



تحلیل خطی و غیر خطی تنش‌های مؤثر ناشی از به کارگیری میکروپایل‌ها (مطالعه موردی شالیزارهای شمال ایران)

محمد حسین باقری پور، استادیار گروه عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی *

تلفا کس: ۰۳۴۱-۲۲۶۲۲۲۰، Email: bagheri@mail.uk.ac.ir

سید مرتضی مرندی، استادیار گروه عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی *

تلفن: ۰۳۴۱-۲۱۱۷۶۲، فاکس: ۰۳۴۱-۲۱۱۴۰۴۹۳، Email: marandi@mail.uk.ac.ir

مهدی کیوان فر، دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشگاه شهید باهنر کرمان *

چکیده

امروزه به منظور تثبیت و بهسازی زمین‌های سست و افزایش توان باربری آنها، روش‌های بسیار گسترده و متنوعی به کار می‌رود. یکی از مناسبترین روش‌ها، استفاده از میکروپایل‌هاست که کاربرد آن به دلایلی نظیر صرفه‌جویی در زمان، کاهش هزینه‌های اجرایی، مصالح کمتر، امکان تجهیز و حمل سریعتر وسایل جهت اجرای میکروپایل و همچنین کنترل نشست‌ها در سازه‌های حساس در حال افزایش است. این مقاله بر تثبیت و بهسازی شالیزارهای نواحی شمال ایران به منظور عبور دکل‌های خطوط انتقال نیرو با استفاده از این روش تأکید دارد. زمین‌های شالیزاری به لحاظ خصوصیات ژئوتکنیکی و ویژگیهای ساختمانی، زمین‌هایی سست با توان باربری بسیار کم محسوب می‌شوند و استفاده از میکروپایل‌ها به منظور تثبیت و افزایش ظرفیت باربری زمین‌های این نواحی، مناسب به نظر می‌رسد. بدین منظور، مطالعه موردی در منطقه‌ای در جوار پست ۶۳ کیلوولتی رشت شمالی انجام گرفته است. با تعیین خصوصیات فنی و ژئوتکنیکی لایه‌های خاک مزبور و استفاده از نرم افزار المان محدود ANSYS، کاربرد میکروپایل مدلسازی و مورد ارزیابی قرار گرفت. در این بررسی، گسترش تنش‌های مؤثر افقی یکبار با فرض رفتار الاستیک و بار دیگر غیر خطی لایه‌های خاک در فاصله ۲ متری از جدار خارجی میکروپایل و توزیع فشار تماسی بین میکروپایل و توده خاک اطراف آن مورد بررسی و ارزیابی دقیق قرار گرفت.

کلید واژه‌ها: میکروپایل، تثبیت، بهسازی، المان محدود، تنش، فشار تماسی

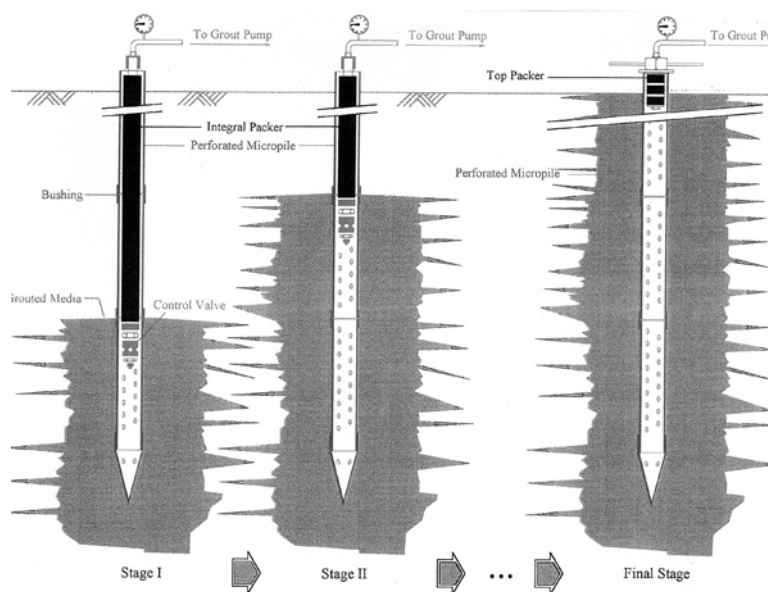
۱- مقدمه

میکروپایل‌ها شمع‌های لوله‌ای هستند که توسط دستگاه لوله کوب در زمین کوبیده شده و به وسیله دستگاه تزریق، دوغاب سیمان با غلظت و فشار معین در چند مرحله تزریق می‌گردد [1]. در اشکال ۱ و ۲، نحوه کوبیدن

