مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۹۱-۹۹، (یادداشت فنی)

Research Note

تحلیل نتایج آزمایش بارگذاری پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی در خاک‌های چسبنده

بهمن نیروه‌مند (استادیار)
گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس

این نوشتار به تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش بارگذاری انجام‌شده بر روی ۳۰ پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی اجراشده با مقیاس واقعی در ایالت‌های مختلف آمریکا و ۱۲ پایه با مقیاس متوسط در ایران پرداخته است. پارامترهای مورد مطالعه شامل: قطر پایه، طول پایه، نسبت لاغری پایه، مدول ارتجاعی زمین، مدول ارتجاعی پایه، تنش و نشست بالای پایه در حد طراحی، و مدول سختی پایه هستند. نتایج تحلیل نشان می‌دهند که میانگین نشست بالای پایه‌ها می‌تواند مبنای نسبتاً خوبی برای تخمین مدول سختی و طراحی اولیه‌ی این پایه‌ها باشد. در این پژوهش، با احتساب پارامترهای مؤثر در تخمین نشست بالای پایه و براساس رگرسیون انجام‌شده بر روی داده‌های موجود، معادله‌یی به‌دست آمده است که انطباق بسیار خوبی را بین نتایج محاسبه‌شده و نتایج واقعی نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی، نشست پایه، تنش حد طراحی، مدول سختی پایه، آزمایش بارگذاری پایه.

bahman_ni@yahoo.com

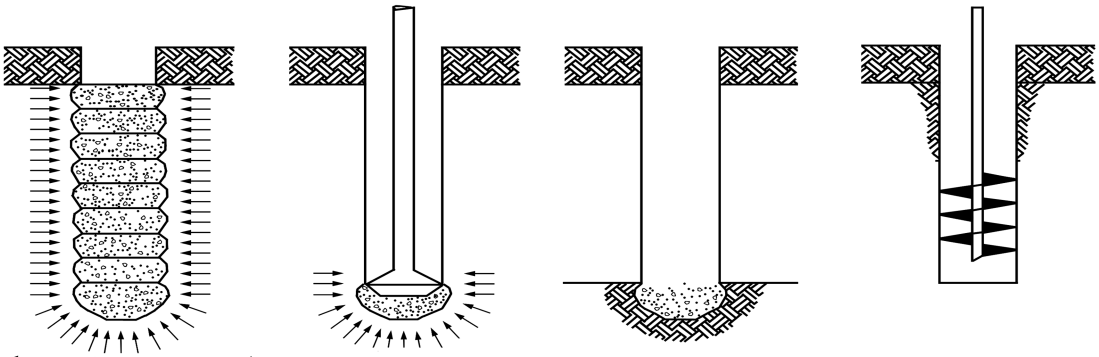
۱. مقدمه

همچنان که رشد جمعیت جهان رو به فزونی است، احتیاج به اراضی حاشیه‌یی یا خاک‌های نامناسب نیز در حال افزایش است. طی دو دهه‌ی اخیر، کاربرد پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی به‌عنوان یک گزینه‌ی پی اقتصادی در حال توسعه بوده است. سیستم پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی کوتاه، یکی از روش‌های تقویت خاک‌های نرم و سُست است، که با استفاده از آن می‌توان ضمن افزایش ظرفیت باربری و سختی بستر خاک، نشست‌های کلی و اختلاف نشست‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش داد. طراحی پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی کوتاه تا حد زیادی برگرفته از مفاهیم طراحی پایه‌های سنگریزه‌یی مرسوم، پی‌های سطحی و پایه‌های بتنی ساخته‌شده در محل است.[۱] علی‌رغم ظاهر مشابه پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی کوتاه با پایه‌های سنگریزه‌یی مرسوم، محصول به‌دست‌آمده در سیستم جدید به دلیل تفاوت در روش ساخت، متفاوت و عملکردی بهتر از پایه‌های سنگریزه‌یی مرسوم دارد. روش طراحی و عملکرد پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی به خوبی توسط نویسندگان مختلف در مقالات ارائه شده‌اند.[۲-۴] علاوه بر این، در پژوهشی در سال ۱۹۷۸، به منظور تعیین نشست و بار قائم شمع‌ها به‌صورت تابعی از عمق، یک راه حل تقریبی ارائه شده است.[۵] در سال ۲۰۰۶ نیز، از روش اخیر به منظور تخمین بار و نشست پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی کوتاه استفاده و راه حل دیگری برای تخمین نشست بالای پایه و نسبت تنش قائم انتها به تنش قائم بالای پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی کوتاه ارائه شده است.[۶] علی‌رغم استفاده از پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی کوتاه طی سال‌های اخیر، هنوز روش‌های تحلیلی به خوبی توسعه نیافته‌اند. در حال حاضر روش‌های ذکرشده،[۵و۶] گزینه‌هایی هستند که میزان دقت آنها نیاز به پژوهش بیشتری دارد. اولین ارزیابی دقت روش‌های تحلیلی ذکرشده، در محاسبه‌ی پارامترهای حد طراحی پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی در یک پروژه‌ی تحقیقاتی در سال ۲۰۱۱ انجام شده است.[۷] در این نوشتار، نتایج آزمایش بارگذاری انجام‌شده طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۷ بر روی ۳۰ پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی اجراشده در خاک‌های ریزدانه با مقیاس واقعی در پروژه‌های مختلف ساختمانی از ایالت‌های مختلف آمریکا مورد مطالعه قرار داده شده‌اند.[۶-۸و۱۰] علاوه بر این، از نتایج آزمایش بارگذاری انجام‌شده در سال ۲۰۱۱ بر روی ۱۲ پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس متوسط اجراشده در خاک‌های ریزدانه در محل، در یک پروژه‌ی تحقیقاتی در ایران استفاده شده است.[۷و۱۱و۱۲] برای تهیه‌ی یک اطلاعات پایه از عملکرد پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی بر حسب ویژگی‌های خاک محیطی و پارامترهای مؤثر پایه‌ها، از داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده در محل‌های مختلف استفاده شده است.

۲. ساختمان پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی

Fox و Cowell در سال ۱۹۹۸، جزئیات روند اجرای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی کوتاه را ارائه کرده‌اند.[۱۳و۱۴] ساختمان این پایه‌ها همان‌طورکه در شکل ۱ نشان داده شده است، از طریق: الف) حفر چاه‌هایی با قطر ۶۰ تا ۹۰ سانتی‌متر و معمولاً با

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۶/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۳/۴/۳۰، پذیرش ۱۳۹۳/۵/۲۶.



الف) حفر چاه معمولا قطر چاه برابر ۷۵ cm و قطر بدنه ی پایه برابر ۹۰ cm است؛

ب) ایجاد حباب انتهایی مقاوم، شامل ریختن سنگ دانه های شکسته با اندازه ی ۷/۵-۵ cm درون حباب تحتانی؛

ج) کوبیدن لایه ی سنگریزه یی درون حباب انتهای پایه؛

د) ایجاد بدنه ی پایه شامل ریختن و کوبیدن سنگ دانه های شکسته با اندازه ی بین ۴-۲ cm (مصالح اساس جاده) به طور متوالی در لایه هایی به ضخامت ۳۰ cm و کمتر.

