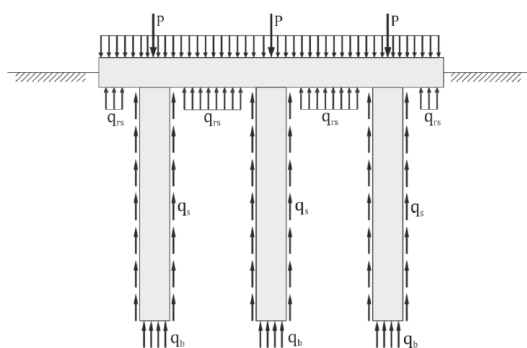
پارکوسو و کوله‌اوی [۸] از مدل دو بعدی کرنش مسطح توسط نرم‌افزار Plaxis که بر پایه روش المان محدود است، به منظور پیش بینی رفتار پی گسترده متکی بر شمع‌ها استفاده کرده‌اند. با توجه به نتایج این مطالعه آنالیز دو بعدی کرنش مسطح، نتایج قابل قبولی از رفتار پی گسترده متکی بر شمع بدون صرف وقت اضافی در مدل سازی و محاسبات ارائه می‌دهد. وولانداری و تجاندر [۹] با مطالعه بر روی یک مدل از پی گسترده متکی بر شمع در یک نمونه پروفیل خاک، به بررسی نشست این نوع فونداسیون با در نظر گیری تعداد مختلف شمع پرداخته‌اند. در این طرح، با آنالیزهای انجام شده توسط نرم‌افزار Plaxis 2D و با مقایسه نتایج حاصل از بررسی عددی با روابط پولوس و دیویس [۱۰] به این موضوع پی برده شده است که اگر تعداد شمع‌ها بیش از تعداد بهینه در نظر گرفته شود، اثر قابل توجهی در کاهش نشست پی گسترده متکی بر شمع مشاهده نخواهد شد. در نتیجه برای یک طراح اقتصادی، نیاز به تعیین تعداد بهینه شمع بر اساس نشست مجاز می‌باشد.

جهت پیش‌گیری از آسیب‌های احتمالی بعدی و رعایت اصول آئین‌نامه‌ای، مهندسین مؤلف هستند حتی‌المقدور از نشست سازه‌ها جلوگیری نموده و یا طراحی را طوری انجام دهند که نشست اتفاق افتاده در سازه در محدوده‌های مجاز باشد. با این وجود در بعضی از پروژه‌ها با توجه به نامناسب بودن شرایط زیرسطحی و عدم دقت کافی در طراحی و اجرا، این سازه‌ها دچار نشست می‌شوند. در صورتی که سازه‌ای دچار نشست بیش از حد مجاز گردد، علاوه بر خسارات مالی که در اثر آسیب دیدگی سازه متوجه مالکین می‌شود، آرامش روانی و جان شهروندان هم در معرض تهدید قرار می‌گیرد. شهر تبریز به عنوان یکی از کلان‌شهرهای ایران، از نکته نظر ژئوتکنیکی از شرایط ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. در نواحی شمال شرقی تبریز به دلیل وجود لایه‌های ریزدانه و بالا بودن تراز آب زیرزمینی، تعدادی از سازه‌ها دچار آسیب شده‌اند. کوی فرشته تبریز در شهرک باغمیشه از جمله مناطقی می‌باشد که در سال‌های اخیر نشست غیرمجاز ساختمان‌های تازه احداث شده در آن به علت عدم رعایت اصول طراحی و اجرا به وفور مشاهده شده است [۱۱]. با توجه به اهمیت استفاده از پی‌های گسترده متکی بر شمع، در این تحقیق با استفاده از نتایج حاصل از دو گمانه ماشینی و دستی مشخصات ژئوتکنیکی خاک بخشی از منطقه کوی فرشته شمالی تبریز مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه به وسیله نرم‌افزار المان محدود پلکسیس مدل‌های عددی اندرکنش مستقیم خاک، پی و سازه، مدل‌سازی شده و نتایج آن‌ها بررسی گردیده‌اند. به منظور امکان تعمیم نتایج این مطالعه به شرایط مختلف موجود در کوی فرشته، ساختمان با طبقات متفاوت برای روسازه انتخاب گردیده و همچنین جهت بررسی حالات مختلف شمع‌های متصل بر پی گسترده و عوامل موثر بر عملکرد آن‌ها، عمق و قطر متفاوت شمع مورد نظر بوده است.



## ۲- بررسی عملکرد پی‌های متکی به شمع

تحت بار محوری، مکانیزم انتقال بار در سیستم فونداسیون پی-شمع، در شکل (۱) نشان داده شده است. این نوع از سیستم‌های فونداسیون شامل سه عضو باربر رادیه، شمع‌ها و خاک زیرین است که بخشی از بار عمودی وارده توسط فشار تماسی بین رادیه و خاک ( $Q_{rs}$ ) و بخشی از آن توسط شمع‌ها ( $Q_s$  و  $Q_b$ ) تحمل می‌شوند [۱۲].



شکل ۱: مکانیزم انتقال بار در پی-شمع [۱۲].

فرایند طراحی سیستم پی-شمع را می‌توان یک فرایند سه مرحله‌ای نامید. در مرحله نخست، مقدماتی شامل بررسی اثر تعداد شمع‌ها بر روی ظرفیت باربری و نشست به وسیله یک آنالیز تقریبی ارزیابی می‌شود. در مرحله دوم تعیین جزئیات بیشتری در رابطه با محل مورد نظر شمع و برخی از الزامات شمع ریزی یا شمع کوبی مورد نیاز است. مرحله سوم، مرحله طراحی همراه روش‌های دقیق‌تر برای تأیید تعداد و محل بهینه شمع‌ها و همچنین کسب اطلاعات ضروری برای طراحی سازه‌ای سیستم فونداسیون خواهد بود. در ادبیات فنی، بیشترین تأکید در موضوع طراحی سیستم‌های فونداسیون بر روی نشست و ظرفیت باربری قائم است. در حالی که در برخی از موارد الزامات طراحی شمع به وسیله لنگر واژگویی اعمالی به وسیله نیروی باد یا زلزله می‌تواند نسبت به بارهای قائم بحرانی‌تر باشد. رندولف [۱۳] سه فلسفه طراحی متفاوت سیستم پی-شمع را به ترتیب زیر بیان کرده است.

الف- نگرش مرسوم: در این نگرش شمع‌ها به صورت گروهی برای تحمل بخش عمده‌ای از بار طراحی می‌شوند، همچنین ممکن است به پی اجازه شرکت در ظرفیت باربری داده شود.

ب- شمع خزشی: در این روش شمع‌ها چنان طراحی می‌شوند که تحت اثر بارهای سرویس در سطح تمام شمع-خاک شروع به لغزش کنند. این لغزش به طور معمول در باری معادل با ۷۰٪ تا ۸۰٪ ظرفیت باربری نهایی شروع می‌شود.

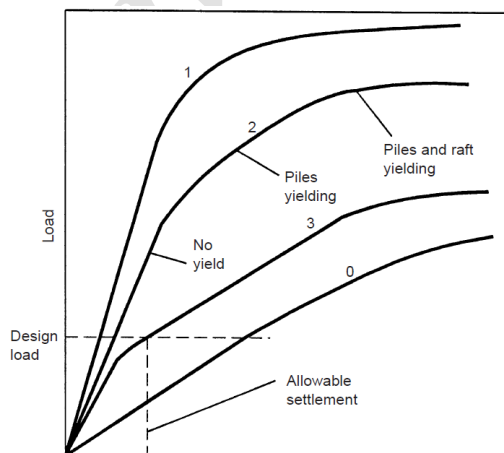
ج- کنترل نشست نامتقارن: در این نگرش شمع‌ها به صورت چیدمان بهینه نشست نامتقارن نسبت به نشست کلی به کار می‌روند. همچنین حالت دیگری از شمع خزشی وجود دارد که در آن ظرفیت کامل شمع‌ها در نظر گرفته می‌شود؛ مثلاً تمام یا بعضی از شمع‌ها در ۱۰٪ ظرفیت باربری نهایی‌شان عمل می‌کنند. به عبارت دیگر شمع‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که اگرچه نقش اصلی آن‌ها کاهنده نشست است، ولی باعث افزایش ظرفیت باربری سیستم فونداسیون نیز می‌گردند [۱۳].

