

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر ضخامت بالشتک شنی و فاصله شمع‌ها بر رفتار رادیه شمع منفصل

محمد قنبر دزفولی^۱، مسعود دهقانی^۲، عادل عساکره^{۳*}، بهزاد کلانتری^۲

۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان

*asakereh@hormozgan.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۷/۰۷/۲۱]

تاریخ دریافت: [۹۶/۱۰/۱۳]

چکیده

به دلیل ایجاد نیروهای متمرکز و لنگرهای خمشی بالا در محل اتصال شمع به رادیه در سازه‌های با بارهای زیاد، استفاده از رادیه شمع منفصل می‌تواند گزینه مناسبی برای فونداسیون این نوع سازه‌ها باشد. در این سیستم شمع‌ها و رادیه به هم متصل نبوده و از بالشتک شنی در فاصله بین شمع و رادیه به منظور بازپخش نیروها استفاده می‌شود. در این حالت بار از طریق رادیه و بالشتک شنی به شمع‌ها منتقل می‌شود. در این پژوهش مطالعه آزمایشگاهی روی رادیه شمع منفصل واقع بر خاک ماسه‌ای به منظور بررسی پارامترهایی نظیر ضخامت بالشتک شنی و فاصله شمع‌ها بر رفتار بار-نشست، سهم شمع‌ها و رادیه از کل بار و همچنین پخش نیروی محوری و تنش اصطکاکی در طول شمع‌های مرکزی و گوشه انجام گرفته است. نتایج نشان داد ضخامت بالشتک شنی و فاصله شمع‌ها نقش مهمی در رفتار بار-نشست، سهم شمع‌ها از کل بار و همچنین چگونگی توزیع تنش در طول شمع دارد. در یک ضخامت بهینه بالشتک شنی و یک فاصله بهینه شمع‌ها کمترین میزان نشست مشاهده شده است. با افزایش ضخامت بالشتک شنی سهم شمع‌ها از کل بار کاهش می‌یابد. همچنین سهم شمع‌ها از کل بار نیز تابعی از فاصله شمع‌ها است. در قسمت‌های بالایی شمع‌ها تنش‌های اصطکاک منفی ایجاد و با افزایش ضخامت بالشتک شنی مقدار این اصطکاک منفی بیشتر می‌شود. در شمع‌های گوشه اصطکاک منفی بیشتری نسبت به شمع‌های مرکزی ایجاد می‌شود که باعث پایین آمدن محور خشی می‌شود.

واژگان کلیدی: رادیه شمع منفصل، مدل آزمایشگاهی، ماسه، بالشتک شنی

۱- مقدمه

شالوده‌های سطحی و شالوده‌های عمیق با عنوان رادیه شمع مورد بررسی قرار گرفته است. در این سیستم هم شمع‌ها و هم رادیه در انتقال بار به لایه‌های زیرین نقش دارند. در رادیه شمع‌ها به طور معمول رادیه و شمع به هم متصل بوده که این پیوستگی باعث ایجاد نیروهای متمرکز شدید و لنگرهای خمشی بالا در محل اتصال رادیه و شمع در بارهای زیاد می-

در صورتی که خاک زیر شالوده دارای مقاومت کافی باشد از شالوده‌های سطحی استفاده می‌شود. در صورت وجود خاک سست یا نرم و یا در صورت اعمال بارهای زیاد از سازه فوقانی به فونداسیون، یکی از روش‌ها استفاده از شالوده‌های عمیق مانند شمع‌ها است. در سالیان اخیر مفهوم بینابینی بین

می‌داند که در نزدیکی سطح زمین خاک سست ماسه ای و یا نرم رسی وجود داشته باشد.

شکل ۱. سازوکار انتقال بار در سیستم رادیه شمع [5].

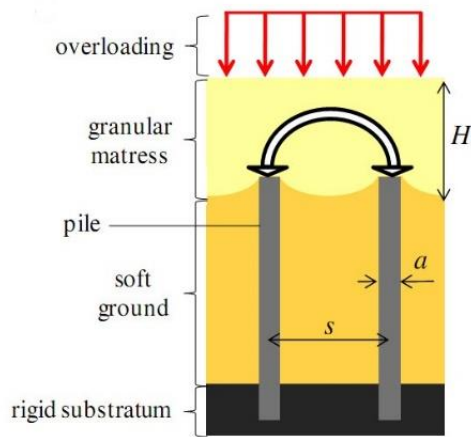


Fig. 1. Load shared mechanism in pile raft [5]

مطالعات فراوانی در خصوص رادیه شمع‌های منفصل به صورت مدل‌های عددی [7-8]، روابط تحلیلی [9-10]، مدل‌های آزمایشگاهی 1g [11-12]، و مدل‌های آزمایشگاهی Ng [13-14]، صورت گرفته است.

لیانگ و همکاران [15]، به مطالعه تاثیر بالشتک شنی و حالت بهینه آرایش شمع‌های کوتاه و بلند در رادیه شمع‌های منفصل پرداختند. آنها در پژوهش‌های خود از شمع‌های کوتاه در محیط بیرونی و شمع‌های بلند در مرکز رادیه شمع منفصل استفاده نموده و نتیجه گرفتند افزایش طول شمع‌های بلند بیشتر از افزایش مدول الاستیسیته شمع‌های کوتاه در کاهش نشست موثر است. با افزایش ضخامت بالشتک شنی تنش محوری در شمع‌های بلند کاهش و در شمع‌های کوتاه افزایش می‌یابد.

کاو و همکاران [11]، به بررسی پارامترهایی مانند تعداد شمع‌ها، طول شمع‌ها، آرایش و محل شمع‌ها و سختی رادیه پرداختند. در این سیستم شمع‌ها به عنوان المان‌های تسلیح کننده خاک در نظر گرفته شد. این پژوهش‌ها نشان داد استفاده از رادیه شمع منفصل در کاهش نشست و لنگر خمشی شمع‌ها موثر است.

فیووارانته و همکاران [13]، با استفاده از مدل‌سازی سانتیفریوژ به بررسی سختی نسبی شمع و خاک و همچنین

شود و در نتیجه ضخامت رادیه افزایش و معیارهای اقتصادی برآورده نمی‌شود. پس به منظور رفع این مشکل از رادیه شمع منفصل استفاده می‌شود [1]. در رادیه شمع منفصل شمع‌ها و رادیه از هم جدا بوده و در فضای مابین رادیه و شمع از بالشتک شنی به منظور بازپخش نیروها استفاده می‌شود. در این سیستم شمع‌ها به جای المان‌های سازه‌ای به صورت المان‌های تسلیح کننده خاک در نظر گرفته می‌شوند که باعث افزایش مقاومت برشی خاک زیرین می‌شود و همچنین بالشتک شنی نقش بازپخش و انتقال نیرو را بر عهده دارد.

رادیه شمع‌های منفصل در مقایسه با رادیه شمع‌های متصل دارای نشست زیادتری است ولی در مناطق زلزله خیز و یا مناطق با بارهای جانبی زیاد به دلیل محدود کردن لنگر خمشی و نیروی برشی شدید که منجر به گسیختگی سازه‌ای در شمع‌ها و یا در محل اتصال شمع و رادیه می‌شود، دارای عملکرد مناسبی است [2].

از نمونه‌های مشهور اجرا شده به این روش می‌توان به فونداسیون پل ریون آنتریون در یونان نام برد که از شمع‌های ۲۵ متری به منظور بهبود مقاومت برشی خاک به همراه بالشتک شنی از مصالح دانه‌ای متراکم به ضخامت ۳ متر برای بازپخش نیروها استفاده شده است [3].

