

مطالعه موردی مقایسه ظرفیت باربری فشاری پی - پایه های سنگریزه ای کوبشی و پی - پایه های بتنی در جاریز نسبت به تغییر نسبت مساحت پایه به پی.

بهمن نیرومند^۱

۱. استادیار، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه خلیج فارس

niroumand@pgu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۱۲/۲۳]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۵/۰۴/۰۴]

چکیده

این مقاله به مقایسه رفتار پی - پایه های سنگریزه ای کوبشی و پی - پایه های بتنی در جاریز به عنوان دو نوع پی نیمه عمیق با مقیاس کوچک در محل می پردازد. در این مطالعه، نسبت مساحت پایه به پی، مدول سختی مرکب پی - پایه و ظرفیت باربری پی - پایه سه پارامتر اصلی هدف است. به همین منظور، ۱۸ آزمایش بارگذاری فشاری در ۳ گروه ۶ تایی متشکل از پی های منفرد دایره ای، پی - پایه های سنگریزه ای کوبشی و پی - پایه های بتنی در جاریز با قطر و طول ثابت پایه و قطرهای متغیر پی منفرد در منطقه ساحلی بندر بوشهر، ساخته و آزمایش شدند. ناحیه آزمایشی شامل یک لایه لای مرطوب از نوع ML واقع بر یک لایه رس اشباع CL بود. نتایج نشان می دهند به ازای نسبت های مساحت پایه به پی کمتر از ۲۰ درصد، استفاده از پایه های بتنی در جاریز یا پایه های سنگریزه ای کوبشی هیچ تاثیری در افزایش مدول سختی و ظرفیت باربری پی - پایه ها ندارند. همچنین به ازای نسبت های مساحت پایه به پی بیشتر از ۲۰ درصد، مدول سختی متوسط پی - پایه های بتنی و پی - پایه های سنگریزه ای کوبشی به ترتیب برابر ۱/۶ و ۱/۳ برابر مدول سختی متوسط پی های دایره ای بدست آمده اند.

واژگان کلیدی: پایه سنگریزه ای کوبشی، بهسازی خاک، ظرفیت باربری، مدول سختی، نسبت مساحت پایه به پی.

۱- مقدمه

مقیاس واقعی شامل سه مرحله حفاری چاه، ایجاد حباب مقاوم انتهایی و اجرای میله پایه است. حباب مقاوم انتهایی بوسیله یک یا دو لایه شن با دانه بندی یکنواخت و میله پایه به وسیله لایه هایی از شن خوب دانه بندی شده به ضخامت ۰/۳ متری و کوبیدن هر لایه با چکش هیدرولیکی دارای کوبه مخصوص ساخته می شوند [3]. روند ساخت پایه های بتنی در جاریز شامل

طی سال های اخیر از پایه های سنگریزه ای کوبشی ($RAPs$) به طور فزاینده ای برای کاهش نشست های غیر یکنواخت، افزایش ظرفیت باربری و سختی بستر های نرم در پروژه های مختلف حمل و نقل و ساختمان سازی استفاده شده است [6,5,4,3,2,1]. روند ساخت پایه های سنگریزه ای کوبشی با

دو مرحله حفاری چاه و پر کردن چاه با بتن است. درک رفتار و عملکرد پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی در مقایسه با پایه‌های بتنی در جرایز از جنبه‌های مختلف شامل میزان تاثیر بر مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی خاک محیطی دور پایه‌ها، ظرفیت باربری و مدول سختی پایه‌ها دارای اهمیت است. نوع و مشخصه‌های مکانیکی و تحکیمی خاک بر تغییر رفتار این دو نوع پایه‌های نیمه عمیق می‌تواند اثرگذار باشد. حتی در خاک‌های رسی با قوام نسبی نرم تا خیلی سفت نتایج بدست آمده از مقایسه رفتار این دو نوع پایه می‌تواند دارای تغییرات زیادی باشد. علاوه بر این، پارامترهای قطر و طول این پایه‌ها در تغییر رفتار این دو نوع پایه می‌تواند اثرگذار باشد. در چنین شرایطی، درک رفتار و عملکرد پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی در مقایسه با پی- پایه‌های بتنی در جرایز با پیچیدگی‌های بیشتری روبرو است. با توجه به جوان بودن روش ساخت پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی نسبت به ستون‌های سنگی رایج و عدم وجود مطالعات کافی در خصوص مقایسه عملکرد و رفتار پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی با پی- پایه‌های بتنی در جرایز، به پژوهش‌های بیشتری در این زمینه نیاز می‌باشد. هر چند تاکنون، نتایج مطالعات موردی یا آزمایشگاهی در زمینه تعیین نسبت مساحت جایگزین موثر در پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی گزارش نشده است، با وجود این، پژوهش‌های متعددی در این زمینه برای ستون‌های سنگی ارتعاشی انجام شده‌اند. Hu و همکاران در سال ۱۹۹۷ با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی روی یک گروه از ستون‌های سنگی دریافتند که حالت گسیختگی ایجاد شده در زیر پی از نوع مخروطی شکل است. همچنین آنها دریافتند که به ازای نسبت‌های مساحت جایگزین کمتر از ۱۰ درصد اصلاح زمین ناچیز است. علاوه بر این، اجرای نسبت‌های مساحت جایگزین بیشتر از ۳۵ درصد عملی نیست [7]. McKelvey و همکاران در سال ۲۰۰۴ با انجام آزمایش‌های مختلف روی مدل‌های

آزمایشگاهی ساخته شده از ستون‌های سنگی در خاک رس کائولین سفید و مواد شفاف با خاصیت مشابه رس دریافتند که به ازای نسبت‌های مساحت جایگزین در محدوده ۳۵-۱۰ درصد، نتیجه عملی مطلوب حادث می‌شود [8]. Hanna و همکاران در سال ۲۰۱۳ با انجام مدل‌سازی عددی روی ستون‌های سنگی منفرد و گروه ستون‌های سنگی در خاک رس نرم و مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی دریافتند که به ازای نسبت‌های مساحت جایگزین در محدوده ۳۵-۱۰ درصد سطوح گسیختگی در سه حالت کلی، محلی و سوراخ کننده از هر دو بخش ستون‌ها و خاک اطراف عبور می‌نماید [9]. جزییات کاملی از طرح و ساخت پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی و بررسی تاثیر ابعاد هندسی شامل قطر و طول پایه‌ها روی رفتار، ظرفیت باربری و مدول سختی این نوع پایه‌ها به وسیله این نویسنده و همکاران در سال ۲۰۱۱ در قالب یک گزارش تحقیقاتی در پژوهشکده حمل و نقل تهیه شده است [10, 11, 12]. در پژوهش انجام شده به وسیله همین نویسنده بر روی دو گروه پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی و پایه‌های بتنی در جرایز با قطر ۱۳۵ میلی متر و طول‌های ۶۰۰، ۷۵۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ میلی متر در خاک‌های ساحلی بندر بوشهر واقع در جنوب ایران، نتایج آزمایش‌های بارگذاری نشان دادند مقادیر مدول سختی و بار حد طراحی پایه‌های بتنی در جرایز به طور میانگین به ترتیب برابر ۱/۲۵ و ۱/۱ برابر مقادیر نظیر در پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی هستند [13]. در ادامه این پژوهش، برای مقایسه رفتار پی- پایه‌های بتنی در جرایز و پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی تحت بارگذاری فشاری و تعیین نسبت مساحت موثر پایه به پی، آزمایش‌های بارگذاری روی سه گروه آزمایشی در دستور کار قرار گرفت. به همین منظور، سه گروه متشکل از پی‌های منفرد دایره‌ای، پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی و پی- پایه‌های بتنی در جرایز با قطر و طول ثابت پایه و قطرهای متغیر پی منفرد به طور متناظر در