شکل (۲) نشان دهنده رفتار بار نشست پی-شمع بر اساس معیارهای طراحی اول و دوم می‌باشد. منحنی ۰ رفتار رادیه ساده را نشان می‌دهد که در آن مقدار نشست در بار طراحی بسیار زیاد است. منحنی ۱ رویکرد طراحی سنتی را نشان می‌دهد که در آن رفتار گروه شمع، بر رفتار سیستم حاکم است و قسمت عمده این منحنی خطی می‌باشد. در این حالت اکثر بارها توسط شمع‌ها تحمل می‌شوند. منحنی ۲ مفهوم شمع خزشی را نشان می‌دهد که در آن شمع‌ها ضریب اطمینان کوچکتری دارند اما چون تعداد



شمع‌ها کمتر است، رادیه نسبت به منحنی ۱ بار بیشتری تحمل می‌کند. منحنی ۳ استراتژی استفاده از شمع‌ها به عنوان کاهنده نشست و استفاده از ظرفیت کامل شمع‌ها در بار طرح را نشان می‌دهد. در نتیجه منحنی بار نشست در بار طرح خطی نیست اما سیستم پی حاشیه اطمینان کافی دارد و معیار نشست نیز برآورده شده است. بنابراین طراحی بر اساس منحنی ۳ اقتصادی‌تر از طراحی بر اساس منحنی ۱ و ۲ خواهد بود [۱۴]. برای طراحی سیستم پی-شمع بهتر است ابتدا عملکرد رادیه بدون حضور شمع‌ها مورد بررسی قرار گیرد. اگر پی گسترده سهم کمی از ظرفیت باربری مورد نیاز را فراهم کند، بنابراین بهتر است تا طراحی فونداسیون پی-شمع به طریق سنتی که شمع‌ها برای اکثر بار روسازه طراحی می‌شود، انجام گیرد و پی گسترده صرفاً برای بهبود عملکرد شمع‌ها و کاهش اندک ملزومات طراحی آن‌ها در نظر گرفته شود. اما اگر پی گسترده ظرفیت باربری کافی و یا نزدیک به ظرفیت باربری مورد نیاز را داشته باشد ولی معیار نشست کل یا نشست غیریکنواخت را برآورده نسازد، می‌توان شمع‌ها را به عنوان کاهنده نشست طراحی کرد. در سیستم پی-شمع معمولی، چون شمع‌ها به رادیه متصل‌اند به سبب سختی بیشتر شمع‌ها در برابر رادیه، سهم قابل توجهی از بار به آن‌ها می‌رسد و نقش رادیه در باربری کم رنگ جلوه می‌کند. همچنین در این حالت چون تعداد شمع‌ها عمدتاً زیاد است، بار تحمل شده توسط هر شمع نسبتاً کم می‌باشد و حاشیه اطمینان زیادی برای رسیدن به ظرفیت ژئوتکنیکی یا سازه‌ای آن‌ها وجود دارد [۱۴].

برای اینکه ضریب اطمینان سیستم فونداسیون بیش از حد نباشد و طرح غیراقتصادی نگردد، می‌توان از فلسفه طراحی شمع‌های کاهنده نشست استفاده نمود و تعداد شمع‌ها را کمتر از حالت قبل در نظر گرفت؛ اما در این صورت در عملکرد شمع‌ها مشکلاتی بروز خواهد نمود. به بیان دیگر چون تعداد شمع‌ها اندک می‌باشد، ممکن است تنش محوری بالایی در آن‌ها ایجاد شود و ظرفیت تحمل آن‌ها به جای ظرفیت ژئوتکنیکی شان با رفتار سازه‌ای آن‌ها کنترل گردد. فاصله مناسب شمع‌ها نیز بسیار مهم است. اگر شمع‌ها خیلی به هم نزدیک باشند، فضای کافی برای قرار دادن و ردیف کردن آن‌ها نخواهد بود. برعکس، اگر با فواصل زیاد از هم قرار گیرند رادیه خیلی بزرگ و غیر اقتصادی خواهد گردید [۱۵].



شکل ۲: منحنی‌های بار-نشست سیستم پی-شمع بر اساس فلسفه‌های مختلف طراحی [۱۴].



### ۳- طراحی پی‌های گسترده متکی به شمع

به طور کلی طراحی هر نوع شالوده دارای شمع شامل سه مرحله زیر است [۱۶]:

الف- تعیین ظرفیت باربری مجاز شمع، گروه شمع، شالوده پی-شمع و تعیین نشست‌های مجاز، ضرایب اثر گروه و نظایر آن‌ها.

ب- تحلیل سیستم که با انجام آن نیروها و تنش‌ها و نشست‌ها و نحوه توزیع آن‌ها در سیستم مشخص گردد.

ج- کنترل نیروها و تنش‌ها و نشست‌های بدست آمده از تحلیل با مقادیر مجاز آن.

پس از انجام تحلیل گروه شمع، نیروهای وارده بر هر شمع در محل سرشمع مشخص خواهند شد. سپس با انجام تحلیل‌های جداگانه برای هر شمع می‌توان به نحوه توزیع نیروها و نشست‌های قائم و تغییر مکان‌های جانبی در طول شمع پی برد. چنانچه کلاهدک شمع در سطح زمین ریخته شود سیستم، یک سیستم پی-شمع خواهد بود. به دلیل دشواری تحلیل سیستم پی-شمع طراحان فرض می‌کنند که کلاهدک هیچگونه مشارکتی در تحمل بار وارده نخواهد داشت در نتیجه سیستم پی-شمع را مانند گروه شمع آزاد تحلیل می‌کنند. در این بخش سعی بر آنست که روش‌های تحلیل واقعی سیستم پی-شمع معرفی گردد. این روش‌ها به طور کلی به سه دسته زیر تقسیم می‌گردند [۱۷].

۱- روش‌های محاسباتی ساده شده: این دسته شامل نظریات پلوس و داویس [۱۷]، رندولف [۱۳]، ون ایمپ و کلرک [۱۸] و برلند [۱۹] می‌باشد. تمام این محققین روابط ساده‌شده‌ای برای در نظر گیری پروفیل خاک و بار وارده بر شالوده در نظر گرفته‌اند.

۲- روش‌های عددی تقریبی: این دسته به دو نظریه نوار بر روی فنر و صفحه بر روی فنر تقسیم می‌گردد. در نظریه نخست شالوده به چند شالوده نواری تبدیل شده و بر روی فنر (شمع) قرار می‌گیرد و در نظریه دوم شالوده به صورت یک صفحه خمشی قرار گرفته بر روی فنر (شمع) در نظر گرفته می‌شود [۲۰].

۳- روش‌های عددی دقیق: که با استفاده از برنامه‌های تجاری مانند Plaxis، FLAC، ANSYS، ABAQUS و GTS NX که بر اساس روش‌های اجزای محدود یا اجزای مرزی کدنویسی شده‌اند، تحلیل انجام می‌شود.

### ۴- ملاحظات عمومی طراحی پی-شمع

در طراحی شمع‌ها سه پارامتر مهم ظرفیت باربری، نشست و مقاومت سازه‌ای مطرح است. علاوه بر این محل صفحه خنثی و اصطکاک منفی نیز در طراحی شمع موثرند. مقاومت سازه‌ای شمع متأثر از نوع مصالح تشکیل دهنده شمع می‌باشد؛ به عبارت دیگر مصالح تشکیل دهنده شمع باید قادر به تحمل و انتقال بار حین حمل و نقل، استقرار و زمان سرویس‌دهی باشد. به طور معمول مقاومت سازه‌ای شمع جز در شمع‌های دارای طول زیاد عامل نگران‌کننده‌ای در طراحی نیست. به طور کلی ظرفیت ژئوتکنیکی نهایی تحت بارهای قائم، جانبی و لنگر خمشی، نشست و سختی کل فونداسیون، نشست غیریکنواخت، جابجایی جانبی، چرخش زاویه‌ای و همچنین طرح سازه‌ای فونداسیون پی-شمع اصلی‌ترین ملاحظات هستند که باید در طراحی سیستم پی-شمع در نظر گرفته شوند [۱۴].





## ۵- مدلسازی

در این بخش، ابتدا به معرفی هندسه و مصالح مدل‌های مورد مطالعه در سه قسمت سازه، فونداسیون و خاک پرداخته می‌شود و بعد از معرفی نرم‌افزار Plaxis، مدلسازی عددی و روش انجام مطالعه بیان می‌گردد.

### ۵-۱- هندسه و مصالح ساختمان

معمولاً مدلسازی اثر سازه‌های سطحی در مطالعات ژئوتکنیکی به سه روش انجام می‌گیرد. در حالت اول سازه به طور کامل همراه با جزئیات المان‌های سازه‌ای مدلسازی می‌شود که اصطلاحاً به اندرکنش مستقیم خاک و سازه معروف است [۱۱]. در حالت دوم بار ناشی از وزن سازه مستقیماً بر سطح زمین و در محل ساختمان اعمال می‌شود که در این حالت تأثیر سختی سازه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود [۲۱]. روش سوم که متداولترین روش موجود برای مدلسازی سازه‌های سطحی در نرم‌افزارهای دو بعدی است، روش سختی نسبی می‌باشد [۲۲]. در این روش کل پیکره یک ساختمان بصورت یک تیر یا یک قاب الاستیک با سختی معادل در سطح زمین با مدول یانگ (E)، ممان اینرسی (I) و سطح مقطع (A) تعریف می‌شود.

