

مدل سازی و استفاده از میکروپایل جهت افزایش ظرفیت باربری شالوده‌ها

عاطفه ایرانمنش^{۱*}، سید مرتضی مرنندی^۲، محمد بهرامی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، at.iranmanesh@gmail.com

۲- دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، marandi@uk.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، bahrami1959@gmail.com

چکیده

میکروپایل‌ها در واقع شمع‌های درجا با قطر کم (کمتر از ۳۰ سانتی متر) هستند که از ترکیب فولاد و دوجاب تشکیل شده‌اند. آن‌ها می‌توانند بارهای محوری (فشاری و کششی) و بارهای افقی را تحمل کنند، و به عنوان توده ترکیبی خاک و شمع یا جایگزینی کم قطر برای شمع‌های مرسوم عمل کنند. میکروپایل‌ها به عنوان المان‌های زیرسازی برای افزایش ظرفیت باربری شالوده‌های موجود و جلوگیری از نشست‌های اضافی استفاده می‌شوند. آن‌ها همچنین به عنوان فونداسیون برای سازه‌های جدید و تثبیت شیب‌ها به کار می‌روند. استفاده از شمع‌ها و میکروپایل‌ها هرکدام با توجه به محل کاربرد آن‌ها، موقعیت پروژه، اهمیت آن و بسیاری از موارد مهم دیگر، دارای مزیت‌ها و نواقصی می‌باشند که در طی تحقیقات انجام شده، استفاده‌ی به جا و درست هر یک از آن‌ها مشخص شده است. در این مقاله تاثیر انواع میکروپایل‌ها و نوع آرایش و چیدمان آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. به طور کلی استفاده از ریزشمع‌ها یا میکروپایل‌ها تاثیر بسزایی در رفتار و افزایش ظرفیت باربری شالوده‌ها دارد. برای انجام بهتر این فرآیند، بایستی نوع آرایش، تعداد، جنس و سایر ویژگی‌های میکروپایل‌ها را به گونه‌ای انتخاب نمود تا بهترین عملکرد شالوده و درعین حال اقتصادی بودن طرح نهایی مد نظر باشد.

واژه‌های کلیدی: میکروپایل، شالوده، ریز شمع، ظرفیت باربری، مدل‌سازی

۱- مقدمه

پایه و اساس طراحی، مدل‌سازی و استفاده از میکروپایل‌ها به طور کلی به شمع‌ها بر می‌گردد. شمع‌ها مدت‌هاست با توجه به کاربری‌های متفاوت و مفید آن‌ها به طور گسترده در تمامی مراحل صنعت استفاده شده است. پس از آن‌ها در بسیاری از موارد به علت محدودیت‌های اجرایی و کاربردی که برای مهندسان و طراحان پیش آمده است، استفاده از شمع‌هایی با قطر کمتر و در نتیجه اجرا و نصب راحت‌تر مورد توجه قرار گرفته است. شمع‌ها اجزاء سازه‌ای درجا یا اجزاء از پیش ساخته‌ی باریک و بلندی هستند که برای نگهداری سازه‌های جدید ساخته شده‌اند. آن‌ها به طور عمده زمانی به کار برده می‌شوند که لایه‌های باربر در عمق بسیار زیاد از سطح زمین قرار گرفته باشند و یا بارهای سازه‌ای به اندازه‌ای زیاد باشند که فونداسیون نتواند آن‌ها را تحمل کند.

شمع‌ها همچنین می‌توانند برای نگهداری شالوده‌های موجود تحت نشست‌های قابل توجه یا مشکوک به گسیختگی استفاده شوند، که اغلب به عنوان یک تکنیک زیرساختاری یاد می‌شوند. شمع‌ها انواع گسترده‌ای را تشکیل داده‌اند که همه آنها زیر مجموعه‌ای از نوع دسته‌بندی‌های با جابجایی و یا از نوع بدون جابجایی قرار گرفته‌اند [۱]. مصالح استفاده شده از شمع‌ها عموماً از فولاد و بتن پیش‌تنیده برای شمع‌های با جابجایی و دوجاب (ترکیب شن، ماسه و آب) مسلح شده با فولاد برای شمع‌های بدون جابجایی تشکیل شده است. شکل و مصالح شمع‌ها به طور کلی وابسته به نیاز هر پروژه انجام می‌شود. شمع‌ها برای مقاومت در برابر بارهای محوری (فشاری-کششی) و بارهای افقی طراحی می‌شوند. زمانی بارهای فشاری اعمال می‌شوند، شمع‌های معمول و رایج با استفاده از هر دو مقاومت انتهایی و اصطکاکی با بار مقابله می‌کنند. نیروی