شکل ۱. فرایند ساخت پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی کوتاه.[۱۳و۱۴]

عمق ۲ تا ۷ متر در زمین شروع می‌شود؛ ب) سپس به منظور ایجاد حباب انتهایی مقاوم، یک لایه سنگریزه‌ی شکسته‌شده با دانه‌بندی یکنواخت به انتهای چاه ریخته می‌شود؛ ج) توسط یک کوبه‌ی پخ‌دار که به این منظور طراحی شده است، با انرژی بالا کوبیده می‌شود؛ د) لایه‌های سنگریزه‌یی خوب دانه‌بندی‌شده به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر درون چاه ریخته و به منظور تشکیل بدنه‌ی پایه، با کوبه‌ی پخ‌دار استاندارد کوبیده می‌شود. در خاک‌های ضعیف، حجم قابل توجهی از خاک‌های درشت‌دانه باید کوبیده شوند، تا پیاز تحتانی[1] را تثبیت کنند.

همان‌طور که قبلاً اشاره شده است، برای کوبیدن لایه‌های سنگریزه‌یی از یک کوبه‌ی ضربه‌یی با بسامد نسبتاً بالا (حدود ۴۰۰ ضربه در دقیقه) و سر پخ‌دار با زاویه‌ی ۴۵ درجه، که به‌صورت خاص طراحی شده است، استفاده شده است. شکل پخ‌دار سر چکش باعث فرورفتن سنگ‌های شکسته به‌صورت شعاعی در دیواره‌ی خاکی و توسعه‌ی قطر پایه می‌شود، که به موجب آن تنش‌های افقی و قائم در بلوک خاک محیطی دور پایه افزایش می‌یابند. در حین این فرایند، قطر پایه تقریباً به اندازه‌ی ۷۶ میلی‌متر (۳ اینچ) بیش از قطر اسمی چاه می‌شود. نتیجه‌ی این فرایند، یک پایه‌ی سخت فوق‌العاده متراکم با زاویه‌ی اصطکاک داخلی بالا و توسعه‌ی تنش جانبی بالا در خاک محیطی دور پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی کوتاه است. همچنین مقاومت و سختی توده‌ی خاک در فاصله‌یی بیش از یک قطر پایه از لبه‌ی حفاری افزایش می‌یابد.[۸]

در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس متوسط مورد مطالعه در این پژوهش، حباب مقاوم انتهایی پایه‌ها با استفاده از شن با دانه‌بندی یکنواخت و بیشینه‌ی اندازه‌ی ۲۲ میلی‌متر و میله‌ی پایه‌ها از شن و ماسه‌ی خوب دانه‌بندی‌شده ساخته شده‌اند. مخلوط شن و ماسه در این مرحله به‌طور وزنی شامل ۶۹٪ شن با اندازه‌ی بیشینه‌ی ۲۲ میلی‌متر، ۲۹٫۲٪ ماسه و ۱٫۸٪ لای مشخصات mm $D_{۱۰} = ۱٫۰۸$، $C_c = ۱٫۸۳$ و $C_u = ۹٫۶۳$ بوده است. این مخلوط در لایه‌هایی به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر ریخته و هر لایه با چکش برقی به مدت ۱۰ ثانیه کوبیده شده است. وزن چکش برقی و ملحقات آن برابر ۴۸ کیلوگرم، تعداد ضربه‌ی وارده در هر دقیقه برابر ۱۰۳۰ و انرژی اعمالی در هر ضربه برابر ۶۰ ژول بوده است. ضربات توسط یک کوبه‌ی پخ‌دار به شکل دایره از جنس فولاد به ضخامت ۲۵ تا ۴۵ میلی‌متر با قطری حدود ۲۰ میلی‌متر کمتر از قطر هر حفره، که توسط میله‌یی به چکش متصل بوده است، به لایه‌ها وارد شده است.[۷و۱۱و۱۲]

۳. روش‌های طراحی

معمولاً از پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی به‌صورت گروه در زیر پی‌های سطحی برای افزایش ظرفیت باربری مجازوکنترل نشست پی استفاده می‌شود. روش طراحی از یک راه حل نشست دو لایه‌یی استفاده می‌کند، که شامل ارزیابی نشست هر دو ناحیه‌ی خاک تقویت‌شده توسط پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی (ناحیه‌ی فوقانی) و خاک تقویت‌نشده (ناحیه‌ی تحتانی) زیر ناحیه‌ی تقویت‌شده توسط پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی است. روش طراحی ناحیه‌ی فوقانی (معادلات ۱ و ۲) توسط تعدادی از نویسندگان بیان شده اند.[۲-۴و۱۱] نشست ناحیه‌ی فوقانی با استفاده از معادله‌ی ۱ محاسبه می‌شود، که در آن، q_g تنش اعمالی به پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و k_g مدول سختی پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی هستند:

$$S_{uz} = q_g / k_g \qquad (۱)$$

تنش در بالای پایه‌ها (q_g) به فشار باربری میانگین پی صلب (q)، نسبت مساحت جانشین (R_a)، و نسبت مدول سختی بین پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی و خاک محیطی (R_s) بستگی دارد. رابطه‌ی بین پارامترهای ذکرشده با معادله‌ی ۲ نشان داده می‌شود:

$$q_g = q \left(\frac{R_g}{R_s R_a - R_a + ۱} \right) \qquad (۲)$$

نسبت مساحت جانشین (R_a)، به‌صورت نسبت مساحت مقطع پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی (A_P) به مساحت مقطع خاک محیطی (A_m) تعریف می‌شود. نسبت مدول سختی (R_s)، به‌صورت نسبت مدول سختی پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی (k_g) به مدول سختی خاک محیطی (k_m) تعریف می‌شود. بنابراین مدول سختی پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی یک پارامتر مهم است. زیرا در تعیین تنش بالای پایه (معادله‌ی ۲) و نشست ناحیه‌ی بالایی (معادله‌ی ۱) مؤثر است. معمولاً مدول سختی پایه‌ها در هر سایت با یک آزمایش بارگذاری قابل تعیین است.

۴. آزمایش بارگذاری پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی

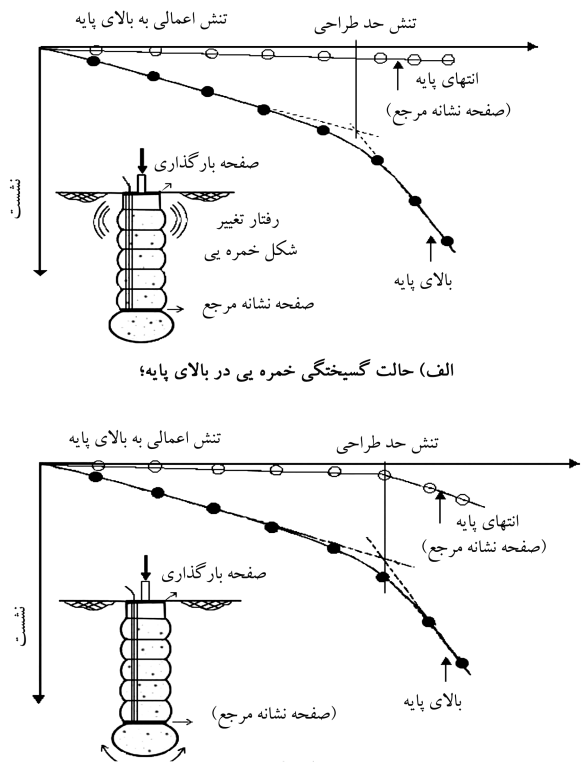
در این روش به منظور تأیید مقادیر پارامترهای انتخاب‌شده برای طراحی، آزمایش بارگذاری پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی انجام می‌شود. در خصوص روندهای کلی

