

مطالعه‌ی میدانی مقایسه‌ی رفتار پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با پایه‌های بتنی در جاریز تحت بارگذاری فشاری

بهمن نیرومند (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۴)
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۲/۳، ص. ۶۵-۵۹

در این مطالعه، رفتار پایه‌های بتنی درجا و پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی کوتاه به عنوان دو نوع پی نیمه عمیق با مقیاس کوچک در محل به صورت مقایسه‌یی بررسی شده‌اند. به همین منظور، دو گروه پایه‌های آزمایشی منفرد با قطر ثابت و طول‌های مختلف در محل، ساخته و آزمایش شده‌اند. محل انجام آزمایش‌ها، منطقه‌ی ویژه‌ی اقتصادی بوشهر و ناحیه‌ی آزمایشی شامل یک لایه لای مرطوب به ضخامت ۱ متر بر روی رس آبرفتی اشباع بوده است. نتایج نشان داده‌اند تا مادامی که انتهای پایه‌های بتنی به لایه‌ی نرم‌تر زیرین نزدیک یا وارد نشده‌اند، بار حد طراحی و مدول سختی بیشتری در مقایسه با پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی دارند. همچنین براساس این نتایج، نشست بالای پایه‌های بتنی در حد طراحی بیشتر از مقادیر نظیر در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی است.

واژگان کلیدی: پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی، پایه‌های بتنی درجا، بهسازی خاک، بار حد طراحی، نشست، مدول سختی، انتقال بار.

bahman_ni@yahoo.com

۱. مقدمه

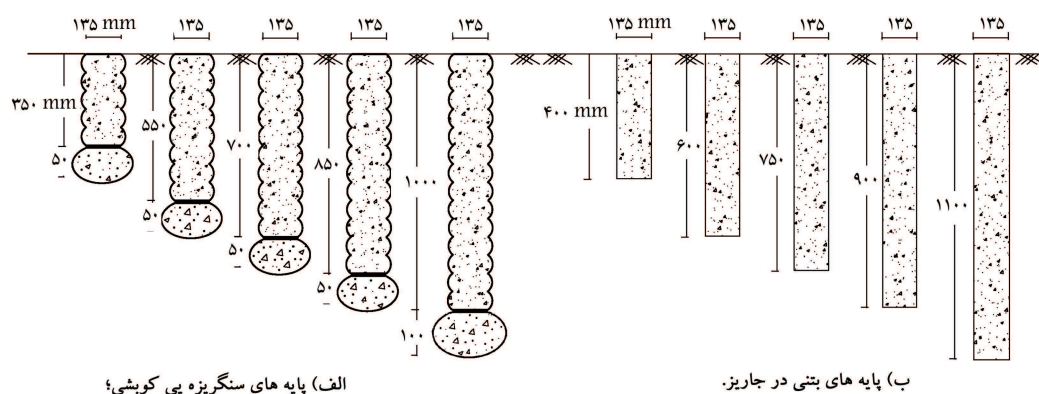
با کوبه‌ی مخصوص ساخته می‌شوند.^[۳] روش‌های طراحی پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی مشتمل بر مفاهیم به دست آمده از طراحی پی‌های سطحی مرسوم، طراحی تقویت خاک توسط ستون‌های سنگی، و طراحی پایه‌های بتنی در جاریز است.^[۴] جزئیات طرح و ساخت پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی در قالب یک گزارش پژوهشی انجام شده توسط این نویسنده و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشکده‌ی حمل و نقل ارائه شده است.^[۵] نتایج ارائه شده مربوط به پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی در این نوشتار، بخشی از نتایج به دست آمده در پروژه‌ی پژوهشی مذکور است. همچنین، نتایج ارائه شده‌ی مربوط به پایه‌های بتنی در جاریز در این نوشتار، بخشی از نتایج به دست آمده در ادامه‌ی این کار پژوهشی است. روند ساخت پایه‌های بتنی در جاریز شامل دو مرحله‌ی حفاری چاه و پرکردن چاه با بتن است. در این زمینه، مروری بر ادبیات موضوع ارائه شده توسط پژوهشگران پیشین نشان می‌دهد که مقایسه‌ی رفتار این دو نوع پی نیمه عمیق کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. به همین منظور، دو گروه پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و پایه‌های بتنی در جاریز با قطر ۱۳۵ میلی‌متر و طول‌های ۴۰۰، ۶۰۰، ۷۵۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ میلی‌متر در خاک‌های نرم ساحلی منطقه‌ی ویژه‌ی اقتصادی بندر بوشهر واقع در جنوب ایران ساخته شدند و تحت آزمایش بارگذاری قرار گرفتند.

شرایط تحت‌الارض در ساختگاه با استفاده از آزمایش‌های درجا و آزمایش‌های آزمایشگاهی متعارف ارزیابی شدند. اندازه‌گیری‌های انجام شده در ساختگاه مختص به بار اعمالی، نشست بالا و نشست انتهای پایه‌ها بوده است. بار انتقالی به انتهای پایه‌ها با استفاده از نشست اندازه‌گیری شده‌ی انتهای پایه‌ها و منحنی بار - نشست