در این مطالعه به منظور بررسی اثر بار و سختی المان‌های سازه‌ای سه ساختمان ۴، ۶ و ۸ طبقه به شکل قاب الاستیک با سختی معادل به شکل دو بعدی مدل شده‌اند. ابعاد و مدول الاستیسیته معادل برای المان‌های سازه‌ای ساختمان‌های مذکور مطابق جدول (۱) محاسبه گردیده است. به دلیل استفاده از نرم‌افزار دوبعدی، به منظور در نظر گرفتن اثر فاصله ستون‌ها از هم در بعد سوم، میزان سختی محوری و خمشی محاسبه شده برای هر یک المان‌ها به فاصله بین آن‌ها که برابر ۵ متر می‌باشد، تقسیم شده است. برای بارگذاری سازه‌ها، در مجموع بار ۱۰ کیلونیوتن بر متر مربع بر هر طبقه و ۵ کیلونیوتن بر متر مربع بر طبقه پارکینگ اعمال شده است که شامل بار مرده، زنده و وزن المان‌های سازه‌ای بر اساس ابعاد و مصالح آن‌ها می‌باشد [۲۱].

### ۵-۲- هندسه و مصالح پی

بر اساس مشخصات فنی و مشاهدات مصالح در ناحیه مورد مطالعه، عموماً از پی‌های سطحی گسترده برای سیستم فونداسیون سازه‌ها استفاده می‌شود. در مطالعه حاضر برای سازه ۴ طبقه یک پی گسترده با ضخامت ۰/۸ متر و برای سازه‌های ۶ و ۸ طبقه پی گسترده‌ای به ضخامت ۱/۰ متر انتخاب شده است. بعلاوه، جهت بررسی و مقایسه رفتار پی‌های گسترده سطحی و پی‌های گسترده متکی بر شمع در مواجهه با خاک‌های نشست‌پذیر در شرایط ژئوتکنیکی مشابه، شالوده سازه‌های مورد مطالعه با شمع‌هایی به قطر ۰/۶، ۰/۸، ۱/۰، ۱/۲ و ۱/۴ متر ترکیب شده‌اند. به منظور بررسی اثر طول شمع‌های مذکور، عمق احداث شمع‌ها متفاوت و برابر با ۰/۶، ۰/۸، ۱/۰، ۱/۲ و ۱/۴ متر انتخاب گردیده. مشخصات مصالح مورد استفاده برای مدلسازی سیستم فونداسیون سازه‌ها در جدول ۲ درج شده است. مشابه المان‌های سازه‌ای به دلیل استفاده از نرم‌افزار دوبعدی، به منظور در نظر داشتن اثر فاصله شمع‌ها از هم در بعد سوم، میزان سختی محوری و خمشی محاسبه شده برای هر یک از شمع‌ها به فاصله بین آن‌ها که برابر ۵ متر می‌باشد، تقسیم شده است.

### ۵-۳- هندسه و مصالح خاک

در این مطالعه، از اطلاعات ژئوتکنیکی حاصل از دو گمانه حفاری شده به منظور احداث یک سازه مسکونی در کوی فرشته شمالی تبریز که موقعیت آن در شکل (۳) نشان داده شده است، استفاده گردیده. در زمین مورد آزمایش یک گمانه از نوع ماشینی به عمق ۱۵ متر و یک گمانه ۱ متری بصورت دستی حفاری شده است. در حین حفاری همزمان با بررسی‌های درجا، نمونه‌های مورد نظر از





اعماق مختلف اخذ و بعد از بسته‌بندی مناسب برای انجام آزمایشات مختلف فیزیکی و مکانیکی به آزمایشگاه منتقل گردیده. تصاویر نمونه‌های اخذ شده از گمانه‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به مشاهدات و اطلاعات به دست آمده در پژوهش حاضر سطح آب زیرزمینی در عمق ۱۰ متر واقع بوده اما براساس مطالعات محققین دیگر سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه در فصول مختلف سال متفاوت می‌باشد [۲۳]. با توجه به نتایج حاصل از لوگ گمانه، یک لایه خاک دستخورد ریزدانه تا عمق ۵ متری به همراه دانه‌های ماسه وجود دارد که دارای دانسیته نسبتاً مناسبی می‌باشد. از عمق ۵ متری الی ۱۳ متری هم خاک ریزدانه و ماسه‌ای به رنگ قهوه‌ای متمایل به قرمز و سست به عنوان لایه خاکی غالب دیده می‌شود. از تراز ۱۳ متری تا انتهای گمانه (عمق ۱۵ متری) نیز خاک‌های ریزدانه رسی سیلتی با تراکم نسبی بالا به مشاهده شده است. شکل (۵) گراف تغییرات عدد SPT را بر اساس اطلاعات گمانه‌ها نشان می‌دهد. علیرغم تغییرات صعودی عدد SPT تا عمق ۵ متر، این اعداد در اعماق ۵ تا ۱۳ متر بشدت افت نموده‌اند. بنابراین با مراجعه به همین داده‌ها می‌توان اعداد محافظه کارانه  $N_1 = 8$  را برای لایه خاکی نخست (از عمق ۵ تا ۱۳ متری) و  $N_1 = 35$  برای لایه تحتانی (از عمق ۱۳ متری به بعد) به عنوان عدد SPT میانگین تصور کرد. مدل رفتاری موهر-کلمب علیرغم سادگی در تعیین پارامترهای مورد نیاز نشان دهنده رفتار صحیح تغییر شکلی خاک نمی‌باشد و بیشتر برای تحلیل‌های ساده و اولیه مناسب می‌باشد [۲۴]. براساس تحقیقات انجام شده توسط تتو و وونگ [۲۵] نتایج به دست آمده توسط مدل رفتاری خاک سخت شونده تطابق بیشتری با نتایج ابزاربندی در پروژه‌های واقعی دارد. ویژگی اصلی این مدل در نظر گرفتن سختی وابسته به مسیر و تنش وارده به توده خاک است. این مدل دارای سخت‌شوندگی همسان بوده و می‌تواند تغییر در اندازه سطح تسلیم را در نظر بگیرد. پارامترهای مدل رفتاری خاک سخت‌شونده عبارت‌اند از: زاویه اصطکاک  $(\phi)$ ، زاویه اتساع  $(\psi)$  و چسبندگی  $(c)$ ، سختی سکانتی در آزمایش سه محوری استاندارد زهکشی شده  $(E_{50})$ ، سختی مماسی برای مرحله اولیه بارگذاری تحکیمی  $(E_{oed})$  و سختی باربرداری-بارگذاری مجدد در تنش محصور کننده مرجع  $(E_{ur})$ ، ضریب پواسون  $(\nu)$ ، مقدار بارگذاری اولیه مبنا  $(P^{ref})$ ، نشان‌گر وابستگی سختی به سطح تنش  $(m)$  و نسبت گسیختگی  $(R_f)$ . با توجه به سختی بسته به مسیر بارگذاری و تنش، استفاده از این مدل در پروژه‌هایی که باربرداری یا بارگذاری به میزان زیاد انجام می‌گردد، مانند ساخت خاک‌ریزها، حفاری تونل‌ها و گودبرداری‌ها توصیه می‌شود [۲۵]. در تحقیق حاضر نیز مدل رفتاری خاک سخت شونده برای انجام مدلسازی انتخاب گردیده است.

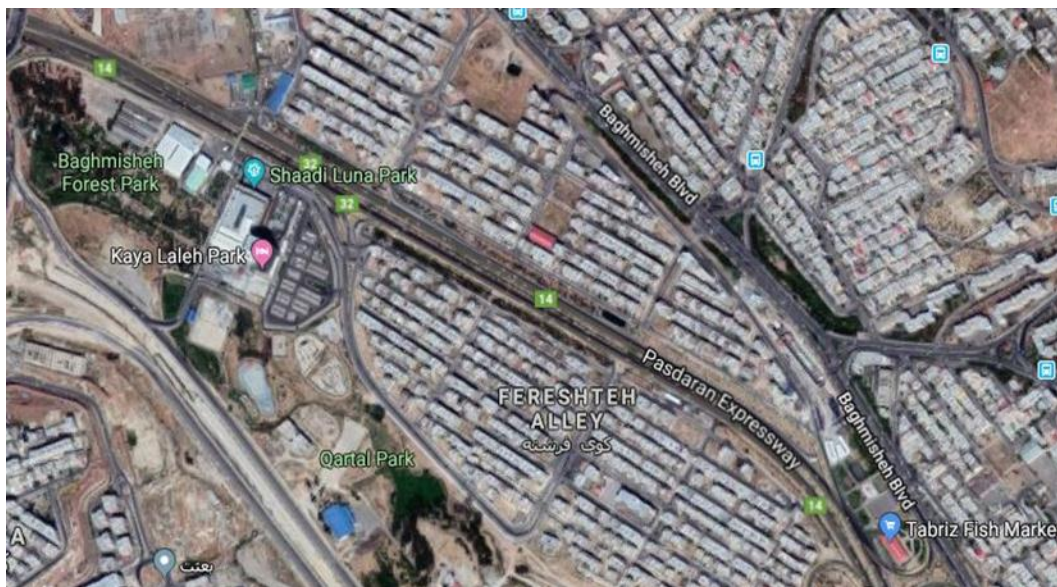
جدول ۱: ابعاد و سختی المان‌های سازه‌ای.

