

## An investigation on the bearing capacity of piled raft foundations experimentally and comparison with modified hyperbolic model results

Mohammad Jamal Malekkhani<sup>1</sup>, Jafar Bolouri Bazzaz<sup>2\*</sup>

1- Ph.D. Student of Geotechnical Engineering, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Associated Professor, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### ABSTRACT

Because of non-linear and settlement dependent behavior of soil and effect of the interactions, understanding the behavior of piles and raft and the load sharing mechanism in piled rafts is a key issue. Recently, researchers have introduced few normalized hyperbolic models according to numerical analysis to estimate the load-sharing ratio of piles in piled raft foundations. These models are based on experimental results and considering different interaction effects between pile-raft-soil, raft, and pile dimensions and the amount of settlement. The aim of this research is to investigate the behavior of piled raft foundation and to estimate the load-sharing ratio of piles experimentally. So, various tests have been conducted on piled rafts, group piles, and unpiled rafts under vertical loading by changing the number and length of piles and density of bed sand. For this purpose, an innovative combined loading system, instrumented by measuring devices, is designed and constructed; then the load-sharing ratio of piles from the total load with a novel method is estimated by measuring soil pressure underneath the raft at any settlement. According to the results, bearing capacity of piled raft foundation in analogous conditions is more than unpiled raft and twice group piles approximately. Also increasing the number of piles in piled rafts and group piles increases bearing capacity and reduces raft settlement. The load sharing ratio of piles shows downward trend by increasing settlement and it increases with increasing the number of piles in the same conditions. In this study, the ultimate bearing capacity of group piles which have been experimentally obtained is compared with the ultimate criterion of the hyperbolic model proposed by other researchers. Then, the model is modified by mathematical analysis methods indicating good agreement between experimental and analytical results.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 07 February 2019

Revise Date: 20 May 2019

Accept Date: 29 May 2019

### Keywords:

Piled raft foundation

Pile group

Unpiled raft

Load sharing ratio

Hyperbolic model

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.171280.1779

\*Corresponding author: Jafar Bolouri Bazzaz  
Email address: bolouri@um.ac.ir

## بررسی آزمایشگاهی ظرفیت باربری پی رادیه شمع و مقایسه با نتایج مدل های پربولیک اصلاح شده

محمد جمال ملک خانی<sup>۱</sup>، جعفر بلوری بزاز<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری خاک و پی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

### چکیده

شناخت رفتار و نحوه توزیع بار بین شمع و پی در پی رادیه شمع به دلیل رفتار غیرخطی و وابسته به نشست و نیز وجود پیچیدگی های ناشی از اندرکنش ها مسأله ای کلیدی می باشد. اخیراً پژوهشگران مدل هایی را برای تخمین نسبت سهم باربری شمع ها در پی رادیه شمع بر مبنای تحلیل های عددی به فرم معادله های پربولیک نرمالیزه شده ارائه کرده اند. این مدل ها بر اساس نتایج آزمایشگاهی و با لحاظ نمودن اثر اندرکنش های مختلف بین شمع-پی-خاک، ابعاد پی و شمع و مقدار نشست سطحی پی می باشند. هدف انجام پژوهش حاضر بررسی رفتار پی رادیه شمع و تعیین سهم باربری شمع ها در این سیستم به روش آزمایشگاهی می باشد. بنابراین با تغییر تعداد و طول شمع ها و تراکم ماسه بستر، آزمایش هایی تحت بار قائم بر روی پی رادیه شمع، گروه شمع و پی بدون شمع انجام شده است. به این منظور سیستم بارگذاری ترکیبی ابداعی با بهره گیری از ابزار دقیق طراحی و ساخته شد و سپس سهم باربری شمع ها به روشی نوین با اندازه گیری فشار خاک زیر پی در هر مقدار نشست و با توجه به کل بار وارده محاسبه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، ظرفیت باربری پی رادیه شمع در حالت مشابه بیش از پی سطحی و تقریباً دو برابر گروه شمع می باشد. همچنین افزایش تعداد شمع در پی رادیه شمع و گروه شمع باعث بهبود ظرفیت باربری خاک و کاهش نشست می گردد. نسبت سهم باربری شمع ها با افزایش مقدار نشست سطحی روند نزولی دارد که این سهم با افزایش تعداد شمع ها در حالت مشابه افزایش یافته است. در این پژوهش ظرفیت باربری نهایی گروه شمع ها که به صورت آزمایشگاهی به دست آمده با معیار بیان شده در مدل های پربولیک پیشنهادی توسط سایر محققین مقایسه شده است. سپس مدل مزبور با استفاده از روش های محاسباتی تصحیح گشته که بیانگر انطباق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی می باشد.

کلمات کلیدی: پی رادیه شمع، گروه شمع، پی بدون شمع، نسبت سهم باربری، مدل های پربولیک

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.171280.1779	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.171280.1779	۱۴۰۰/۰۱/۳۰	۱۳۹۸/۰۳/۰۸	۱۳۹۸/۰۳/۰۸	۱۳۹۸/۰۲/۳۰	۱۳۹۷/۱۱/۱۸
			جعفر بلوری بزاز		*نویسنده مسئول:	
			bolouri@um.ac.ir		پست الکترونیکی:	

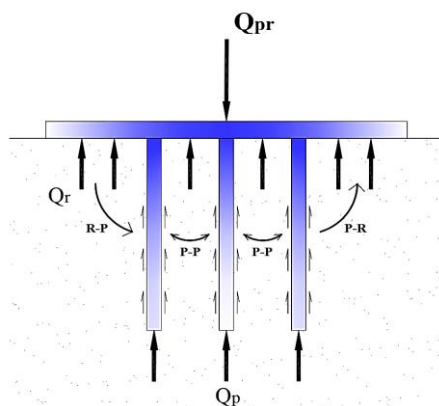
## ۱- مقدمه

در فرآیند طراحی مناسب پی قرار گرفته در زیر یک سازه که وظیفه انتقال بار وارده به خاک زیر خود را دارد، در صورتی که خاک زیر پی علاوه بر ظرفیت باربری کافی، نشست قابل قبول نیز داشته باشد، اولین گزینه پی سطحی است. چنانچه پی سطحی توانایی تحمل بارگذاری وارده را نداشته و یا نشست‌هایی بیش از حد مجاز رخ دهند ایده استفاده از شمع در زیر پی مطرح شده است [۱]. استفاده از شمع در نقاط مناسب زیر پی، می‌تواند ظرفیت باربری نهایی خاک را بهبود، نشست کلی و نامتقارن را کاهش دهد [۲]. مجموعه پی و شمع را می‌توان به صورت گروه شمع و یا پی رادیه شمع مورد تحلیل و بررسی قرارداد. در تحلیل گروه شمع، کلاهی نقشی در افزایش ظرفیت باربری ندارد و این رویکرد در صورتی که امکان بهره‌گیری از ظرفیت باربری پی (سرشمع) با توجه به مشخصات خاک سطحی محل وجود داشته باشد، موجب غیراقتصادی شدن طرح می‌گردد. اما در سیستم پی رادیه شمع، از ظرفیت باربری پی قرار گرفته بر شمع‌ها صرف نظر نمی‌شود و طرح نهایی از لحاظ فنی و اقتصادی نسبت به گروه شمع بسیار مناسب می‌باشد [۳ و ۴]. رفتار پی رادیه شمع<sup>۱</sup> به دلیل اهمیت و نیز وجود ابهام‌های فراوان در مورد نحوه توزیع بار بین شمع و پی، تاکنون به وسیله محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۵، ۶، ۷ و ۸]. پژوهش‌های دیگری نیز بر روی ایده استفاده از شمع در زیر پی به عنوان کاهش دهنده نشست انجام شده و همگی کارایی این روش را تأیید کرده‌اند [۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲]. وو و همکاران با انجام آزمایش‌هایی کوچک مقیاس بر روی پی رادیه شمع، شمع تک و پی بدون شمع به بررسی رفتار بار-نشست در خاک رس نرم پرداخته‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده، مقاومت سیستم پی رادیه شمع کمتر از مجموع مقاومت پی و شمع به صورت جداگانه گزارش شده است [۱۳]. لی و چانگ آزمایش‌هایی بر روی پی رادیه شمع و گروه شمع در ماسه خشک متراکم انجام داده و بیان کردند که ظرفیت باربری پی، در پی رادیه شمع کاملاً بسیج شده و (۲۰ - ۳۰)٪ بیشتر از پی بدون شمع است. همچنین هنگامی که فاصله شمع‌ها از یکدیگر، کمتر از ۵ برابر قطر شمع باشد، برهم‌نهی تنش‌های ناشی از جابجایی آن‌ها منجر به کاهش ظرفیت باربری پی رادیه شمع می‌شود [۱۴]. رفتار پی رادیه شمع توسط ال‌گرهی و همکاران در ماسه خشک با تغییر پارامترهای مختلف مانند تعداد شمع، طول شمع و ضخامت پی به صورت مدل آزمایشگاهی کوچک مقیاس، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش، افزایش تعداد و طول شمع‌ها و نیز ضخامت پی باعث کاهش نشست در زیر پی شده است. علاوه بر این، نحوه توزیع بار بین پی و شمع‌ها و سهم باربری پی، با افزایش ضخامت پی تغییر چندانی نکرده و با افزایش تعداد شمع‌ها، سهم باربری پی کمتر شده است [۱۵]. پاتیل و همکاران با انجام آزمایش‌هایی بر روی مدل کوچک مقیاس پی رادیه شمع تحت بار قائم به بررسی رفتار بار-نشست و فرآیند انتقال بار بین پی و شمع‌ها پرداخته و بیان کردند که در ابتدای بارگذاری، به دلیل عدم تماس کافی بین سطح پی و خاک زیرین، شمع‌ها سهم اصلی بار را تحمل می‌کنند اما در ادامه و با نشست بیشتر مجموعه، بار بیشتری به پی منتقل شده و سهم باربری آن افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش تعداد شمع زیر پی، ظرفیت باربری پی رادیه شمع بهبود یافته است [۱۶]. رفتار پی رادیه شمع تحت بار قائم ( $Q_{pr}$ ) و تخمین سهم باربری پی ( $Q_r$ ) و شمع‌ها ( $Q_p$ )، به دلیل وجود اندرکنش‌های مختلف بین شمع-پی ( $P-R$ )، پی-شمع ( $R-P$ ) و شمع-شمع ( $P-P$ ) که در شکل ۱ به صورت شماتیک نشان داده شده بسیار پیچیده بوده و تعیین سهم باربری شمع‌ها جهت طراحی اولیه، نیازمند اندازه‌گیری مستقیم در محل، مدل آزمایشگاهی و یا استفاده از مدل‌های هایپربولیک ارائه شده توسط پژوهشگران می‌باشد. لی و همکاران با در نظر گرفتن اندرکنش‌ها بین پی-شمع-خاک و فرض رفتار غیرخطی در توزیع بار بین پی و شمع‌ها و اینکه ظرفیت باربری پی رادیه شمع ترکیبی از ظرفیت پی بدون شمع و گروه شمع می‌باشد، مدلی بر مبنای روابط نرمالیزه شده غیرخطی بار-نشست جهت تعیین سهم باربری شمع‌ها در پی رادیه شمع واقع بر بستر ماسه‌ای ارائه کردند [۱۷ و ۱۸]. در ادامه کومار با بررسی دقیق عوامل تأثیر گذار بر اندرکنش‌ها بین پی-شمع بر مبنای نتایج لی و همکاران و با استفاده از روش اجزا محدود و صحت سنجی با نتایج آزمایش سانتریفیوژ بر روی پی رادیه شمع، مدلی برای تخمین ظرفیت باربری پی رادیه شمع و سهم باربری شمع‌ها در هر مقدار نشست تحت بار قائم، پیشنهاد نموده است [۱۹].