کششی در اثر فشار بالا آمده خاک اتفاق می‌افتند که توسط مقاومت اصطکاک جداره و وزن خود شمع جلوگیری می‌شود. بار های جانبی بر روی شمع برش و ممان اعمال می‌کند که توسط سختی شمع و خاک اطراف مقابله می‌شود. تاریخچه ابداع میکروپایل به اوایل دهه ۵۰ میلادی زمانی که اروپا با خیل عظیمی از ساختمان های در معرض خرابی ناشی از صدمات وارده در جنگ جهانی دوم رو برو بوده است، بر می‌گردد. در این دوره ابداع یک روش بهسازی بستر که علاوه بر کارایی و قابلیت اجرا در بین ساختمانهای تخریب شده سریع و اقتصادی نیز باشد، بسیار ضروری بود که در چنین شرایطی ابداع میکروپایل توسط فاندیدیل پیمانکار مشهور ایتالیایی صورت پذیرفت که به دلیل ویژگی های منحصر به فرد این روش گسترش فراوانی یافت [۲]. در آغاز استفاده از میکروپایل ها تنها در بهسازی بستر ضعیف ساختمانها مورد توجه قرار داشت لیکن رفته رفته و با توسعه و اجرای این روش در کشورهای مختلف، دامنه کاربرد آنها به دیگر عرصه های مهندسی ژئوتکنیک نظیر پایدارسازی شیب ها، مقابله با ریزش و... نیز کشیده شد.

میکروپایل ها دارای محدوده قطر بین ۱۰ تا ۳۰ سانتی متر، طول ۲۰ تا ۳۰ متر و بار فشاری-کششی ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلو نیوتن می‌باشند. همچنین تحمل بار فشاری تا حدود ۵۰۰۰ کیلو نیوتن نیز برای آن ها ثبت شده است [۳]. سایر شرایط فنی برای تعریف مواردی اعم از پالی رادیس، ریشه شمع، شمع سوزنی، مینی شمع، شمع میخی، استفاده شده اند. با این حال همه این شرایط به شرایط فنی نوع خاصی از شمع های کم قطر حفاری شده بر میگردند. میکروپایل ها راه حل عملی برای مقاوم سازی سازه و مقاوم سازی خاک فراهم کرده اند که عمدتاً کاربرد آن ها به شرح ذیل است:

(۱) تقویت فونداسیون های موجود

(۲) تقویت فونداسیون سازه های جدید

(۳) کاهش نشست

(۴) تقویت خاک و تثبیت لغزش ها

(۵) پایدار سازی سازه

میکروپایل ها می‌توانند بیشتر از سایر شمع ها مورد علاقه باشند، زیرا آن ها می‌توانند تحت شرایط سخت لایه های خاکی حفاری شوند و همچنین تجهیزات حفاری می‌توانند تحت فضای بالا سری محدود کار کنند. علاوه بر این میکروپایل ها اجازه حداقل نشست را به سازه های موجود اطراف می‌دهند.

در سال ۱۹۱۷ اداره اتحادیه بزرگراه های ایالات متحده آمریکا [۴] (FHWA)، بررسی تاریخچه میکروپایل شامل اطلاعات آزمایش های آزمایشگاهی، آزمایش های انجام شده در محل، روش های طراحی، روش های ساخت و ساز، نظارت سایت ها و نظارت بر مطالعات موردی را فراهم آورد. از جمله پارامترهای مهمی که بر نوع میکروپایل ها تأثیر گذار است، به شرح ذیل است:

(۱) ملاحظات فیزیکی: تجهیزات حفاری میکروپایل از مزیت نصب و اجرا در مناطق محدود با فضای آزاد کم برخوردارند. بر خلاف شمع های معمول و متداول، میکروپایل ها می‌توانند در نزدیکی چند میلی متری از دیوارهای موجود یا فونداسیون نصب کنند. همچنین تجهیزات را می‌توان در شیب های تند و مناطق دور نیز نصب کرد.