سازه	طبقات	ستون			تیر		
		ابعاد (m)	EA (kN/m)	EI (kNm <sup>2</sup> /m)	ابعاد (m)	EA (kN/m)	EI (kNm <sup>2</sup> /m)
۴	۱ الی ۲	۰/۵×۰/۵	۱۵×۱۰ <sup>۵</sup>	۳/۲×۱۰ <sup>۴</sup>	۰/۴۵×۰/۴۵	۱۳/۵×۱۰ <sup>۵</sup>	۲/۳×۱۰ <sup>۵</sup>
	۳ الی ۴	۰/۴×۰/۴	۹/۶×۱۰ <sup>۵</sup>	۱/۳×۱۰ <sup>۴</sup>	۰/۳۵×۰/۳۵	۱۰/۵×۱۰ <sup>۵</sup>	۱/۱×۱۰ <sup>۵</sup>
۶	۱ الی ۳	۰/۵×۰/۵	۱۵×۱۰ <sup>۵</sup>	۳/۲×۱۰ <sup>۴</sup>	۰/۴۵×۰/۴۵	۱۳/۵×۱۰ <sup>۵</sup>	۲/۳×۱۰ <sup>۵</sup>
	۳ الی ۶	۰/۴×۰/۴	۹/۶×۱۰ <sup>۵</sup>	۱/۳×۱۰ <sup>۴</sup>	۰/۳۵×۰/۳۵	۱۰/۵×۱۰ <sup>۵</sup>	۱/۱×۱۰ <sup>۵</sup>
۸	۱ الی ۴	۰/۵×۰/۵	۱۵×۱۰ <sup>۵</sup>	۳/۲×۱۰ <sup>۴</sup>	۰/۴۵×۰/۴۵	۱۳/۵×۱۰ <sup>۵</sup>	۲/۳×۱۰ <sup>۵</sup>
	۴ الی ۸	۰/۴×۰/۴	۹/۶×۱۰ <sup>۵</sup>	۱/۳×۱۰ <sup>۴</sup>	۰/۳۵×۰/۳۵	۱۰/۵×۱۰ <sup>۵</sup>	۱/۱×۱۰ <sup>۵</sup>



جدول ۲: مشخصات مصالح سیستم فونداسیون سازه‌ها.

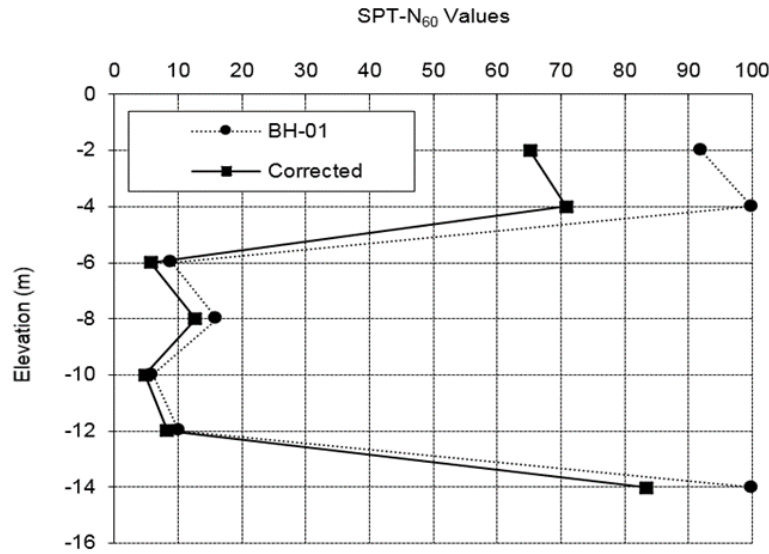
فونداسیون	قطر (m)	عمق استقرار (m)	EA (kN/m)	EI (kNm <sup>2</sup> /m)
پی گسترده	-	۰/۸	۳۰×۱۰ <sup>۶</sup>	۲۵×۱۰ <sup>۵</sup>
	-	۱/۰	۲۴×۱۰ <sup>۶</sup>	۱۳×۱۰ <sup>۵</sup>
شمع	۰/۶	۱۰/۰، ۸/۰، ۶/۰، ۱۶/۰، ۱۴/۰، ۱۲/۰	۱۷×۱۰ <sup>۵</sup>	۳/۶×۱۰ <sup>۴</sup>
	۰/۸		۳۰×۱۰ <sup>۵</sup>	۱۲×۱۰ <sup>۴</sup>
	۱/۰		۴۷×۱۰ <sup>۵</sup>	۳۰×۱۰ <sup>۴</sup>
	۱/۲		۶۸×۱۰ <sup>۵</sup>	۶۰×۱۰ <sup>۴</sup>



شکل ۳: تصویر هوایی کوی فرشته تبریز بر گرفته از Google Maps.



شکل ۴: نمونه‌های اخذ شده خاک از گمانه‌های مورد مطالعه در اعماق ۲، ۴، ۶ و ۸ متری.



شکل ۵: تغییرات عدد SPT در عمق‌های مختلف.

جدول ۳: مشخصات لایه‌های خاک.

پارامتر	عمق (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (deg)	$E_{50}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$E_{oed}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$E_{ur}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$P_{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$	m	$R_f$
لایه اول	سطح-۱۳	۱۸	۷	۱۸	$10 \times 10^3$	$10 \times 10^3$	$30 \times 10^3$	۱۰۰	۰/۳۵	۰/۵	۰/۹
لایه دوم	۱۳-کف	۱۸	۱۰	۲۴	$20 \times 10^3$	$20 \times 10^3$	$60 \times 10^3$	۱۰۰	۰/۳۰	۰/۵	۰/۹

عدم تمایل برخی از مالکین و کارفرمایان برای احداث پی‌های عمیق به دلیل مسائل اقتصادی در تعدادی از پروژه‌های اجرا شده در شهرک باغمشه و کوی فرشته تبریز و سوء استفاده از تبصره‌های قانونی برای عدم تمکین به نظرات مهندسين طراح، ناظر و مجری، عامل بروز نشست غیرمجاز در آنها می‌باشد که نمونه‌هایی از این سازه‌های آسیب‌دیده در شکل (۶) مشاهده می‌گردد.



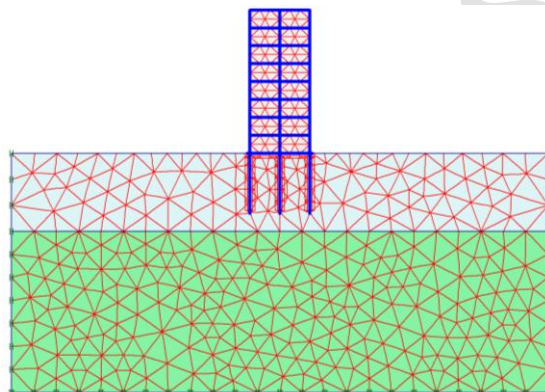
شکل ۶- نمونه‌ای از سازه‌های آسیب دیده با پی سطحی در شهر تبریز: (الف) سازه کج شده در کوی فرشته و تصویری از ترک‌های نمای ساختمان [۲۳]، (ب) سازه کج شده در کوی شرکت گاز [۱۱].





#### ۴-۵- مدل‌سازی عددی

موقعیت مرزهای جانبی طوری انتخاب گردیده که وجود مرزهای مصنوعی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در میدان تنش-کرنش نداشته باشد. به عبارت دیگر ابعاد مدل به گونه‌ای انتخاب شده است که افزایش ابعاد آن بیش از مقادیر انتخاب شده تأثیر قابل ملاحظه‌ای را در میزان تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در توده خاک پیرامون گودبرداری و سازه‌های سطحی نداشته باشد. شرایط مرزی، نوع المان و تراکم المان‌ها نیز بر اساس تحلیل حساسیت انتخاب گردیده، به طوری که نتایج تحت تأثیر قرار نگیرند. جهت افزایش دقت محاسبات شبکه‌بندی در تمام نواحی مدل بسیار ریز انتخاب شده است. مش بندی مدل به میزان ۴ برابر عرض پی در امتداد قائم و بطور جانبی ۹ برابر عرض پی صورت گرفته است که این ابعاد جانبی با توصیه‌های محققین قبلی نیز دارای تطابق مناسبی می‌باشد [۲۲]. در نهایت مدل به دست آمده دارای ۴۰ متر عمق و ۹۰ متر عرض خواهد بود. به منظور انجام این مطالعه عددی مجموعاً ۷۵ مدل عددی دو بعدی مدل‌سازی و تحلیل گردیده. شکل ۷ نمونه‌ای از مدل‌های مش‌بندی شده را نشان می‌دهد که با توجه به آن شرایط مرزی مدل با استفاده از تکیه‌گاه‌های گیردار در کف آن، تکیه‌گاه‌های غلتکی در کناره‌ها و آزاد بودن مرزهای سطح بالایی مدل مشابه شرایط واقعی زمین فرض شده است.



شکل ۷: نمونه مدل‌سازی صورت گرفته برای سازه ۸ طبقه با شمع‌هایی به طول ۱۰ متر.