لایه بالشتک شنی نقش مهمی در انتقال بار و به طور کلی رفتار بار- نشست رادیه شمع دارد. مصالح مورد استفاده در بالشتک شنی معمولاً از مصالح درشت دانه و با سختی بالاتری نسبت به لایه زیرین می‌باشد. سختی بالای این مصالح نسبت به خاک‌های ریزدانه باعث افزایش مشارکت رادیه از کل بار و همچنین افزایش کارایی مجموعه می‌شود [4]. انتقال بار از این لایه به شمع‌ها توسط سازوکار قوس زدگی است (شکل ۱). بنابراین خواص هندسی و مکانیکی لایه بالشتک شنی نقش مهمی در رفتار رادیه شمع منفصل دارد [5].

به طور کلی روش‌های آنالیز رادیه شمع را می‌توان به روش‌های تحلیلی ساده، روش‌های تحلیلی عددی تقریبی، روش‌های تحلیلی عددی و مطالعات پارامتریک نام برد. پولوس [6] شرایط مطلوب استفاده از رادیه شمع را زمانی که خاک زیر رادیه از رس سخت متراکم و یا ماسه یکنواخت متراکم باشد معرفی می‌کند همچنین شرایط نامطلوب را زمانی

فاصله شمع‌ها بر رفتار بار-نشست، سهم شمع‌ها از کل بار و پخش تنش محوری و تنش اصطکاکی در شمع‌های گوشه و مرکزی پرداخته می‌شود.

۲- دستگاه و روش انجام آزمایش

شکل‌های (۲-الف و ۲-ب) مقطع عرضی و نمای کلی دستگاه به همراه تجهیزات مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. دستگاه شامل فریم بارگذاری (تیر و ستون)، وزنه‌های بتنی برای تکیه‌گاه فریم بارگذاری، چاله آزمایش، جک هیدرولیکی، دیتالاگر، LVDT و دستگاه ثبت اطلاعات کرنش سنج، است. فریم بارگذاری شامل دو ستون از IPE200 و تیر از 2IPE240 است. از دو عدد وزنه بتنی هر یک به وزن ۷/۵ تن برای تکیه‌گاه فریم بارگذاری استفاده شده است. به منظور انجام آزمایش‌ها چاله‌ای به طول ۲ متر، عرض ۲ متر و عمق ۱/۵ متر در زمین حفر گردیده است. به منظور بارگذاری از یک جک هیدرولیکی به ظرفیت ۱۵ تن با کورس ۱۵ سانتی‌متر استفاده شده است. برای ثبت اطلاعات مربوط به جابه‌جایی از LVDT استفاده شده است. اطلاعات مربوط به فشار و جابه‌جایی در دیتالاگر با یک قرائت در ثانیه ثبت می‌شود.

برای مدل کردن محیط خاکی (ماسه و بالشتک شنی) در چاله آزمایش از دو نوع ماسه شکسته سیلیکاتی استفاده شده است. نمودار دانه‌بندی در شکل (۳) نشان داده شده است. طبق استاندارد یونیفاید هر دو نوع خاک از نوع SP است. سایر مشخصات مکانیکی خاک در جدول (۱) نشان داده شده است. مدل رادیه از یک صفحه مربعی فولادی به بعد ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر است. با توجه به ضخامت در نظر گرفته شده برای رادیه، رفتار به صورت صلب در نظر گرفته شده است. به منظور مدل کردن شمع‌ها از یک لوله آلومینیومی توخالی به قطر خارجی ۲۲ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر با مدول الاستیسیته ۷۰ گیگاپاسکال استفاده شده است. در جدول (۲) خلاصه‌ای از اطلاعات مربوط به مقیاس مدل آزمایشگاهی و مدل واقعی آورده شده است. گویی، بولتون و همکاران [18, 19]، به بررسی تاثیر اندازه ذرات بر

سختی بالشتک شنی در رفتار رادیه شمع منفصل پرداختند. نتایج نشان داد وجود لایه بالشتک شنی باعث ایجاد اصطکاک منفی در قسمت بالایی شمع می‌شود و در قسمت پایینی اصطکاک مثبت ایجاد خواهد شد. انتقال بار توسط بالشتک شنی به شمع‌ها صورت می‌گیرد و با کاهش سختی بالشتک شنی کارایی رادیه شمع کاهش می‌یابد.

اسلامی و همکاران [8] به بررسی ضخامت بالشتک شنی به صورت آنالیز الاستوپلاستیک پرداختند. آن‌ها نشان دادند افزایش سختی و یا کاهش ضخامت بالشتک شنی باعث کاهش نشست رادیه شمع منفصل می‌شود. همچنین تغییر ضخامت بالشتک شنی تاثیر چشمگیری در پخش بار به شمع‌ها دارد. زمانی که شمع‌های طویل در مرکز رادیه متمرکز باشند نشست‌های نامتقارن کمتر می‌شود. ماکزیمم تنش محوری در طول محور شمع بستگی به ضخامت و سختی بالشتک شنی دارد.

انتقال نیرو از رادیه به شمع‌ها توسط قوس‌های تشکیل شده در لایه بالشتک شنی انجام می‌شود. تشکیل این قوس‌ها به عوامل مختلفی از جمله فاصله بین شمع‌ها، قطر شمع‌ها، ضخامت مصالح دانه‌ای، سختی شمع‌ها و تغییر مکان بین شمع و خاک بستگی دارد [4].

جنک و همکاران [16]، دریافتند قوس زدگی کلی زمانی تشکیل می‌شود که ضخامت بالشتک شنی حدود ۱/۶ برابر فاصله شمع‌ها باشد. همچنین استاندارد [17] BS8006 کمینه ضخامت بالشتک شنی برای تشکیل قوس زدگی جزئی و کلی را به ترتیب برابر ۰/۷ و ۱/۴ برابر فاصله بین شمع‌ها در نظر گرفته است.

رفتار رادیه‌شمع‌ها از لحاظ عملکرد و اندرکنش‌های موجود دارای پیچیدگی است. بیشتر کارهای قبلی انجام شده محدود به مطالعات عددی و تحلیلی و آزمایشگاهی با مقیاس کوچک است. از طرفی بررسی همزمان تاثیر ضخامت بالشتک شنی و فاصله شمع‌ها و همچنین چگونگی پخش تنش‌ها در طول شمع‌ها در مدل‌های آزمایشگاهی به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است که نیاز به بررسی جامع‌تر این موضوع دارد.

در این پژوهش به بررسی مدل آزمایشگاهی رادیه شمع منفصل و بررسی پارامترهایی مانند ضخامت بالشتک شنی و

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک

Parameter	Sand	Cushion
Specific Gravity	2.66	2.61
Maximum Dry Density (KN/m ³)	17.7	16.52
Minimum Dry Density (KN/m ³)	13.38	13.62
D ₅₀ (mm)	0.6	2.1
Cc	0.5	1.14
Cu	2.33	2.94

Table 1. Physical properties of soils

جدول ۲. مشخصات مربوط به اثر مقیاس (عدد مقیاس $\lambda=20$)

Parameter	Scaling factor	model	Prototype	
pile	Outside Diameter (mm)	λ	22	440
	Inner Diameter (mm)	-	20	426
	Length (mm)	λ	400	8000
	Modulus of elasticity (kN/m ²)	-	70×10^6	200×10^6
	Axial stiffness (EA)	λ^2	4616	1846320
Raft	Width (mm)	λ	300	6000

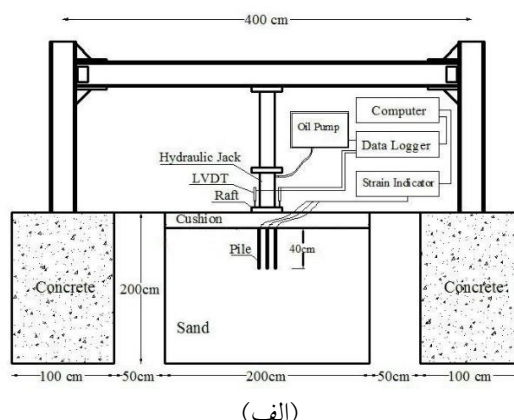
Table 2. Properties of scaling effect ($\lambda=20$)