خاک‌های نرم ساحلی منطقه ویژه اقتصادی بندر بوشهر واقع در جنوب ایران ساخته شدند و تحت آزمایش بارگذاری قرار گرفتند. قطر پی‌های منفرد در هر سه گروه به ترتیب برابر ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ میلی‌متر و قطر اسمی و طول پایه‌های بتنی و سنگریزه‌ای کوبشی در دو گروه پی- پایه به ترتیب برابر ۱۳۵ و ۶۰۰ میلی‌متر بودند. شرایط تحت الارض در ساختگاه با استفاده از آزمایش‌های درجا و آزمایش‌های آزمایشگاهی متعارف ارزیابی شدند. اندازه‌گیری‌های انجام شده در ساختگاه مختص به بار اعمالی و نشست بالا در پی- پایه‌ها و نشست انتهای پایه‌ها بود. در این مقاله، مقادیر بار و تنش حد طراحی و مدول سختی اجزای آزمایشی به ازای قطرهای مختلف پی دایره‌ای (نسبت‌های مختلف مساحت پایه به پی) در هر سه گروه آزمایشی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۲- ساخت و ابزار گذاری پایه ها

در این پژوهش، ۳ گروه ۶ تایی متشکل از پی‌های منفرد دایره‌ای، پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی و پی- پایه‌های بتنی درجاریز با قطر و طول ثابت پایه و قطرهای متغیر پی منفرد در محل ساخته شدند. در گروه اول، برای ساخت پی‌های منفرد از

شکل ۱. جزئیات اندازه‌گذاری شده اجزای آزمایشی شامل؛ (الف) پی‌های منفرد دایره‌ای، (ب) پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی و (ج) پی- پایه‌های بتنی

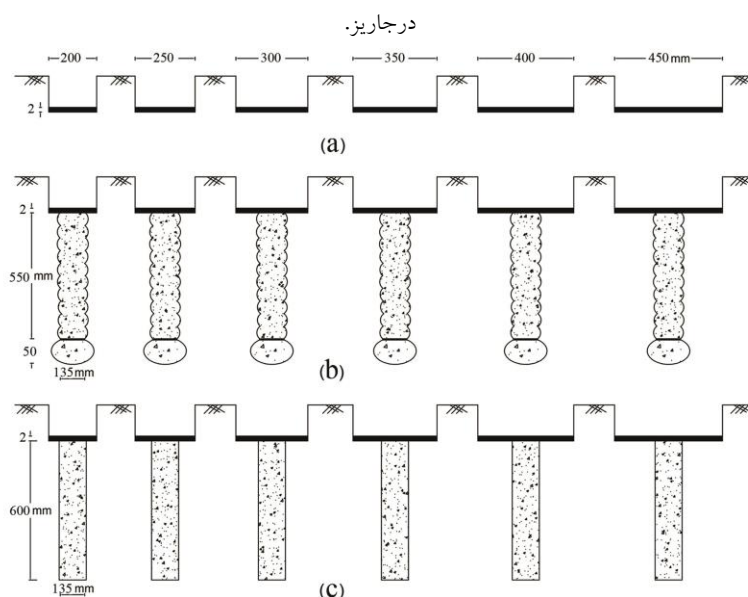


Fig. 1. The measured details of the test elements include; (a) spread circular footings, (b) footing-rammed aggregate piers, and (c) footing-cast in place piers.

کیلوگرم نیرو در حد فاصل بالای پیستون جک و زیر تکیه‌گاه گاری استفاده شد. برای اعمال بار به صورت محوری و حفظ بار در موقعیت مشخص و جلوگیری از انحراف بار در حین بارگذاری، قطعه چهارشاخ، طراحی و ساخته شد. چهارشاخ در مرکز خود دارای استوانه فولادی به قطر داخلی ۵۲ میلی‌متر و طول ۲۰۰ میلی‌متر بود که با عبور شافت انتقال نیرو از داخل آن، به شافت اجازه انحراف در حین بارگذاری داده نمی‌شد. در عمل پس از استقرار صفحه بارگذاری روی پایه و اتصال شافت انتقال نیرو به آن، قطعه چهار شاخ با عبور شافت انتقال نیرو از داخل استوانه هادی شافت، به واسطه چهار خار انتهایی به داخل زمین کوبیده و تراز شد.

شکل ۲. تصویر سیستم متحرک گاری و ریل‌ها روی مسیر آماده سازی شده.



Fig. 2. Photo of the cart and modular rails system on the prepared embankments.

طراحی سیستم بارگذاری به گونه‌ای بود که امکان کج شدن صفحه بارگذاری در حین اعمال بار وجود نداشت. پس جابه‌جایی صفحه فقط از طریق یک نشست سنج عقب‌رهای اندازه‌گیری شد.

شکل ۳. جزئیات شماتیک سیستم‌های بارگذاری و اندازه‌گیری بار و نشست در پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی.

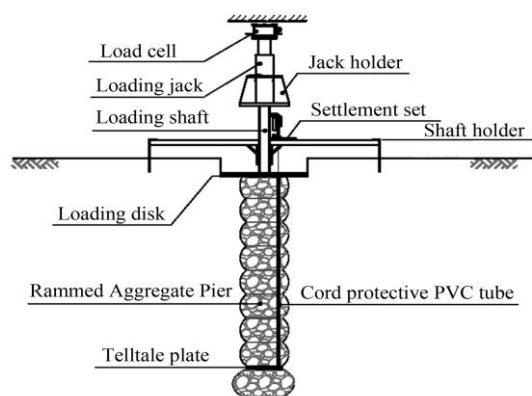


Fig. 3. Schematic details of loading and measurements of load and settlement systems for rammed aggregate piers.