در مطالعه حاضر به علت مرحله‌ای بودن احداث پی و سازه از آنالیز تنش در حالت ساخت مرحله‌ای استفاده گردیده و مراحل تحلیل مدل‌ها به شرح زیر می‌باشد:

- ۱) فعال‌سازی لایه‌های خاک و معرفی تراز آب زیرزمینی. در این فاز جابجایی ناشی از وزن خاک صفر در نظر گرفته شده است.
- ۲) فعال‌سازی پی گسترده، شمع‌ها و اندرکنش بین خاک و سیستم فونداسیون.
- ۳) احداث طبقات سازه و بارگذاری آن‌ها در فازهای مجزا.

#### ۶- نتایج

در این بخش نتایج حاصل مطالعه عددی برای ۷۵ مدل مورد بررسی ارائه می‌گردد. مقایسه عملکرد پی‌های سطحی در شرایط یکسان ژئوتکنیکی با پی‌های گسترده متکی بر شمع، بررسی تأثیر و عملکرد طول و قطر متفاوت شمع‌ها در سیستم پی-شمع جهت نیل به یک طرح بهینه اصلی‌ترین موضوعاتی می‌باشند که در این فصل به آن‌ها پرداخته می‌شود.



#### ۱-۶- ساختمان ۴ طبقه

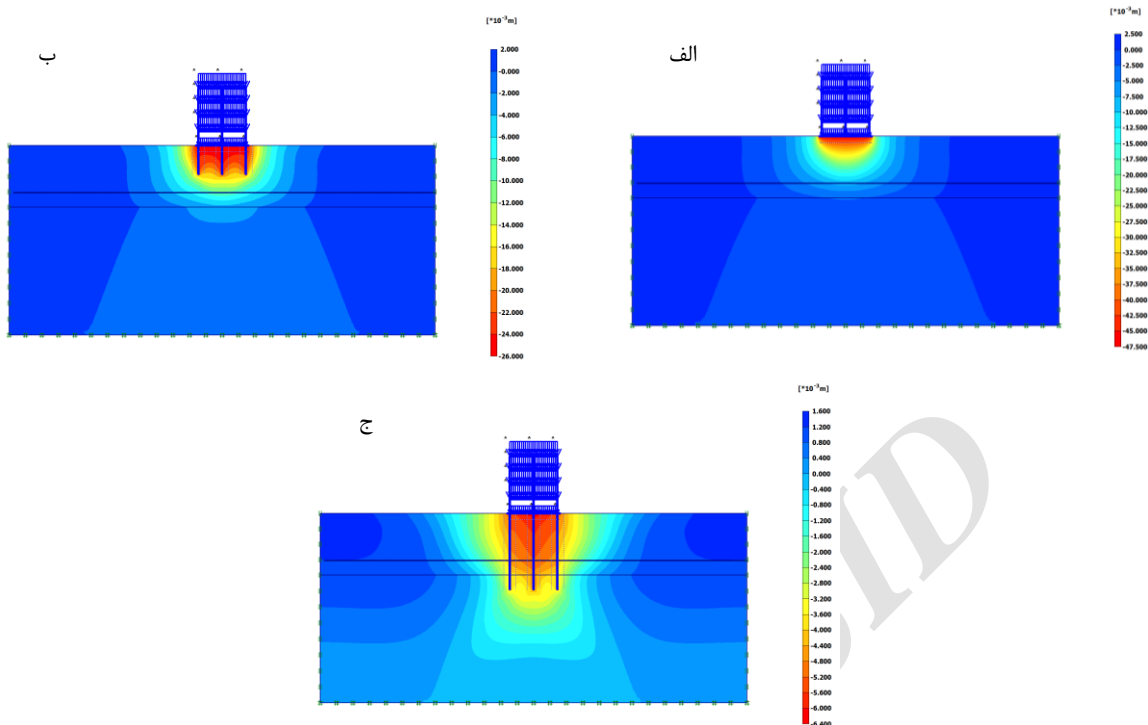
جدول (۴) میزان نشست حداکثر پی سازه، که در مرکز آن اتفاق می‌افتد را براساس متغیر قطر و طول شمع نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۴) و مطابق شکل (۸-الف)، در صورتی که سازه ۴ طبقه صرفاً بر روی پی گسترده به ضخامت ۰/۸ متر بنا گردد، حداکثر نشست مرکز پی آن به ۴۸/۲۲- میلی‌متر می‌رسد. بر اساس جدول ۷-۴-۲ مبحث هفت مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲)، که محدوده مجاز نشست یکنواخت و غیریکنواخت پی‌های سطحی را تعیین می‌کند، حداکثر نشست یکنواخت قابل قبول برای پی‌های نواری و گسترده احداث شده بر روی خاک ماسه‌ای ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین، جدول ۴ وضعیت نشست پی سازه ۴ طبقه را در حالات مختلف مدلسازی، از نظر آئین‌نامه مشخص می‌نماید که مطابق آن در صورت استفاده از سیستم پی-شمع وضعیت تقریباً غیر مجاز نشست سازه در حالت استفاده از پی گسترده در تمام مدل‌ها به حالت مجاز تغییر خواهد نمود.

مطابق شکل (۸-ب)، در صورت استفاده از شمع‌هایی به قطر ۰/۶ متر و با طول ۶ متر که حداقل مشخصات شمع‌های مورد مطالعه می‌باشد، می‌توان میزان نشست پی را با ۴۶٪ کاهش به ۲۶/۰۶- میلی‌متر رساند. براساس نتایج حاصله افزایش طول شمع تأثیر بسیار زیادی در کاهش میزان نشست پی دارد به طوری که در صورت استفاده از شمع‌هایی به ضخامت ۰/۶ و با طول ۱۶ متر، نشست پی ۸۷/۱۲٪ کاهش نشان می‌دهد و مطابق شکل ۸ ج، به ۶/۲۱- میلی‌متر می‌رسد. با بررسی نتایج این مطالعه مشخص می‌گردد افزایش طول شمع‌ها در عمق‌های کمتر تأثیر بیش‌تری بر روی کاهش نشست پی دارد و در عمق‌های بیشتر اثر پذیری نشست آن از افزایش طول شمع کاهش می‌یابد. برای مثال در تمام اقطار مورد بررسی افزایش طول شمع از ۶ به ۸ متر، از ۸ به ۱۰ متر، از ۱۰ به ۱۲ متر، از ۱۲ به ۱۴ متر و از ۱۴ به ۱۶ متر به ترتیب نشست پی را در حدود ۷، ۵، ۴، ۳ و ۱ میلی‌متر که معادل ۱۴٪، ۱۰٪، ۸٪، ۷٪ و ۲٪ می‌باشد، کاهش می‌دهد. با توجه به اینکه در حالت استفاده از شمع به طول ۸ متر نشست حداکثر پی به حدود ۱۹- میلی‌متر می‌رسد، بنابراین برای سیستم پی-شمع فونداسیون سازه ۴ طبقه، افزایش طول شمع‌ها بیش از ۸ متر انتخابی مناسب و بهینه نخواهد بود.

بررسی نتایج حاصل از مدلسازی عددی بیانگر آن است که تغییر قطر شمع‌های مورد استفاده در این تحقیق، تأثیر چشم‌گیری در کاهش نشست پی سازه ندارد. برای مثال در مدل‌های شماره ۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ که به ترتیب دارای قطرهای ۰/۶، ۰/۸، ۱/۰ و ۱/۲ متر و طول ۱۶ متر می‌باشند نشست پی به ترتیب برابر ۶/۲۱-، ۵/۷۲-، ۵/۴۶- و ۵/۲۹- میلی‌متر ثبت شده است. در مقایسه عملکرد شمع‌ها با قطر ۰/۶ و ۱/۲ متری حداکثر تأثیر در کاهش میزان نشست سازه به ۱/۰۸ میلی‌متر می‌رسد که افزایش قطر شمع‌ها را بیش از ۰/۶ متر توجیه نمی‌کند.

#### ۲-۶- ساختمان ۶ طبقه

جدول (۴) نتایج کمی حاصل از تحلیل مدل‌های عددی مربوط به سازه ۶ طبقه را در بحث نشست پی سازه، براساس متغیر قطر و طول شمع نشان می‌دهد.