به منظور آماده سازی بستر خاکی از روش بارش همراه با کوبیدن توسط صفحه فلزی استفاده می‌شود. ابتدا مقدار خاک لازم برای رسیدن به تراکم مورد نظر وزن می‌شود سپس به صورت بارشی و یکنواخت در چاله آزمایش ریخته شده و توسط صفحه فلزی کوبیده می‌شود [20]. ضخامت لایه کوبیده شده در هر مرحله ۱۰ سانتی‌متر است. به منظور کنترل تراکم یکنواخت در تمام قسمت‌های خاک از جعبه‌های کوچک مکعبی شکل در نقاط مختلف محیط خاکی استفاده شده است. پس از هر آزمایش کل نمونه خاک تخلیه و برای آزمایش بعدی آماده می‌شود. این روش باعث دقت و تکرارپذیری آزمایش‌ها می‌شود. پس از آماده شدن بستر ماسه-ای شمع‌ها به آرامی درون خاک توسط جک نفوذ داده می‌شوند [21]. سرعت نفوذ شمع به داخل خاک باید به صورت بسیار آهسته صورت پذیرد تا از برهم خوردن خاک جلوگیری شود. لایه بالشتک شنی نیز مشابه لایه ماسه‌ای در محل خود ریخته و کوبیده می‌شود. دانسیته نسبی خاک ماسه-ای ۶۰ درصد و لایه بالشتک شنی ۹۰ درصد است.

رفتار رادیه شمع پرداختند و به این نتیجه رسیدند اگر نسبت قطر شمع به قطر متوسط ذرات خاک از ۲۰ برابر بیشتر باشد، اندازه ذرات تاثیر ناچیزی در نتایج دارد. در این مطالعه این نسبت برابر ۳۷ است که به منظور مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج دیگر پژوهش‌ها در خصوص رادیه شمع در مقیاس‌های دیگر مناسب خواهد بود.

شکل ۲. شکل شماتیک دستگاه آزمایش: الف- مقطع عرضی دستگاه

آزمایش ب- نمای کلی دستگاه به همراه تجهیزات



(الف)



(ب)

Fig. 2. Schematic view of testing apparatus (a): Lateral view of setup (b): General view of setup with its attachment

شکل ۳. نمودار دانه‌بندی خاک ماسه‌ای و بالشتک شنی

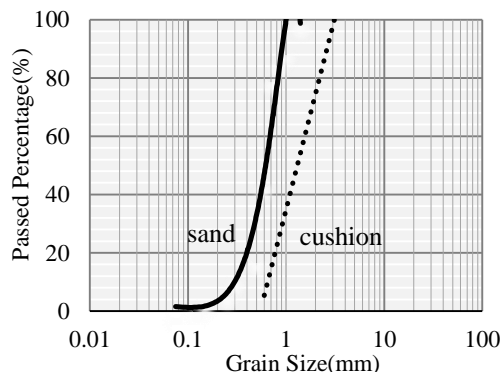


Fig. 3. Diagram of Particle size distribution (sand and cushion)

پس از آماده شدن محیط خاکی صفحه فلزی مدل رادیه در محل خود قرار داده شده و در مرکز این صفحه جک هیدرولیکی مستقر می‌شود. به منظور اندازه‌گیری نشست از LVDT که به پایه‌های ثابت متصل است استفاده شده است. چگونگی بارگذاری به صورت پله‌ای و در بازه‌های ۲۰۰ کیلوگرمی است بدین صورت که پس از اعمال بار در هر مرحله، بار به صورت ثابت روی خاک قرار داده می‌شود تا تغییرات نشست تقریباً ناچیز شود. برای ثبت اطلاعات مربوط به نیروی وارد بر شمع‌ها از استرین گیج‌هایی در محیط بیرونی شمع‌ها و در هر مقطع ۳ عدد نصب شده است. آرایش و محل استرین گیج‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است. به منظور ثبت نیرو و پخش تنش اصطکاکی در شمع‌های مرکزی (P1) و شمع‌های گوشه (P3) استرین گیج‌هایی به فواصل ۱۰ سانتی‌متر در طول شمع نصب شده است. در شمع کناری (P2) به منظور محاسبه نیروی وارد بر شمع فقط در نوک شمع استرین گیج نصب شده است. قرائت مربوط به این استرین گیج‌ها توسط دستگاه ثبت کرنش‌سنج محاسبه و با سرعت یک قرائت در ثانیه در کامپیوتر ذخیره می‌شود. در این مقاله ۱۳ آزمایش روی رادیه شمع منفصل انجام شده است.

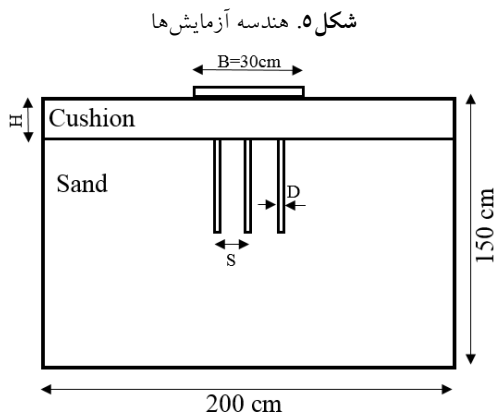


Fig. 5. Geometry of tests

جدول ۳. برنامه آزمایشات

Test series	H/B	S/D	No. of test
1	0-0.17-0.34-0.5	-	4
2	0.17-0.34-0.5	2-4-6	9

Table 3. Tests Program

۳- نتایج

۳-۱- تاثیر ضخامت بالشتک شنی

شکل (۶) رفتار نرمال شده بار نشست رادیه شمع منفصل در ضخامت‌های مختلف بالشتک شنی را نشان می‌دهد. در هر سه نسبت S/D برابر ۲، ۴ و ۶ با افزایش H/B فشار باربری افزایش می‌یابد. روند افزایش فشار باربری با تغییر H/B از ۰/۱۷ به ۰/۳۴ زیاد است در حالی که با تغییر H/B از ۰/۳۴ به ۰/۵۰ این روند کندتر صورت می‌پذیرد.

تغییر ضخامت لایه بالشتک شنی باعث تغییر سازوکار انتقال بار می‌شود. به طور کلی این تغییر ضخامت باعث تاثیر در سه عامل می‌شود: ۱- میزان سهم بالشتک شنی و ماسه زیرین از کل بار ۲- تاثیر در تنش‌های اعمال شده در طول شمع‌ها و ۳- اثر قوس زدگی در لایه بالشتک شنی؛

شکل ۴. آرایش و موقعیت شمع‌ها

Fig. 4. Arrangement and location of piles

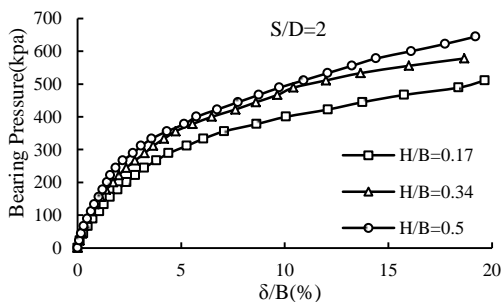
شکل (۵) هندسه آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. در آزمایش‌های سری اول ۴ آزمایش روی خاک ماسه‌ای بدون وجود شمع با H/B برابر ۰، ۰/۱۷، ۰/۳۴ و ۰/۵ انجام می‌شود. هدف بررسی رفتار خاک در حالت بدون وجود شمع به منظور مقایسه با حالت وجود شمع است. در آزمایش‌های سری دوم ۹ آزمایش روی رادیه شمع با H/B برابر ۰/۱۷،

از یافته‌های مشابه می‌توان به مطالعات انجام گرفته در مقیاس کوچک آزمایشگاهی با دستگاه سانتریفیوژ توسط رسولی و همکاران [22]، اشاره نمود. در پژوهش‌های انجام شده وجود ضخامت بهینه بالشتک شنی در نتایج مشاهده شده است به طوری که با افزایش ضخامت بالشتک شنی از ۱ متر به ۱/۵ متر فشار باربری افزایش و با افزایش ضخامت بالشتک شنی به ۲ متر فشار باربری کاهش می‌یابد به عبارت دیگر ضخامت بهینه بالشتک شنی در H/B برابر ۰/۲۷ بدست آمده است. در مطالعات حاضر این نسبت برابر ۰/۳۳ است.