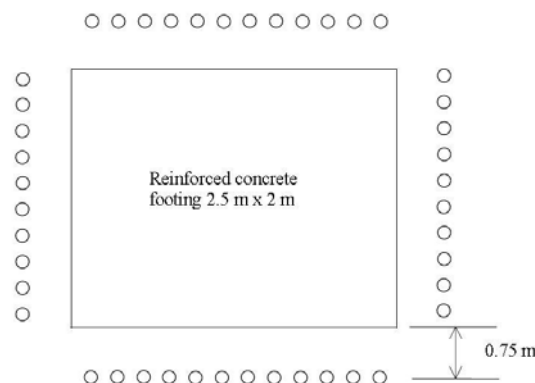
(۲) شرایط لایه های خاک زیرین: میکروپایل ها دارای فواید نصب در شرایط لایه های خاکی مشکل و سخت حتی در محدوده نوعی سنگ و تخته سنگ تا خاک های با دانه بندی شل و رس های نرم می‌باشند. علاوه بر این شرایط سطح آب زیر زمینی باعث کمترین اختلال در نصب میکروپایل می‌شود و گزینه مورد علاقه ویژه ای برای مکان هایی که سطوح خارجی با سنگ آهک کارستیک متخلخل شده است، به حساب می‌آید.

(۳) شرایط محیطی: به علت تنظیمات پارامتری، میکروپایل ها نسبت به دیگر سیستم های شمع های متداول باعث اتلاف کمتری از میزان حفاری می‌شوند. ترکیب مناسبی از دوغاب نیز می‌تواند برای مقاومت در برابر آب زیر زمینی شیمیایی و مضر

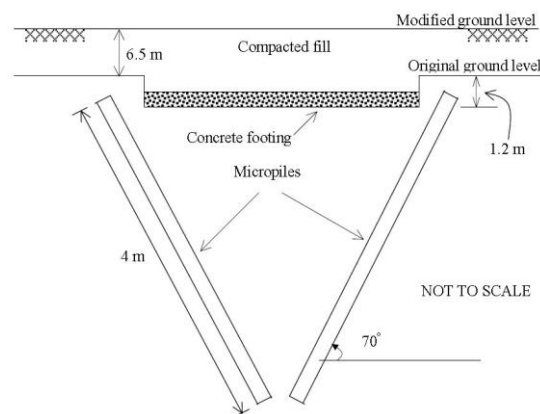
طراحی شود. نصب میکروپایل ها اختلال و آشفتگی کمتری نسبت به روش های شمع کوبی رایج به وجود می آورد. در نتیجه اختلال در فونداسیون های مجاور را نیز به حداقل می رساند.

۲- مدل های میکروپایل

در سال ۲۰۰۳ مطالعاتی بر روی میکروپایل هایی به قطر 0.1 متر و طول چهار متر انجام شد. میکروپایل ها برای بهسازی فونداسیون با زاویه ۷۰ درجه نسبت به افق اجرا شدند. برای مدل سازی عددی توسط نرم افزار PLAXIS 2D [۵] با استفاده از المان تیر برای در نظر گرفتن رفتار انعطاف پذیری میکروپایل استفاده شده است. شکل شماتیک فونداسیون و چگونگی آرایش میکروپایل ها در شکل های (۱) و (۲) نشان داده شده است [۶].

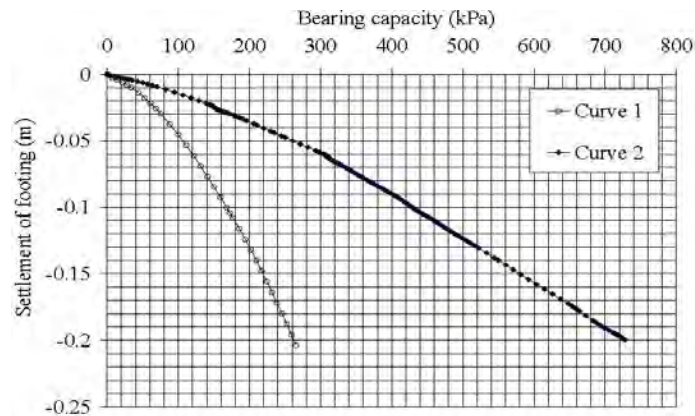


شکل (۱) مدل شالوده [۶]