طی دو دهه‌ی اخیر، با توسعه‌ی شهرنشینی و افزایش نرخ استفاده از اراضی نامرغوب در حاشیه‌ی شهرها، تمایل به استفاده از روش‌های مختلف بهسازی خاک در فضای حرفه‌یی و انجام پژوهش‌های کاربردی در این زمینه بیشتر شده است. استفاده از پی‌های نیمه عمیق در محل‌هایی با سیستم خاک دو لایه و استقرار خاک ضعیف با ضخامت کم بر روی خاک قوی، یک گزینه‌ی اقتصادی برای تقویت خاک به شمار می‌رود. با این وجود، رفتار این نوع پی‌ها در سیستم خاک دو لایه و استقرار خاک قوی با ضخامت کم بر روی خاک ضعیف، کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. عملکردهای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و پایه‌های بتنی در جاریز با طول کوتاه به عنوان پی‌های نیمه عمیق، شامل افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی‌های سطحی و بسترهای نرم زیر دیوارهای خاک مسلح و خاکریزها، تثبیت شیب‌های خاکی و کنترل زمین لغزه و کاهش پتانسیل روانگرایی خاک است. طی سال‌های اخیر از پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی (RAPs) به طور فزاینده‌یی برای کاهش نشست‌های غیریکنواخت، افزایش ظرفیت باربری و سختی بسترهای نرم در پروژه‌های مختلف حمل و نقل و ساختمان‌سازی استفاده شده است.^[۵-۱] روند ساخت پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس واقعی شامل سه مرحله‌ی حفاری چاه، ایجاد حباب مقاوم انتهایی و اجرای میله‌ی پایه است. حباب مقاوم انتهایی توسط یک یا دو لایه شن با دانه‌بندی یکنواخت و میله‌ی پایه توسط لایه‌هایی از شن خوب دانه‌بندی شده به ضخامت ۰/۳ متر و کوبیدن هر لایه با چکش هیدرولیکی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۵/۷، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱/۱۸، پذیرش ۱۳۹۳/۱/۳۰



الف) پایه های سنگریزه یی کوبشی؛

ب) پایه های بتنی در جاریز.

شکل ۱. جزئیات اندازه‌گذاری شده‌ی پایه‌های آزمایشی.

است. شکل ۲، تصویر سیستم متحرک گاری و ریل‌ها روی مسیر آماده‌سازی شده را نشان می‌دهد. سیستم اندازه‌گیری داده‌ها در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی مختص به بار و نشست بالای پایه و نشست انتهایی پایه و در پایه‌های بتنی مختص به بار و نشست بالای پایه بوده است. علاوه بر این، قطر حفرة پس از حفاری و پس از ساخت پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و ضخامت لایه‌های سنگریزه‌یی در هر مرحله از کوبش اندازه‌گیری شده است. شکل ۳، جزئیات سیستم‌های بارگذاری و اندازه‌گیری بار و نشست در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و پایه‌های بتنی در جاریز را به طور شماتیک

به‌دست‌آمده از آزمایش بارگذاری روی حباب مقاوم انتهایی پایه تعیین شده‌اند. در این نوشتار، مقادیر بار حد طراحی، نشست بالای پایه در حد طراحی، نسبت بار انتها به بار اعمالی در بالای پایه در حد طراحی و مدول سختی پایه در دو نوع پی نیمه‌عمیق با یکدیگر مقایسه شده‌اند. علاوه بر این، نتایج ارزیابی قابلیت و میزان دقت راه‌حل‌های تحلیلی موجود در تخمین مشخصه‌های نظیر حد طراحی پایه‌های آزمایشی ارائه شده‌اند.

۲. ساخت و ابزارگذاری پایه‌ها

طی این پژوهش، ۵ پایه‌ی منفرد بتنی در جاریز با قطر ثابت ۱۳۵ میلی‌متر و طول‌های ۴۰۰، ۶۰۰، ۷۵۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده است. ساخت این پایه‌ها توسط حفاری محل پایه‌ها و بتن‌ریزی درون حفرة، بدون هیچ‌گونه تراکم خاک محیطی پایه‌ها انجام شده است. نحوه‌ی ساخت ۵ حفرة با حباب سنگریزه‌یی مقاوم انتهایی و ۵ پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی منفرد با قطر ثابت ۱۳۵ میلی‌متر و طول‌های ۴۰۰، ۶۰۰، ۷۵۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ میلی‌متر نیز به خوبی در مراجع^[۸،۷] تشریح شده‌اند. شکل ۱، جزئیات اندازه‌گذاری پایه‌های آزمایشی را در هر دو گروه پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و پایه‌های بتنی در جاریز نشان می‌دهد.

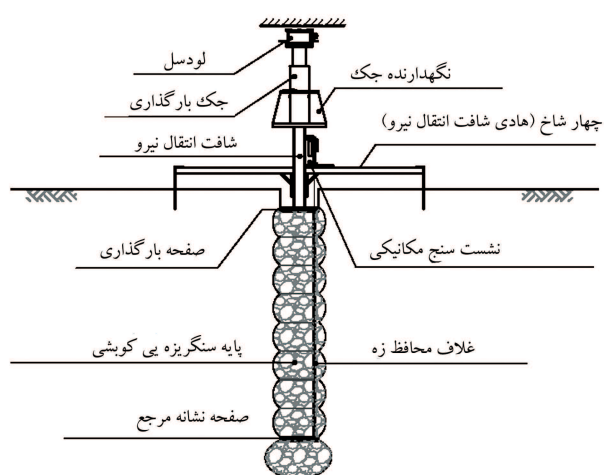
فاصله‌ی پایه‌ها طوری در نظر گرفته شده بود که پایه‌های مجاور تأثیری در یکدیگر نداشته باشند.^[۱۰،۹] اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در این آزمایش، مختص به بار وارده در بالای پایه (P_t)، نشست بالای پایه (δ_t) و نشست انتهایی پایه (δ_b) در زمان‌های مشخص بوده است. به همین منظور، در فاصله‌ی بین حباب انتهایی و پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی، صفحه‌ی دایره‌یی از جنس تفلون هم قطر حفرة با ضخامت ۱ سانتی‌متر قرار گرفت و توسط یک زه به نشست‌سنج مکانیکی در سطح زمین متصل و برای حرکت آزاد زه از یک غلاف با قطر ۱۲ میلی‌متر استفاده شد.^[۸]

۳. سیستم بارگذاری و اندازه‌گیری

در این پژوهش، برای بارگذاری پایه‌های آزمایشی از ایده‌ی سیستم تیر واکنشی متحرک به‌صورت 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 بوده است. در این سیستم از ۴ ریل ۶ متری، که متناسب با پیش‌روی گاری به سمت جلو جابه‌جا می‌شدند، استفاده شده



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



شکل ۳. جزئیات شماتیک سیستم‌های بارگذاری و اندازه‌گیری بار و نشست در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و پایه‌های بتنی در جاریز.