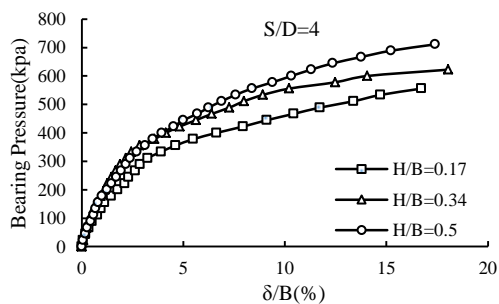
شکل ۶. تغییرات فشار باربری در مقابل نشست نرمال شده برای ضخامت

های مختلف بالشتک شنی:

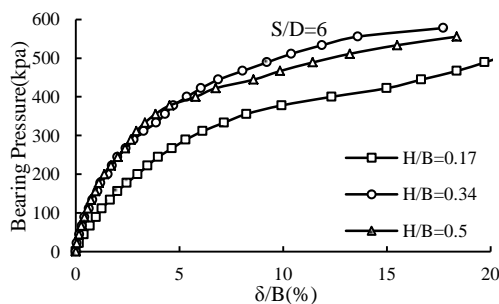
الف: $S/D=2$ ، ب: $S/D=4$ ، ج: $S/D=6$



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 6. Variation of bearing pressure with normalized settlement for different height of cushion (a) $S/D=2$, (b) $S/D=4$, (c) $S/D=6$

در بررسی عامل اول، در حالت H/B برابر ۰/۱۷ به دلیل نزدیک بودن رادیه به ماسه زیرین محصور بین شمع‌ها، تاثیر ماسه زیرین زیاد و تاثیر لایه بالشتک شنی کم است. با افزایش H/B به ۰/۳۴ تاثیر ماسه زیرین کاهش و تاثیر بالشتک شنی افزایش می‌یابد و با افزایش H/B به ۰/۵۰ تاثیر لایه بالشتک شنی زیاد و تاثیر لایه ماسه زیرین کم است. بنابراین در حالت H/B برابر ۰/۳۴ بیشترین مشارکت ماسه زیرین و لایه بالشتک شنی وجود دارد.

در بررسی عامل دوم، ضخامت بالشتک شنی بر پخش تنش‌های محوری و تنش‌های اصطکاکی تاثیر دارد که در ادامه بحث به آن پرداخته شده است. با افزایش ضخامت بالشتک شنی سهم شمع‌ها از کل بار کاهش و همچنین میزان اصطکاک منفی در شمع‌ها افزایش یافته است که تاثیر شمع‌ها و سهم شمع‌ها را در انتقال بار کاهش می‌دهد.

در بررسی سوم طبق پژوهش‌های انجام شده توسط جنک و همکاران [16] قوس زدگی کامل در خاک زمانی اتفاق می‌افتد که نسبت H/S' (ضخامت مصالح مابین شمع و رادیه و S' فاصله خالص بین شمع‌ها) حدوداً برابر ۱/۶ باشد. با تشکیل این قوس‌ها انتقال بار از رادیه به شمع‌ها به شکل مطلوبی انجام می‌شود. با این تفاسیر در حالت S/D برابر ۲ در تمامی ضخامت‌های بالشتک شنی قوس زدگی کامل وجود خواهد داشت، در حالت S/D برابر ۴ قوس زدگی کامل در H/B برابر ۰/۳۴ (H/S' برابر ۱/۵۲) اتفاق می‌افتد و در حالت S/D برابر ۶ قوس زدگی کامل در هیچ کدام از ضخامت‌های بالشتک شنی اتفاق نخواهد افتاد.

با توجه به برآیند کلیه عوامل ذکر شده و نتایج به دست آمده، کاهش ضخامت بالشتک شنی از یک مقدار مشخص باعث تاثیر منفی عامل اول و سوم و افزایش بیشتر این ضخامت باعث تاثیر منفی عامل اول، دوم بر فشار باربری می‌شود. به منظور دید بهتر تاثیر ضخامت بالشتک شنی، این تاثیر در نشست‌های نرمال شده ۱۰ درصد و ۲۰ درصد در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود در هر دو نسبت نشست نرمال شده ۱۰ درصد و ۲۰ درصد شیب افزایش فشار باربری با تغییر H/B از ۰/۱۷ به ۰/۳۴ بیشتر از تغییر H/B از ۰/۳۴ به ۰/۵ است.

تغییر ضخامت بالشتک شنی تاثیر کمی در تغییر سهم شمع‌ها دارد. در حالی که در بارهای زیاد درصد سهم شمع‌ها از کل بار با افزایش H/B از ۰/۱۷ به ۰/۳۴ با شیب ملایم کاهش می‌یابد در حالی که با تغییر H/B از ۰/۳۴ به ۰/۵۰ تغییرات کاهش سهم شمع‌ها افزایش می‌یابد.

شکل ۸. نسبت باربری شمع‌ها برای ضخامت‌های مختلف بالشتک شنی:

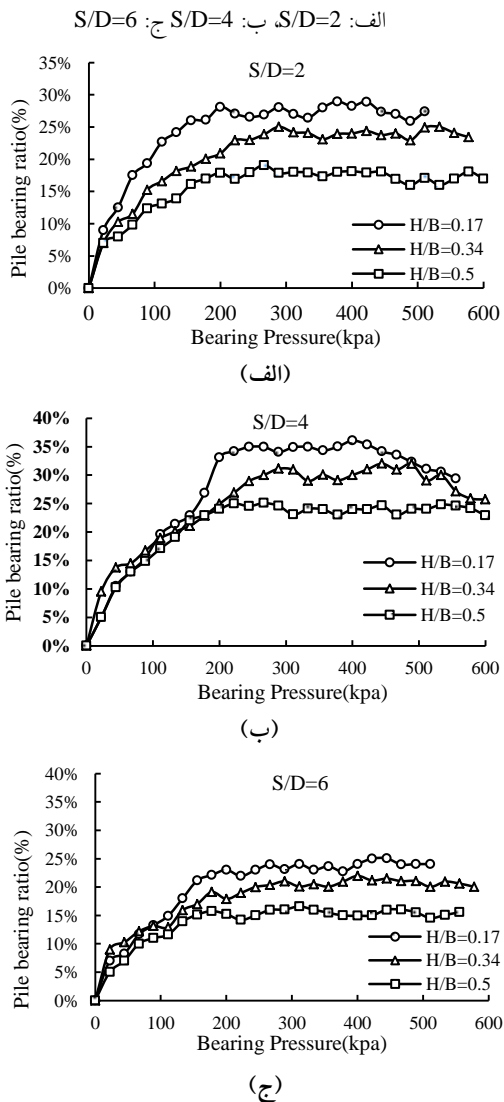


Fig. 8. Pile bearing ratio for different height of cushion (a) S/D=2, (b) S/D=4, (c) S/D=6

این روند مشابه مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته توسط کائو و همکاران [11] است. پژوهش‌هایی بر روی دو نوع شمع با طول‌های ۵۰ سانتی‌متر (L/B=2.30) و ۳۵ سانتی‌متر (L/B=1.60) انجام شد و درصد سهم شمع‌ها به ترتیب بین ۳۰ تا ۳۵ درصد برای شمع‌های به طول ۵۰

شکل ۷. تغییرات فشار باربری برای ضخامت‌های مختلف بالشتک شنی در نشست‌های نرمال شده ۱۰ درصد و ۲۰ درصد