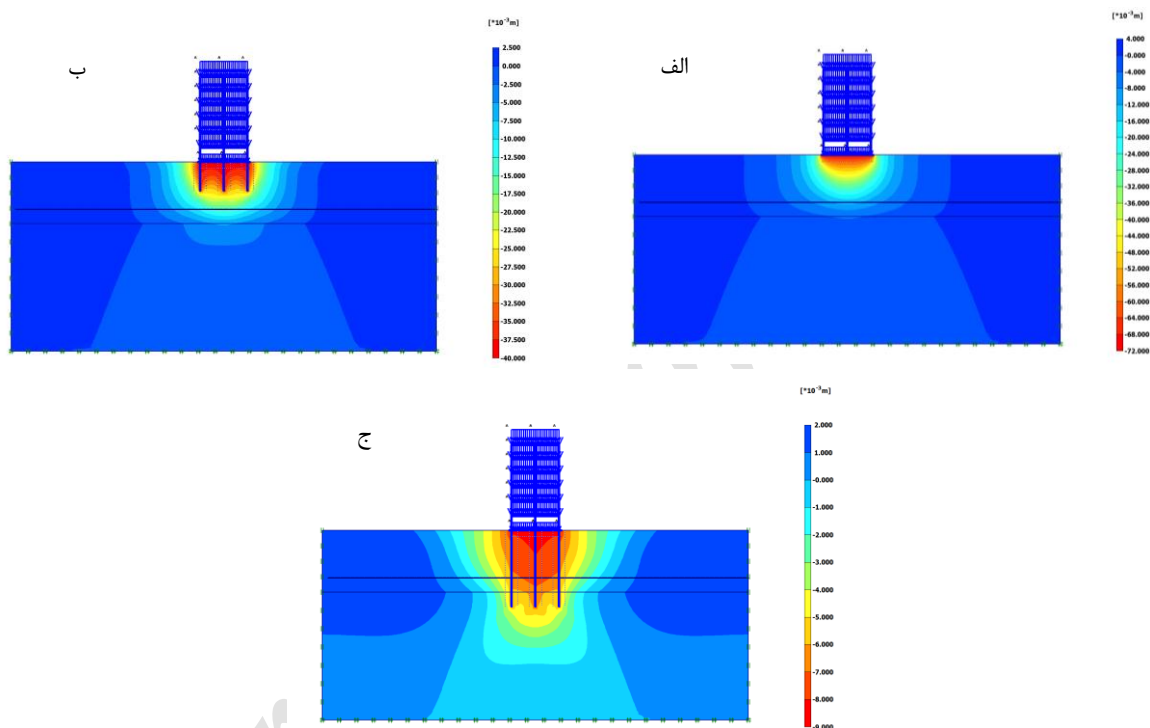
شکل ۸: نشست سازه ۴ طبقه بر حسب میلی‌متر در مدل: (الف) شماره ۰، (ب) شماره ۱، (ج) شماره ۶.

براساس جدول (۴) و مطابق شکل (۹-الف)، در صورتی که سازه ۶ طبقه صرفاً بر روی پی گسترده به ضخامت ۱/۰ متر بنا گردد، حداکثر نشست مرکز پی آن به ۷۱/۷- میلی‌متر می‌رسد. از نظر مبحث ۷ مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲) این میزان از نشست برای یک پی گسترده بنا شده بر روی خاک ماسه‌ای کاملاً غیر مجاز می‌باشد و می‌بایست میزان نشست توسط راهکارهای مهندسی مانند پایل و یا میکروپایل تقلیل داده شود. براساس نتایج مطالعه حاضر با در نظر گرفتن سیستم فونداسیون پی گسترده متکی بر شمع، میزان نشست سازه به شدت کاهش پیدا کرده و از نظر مقررات آئین‌نامه در دسته مجاز قرار می‌گیرد.

مطابق شکل (۹-ب)، در صورت استفاده از شمع‌هایی به قطر ۰/۶ متر و با طول ۶ متر که حداقل مشخصات شمع‌های مورد مطالعه می‌باشد، می‌توان میزان نشست پی را با بیش از ۴۴٪ کاهش به ۳۹/۹۳- میلی‌متر رساند. براساس نتایج جدول ۴ و شکل ۹ ج، افزایش طول شمع تأثیر بسیار زیادی در کاهش میزان نشست پی دارد به طوری که در صورت استفاده از شمع‌هایی به ضخامت ۰/۶ و با طول ۱۶ متر، نشست پی ۸۷/۷۴٪ کاهش نشان می‌دهد و به ۸/۷۹- میلی‌متر می‌رسد. مشابه سازه ۴ طبقه در سازه ۶ طبقه نیز، افزایش طول شمع‌ها در عمق‌های کمتر تأثیر بیشتری بر روی کاهش نشست پی دارد و در عمق‌های بیشتر اثر پذیری نشست آن از افزایش طول شمع کاهش می‌یابد. برای مثال در تمام اقطار مورد بررسی افزایش طول شمع از ۶ به ۸ متر، از ۸ به ۱۰ متر، از ۱۰ به ۱۲ متر، از ۱۲ به ۱۴ متر و از ۱۴ به ۱۶ متر به ترتیب نشست پی را در حدود ۱۱، ۸، ۶، ۵ و ۲ میلی‌متر که معادل ۱۱٪، ۸٪، ۷٪ و ۲٪ می‌باشد، کاهش می‌دهد. با توجه به اینکه در حالت استفاده از شمع به طول ۱۰ متر نشست حداکثر پی حدوداً به ۲۱- میلی‌متر می‌رسد، بنابراین برای سیستم پی-شمع سازه ۶ طبقه، افزایش طول شمع‌ها بیش از ۱۰ متر انتخابی مناسب و بهینه نخواهد بود.



بررسی نتایج حاصل از مدلسازی عددی بیانگر آن است که تغییر قطر شمعی‌های مورد استفاده در این تحقیق، تأثیر چشم‌گیری در کاهش نشست پی سازه ندارد. برای مثال در مدل‌های شماره ۴، ۱۰، ۱۶ و ۲۲ که به ترتیب دارای قطرهای ۰/۶، ۰/۸، ۱/۰ و ۱/۲ متر و طول ۱۲ متر می‌باشند نشست پی به ترتیب برابر ۱۵/۴۴، ۱۴/۹۲، ۱۴/۶۴ و ۱۴/۴۷ میلی‌متر ثبت شده است. در مقایسه عملکرد شمعی‌ها با قطر ۰/۶ و ۱/۲ متری حداکثر تأثیر در کاهش میزان نشست سازه به ۰/۹۷ میلی‌متر می‌رسد که افزایش قطر شمعی‌ها را بیش از ۰/۶ متر توجیه نمی‌نماید. به عبارت دیگر سختی تأمین شده توسط شمعی‌هایی به قطر ۰/۶ متر که با فاصله‌های مرکز به مرکز ۵ متر در طول و عرض هندسه پی قرار گرفته‌اند، برای پایداری و کاهش نشست پی مناسب می‌باشد و افزایش قطر شمعی‌ها انتخاب بهینه نخواهد بود.



شکل ۹: نشست سازه ۶ طبقه بر حسب میلی‌متر در مدل: (الف) شماره ۰، (ب) شماره ۱، (ج) شماره ۶.

### ۶-۳- ساختمان ۸ طبقه

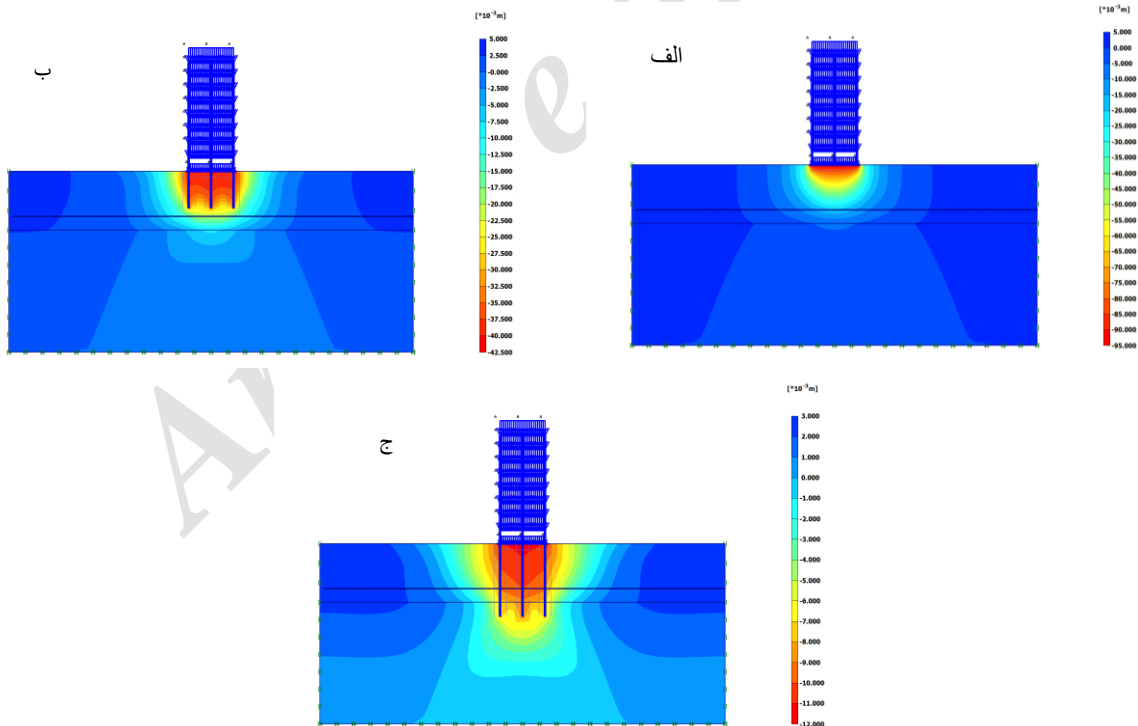
جدول (۴) نتایج کمی حاصل از تحلیل مدل‌های عددی مربوط به سازه ۸ طبقه را در بحث نشست پی سازه، براساس متغیر قطر و طول شمعی نشان می‌دهد. براساس جدول (۴) و مطابق شکل (۱۰-الف)، در صورتی که سازه ۸ طبقه صرفاً بر روی پی گسترده به ضخامت ۱/۰ متر بنا گردد، حداکثر نشست مرکز پی آن به ۹۵/۹۷ میلی‌متر می‌رسد. از نظر مبحث ۷ مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲) این میزان از نشست برای یک پی گسترده بنا شده بر روی خاک ماسه‌ای کاملاً غیر مجاز می‌باشد و می‌بایست میزان نشست توسط راهکارهای مهندسی تقلیل داده شود. براساس نتایج مطالعه حاضر با در نظر گرفتن سیستم فونداسیون پی گسترده متکی بر شمعی، در صورتی که طول شمعی‌ها بیش از ۶ متر باشند، میزان نشست سازه به شدت کاهش پیدا کرده و از نظر مقررات آئین‌نامه در دسته مجاز قرار می‌گیرد.