جدول ۱. خلاصه‌ی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاک در محل آزمایش.

ردیف	سیستم طبقه‌بندی خاک (USCS)	محدوده‌ی عمق (m)	SPT N	خصوصیات خاک				
				γ_{wet} (kN/m ³)	ω (%)	C' (kPa)	φ' (deg.)	C_u (kPa)
۱	FL	۰-۰/۱۵		۱۷-۱۸/۹	۲۷/۴-۳۰/۷	۱-۲**	۲۵**	۱۸-۷۵***
۲	ML	۰/۱۵-۱/۱۵	۱۴-۱۶*	۱۶/۴	۵۵/۵	۵	۲۰	۷
۳	CL	۱/۱۵-۲/۵۵	۵-۷	۱۸/۳	۳۶/۸	۵	۲۳	۱۴
۴	CL	۲/۵۵-۴/۱۵	۸-۱۲					

* آزمایش نفوذ استاندارد؛ ** آزمایش برش مستقیم در حالت زه‌کشی شده؛ *** آزمایش مقاومت فشاری تک محوری.

نشان می‌دهد. برای اعمال نیروی فشاری به پایه‌های آزمایشی از یک جک به ظرفیت ۳۰ تن و فاصله‌ی حرکتی ۱۰۰ میلی‌متر و به منظور اندازه‌گیری نیرو از یک لودسل به ظرفیت ۱۰ تن و دقت ۰/۵ کیلوگرم نیرو در حد فاصل بالای پیستون جک و زیر تکیه‌گاه گاری استفاده شده است. برای اعمال بار به صورت محوری و حفظ بار در موقعیت مشخص و جلوگیری از انحراف بار در حین بارگذاری، قطعه‌ی چهارشاخ، طراحی و ساخته شده است. چهارشاخ در مرکز خود، یک استوانه‌ی فولادی به قطر داخلی ۵۲ میلی‌متر و طول ۲۰۰ میلی‌متر داشت که با عبور شافت انتقال نیرو از داخل آن، به شافت اجازه‌ی انحراف در حین بارگذاری داده نمی‌شد. در عمل پس از استقرار صفحه‌ی بارگذاری روی پایه و اتصال شافت انتقال نیرو به آن، قطعه‌ی چهارشاخ با عبور شافت انتقال نیرو از داخل استوانه‌ی هادی شافت، به واسطه‌ی چهار خار انتهایی به داخل زمین کوبیده و تراز شده است.

طراحی سیستم بارگذاری به گونه‌ی بوده است که امکان کج شدن صفحه‌ی بارگذاری در حین اعمال بار وجود نداشت. لذا جابجایی صفحه فقط از طریق یک نشست‌سنج عقربه‌ی اندازه‌گیری شده است. نشست بالای پایه توسط یک نشست‌سنج عقربه‌ی با فاصله‌ی حرکتی ۱۰۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و نشست انتهایی پایه توسط یک نشست‌سنج عقربه‌ی با فاصله‌ی حرکتی ۳۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. جزئیات بیشتر این سیستم در مراجع^{[۸]، [۷]} ارائه شده‌اند.

طراحی سیستم بارگذاری به گونه‌ی بوده است که امکان کج شدن صفحه‌ی بارگذاری در حین اعمال بار وجود نداشت. لذا جابجایی صفحه فقط از طریق یک نشست‌سنج عقربه‌ی اندازه‌گیری شده است. نشست بالای پایه توسط یک نشست‌سنج عقربه‌ی با فاصله‌ی حرکتی ۱۰۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و نشست انتهایی پایه توسط یک نشست‌سنج عقربه‌ی با فاصله‌ی حرکتی ۳۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. جزئیات بیشتر این سیستم در مراجع^{[۸]، [۷]} ارائه شده‌اند.