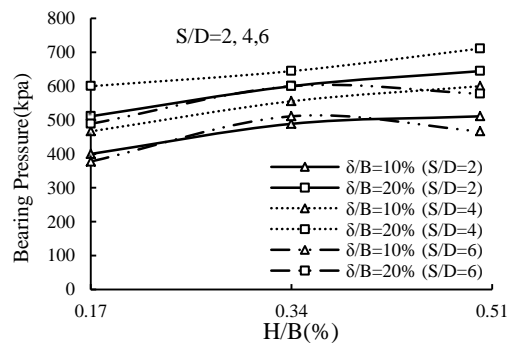


Fig. 7. Variation of bearing pressure for different height of cushion in normalized settlement 10% & 20%

شکل (۸) تغییرات درصد سهم شمع‌ها از کل بار در ضخامت‌های مختلف بالشتک شنی در طول بارگذاری را نشان می‌دهد. نیروی وارد بر شمع‌ها توسط کرنش سنج‌های متصل به نوک شمع محاسبه می‌شود. این نیرو از رابطه $P = \epsilon_p * E_p * A_p$ بدست می‌آید که در این رابطه E_p و A_p به ترتیب کرنش محوری، مدول الاستیسیته و سطح مقطع خالص شمع‌ها است. مجموع نیروی وارد به شمع‌ها (P_T) از رابطه $P_T = P_1 + 4 * P_2 + 4 * P_3$ بدست می‌آید که P_1 و P_2 و P_3 به ترتیب نیروی وارد بر شمع‌های مرکزی، کناری و گوشه است. در هر سه حالت S/D برابر ۲، ۴ و ۶ با افزایش ضخامت بالشتک شنی سهم شمع‌ها از کل بار کاهش می‌یابد. در مراحل اولیه بارگذاری بیشتر بار توسط رادیه حمل می‌شود. با افزایش بیشتر بار، سهم شمع‌ها از کل بار شروع به افزایش می‌کند و در یک مقدار ثابت می‌ماند. کمترین سهم شمع‌ها از کل بار در S/D برابر ۶ و H/B برابر ۰/۵ در حدود ۱۴ درصد و بیشترین سهم شمع‌ها از کل بار در S/D برابر ۴ و H/B برابر ۰/۱۷ در حدود ۳۴ درصد است.

با افزایش ضخامت بالشتک شنی سهم بیشتری از بار در این لایه مستهلک می‌شود که باعث انتقال نیروی کمتری به شمع‌ها شده است.

به منظور تعیین سهم شمع‌ها در حین بارگذاری در سطوح مختلف بار، تغییرات سهم شمع‌ها از کل بار برای ضخامت‌های مختلف بالشتک شنی، در سه سطح بار ۱۱۱، ۳۱۱ و ۵۱۱ کیلوپاسکال که معرف بارهای سطوح کم، متوسط و زیاد است که در شکل (۹) نشان داده شده است. در سطح بارهای کم،

شکل ۱۱. تغییرات تنش محوری و تنش اصطکاکی در طول شمع گوشه (P3) در ضخامت‌های مختلف بالشتک شنی
الف- پخش تنش محوری در طول شمع
ب- پخش تنش اصطکاکی در طول شمع

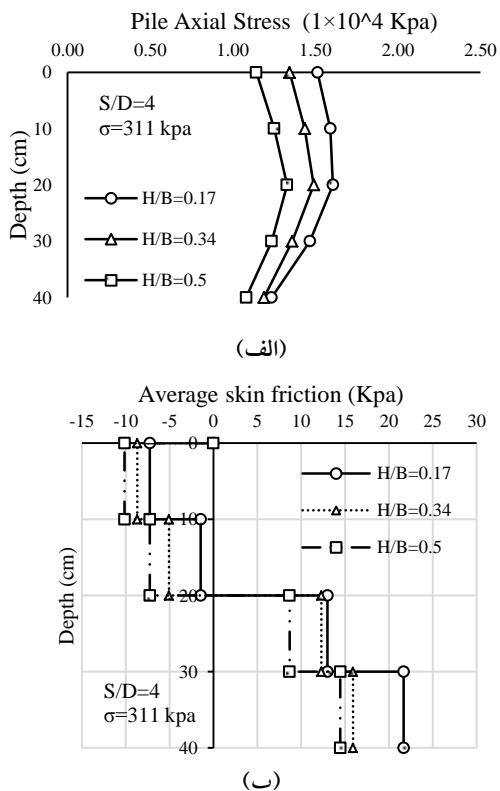


Fig. 11. Variations of axial stress and frictional stress along the corner pile (P3) in different thicknesses of the cushion

(a). Distribution of the axial stress along the pile
(b). Distribution of the frictional stress along the pile

شکل‌های (۱۰-الف و ۱۱-الف) تاثیر ضخامت بالشتک شنی بر پخش تنش محوری در شمع‌های مرکزی (P1) و گوشه (P3) در بار متوسط ۳۱۱ کیلوپاسکال در حالت S/D برابر ۴ را نشان می‌دهد. دلیل انتخاب S/D برابر ۴ این است که این فاصله حالت بهینه در رفتار رادیه شمع است که کمترین نشست‌ها و بیشترین فشار باربری در این حالت مشاهده شده است. همچنین تغییرات متوسط تنش اصطکاکی در طول شمع‌های مرکزی (P1) و گوشه (P3) در ضخامت‌های مختلف بالشتک شنی در شکل‌های (۱۰-ب و ۱۱-ب) نشان داده شده است.

متوسط تنش اصطکاکی در فاصله بین استرین گیج‌ها با تقسیم اختلاف نیرو بر مساحت جانبی شمع بین هر دو

سانتی‌متر و بین ۲۰ تا ۳۰ درصد برای شمع‌های به طول ۳۵ سانتی‌متر بدست آمده است.

شکل ۹. تغییرات نسبت باربری شمع‌ها با ضخامت‌های مختلف بالشتک

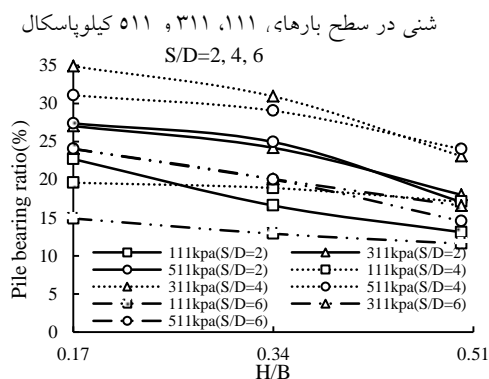


Fig. 9. Variations of the Pile bearing ratio with different thicknesses of cushion at 111, 311, and 511 kPa load levels

شکل ۱۰. تغییرات تنش محوری و تنش اصطکاکی در طول شمع مرکزی (P1) در ضخامت‌های مختلف بالشتک شنی
الف- پخش تنش محوری در طول شمع
ب- پخش تنش اصطکاکی در طول شمع

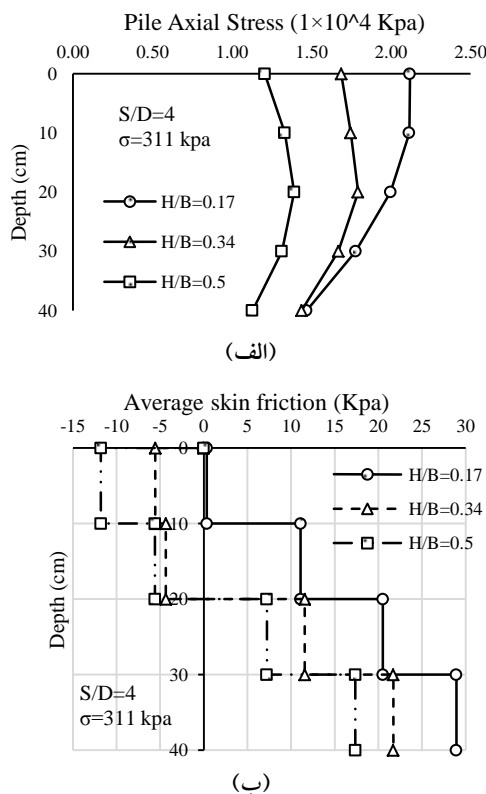


Fig. 10. Variations of axial stress and frictional stress along the central pile (P1) in different thicknesses of the cushion