لوله‌ها و مراحل تزریق دوغاب سیمان نشان داده شده است. متناسب با خواص اولیه خاک و مشخصات فنی دوغاب سیمان و فشار تزریق، عملیات تزریق سبب بهبود خواص اولیه خاک‌ها می‌گردد. در خاک‌های دانه‌ای، دوغاب تزریق شده در فضای خالی دانه‌های خاک نفوذ نموده و با ایجاد



شکل ۱: کوش لوله‌ها با دستگاه شمعی‌کوب



شکل ۲: مراحل تزریق دوغاب سیمان

یک ناحیه سخت شده اطراف گمانه تزریق در شعاع مفروضی خواص خاک را بهبود می‌بخشد. در خاک‌های ریز و چسبنده، تزریق تحت فشار زیاد دوغاب سیمان، موجب ایجاد ترک در خاک شده که با نفوذ دوغاب در میان

ذرات و ترک‌های حاصل شده، اسکلتی به هم چسبیده و سخت از خاک و دوغاب شکل می‌گیرد [2]. خاک تثبیت شده از طریق اجرای میکروپایل‌ها به دو روش قابل بهبود است. در روش اول، لوله میکروپایل به عنوان یک المان باربر، قابلیت تحمل نیروهای فشاری و کششی متناسب با ظرفیت خود را دارد. در روش دوم، توده‌ای از خاک که توسط مجموعه‌ای از میکروپایل‌های مجاور هم تحکیم شده و از سطح تا عمق قابل ملاحظه‌ای که تحت اثر تنش‌های ناشی از بارگذاری قرار می‌گیرد، داری خواص بهبود یافته مقاومتی و ژئوتکنیکی می‌باشد، بطوری که اختلاف مشخصات فنی آن با خاک اولیه کاملاً محسوس است.

۲- کاربرد میکروپایل‌ها

میکروپایل‌ها در موادی به کار می‌روند که زمین از مقاومت مکانیکی پایینی برخوردار است و میزان خاک رس همراه لای، ماسه نرم و اکثراً مواد آلی، امکان ایجاد فونداسیونی از نوع معمول و کلاسیک را ناممکن می‌سازد [3]. در زمین‌های شالیزار و ماسه‌های ساحلی گیلان و مازندران، زمین‌های رس سیلتی در استان خوزستان و زمین‌های رسی در بسیاری از نقاط کشور نظیر شیراز، کاربرد میکروپایل‌ها به عنوان روشی مناسب جهت تثبیت و افزایش ظرفیت باربری این زمین‌ها به نظر می‌رسد. سازه‌های زیادی در ایران با استفاده از این روش تقویت و حتی بازسازی شده‌اند که از جمله می‌توان به طراحی و اجرای بازسازی نیروگاه‌های نکا و لوشان، بازسازی پل بزرگ میان پشته در بندر انزلی، طراحی و اجرای تقویت فونداسیون ساختمان مرکز تجاری ایران در عشق‌آباد، فرودگاه شیراز و سکوسازی یارد خرمشهر اشاره نمود. با توجه به این که تعداد قابل توجهی از دکل‌های خطوط انتقال نیرو از زمین‌های شالیزار نواحی شمال کشور عبور می‌کنند و به واسطه بارهای جانبی باد و زلزله، نیروهای بالادهنده قابل توجهی به فونداسیون دکل‌ها اعمال می‌گردد که در صورت عدم انتقال این نیروها به زمینی با توان باربری بالا، به واژگونی دکل‌ها و قطع خطوط انتقال نیرو منجر خواهد شد. در این مقاله، استفاده از میکروپایل‌ها به عنوان روشی مناسب جهت تثبیت و افزایش ظرفیت باربری زمین‌های شالیزار پیشنهاد گردیده است. در شکل ۳، میکروپایل‌های اجرا شده در شالیزارهای شمال ایران نشان داده شده است.