آزمایش، از استاندارد ASTM D-۱۱۴۳ مربوط به بارگذاری شمع‌ها به‌عنوان راهنما جهت نحوه‌ی اعمال افزایش بار، مدت افزایش یا کاهش بار استفاده می‌شود. برای تأمین تکیه‌گاه محکم برای جک بارگذاری از روش‌های مختلف مانند تیر عکس‌العمل، زیرشاسی کامیون یا جرثقیل می‌توان استفاده کرد. معمولاً تکیه‌گاه‌های تیر عکس‌العمل می‌تواند از طریق پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی مقاوم در برابر نیروهای برکنش تأمین شود. طی این آزمایش، مقادیر بار و نشست‌های بالا و انتهای پایه در گام‌های مختلف بارگذاری ثبت می‌شوند. در پایه‌های تحت آزمایش، یک صفحه‌ی فولادی مرجع در انتهای پایه نصب می‌شود تا بدین‌وسیله تغییرمکان‌های انتهای پایه در حین بارگذاری تعیین شود. عملکرد پایه وقتی قابل قبول است، که در تنش حد طراحی، تغییرمکان انتهای پایه از ۲۰٪ تغییرمکان بالای پایه بیشتر نباشد. افزایش بار معادل ۱۱۵٪ بیشینه‌ی تنش حد طراحی در بالای پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی باید دست‌کم به مدت ۱۵ دقیقه و بیشینه‌ی ۴ ساعت حفظ شود، تا اینکه نرخ تغییرمکان به میزان ۰٫۰۲۵ سانتی‌متر بر ساعت یا کمتر کاهش یابد. به استثناء افزایش بار معادل ۱۱۵٪ بیشینه‌ی تنش حد طراحی در بالای پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی، کلیه‌ی افزایش بارها باید به میزان دست‌کم ۱۵ دقیقه و بیشینه‌ی ۱ ساعت حفظ شوند، تا اینکه نرخ تغییرمکان به ۰٫۰۲۵ سانتی‌متر بر ساعت یا کمتر کاهش یابد. به منظور جبران ناهمواری‌های موضعی سطحی، قبل از اندازه‌گیری تغییرمکان‌ها و اعمال افزایش بارها، صفحه‌ی فولادی زیر بار باید تحت بار نشیمن معادل ۵٪ بار کل قرار گیرد. در هر صورت، آزمایش پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی باید بر طبق شرایط مندرج در طرح باشد. به منظور ارزیابی مدول سختی و رفتار پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی، نمودارهای تنش در مقابل نشست تهیه می‌شوند.

۱.۴. تفسیر نتایج آزمایش بارگذاری

انجام آزمایش بارگذاری بر روی پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی این فرصت را می‌دهد که علاوه بر ارزیابی مدول سختی پایه، رفتار حاکم بر پایه نیز شناسایی شود. پس از انجام آزمایش بارگذاری بر روی پایه‌های سنگریزه‌یی ساخته‌شده، منحنی‌های $q_t - \delta_t$ و $q_t - \delta_b$ برای هر پایه در یک دستگاه مختصات دکارتی ترسیم می‌شوند. معمولاً دو قسمت ابتدایی و انتهایی منحنی $q_t - \delta_t$ در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی به‌صورت خطی است. تنش حد طراحی یک پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی متناظر با نقطه‌ی بیشینه‌ی خمیدگی یا کمینه‌ی شعاع انحناء روی منحنی $q_t - \delta_t$ در بالای پایه است. نقطه‌ی بیشینه‌ی خمیدگی مربوط به بار نقطه‌یی است که از تقاطع امتدادهای دو قسمت خطی منحنی $q_t - \delta_t$ پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی به‌دست می‌آید.

پایه به ازاء تنش‌های کمتر از تنش حد طراحی، تغییرشکل‌های برگشت‌پذیر و به ازاء تنش‌های بزرگ‌تر از تنش حد طراحی، تغییرشکل‌های برگشت‌ناپذیر را تجربه می‌کند. برای پی‌های واقع بر پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی، تنش بالای پایه‌ها به مقادیری کمتر از تنش حد طراحی محدود می‌شود. نشست‌های خاص بالا و انتهای پایه، به ازاء تنش‌های بیشتر از تنش حد طراحی، نشان‌گر مکانیزم تغییرشکل حاکم در پایه هستند. شکل ۲، رفتار تنش ـ نشست و نحوه‌ی تعیین تنش حد طراحی پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی را در دو حالت: الف) تغییرشکل خمره‌یی، ب) نشست انتها، نشان می‌دهد. مطابق شکل ۲الف، عدم وجود خمیدگی در منحنی تنش اعمالی در بالای پایه نسبت به نشست انتهای پایه‌ی سنگریزه‌یی پس از تنش حد طراحی، نشان‌دهنده‌ی وقوع تغییرشکل خمره‌یی در قسمت فوقانی پایه است. معمولاً رفتار خمره‌یی در خاک‌های چسبنده‌ی نرم، جایی که مقاومت در برابر ایجاد تغییرشکل خمره‌یی پایین است، یا در خاک‌های دانه‌یی با طول‌های بلند پایه، جایی



الف) حالت گسیختگی خمره یی در بالای پایه؛

ب) حالت گسیختگی برشی سوراخ کننده در انتهای پایه.

شکل ۲. رفتارهای نمونه‌ی تنش ـ نشست و نحوه‌ی تعیین تنش حد طراحی پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی.

که ظرفیت باربری پایه از مقاومت خمره‌یی خاک محیطی متراکم یا سفت تجاوز می‌کند، رخ می‌دهد. در برخی موارد، تغییرشکل خمره‌یی پایه مربوط به یک لایه‌ی نرم میانی در امتداد پایه است. نشست انتهای پایه نیز با مشاهده‌ی خمیدگی در منحنی تنش اعمالی در بالای پایه نسبت به نشست انتهای پایه‌ی سنگریزه‌یی پس از تنش حد طراحی، مشخص می‌شود (شکل ۲ب). این نوع رفتار وقتی رخ می‌دهد که تنش وارده از مقاومت اصطکاکی در امتداد محیط میله‌ی پایه تجاوز کند و معمولاً برای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی کوتاه اجراشده در خاک‌های چسبنده یا دانه‌یی، که در آن مقاومت خمره‌یی از ظرفیت میله‌ی پایه‌ی کوتاه بیشتر می‌شود، رخ می‌دهد.[۱و۷]

۵. اطلاعات تاریخی

به‌طور کلی در جدول ۱، مشخصات هندسی و نتایج آزمایش بارگذاری ۳۰ پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی اجراشده در خاک‌های ریزدانه از ایالت‌های مختلف آمریکا ارائه شده است. همان‌طور که در جدول مذکور مشاهده می‌شود، خاک‌های این مناطق به‌طور عمده متشکل از لای و رس با خاصیت خمیری کم و در برخی موارد شامل ماسه‌ی لای‌دار هستند. قطر پایه‌های آزمایش‌شده در اندازه‌های ۰٫۶۰، ۰٫۷۵ و ۰٫۹۰ متر و طول این پایه‌ها در محدوده‌ی ۱٫۸-۵٫۱ متر است. نسبت لاغری (طول به قطر) پایه‌ها در محدوده‌ی ۲٫۴-۶٫۷ و مدول ارتجاعی زمین در محدوده‌ی ۲٫۵-۳۱٫۷ مگاپاسکال هستند. به همین ترتیب در جدول ۲، مشخصات هندسی و نتایج آزمایش بارگذاری ۱۲ پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی اجراشده با مقیاس متوسط در خاک‌های

جدول ۱. مشخصات هندسی و نتایج آزمایش بارگذاری بر روی پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس واقعی در پروژه‌های مختلف اجراشده در برخی از ایالت‌های آمریکا.