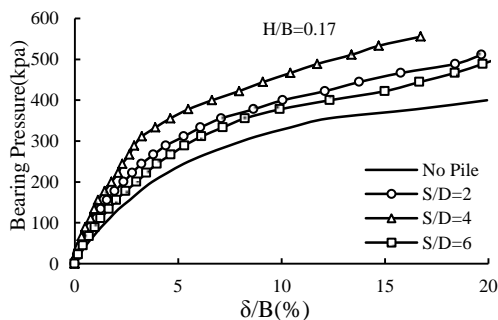
(a). Distribution of the axial stress along the pile
(b). Distribution of the frictional stress along the pile

اثر کمتری در افزایش مقاومت برشی دارد. همچنین فاصله زیاد شمع‌های کناری و گوشه از مرکز رادیه باعث کاهش انتقال نیرو به شمع‌ها می‌شود که باعث کاهش سهم شمع‌ها از کل بار می‌شود. پس در این حالت فشار باربری کمتری نسبت به حالت S/D برابر ۴ مشاهده شده است.

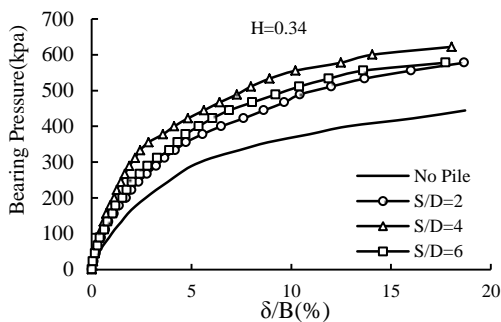
شکل ۱۲. تغییرات فشار باربری در مقابل نشست نرمال شده

برای فواصل مختلف شمع‌ها:

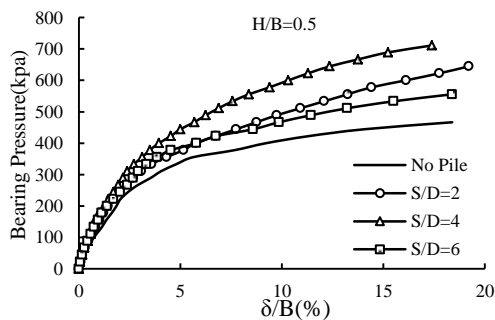
الف: $H/B=0.17$, ب: $H/B=0.34$, ج: $H/B=0.5$



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 12. Variation of bearing pressure with normalized settlement for different pile spacing (a) $H/B=0.17$, (b) $H/B=0.34$, (c) $H/B=0.5$

به منظور دید بهتر تاثیر فاصله شمع‌ها بر فشار باربری، تغییرات فشار باربری در نشست‌های نرمال شده ۱۰ درصد و

استرین گیج محاسبه می‌شود. از آنجا که قسمتی از بار وارد شده توسط خاک اطراف شمع، به شمع‌ها منتقل می‌شود، ماکزیمم نیرو در نوک شمع ایجاد نشده و در قسمت بالایی شمع‌ها به دلیل تغییر مکان بیشتر خاک نسبت به شمع تنش اصطکاک منفی ایجاد می‌شود. همچنین در قسمت پایینی تنش اصطکاک مثبت تشکیل می‌شود. با افزایش ضخامت بالشتک شنی مقدار اصطکاک منفی در قسمت بالای شمع‌ها بیشتر می‌شود و محور ختنی به سمت پایین حرکت می‌کند. همانطور که قبلاً دیده شد با افزایش ضخامت بالشتک شنی سهم شمع‌ها از کل بار کاهش یافته و بنابراین نیروی کمتری به شمع‌ها وارد شده است که جابه‌جایی شمع نسبت به خاک را کاهش داده و باعث افزایش اصطکاک منفی می‌شود. در شمع‌های گوشه اصطکاک منفی بیشتری نسبت به شمع‌های مرکزی ایجاد شده است.

۳-۲- تاثیر فاصله شمع‌ها

شکل (۱۲) نمودار فشار باربری در مقابل نشست نرمال شده در فواصل مختلف شمع‌ها را نشان می‌دهد. در تمامی حالات بیشترین فشار باربری در S/D برابر ۴ مشاهده شده است. در حالت S/D برابر ۲ کمترین فاصله بین شمع‌ها وجود دارد که در این حالت شمع‌ها به دلیل نزدیکی به هم باعث بروز آثار اندرکنشی بر یکدیگر شده و راندمان شمع‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین در این حالت حجم کمی از خاک، بین شمع‌ها محصور است. محصور شدگی خاک ماسه‌ای بین شمع‌ها باعث افزایش مقاومت برشی می‌شود. پس در این حالت بیشترین آثار اندرکنشی و کمترین حجم محصور شدگی ماسه را داریم. در حالت S/D برابر ۴ آثار اندرکنشی به دلیل فاصله بیشتر شمع‌ها نسبت به حالت قبل، کمتر بوده و لذا حجم خاک محصور شده بیشتر می‌گردد لذا فشار باربری بیشتری نسبت به حالت S/D برابر ۲ مشاهده شده است. در S/D برابر ۶ کمترین آثار اندرکنشی شمع‌ها بر یکدیگر و بیشترین حجم محصور شدگی ماسه وجود دارد. گرچه در این حالت حجم زیادی از ماسه در بین شمع‌ها محصور است ولی به دلیل فاصله زیاد بین شمع‌ها آثار محصور شدگی ماسه

نسبت به شمع‌ها افزایش داده و باعث افزایش اصطکاک منفی بیشتر و انتقال محور ختنی به سمت پایین شده است.

شکل ۱۴. تغییرات نسبت باربری شمع‌ها با فاصله شمع‌ها در سطح بارهای ۱۱۱، ۳۱۱ و ۵۱۱ کیلوپاسکال

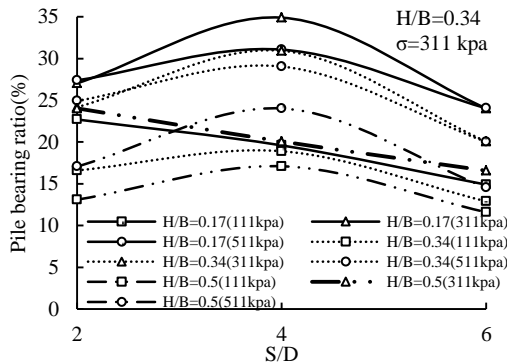
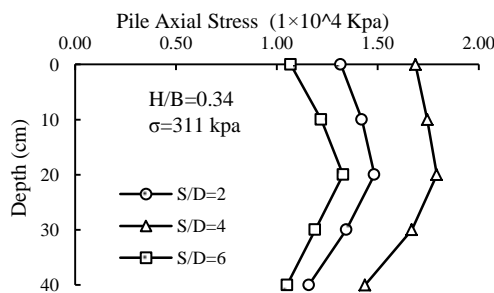


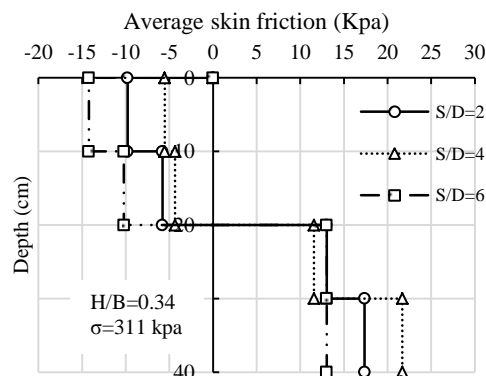
Fig. 14. Variation of pile bearing ratio with different pile spacing at 111, 311, and 511 kPa load levels

شکل ۱۵- تغییرات تنش محوری و تنش اصطکاکی در طول شمع

مرکزی (P1) در فواصل مختلف شمع‌ها
الف- پخش تنش محوری در طول شمع
ب- پخش تنش اصطکاکی در طول شمع



(الف)



(ب)

Fig. 15. Variations of axial stress and frictional stress along the central pile (P1) in different pile spacing
(a). Distribution of the axial stress along the pile
(b). Distribution of the frictional stress along the pile

۲۰ درصد در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش S/D از ۲ به ۴ فشار باربری افزایش و با افزایش S/D از ۴ به ۶ فشار باربری کاهش می‌یابد. در تمامی حالات کمترین میزان نشست در S/D برابر ۴ مشاهده شده است.