هدف از انجام این پژوهش بررسی ظرفیت باربری پی بدون شمع، شمع تک، گروه شمع، پی رادیه شمع تحت بار قائم و تعیین سهم باربری شمع‌ها و پی به صورت آزمایشگاهی در ماسه خشک نیمه متراکم و مقایسه با نتایج تخمینی مدل‌های ارائه شده توسط

<sup>1</sup> Piled Raft Foundation

پژوهشگران می‌باشد. همچنین به دلیل وجود ایرادهایی در دستگاه‌های بارگذاری موجود برای انجام مطالعات آزمایشگاهی مانند پیچیدگی و گران بودن تجهیزات بارگذاری و کنترل سیستم، استفاده از روغن تحت فشار بالا که علاوه بر احتمال وقوع نشتی و تغییر سرعت بارگذاری، می‌تواند خطراتی را نیز برای کاربر به وجود آورد و ضرورت استفاده از قاب فولادی سنگین و هزینه نسبتاً زیاد این تجهیزات، سیستم بارگذاری با استفاده از وزن آب و با دقتی بسیار بالا طراحی و ساخته شده که در ادامه به معرفی این سیستم و سپس ارائه نتایج به دست آمده پرداخته شده است.



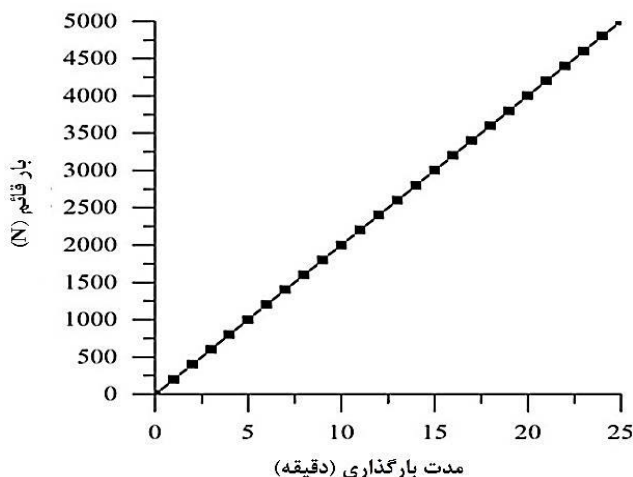
شکل ۱: نمایی شماتیک از اندرکنش و نحوه توزیع بار بین پی و شمع‌ها در پی رادیه شمع

## ۲- معرفی دستگاه بارگذاری و اجزای تشکیل دهنده

در این پژوهش سیستم بارگذاری در محل آزمایشگاه تحقیقاتی مکانیک خاک دانشگاه فردوسی مشهد به گونه‌ای طراحی و ساخته شده که علاوه بر بار قائم (که تنها این قابلیت در آزمایش‌ها بکار گرفته شده)، توانایی اعمال بار افقی و نیز مایل به صورت مؤلفه‌های افقی و قائم با سرعت بارگذاری و زاویه دلخواه را دارد و مهم‌ترین ویژگی‌های آن عبارت‌اند از:

- توانایی اعمال بار قائم، افقی و مایل با زوایای مختلف
- بهره‌گیری از ساختار و قطعات بسیار ساده مکانیکی
- قابلیت تنظیم و تثبیت سرعت بارگذاری با دقت بسیار بالا بدون استفاده از تجهیزات و قطعات فنی پیچیده
- قیمت بسیار کمتر در مقایسه با دستگاه‌های بارگذاری موجود
- ایمنی بالاتر نسبت به دستگاه‌های بارگذاری با سیال تحت فشار

در این سیستم نوین که شامل یک مخزن تغذیه آب با حجم ۶۰۰ لیتر، دو مخزن ۵۰۰ و ۱۰۰ لیتری برای اعمال بار قائم و افقی، یک پمپ آب، شیرآلات مکانیکی، اتصالات، حسگرها و تجهیزات ثبت داده‌ها می‌باشد، از وزن آب بجای فشار روغن برای بارگذاری استفاده شده است. فرآیند بارگذاری با خروج آب از مخزن تغذیه شروع می‌شود و بر اساس نیاز می‌توان بار قائم، افقی یا ترکیبی از هر دو را با نرخ ثابت و به وسیله پمپ آب به مخزن قرار گرفته بر روی پی که بار قائم ( $P_V$ ) و یا مخزن جانبی که بار افقی ( $P_H$ ) را به پی اعمال می‌کنند، وارد نمود. در شکل ۲ نمودار بار قائم- زمان در سیستم بارگذاری ساخته شده و حالتی که آب با حداکثر دبی وارد مخزن بار قائم می‌شود نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثر نرخ بارگذاری و سرعت خروج آب از پمپ حدود ۲۰۰ نیوتن بر دقیقه بوده که به دلیل سرعت پایین و یکنواخت بارگذاری، استاتیکی محسوب می‌گردد [۲۰].

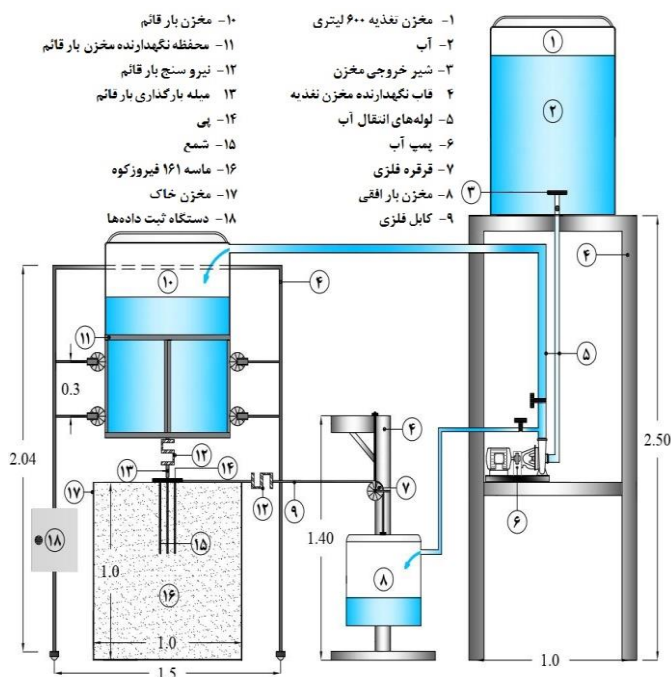


شکل ۲: حداکثر تغییرات بار قائم-زمان در حالت بارگذاری قائم خالص به وسیله سیستم بارگذاری طراحی شده

### ۲-۱- نحوه اعمال بار قائم

در این سیستم، مخزن بار قائم داخل سیدی فلزی که از مقاطع فولادی سبک و توخالی ساخته شده است قرار می‌گیرد، برای ایجاد امکان جابجایی در راستای قائم مخزن بارگذاری، محفظه نگه‌دارنده آن از ۴ وجه بر روی ریل‌هایی کاملاً صاف و صیقلی قرار گرفته که صرفاً امکان جابجایی در راستای قائم را به وجود می‌آورند. پس از قرارگیری میله بارگذاری کاملاً صلب در مرکز سطح پی، بار قائم که ناشی از وزن آب موجود در مخزن آب قرار گرفته در سبد فلزی می‌باشد، به صورت بار نقطه‌ای منتقل می‌گردد.

با توجه به اینکه نوک میله بارگذاری دارای سطح مقطع کروی است و تنها بر روی سطح پی و در چاله‌ای که بر روی پی ایجاد شده مماس می‌گردد، بنابراین عملکرد محل اتصال به صورت مفصلی بوده و هیچ‌گونه لنگر خمشی به پی اعمال نمی‌شود. در شکل ۳ دستگاه بارگذاری به همراه مخزن خاک، مدل پی و تجهیزات ثبت داده‌ها در تصویر و با جزئیات کامل به صورت شماتیک نشان داده شده است.

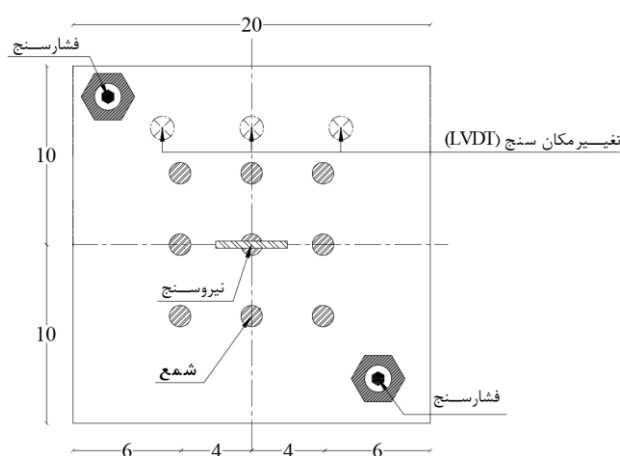


شکل ۳: تصویر و نمای شماتیک دستگاه بارگذاری ساخته شده (واحد: متر)



## ۲-۲- سیستم ابزار دقیق

همان طور که پیش تر اشاره شد بارگذاری توسط نیروی وزن آب بر پی اعمال می شود. مطابق شکل ۴، بار قائم به وسیله یک عدد نیروسنج S شکل با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلوگرم، تنش زیر پی توسط دو عدد فشارسنج در دو گوشه پی که به وسیله فشار آب و خاک کالیبره شده اند و نشست قائم را سه عدد تغییر مکان سنج (LVDT<sup>۲</sup>) که در وسط و دو گوشه پی قرار دارند در طول آزمایش اندازه گیری می نمایند. مقادیر اندازه گیری شده توسط حسگرها به وسیله یک عدد دیتالاگر<sup>۳</sup> ثبت شده و همچنین در حین آزمایش بر روی صفحه نمایش متصل به دیتالاگر قابل مشاهده می باشند. برای تعیین فشار خاک زیر پی باید صفحه دیافراگمی تحتانی فشارسنجها کاملاً در تماس مستقیم با خاک زیر پی باشد، بنابراین در محل فشارسنجها حفره هایی بر روی سطح پی ایجاد شده تا امکان تماس کامل صفحه دیافراگمی با خاک زیر پی و ثبت تغییرات فشار وجود داشته باشد.