شکل ۳: میکروپایل‌های اجرا شده در شالیزارهای شمال ایران (رشت)

۳- مشخصات منطقه‌ای و آزمایشات صحرائی

منطقه انتخاب شده جهت انجام آزمایشات بارگذاری روی میکروپایل آزمایشی [۴]، ناحیه‌ای است که در جوار پست ۶۳ کیلومتری رشت نزدیک خمام واقع در ۱۰ کیلومتری شمال شهر رشت واقع شده است. مطالعات انجام شده در این منطقه، شامل آزمایشات انجام شده روی خاک حاصل از ۷ گمانه ۱۵ متری می‌باشد [۵]. مشخصات لایه‌های خاک و ناحیه‌ای که توسط اجرای میکروپایل، مشخصات فنی آن بهبود یافته است با توجه به نتایج آزمایشات صحرائی انجام شده و فرمول‌های مکانیک خاک [۶] در جداول (۱) و (۲) ارائه گردیده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاک منطقه مورد مطالعه

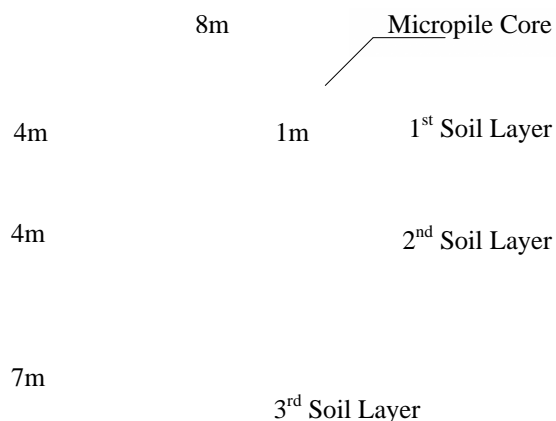
شماره لایه	ضخامت لایه (m)	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	مدول الاستیسیته (kPa)	ضریب پواسون	چگالی خاک مستغرق (kg/m^3)
۱	۴	۴۸	۳	۳×۱۰^۳	۰/۴۵	۸۰۰
۲	۴	۶۵	۴	۷×۱۰^۳	۰/۴۵	۹۰۰
۳	۷	۱۲	۳۴	۳۰×۱۰^۳	۰/۳۰	۹۳۰

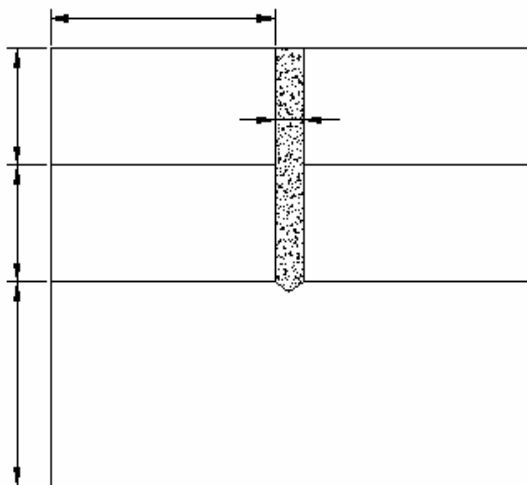
جدول ۲: مشخصات فیزیکی و مکانیکی ناحیه تثبیت شده

چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	مدول الاستیسیته (kPa)	ضریب پواسون	چگالی خاک تثبیت شده خشک (kg/m^3)
۶۰۰	۲۷	۲×۱۰^۵	۰/۲۵	۲۱۰۰