تغییرات سهم شمع‌ها از کل بار در فواصل مختلف شمع‌ها در بارهای ۱۱۱، ۳۱۱ و ۵۱۱ کیلوپاسکال در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در تمامی سطوح بار با افزایش S/D از ۲ به ۴ سهم شمع‌ها از کل بار افزایش و با افزایش S/D از ۴ به ۶ سهم شمع‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین حالت بهینه فاصله بین شمع‌ها در S/D برابر ۴ است.

شکل ۱۳. تغییرات فشار باربری با فاصله شمع‌ها در نشست های نرمال شده ۱۰ درصد و ۲۰ درصد

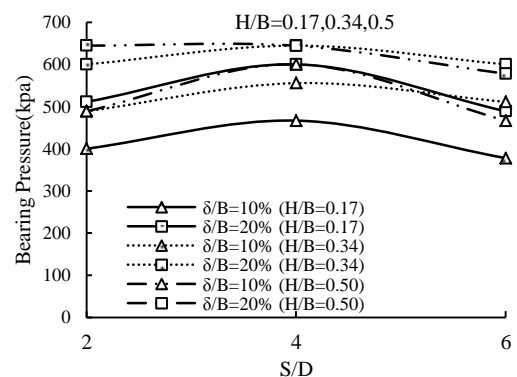


Fig. 13. Variation of bearing pressure for different pile spacing in normalized settlement 10% & 20%

شکل‌های (۱۵ و ۱۶) تغییرات تنش محوری و پخش تنش اصطکاکی در طول شمع‌های مرکزی (P1) و گوشه (P3) در فواصل مختلف شمع‌ها را نشان می‌دهد. به دلیل حجم بالای اطلاعات فقط حالت H/B برابر ۰/۳۴ در بار متوسط ۳۱۱ کیلوپاسکال آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود در شمع‌های گوشه اصطکاک منفی بیشتری نسبت به شمع‌های مرکزی تشکیل شده است. با افزایش S/D از ۲ به ۴ مقدار اصطکاک منفی در قسمت بالایی شمع‌های مرکزی و گوشه کاهش می‌یابد. در حالت S/D برابر ۲ به دلیل فاصله کم شمع‌ها با یکدیگر آثار اندرکنشی شمع-خاک بیشتر از حالت S/D برابر ۴ است که این موضوع تغییر مکان خاک را

شمع‌ها و ضخامت بالشتک شنی بر رفتار مجموعه و نیروی وارد بر شمع‌ها و پخش تنش محوری در طول شمع‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس آزمایش‌های انجام شده نتایج ذیل استخراج شده است:

۱- در یک نشست مشخص، با افزایش ضخامت بالشتک شنی فشار باربری افزایش می‌یابد. این افزایش فشار باربری در یک ضخامت مشخص لایه بالشتک شنی اتفاق می‌افتد و پس از آن افزایش ضخامت بالشتک شنی تاثیر زیادی در افزایش فشار باربری ندارد. در این مطالعه ضخامت بهینه بالشتک شنی در H/B برابر $0/34$ بدست آمده است.

۲- افزایش ضخامت بالشتک شنی باعث کاهش سهم شمع‌ها از کل بار می‌شود. در سطح بارهای کم (کمتر از ۱۱۱ کیلوپاسکال) سهم شمع‌ها از کل بار مقدار کمی است و با افزایش بیشتر بار سهم شمع‌ها از کل بار افزایش می‌یابد و به یک مقدار ثابت می‌رسد. در انتهای بارگذاری سهم شمع‌ها شروع به کاهش می‌کند.

۳- با افزایش ضخامت بالشتک شنی مقدار اصطکاک منفی در قسمت بالایی شمع‌های مرکزی و گوشه افزایش می‌یابد و باعث انتقال محور خنثی به سمت پایین می‌شود به طوری که در H/B برابر $0/17$ این محور در فاصله کمتر از ۱۰ سانتی‌متر از سر شمع (۲۵ درصد بالایی طول شمع) و در H/B های برابر $0/34$ و $0/5$ این محور در حدود ۲۰ سانتی‌متر از سر شمع (۵۰ درصد بالایی طول شمع) تشکیل شده است. محور خنثی نیز در شمع‌های کناری پایین تر از شمع‌های مرکزی قرار دارد.

۴- در یک نشست مشخص، با افزایش S/D از ۲ به ۴ نشست کاهش و با افزایش S/D از ۴ به ۶ نشست افزایش می‌یابد. در این پژوهش S/D بهینه برابر ۴ است. بیشترین سهم شمع‌ها از کل بار در S/D برابر ۴ است. در یک سطح بار مشخص با افزایش S/D از ۲ به ۴ سهم شمع‌ها از کل بار افزایش و با افزایش S/D به ۶ سهم شمع‌ها کاهش یافته است. در فواصل مختلف شمع‌ها کمترین اصطکاک منفی ایجاد شده در $S/D=4$ مشاهده شده است. با افزایش S/D از ۲ به ۴ مقدار اصطکاک منفی در قسمت بالایی شمع‌های مرکزی و گوشه کاهش می‌یابد. با افزایش S/D به ۶

شکل ۱۶. تغییرات تنش محوری و تنش اصطکاک در طول شمع

گوشه (P3) در فواصل مختلف شمع‌ها

الف- پخش تنش محوری در طول شمع

ب- پخش تنش اصطکاک در طول شمع

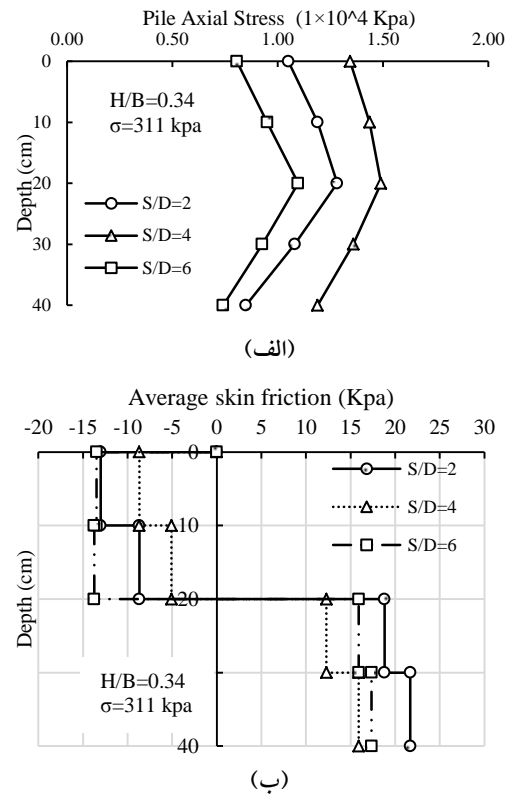


Fig. 16. Variations of axial stress and frictional stress along the corner pile (P3) in different pile spacing (a). Distribution of the axial stress along the pile (b). Distribution of the frictional stress along the pile

با افزایش S/D به ۶ اصطکاک منفی بیشتری نسبت به حالت S/D برابر ۴ در قسمت بالایی شمع‌های مرکزی و گوشه ایجاد شده است که باعث انتقال محور خنثی به سمت پایین می‌شود. بیشترین اصطکاک منفی در S/D برابر ۶ و کمترین اصطکاک منفی در S/D برابر ۴ مشاهده شده است. این اصطکاک منفی باعث کاهش نیروی وارد بر شمع‌ها می‌شود و همان‌گونه که در بخش‌های قبلی دیده شد کمترین سهم شمع‌ها از کل بار نیز در S/D برابر ۶ و بیشترین سهم شمع‌ها در S/D برابر ۴ مشاهده شده است.