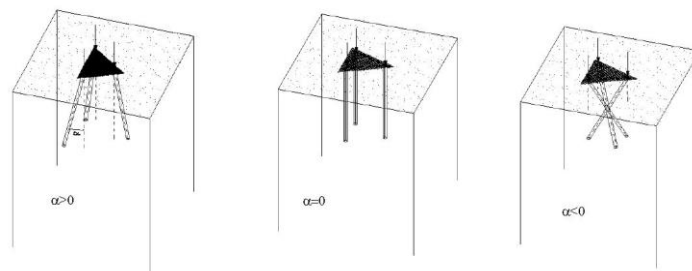


شکل (۲) آرایش میکروپایل ها [۶]

شکل (۳) نتایج مقایسه مدل سازی نرم افزار و مطالعه موردی برای نشست فونداسیون در حالت بدون میکروپایل (منحنی ۱) و با میکروپایل (منحنی ۲) را نشان می دهد. همچنین مدل سازی عددی میکروپایل را می توان با استفاده از نرم افزار 3D FLAC [۷] بر روی رفتار شبکه ای میکروپایل ها انجام داده و تأثیر آن ها بر سطح تنش و تراکم ایجاد شده، بررسی نمود. این کار با نصب و طراحی گروه میکروپایل ها به صورت قائم در عمق خاک و مورب مطابق شکل (۴) انجام می گیرد [۸].



شکل (۳) مقایسه مدل سیوکومار برای نشست فونداسیون با و بدون میکروپایل



شکل (۴): وضعیت مختلف مدل سازی [۸]

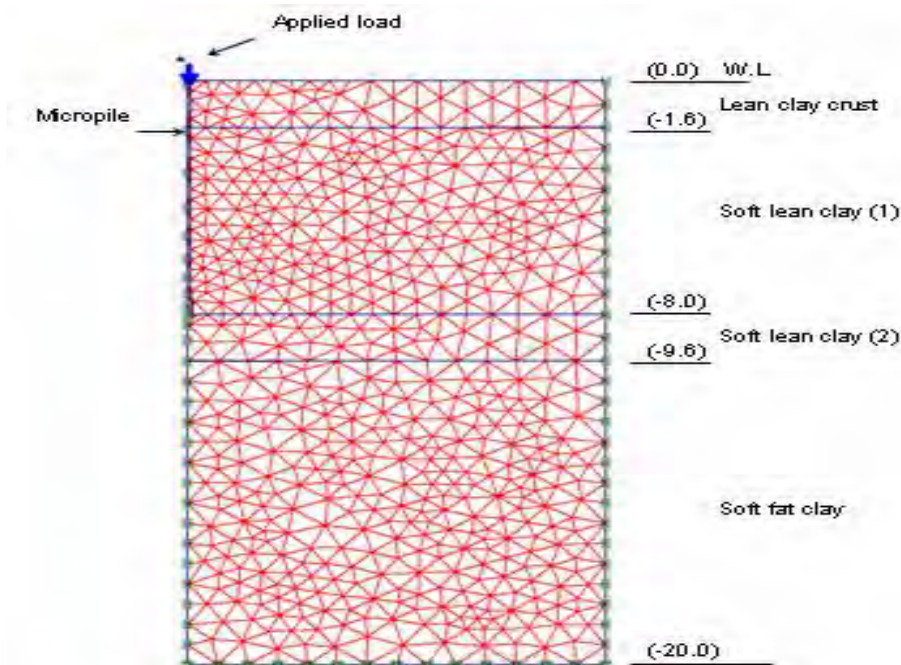
در این حالت مقاومت نهائی شفت با گروه میکروپایل (با زاویه ۱۵ درجه) در خاک ماسه ای اتساعی (قابل تورم) کمتر از حالت میکروپایل های قائم نصب شده می باشد. مقاومت نوک میکروپایل ها در حالت مورب همیشه چه در بارگذاری فشاری و چه کششی بیشتر از حالت قائم می باشد. بر اساس تحلیل های انجام شده، می توان نتیجه گرفت که رفتار گروه میکروپایل ها در خاک های ماسه ای متأثر از روش نصب میکروپایل، نوع ماسه، فاصله بین میکروپایل ها، نسبت طول به قطر و مشخصات برهم کنش سطح خاک-میکروپایل می باشد. فلسفه رفتاری میکروپایل ها را می توان به دو دسته تقسیم کرد: (۱) میکروپایل هایی که به صورت مستقیم تحت بارگذاری قرار می گیرند، (۲) تثبیت و استحکام ایجاد شده توسط قفل و بست میکروپایل به خاک اطراف.