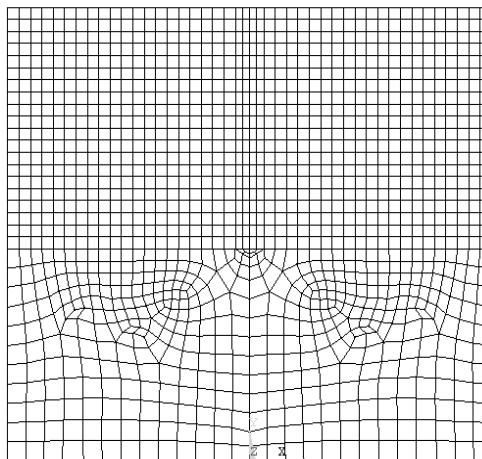
۴- تحلیل عددی میکروپایل

به منظور بررسی توزیع فشار تماسی بین میکروپایل و توده خاک اطراف آن و نحوه گسترش تنش‌های مؤثر افقی در لایه‌های خاک از روش المان محدود [۷] و نرم‌افزار معروف ANSYS نسخه 6.1 استفاده شده است. در محاسبات، رفتار لایه‌های غیرخطی از نوع داکر-پراگر [۸] و رفتار مصالح میکروپایل با توجه به نتایج حاصل از نمودار بارگذاری- تغییر مکان میکروپایل آزمایشی، الاستیک و خطی منظور گردیده است. معیار گسیختگی برشی میکروپایل و توده خاک اطراف آن، معیار موهر-کلمب می‌باشد. در شکل (۴)، هندسه مدل و پروفیل خاک شامل لایه بندی و وضعیت قرارگیری میکروپایل و عمق نفوذ آن و در شکل (۵)، مدل اجزای محدود و شبکه‌بندی انتخاب شده برای هندسه مدل نشان داده شده است. به منظور شبکه‌بندی مدل، از المان چهارگره‌ی Soild استفاده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد به منظور بالابردن دقت محاسبات و نظم‌بندی المان‌های تولید شده و سهولت در مدل نمودن اصطکاک بین میکروپایل و خاک، لایه‌های اول و دوم به صورت دستی و توده خاک زیر میکروپایل به صورت اتوماتیک شبکه‌بندی شده است. نظر به اینکه باربری نهایی میکروپایل کاملاً اصطکاکی است و باربری نوک به سبب نحوه نفوذ دوغاب در اطراف میکروپایل به هیچ وجه قابل منظور نمودن نمی‌باشد، جهت مدل نمودن اصطکاک از المان‌های تماس (Contact) و هدف (Target) استفاده شده است. در برآورد تقریبی ضریب اصطکاک و چسبندگی بین میکروپایل و خاک از روابط تجربی ارائه شده برای شمع‌ها استفاده شده و مقدار این ضرایب به ترتیب $\mu = \tan(18^\circ) = 0.325$ و $C' = 4\text{kg/cm}^2$ منظور گردیده است. از مدل نمودن لوله میکروپایل به دلیل سطح مقطع کوچک سازه‌ای و عدم لغزش نسبت به غلاف سیمانته شده اطراف آن و عدم کمانش به سبب مهار جانبی در محدوده اعمال بار صرف نظر شده است. بارگذاری سیستم در حالت استاتیکی و شامل نیروی وزن، بار متمرکز فشاری روی میکروپایل و تاثیر فشار آب منفذی روی جدار خارجی میکروپایل می‌باشد، همچنین در اختصاص قیود تکیه گاهی، گره‌های مرزی پایین مدل به سبب قرارگیری روی بستر سخت، در کلیه جهات، (All DOF)، و گره‌های مرزهای چپ و راست تنها در جهت افقی، (X)، مقید شده‌اند.