شکل ۴: تصویر حسگر فشارسنج و نمای شماتیک پلان مدل پی، نیروسنج، تغییر مکان سنج، فشارسنج و شمعها (واحد: سانتی متر)

## ۳- اجزا، برنامه و نحوه انجام آزمایش

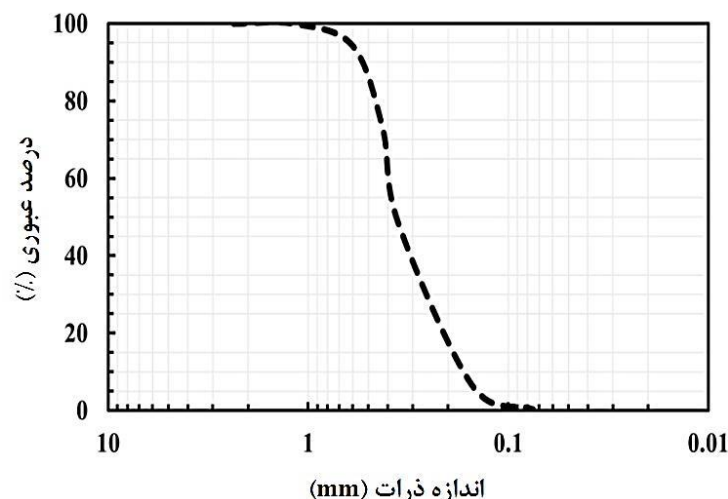
جزئیات مصالح و فرآیند آزمایشهای انجام شده بر روی پی بدون شمع، گروه شمع، شمع تک و پی رادیه شمع برای بررسی رفتار و نیز میزان کارایی سیستم بارگذاری معرفی شده در ادامه بیان شده اند.

## ۳-۱- مشخصات خاک استفاده شده

در این پژوهش از ماسه سیلیسی ۱۶۱ فیروزکوه خشک که با دانه بندی یکنواخت و دانه هایی شکسته در کشور توسط بسیاری از محققین مورد بررسی قرار گرفته استفاده شده است. جهت تعیین مشخصات فنی و پارامترهای مقاومت برشی خاک، آزمایش دانه بندی بر اساس آیین نامه ASTM D422-87 و نیز آزمایش برش مستقیم بر اساس آیین نامه ASTM D3080-90 در دو حالت که وزن مخصوص خاک برابر با ۱/۴۵ و ۱/۵۰ گرم بر سانتی متر مکعب بود بر روی خاک انجام گرفتند و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب برابر با ۳۴ و ۳۶ درجه به دست آمد. در شکل ۵ نمودار دانه بندی و در جدول ۱ مشخصات ماسه استفاده شده نشان داده شده اند.

<sup>۲</sup> Linear Variable Differential Transformer

<sup>۳</sup> Data logger



شکل ۵: منحنی دانه‌بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

جدول ۱: مشخصات فیزیکی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

$G_s$	$D_{50}$	$C_u$	$C_c$	$e_{max}$	$e_{min}$
۲/۶۵۸	۰/۳۵	۲/۵۸	۰/۶۳	۰/۹۴۳	۰/۶۰۳

### ۳-۲- مدل پی و شمع‌ها

صفحه فولادی با ابعاد  $200 \times 200$  و ضخامت ۸ میلی‌متر به‌عنوان مدل پی در آزمایش‌ها استفاده شده است. بر اساس پژوهش‌های پیشین و جهت جلوگیری از تأثیر اندازه ذرات ماسه بر روی نتایج، قطر شمع باید حداقل ۲۰ برابر اندازه متوسط ذرات ماسه ( $D_{50}$ ) (که با توجه به مشخصات خاک برابر با ۷ میلی‌متر می‌شود) باشد [۲۱]. بنابراین برای انجام آزمایش‌ها بر روی گروه شمع، شمع تک و پی رادیه شمع، شمع‌هایی از جنس فولاد ST-37 با سطح مقطع دایروی توپر به قطر ۸ میلی‌متر و طول ۸ و ۱۶ سانتی‌متر که معادل با نسبت طول به قطر ( $L/D$ ) ۱۰ و ۲۰ می‌باشد، با مدول الاستیسیته  $E=21 \times 10^5$  مگا پاسکال و نسبت پواسون  $\nu=0.3$  انتخاب شدند. برای شبیه‌سازی شرایط واقعی، به‌وسیله چسب اپوکسی لایه‌ای از ماسه به کف پی و سطح جانبی شمع‌ها چسبانده شد.

### ۳-۳- مخزن خاک

برای جلوگیری از تداخل تنش‌های به وجود آمده در پی و شمع‌ها با جداره و کف مخزن، سطح مقطع مخزن خاک باید حداقل دارای طولی معادل با ۵ برابر عرض پی (۱ متر) [۲۲] و عمق آن نیز حداقل دو برابر طول بلندترین شمع باشد [۱۵ و ۱۶]. بر این اساس مخزن خاک با سطح مقطع مربع از جنس فولاد با ابعاد  $(1 \times 1)$  متر و ضخامت ۵ میلی‌متر که هیچ تأثیر بر روی توزیع تنش خاک زیر پی و شمع‌ها نمی‌گذارد و به دلیل دارا بودن سختی کافی، تحت بار وارده نیز تغییر شکلی نمی‌دهد، در آزمایش‌ها استفاده شده است.

### ۳-۴- فرآیند انجام آزمایش‌ها

برای تهیه نمونه‌های ماسه به‌صورت یکنواخت و تکرارپذیر روش بارش ماسه به دلیل توانایی در شبیه‌سازی فرآیند رسوب خاک و قابلیت تهیه نمونه‌های کوچک تا بزرگ مقیاس به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است [۲۳ و ۲۴]. با توجه به اینکه در این روش به دلیل ثابت بودن ارتفاع و سرعت سقوط ذرات امکان ساخت نمونه‌هایی با تراکم ثابت وجود دارند [۲۵ و ۲۶]؛ در این پژوهش از روش بارش خشک ماسه برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. بر این اساس مراحل کلی انجام آزمایش‌ها را می‌توان به ترتیب زیر بیان کرد:

الف) پر کردن مخزن به روش بارش خشک و با توجه به تراکم مورد نظر

- (ب) استقرار پی (در حالت بدون شمع) بر روی سطح خاک در مرکز مخزن و کنترل تراز بودن آن
- (ج) استقرار نوک شمع‌های متصل به پی (در حالت پی رادیه شمع و گروه شمع) روی سطح خاک و رانش مجموعه با اعمال نیرو توسط وزنه و فرورفتن شمع‌ها تا تراز موردنظر
- (د) نصب دو عدد تنش سنج برای اندازه‌گیری تنش زیر پی و نیز استقرار میله بارگذاری قائم متصل به نیروسنج S شکل در مرکز پی و سه عدد تغییر مکان سنج بر روی سطح پی
- (ه) بارگذاری بر روی پی به وسیله دستگاه بارگذاری و ثبت هم‌زمان داده‌ها توسط سیستم ابزار دقیق

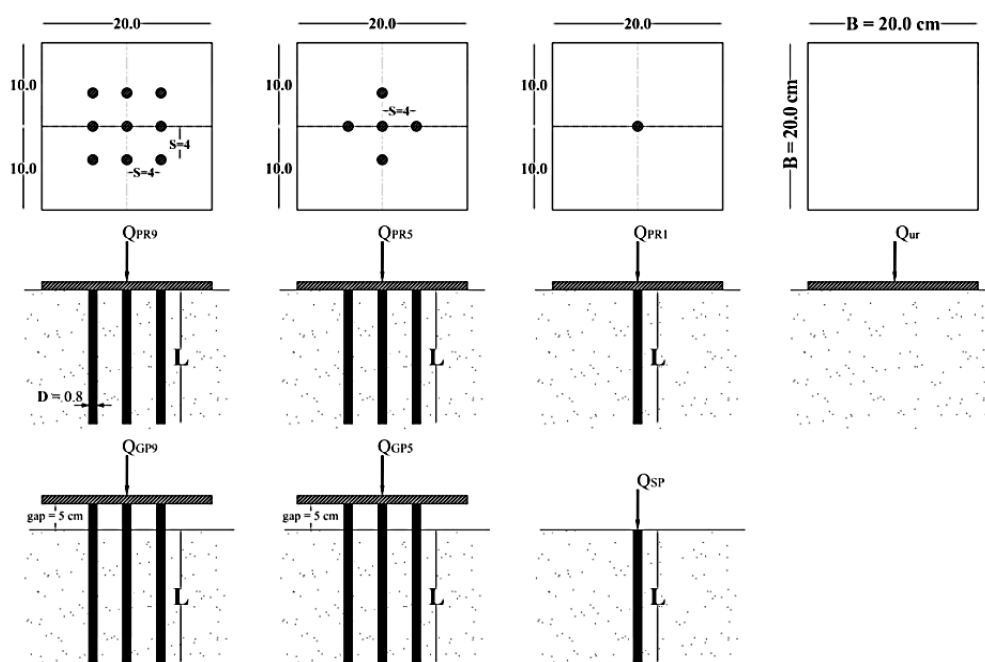
### ۳-۵- برنامه‌ریزی آزمایش‌ها

با توجه به اینکه هدف از انجام این پژوهش بررسی آزمایشگاهی رفتار پی رادیه شمع و تعیین سهم باربری شمع‌ها در مقیاس کوچک و مقایسه نتایج با مدل‌های هایپربولیک موجود می‌باشد، بنابراین ۲۰ آزمایش بر روی پی بدون شمع (UR)، شمع تک (SP)، گروه شمع (GP) و پی رادیه شمع (PR) با در نظر گرفتن فاصله‌ای معادل با ۵ برابر قطر شمع‌ها در بین مرکز تا مرکز آن‌ها (S/D) که بر اساس پژوهش‌های پیشین مانع تداخل تنش بین شمع‌ها با یکدیگر می‌شود [۱۴] انجام شده‌اند. در شکل ۶ حالت‌های مختلف و در جدول ۲ جزئیات آزمایش‌های انجام شده بیان شده‌اند. نام‌گذاری آزمایش‌ها به این صورت است که از چپ به راست قسمت اول بیانگر حالت (پی بدون شمع، پی رادیه شمع، شمع تک یا گروه شمع)، قسمت دوم درصد تراکم خاک بستر و قسمت سوم نسبت طول به قطر شمع (L/D) را بیان می‌کند. برای مثال کد آزمایش PR1-50-10 بیان می‌کند که پی رادیه شمع دارای یک شمع با نسبت طول به قطر ۱۰ بر روی خاک با تراکم ۵۰٪ قرار گرفته است.