مدل سازی موارد فوق را می توان به صورت مدلی متقارن به روش المان های ۱۵ گره ای، شرایط مرزی افقی در فاصله ای برابر با ۲.۵ برای طول میکروپایل و شرایط مرزی قائم با فاصله ی ۲.۵ طول که در مقدار (۷-۱) ضرب شده باشد، انجام داد. در عبارت فوق ۷ ضریب پواسون می باشد. شکل (۵) مدل سازی در نرم افزار را نشان می دهد [۹].

با استفاده از نتایج نمودار های بار-جابجایی در حالت های مختلف، محدوده ضریب α را که بروس (۱۹۹۴) بین ۰.۶ تا ۰.۸ تخمین زده است، می توان بین ۰.۸ تا ۱.۰ (در بهترین حالت $\alpha=0.9$) بدست آورد. چگونگی استفاده از α و رابطه ی فشار افقی خاک در زیر نشان داده شده است:

$$K_0 = (1 - \sin \phi') OCR^{\sin \phi'} \quad (1)$$

$$C_a = R_{int} \cdot C_u \rightarrow C_a = \alpha \cdot C_u \quad (2)$$



شکل (5): مدل سازی در نرم افزار [۹]

بررسی های ستودن و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۱۰] بر روی نتایج آزمایش های فشاری و کششی میکروپایل های قرار گرفته در خاک های شن و ماسه ای و ماسه های متراکم و نیمه متراکم رابطه ای برای سختی محوری میکروپایل، K با توجه به طول حمایت شده در خاک حاصل نمود. در شکل (۶) این طول و طول الاستیک مورد نظر نشان داده شده است.

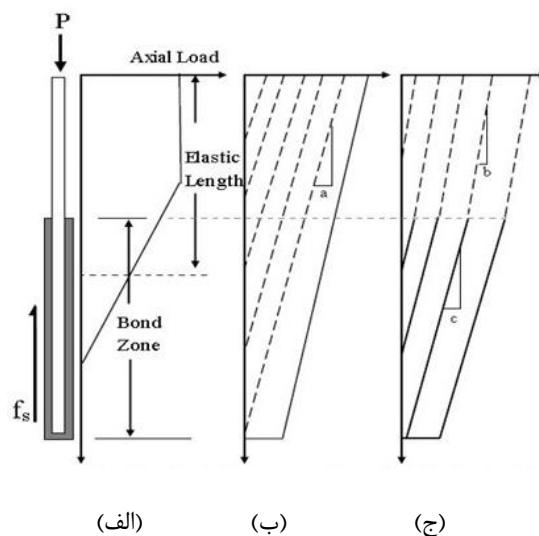
با انجام این تحقیقات، نتایج زیر حاصل شد:

(۱) در بار طراحی ۳۶۰ کیلو نیوتن جابجایی بالای میکروپایل در آزمایش کششی پنج برابر جابجایی در آزمایش فشاری بدست آمده است.

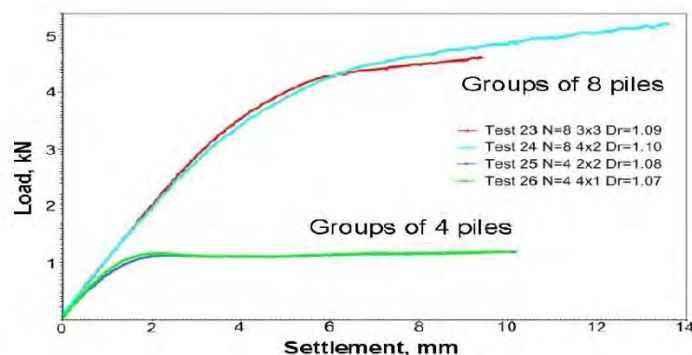
(۲) هر دو حالت بارگذاری فشاری و کششی از روابط سختی به دست آمده پیروی می کنند.