شکل ۴: هندسه مدل و وضعیت قرارگیری لایه‌ها



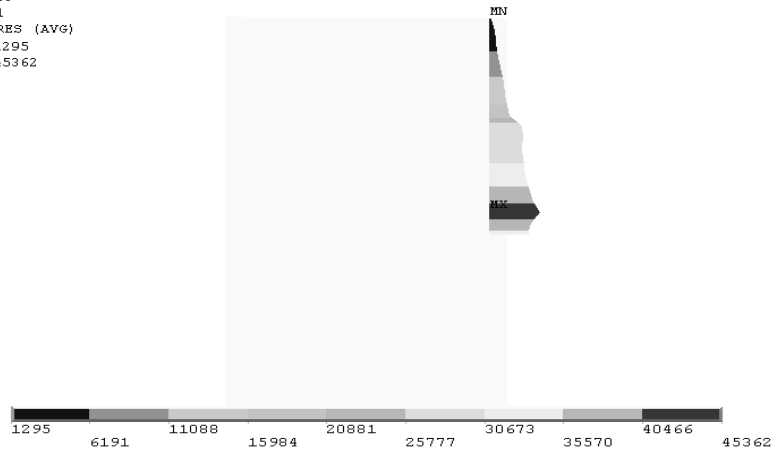
شکل ۵: شبکه بندی مدل اجزای محدود

۵- بررسی توزیع فشار تماسی بین میکروپایل و خاک

در اشکال ۶ و ۷، نحوه توزیع فشار تماسی (Contact Pressure) بین میکروپایل و توده خاک اطراف آن به ازای بارهای ۲۰ و ۲۲ تن که جزء بارهای اعمال شده به میکروپایل در آزمایش بارگذاری در محل می‌باشند، نشان داده شده است. بررسی اشکال فوق‌الذکر، نشان می‌دهد که تغییرات فشار تماسی بین میکروپایل و خاک، غیرخطی است و از کمترین مقدار در بالای میکروپایل شروع شده و با افزایش عمق به سبب افزایش تنش‌های مؤثر افقی ناشی از اثر وزن المان‌های خاک و بار متمرکز، بر مقدار فشار تماسی افزوده شده و در حدود ۰/۹ طول میکروپایل به مقدار بیشینه خود رسیده و از آن پس با افزایش عمق از مقدار آن کاسته می‌گردد. علت این کاهش را می‌توان با تغییر خواص لایه‌های خاک مرتبط دانست، بدین معنی که در عمق ۸ متر به سبب افزایش قابل توجه زاویه اصطکاک داخلی، از مقدار ضریب فشار جانبی خاک، (k_0) ، کاسته شده که این امر، سبب کاهش تنش‌های مؤثر افقی در خاک شده و خاک با نیروی کمتری به میکروپایل نیرو وارد نموده و از مقدار فشار تماسی کاسته می‌گردد. نکته دیگری که از مقایسه منحنی‌های تغییرات فشار تماسی بین میکروپایل و توده خاک اطراف آن استنتاج می‌شود آنست که با افزایش بار متمرکز، بدلیل ازدیاد تنش‌های مؤثر افقی در توده خاک مجاور میکروپایل، بر مقدار فشار تماسی افزوده می‌گردد.

NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =28
 TIME=1
 CONTPRES (AVG)
 SMN =1295
 SMX =45362

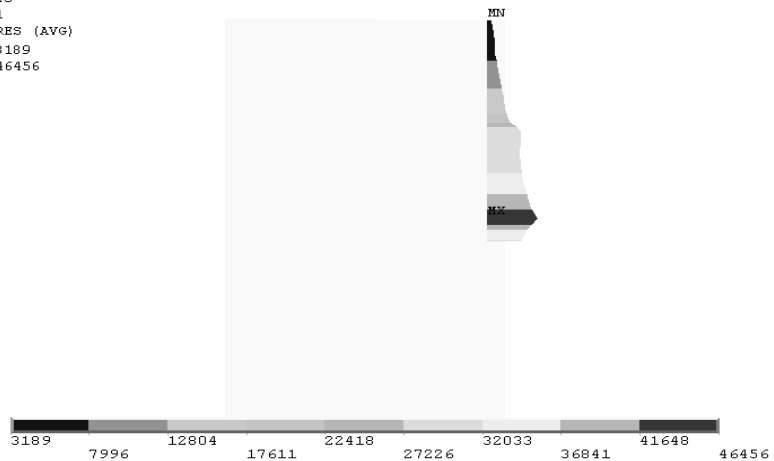
ANSYS
 JUN 7 2003
 09:18:33



شکل ۶: توزیع فشار تماسی بین میکروپایل و توده خاک اطراف آن (بار ۲۰ تن)

NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =25
 TIME=1
 CONTPRES (AVG)
 SMN =3189
 SMX =46456

ANSYS
 JUN 7 2003
 09:35:22

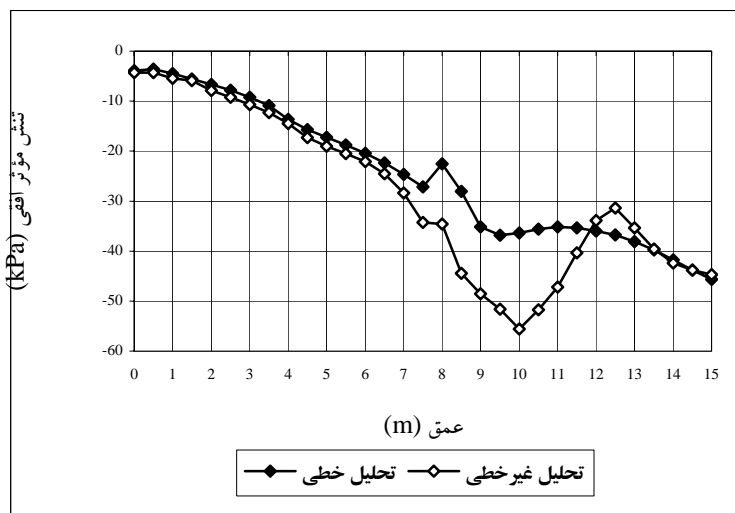


شکل ۷: توزیع فشار تماسی بین میکروپایل و توده خاک اطراف آن (بار ۲۲ تن)