جدول ۲: جزئیات آزمایش‌های انجام شده در حالت‌های مختلف

ردیف	کد آزمایش	(N) تعداد شمع	نسبت طول به قطر (L/D) شمع	درصد تراکم خاک (D <sub>r</sub> بستر)
۱	UR-50	۰	---	۵۰
۲	UR-70	۰	---	۷۰
۳	PR1-50-10	۱	۱۰	۵۰
۴	PR1-50-20	۱	۲۰	۵۰
۵	PR1-70-10	۱	۱۰	۷۰
۶	PR5-50-10	۵	۱۰	۵۰
۷	PR5-50-20	۵	۲۰	۵۰
۸	PR5-70-10	۵	۱۰	۷۰
۹	PR9-50-10	۹	۱۰	۵۰
۱۰	PR9-50-20	۹	۲۰	۵۰
۱۱	PR9-70-10	۹	۱۰	۷۰
۱۲	SP-50-10	۱	۱۰	۵۰
۱۳	SP-50-20	۱	۲۰	۵۰
۱۴	SP-70-10	۱	۱۰	۷۰
۱۵	GP5-50-10	۵	۱۰	۵۰
۱۶	GP5-50-20	۵	۲۰	۵۰
۱۷	GP5-70-10	۵	۱۰	۷۰
۱۸	GP9-50-10	۹	۱۰	۵۰
۱۹	GP9-50-20	۹	۲۰	۵۰
۲۰	GP9-70-10	۹	۱۰	۷۰





شکل ۶: نمایی شماتیک از حالت‌های مختلف انجام آزمایش‌ها (واحد: سانتی‌متر)

#### ۴- نتایج و بحث و بررسی

در این قسمت نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده به‌وسیله دستگاه بارگذاری معرفی‌شده، بر روی پی بدون شمع، گروه شمع و پی رادیه شمع تحت بار قائم، با تغییر پارامترهای مختلف ارائه و بررسی شده است.

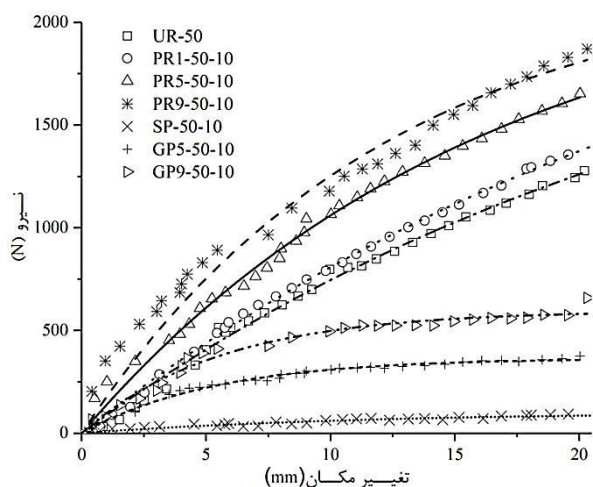
#### ۴-۱-۱- بررسی رفتار و تعیین ظرفیت باربری نهایی

نتایج مربوط به تأثیر تعداد شمع‌ها (۱، ۵ و ۹)، طول شمع‌ها و تراکم نسبی خاک در آزمایش‌های انجام‌شده در ادامه بررسی و نمودارهای بار-نشست در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نشان داده‌شده‌اند. با توجه به اینکه تعیین ظرفیت باربری نهایی پی سطحی و گروه شمع برای تعیین سهم باربری شمع‌ها در پی رادیه شمع توسط مدل هایپربولیک موردنیاز می‌باشد بنابراین در ادامه به این موضوع پرداخته‌شده است.

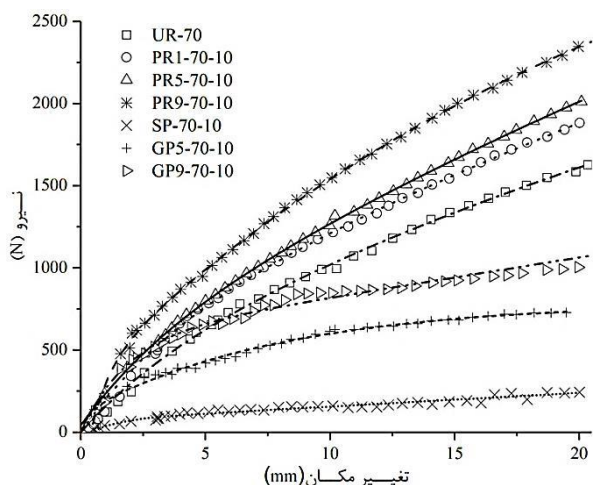
#### ۴-۱-۱-۱- تعیین معیار حالت نهایی در پی رادیه شمع، پی بدون شمع و گروه شمع

به دلیل اینکه در نمودارهای بار-نشست پی بدون شمع و پی رادیه شمع هیچ‌گونه نقطه اوجی مشاهده نگردید، بر اساس پیشنهاد محققین و با استفاده از روش متداول  $0.1B$ ، ظرفیت باربری نهایی در بار متناظر با نشست ۲۰ میلی‌متر ( $0.1$  عرض پی) در نظر گرفته‌شده است [۲۷ و ۲۸]. در برخی از پژوهش‌های پیشین در مورد گروه شمع نیز به‌طور مشابه ظرفیت باربری نهایی متناظر با بار در نشست برابر با  $0.1$  قطر شمع در نظر گرفته‌شده است [۲۹]. اما با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ پژوهش حاضر در مورد گروه شمع مشاهده می‌شود که پس از عبور از نشست  $0.18$  میلی‌متر (معادل با  $0.1$  قطر شمع)، ظرفیت باربری گروه شمع افزایش قابل‌توجهی یافته و پس از رسیدن به نشستی مشخص ظرفیت باربری به حداکثر مقدار خود رسیده و تثبیت شده است. بنابراین در نظر گرفتن نشست برابر با  $0.1$  قطر شمع که معادل با نشست ناچیز  $0.18$  میلی‌متر می‌شود در مورد گروه شمع مناسب به نظر نمی‌رسد. در این پژوهش با بررسی دقیق

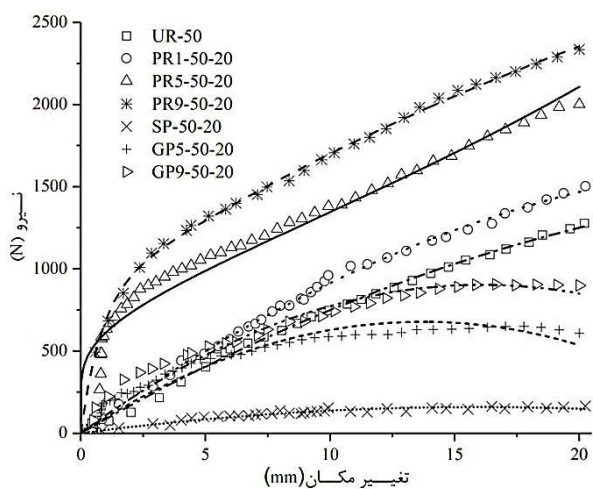
رفتار بار-نشست گروه شمع در شکل‌های ۷، ۸ و ۹، بار متناظر با نشست ۱۰ میلی‌متر که به صورت میانگین کمتر از ۱۰٪ تا پایان فرآیند بارگذاری (نشست قائم ۲۰ میلی‌متر) تغییر کرده، به عنوان ظرفیت باربری نهایی گروه شمع لحاظ شده است.



شکل ۷: مقایسه ظرفیت باربری پی رادیه شمع با گروه شمع و پی سطحی ( $Dr=50\%$ ,  $L/D=10$ )



شکل ۸: مقایسه ظرفیت باربری پی رادیه شمع با گروه شمع و پی سطحی ( $Dr=70\%$ ,  $L/D=10$ )



شکل ۹: مقایسه ظرفیت باربری پی رادیه شمع با گروه شمع و پی سطحی ( $Dr=50\%$ ,  $L/D=20$ )

## ۴-۱-۲- بررسی و مقایسه رفتار پی رادیه شمع، پی سطحی و گروه شمع

با بررسی نمودارهای به دست آمده مشاهده می شود که با تماس پی با سطح خاک و تبدیل گروه شمع به پی رادیه شمع، ظرفیت باربری افزایش و نشست کاهش یافته است. در گروه شمع با شروع بارگذاری بر روی سر شمعها، تنها اصطکاک جانبی جداره شمع با خاک پیرامونی منجر به ایجاد قابلیت تحمل بار و به تدریج با ادامه بارگذاری و بسیج شدن کامل اصطکاک، ظرفیت باربری گروه شمع به مقدار نهایی خود می رسد که این رفتار توسط سایر پژوهشگران نیز مشاهده و گزارش شده است [۱۷، ۲۹ و ۳۰].

با مقایسه رفتار پی رادیه شمع و پی سطحی مشاهده می شود که در هر وضعیت مشابه، با قرارگیری شمعها در زیر پی و انتقال بخشی از نیروی کل وارده به شمعها، اصطکاک جانبی به وجود آمده بین جداره شمع با خاک پیرامون، منجر به افزایش قابلیت تحمل بار پی دارای شمع شده و مقدار نشست نسبت به حالت پی بدون شمع، در یک بار مشخص، کاهش یافته است. از سوی دیگر افزایش بار قائم قابل تحمل خاک بستر به دلیل وجود شمعها، باعث بالا رفتن مقدار تنش و تراکم خاک در اطراف جداره شمعها می شود و این اندرکنش بین پی و شمع نیز ظرفیت باربری پی دارای شمع را بهبود می بخشد.

در این پژوهش جهت بررسی دقیق تر اثر افزودن شمعها به زیر پی از دو پارامتر بدون بعد نسبت بهبود ظرفیت باربری (LIR) و نسبت نشست (SR) بیان شده در معادله های ۱ و ۲ استفاده شده است.

الف) نسبت بهبود ظرفیت باربری برای مقایسه نسبت بار در پی رادیه شمع به پی سطحی در هر نشست دلخواه و مطابق معادله ۱ تعریف می شود [۱۵ و ۳۱].

$$LIR = \frac{P_{pr}}{P_r} \quad (1)$$

در معادله ۱،  $P_{pr}$  و  $P_r$  به ترتیب برابر با ظرفیت باربری پی رادیه شمع و پی سطحی در دو مقدار نشست ۱۰ و ۲۰ میلی متر می باشند.