ردیف	نوع لایه‌ی خاک UCS	قطر اسمی پایه (D_P) (m)	طول شافت پایه (L_t) (m)	نسبت لاغری پایه (L_t/D_P)	تنش بالای پایه در حد طراحی (q_d) (kPa)	تغییرشکل بالای پایه در حد طراحی (δ_d) (mm)	مدول سختی پایه (k_P) (MN/m^3)	مدول ارتجاعی پایه (E_P) (MPa)	مدول ارتجاعی زمین (E_S) (MPa)	آزمایش SPT در زمین (N_{avg})	مرجع
۱	ML	۰٫۹۱۴	۲٫۴۰	۲٫۶۳	۱۲۶۷٫۸	۱۲٫۱	۱۰۵٫۱	۳۴۹	۸٫۶۴	۷	[۱۰]
۲	ML	۰٫۷۶۲	۱٫۸۰	۲٫۳۶	۸۴۷٫۵	۱۳٫۲	۶۴٫۱	۲۵۲	۱۰	۸	[۱۰]
۳	ML, SM	۰٫۹۱۴	۳٫۷۰	۴	۱۱۱۵٫۷	۱۱٫۶	۹۴٫۲	۱۹۹	۱۹٫۷	۱۶	[۱۰]
۴	ML, SM	۰٫۷۶۲	۲٫۱۰	۲٫۷۶	۱۲۷۵٫۵	۱۵٫۳	۸۳٫۶	۲۳۶	۱۰	۸	[۱۰]
۵	ML	۰٫۷۶۲	۲٫۴۰	۳٫۱۵	۱۰۶۷٫۷	۱۲٫۹	۸۳٫۱	۱۹۰	۱۲٫۶	۱۰	[۱۰]
۶	CL, ML	۰٫۷۶۲	۲٫۴۰	۳٫۱۵	۷۲۷٫۸	۸٫۷	۸۳٫۹	۳۰۴	۱۲٫۶	۱۰	[۱۰]
۷	CL, ML	۰٫۷۶۲	۳٫۴۰	۴٫۴۶	۱۱۵۳٫۹	۱۱٫۱	۱۰۳٫۷	۱۵۳	۱۲٫۶	۱۰	[۱۰]
۸	ML, SM	۰٫۷۶۲	۲٫۴۰	۳٫۱۵	۱۵۳۳٫۸	۱۲٫۱	۱۲۶٫۵	۲۱۵	۳۱٫۷	۳۰	[۱۰]
۹	ML, SM	۰٫۷۶۲	۲٫۴۰	۳٫۱۵	۱۲۹۲٫۸	۱۶	۸۰٫۹	۱۵۰	۱۷٫۵	۱۴	[۱۰]
۱۰	ML, SM	۰٫۷۶۲	۳	۳٫۹۴	۱۱۶۸٫۳	۱۰٫۲	۱۱۵٫۱	۱۹۴	۱۲٫۶	۱۰	[۱۰]
۱۱	ML	۰٫۹۱۴	۳٫۸۰	۴٫۱۶	۵۹۸٫۵	۱۲	۴۹٫۹	۲۰۸	۵٫۸۴	۵	[۱۰]
۱۲	ML	۰٫۹۱۴	۴٫۷۰	۵٫۱۴	۴۵۲	۹٫۲	۵۰٫۲	۱۹۹	۷٫۲۶	۶	[۱۰]
۱۳	ML	۰٫۹۱۴	۳٫۴۰	۳٫۷۲	۶۹۴٫۳	۱۱٫۶	۵۸٫۶	۲۰۱	۸٫۶۴	۷	[۱۰]
۱۴	ML, SM	۰٫۷۶۲	۲٫۴۰	۳٫۱۵	۶۳۳٫۵	۶٫۵	۹۷٫۷	۳۵۳	۱۲٫۶	۱۰	[۱۰]
۱۵	SM, ML, CL	۰٫۷۶۲	۳	۳٫۹۴	۱۱۰۱٫۲	۱۵٫۹	۶۹٫۲	۳۴۵	۱۳٫۹	۱۱	[۱۰]
۱۶	ML	۰٫۶۱۰	۲٫۱۰	۳٫۴۴	۸۱۷	۶٫۷	۹۳٫۶	۲۳۴	۵٫۸۴	۵	[۱۰]
۱۷	ML	۰٫۷۶۲	۲٫۷۰	۳٫۵۴	۶۴۶٫۴	۱۱٫۵	۵۶٫۲	۲۰۶	۲٫۹	۳	[۱۰]
۱۸	MH	۰٫۶۱۰	۲٫۴۰	۳٫۹۳	۹۱۱٫۳	۷٫۷	۱۱۸٫۶	۲۱۵	۵٫۸۴	۵	[۱۰]
۱۹	ML	۰٫۷۶۲	۲٫۱۰	۲٫۷۶	۱۳۱۱٫۹	۱۲٫۶	۱۰۲٫۶	۱۱۵	۱۱٫۳	۹	[۱۰]
۲۰	ML	۰٫۷۶۲	۲٫۴۰	۳٫۱۵	۱۲۵۹٫۷	۱۵٫۷	۸۰٫۳	۱۷۶	۲٫۹	۳	[۱۰]
۲۱	ML	۰٫۷۶۲	۲٫۴۰	۳٫۱۵	۷۴۶٫۹	۷٫۶	۹۶	۲۳۰	۷٫۲۶	۶	[۱۰]
۲۲	ML, SM	۰٫۷۶۲	۲٫۴۰	۳٫۱۵	۹۵۷٫۶	۱۵٫۳	۶۲٫۷	۱۱۷	۱۷٫۶	۱۵	[۱۰]
۲۳	ML, SM	۰٫۷۶۲	۱٫۸۰	۲٫۳۶	۵۰۲٫۷	۷٫۶	۶۵	۱۸۴	۷٫۲۶	۶	[۱۰]
۲۴	ML, SM	۰٫۷۶۲	۳	۳٫۹۴	۹۵۷٫۶	۱۳٫۹	۶۸٫۷	۳۱۳	۱۲٫۶	۱۰	[۱۰]
۲۵	CL	۰٫۷۶۲	۲٫۸۰	۳٫۶۷	۴۴۱	۱۰	۴۴٫۱	۱۵۲	۲٫۵		[۹]
۲۶	CL	۰٫۷۶۲	۵٫۱۰	۶٫۶۹	۵۶۲	۱۳	۴۳٫۲	۱۹۳	۲٫۵		[۹]
۲۷	CL	۰٫۷۶۲	۲٫۵۰	۳٫۳۰	۴۷۵	۷٫۸	۶۱	۱۲۳	۳۰		[۶]
۲۸	ML	۰٫۷۶۲	۲٫۱۰	۲٫۷۶	۱۲۷۸	۱۲٫۵	۱۰۲	۲۲۰	۳۰		[۶]
۲۹	CL	۰٫۷۶۲	۲٫۷۰	۳٫۶۰	۴۱۵	۱۲٫۲	۱۶	۱۹۷	۴٫۶		[۸]
۳۰	CL	۰٫۷۶۲	۵٫۰۵	۶٫۶۰	۴۸۰	۷٫۵	۶۲	۲۸۵	۴٫۶		[۸]