۴. شناسایی خاک محل

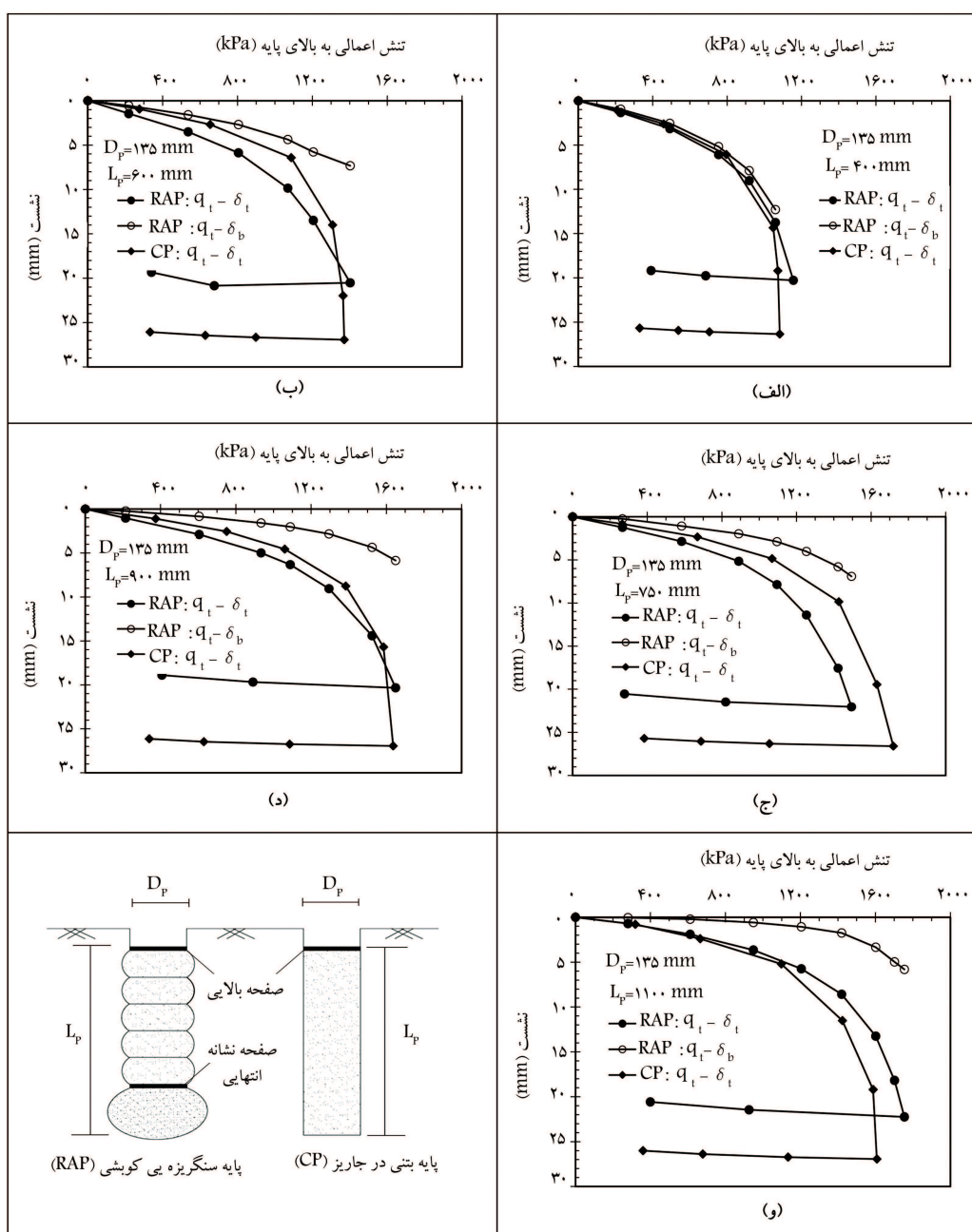
به منظور شناسایی شرایط لایه‌های خاک ناحیه‌ی آزمایشی و تعیین مقادیر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک برای انجام محاسبات ظرفیت باربری و نشست پایه‌ها، آزمایش‌های درجا و آزمایشگاهی مختلفی انجام شده و نتایج نشان داده است که در محدوده‌ی عمق تا ۴ متر پس از برداشت لایه‌ی خاک هوازده‌ی ساحلی به ضخامت ۰/۱۵ متر، ۳ لایه‌ی طبق خاک شامل: لایه‌ی نازک لای مرطوب با قوام سفت (ML) به رنگ قهوه‌ی و ضخامت ۱ متر، لایه‌ی رس نرم اشباع با قوام متوسط (CL) به رنگ زرد و ضخامت ۱/۴ متر، و لایه‌ی رس نرم 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 چگالی، طبقه‌بندی خاک، درصد رطوبت، حدود اتربرگ، تحکیم یک بعدی، مقاومت فشاری تک محوری و برش مستقیم (DST) بوده است. نتایج تعداد ضربات N در آزمایش SPT در لایه‌های CL، ML و CL به ترتیب در بازه‌های ۱۴-۱۶، ۸-۶ و ۸-۱۲ بوده است. جدول ۱، خلاصه‌ی خصوصیات

۵. نتایج آزمایش بارگذاری پایه‌ها

در این پژوهش، آزمایش بارگذاری پایه‌های آزمایشی طبق استاندارد ASTM ۱۱۴۳ D- مربوط به بارگذاری شمع‌ها و به سبک کنترل تنش انجام شده است، که در آن بارگذاری هر پایه تا رسیدن نشست بالای پایه به حد ۲۵/۴ میلی‌متر بوده است. پس از انجام آزمایش بارگذاری بر روی پایه‌های سنگریزه‌ی ساخته شده و ثبت داده‌های بار وارده در بالای پایه (P_t)، نشست بالای پایه (δ_t) و نشست انتهایی پایه (δ_b) برای هر 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 پایه‌ی سنگریزه‌ی کوبشی بوده است.^{[۲]، [۱]} به طور خاص، تغییر شکل خمربندی در قسمت فوقانی و نشست انتها، دو رفتار حاکم بر پایه‌های سنگریزه‌ی کوبشی هستند. عدم وجود خمیدگی در منحنی تنش اعمالی در بالای پایه نسبت به نشست انتهایی پایه‌ی سنگریزه‌ی پس از تنش حد طراحی، نشان دهنده‌ی وقوع تغییر شکل خمربندی در قسمت فوقانی پایه است. نشست انتهایی پایه نیز با مشاهده‌ی خمیدگی در منحنی تنش اعمالی در بالای پایه نسبت به نشست انتهایی پایه‌ی سنگریزه‌ی پس از تنش حد طراحی مشخص می‌شود.