فاصله اجزای آزمایشی طوری در نظر گرفته شده بودند که اجزای مجاور تاثیری روی هم نداشتند. در این آزمایش‌ها، فاصله پی‌های دایره‌ای از یکدیگر در گروه (الف) بسته به قطر دایره در محدوده ۲-۳ متر و برای اجزای پی-پایه دو گروه (ب) و (ج) برابر ۴/۵ متر بودند. اندازه‌گیری‌های انجام شده در این آزمایش، مختص به بار وارد شده در بالای صفحه (P_f)، نشست بالای صفحه (δ_f) و نشست انتهای پایه (δ_b) در زمان های مشخص بود. به همین منظور، در فاصله بین حساب انتهایی و پایه سنگریزه‌ای کوبشی، صفحه دایره‌ای از جنس تفلون هم قطر حفره با ضخامت یک سانتی‌متر قرار گرفته و توسط یک زه به نشست سنج مکانیکی در سطح زمین متصل شده بود. برای حرکت آزاد زه از یک غلاف با قطر ۱۲ میلی‌متر استفاده شده بود [11].

۳- سیستم بارگذاری و اندازه‌گیری

در این پژوهش، برای بارگذاری پایه‌های آزمایشی از ایده سیستم تیر واکنشی متحرک به صورت گاری و ریل استفاده شد تا ضمن افزایش سرعت انجام آزمایش‌ها، اقتصادی‌تر نیز باشد. مبنای این ایده، سیار بودن یک تکیه‌گاه محکم برای تحمل نیروی عکس‌العمل اعمالی از طرف جک بارگذاری است. در این سیستم از ۴ ریل ۶ متری که متناسب با پیشروی گاری به سمت جلو جابه‌جا می‌شدند، استفاده شد. شکل (۲) تصویر سیستم متحرک گاری و ریل‌ها روی مسیر آماده سازی شده را نشان می‌دهد. سیستم اندازه‌گیری داده‌ها در پی-پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی مختص به بار و نشست صفحه بالایی و نشست انتهای پایه و در پی‌های دایره‌ای منفرد و پی-پایه‌های بتنی مختص به بار و نشست صفحه بالایی بود. علاوه بر این، قطر حفره پس از حفاری و پس از ساخت پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی و ضخامت لایه‌های سنگریزه‌ای در هر مرحله از کوبش اندازه‌گیری شد. شکل (۳) جزئیات سیستم‌های بارگذاری و اندازه‌گیری بار و نشست در پی-پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی را به طور شماتیک نشان می‌دهد. برای اعمال نیروی فشاری به پایه‌های آزمایشی از یک جک به ظرفیت ۳۰ تن و فاصله حرکتی ۱۰۰ میلی‌متر و به منظور اندازه‌گیری نیرو از یک لودسل به ظرفیت ۱۰ تن و دقت ۰/۵

جدول ۱. خلاصه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاک در محل آزمایش.

Layer Number	USCS Classification	Depth Limits (m)	SPT (N)	Soil Properties				
				γ_{wet} (kN/m ³)	ω (%)	C' (kPa)	ϕ' (°)	Cu (kPa)
1	Silt layer (ML)	0.15 - 1.15	14-16 ^a	17 - 18.9	27 - 31	1 - 2 ^b	25 ^b	18 - 75 ^c
2	Clay layer (CL)	1.15 - 2.55	7-9	16.8-18.2	41-45	5	19.7	15-25
3	Clay layer (CL)	2.55 - 4.15	8-12	18.3	37	5	23	25-35

^a Standard Penetration Test, ^b Consolidated - Drained Direct Shear Tests, ^c Uniaxial Compression Tests

Table 1. Summary of physical and mechanical properties of soil layers.

۵- نتایج آزمایش بارگذاری

آزمایش بارگذاری اجزای آزمایشی مطابق استاندارد *ASTM D-1143* و به سبک کنترل تنش انجام شده است. در این پژوهش، بارگذاری هر المان آزمایشی تا رسیدن نشست صفحه بالایی تا حد ۲۵/۴ میلی‌متر انجام شده است. پس از انجام آزمایش بارگذاری روی پی - پایه‌های سنگریزه‌ای ساخته شده و ثبت داده‌های بار وارد شده بر صفحه بالایی (P_t)، نشست صفحه بالایی (δ_t) و نشست انتهای پایه (δ_b)، برای هر پی - پایه منحنی‌های $P_t - \delta_t$ و $P_t - \delta_b$ در یک دستگاه مختصات دکارتی ترسیم شده است. هدف از ترسیم دو منحنی $P_t - \delta_t$ و $P_t - \delta_b$ در یک دستگاه مختصات دکارتی علاوه بر تعیین بار حد طراحی، شناسایی رفتار حاکم بر پایه سنگریزه‌ای کوبشی است [2,1]. به طور خاص، تغییر شکل خمیره‌ای در قسمت فوقانی و نشست انتها، دو رفتار حاکم بر پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی هستند. عدم وجود خمیدگی در منحنی تنش اعمالی در بالای پایه نسبت به نشست انتهای پایه سنگریزه‌ای پس از تنش حد طراحی، نشان دهنده وقوع تغییر شکل خمیره‌ای در قسمت فوقانی پایه است. نشست انتهای پایه نیز با مشاهده خمیدگی در منحنی تنش اعمالی در بالای پایه نسبت به نشست انتهای پایه سنگریزه‌ای پس از تنش حد طراحی، مشخص می‌شود.

۵-۱- منحنی‌های تنش فشاری - نشست

شکل (۴) منحنی‌های $\delta_t - q_t$ اندازه‌گیری شده برای پی‌های دایره‌ای منفرد، منحنی‌های $\delta_t - q_t$ و $\delta_b - q_t$ اندازه‌گیری شده برای پی - پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی و منحنی‌های $\delta_t - q_t$ اندازه‌گیری شده برای پی - پایه‌های بتنی درجاریز برای

نشست بالای پایه بوسیله یک نشست سنج عقربه‌ای با فاصله حرکتی ۱۰۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و نشست انتهای پایه بوسیله یک نشست سنج عقربه‌ای با فاصله حرکتی ۳۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شدند. جزییات بیشتر این سیستم در مراجع [11,10] ارائه شده‌اند.

۴- شناسایی خاک محل

به منظور شناسایی شرایط لایه‌های خاک ناحیه آزمایشی و تعیین مقادیر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک برای انجام محاسبات ظرفیت باربری و نشست پایه‌ها، آزمایش‌های درجا و آزمایشگاهی مختلفی انجام شدند. نتایج نشان می‌دهند که در محدوده عمق تا ۴ متر، پس از برداشت لایه خاک هوازده ساحلی به ضخامت ۰/۱۵ متر، سه لایه مطبق خاک شامل یک لایه لای مرطوب با قوام سفت (ML) به رنگ قهوه‌ای و ضخامت ۱ متر، لایه رس اشباع با قوام متوسط (CL) به رنگ زرد و ضخامت ۱/۴ متر، و لایه رس اشباع با قوام سفت و به رنگ خاکستری (CL) و ضخامت ۱/۶ متر به صورت یکنواخت وجود دارد. در این مطالعه، آزمایش‌های درجا شامل آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) و آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل دانسیته، طبقه بندی خاک، درصد رطوبت، حدود اتربرگ، تحکیم یک بعدی، مقاومت فشاری تک محوری و برش مستقیم (DST) بودند. نتایج تعداد ضربات N در آزمایش SPT در لایه‌های ML، CL و CL به ترتیب در بازه ۱۶-۱۴، ۸-۶ و ۱۲-۸ بودند. جدول (۱) خلاصه‌ای از ویژگی‌های مهندسی لایه‌های تحت الارض در ناحیه آزمایشی را ارائه می‌دهد. جزییات بیشتر نتایج در مرجع [11] ارائه شده‌اند.