جدول ۲. مشخصات هندسی و نتایج آزمایش بارگذاری پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی در یک پروژه‌ی تحقیقاتی اجراشده در جنوب (بندر بوشهر) ایران.

ردیف	نوع لایه‌ی خاک UCS	قطر اسمی پایه (D_P) (m)	طول شافت پایه (L_t) (m)	نسبت لاغری پایه (L_t/D_P)	تغییرشکل بالای پایه در حد طراحی (δ_d) (mm)	مدول سختی پایه (k_P) (MN/m^3)	مرجع
۱	ML	۰٫۱۳۵	۰٫۳۵	۲٫۶۰	۹٫۷	۱۶۴	[۱۲و۱۱،۷]
۲	ML	۰٫۱۳۵	۰٫۵۵	۴٫۱۰	۹	۱۵۲	[۱۲و۱۱،۷]
۳	ML	۰٫۱۳۵	۰٫۷۰	۵٫۲۰	۱۰٫۲	۲۱۱	[۱۲و۱۱،۷]
۴	ML	۰٫۱۳۵	۰٫۸۵	۶٫۳۰	۱۰٫۳	۲۱۰	[۱۲و۱۱،۷]
۵	ML, CL	۰٫۱۳۵	۱	۷٫۴۱	۱۰٫۸	۳۵۹	[۱۲و۱۱،۷]
۶	ML, CL	۰٫۱۳۵	۱٫۲۰	۸٫۸۹	۱۲٫۸	۱۶۵	[۱۲و۱۱،۷]
۷	ML, CL	۰٫۱۳۵	۱٫۳۵	۱۰	۹٫۳۰	۲۶۸	[۱۲و۱۱،۷]
۸	ML, CL	۰٫۱۳۵	۱٫۵	۱۱٫۱۱	۱۱	۲۳۱	[۱۲و۱۱،۷]
۹	ML	۰٫۱۰۵	۱	۹٫۵۰	۷٫۲	۳۴۷	[۱۲و۱۱،۷]
۱۰	ML	۰٫۱۳۵	۱	۷٫۴۰	۸٫۲	۲۶۵	[۱۲و۱۱،۷]
۱۱	ML	۰٫۱۵۵	۱	۶٫۴۵	۱۲٫۶	۲۱۵	[۱۲و۱۱،۷]
۱۲	ML	۰٫۱۸۵	۱	۵٫۴۰	۱۳٫۱	۱۴۶	[۱۲و۱۱،۷]

ریزدانه‌ی (ML) منطقه‌ی ویژه‌ی اقتصادی از بندر بوشهر واقع در جنوب ایران ارائه شده است. قطر پایه‌های با مقیاس متوسط نیز در اندازه‌های ۰٫۱۰۵، ۰٫۱۳۵، ۰٫۱۵۵ و ۰٫۱۸۵ متر و طول این پایه‌ها در محدوده‌ی ۱٫۵-۰٫۳۵ متر است.[۱۲و۱۱،۷]

۶. نتایج آزمایش‌ها و تفسیر داده‌ها

۱.۶. نشست بالای پایه‌ها در حد طراحی

شکل‌های ۳ و ۴، تغییرات نشست حد طراحی بالای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس واقعی را به ترتیب بر حسب طول و نسبت لاغری پایه‌ها نشان می‌دهند. قطر و طول پایه‌های موردنظر به ترتیب در محدوده‌ی ۰٫۹۱۴-۰٫۶۱۰ متر و ۵٫۱۰-۱٫۸۰ متر قرار دارند. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، در پایه‌های مورد مطالعه، نشست‌های کمینه و بیشینه به ترتیب برابر ۶٫۵ و ۱۶٫۱ میلی‌متر و میانگین نشست برابر ۱۱٫۳۵ میلی‌متر است. همچنین با افزایش طول یا نسبت لاغری پایه‌ها، نشست بالای پایه‌ها دارای تغییرات جزئی و روند ثابتی است. شکل ۵، تغییرات نشست حد طراحی بالای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی را بر حسب تنش حد طراحی این پایه‌ها نشان می‌دهد. در پایه‌های مورد مطالعه، تنش‌های کمینه و بیشینه به ترتیب برابر ۴۱۵ و ۱۵۳۴ کیلوپاسکال و میانگین تنش برابر ۸۸۲ کیلوپاسکال است. مطابق شکل مذکور، با افزایش تنش حد طراحی پایه‌ها، نشست بالای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی، تغییرات جزئی و روندی ثابت دارد.

شکل ۶، تغییرات نشست بالای پایه‌های با مقیاس متوسط را بر حسب طول پایه‌ها نشان می‌دهد. قطر و طول پایه‌های با مقیاس متوسط به ترتیب در محدوده‌ی ۰٫۱۸۵-۰٫۱۰۵ متر و ۱٫۵-۰٫۳۵ متر هستند. در پایه‌های با مقیاس متوسط نشست‌های کمینه و بیشینه به ترتیب برابر ۷٫۲ و ۱۳٫۱ میلی‌متر و میانگین نشست برابر ۱۰٫۳۵ میلی‌متر است. آنچه مسلم است، ایجاد ارتباط بین نتایج نشست بالای پایه در هر دو گروه پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس متوسط و مقیاس واقعی به دلیل عدم انجام تحلیل ابعادی برای پایه‌های با مقیاس متوسط و تغییر شرایط زمین، امری خطا و غیراصولی است.

اما همان‌طورکه مشاهده می‌شود، با افزایش طول یا نسبت لاغری پایه‌ها، نشست بالای هر دو گروه پایه‌های با مقیاس متوسط و مقیاس واقعی، تغییراتی جزئی و روندی ثابت دارد. جالب اینکه میانگین مقادیر نشست بالای پایه‌های با مقیاس متوسط با میانگین مقادیر نظیر در پایه‌های با مقیاس واقعی انطباق بسیار خوبی را نشان می‌دهد. هر چند اثبات درستی این انطباق نیاز به پژوهش بیشتر دارد. به نظر می‌رسد این مقدار میانگین به‌دست‌آمده‌ی نشست بالای پایه‌ها، مبنای خوبی برای طراحی اولیه‌ی پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی کوتاه منفرد باشد و از این لحاظ با اهمیت است.