از آنالیز های انجام شده مشخص شد که در هر دو حالت بارگذاری فشاری و کششی انتقال بار بیشتر توسط طول حمایت شده در خاک انجام می شود. در سال ۲۰۰۹ بر روی بهبود شالوده ها با استفاده از گروه میکروپایل، آزمایش های آزمایشگاهی بر روی گروه میکروپایل و شالوده ها با ظرفیت بالا با استفاده از گروه میکروپایل مطالعاتی انجام گرفت. این آزمایش ها در خاک ماسه ای خشک توسط گروه های خطی و مستطیلی برای بدست آوردن نتایج بر اساس فاصله مناسب بین میکروپایل ها صورت گرفت. گروه میکروپایل ها در چیدمان های مختلف ساخته و مورد آزمایش قرار داده شد. شکل های (۷) و (۸) مقایسه بین چیدمان میکروپایل ها را نشان می دهد [۱۱].

برای ساخت میکروپایل‌ها می‌توان از مصالحی به نام تیتان^۱ برای استفاده در صنعت میکروپایل استفاده کرد. در این صورت سیستم مهار حفره تزریق تیتان را با ویژگی‌های خاصی می‌توان استفاده نمود: (۱) میلگرد تو خالی، (۲) نسبت آب به سیمان دوغاب نهائی برابر با ۰.۴۵، (۳) نسبت آب به سیمان دوغاب تزریقی اضافی برابر با ۰.۷، (۴) بهسازی زمین [۱۲]. برای دست یابی به ظرفیت باربری نهائی بالاتر، میکروپایل با رزین‌هایی از جنس پلی‌ارتان مورد بررسی قرار می‌گیرند. والنتنو [۱۳] بعد از انجام آزمایشات گوناگون میکروپایل‌ها در فشار و کشش، رفتار طبیعی پلی‌ارتان را نشان داد. با توجه به تحقیقاتی که در سال ۲۰۱۱ [۱۴] بر روی رفتار و روابط مربوط به اصطکاک جدار میکروپایل‌های در خاک‌های دانه‌ای قرار گرفته، مدل نرم افزاری میکروپایل‌ها را با نرم افزار جدید ژئوتکنیکی GEO5 [۱۵] می‌توان مدل سازی نمود. این نرم افزار در تمامی مدل سازی‌ها و طراحی‌های پروژه‌های عمرانی و ژئوتکنیکی قابل کاربرد است. قسمتی از این نرم افزار بر خلاف دیگر نرم افزارهای قبلی دارای مدل سازی دقیق و قابل اطمینان مخصوص میکروپایل‌ها می‌باشد. تعیین عمق منطقه تحت تأثیر نوک شمع در عمق خاک یکی از ویژگی‌های این نرم افزار است (شکل ۹).



شکل (۶) انتقال بار طول حمایت شده و طول الاستیک میکروپایل: (الف) انتقال بار از طول الاستیک، (ب) انتقال بار میانگین از طول غلاف دار و بدن غلاف، (ج) میانگین انتقال بار برای طول غلاف دار و بدن غلاف به صورت جداگانه [۱۰]

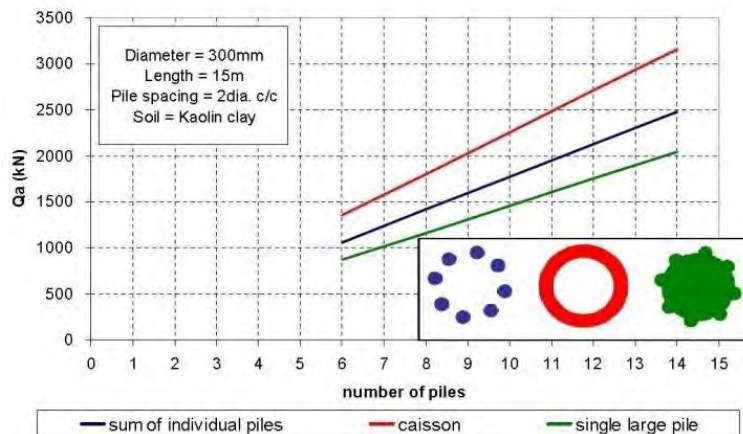


شکل (۷) مقایسه بین چیدمان مربعی و مستطیلی میکروپایل‌ها [۱۱]