قطرهای مختلف پی دایره‌ای و پایه با قطر و طول ثابت را به
 طور مقایسه‌ای نشان می‌دهد. برای ترسیم منحنی‌های $q_t - \delta_t$ و $q_t - \delta_b$ ، با تقسیم بار اعمالی (P_t) به سطح مقطع پی دایره‌ای
 می‌توان تنش اعمالی (q_t) را محاسبه نمود.

شکل ۴. مقایسه منحنی‌های $q_t - \delta_t$ اندازه‌گیری شده برای پی‌های دایره‌ای منفرد، منحنی‌های $q_t - \delta_b$ و $q_t - \delta_t$ اندازه‌گیری شده برای پی - پایه‌های سنگریزه‌ای
 کوبشی و منحنی‌های $q_t - \delta_t$ اندازه‌گیری شده برای پی - پایه‌های بتنی درجاریز برای قطرهای مختلف پی دایره‌ای و پایه با قطر اسمی ثابت ۱۳۵ میلی‌متر و طول
 ثابت ۶۰۰ میلی‌متر.

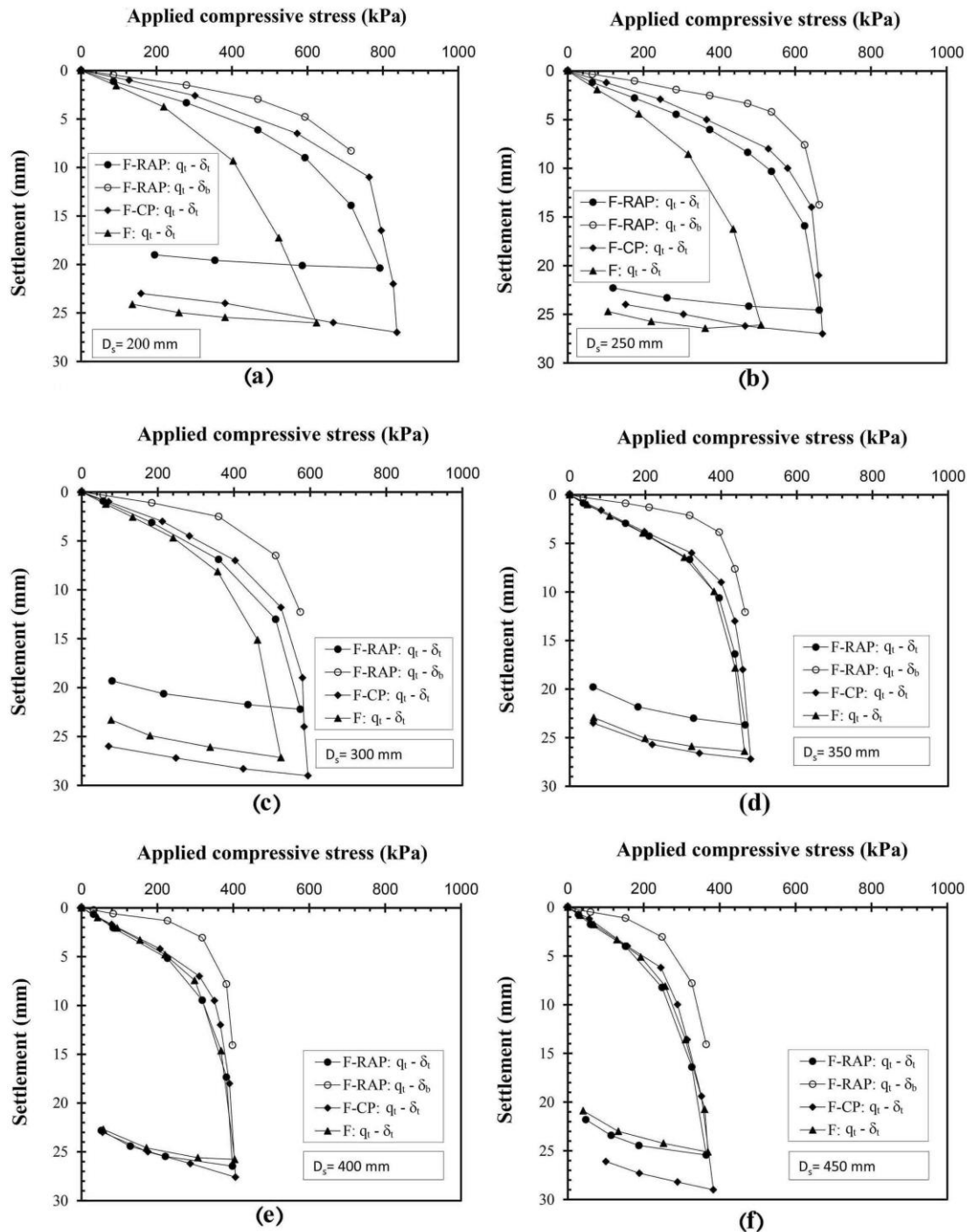


Fig. 4. Comparison of measured stress-settlement curves for spread circular footings, footing-rammed aggregate piers and footing-cast in place concrete piers for different diameters of circular footing and piers by a constant diameter of 135 mm and a constant length of 600 mm.

مدول سختی تعریف می شود. شکل (۵) مقایسه نتایج مدول سختی اجزای آزمایشی برحسب قطر پی های دایره ای منفرد را در سه گروه آزمایشی نشان می دهد. همان گونه که در شکل مشاهده می شود، در هر سه گروه آزمایشی، با افزایش قطر پی منفرد مدول سختی دارای روند نزولی است. با وجود این، متناسب با افزایش قطر پی منفرد، نرخ کاهش مدول سختی پی - پایه های بتنی بیشتر از پی - پایه های سنگریزه ای کوبشی و نرخ کاهش مدول سختی پی - پایه سنگریزه ای کوبشی بیشتر از پی های دایره ای منفرد است.

شکل ۵. مقایسه نتایج مدول سختی اجزای آزمایشی برحسب قطر پی دایره ای در سه گروه: (الف) پی های منفرد دایره ای، (ب) پی - پایه های سنگریزه ای کوبشی و (ج) پی - پایه های بتنی درجاریز.