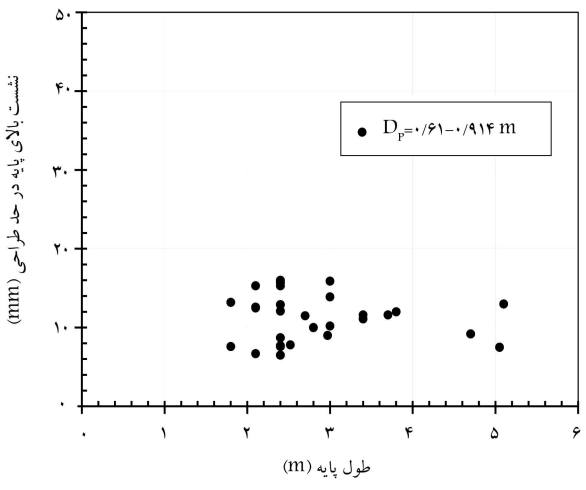
۲.۶. مدول سختی پایه‌ها

شکل‌های ۷ و ۸، تغییرات مدول سختی پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس واقعی را به ترتیب بر حسب طول و نسبت لاغری پایه‌ها نشان می‌دهند.

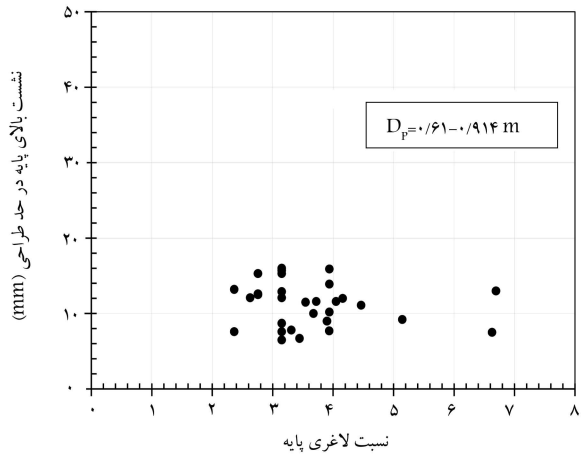
به همین ترتیب، در پایه‌های مورد مطالعه، کمینه و بیشینه‌ی مدول سختی پایه‌ها به ترتیب برابر ۱۶ و ۱۲۷ مگانیوتن بر مترمکعب و میانگین مدول سختی پایه‌ها برابر ۷۸ مگانیوتن بر مترمکعب هستند.

۷. مطالعه‌ی پارامتری

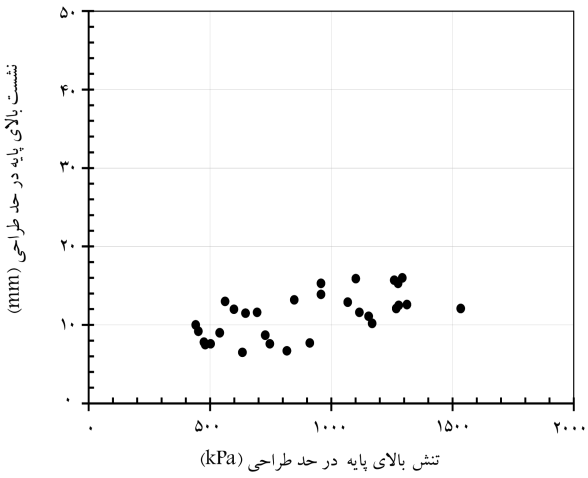
طی این پژوهش، با استفاده از داده‌های ارائه‌شده در جدول ۱ و انجام مطالعه‌ی پارامتری بر روی آنها، دو رابطه برای تخمین نشست بالای پایه در حد طراحی و مدول سختی پایه ارائه شده است، که در ادامه تشریح شده‌اند. همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش طول یا نسبت لاغری پایه‌ها، نشست بالای پایه‌ها در حد طراحی، تغییراتی جزئی و روندی ثابت دارد. بر مبنای این داده‌ها، نشست‌های کمینه و بیشینه به ترتیب برابر ۶٫۵ و ۱۶٫۱ میلی‌متر و میانگین نشست برابر ۱۱٫۳۵ میلی‌متر است. همچنین تفاضل مقادیر کمینه و بیشینه از مقدار میانگین نشست بالای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی به ترتیب برابر ۴٫۸۵ و ۴٫۷۵ میلی‌متر هستند. بنابراین در طراحی پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی منفرد، برای تخمین اولیه‌ی نشست بالای پایه‌ها می‌توان از میانگین نشست ۱۱٫۳۵ میلی‌متر استفاده کرد. هر



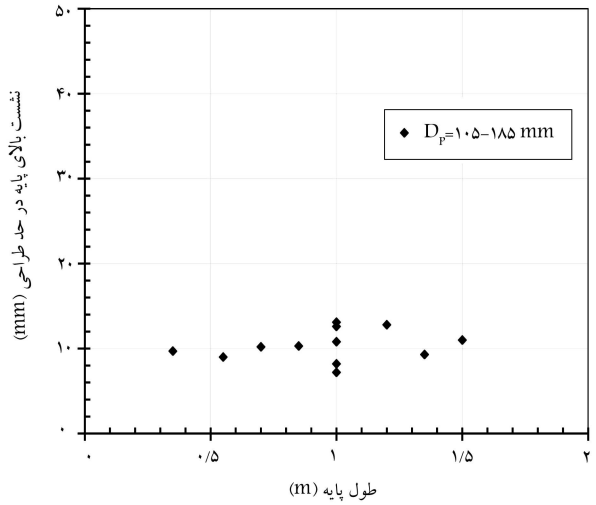
شکل ۳. مقایسه‌ی تغییرات نشست بالای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس واقعی در حد طراحی به‌صورت تابعی از طول پایه‌ها.



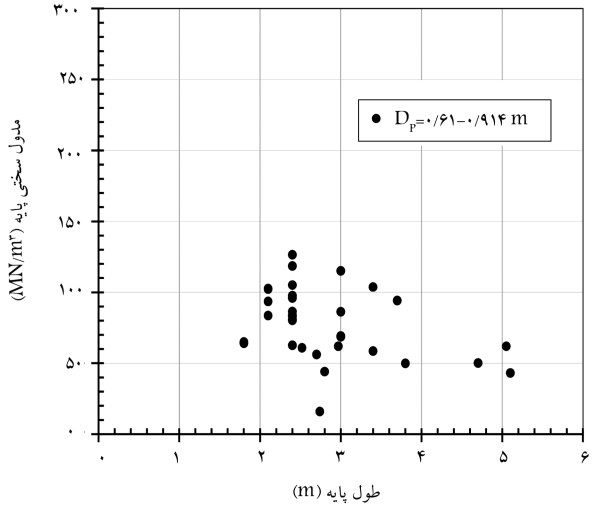
شکل ۴. مقایسه‌ی تغییرات نشست بالای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس واقعی در حد طراحی به‌صورت تابعی از نسبت لاغری پایه‌ها.