۱.۵. تنش فشاری اعمالی در بالای پایه‌ها

در شکل ۴، منحنی‌های $q_t - \delta_t$ و $q_t - \delta_b$ اندازه‌گیری شده در پایه‌های سنگریزه‌ی کوبشی و همچنین منحنی‌های $q_t - \delta_t$ اندازه‌گیری شده در پایه‌های بتنی درجاریز برای پایه‌های به قطر اسمی ۱۳۵ میلی‌متر و طول ۴۰۰، ۶۰۰، ۷۵۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ میلی‌متر نشان داده شده است. برای ترسیم منحنی‌های $q_t - \delta_t$ و $q_t - \delta_b$ با تقسیم بار اعمالی (P_t) به سطح مقطع پایه (AP) می‌توان تنش اعمالی (q_t) را محاسبه کرد. بر مبنای نتایج ارائه شده در این شکل، تغییر شکل حاکم بر پایه‌های سنگریزه‌ی کوبشی با طول‌های مختلف، از نوع نشست انتهایی پایه است، که با افزایش طول پایه، کاهش تمایل به نشست انتها و افزایش تمایل به تغییر شکل خمربندی مشاهده می‌شود. در هر دو گروه پایه‌های آزمایشی، با افزایش طول پایه‌ها، ظرفیت باربری پایه‌ها افزایش یافته است. همچنین، در شرایط مشابه (قطر و طول مساوی) پایه‌های بتنی در مقایسه با پایه‌های سنگریزه‌ی کوبشی، ظرفیت باربری مساوی یا نسبتاً بزرگ‌تری دارند.

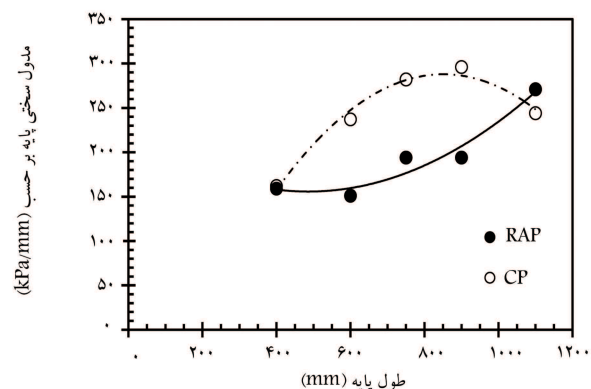
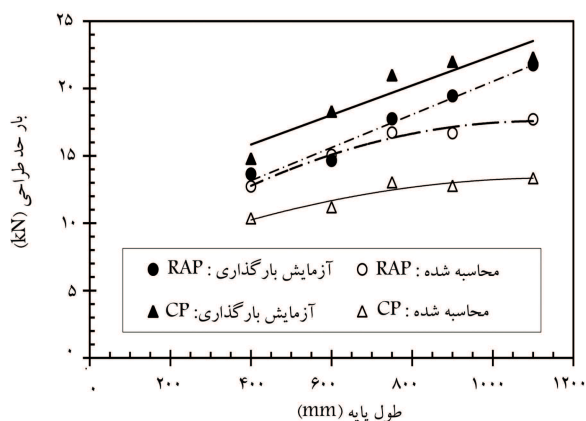


شکل ۴. منحنی‌های $q_t - \delta_t$ و $q_t - \delta_b$ اندازه‌گیری شده در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و منحنی‌های $q_t - \delta_t$ اندازه‌گیری شده در پایه‌های بتنی درجاریز برای پایه‌های به قطر اسمی ثابت ۱۳۵ میلی‌متر و طول‌های ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ میلی‌متر.

حسب طول این پایه‌ها را در دو گروه پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و پایه‌های بتنی درجاریز نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با افزایش طول پایه‌ها مدول سختی پایه‌ها، سیر صعودی دارند. در حالی که در پایه‌های بتنی در بازه‌ی طول ۴۰۰-۷۵۰ میلی‌متر، سیر صعودی دارند. در بازه‌ی طول ۹۰۰-۱۱۰۰ میلی‌متر، سیر نزولی دارند. کاهش مقادیر مدول سختی پایه‌های بتنی در بازه‌ی طول ۹۰۰-۱۱۰۰ میلی‌متر به دلیل استقرار انتهای پایه در مرز لایه‌های ML و CL و کاهش مقاومت انتهای پایه است. عدم کاهش مقادیر مدول سختی پایه‌ها در بازه‌ی طول ۹۰۰-۱۱۰۰ میلی‌متر در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی نیز به دلیل تمایل بیشتر به تغییر شکل خمربندی و انتقال بار جزئی به انتهای

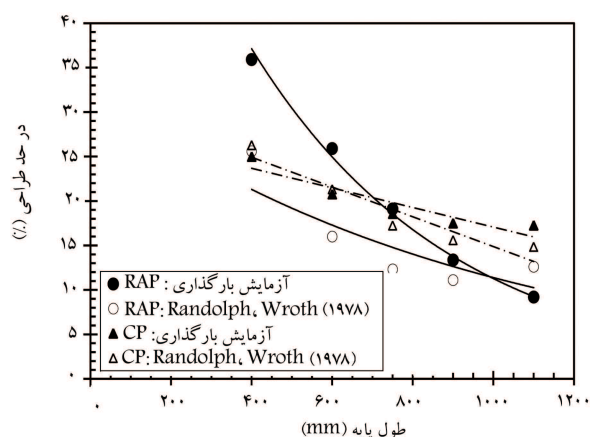
۲.۵. مدول سختی پایه‌ها

برای تعیین مدول سختی پایه‌های آزمایشی از صفحه‌ی بارگذاری فولادی با قطری برابر قطر اسمی پایه‌ها استفاده شده است. براساس NAVFAC DM-۷/۱ (۱۹۸۲) مقدار مدول سختی پایه حاصل از آزمایش بارگذاری به این صورت به دست می‌آید که پس از رسم منحنی تنش فشاری در مقابل نشست، نقطه‌ی نظیر تنش حد طراحی تعیین می‌شود. سپس تنش و نشست متناظر با نصف تنش حد طراحی مشخص می‌شود. خارج قسمت تقسیم تنش فشاری بر نشست به دست آمده مدول سختی پایه خواهد بود. شکل ۵، مقایسه‌ی نتایج مدول سختی پایه‌های آزمایشی بر



شکل ۶. مقایسه‌ی نتایج بار حد طراحی اندازه‌گیری شده و نتایج محاسبه شده بر حسب طول پایه‌ها در دو گروه پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و پایه‌های بتنی درجاریز.