مطابق شکل (۱۰-ب)، در صورت استفاده از شمع‌هایی به قطر ۰/۶ متر و با طول ۸ متر که حداقل مشخصات شمع‌های مورد مطالعه می‌باشد، می‌توان میزان نشست پی را با بیش از ۵۸٪ کاهش به ۴۰/۳۱- میلی‌متر رساند. براساس نتایج به دست آمده و شکل ۱۰ ج، افزایش طول شمع تأثیر بسیار زیادی در کاهش میزان نشست پی دارد به طوری که در صورت استفاده از شمع‌هایی به ضخامت ۰/۶ و با طول ۱۶ متر، نشست پی ۸۷/۷۸٪ کاهش نشان می‌دهد و به ۱۱/۷۳- میلی‌متر می‌رسد. مشابه سازه ۴ و ۶ طبقه در سازه ۸ طبقه نیز، افزایش طول شمع‌ها در عمق‌های کمتر تأثیر بیش‌تری بر روی کاهش نشست پی دارد و در عمق‌های بیشتر اثر پذیری نشست آن از افزایش طول شمع کاهش می‌یابد. برای مثال در تمام اقطار مورد بررسی افزایش طول شمع از ۶ به ۸ متر، از ۸ به ۱۰ متر، از ۱۰ به ۱۲ متر، از ۱۲ به ۱۴ متر و از ۱۴ به ۱۶ متر به ترتیب نشست پی را در حدود ۱۶٪، ۱۱٪، ۹٪، ۷٪ و ۳٪ کاهش می‌دهد. با توجه به اینکه در حالت استفاده از شمع به طول ۱۲ متر نشست حداکثر پی حدوداً به ۲۰- میلی‌متر می‌رسد، بنابراین برای سیستم پی-شمع سازه ۸ طبقه، افزایش طول شمع‌ها بیش از ۱۲ متر انتخابی مناسب و بهینه نخواهد بود.

بررسی نتایج حاصل از مدلسازی عددی بیانگر آن است که تغییر قطر شمع‌های مورد استفاده در این تحقیق، تأثیر چشم‌گیری در کاهش نشست پی سازه ندارد. برای مثال در مدل‌های شماره ۵، ۱۱، ۱۷ و ۲۳ که به ترتیب دارای قطرهای ۰/۶، ۰/۸، ۱/۰ و ۱/۲ متر و طول ۱۴ متر می‌باشند نشست پی به ترتیب برابر ۱۴/۳۵-، ۱۳/۶۰-، ۱۳/۲۰- و ۱۲/۹۶- میلی‌متر ثبت شده است. در مقایسه عملکرد شمع‌ها با قطر ۰/۶ و ۱/۲ متری حداکثر تأثیر در کاهش میزان نشست سازه به ۱/۳۹ میلی‌متر می‌رسد که افزایش قطر شمع‌ها را بیش از ۰/۶ متر توجیه نمی‌نماید.



شکل ۱۰: نشست سازه ۸ طبقه بر حسب میلی‌متر در مدل: (الف) شماره ۰، (ب) شماره ۲، (ج) شماره ۶.



جدول ۴: نشست پی سازه ۴، ۶ و ۸ طبقه براساس متغیر قطر و طول شمع.

شماره مدل	قطر شمع (m)	طول شمع (m)	سازه ۴ طبقه			سازه ۶ طبقه			سازه ۸ طبقه														
			نشست پی (mm)	کاهش نشست (%)	وضعیت آئین‌نامه‌ای نشست	نشست پی (mm)	کاهش نشست (%)	وضعیت آئین‌نامه‌ای نشست	نشست پی (mm)	کاهش نشست (%)	وضعیت آئین‌نامه‌ای نشست												
۰	پی گسترده سطحی		-۴۸/۲۲	-	مرز حالت غیر مجاز	-۷۱/۷۰	-	غیر مجاز	-۹۵/۹۷	-	غیر مجاز												
۱	۰/۶	۶	-۲۶/۰۶	۴۵/۹۶	مجاز	-۳۹/۹۳	۴۴/۳۱	مجاز	-۵۶/۰۶	۴۱/۵۹	غیر مجاز												
۲		۸	-۱۹/۲۰	۶۰/۱۸	مجاز	-۲۹/۱۷	۵۹/۳۲		مجاز	-۴۰/۳۱	۵۸/۰۰	مجاز											
۳		۱۰	-۱۴/۳۰	۷۰/۳۴		مجاز	-۲۱/۳۹			۷۰/۱۷	مجاز		-۲۹/۳۲	۶۹/۴۵	مجاز								
۴		۱۲	-۱۰/۴۳	۷۸/۳۷			مجاز			-۱۵/۴۴			۷۸/۴۷	مجاز		-۲۰/۵۷	۷۸/۵۷	مجاز					
۵		۱۴	-۷/۲۲	۸۵/۰۳						مجاز			-۱۰/۴۸			۸۵/۳۸	مجاز		-۱۴/۳۵	۸۵/۰۵	مجاز		
۶		۱۶	-۶/۲۱	۸۷/۱۲									مجاز			-۸/۷۹			۸۷/۷۴	مجاز		-۱۱/۷۳	۸۷/۷۸
۷	۰/۸	۶	-۲۵/۹۰	۴۶/۲۹				مجاز								-۳۹/۸۳			۴۴/۴۵			مجاز	-۵۵/۹۴
۸		۸	-۱۸/۹۵	۶۰/۷۰	مجاز			-۲۸/۹۱	۵۹/۶۸			مجاز				-۴۰/۰۳			۵۸/۲۹				مجاز
۹		۱۰	-۱۳/۹۵	۷۱/۰۷		مجاز		-۲۰/۹۵	۷۰/۷۸		مجاز				-۲۸/۷۹	۷۰/۰۰			مجاز				
۱۰		۱۲	-۱۰/۰۴	۷۹/۱۸			مجاز	-۱۴/۹۲	۷۹/۱۹					مجاز	-۱۹/۸۹	۷۹/۲۷		مجاز					
۱۱		۱۴	-۶/۸۱	۸۵/۸۸				مجاز	-۹/۸۹	۸۶/۲۱					مجاز	-۱۳/۶۰	۸۵/۸۳				مجاز		
۱۲		۱۶	-۵/۷۲	۸۸/۱۴					مجاز	-۸/۱۴			۸۸/۶۵			مجاز	-۱۰/۸۸			۸۸/۶۶			
۱۳	۱/۰	۶	-۲۵/۸۵	۴۶/۳۹						مجاز			-۳۹/۷۸				۴۴/۵۲			مجاز		-۵۵/۸۷	
۱۴		۸	-۱۸/۸۳	۶۰/۹۵	مجاز					-۲۸/۸۰		۵۹/۸۳	مجاز				-۳۹/۹۲					۵۸/۴۰	مجاز
۱۵		۱۰	-۱۳/۷۶	۷۱/۴۶		مجاز				-۲۰/۷۳	۷۱/۰۹	مجاز					-۲۸/۵۲		۷۰/۲۸			مجاز	
۱۶		۱۲	-۹/۸۲	۷۹/۶۴			مجاز			-۱۴/۶۴	۷۹/۵۸			مجاز			-۱۹/۵۳	۷۹/۶۵	مجاز				
۱۷		۱۴	-۶/۵۶	۸۶/۴۰				مجاز		-۹/۴۰	۸۶/۸۹				مجاز		-۱۳/۲۰	۸۶/۲۵			مجاز		
۱۸		۱۶	-۵/۴۶	۸۸/۶۸					مجاز	-۷/۷۹	۸۹/۱۴					مجاز	-۱۰/۴۳	۸۹/۱۳					
۱۹	۱/۲	۶	-۲۵/۸۳	۴۶/۴۳						مجاز	-۳۹/۷۵						۴۴/۵۶	مجاز		-۵۵/۸۲			
۲۰		۸	-۱۸/۷۷	۶۱/۰۷	مجاز					-۲۸/۷۴	۵۹/۹۲		مجاز				-۳۹/۸۵			۵۸/۴۸			مجاز
۲۱		۱۰	-۱۳/۶۶	۷۱/۶۷		مجاز				-۲۰/۶۱	۷۱/۲۶	مجاز					-۲۸/۳۸			۷۰/۴۳		مجاز	
۲۲		۱۲	-۹/۶۸	۷۹/۹۳			مجاز			-۱۴/۴۷	۷۹/۸۲			مجاز			-۱۹/۳۳		۷۹/۸۶	مجاز			
۲۳		۱۴	-۶/۴۱	۸۶/۷۱				مجاز		-۹/۲۶	۸۷/۰۹				مجاز		-۱۲/۹۶		۸۶/۵۰		مجاز		
۲۴		۱۶	-۵/۲۹	۸۹/۰۳					مجاز	-۷/۵۷	۸۹/۴۴					مجاز	-۱۰/۱۶		۸۹/۴۱				