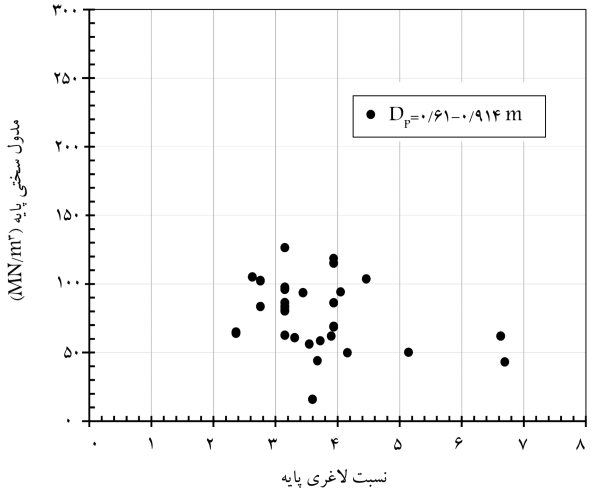
شکل ۵. مقایسه‌ی تغییرات نشست بالای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس واقعی به‌صورت تابعی از تنش بالای پایه در حد طراحی پایه‌ها.



شکل ۶. مقایسه‌ی تغییرات نشست بالای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس متوسط در حد طراحی به‌صورت تابعی از طول پایه‌ها.



شکل ۷. تغییرات مدول سختی پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس واقعی به‌صورت تابعی از طول پایه‌ها.



شکل ۸. تغییرات مدول سختی پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس واقعی به‌صورت تابعی از نسبت لاغری پایه‌ها.

چند در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی منفرد، طول پایه، قطر پایه، تنش بالای پایه، مدول ارتجاعی خاک محیطی و مدول ارتجاعی پایه از جمله پارامترهای مؤثر در محاسبه‌ی نشست بالای پایه‌ها هستند، که بی‌توجهی به هر یک از پارامترهای مذکور می‌تواند موجب بالارفتن میزان خطای محاسبه شود. بر این مبنا، معادله‌ی ۳ می‌تواند در محاسبه‌ی نشست بالای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی در حد طراحی سودمند باشد. در این مطالعه، معادله‌ی ۳ با احتساب پارامترهای مؤثر در محاسبه‌ی نشست، براساس نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون بر روی داده‌های ارائه‌شده در جدول ۱ به‌دست آمده است:

$$\delta_t = (q_t L_t / E_S) I_P \qquad (۳)$$

که در آن، L_t طول پایه، δ_t نشست بالای پایه، q_t تنش اعمالی در بالای پایه، E_S مدول ارتجاعی خاک محیطی و I_P ضریب تأثیر نشست هستند. برای محاسبه‌ی I_P از معادله‌ی ۴ استفاده می‌شود:

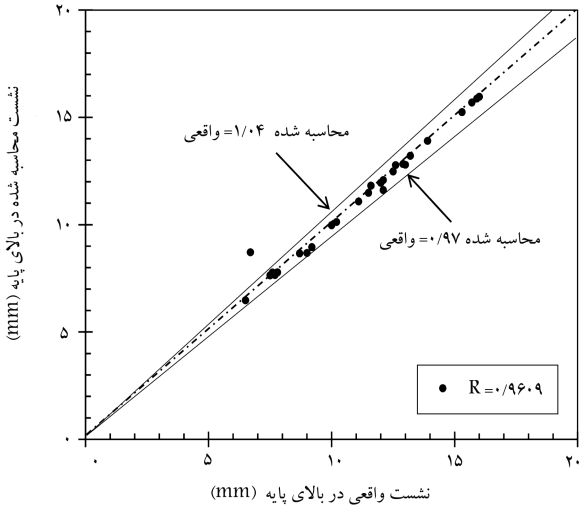
$$I_P = [C_1 + C_2(E_S/E_P) + C_3 LN(L_t/D_P)] \qquad (۴)$$

در این ارزیابی، D_P قطر اسمی پایه، L_t/D_P نسبت لاغری پایه، E_P مدول ارتجاعی پایه، $C_1 = ۳/۴۶ \times ۱۰^{-۴}$، $C_2 = ۹۹۸۱ \times ۱۰^{-۴}$ و $C_3 = -۲/۷ \times ۱۰^{-۴}$ هستند. شکل ۹، مقایسه‌ی نتایج نشست حد طراحی محاسبه‌شده و واقعی در بالای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی را نشان می‌دهد. همان‌طورکه در شکل مذکور مشاهده می‌شود، با استفاده از معادله‌ی ۱ برای محاسبه‌ی نشست بالای پایه‌ها در حد طراحی، مقدار R برابر ۰/۹۶۰۹ به‌دست آمده است، که در این مورد انطباق بسیار خوبی را بین نتایج محاسبه‌شده و نتایج واقعی نشان می‌دهد.

برای تخمین مدول سختی پایه (k_P) نیز از معادله‌ی ۵ استفاده می‌شود:

$$k_P = q_d / \delta_t \qquad (۵)$$

که در آن، $q_d = P_d/A_P$ تنش حد طراحی در بالای پایه، P_d بار حد طراحی و A_P سطح مقطع اسمی پایه است. در معادله‌ی ۵، تخمین درست مقادیر بار و نشست حد طراحی موجب تخمین بهتر مدول سختی پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی منفرد می‌شود.



شکل ۹. مقایسه‌ی نتایج نشست حد طراحی محاسبه‌شده و واقعی در بالای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی.

برای تخمین اولیه‌ی مدول سختی پایه‌ها می‌توان از میانگین نشست بالای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی (۱۱/۳۵ میلی‌متر) استفاده کرد. مقایسه‌ی نتایج مدول سختی محاسبه‌شده و واقعی در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همان‌طورکه در شکل مذکور مشاهده می‌شود، با استفاده از میانگین نشست بالای پایه‌های با مقیاس واقعی برای محاسبه‌ی مدول سختی پایه، مقدار R برابر ۰/۷۰۶۰ به‌دست آمده است.

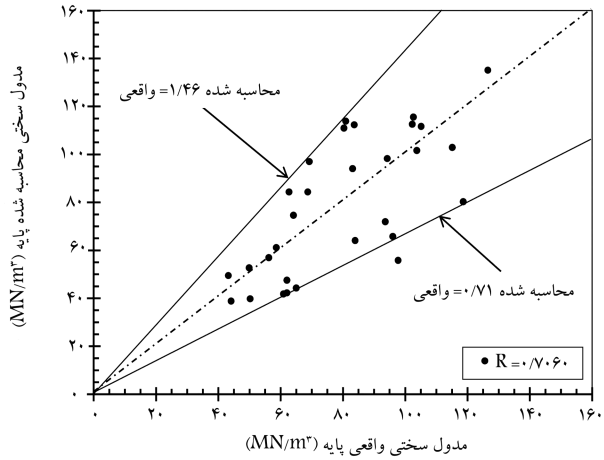
همچنین در این پژوهش، تحلیل نتایج مدول سختی پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس متوسط با طول ثابت و تغییر قطر نشان داده است که در این پایه‌ها رابطه‌ی ۶ و یا ۷ صادق است:

$$k_{P1} D_{P1}^2 = k_{P2} D_{P2}^2 \qquad (۶)$$

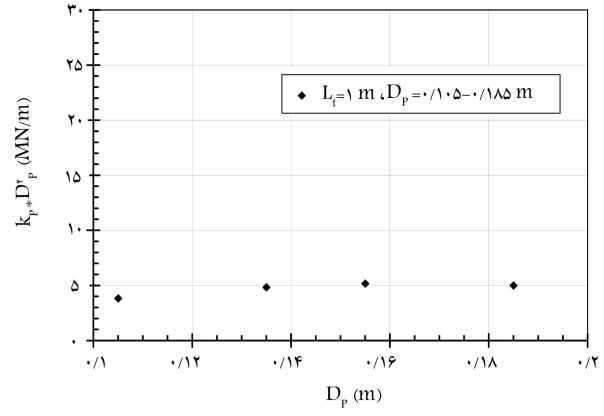
یا:

$$k_{P1}/k_{P2} = C(D_{P2}/D_{P1})^2 \qquad (۷)$$

که در آن‌ها، k_{P1} مدول سختی پایه به قطر D_{P1} و k_{P2} مدول سختی پایه به قطر D_{P2} هستند. در این ارزیابی، $C = ۱$ حاصل شده است. شکل ۱۱، تغییرات



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج مدول سختی محاسبه‌شده و واقعی در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی.