شکل ۵. مقایسه‌ی نتایج مدول سختی پایه‌ها بر حسب طول پایه‌ها در دو گروه پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و پایه‌های بتنی درجاریز.



شکل ۷. مقایسه‌ی نتایج نسبت بار در حد طراحی (نسبت بار انتهای پایه به بار اعمالی در بالای پایه) اندازه‌گیری شده و نتایج محاسبه شده بر حسب طول پایه‌ها، در دو گروه پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و پایه‌های بتنی درجاریز.

این پایه‌هاست. انطباق مقادیر مدول سختی دو پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی و بتنی به ازاء طول ۴۰۰ میلی‌متر به دلیل کوتاه بودن طول پایه و حاکم بودن نشست انتها به طور کامل بر پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی است. به طور میانگین بر مبنای این نتایج، مقادیر مدول سختی پایه‌های بتنی، ۱/۲۵ برابر مقادیر نظیر در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی هستند. البته این به معنای بیشتر بودن مدول سختی مرکب بستر خاک پایه‌های بتنی نسبت به مدول سختی مرکب بستر خاک پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی نیست. چون مدول سختی توده‌ی خاک بین پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی به علت اجرای این پایه‌ها افزایش می‌یابد، در حالی که برای توده‌ی خاک بین پایه‌های بتنی افزایشی وجود ندارد.

۶. مقایسه‌ی پارامترهای اندازه‌گیری شده با پارامترهای

تحلیلی

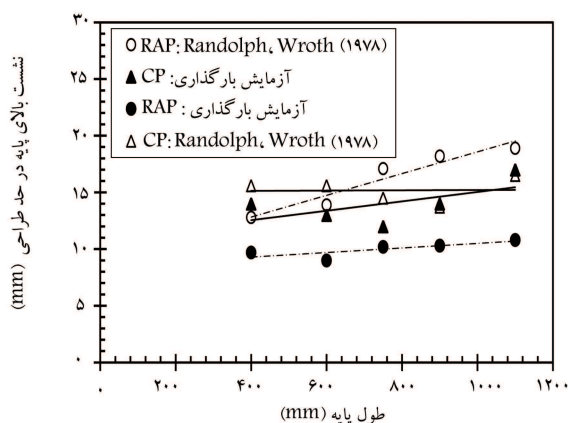
۱.۶. بار حد طراحی پایه‌ها

تغییرات بار حد طراحی (P_d) اندازه‌گیری شده و محاسبه شده بر حسب طول پایه‌های آزمایشی برای دو گروه پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و بتنی درجاریز با قطر ثابت ۱۳۵ میلی‌متر و طول‌های ۴۰۰، ۶۰۰، ۷۵۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ میلی‌متر در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. نحوه‌ی محاسبه‌ی بار حد طراحی پایه‌ها براساس تئوری‌های رایج، به خوبی در مرجع [۱۱] تشریح شده است. برای پایه‌های آزمایشی با قطر ثابت ۱۳۵ میلی‌متر و طول‌های ۳۵۰، ۵۵۰، ۷۰۰، ۸۵۰ و ۱۰۰۰ میلی‌متر بار حد طراحی اندازه‌گیری شده برای نوع سنگریزه‌یی کوبشی به ترتیب برابر ۱۳/۶۵، ۱۴/۶۵، ۱۷/۷۵، ۱۹/۴۵ و ۲۱/۷۵ کیلونیوتن و برای نوع بتنی درجاریز به ترتیب برابر ۱۴/۸۰، ۱۸/۳۰، ۲۱/۲۲ و ۲۲/۳۰ کیلونیوتن است. همچنین برای همین پایه‌ها، بار حد طراحی محاسبه شده برای نوع سنگریزه‌یی کوبشی به ترتیب برابر ۱۲/۷۳، ۱۵/۰۶، ۱۶/۷۲، ۱۶/۶۸ و ۱۷/۷۱ کیلونیوتن و برای نوع بتنی درجاریز به ترتیب برابر ۱۰/۳۶، ۱۱/۱۹، ۱۳/۰۴، ۱۳/۷۸ و ۱۳/۳۵ کیلونیوتن است. مطابق این شکل، بار حد طراحی اندازه‌گیری شده در هر دو گروه پایه‌های آزمایشی با افزایش طول پایه‌ها، روند افزایشی دارند. بار حد طراحی اندازه‌گیری شده در پایه‌های بتنی نیز به طور میانگین، ۱/۱ برابر مقدار نظیر در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی است. همچنین، بار حد طراحی محاسبه شده به طور میانگین ۹۰ و ۶۰ درصد بار حد طراحی اندازه‌گیری شده به ترتیب برای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و پایه‌های بتنی است. علت این تفاوت تا حد زیادی به افزایش

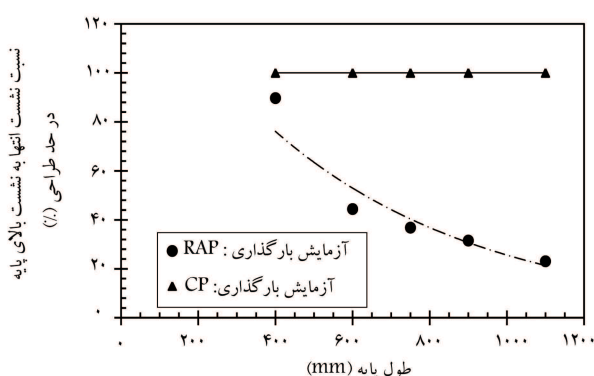
قطر پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی در حین ساخت و عدم افزایش آنها در پایه‌های بتنی مربوط است.