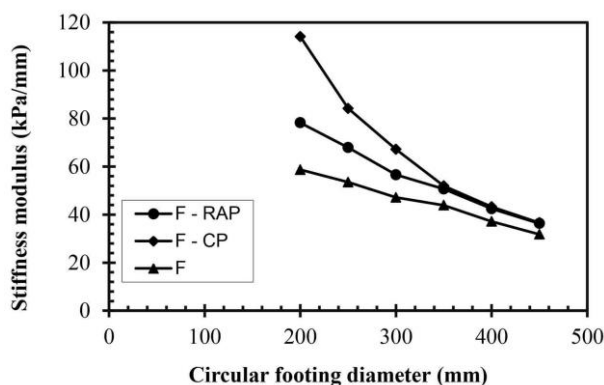


Fig. 5. Comparison of stiffness modulus results of the test elements in terms of circular footing diameter for three groups include; (a) spread circular footings, (b) footing-rammed aggregate piers, and (c) footing-cast in place concrete piers.

جدول ۲. مقایسه نسبت های مختلف مدول سختی اجزای مختلف آزمایشی.

D_F (mm)	$R_a = A_P / A_F$ (%)	$k_{S, F-CP} / k_{S, F-RAP}$	$k_{S, F-RAP} / k_{S, F}$	$k_{S, F-CP} / k_{S, F}$
200	45	1.5	1.3	1.9
250	30	1.2	1.3	1.6
300	20	1.2	1.2	1.4
350	15	1	1.2	1.2
400	11	1	1.1	1.2
450	9	1	1.1	1.2

Table 2. Comparison of the different ratios of stiffness modulus of the different test elements.

جدول (۲) نسبت های مختلف متشکل از مدول های سختی پی دایره ای (k_S, F)، پی - پایه بتنی درجاریز ($k_S, F-CP$) و پی - پایه سنگریزه ای کوبشی ($k_S, F-RAP$) را نشان می دهد. همان گونه که در جدول مشاهده می شود، به ازای قطر پی دایره ای برابر ۲۰۰

هدف از ترسیم همزمان منحنی های $q_t - \delta_b$ و $q_t - \delta_t$ اندازه گیری شده برای پی - پایه های سنگریزه ای کوبشی به ازای هر قطر از پی های دایره ای، مشخص نمودن تغییر شکل حاکم بر پایه سنگریزه ای کوبشی است. همچنین هدف از ترسیم همزمان منحنی های $q_t - \delta_t$ اندازه گیری شده برای پی های منفرد دایره ای، پی - پایه های سنگریزه ای کوبشی و پی - پایه های بتنی درجاریز به ازای هر قطر از پی های دایره ای، مطالعه اثر نسبت مساحت پایه به پی بر ظرفیت باربری پی - پایه ها متناسب با افزایش قطر پی های دایره ای و مقایسه ظرفیت باربری دو نوع پی - پایه است. بر مبنای نتایج ارائه شده در این شکل، تغییر شکل حاکم بر پایه سنگریزه ای کوبشی در زیر کلیه پی - پایه های سنگریزه ای کوبشی، از نوع نشست انتهای پایه است. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش قطر پی های دایره ای (کاهش نسبت مساحت پایه به پی) نرخ همگرایی منحنی های $q_t - \delta_t$ برای پی های دایره ای منفرد، پی - پایه های سنگریزه ای کوبشی و پی - پایه های بتنی درجاریز به صورت افزایشی است. هر چند، با افزایش قطر پی از ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی متر نرخ همگرایی به صورت افزایشی و متفاوت از نرخ همگرایی (حدود صد در صد) متناسب با افزایش قطر پی از ۳۵۰ تا ۴۵۰ میلی متر است. به عبارت دیگر، بیشترین تاثیر پایه های سنگریزه ای و بتنی به ترتیب مربوط به قطر پی های ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی متر بوده است و به ازای قطرهای بزرگتر یا مساوی ۳۵۰ میلی متر پایه ها هیچ گونه اثری در ظرفیت باربری پی - پایه ندارند. علاوه بر این، به ازای پی های با قطر کمتر یا مساوی ۳۰۰ میلی متر، پی - پایه های بتنی از ظرفیت نسبتا بالاتری نسبت به پی - پایه های سنگریزه ای کوبشی برخوردارند.

۲-۵- مدول سختی

برای تعیین مدول سختی اجزای آزمایشی، به طور مستقیم از صفحه فولادی فوقانی استفاده شده است. بر اساس $NAVFAC DM-7.1$ [14] مقدار مدول سختی اجزاء حاصل از آزمایش بارگذاری به این صورت بدست می آید که قسمت حاصل از تقسیم تنش فشاری بر نشست بدست آمده به عنوان

طراحی اجزای آزمایشی، در مرجع [12] تشریح شده است. برای پی‌های دایره‌ای با قطرهای ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ میلی‌متر، بار حد طراحی اندازه‌گیری شده برای پی‌های دایره‌ای بدون پایه به ترتیب برابر ۱/۴، ۱/۵، ۱/۶، ۱/۷ و ۱/۸ کیلو نیوتن، برای پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی به ترتیب برابر ۲۰/۴، ۲۹/۲۰، ۳۳/۹، ۳۹/۱ و ۴۲/۷ کیلو نیوتن، و برای پی- پایه‌های بتنی درجاریز به ترتیب برابر ۲۳/۳، ۳۱/۱، ۳۷/۹، ۴۰/۱، ۴۳/۵ و ۴۶/۶ کیلو نیوتن است.

جدول ۳. مقایسه نسبت‌های مختلف تنش حد طراحی اجزای مختلف آزمایشی.

D_F (mm)	$R_d = A_F / A_P$ (%)	$q_{d, F-CP} / q_{d, F-RAP}$	$q_{d, F-RAP} / q_{d, F}$	$q_{d, F-CP} / q_{d, F}$
200	45	1.1	1.4	1.6
250	30	1.1	1.3	1.4
300	20	1.1	1.1	1.3
350	15	1	1	1.1
400	11	1	1	1
450	9	1	1	1

Table 3. Comparison of the different ratios of design limit stress of the different test elements.

جدول (۳) نسبت‌های مختلف متشکل از تنش‌های حد طراحی پی دایره‌ای (q_d, F)، پی- پایه بتنی درجاریز ($q_d, F-CP$) و پی- پایه سنگریزه‌ای کوبشی ($q_d, F-RAP$) را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود، به ازای قطرهای پی دایره‌ای در محدوده ۲۰۰-۳۰۰ میلی‌متر، تنش‌های متوسط حد طراحی پی- پایه‌های بتنی و پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی به ترتیب برابر ۱/۴ و ۱/۳ برابر تنش حد طراحی پی‌های دایره‌ای بدست آمده‌اند. همچنین به ازای قطرهای بیشتر از ۳۰۰ میلی‌متر، تنش‌های متوسط حد طراحی پی- پایه بتنی و پی- پایه سنگریزه‌ای کوبشی افزایش چندانی نداشته‌اند. در مجموع بر اساس نتایج این پژوهش، به ازای نسبت‌های مساحت پایه به پی بیشتر از ۲۰ درصد، پی- پایه‌های بتنی درجاریز و پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی در افزایش تنش حد طراحی پی‌های دایره‌ای تقریباً به یک میزان موثر هستند. همچنین، به ازای نسبت‌های مساحت پایه به پی کمتر از ۲۰ درصد، کاربرد هر دو نوع پایه‌ها تأثیری در افزایش تنش حد طراحی پی‌های دایره‌ای ندارد.