ب) برای بررسی تأثیر افزودن شمعها به زیر پی بر کاهش مقدار نشست در مقایسه با حالت نهایی پی بدون شمع (نشست ۲۰ میلی متر)، از پارامتر بدون بعد نسبت نشست (SR) استفاده شده است [۳۱].

$$SR = \frac{w_{pr}}{w_r} \quad (2)$$

در معادله ۲،  $w_r$  مقدار نشست نهایی پی سطحی (۲۰ میلی متر) و  $w_{pr}$  مقدار نشست پی دارای شمع، در مقدار بار برابر و متناظر با بار وارده در نشست نهایی پی سطحی است.

در شکل ۱۰ تغییرات نسبت بهبود ظرفیت باربری با تغییر تعداد و طول شمعها و نیز تراکم خاک بستر ارائه شده اند و با توجه به نتایج حاصله می توان به نکات زیر اشاره کرد:

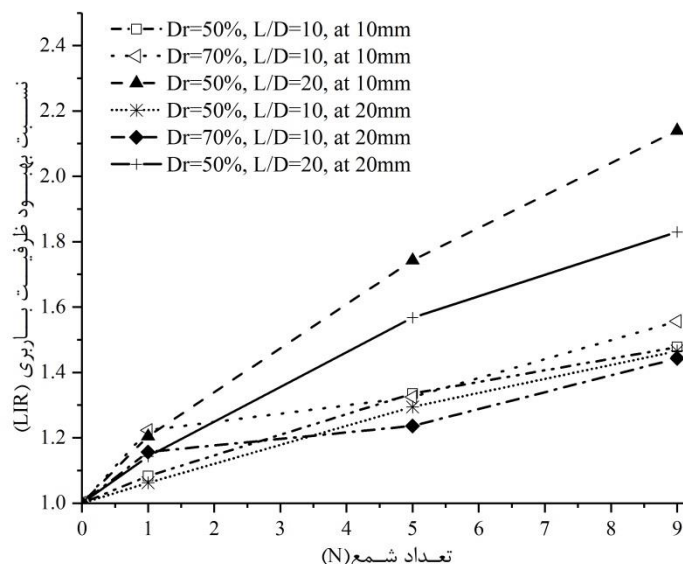
الف) در تعداد شمع برابر و شرایط مشابه، به دلیل اینکه ظرفیت باربری پی رادیه شمع ترکیبی از ظرفیت پی سطحی و گروه شمع می باشد و با توجه به نتایج به دست آمده، در مراحل ابتدایی بارگذاری و رسیدن به نشست ۱۰ میلی متر، تقریباً تمام ظرفیت باربری گروه شمع بسیج می شود؛ همچنین با افزایش مقدار تنش در اطراف شمعها و ایجاد اندرکنش بین پی و شمعها، نرخ افزایش ظرفیت باربری شمعها و در نتیجه تأثیر مثبت حضور شمعها کاهش می یابد. به همین دلیل نسبت بهبود ظرفیت باربری که با مشاهدات محققین پیشین نیز مطابقت دارد [۲ و ۳۱]، در نشست مراحل ابتدایی بارگذاری پی رادیه شمع (۱۰ میلی متر) بیشتر از نشست نهایی (۲۰ میلی متر) می باشد.

<sup>4</sup> Load Improvement Ratio

<sup>5</sup> Settlement Ratio

ب) در تعداد شمع ثابت و نشست ۱۰ میلی متر، افزایش طول شمع و نیز تراکم خاک با افزایش اصطکاک بین جداره شمع با خاک، باعث افزایش ظرفیت باربری پی رادیه شمع نسبت به پی سطحی می گردند. همچنین دو برابر شدن طول شمعها بیش از افزایش ۲۰ درصدی تراکم خاک بر روی بهبود ظرفیت باربری پی رادیه شمع تأثیر گذار است. دلیل این موضوع می تواند به دلیل این باشد که با توجه به فاصله مناسب بین شمعها، اندرکنش بین شمعها با یکدیگر بسیار ناچیز بوده و با افزایش طول شمعها در خاک بستر با تراکم کمتر، ظرفیت باربری پی رادیه شمع افزایش بیشتری نسبت به حالتی که طول شمعها کوتاه تر ولی خاک متراکم تر بوده یافته است. اما با متراکم تر شدن خاک بستر اندرکنشها بین تنش های شمع و پی نسبت به حالتی که خاک تراکم کمتری داشته افزایش یافته و موجب کاهش تأثیر مثبت حضور شمعها در زیر پی گردیده است.

ج) در تمامی حالتها با افزایش تعداد شمعها، نسبت بهبود ظرفیت باربری (در هر دو مقدار نشست) افزایش یافته است که نشان دهنده تأثیر مثبت افزودن شمع به زیر پی می باشد. مثلاً با قرارگیری یک شمع در زیر پی سطحی حدود ۶ تا ۲۰ درصد و با افزایش تعداد شمعها به ۹ عدد تا بیش از ۱۰۰ درصد ظرفیت باربری پی رادیه شمع نسبت به پی سطحی افزایش یافته است. بنابراین با وجود تمام اندرکنشها بین شمع-پی و شمع-شمع (مطابق شکل ۱)، اثر مثبت افزودن شمع به زیر پی کاملاً مشهود می باشد.



شکل ۱۰: نمودار تغییرات نسبت بهبود ظرفیت باربری با تعداد شمع در حالت های مختلف و نشست های ۱۰ و ۲۰ میلی متر

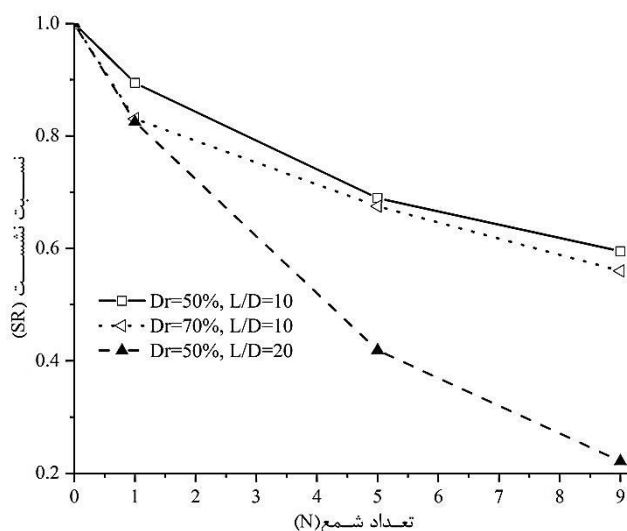
در این پژوهش برای بررسی تأثیر افزودن شمعها بر روی نشست میانگین پی رادیه شمع در حالت نهایی (نشست ۲۰ میلی متر)، از پارامتر بدون بعد نسبت نشست (SR) استفاده شده است. در شکل ۱۱ تغییرات نسبت نشست با افزایش تعداد شمع زیر پی در حالت های مختلف ارائه و نتایج زیر به دست آمده اند:

الف) با افزایش تعداد شمع به زیر پی به دلیل افزایش سختی خاک زیر پی و در یک بار ثابت وارده، نسبت نشست کاهش یافته است. این امر بیانگر تأثیر قابل توجه شمعها بر کاهش نشست پی می باشد به نحوی که قرارگیری ۱ تا ۹ عدد شمع، (۱۰ تا ۸۰٪) نشست پی رادیه شمع را نسبت به پی سطحی در شرایط مشابه، کاهش داده است.

ب) در تعداد شمع ثابت افزایش تراکم خاک بستر و طول شمع هر دو منجر به کاهش نشست می شوند و با توجه به شکل ۱۱، افزایش طول شمع بیشتر از افزایش تراکم خاک بر روی کاهش نشست تأثیر دارد. در واقع دو برابر شدن طول شمع نسبت به افزایش ۴۰٪ تراکم خاک باعث ایجاد سختی بیشتر در خاک بستر و جلوگیری از نشست خاک زیر پی می کند. همچنین با بیشتر شدن طول شمع و با توجه به شکل ۱۰ ظرفیت باربری پی رادیه شمع نسبت به حالت مشابه با خاک متراکم تر افزایش یافته است؛ این افزایش مقدار تنش منجر به افزایش تراکم اولیه خاک بستر در اعماق بیشتر خاک شده و به همین دلیل اختلاف قابل توجهی بین نشست در حالتی که طول شمع

افزایش یافته نسبت به حالت‌های دیگر مشاهده می‌شود. نتیجه مذکور با مشاهدات گزارش شده توسط محققین دیگر نیز همخوانی دارد [۴] و [۶].

(ج) در تمامی حالت‌ها، با افزایش تعداد شمع‌ها و به دلیل ایجاد تداخل بین تنش‌های ایجاد شده در اطراف جداره شمع‌ها با پی نرخ رشد اثر مثبت حضور شمع، کمتر شده است. این اثر در حالتی که طول شمع‌ها بلندتر بوده به دلیل رشد ناحیه تأثیر تنش، بیشتر خود را نشان می‌دهد که بیانگر وجود تنش‌های بیشتر در اطراف شمع‌ها با طول بلندتر نسبت به حالتی که طول شمع کوتاه‌تر ولی خاک متراکم‌تر بوده می‌باشد.



( با افزایش تعداد شمع در نشست ۲۰ میلی‌متر SR شکل ۱۱: تغییرات نسبت نشست )

#### ۴-۱-۳- تخمین سهم باربری شمع‌ها به وسیله نتایج آزمایشگاهی و مدل های پربولیک

با توجه به وجود پیچیدگی‌های زیاد در نحوه توزیع بار بین پی و شمع در پی رادیه شمع، یکی از مهم‌ترین مسائل برای طراحی اولیه سازه پی رادیه شمع، تخمین سهم باربری و ابعاد شمع‌ها در این سیستم می‌باشد. بنابراین در این پژوهش سهم باربری شمع‌ها در مدل آزمایشگاهی به وسیله ابزار دقیق تخمین زده شده و سپس با تصحیح مدل های پربولیک ارائه شده توسط محققین دیگر راهکاری برای تعیین سهم باربری شمع‌ها بر اساس نتایج آزمایش بر روی پی سطحی و گروه شمع ارائه شده است.

#### ۴-۲-۱- تخمین سهم باربری شمع‌ها در مدل آزمایشگاهی

همان‌گونه که در بخش ۲-۲ اشاره شد با نصب دو عدد فشارسنج در دو طرف قطر صفحه پی (شکل ۴) و در تماس با خاک زیر پی، تنش وارده از خاک بستر به پی ( $q_r$ ) و نیز کل بار وارده به پی رادیه شمع ( $Q_{pr}$ ) توسط نیروسنج اندازه‌گیری گردید. سپس به کمک معادله‌های ۳، ۴ و ۵، مقدار بار تحمل شده توسط پی ( $Q_r$ )، شمع‌ها ( $Q_p$ ) و سهم باربری شمع‌ها از کل بار وارده ( $\alpha_p$ )، محاسبه شد.