۲.۶. نسبت بار انتها به بار بالای پایه‌ها در حد طراحی

منحنی‌های تغییرات نسبت بار (در حد طراحی) انتها به بار اعمالی در بالای پایه‌ها (P_b/P_t) در دو حالت اندازه‌گیری شده و محاسبه شده بر حسب طول پایه‌های آزمایشی برای دو گروه پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و بتنی درجاریز با قطر ثابت ۱۳۵ میلی‌متر و طول‌های ۴۰۰، ۶۰۰، ۷۵۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ میلی‌متر در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. نحوه‌ی محاسبه‌ی بار انتقالی به انتهای پایه براساس راه حل Randolph, Wroth (۱۹۷۸)، به خوبی در مراجع [۹-۱۱] تشریح شده است. در شکل مذکور، بار اعمالی در بالای پایه‌ها در دو حالت اندازه‌گیری شده و محاسبه شده یکسان در نظر گرفته شده است. برای پایه‌های آزمایشی با قطر ثابت ۱۳۵ میلی‌متر و طول‌های ۳۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۸۵۰ و ۱۰۰۰ میلی‌متر نسبت بار (در حد طراحی) اندازه‌گیری شده برای نوع سنگریزه‌یی کوبشی به ترتیب برابر ۳۵/۹، ۲۵/۹، ۱۹/۱، ۱۳/۳۶ و ۹/۲ درصد و برای نوع بتنی درجاریز به ترتیب برابر ۲۵، ۲۰/۸، ۱۸/۶، ۱۷/۵ و ۱۷/۲۶ درصد است. همچنین برای همین پایه‌ها،



شکل ۸. مقایسه‌ی نتایج اندازه‌گیری‌شده‌ی نشست بالای پایه و نتایج محاسبه‌شده در حد طراحی بر حسب طول پایه‌ها در دو گروه پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و پایه‌های بتنی درجاریز.



شکل ۹. مقایسه‌ی نتایج نسبت نشست اندازه‌گیری‌شده در حد طراحی (نشست انتها به نشست بالای پایه) بر حسب طول پایه‌ها در دو گروه پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و پایه‌های بتنی درجاریز.

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور مقایسه‌ی رفتار پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با پایه‌های بتنی درجاریز تحت بارگذاری فشاری، نتایج آزمایش بارگذاری ۵ پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی با ۵ پایه‌ی بتنی درجاریز با قطر ۱۳۵ میلی‌متر و طول‌های ۴۰۰، ۶۰۰، ۷۵۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ میلی‌متر در یک خاک دولایه مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه به‌طور خلاصه عبارت‌اند از:

- مقادیر مدول سختی پایه‌های بتنی به‌طور میانگین، ۱/۲۵ برابر مقادیر نظیر در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی است. چنانچه طول پایه خیلی کوتاه یا انتهای پایه‌ی بتنی روی خاک ضعیف قرارگیرد، مدول سختی پایه‌ی بتنی می‌تواند برابر یا کمتر از مقدار نظیر در پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی باشد. البته این به معنای بیشتر بودن مدول سختی مرکب بستر خاک پایه‌های بتنی نسبت به مدول سختی مرکب بستر خاک پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی نیست.
- بار حد طراحی اندازه‌گیری‌شده در پایه‌های بتنی به‌طور میانگین، ۱/۸ برابر مقدار نظیر در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی است.

نسبت بار (در حد طراحی) محاسبه‌شده برای نوع سنگریزه‌یی کوبشی به ترتیب برابر ۲۵/۶، ۱۶، ۱۲/۳، ۱۱/۱ و ۱۲/۶ درصد و برای نوع بتنی درجاریز به ترتیب برابر ۲۶/۳، ۲۱/۳، ۱۷/۲، ۱۵/۶ و ۱۴/۸ درصد است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، به ازاء طول پایه‌های کمتر از ۷۰۰ میلی‌متر میزان انتقال بار به انتهای پایه در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی بیشتر از پایه‌های بتنی و به ازاء طول پایه‌های بیشتر از ۷۰۰ میلی‌متر، برعکس است. این مسئله در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی می‌تواند به علت تمایل پایه‌های با طول بلند به تغییر شکل خمربندی در قسمت فوقانی پایه و انتقال کم بار به انتهای پایه باشد. به عبارت دیگر، با افزایش طول پایه‌ها میزان کاهش نسبت بار در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی در مقایسه با پایه‌های بتنی بیشتر است. همچنین بر پایه‌ی این مشاهده‌ها، برای پایه‌های بتنی در مقایسه با پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی، نسبت‌های بار محاسبه‌شده بر مبنای راه حل Randolph, Wroth با نسبت‌های بار اندازه‌گیری‌شده انطباق بسیار خوبی را نشان می‌دهند.

۳.۶. نشست حد طراحی در بالای پایه‌ها

تغییرات اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده‌ی نشست حد طراحی (δ_d) بر حسب طول پایه‌های آزمایشی برای دو گروه پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و بتنی درجاریز با قطر ثابت ۱۳۵ میلی‌متر و طول‌های ۴۰۰، ۶۰۰، ۷۵۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ میلی‌متر در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. نحوه‌ی محاسبه‌ی بار انتقالی به انتهای پایه براساس راه حل Randolph, Wroth (۱۹۷۸)، به خوبی در مراجع [۹-۱۱] تشریح شده است. برای پایه‌های آزمایشی با قطر ثابت ۱۳۵ میلی‌متر و طول‌های ۳۵۰، ۵۵۰، ۷۵۰، ۸۵۰ و ۱۰۰۰ میلی‌متر، نشست اندازه‌گیری‌شده‌ی بالای پایه (در حد طراحی) برای نوع سنگریزه‌یی کوبشی در بازه‌ی ۹-۱۰/۸ میلی‌متر و برای نوع بتنی درجاریز در بازه‌ی ۱۷-۱۲ میلی‌متر است. همچنین برای همین پایه‌ها، نشست محاسبه‌شده‌ی بالای پایه برای نوع سنگریزه‌یی کوبشی در بازه‌ی ۱۸/۹-۱۲/۸ میلی‌متر و برای نوع بتنی درجاریز در بازه‌ی ۱۶/۵-۱۳/۷ میلی‌متر است. بر مبنای این نتایج و به‌طور میانگین، نشست بالای پایه‌های بتنی در حد طراحی، ۱/۴ برابر مقادیر نظیر در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی هستند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، برای پایه‌های بتنی در مقایسه با پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی، نشست محاسبه‌شده در بالای پایه بر مبنای راه حل Randolph, Wroth با نشست نظیر اندازه‌گیری‌شده انطباق نسبتاً خوبی را نشان می‌دهند.