شکل ۱۱. تغییرات حاصل‌ضرب مدول سختی و توان دوم قطر اسمی پایه‌های با مقیاس متوسط بر حسب قطر اسمی پایه‌های با طول ثابت ۱۰۰۰ میلی‌متر و قطرهای ۱۰۵، ۱۳۵، ۱۵۵ و ۱۸۵ میلی‌متر.

حاصل‌ضرب مدول سختی و توان دوم قطر اسمی پایه‌های با مقیاس متوسط بر حسب قطر اسمی پایه‌های با طول ثابت و تغییر قطر را نشان می‌دهد. بنابراین در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی منفرد اجراشده در یک محل و با طول یکسان در صورت تغییر قطر پایه، مدول سختی پایه را می‌توان از رابطه‌ی ۶ تعیین کرد.

۸. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش بارگذاری بر روی ۳۰ پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی اجراشده در خاک‌های ریزدانه با مقیاس واقعی در پروژه‌های مختلف ساختمانی از ایالت‌های مختلف آمریکا طی سال‌های ۲۰۰۱ الی ۲۰۰۷ و نیز بخشی از داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش بارگذاری بر روی ۱۲ پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی اجراشده در خاک‌های ریزدانه با مقیاس متوسط در یک پروژه‌ی تحقیقاتی انجام‌شده در ایران در سال ۲۰۱۱ مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه بدون ارتباط کمّی نتایج دو گروه ذکرشده‌ی پایه‌های با مقیاس واقعی و مقیاس متوسط به طور خلاصه عبارت‌اند از:

- بر مبنای نتایج به‌دست‌آمده از پایه‌های آزمایشی با مقیاس متوسط، برای دو پایه‌ی سنگریزه‌یی کوبشی اجراشده در یک خاک ریزدانه با طول مساوی و قطرهای مختلف، معادله‌ی $k_{P1}/k_{P2} = C(D_{P2}/D_{P1})^2$ صادق است. در ادامه‌ی این پژوهش، بررسی صحت معادله‌ی ذکرشده در پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس واقعی توصیه می‌شود.
- در هر دو گروه پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس واقعی و مقیاس متوسط، میانگین نشست بالای پایه‌ها در دو مقیاس واقعی و متوسط، با افزایش طول یا نسبت لاغری پایه‌ها، میانگین نشست بالای پایه‌ها در حد طراحی، تغییراتی جزئی و روندی ثابت دارد. از این رو مقدار میانگین نشست بالای پایه‌ها می‌تواند مبنای نسبتاً خوبی برای تخمین مدول سختی و طراحی اولیه‌ی پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی کوتاه منفرد باشد. در این مطالعه، میانگین نشست بالای پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس واقعی، ۱۱٫۳۵ میلی‌متر به‌دست آمده است.
- براساس تحلیل پارامتری انجام‌شده بر روی داده‌های پایه‌های سنگریزه‌یی کوبشی با مقیاس واقعی با نسبت لاغری در محدوده‌ی ۶٫۷-۲٫۳ و نسبت مدول ارتجاعی پایه به مدول ارتجاعی زمین در محدوده‌ی ۸۸-۵ برای محاسبه‌ی نشست بالای پایه بر حسب پارامترهای طول پایه، قطر پایه، تنش بالای پایه، مدول ارتجاعی خاک محیطی و مدول ارتجاعی پایه، معادله‌یی به‌دست آمده است که انطباق بسیار خوبی را بین نتایج محاسبه‌شده و نتایج واقعی نشان می‌دهد. این تخمین می‌تواند از جهات بررسی طراحی، ساده و اطمینان از اینکه نشست بالای پایه از نشست مجاز فراتر نرود، سودمند باشد.

پانوشت

1. bottom bulb

منابع (References)

1. Wissmann, K.J., Shields, C.S. and FitzPatrick, B.T. "Modulus load test results for rammed aggregate piers^{TM} in granular soils", *Journal Geotech. Geoenviron. Eng.*, **124**, pp. 460-472 (2004).
2. Lawton, E.C., Fox, N.S. and Handy, R.L. "Control of settlement and uplift of structures using short aggregate piers", *Conference Proceeding Paper: In-Situ Deep Soil Improvement, ASCE, National Convention*, Atlanta, Georgia, pp. 121-132 (1994).
3. Lawton, E.C. and Fox, N.S. "Settlement of structures supported on marginal or inadequate soils stiffened with short aggregate piers", *Geotechnical Specially Publication No. 40: Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE*, **2**, pp. 962-974 (1994).
4. Wissmann, K.J., Fox, N.S. and Martin, J.P. "Rammed aggregate piers defeat 75-foot long driven piles", *Performance Confirmation of Constructed Geotechnical Facilities, ASCE, Geotechnical Special Publication, Amherst Massachusetts*, **94** (9-12 April 2000).
5. Randolph, M.F. and Wroth, C.P. "Analysis of deformation of vertically loaded piles", *J. Geotech. Eng. Div.*, **104**(12), pp. 1465-1488 (1978).
6. Suleiman, M.T. and White, D.J. "Load transfer in rammed aggregate piers", *International Journal of Geomechanics*, **6**(6), pp. 389-398 (2006).
7. 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).
8. Pitt, J.M., White, D.J., Gaul, A. and Hoevelkamp, K., *Highway Applications for Rammed Aggregate Piers In Iowa Soils*, Iowa DOT Project TR-443, 154 p. (2003).
9. White, D.J., Pham, H.T.V. and Hoevelkamp, K. "Support mechanisms of rammed aggregate piers. I: Experimental results", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **133**(12), pp. 1503-1511 (2007).
10. Wissmann, K.J., Moser, K. and Pando, M. "Reducing settlement risks in residual piedmont soil using rammed aggregate pier elements", *In Proceeding of the Foundations and Ground Improvement, Geotechnical Special Publication, ASCE, Blacksburg, Va.*, **113**(15), pp. 943-957 (2001).
11. 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.*, **28-2**(4), pp. 95-103 (2012).

12. Razeghi, H.R., Niroumand, B. and Ghiassian, H. "A field study of the behavior of small-scale single rammed aggregate piers, testing methodology, interpretation", *Scientia Iranica,* **8**(6), pp. 1198-1206 (December 2011).

13. Farrell, T. and Taylor, A. "Rammed aggregate pier design and construction in california; performance, constructability, and economics", *In Proceeding of the Structural Engineers Association of California*, Placerville, CA. (2004).

14. 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 Report No. UUCVEEN 04-12, University of Utah, Salt Lake City, (2004).