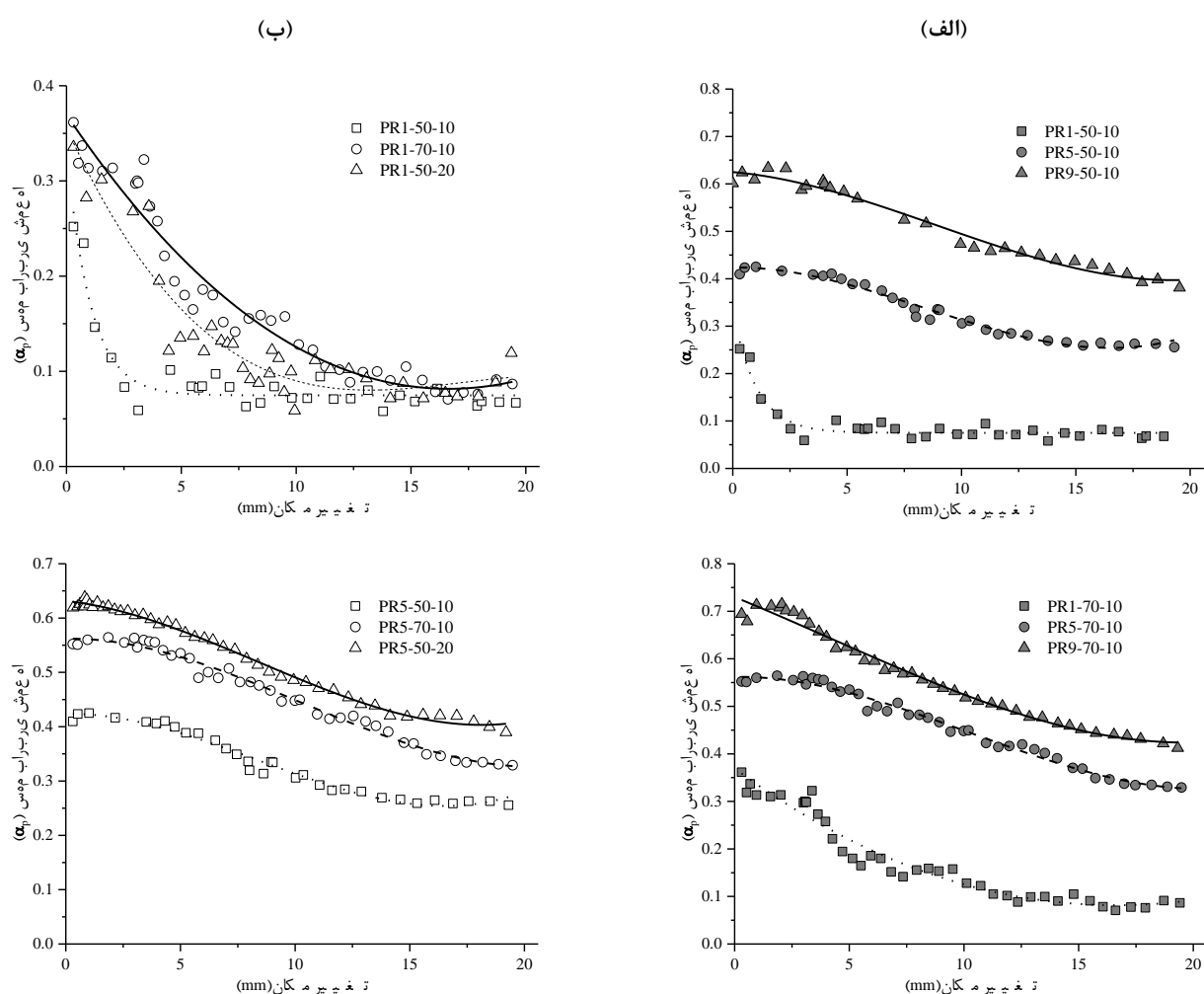
$$= q_r \times (B_r^2 - (N \times \pi \times \frac{D_p^2}{4})) Q_r \quad (3)$$

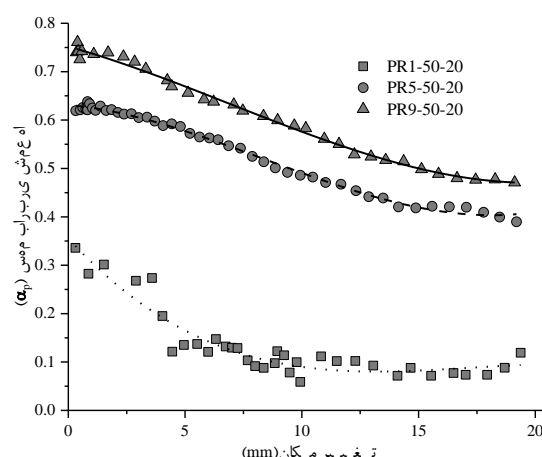
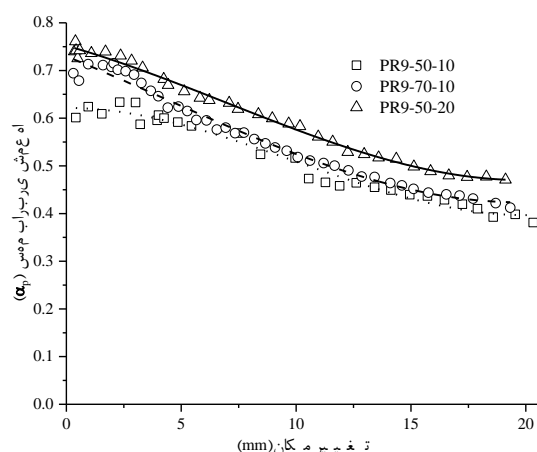
$$Q_p = Q_{pr} - Q_r \quad (4)$$

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

در معادله ۳،  $N$  تعداد،  $D_p$  قطر شمع‌ها و  $B_p$  عرض پی می‌باشد. در شکل ۱۲ تغییرات سهم باربری شمع‌ها از کل بار وارده با نشست پی رادیه شمع و در حالت‌های مختلف نشان داده شده است. در ابتدای بارگذاری به دلیل بالاتر بودن سختی شمع نسبت به خاک زیر پی سهم بیشتری از بار را شمع دریافت می‌کند. در ادامه بارگذاری به دلیل نشست مجموعه، ایجاد اندرکنش بین تنش‌های شمع و پی و اینکه سطح باربر پی بیش از شمع‌ها می‌باشد، سهم باربری شمع به مرور کاهش می‌یابد.

با توجه به نمودارهای شکل ۱۲-الف، با افزایش تعداد شمع‌ها در زیر پی و به دلیل وجود فاصله مناسب بین شمع‌ها از یکدیگر و عدم تأثیر اندرکنش شمع-شمع بر روی ظرفیت باربری شمع‌ها (مشابه گروه شمع) و نیز افزایش سطح تماس و اصطکاک جانبی شمع‌ها با خاک پیرامون سهم باربری شمع‌ها افزایش یافته است. در تعداد شمع ثابت (نمودارهای شکل ۱۲-ب)، افزایش طول و تراکم هر دو باعث افزایش سهم باربری شمع‌ها می‌شود. در واقع افزایش تراکم خاک باعث افزایش تنش‌های مؤثر جانبی و نیز اصطکاک جانبی شمع‌ها با خاک و بالا رفتن سهم باربری شمع‌ها می‌گردد.





شکل ۱۲. تغییرات سهم باربری شمع‌ها در مدل آزمایشگاهی و حالت‌های مختلف

#### ۴-۲-۲- تخمین سهم باربری شمع‌ها توسط مدل هایپربولیک اصلاح شده

به دلیل رفتار غیرخطی تنش-کرنش خاک، از روابط غیرخطی جهت تبیین پاسخ‌های بار-نشست پی استفاده می‌شود. معادله ۶ که در قالب تابعی هایپربولیک ارتباط بار و نشست را بیان می‌کند برای پیش‌بینی رفتار پی‌های سطحی و شمع دار مورد استفاده قرار گرفته است [۳۰]. در این معادله بار وارده و نشست به ترتیب برابر با  $Q$  و  $s$  و پارامترهای ثابت تابع هایپربولیک  $a$  و  $b$  می‌باشند. از حالت نرمالیزه شده تابع هایپربولیک بیان شده می‌توان برای بررسی رفتار پی سطحی و گروه شمع نیز بهره برد که به صورت معادله‌های ۷ و ۸ می‌باشند.

$$Q = \frac{s}{a + b \cdot s} \quad (6)$$

$$\frac{Q_r}{Q_{r,u}} = \frac{s/B_r}{a_r + b_r \cdot (s/B_r)} \quad (7)$$

$$\frac{Q_p}{Q_{p,u}} = \frac{s/D_p}{a_p + b_p \cdot (s/D_p)} \quad (8)$$

در معادله ۷،  $Q_r$  و  $Q_{r,u}$  به ترتیب بار وارده و بار نهایی متناظر با نشست  $0/1$  عرض پی ( $B_r$ ) و  $a_r$  و  $b_r$  به ترتیب برابر با  $0/2$  و  $0/8$  پارامترهای مدل برای رابطه بار-نشست نرمالیزه شده هایپربولیک پی سطحی می‌باشد. در معادله ۸ نیز،  $Q_p$  و  $Q_{p,u}$  بار وارده و بار نهایی متناظر با نشست  $0/1$  قطر شمع ( $D_p$ ) و  $a_p$  و  $b_p$  به ترتیب برابر با  $0/1$  و  $0/9$  پارامترهای مدل ارائه شده برای رابطه بار-نشست نرمالیزه شده هایپربولیک گروه شمع می‌باشد. مقادیر ثابت مدل بر اساس نتایج آزمایشگاهی و به کمک معادله‌های بار-نشست ۷ و ۸ و این که بار نهایی پی سطحی در نشست برابر با  $10\%$  عرض پی و گروه شمع در نشست متناظر با  $10\%$  عرض قطر شمع حاصل می‌شوند به دست آمده‌اند [۱۷ و ۱۸]. بر اساس مطالب بیان شده، کومار و همکاران با در نظر گرفتن هندسه و ابعاد پی و شمع در هر حالت منحصر به فرد و نیز اثرات اندرکنش‌های مختلف در پی رادیه شمع و اینکه ظرفیت باربری پی رادیه شمع ترکیبی از ظرفیت باربری پی سطحی و گروه شمع می‌باشد، مدلی هایپربولیک را بر مبنای رفتار بار-نشست غیرخطی نرمالیزه شده به صورت معادله ۹ برای تخمین سهم باربری شمع‌ها در پی رادیه شمع ( $\alpha_p$ ) در هر مقدار نشست و بر اساس نتایج آزمایش بر روی پی سطحی و گروه شمع ارائه و با مقایسه نتایج آزمایش در محل و روش اجزا محدود بر روی پی رادیه شمع، صحت آن را تأیید نموده‌اند [۱۹].

$$\alpha_p = \frac{Q_{p-pr}}{Q_{pr}} = \frac{1}{\frac{\eta}{\alpha_{pr}} \left[ 1 + \frac{Q_{ur,u}}{Q_{gp,u}} \left( \frac{\left( \frac{D_p}{B_r} \right) \cdot a_p + b_p \left( \frac{s}{B_r} \right)}{a_r + b_r \left( \frac{s}{B_r} \right)} \right) \right]} \quad (9)$$

در معادله ۹،  $Q_{gp,u}$  و  $Q_{ur,u}$  به ترتیب ظرفیت باربری نهایی پی سطحی و گروه شمع،  $Q_{p-pr}$  ظرفیت باربری شمع‌ها در پی رادیه شمع و  $Q_{pr}$  ظرفیت باربری پی رادیه شمع می‌باشند. همچنین  $\eta$  ضریب بازدهی پی رادیه شمع نامیده شده که به صورت معادله ۱۰ بیان می‌شود.