۴.۶. نسبت نشست انتها به نشست بالای پایه‌ها در حد طراحی

شکل ۹، مقایسه‌ی نتایج نسبت اندازه‌گیری‌شده‌ی نشست در حد طراحی (نشست انتها به نشست بالای پایه) بر حسب طول پایه‌ها را برای دو گروه پایه‌های آزمایشی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در پایه‌های بتنی به علت صلب بودن این پایه‌ها، نسبت نشست انتها به نشست بالای پایه‌ها برابر ۱ است. این در حالی است که در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی این نسبت نشست در حد طراحی برای پایه‌های با طول ۴۰۰، ۶۰۰، ۷۵۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ میلی‌متر به ترتیب برابر ۸۹/۷، ۴۴/۴، ۳۶/۸، ۳۱/۵ و ۲۳/۱ درصد است. این به وضوح مزیت پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی را نسبت به پایه‌های بتنی در خاک دولایه (خاک قوی روی خاک ضعیف) نشان می‌دهد.

- انتهای به بار بالای پایه) محاسبه شده بر مبنای راه حل Randolph, Wroth با نسبت های بار اندازه گیری شده انطباق بهتری را نشان می دهد.
- در استفاده از نتایج این مطالعه باید در نظر داشت که این نتایج برای ساخت گاهی با شرایط محل مطالعه شده صدق می کند و کاربرد آن برای سایر خاک ها قابل تعمیم نیست و باید با احتیاط و مطالعه ی بیشتری باشد.
- نشست بالای پایه های بتنی در حد طراحی به طور میانگین، ۱/۴ برابر مقادیر نظیر در پایه های سنگریزه یی کوبشی است.
- در مقایسه با پایه های سنگریزه یی کوبشی، نشست محاسبه شده در بالای پایه های بتنی بر مبنای راه حل Randolph, Wroth با نشست نظیر اندازه گیری شده، انطباق بهتری را نشان می دهد.
- در پایه های کوتاه (نسبت لاغری کمتر از ۵)، میزان انتقال بار به انتهای پایه در پایه های سنگریزه یی کوبشی، بیشتر از پایه های بتنی و در پایه های بلند برعکس است. همچنین، با افزایش طول پایه ها میزان کاهش نسبت بار در پایه های سنگریزه یی کوبشی در مقایسه با پایه های بتنی بیشتر است.
- در پایه های بتنی در مقایسه با پایه های سنگریزه یی کوبشی، نسبت های بار (بار

تقدیر و تشکر

به جهت حمایت شرکت مهندسان مشاور فناوری پی آسیا در بخش ساخت و آزمایش پایه های بتنی در جازین، از هیأت مدیره ی این شرکت صمیمانه قدردانی می شود.

منابع (References)

1. Lawton, E.C. and Warner, B.J. "Performance of a group of Geopier elements loaded in compression compared to single Geopier elements and unreinforced soil", Final Rep., Rep. No. UUCVEE N 04-12, Univ. of Utah, Salt Lake City (2004).
2. Farrell, T. and Taylor, A. "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. Engineering*, **132**(1), pp. 54-62 (2004).
3. White, D.J., Gaul, A.J. and Hoevelkamp, K. "Highway applications for rammed aggregate pier in Iowa soils", Final Rep., Iowa DOT TR-443, Ames, Iowa (2003).
4. White, D.J. and Suleiman, M.T. "Design of short aggregate piers to support highway embankments", *Transportation Research Record* 1868, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 103-112 (2005).
5. Lawton, E.C. and Fox, N.S. "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*, **2**(40), pp. 962-974 (1994).
6. Wissmann, K.J., Shields, C.S. and FitzPatrick, B.T. "Modulus load test results for rammed aggregate piersTM in granular soils", *Journal Geotech. Geoenviron. Eng.*, **124**, pp. 460-472 (2004).
7. Razeghi, H.R., Niroumand, B., Ghiassian, H. and Mansourzadeh, M. "A field study on the behavior of single rammed aggregate piers toward changes the diameter", *Sharif Journal, Civil Eng.*, **282**(4), pp. 95-103 (2012).
8. Razeghi, H.R., Niroumand, B. and Ghiassian, H. "A field study of the behavior of small-scale single rammed aggregate piers, testing methodology, interpretation", *Scintia Iranica*, **18**(6), pp. 1198-1206 (December 2011).
9. Suleiman, M.T. and White, D.J. "Load transfer in rammed aggregate piers", *International Journal of Geomechanics*, **6**(6), pp. 389-398 (December 2006).
10. Randolph, M.F. and Wroth, C.P. "Analysis of deformation of vertically loaded piles", *J. Geotech. Eng. Div.*, **104**(12), pp. 1465-1488 (1978).
11. Razeghi, H.R., Niroumand, B., Ghiassian, H. and Mansourzadeh, M. "Comparison of experimental and analytical results in rammed aggregate piers with variable diameters", *Transportation Research Journal*, **1**, pp. 75-88 (2011).