میلی‌متر، مدول‌های سختی پی- پایه بتنی و پی- پایه سنگریزه‌ای کوبشی به ترتیب برابر ۱/۹ و ۱/۳ برابر مدول سختی پی دایره‌ای بدست آمده‌اند. این روند تا قطر ۳۰۰ میلی‌متر حاکی از تأثیر پایه‌های بتنی و پایه سنگریزه‌ای کوبشی بر افزایش مدول سختی پی دایره‌ای است. همچنین به ازای قطرهای بیشتر از ۳۰۰ میلی‌متر، مدول‌های سختی پی- پایه‌های بتنی و پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی افزایش چندانی نداشته و به ترتیب حدود ۱/۲ و ۱/۱ برابر مدول سختی پی‌های دایره‌ای بدست آمده‌اند. در مجموع بر اساس نتایج این پژوهش، به ازای نسبت‌های مساحت پایه به پی بیشتر از ۲۰ درصد، پی- پایه‌های بتنی درجاریز بیشتر از پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی در افزایش مدول سختی پی دایره‌ای موثر هستند. همچنین، به ازای نسبت‌های مساحت پایه به پی کمتر از ۲۰ درصد، کاربرد هر دو نوع پایه‌ها تأثیری در افزایش مدول سختی پی دایره‌ای ندارد.

شکل ۶. مقایسه نتایج تنش حد طراحی اجزای آزمایشی برحسب قطر پی دایره‌ای در سه گروه؛ (الف) پی‌های منفرد دایره‌ای، (ب) پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی و (ج) پی- پایه‌های بتنی درجاریز.

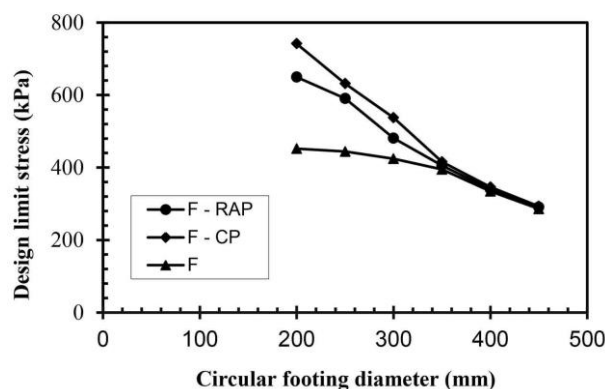


Fig. 6. Comparison of design limit stress results of the test elements in terms of circular footing diameter for three groups include; (a) spread circular footings, (b) footing-rammed aggregate piers, and (c) footing-cast in place concrete piers.

۳-۵- تنش حد طراحی

تغییرات تنش حد طراحی (q_d) اندازه‌گیری شده برحسب قطر پی دایره‌ای برای سه گروه آزمایشی شامل؛ (الف) پی‌های منفرد دایره‌ای، (ب) پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی و (ج) پی- پایه‌های بتنی درجاریز به طور مقایسه‌ای در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. چگونگی تعیین و محاسبه بار و تنش حد

۴-۵- منحنی‌های بار هم نشست

به منظور تعیین میزان تاثیر نسبت مساحت پایه به پی در ظرفیت باربری پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی و پی- پایه‌های بتنی درجاریز در محدوده‌های ارتجاعی و خمیری منحنی‌های بار- نشست، منحنی‌های تغییرات بار برحسب قطر پی دایره‌ای در اجزای مختلف سه گروه آزمایشی در نشست‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر در شکل (۷) نشان شده‌اند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در نشست‌های مختلف ۲۰-۵ میلی‌متر، بیشترین تاثیر پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی و بتنی درجاریز در افزایش ظرفیت باربری پی- پایه‌ها به ازای قطرهای پی دایره‌ای در محدوده ۲۰۰-۳۰۰ میلی‌متر (نسبت‌های مساحت پایه به پی بیشتر از ۲۰ درصد) است. در پی- پایه‌های شناور (عدم اتکای انتهای پایه‌ها روی یک لایه

شکل ۷. مقایسه نتایج بار فشاری برحسب قطر پی دایره‌ای در سه گروه پی‌های منفرد دایره‌ای، پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی و پی- پایه‌های بتنی درجاریز برای نشست‌های: (الف) $\delta_t = 5$ mm، (ب) $\delta_t = 10$ mm، (ج) $\delta_t = 15$ mm و (د) $\delta_t = 20$ mm.