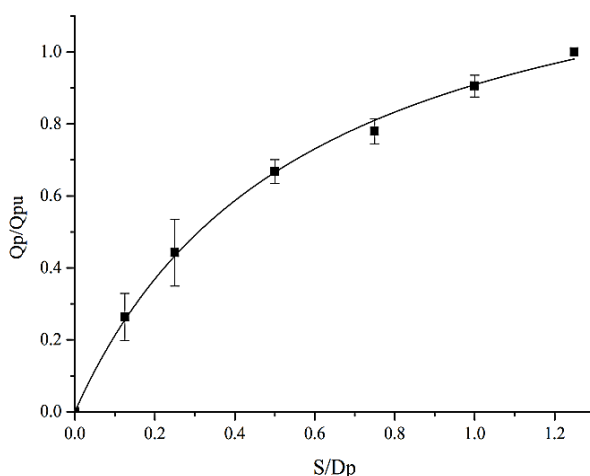
$$\eta = \frac{Q_{pr}}{Q_{ur} + Q_{gp}} = 3.5 \left( \frac{s}{B_r} \right) - 0.06 \left( \frac{s}{D_p} \right) - 0.51 D_p + 1.27 \quad (10)$$

در مدل ارائه شده،  $\alpha_{pr}$  ضریب اندرکنش شمع-پی و برابر با سهم باربری شمع در پی رادیه شمع به بار تحمل شده توسط گروه شمع بوده و مطابق معادله ۱۱ تعریف شده است.

$$\alpha_{pr} = \frac{Q_{p-pr}}{Q_{gp}} = 1 - \exp\left(-10.55 \left( \frac{s}{B_r} \right)^{0.26}\right) \quad (11)$$

همان‌گونه که اشاره شد در مدل ارائه شده توسط کومار، ظرفیت باربری نهایی گروه شمع متناظر با بار در نشست ۰/۱ قطر شمع لحاظ شده و بر این مبنا پارامترهای ثابت  $a_p$  و  $b_p$  با استفاده از معادله ۸ به دست آمده‌اند [۱۹]. اما در آزمایش‌های انجام شده با توجه به اینکه قطر شمع ۸ میلی‌متر بوده و بر اساس توضیحات بخش ۴-۱-۱، معیار حالت نهایی در مورد گروه شمع متناظر با بار در نشست ۱۰ میلی‌متر انتخاب شده است. از این رو بر اساس معادله ۸ و استفاده از روش برازش منحنی داده‌های موجود آزمایش‌های انجام شده بر روی گروه شمع، پارامترهای ثابت با توجه به معیار حالت نهایی مشاهده شده (نشست ۱۰ میلی‌متر) اصلاح و معادله منحنی به دست آمده به همراه پارامترهای ثابت برازش شده در شکل ۱۳ به صورت معادله ۱۲ می‌باشد.

$$\frac{Q_p}{Q_{p,u}} = \frac{s/D_p}{0.4 + 0.7(s/D_p)} \quad (12)$$

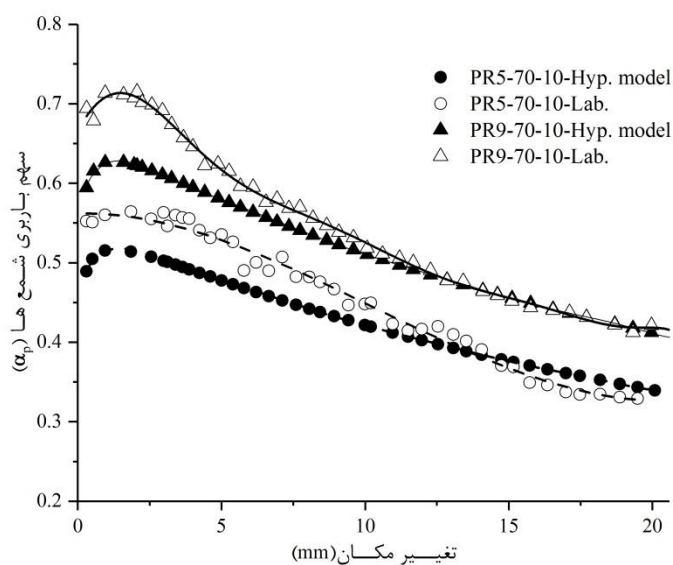
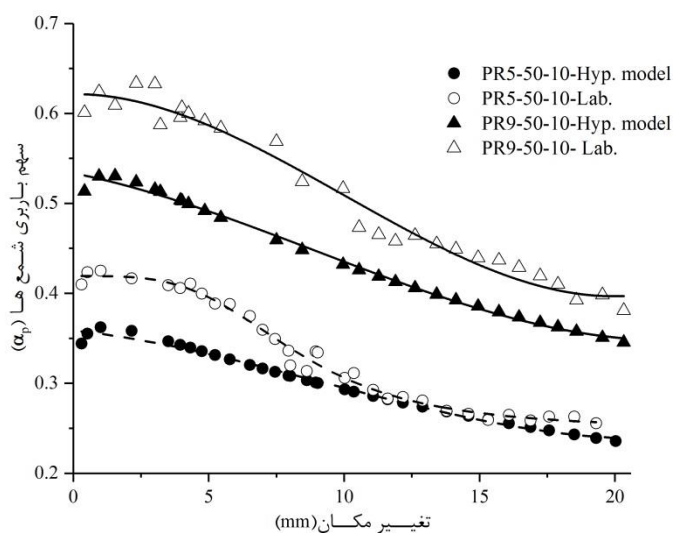


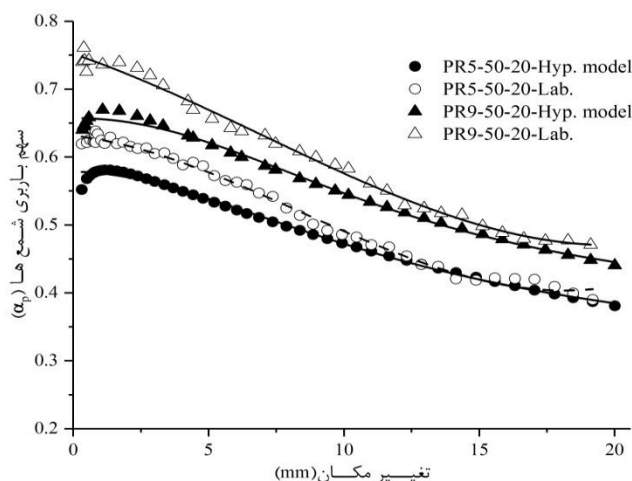
شکل ۱۳: منحنی برازش شده داده‌های به دست آمده از آزمایش بر روی گروه شمع



بنابراین برای تخمین سهم باربری شمع‌ها در پی رادیه شمع به‌وسیله مدل ارائه‌شده، مقدار  $a_p$  و  $b_p$  در معادله ۹، به ترتیب برابر با ۰/۴ و ۰/۷ لحاظ شده و بر مبنای اصلاح انجام‌گرفته نتایج در شکل ۱۴ ارائه‌شده‌اند.

همان‌طور که از نتایج مشخص است، انطباق بسیار خوبی بین مقادیر سهم باربری شمع در نتایج آزمایشگاهی و تخمین زده‌شده توسط مدل وجود دارد و با افزایش نشست تقریباً اختلافی بین این دو مقدار وجود ندارد. بنابراین با توجه به اینکه روندهای به‌دست‌آمده مشابه نتایج پژوهشگران دیگر می‌باشد [۱۷، ۱۸ و ۱۹]، می‌توان از مدل اصلاح‌شده جهت تخمین سهم باربری شمع‌ها در پی رادیه شمع با تقریب بسیار مناسب و قابل قبول استفاده نمود.





شکل ۱۴: مقایسه سهم باربری تخمین زده شده شمع‌ها توسط نتایج آزمایشگاه با مدل هایپرپولیک در حالت‌های مختلف

بر اساس مطالب بیان شده می‌توان روش تخمین سهم باربری شمع‌ها جهت طراحی پی رادیه شمع را به صورت زیر بیان کرد:

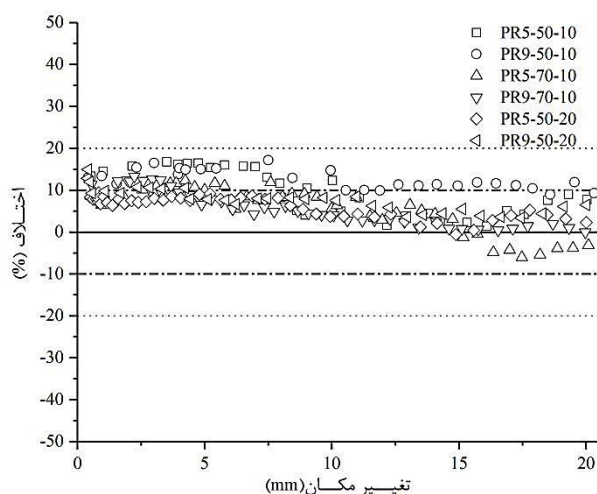
۱. ظرفیت باربری نهایی پی بدون شمع ( $Q_{ur,u}$ ) و گروه شمع ( $Q_{gp,u}$ ) با تعداد شمع و هندسه یکسان با پی رادیه شمع و بر اساس معیارهای بیان شده حالت نهایی به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شوند.
۲. در صورت وجود مغایرت با حالت نهایی بیان شده در این پژوهش، بایستی ضرایب ثابت مدل هایپرپولیک معادله ۹ با توجه به توضیحات بخش ۴-۲-۲ اصلاح گردند.
۳. ضرایب بازدهی پی رادیه شمع ( $\eta$ ) و اندرکنش شمع-پی ( $\alpha_{pr}$ ) به ترتیب بر اساس معادله‌های ۱۰ و ۱۱ تخمین زده شوند.
۴. سهم باربری شمع‌ها از کل بار وارده در پی رادیه شمع ( $\alpha_p$ ) در هر مقدار نشست دلخواه، با توجه به ابعاد پی و شمع و استفاده از مدل هایپرپولیک معادله ۹ تعیین می‌گردد.