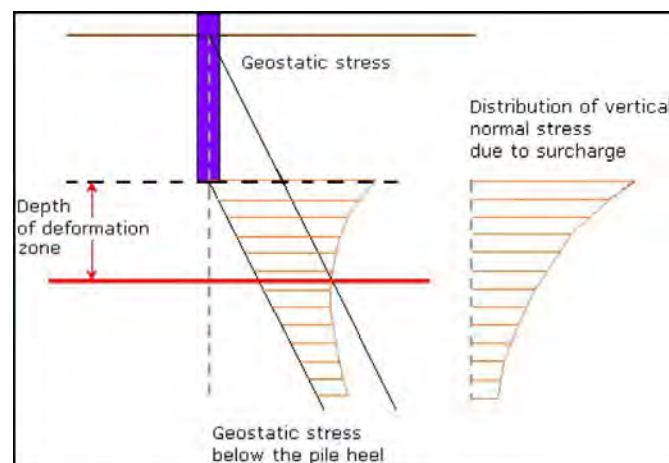
¹ Titan

با مقایسه نتایج بدست آمده از نرم افزار و آزمایش های متعدد محلی و آزمایشگاهی نتایج زیر حاصل می شود: ظرفیت اصطکاک نهائی جداره متناسب با افزایش ضریب اصطکاک خاک دانه ای افزایش پیدا می کند. این افزایش می تواند به سبب افزایش در فشار جانبی خاکی ناشی از اتساع خاک و سختی برهم کنش و سطح مشترک خاک-جداره باشد.

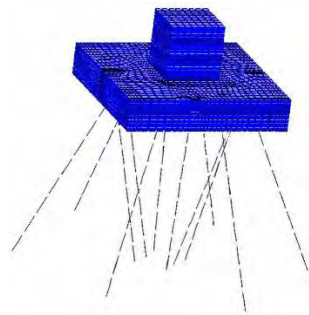
کلکان در سال ۲۰۱۳ [۱۶] در رابطه با مدل سازی غیر خطی سیستم فونداسیون میکروپایل ها، با داشتن سر شمع برای میکروپایل ها مطالعه کرده است. شکل (۱۰) مدل سازی وی را نشان می دهد. با بررسی تأثیرمیلگرد گذاری و چگونگی پخش آن ها در شالوده این نتایج حاصل می گردد: (۱) هرچه پخش میکروپایل ها در زیر فونداسیون بیشتر باشد مقدار باربری و تحمل مدل نیز افزایش می یابد و این افزایش در زاویه ای حدود ۲۵ و بیشتر از آن بسیار قابل ملاحظه است. (۲) بهبود ظرفیت باربری جانبی با مقدارآرماتورگذاری مصرف شده در سر شمع رابطه ای مستقیم دارد.



شکل (۸) مقایسه بین چیدمان دایره ای میکروپایل ها [۱۱]



شکل (۹) تعیین عمق منطقه تحت تأثیر نوک شمع در عمق خاک (راهنمای GEOS5) [۱۵]



شکل (۱۰) مدل سازی میکروپایل در نرم افزار [۱۶]

- با استفاده از نرم افزار Plaxis 3D [۱۷] میکروپایل ها به طور قائم و در حالت های تغییر در قطر، طول، چیدمان، فاصله و میزان بارگذاری میکروپایل ها مدل سازی می شوند [۱۸]. بر این اساس، نتایج زیر حاصل شده است:
- (۱) با آزمایش های مختلف بر روی میکروپایل های تک کاملاً مشخص شد که افزایش قطر، طول و تعداد میکروپایل ها رابطه مستقیمی با افزایش در ظرفیت باربری و کاهش در میزان نشست دارد.
 - (۲) در گروه میکروپایل ها نیز با توجه به مطالعات انجام گرفته، مقدار قطر و طول در افزایش بارگذاری مشابه با حالت میکروپایل تک دارای رابطه مستقیم می باشد.
 - (۳) در حالت کلی افزایش در میزان فاصله بین میکروپایل ها منجر به افزایش در میزان باربری و کاهش نشست در مرکز فونداسیون می شود.
 - (۴) با توجه به مطالعه انجام شده بر روی انواع آرایش فرارگیری گروه میکروپایل (سه تایی) می توان به این نتیجه رسید که هرچه چیدمان میکروپایل ها متعادل تر و سهم باربری هر یک آن ها مشابه با دیگر میکروپایل های گروه باشد، نشست کمتری اتفاق می افتد. در واقع چیدمانی که در آن میکروپایل ها، سطح باربری فونداسیون را بهتر و هماهنگ تر پوشش دهد، می تواند ظرفیت باربری بیشتری را نتیجه دهد.
 - (۵) انتخاب نوع چیدمان با توجه به فاصله بین میکروپایل ها نسبت به ابعاد فونداسیون نیازمند تعیین یک حد مرزی برای بهینه کردن طراحی ها و انتخاب نوع چیدمان با توجه به فواصل می باشد.