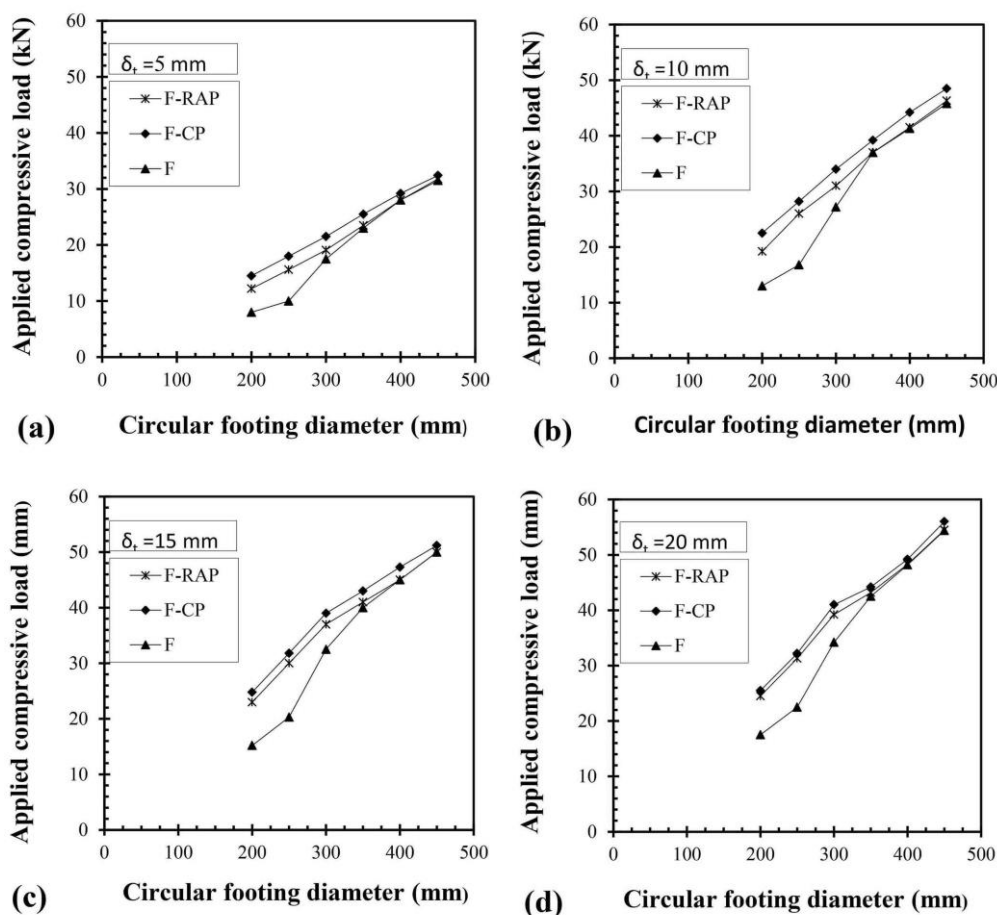


Fig. 7. Comparison of the compressive load results of the test elements in terms of circular footing diameter for three groups include; (i) spread circular footings, (ii) footing-rammed aggregate piers, and (iii) footing-cast in place concrete piers for settlements of 5, 10, 15 and 20 mm.

ساحل بندر بوشهر حکایت از عملکرد مطلوب هر دو نوع پایه در عمل دارد. بر اساس نتایج بدست آمده در این پژوهش و پژوهش پیشین این نویسنده در سال ۲۰۱۵ [13]، ظرفیت باربری و مدول سختی پایه‌ها و پی - پایه‌های بتنی نسبتاً بیشتر از نوع سنگریزه‌ای کوبشی است. با وجود این، معلوم نیست در محلی دیگر با نوع خاک، لایه‌بندی و مشخصه‌های فنی دیگر چنین نتیجه‌ای حادث شود. از طرف دیگر، با توجه به قطر و طول پایه‌های آزمایشی، تغییر شکل حاکم بر هر دو نوع پایه و پی - پایه از نوع نشست آنها بوده است. حال آنکه معلوم نیست با حاکم شدن تغییر شکل خمره‌ای در بالای پایه و تاثیر پی منفرد بر آن چنین نتیجه‌ای تکرار شود. البته پژوهش‌های انجام شده در این خصوص بسیار کم هستند و تا مادامی که تحقیقات بیشتری در این خصوص انجام نشده باشد، تصمیم‌گیری در انتخاب هر یک از این سیستم‌ها در عمل، باید با انجام مطالعه موردی در این زمینه باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور مقایسه رفتار پی - پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی با پی - پایه‌های بتنی درجاریز تحت بارگذاری فشاری، نتایج ۱۸ آزمایش بارگذاری فشاری در ۳ گروه ۶ تایی متشکل از پی‌های منفرد دایره‌ای، پی - پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی و پی - پایه‌های بتنی درجاریز با قطر و طول ثابت پایه و قطرهای متغیر پی منفرد، در محل، مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از این مطالعه، به طور خلاصه عبارتند از: به ازای نسبت‌های مساحت پایه به پی بیشتر از ۲۰ درصد، مدول سختی متوسط پی - پایه‌های بتنی و پی - پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی به ترتیب برابر $1/6$ و $1/3$ برابر مدول سختی متوسط پی‌های دایره‌ای بدست آمده‌اند. همچنین، به ازای نسبت‌های مساحت پایه به پی کمتر از ۲۰ درصد، کاربرد هر دو نوع پایه‌ها تاثیری در افزایش مدول سختی پی دایره‌ای ندارد.

به ازای نسبت‌های مساحت پایه به پی بیشتر از ۲۰ درصد، تنش متوسط حد طراحی پی - پایه‌های بتنی و پی - پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی به ترتیب برابر $1/4$ و $1/3$ برابر تنش حد طراحی پی‌های دایره‌ای بدست آمده‌اند. همچنین، به ازای

بنابر این، با افزایش عمق گوه زیر پی دایره‌ای، گسیختگی پی - پایه تمایل بیشتری به گسیختگی کلی پیدا می‌کند. با وقوع گسیختگی کلی، پایه به جای تامین نیروی فشاری قائم در زیر پی، نیروی برشی را به میزان جزیی در سطح برش تامین می‌کند که در مقایسه با نیروی مقاوم برشی کل سهم اندکی خواهد بود. به همین دلیل، ظرفیت باربری یک پی - پایه با نسبت مساحت جایگزین کمتر از ۲۰ درصد با ظرفیت باربری بستر طبیعی (بر مبنای همان قطر پی دایره‌ای) برابر است.

چنانچه طول پایه به قطر پی دایره‌ای نزدیک‌تر باشد، طول پایه به طور کامل درون گوه گسیختگی زیر پی دایره‌ای قرار خواهد گرفت و تاثیری در افزایش ظرفیت باربری ندارد. در صورتی که طول پایه بیشتر از قطر پی دایره‌ای باشد به دلیل حاکم بودن نشست آنها در پی - پایه‌ها، نیروی مقاوم لازم برای ایستادگی در مقابل بار اعمالی تامین نخواهد شد و پس از ایجاد نشست قائم در پایه، شرایط لازم برای وقوع گسیختگی کلی فراهم می‌شود. بر عکس با کاهش قطر پی دایره‌ای، طول پایه مستقر در گوه گسیختگی زیر پی دایره‌ای، کمتر، سهم نیروی مقاوم جلدی پایه، افزایش، و سهم نیروی قائم خاک محیطی در مقایسه با سهم نیروی قائم پایه در زیر پی دایره‌ای کاهش می‌یابد. بنابراین، پی - پایه تمایل بیشتری به فرو رانش درون خاک دارد. به عبارت دیگر، از بیشینه ظرفیت نیروی مقاوم آنها و نیروی مقاوم جلدی پایه استفاده می‌شود. به همین دلیل، ظرفیت باربری پی - پایه به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت. به طور یقین، در این حالت با افزایش طول پایه سنگریزه‌ای کوبشی کوتاه و بالا رفتن نیروی مقاوم جلدی پایه، ظرفیت پی - پایه نیز افزایش خواهد داشت. همچنین در نشست‌های مختلف، ظرفیت باربری پی - پایه‌های بتنی درجاریز تقریباً برابر ظرفیت باربری پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی است.

۵-۵- تفسیر نتایج

به طور کلی، مقایسه نتایج بدست آمده از انجام آزمایش‌های بارگذاری روی پایه‌ها و پی - پایه‌های بتنی درجاریز و سنگریزه‌ای کوبشی ساخته شده در محل آزمایشی واقع در

Transportation Research Record. 1868, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 103-112.

5. Lawton, E. C., and Fox, N. S. 1994 Settlement of structures supported on marginal or inadequate soils stiffened with short aggregate piers. Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, *ASCE Geotechnical Special Publication* No. 40, Vol. 2, pp. 962-974.

6. Wissmann, K. J., Shields, Craig S., Fitzpatrick, Brendan T. 2004 Modulus Load Test Results for Rammed Aggregate Piers™ in Granular Soils. *Journal Geotech. Geoenviron. Eng.*, (124), pp. 460-472.