۴- نتیجه گیری

مطالعات آزمایشگاهی به منظور بررسی رفتار رادیه شمع منفصل انجام پذیرفته است. تاثیر پارامترهایی مانند فاصله

[12] EL SAWWAF, M. 2010 Experimental study of eccentrically loaded raft with connected and unconnected short piles. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136, 1394-1402.

[13] FIORAVANTE, V. & GIRETTI, D. 2010 Contact versus noncontact piled raft foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 47, 1271-1287.

[14] FIORAVANTE, V. 2011 Load transfer from a raft to a pile with an interposed layer. *Géotechnique*, 61, 121.

[15] LIANG, F.-Y., CHEN, L.-Z. & SHI, X.-G. 2003 Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load. *Computers and Geotechnics*, 30, 443-453.

[16] JENCK, O., DIAS, D. & KASTNER, R. 2005 Soft ground improvement by vertical rigid piles two-dimensional physical modelling and comparison with current design methods. *Soils and Foundations*, 45, 15-30.

[17] STANDARD, B. 1995 Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. British Standards Institution.

[18] GUI, M. & BOLTON, M. 1998 Geometry and scale effects in CPT and pile design. *Geotechnical site characterization*. Edited by PK Robertson and PW Mayne. Balkema, Rotterdam, 1063-1068.

[19] 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, 543-552.

[20] HATAF, N., BOUSHEHRAN, A. & GHAHRAMANI, A. 2010 Experimental and numerical behavior of shallow foundations on sand reinforced with geogrid and grid anchor under cyclic loading. *Civil Engineering*, 17, 1-10.

[21] LE KOUBY, A., DUPLA, J. C., CANOU, J. & FRANCIS, R. 2016 The effects of installation order on the response of a pile group in silica sand. *Soils and Foundations*, 56, 174-188.

[22] RASOULI, H., SAEEDI AZIZKANDI, A., BAZIAR, M., MODARRESI, M. & SHAHNAZARI, H. 2015 Centrifuge modeling of non-connected piled raft system. *International Journal of Civil Engineering*, 13, 114-123.

اصطکاک منفی بیشتری نسبت به حالت $S/D=4$ در قسمت بالایی شمع‌های مرکزی و گوشه ایجاد شده است که باعث انتقال محور ختنی به سمت پایین می‌شود.

References

۵- مراجع

[1] WONG, I., CHANG, M. & CAO, X. 2000 Raft foundations with disconnected. *Design applications of raft foundations*, 469.

[2] TRADIGO, F., PISANÒ, F., DI PRISCO, C. & MUSSI, A. 2015 Non-linear soil-structure interaction in disconnected piled raft foundations. *Computers and Geotechnics*, 63, 121-134.

[3] COMBAULT, J. 2011 The Rion-Antirion Bridge—when a dream becomes reality. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 5, 415-426.

[4] LAI, H.-J., ZHENG, J.-J., ZHANG, J., ZHANG, R.-J. & CUI, L. 2014 DEM analysis of “soil”-arching within geogrid-reinforced and unreinforced pile-supported embankments. *Computers and Geotechnics*, 61, 13-23.

[5] BLANC, M., RAULT, G., THOREL, L. & ALMEIDA, M. 2013 Centrifuge investigation of load transfer mechanisms in a granular mattress above a rigid inclusions network. *Geotextiles and Geomembranes*, 36, 92-105.

[6] POULOS, H. 1991 Analysis of piled strip foundations. *Comp. Methods and Advances in Geomechs*, 1, 183-191.

[7] TRADIGO, F., PISANÒ, F., MUSSI, A., PERSIO, R. & DI PRISCO, C. 2014 Finite element analysis of soil-structure interaction in disconnected piled raft foundations. *Numerical methods in geotechnical engineering (NUMGE). II. Delft (Netherlands): CRC Press (Taylor & Francis Group)*, 705-10.

[8] ESLAMI, A., VEISKARAMI, M. & ESLAMI, M. 2012 Study on optimized piled-raft foundations (PRF) performance with connected and non-connected piles—three case histories. *International Journal of Civil Engineering*, 10, 100-111.

[9] SHAHU, J., MADHAV, M. & HAYASHI, S. 2000 Analysis of soft ground-granular pile-granular mat system. *Computers and Geotechnics*, 27, 45-62.

[10] HAGHBIN, M. 2014 Study on behavior of soil reinforcing pile in piled raft systems. *International Journal of Civil Engineering*, 304-315.

[11] CAO, X. D., WONG, I. H. & CHANG, M.-F. 2004 Behavior of model rafts resting on pile-reinforced sand. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130, 129-138.

Experimental study of the effect of cushion thickness and the pile spacing on the behavior of the non-connected pile raft foundation

Mohammad Ghanbar Dezfouli¹, Masoud Dehghani², Adel Asakereh^{2*}, Behzad Kalantari²

1. PhD candidate, Department of civil engineering, faculty of engineering, University of hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

2. Assistant Professor, Department of civil engineering, faculty of engineering, University of hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

*asakereh@hormozgan.ac.ir

Abstract:

Because of the existence of concentrated forces and high bending moments at the junction of pile and raft in structure with a high load using the non-connected pile raft foundation can be an appropriate option for the foundation of the mentioned structures. In this system, the piles and the raft are not connected and a cushion is used between the piles and the raft to redistribute the forces. In this state, load transmit from raft to pile by the arching mechanism that forming in cushion layer. The behavior of pile raft because of the interactions such as: pile-pile, pile-soil, pile-raft and raft-soil is very complicated. The pile used in pile raft for two purpose: 1- reduce the settlement and 2- increase the bearing capacity.

In this study, a series of experimental tests were conducted on a non-connected pile raft located on a sandy soil in order to investigate the effect of parameter such as cushion height (H) and pile spacing (S) in forms of non-dimensional form (H/B & S/D) on load-settlement behavior, pile bearing ratio and axial and frictional stress in center and corner piles. For this purpose, cases H/B= 0.17, 0.34, 0.5 and S/D=2, 4, 6 were investigated. The axial stress in piles measured according to strain gauges that installed in the perimeter of piles.

The results show that in three state S/D=2, 4, 6 optimum state occur in H/B=0.34. With increase H/B, the forces applied in piles is decrease and then the pile bearing ratio is decrease. The maximum pile bearing ratio occur in H/B=0.17 and the minimum occur in H/B=0.5.

In the low level of the load major of the load protected by raft that with increase the load level, pile bearing ratio increase and stable in a specified value. Because part of the load is transmitted to piles by the soil around the piles, the maximum force applied to the piles does not occur at the tip of the piles and a negative friction is formed in the upper part of the piles. In the upper part of the piles, the displacement of the soil is more than the displacement of the piles, resulting in the formation of a negative friction and the formation of a positive friction in the bottom of the piles. With increase the H/B, the value of negative friction increases and neutral axes (a location of piles that displacement of soil and pile are equal) move down. In various pile spacing (S/D=2, 4, 6) and in three states (H/B= 0.17, 0.34, 0.5) maximum bearing pressure was observed in S/D= 4. In S/D=2 maximum interaction effect (pile-pile) and minimum confinement of sand and in S/D=6 minimum interaction effect (pile-pile) existed and confinement of sand has insignificant effect because of high pile spacing. In three states H/B= 0.17, 0.34, 0.5 minimum pile bearing ratio in S/D=6 and maximum pile bearing ratio in S/D=4 were observed. Maximum negative friction in S/D=6 and minimum negative friction in S/D=4 were observed. In all states in corner piles negative friction is more than center piles.

Keywords: non-connected pile raft foundation, Laboratory model, sand, cushion