۶- توزیع تنش‌های مؤثر افقی در خاک

به منظور مقایسه رفتار خطی و غیرخطی لایه‌های خاک، آنالیز اجزای محدود به ازای بار ۲۰ تن، یکبار به صورت خطی و بار دیگر به صورت غیرخطی انجام گرفت و منحنی‌های تنش‌های مؤثر افقی بدست آمده در فاصله ۲ متری از جدار خارجی میکروپایل در شکل ۸ نشان داده شده است. بررسی منحنی‌ها نشان می‌دهد که تا نزدیک به انتهای طول میکروپایل، به دلیل سختی قابل توجه میکروپایل نسبت به لایه‌های خاک اطراف، سهم ناچیزی از تنش‌های ناشی از اثر بار متمرکز به توده خاک منتقل شده و اختلاف منحنی‌ها کم است. با افزایش عمق و تغییر خواص لایه‌ها، انتقال تنش‌های ناشی از اثر بار متمرکز به توده خاک زیر میکروپایل، سبب لغزش ذرات و دانه‌های خاک روی هم شده که این امر، تغییر شکل‌های بزرگتری در توده خاک ایجاد نموده و سبب می‌شود رفتار خاک از حالت الاستیک فاصله گرفته و اختلاف منحنی‌ها افزایش یابد. از عمق حدود ۱۰ متر به سبب توزیع و پخش

تنش‌های ناشی از اثر بار متمرکز، رفتار خاک به سمت رفتار خطی متمایل گردیده و منحنی‌های تنش‌های مؤثر افقی حاصل از تحلیل خطی و غیرخطی بهم نزدیک می‌شوند.



شکل ۸: منحنی‌های تنش‌های مؤثر افقی حاصل از تحلیل خطی و غیر خطی در فاصله ۲ متری از جدار خارجی میکروپایل

۷- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این مقاله، نقش میکروپایل‌ها در افزایش ظرفیت باربری زمین‌های شالیزار شمال ایران مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

- ۱- مطالعات صحرایی انجام شده نشان می‌دهد که اجرای میکروپایل‌ها، مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها را تا حد قابل توجهی افزایش می‌دهد، بگونه‌ایکه اختلاف مشخصات خاک تثبیت شده و اولیه کاملاً محسوس است.
- ۲- توزیع فشار تماسی بین میکروپایل و توده خاک اطراف آن غیر خطی بوده، به نحوی که در بالای میکروپایل کمترین و در حدود ۰/۹ طول میکروپایل به بیشترین مقدار خود رسیده است.
- ۳- با افزایش بار متمرکز اعمال شده بر مقدار فشار تماسی افزوده می‌گردد.
- ۴- بررسی منحنی‌های تنش‌های مؤثر افقی در حالت تحلیل خطی و غیرخطی نشان می‌دهد که تا نزدیک به انتهای طول میکروپایل به سبب سختی قابل ملاحظه میکروپایل نسبت به توده خاک اطراف آن، قسمت عمده بار متمرکز اعمال شده توسط میکروپایل تحمل گردیده و اختلاف منحنی‌ها کم است، از آن پس به سبب انتقال تنش‌های ناشی از اثر بار متمرکز به توده خاک زیر میکروپایل، تغییر شکل‌های بزرگتری در خاک ایجاد شده و رفتار آن از حالت الاستیک و خطی فاصله گرفته و اختلاف منحنی‌ها افزایش می‌یابد.

۸- مراجع

- [1] Bruce, D. A., Juran, I., "Drilled and Grouted Micropiles", State of Art Practice Review, Federal Highway Administration (FHWA), 1997.
- [2] Bruce, D. A., Dimillo, A. F., Juran, I., "A Primer on Micropiles ", Civil Engineering-ASCE, Civil Engineering Database, V. 65, No. 12, 1995, pp. 51-54.
- [3] Poulos, H. G., Davis, E. H., "Pile Foundation Analysis and Design", The University of Sydney, 1980, pp. 356.
- [۴] شرکت خاک و بتن ایران، "گزارش آزمایشات بارگذاری میکروپایل شاهد، فونداسیون پست ۶۳ کیلوولتی رشت شمالی"، مهرماه ۱۳۷۴.
- [۵] آزمایشگاه مکانیک خاک وزارت راه و ترابری گیلان، "گزارش آزمایشگاه مکانیک خاک مسیر خط ۲۳۰ کیلوولتی رشت شمالی"، تیرماه ۱۳۶۸.
- [۶] داس، بر اجا ام، "اصول مهندسی ژئوتکنیک"، ترجمه طاحونی، شاپور، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۷.
- [۷] صدرنژاد، امیرالدین، "مقدمه‌ای بر روش اجزای محدود"، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۰.
- [۸] صدر نژاد، امیرالدین، "مبانی نظریه خمیری در خاک"، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۷۹.