7. Hu, W., Wood, D. M., and Stewart, W. 1997 Ground improvement using stone column foundations: Result of model tests. *International Conf. on Ground Improvement Techniques*, CI-Premier, Singapore, pp. 247-256.

8. McKelvey D., Sivakumar V., Bell A., and Graham J. 2004 Modelling vibrated stone columns in soft clay. *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*, vol.157, pp. 137-149.

9. Hanna A. M., Etezad M. and Ayadat T. 2013 Mode of Failure of a Group of Stone Columns in Soft Soil. *International Journal of Geomechanics*, Vol. 13, No. 1, pp. 87-96.

10. Razeghi, H. R., Niroumand, B., Ghiassian, H. and Mansourzadeh, M. 2012 A Field Study on the Behavior of Single Rammed Aggregate Piers toward Changes the Diameter. *Sharif Journal, Civil Eng.*, Vol. 28-2, No. 4, pp. 95-103 (In Persian).

11. Razeghi, H.R., Niroumand, B., Ghiassian, H. 2011 A Field Study of the Behavior of Small-Scale Single Rammed Aggregate Piers, Testing Methodology, Interpretation. *Scientia Iranica*, vol. 18, issue 6, pp. 1198-1206.

12. Razeghi, H. R., Niroumand, B., Ghiassian, H. and Mansourzadeh, M. 2011 Comparison of Experimental and Analytical Results in Rammed Aggregate Piers with Variable Diameters. *Transportation Research Journal* 1, pp. 75 – 88.

13. Niroumand, B. 2015 A Comparative Field Study of the Behavior of Rammed Aggregate Piers and Concrete Piers under Compressive Loading. *Sharif Journal, Civil Eng.*, Vol. 31.2, Issue 3.2, pp. 59-65 (In Persian).

14. NAVFAC 1982 Soil Mechanics. Design Manual 7.1 Dept. of the Navy, Naval Facilities Eng., New York, *John Wiley and Sons*, Inc.

نسبت‌های مساحت پایه به پی کمتر از ۲۰ درصد، کاربرد هر دو نوع پایه‌ها تأثیری در افزایش تنش حد طراحی پی‌های دایره‌ای ندارد.

به ازای نسبت‌های مساحت پایه به پی بیشتر از ۲۰ درصد، تنش متوسط حد طراحی و مدول سختی متوسط پی- پایه‌های بتنی درجاریز به ترتیب ۱/۱ و ۱/۳ مقادیر مانند در پی- پایه‌های سنگریزه‌ای کوبشی است.

در استفاده از نتایج این مطالعه باید در نظر داشت که این نتایج برای ساختگاهی با شرایط محل مطالعه شده صدق می‌کند و کاربرد آن برای سایر خاک‌ها و در شرایط عملی باید با توجه به کلیه پارامترهای موثر و احتساب اثر مقیاس ابعادی با احتیاط و تحقیق بیشتری باشد.

۷- سپاسگزاری

از حمایت شرکت مهندسین مشاور فناوران پی آسیا در بخش ساخت و آزمایش اجزای آزمایشی، و هیات مدیره این شرکت صمیمانه قدردانی می‌شود

References

۸- منابع

1. Lawton, E. C., and Warner, B. J. 2004 Perform- ance of a group of Geopier elements loaded in compression compared to single Geopier elements and unreinforced soil. Final Rep., No. UUCVEEN 04-12, Univ. of Utah, Salt Lake City.
2. Farrell, T. and Taylor, A. 2004 Rammed Aggregate Pier Design and Construction in California; Performance, Constructability, and Economics. Structural Engineers Association of California Convention Proceedings. Placerville, CA. and liquefied behavior, *Journal Geotech. Geoenviron. Eng.*, 132(1), pp. 54-62.
3. White, D. J., Gaul, A. J., and Hoevelkamp, K. 2003 Highway applications for rammed aggregate pier in Iowa soils. Final Rep., Iowa DOT TR-443, Ames, Iowa.
4. White, D. J., and Suleiman, M. T. 2005 Design of short aggregate piers to support highway embankments.

Comparing Bearing Capacity of Rammed Aggregate Piers and Concrete Piers under Circular Rigid Footings to Change Area Replacement Ratio (a Case Stud)

B. Niroumand

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Persian Gulf University

niroumand@pgu.ac.ir

Abstract

This article compares the behavior of circular footing on rammed aggregate piers and circular footing on cast-in-place concrete piers as two types of semi-deep foundation, at small-scale on-site. Area replacement ratio (pier on circular footing), composite (circular footing-pier) stiffness modulus and the bearing capacity of circular footing-pier are three main factors to be studied. For this purpose, 18 compressive load tests were carried out in the coastal area of Bushehr port, Iran. the tests were implemented in three groups on 6 elements composed of the following circular footings: circular footings on rammed aggregate piers, circular footings on concrete piers with constant diameter and length of piers and variable diameter of circular footing. In all three groups, the diameter of circular footings was 200, 250, 300, 350, 400 and 450 mm and in two groups of circular footings on piers, nominal diameter and length of concrete piers and rammed aggregate piers were 135 and 600 mm, respectively. The site was composed of wet soil layer of low plasticity silt (ML). Underground conditions at the site were evaluated using in-situ and prevalent laboratory tests. Measurements performed in the site were composed of applied load and top settlement in circular footings on piers and pier's bottom settlement. The results show that for the area replacement ratios greater than 20%, the average stiffness modulus of circular footing -concrete pier and circular footing- RAPs are obtained to be 1.6 and 1.3 of the average stiffness modulus of circular footings, respectively. Also, for the area replacement ratios (pier/circular footing) less than 20%, the use of cast-in-place concrete piers or rammed aggregate piers has no effect on the stiffness modulus and bearing capacity of circular footing on piers. In general, the comparison of load tests results on circular footings on concrete piers and rammed aggregate piers and two types of piers shows that the performance of them is desirable in practice. Based on the results obtained in this study and the previous research by the author in 2015 at the same site, the bearing capacity and stiffness modulus of concrete piers and circular footing on concrete piers are relatively greater than that of rammed aggregate piers type. However, it is unclear whether such result occur in the case of other local soil types, layering and technical characteristics. On the other hand, as for the diameter and length of the trial piers, tip stress (against bulging) was governed on two types of piers and circular footing on piers. While, it is not clear with the occurrence of bulging deformation on the top of pier and the effect of circular footing on it, whether such outcome would be repeated or not. Since very little research has been carried out in this field, to be able to choose any one of these systems in practice, more research should be carried out in this field. In this regard, conducting a case study with fewer loading tests and numerical modeling with validation of results can significantly help to reduce the cost and duration of initial studies, the prediction of results and to choose a suitable system.

KeyWords: rammed aggregate piers; soil improvement; bearing capacity; stiffness modulus; the area replacement ratio; circular footing