## ۵- صحت سنجی نتایج

در این پژوهش ابتدا به صورت آزمایشگاهی رفتار پی رادیه شمع، گروه شمع و سهم باربری شمع‌ها در پی رادیه شمع بررسی و برای اطمینان از صحت نتایج هر آزمایش حداقل یک مرتبه تکرار شده است. رفتار، روند تغییرات و نسبت‌های به دست آمده با نتایج دیگر پژوهشگران [۴، ۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۳۰، ۳۱] مقایسه و در بخش ۴ ارائه شده که بیانگر تطابق مناسبی می‌باشد. سپس برای پیش‌بینی نسبت سهم باربری شمع‌ها، ضرایب مدل هایپرپولیک ارائه شده توسط کومار [۱۹] بر مبنای نتایج آزمایشگاهی به دست آمده و روش‌های محاسباتی بیان شده توسط محققین پیشین [۱۷ و ۱۸] تصحیح شده است. در مدل اولیه ظرفیت باربری نهایی گروه شمع در نشست معادل با ۱۰٪ قطر شمع در نظر گرفته شده است. اما در آزمایش‌های انجام شده و مطابق نتایج شکل‌های ۷، ۸ و ۹ مشاهده شد که ظرفیت باربری گروه شمع در نشست ۱۰ میلی‌متر به مقدار نهایی خود می‌رسد. بنابراین نتایج ظرفیت باربری گروه شمع در آزمایش‌ها، پس از نرمالیزه شدن بر مبنای مقادیر نهایی، در شکل ۱۳ ترسیم و معادله منحنی به دست آمده به صورت تابعی هایپرپولیک و مطابق رابطه ۱۲ ارائه شده است.

در این تحقیق با توجه به اینکه از همان روش استفاده شده توسط پژوهشگران پیشین [۱۷ و ۱۸] برای محاسبه ضرایب ثابت مدل استفاده شده است، در نتیجه ضرایب ثابت معادله به دست آمده متناظر با مقادیر  $a_p$  و  $b_p$  در مدل هایپرپولیک می‌باشند. جهت بررسی صحت مدل اصلاح شده، نتایج آزمایشگاهی مربوط به نسبت سهم باربری شمع‌ها از کل بار وارده و نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل اصلاحی در شکل ۱۴ ارائه شده است. همچنین همان گونه که در شکل ۱۵ درصد اختلاف بین مقادیر به دست آمده آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده سهم

باربری شمع‌ها در حالت‌های مختلف نشان داده شده، مشاهده می‌شود که هم‌خوانی مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل اصلاح شده وجود دارد و مدل هایپربولیک اصلاح شده می‌تواند با دقت بالا سهم باربری شمع‌ها را در پی رادیه شمع محاسبه نماید.



شکل ۱۵: مقایسه درصد اختلاف سهم باربری شمع‌ها در پی رادیه شمع بین نتایج آزمایشگاهی و مدل هایپربولیک اصلاح شده

## ۶- نتیجه گیری

- در این پژوهش با انجام آزمایش‌هایی توسط دستگاه بارگذاری ساخته شده رفتار پی رادیه شمع، پی سطحی و گروه شمع بررسی و سهم باربری شمع‌ها در پی رادیه شمع نیز تعیین گردید. همچنین با استفاده از مدل هایپربولیک اصلاح شده سهم باربری شمع‌ها در پی رادیه شمع محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان به‌طور خلاصه به نکات زیر اشاره نمود.
- دستگاه معرفی شده جهت بارگذاری به وسیله وزن آب در راستای قائم و جانبی در مدل‌های کوچک مقیاس ژئوتکنیکی، دارای مزایای قابل توجهی از جمله دقت و ایمنی بالاتر بارگذاری، قیمت کمتر و استفاده آسان‌تر نسبت به روش‌های بارگذاری به وسیله روغن تحت فشار می‌باشد.
  - در صورت ایجاد تماس بین پی (سر شمع) در گروه شمع با خاک بستر و استفاده از پی رادیه شمع ظرفیت باربری به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و طرح اقتصادی می‌شود. همچنین افزایش تعداد شمع در زیر پی در تمامی حالت‌ها، باعث افزایش ظرفیت باربری خاک و کاهش نشست می‌گردد.
  - در پی رادیه شمع با تعداد شمع ثابت، افزایش طول شمع بیشتر از افزایش تراکم خاک بستر بر روی بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست اثر داشته است.
  - سهم باربری شمع‌ها با افزایش نشست روند نزولی دارد و در مراحل ابتدایی بارگذاری افزایش یافته و در ادامه به دلیل بالا رفتن مقدار تنش در اطراف شمع‌ها و تداخل بین تنش‌های به وجود آمده از سهم باربری شمع کاسته شده است.
  - جهت تعیین سهم باربری شمع‌ها در پی رادیه شمع علاوه بر روش اندازه‌گیری بار توسط ابزار دقیق و به دلیل رفتار غیرخطی تنش- کرنش خاک می‌توان از مدل‌های ریاضی بر اساس نتایج آزمایش بر روی پی بدون شمع و گروه شمع نحوه توزیع بار در پی رادیه شمع را با دقت بسیار بالا تخمین زد.

## مراجع

- [1] Burland, J. B., Broms, B. B., & de Mello, V. F. (1978). Behaviour of foundations and structures.
- [2] Poulos, H. G. (2002). Simplified design procedure for piled raft foundations. In Deep Foundations 2002: An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance (pp. 441-458).

- [3] Randolph, M. F. (1994). Design methods for pile groups and piled rafts. Proc. 13th ICSMGE, 5, 61-82.
- [4] Katzenbach, R., Arslan, U., Moormann, C., & Reul, O. (1998). Piled raft foundation: interaction between piles and raft. Darmstadt Geotechnics, 4(2), 279-296.
- [5] Viggiani, C. (2001). Analysis and design of piled foundations. In Proceedings (pp. 47-75).
- [6] Poulos, H. G. (2001). Piled raft foundations: design and applications. Geotechnique, 51(2), 95-113.
- [7] Poulos, H. G. (2001). Methods of analysis of piled raft foundations. A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 of Piled Foundations.
- [8] Mandolini, A. (2003). Design of piled raft foundations: practice and development. Proceedings of Deep Foundations on Bored and Auger Piles-BAP IV, Ghent, Belgium, 2-4.
- [9] Prakoso, W. A., & Kulhawy, F. H. (2001). Contribution to piled raft foundation design. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(1), 17-24.
- [10] Horikoshi, K., & Randolph, M. F. (1996). Centrifuge modelling of piled raft foundations on clay. Geotechnique, 46(4), 741-752.
- [11] Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). Pile foundation analysis and design (No. Monograph).
- [12] Kim, K. N., Lee, S. H., Kim, K. S., Chung, C. K., Kim, M. M., & Lee, H. S. (2001). Optimal pile arrangement for minimizing differential settlements in piled raft foundations. Computers and Geotechnics, 28(4), 235-253.
- [13] Wu, W. J., Chai, J. C., & Huang, J. Z. (2002). -Interaction between pile and raft in piled raft foundation. In Advances In Building Technology (pp. 603-610).
- [14] Lee, S. H., & Chung, C. K. (2005). An experimental study of the interaction of vertically loaded pile groups in sand. Canadian Geotechnical Journal, 42(5), 1485-1493.
- [15] El-Garhy, B., Galil, A. A., Youssef, A. F., & Raia, M. A. (2013). Behavior of raft on settlement reducing piles: Experimental model study. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 5(5), 389-399.
- [16] Patil, J. D., Vasavalala, S. A., & Solanki, C. H. (2016). An experimental study on behaviour of piled raft foundation. Indian Geotechnical Journal, 46(1), 16-24.
- [17] Lee, J., Park, D., & Choi, K. (2014). Analysis of load sharing behavior for piled rafts using normalized load response model. Computers and Geotechnics, 57, 65-74.
- [18] Lee, J., Park, D., Park, D., & Park, K. (2015). Estimation of load-sharing ratios for piled rafts in sands that includes interaction effects. Computers and Geotechnics, 63, 306-314.
- [19] Kumar, A., & Choudhury, D. (2018). Development of new prediction model for capacity of combined pile-raft foundations. Computers and Geotechnics, 97, 62-68.
- [20] Ishihara, K. (1996). Soil behaviour in earthquake geotechnics. Oxford engineering science series.
- [21] Bolton, M. D., Gui, M. W., Garnier, J., Corte, J. F., Bagge, G., Laue, J., & Renzi, R. (1999). Centrifuge cone penetration tests in sand. Géotechnique, 49(4), 543-552.
- [22] Roshan, A., & Shooshpasha, I. (2014). Numerical analysis of piled raft foundations in soft clay. International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics, 22.
- [23] Presti, D. L., Pedroni, S., & Crippa, V. (1992). Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D 4253-83: A comparative study. Geotechnical Testing Journal, 15(2), 180-189.
- [24] Kazemi, M., & Bolouri Bazaz, J. (2017). Reconstruction of a Large Scale Sand Specimen Using a Sand Curtain Rainer System. Journal of Engineering Geology, 11(2), 277-298.
- [25] Cresswell, A., Barton, M. E., & Brown, R. (1999). Determining the maximum density of sands by pluviation. Geotechnical Testing Journal, 22(4), 324-328.
- [26] Rad, N. S., & Tumay, M. T. (1987). Factors affecting sand specimen preparation by raining. Geotechnical Testing Journal, 10(1), 31-37.
- [27] Lutenecker, A. J., & Adams, M. T. (1998). Bearing capacity of footings on compacted sand.
- [28] Briaud, J. L., & Jeanjean, P. (1995). LOAD SETTLEMENT CURVE METHOD FOR SPREAD FOOTINGS ON SAND. DISCUSSION. Journal of Geotechnical Engineering, 121(9).
- [29] McCabe, B. A., & Lehane, B. M. (2006). Behavior of axially loaded pile groups driven in clayey silt. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(3), 401-410.
- [30] Dithinde, M., Phoon, K. K., De Wet, M., & Retief, J. V. (2010). Characterization of model uncertainty in the static pile design formula. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137(1), 70-85.
- [31] Long, P. D., & Vietnam, V. W. (2010). Piled raft—a cost-effective foundation method for high-rises. Geotechnical Engineering, 41(1), 149.