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

- در صورت عدم استفاده از ترکیب پی‌های سطحی و عمیق نشست سه سازه ۴، ۶ و ۸ طبقه به ترتیب به  $-۴۸/۲۲$ ،  $-۷۱/۷۰$  و  $-۹۵/۹۷$  میلی‌متر می‌رسد که از نظر ضوابط مبحث هفت مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲) در محدوده غیر مجاز قرار می‌گیرند.
- حداقل طول لازم شمع‌ها در سیستم فونداسیون پی-شمع جهت تغییر وضعیت آئین‌نامه‌ای نشست سازه‌ها از غیر مجاز به مجاز، برای سازه ۴ و ۶ طبقه ۶ متر و برای سازه ۸ طبقه ۸ متر می‌باشد.



۳- با توجه به اینکه در سازه‌های ۴، ۶ و ۸ طبقه به ترتیب در صورت استفاده از شمع‌هایی به طول ۸، ۱۰ و ۱۲ متر نشست حداکثر پی به حدود ۱۹-، ۲۱- و ۲۰- میلی‌متر می‌رسد، بنابراین برای سیستم پی-شمع فونداسیون این سازه‌ها، افزایش طول شمع‌ها به ترتیب بیش از ۸، ۱۰ و ۱۲ متر انتخابی مناسب و بهینه نخواهد بود.

۴- افزایش طول شمع تأثیر عمده‌ای در نشست ماکزیمم دارد، اما تأثیر آن روی لنگرهای داخلی ناچیز است. مشاهده شده است که تأثیر طول شمع روی نشست‌های غیریکنواخت به شدت بارگذاری بستگی دارد. به این صورت که در شدت بارهای بزرگ، استفاده از شمع‌های بلندتر باعث کاهش نشست‌های غیریکنواخت می‌گردد.

۵- بررسی نتایج حاصل از مدلسازی عددی بیانگر آن است که تغییر قطر شمع‌های مورد استفاده در این تحقیق، تأثیر چشم‌گیری در کاهش نشست پی سازه ندارد. به عبارت دیگر سختی تأمین شده توسط شمع‌هایی به قطر ۰/۶ متر که با فاصله‌های مرکز به مرکز ۵ متر در طول و عرض هندسه پی قرار گرفته‌اند، برای پایداری و کاهش نشست پی مناسب می‌باشد و افزایش قطر شمع‌ها انتخاب بهینه نخواهد بود.

۶- جهت جلوگیری از آسیب‌های احتمالی بعدی و براساس نتایج این مطالعه، به دلیل سستی خاک کوی فرشته تبریز و نشست‌پذیری بالای آن، توصیه می‌گردد از منظور پی‌های سطحی برای تمام سازه‌ها در این منطقه امتناع گردد.

#### ۸- سپاسگذاری

مطالعه حاضر، مقاله‌ای مستخرج از طرحی پژوهشی تحت عنوان "بررسی عملکرد شمع‌ها در خاک و محیط‌های نشست‌پذیر" متعلق به سازمان نظام مهندسی استان آذربایجان شرقی می‌باشد. پژوهشگران این مطالعه از حمایت‌های این سازمان کمال تشکر و قدردانی را دارند.

#### ۹- مراجع

- [1]- Mekbib, M., 2004, **Performance of piled raft foundations for Addis Ababa soils**, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy at the Addis Ababa University, Addis Ababa.
- [2]- Muni, B., 2000, **Soil mechanics and foundations**, Wiley & Sons, New Jersey, United States of America.
- [3]- Moyes, P., 2005, **Piled raft design process for a high-rise building on the gold coast**, Tall Buildings: From Engineering to Sustainability, 241-252.
- [4]- Horikoshi, K., and Randolph, M. F., 1996, **Centrifuge modelling of piled raft foundations on clay**, Geotechnique, 46(4), 741-752.
- [5]- El-Sawwaf, M., 2010, **Experimental study of eccentrically loaded raft with connected and unconnected short piles**, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 136(10), 1394-1402.
- [6]- Matsumoto, T., Nemoto, H., Mikami, H., Yaegashi, K., Arai, T., and Kitiyodom, P., 2010, **Load tests of piled raft models with different pile head connection conditions and their analyses**, Soils and Foundations, 50(1), 63-81.
- [7]- Fioravante, V., 2011, **Load transfer from a raft to a pile with an interposed layer**, Géotechnique, 61(2), 121.



- [8]- Prakoso, W. A., and Kulhawy, F. H., 2001, **Contribution to piled raft foundation design**, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(1), 17-24.
- [9]- Wulandari, P.S. and Tjandra, D., 2015, **Analysis of piled raft foundation on soft soil using PLAXIS 2D**, Procedia Engineering, 363-367.
- [10]- Poulos, H. G., and Davis, E. H., 1980, **Pile foundation analysis and design**, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y.
- [۱۱]- احترامی، ع.، ۱۳۹۷، بررسی رفتار و اصلاح نشست نامتقارن سازه‌های بتنی و پی‌های آن‌ها به روش جکینگ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز.
- [12]- Sonmez, N., 2013, **A Study on Design of Piled Raft foundation System**, Middle East Technical University.
- [13]- Randolph, M. F., 1994, **Design methods for pile group and piled rafts**, In Proc. 13th Int. Conference on SMFE, 5, 61-82.
- [14]- Poulos, H. G., 2001, **Piled raft foundations: design and applications**, Geotechnique, 51(2), 95-114.
- [15]- Coduto, D. P., 2001, **Soil Mechanics. Foundation Design; Principles and Practices**, 57-61.
- [16]- Das, B. M., 2015, **Principles of foundation engineering**, Eighth edition, Cengage learning, Boston, United States of America.
- [17]- Poulos, H. G., 1997, **Comparison of some methods for analysis of piled rafts**, In Proceedings of the international conference on soil mechanics and foundation engineering-international society for soil mechanics and foundation engineering.
- [18]- Van Impe, W. F. and Clerq, L., 1995, **A Piled Raft Interaction Model**, Geotechnica, No.73, 1-23.
- [19]- Burland, J. B., 1995, **Piles as Settlement Reducers**, Keynote Address, 18<sup>th</sup> Italian Congress on Soil Mechanics, Pavia, Italy.
- [20]- Poulos, H. G., 1991, **Analysis of Piled Strip Foundations**, Comp. Methods & Advances in Geomechs., ed. Beer et al, Balkema, Rotterdam, 1: 183-191.
- [۲۱]- ملکی، م.، بائی، ب. و بیتهی، م.، ۱۳۸۹، بررسی تأثیر اندرکنش گودبرداری و سازه‌ی مجاور آن در تحلیل گودبرداری‌ها در محیط‌های شهری، نشریه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، دوره ۲۱، شماره ۲، ص ۲۵-۴۰.
- [22]- Potts, D. M., and Addenbrooke, T. I., 1997, **A structure's influence on tunnelling-induced ground movements**, In Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 125(2).
- [۲۳]- علیزاده مجدی، ع. و دبیری، ر.، ۱۳۹۷، آسیب شناسی ژئوتکنیکی کوی فرشته تبریز، رویکردهای نوین در مهندسی عمران، دوره ۲، شماره ۱، ص ۱۴-۳۲.
- [۲۴]- رضایی، ا. ح؛ احترامی، ع.، ۱۳۹۷، رده بندی ریسک سازه‌های سطحی و بررسی عملکرد شمع درجا در کاهش نشست‌های ناشی از حفر تونل‌های مترو در مناطق شهری (مطالعه موردی مترو تبریز)، مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، سمنان، ایران.
- [25]-Teo, P. L., and Wong, K. S., 2012, **Application of the Hardening Soil model in deep excavation analysis**, The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 5(3), 152-165.



[۲۶]- مبحث ۷ مقررات ملی ساختمان ایران، ۱۳۹۲، پی و پی سازی، دفتر امور مقررات ملی ساختمان وزارت راه و شهرسازی، نشر توسعه ایران، تهران، ایران.

Archive of SID