۳- نتیجه گیری

در این تحقیق مرور کلی بر نظریات مطرح شده درباره انواع مدل سازی های ریز شمع ها یا میکروپایل ها آمده است. با بررسی دقیق نتایج تحقیقات گذشته در آزمایشگاه، تاثیر انواع میکروپایل ها و نوع آرایش و چیدمان آن ها به روشنی دیده می شود. به طور کلی استفاده از ریزشمع ها یا میکروپایل ها تاثیر بسزایی در رفتار و افزایش ظرفیت باربری شالوده ها دارد. برای انجام بهتر این فرآیند، بایستی نوع آرایش، تعداد، جنس و سایر ویژگی های میکروپایل ها را به گونه ای انتخاب نمود تا بهترین عملکرد شالوده و درعین حال اقتصادی بودن طرح نهایی مد نظر باشد. این کار با استفاده از مطالعات و نتایج آورده شده، امکان پذیر می باشد.

۴- قدردانی

تحقیقات انجام شده در این مقاله با همکاری اداره کل آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان کرمان صورت گرفته که بدینوسیله از این آزمایشگاه قدردانی و تشکر می‌شود.

مراجع

- [1] Thoburn, S., and Hutchison, F.C., 1985. Underpinning. Surrey University Press, London, England.
- [۲] اداره راه و ترابری آمریکا، اداره بزرگراه های ایالات متحده، ۲۰۰۰. راهنمای جامع طراحی و اجرای ریز شمع ها. ترجمه غلامرضا نیازی، مجید محقق، بهنام محمود خانی (۲۰۱۱) زنجان.
- [3] Bruce, D.A., Bruce, M.E.C., and Traylor, R.P., 1999. High Capacity Micropiles – Basic Principles and Case Histories. GeoEngineering for Underground Facilities. Proc. of the 3rd National Conference of the Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers. Geotechnical Special Publication No. 90, Urbana-Champaign, IL, June 13-17, pp. 188-199.
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 1977. Standard Specification for Highway Bridges. Washington, DC, Revised 1992.
- [5] Brinkgreve, R. B. J., Broere, W., & Waterman, D., 2008. PLAXIS-2D (Version 9.0). Delft University of Technology and PLAXIS bv, The Netherlands.
- [6] Sivakumar B., Srinivasa M., 2003. Bearing capacity improvement using micropiles a case study.
- [7] Itasca Inc., 2002. User's Guide of the FLAC Software, Minneapolis, Minnesota, USA.
- [8] Shu Sh., Muhunthan B., 2005. Influence of Sand State on Network effect of Micropiles, Washington State University, Pullman.
- [9] Elkasabgy M., Naggat M., 2007. The axial capacity of Micropiles. International workshop on Micropiles, Toronto, Canada.
- [10] Stuedlein A., Gibson M., Horvitz G., 2008. Tension and compression micropile load test in gravelly sand, Washington, USA.
- [11] Rose A., 2009. Research Projects on Micropile Groups. City University, London.
- [12] Alter J., 2010. Introduction to Micropile analysis, design, and construction with TITAN Micropiles. Arizona Ram Jack Seminar.
- [13] Valentino R., 2011. Micropiles Made of Reinforced Polyurethane Resins: Load Tests and Evaluation of the Bearing Capacity. EJGE Journal, Italy.
- [14] Elsalfti A. K., 2011. Skin Friction of Micropiles Embedded in Gravelly Soils, Concordia University Montreal, Quebec, Canada.
- [15] Fine Ltd., GEO5 Geotechnical Software Suite, 2010. User's guide Manual Version 5.10. Los Angeles, California.
- [16] Kalkan E., 2013. Nonlinear Modeling of Micropile Foundation Systems. University of California Davis.
- [17] Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., & Swolfs, W. M., 2012. Plaxis 3D 2012 Manual. Plaxis bv, the Netherlands.
- [۱۸] خسروی، م. ظرفیت باربری میکروپایل ها در خاک های غیر چسبنده، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۹۳.