

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

ارزیابی اثر ضریب لاغری، قطر و طول میکروپایل بر ظرفیت
باربری ریزشمع در خاک‌های دانه‌ای با تراکم‌های مختلف با
استفاده از مدلسازی فیزیکی آزمایشگاهی

نگارنده:

حسین مرادی مقدم

اساتید راهنما:

دکتر رضا نادری

دکتر محسن کرامتی

بهمن ۱۳۹۷

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی ژئوتکنیک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حسین مرادی مقدم به شماره دانشجویی: ۹۵۱۳۷۶۴

تحت عنوان: ارزیابی اثر ضریب لاغری، قطر و طول میکروپایل بر ظرفیت باربری ریزشمع در خاک‌های دانه‌ای

با تراکم‌های مختلف با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی آزمایشگاهی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه

مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
			دکتر رضا نادری
			دکتر محسن کرامتی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر سعید گلیان		دکتر امیر بذرافشان مقدم
			دکتر محمد شامخی امیری

اثری کوچک است، خیلی کوچک و شاید هیچ؛
اما به یاد عهد قدیم و رسم ندیم، تقدیم می شود به:

اولین و مهربان ترین آموزگار زندگی ام، پروردگار یگانه ام؛

تقدیم به منشاء دستاوردها، حضرت علی ابن موسی الرضا (ع)؛

و

تقدیم به منجی هستی، حضرت مهدی (عج)؛

و در انتها

این اثر تقدیم می شود به پدر و مادر خوبم؛ آنان که امروز، بیشتر از دیروز و نه به اندازه ی فردا،

دوستشان دارم....

سپاس

سپاس **خدایی** را که اول و آخر وجود است، بی آنکه اولی بر او پیشی گیرد یا آخری پس از او باشد؛

خدایی که دست هر چشمی از دامان دیدارش کوتاه است و فهم هر کبوتر توصیف‌گری از پرواز در آسمان

وصفش عاجز....

برخود لازم می‌دانم از استادان ارجمندم جناب آقای **دکتر رضاناوری و دکتر محسن کرامتی** که بی‌دریغ

مرا در مسیر رسیدن به هدف‌هایم و انجام این پژوهش پشتیبانی کردند، نهایت تشکر و قدردانی را داشته

باشم. در پایان از **مهندس امین رامش** نیز به خاطر کمک‌های ایشان در انجام آزمایش‌ها متشکرم.

تعهد نامه

اینجانب حسین مرادی مقدم دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارزیابی اثر ضریب لاغری، قطر و طول میکروپایل بر ظرفیت باربری ریزشمع در خاک‌های دانه‌ای با تراکم‌های مختلف با استفاده از مدل سازی فیزیکی آزمایشگاهی تحت راهنمایی دکتر رضا نادری و دکتر محسن کرامتی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده

نیاز به ساخت و سازه‌های گوناگون، مهندسين عمران را با خاک‌های مسئله‌دار و مشکلاتی نظیر نشست و کمبود ظرفیت باربری مواجه ساخته است. از جمله اقدامات صورت گرفته در جهت تثبیت این خاک‌ها، استفاده از انواع روش‌های بهسازی می‌باشد. یکی از این روش‌های کاربردی، استفاده از میکروپایل‌ها یا همان ریز شمع‌ها به عنوان یک المان سازه‌ای در خاک می‌باشد. در این تحقیق و در یک برنامه آزمایشگاهی، پس از طراحی و ساخت دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بزرگ مقیاس، آزمایش‌های متعدد بارگذاری استاتیکی کرنش کنترل با نرخ جابه‌جایی 10 mm/min جهت بررسی پارامترهای مختلفی همچون طول و قطر میکروپایل‌ها در خاک‌های با تراکم نسبی مختلف انجام گرفته است. در این بررسی ها از نرم افزار SPSS به منظور تحلیل نتایج و تعیین اثر کمی پارامترها و روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک EPR به منظور پیش‌بینی رفتار میکروپایل‌ها استفاده شده است. اندازه طول میکروپایل‌ها به ترتیب ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ متر و اندازه قطرهای مورد استفاده به ترتیب ۱، ۲ و ۳ اینچ می‌باشد. خاک مورد استفاده ماسه استاندارد فیروزکوه می‌باشد که در تراکم‌های نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها علاوه بر تایید عملکرد و صحت نتایج دستگاه، تاثیر تقریباً ۱،۱ برابری پارامتر قطر نسبت به طول در تراکم‌های مختلف، تاثیر ۲،۱ برابری پارامتر تراکم نسبت به قطر در طول‌های مختلف و تاثیر ۲،۳ برابری پارامتر تراکم نسبت به طول در قطرهای مختلف میکروپایل را نشان می‌دهد. در نهایت ملاحظه می‌شود مدل EPR دارای دقت بالا در پیش‌بینی بوده و بر مبنای نتایج SPSS پارامترهای تراکم، قطر و طول به ترتیب دارای بیشترین اهمیت در ارزیابی مقدار ظرفیت باربری میکروپایل‌ها می‌باشند.

کلمات کلیدی : میکروپایل، ظرفیت باربری، مدل‌سازی آزمایشگاهی، تحلیل SPSS، مدل EPR

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: کلیات
۱-۱	تعریف مسئله
۱-۲	ضرورت انجام تحقیق
۱-۳	فرضیات و محدودیت ها
۱-۴	اهداف تحقیق
۱-۵	روش انجام تحقیق
۱-۶	ساختار پایان نامه
۹	فصل ۲: مروری بر ادبیات فنی
۲-۱	مقدمه
۲-۲	تعاریف، اصول و مبانی نظری
۲-۲-۱	معرفی ریزشمع
۲-۲-۲	سیستم طبقه بندی ریزشمع
۲-۲-۳	کاربردهای ریزشمع
۲-۲-۴	عوامل موثر در انتخاب ریزشمع ها
۲-۲-۵	اجزای ریزشمع
۲-۲-۶	روش اجرای ریزشمع
۲-۲-۷	محاسبات فنی
۲-۲-۸	مشخصات فنی اجرای ریزشمع
۲-۲-۹	کنترل کیفیت عملکرد
۲-۲-۱۰	مقایسه اجرای ریزشمع با سایر روش های تحکیم
۲-۳	مروری بر ادبیات موضوع
۲-۳-۱	تاریخچه ی مختصر میکروپایل ها
۲-۳-۲	مطالعات آزمایشگاهی
۲-۳-۳	مطالعات میدانی
۲-۳-۴	مطالعات تئوری، عددی و نرم افزاری
۲-۳-۵	مطالعات ترکیبی
۲-۳-۶	تاریخچه موردی میکروپایل
۲-۴	نتیجه گیری
۵۹	فصل ۳: روش تحقیق
۳-۱	مقدمه
۳-۲	خصوصیات مصالح مصرفی
۳-۲-۱	خصوصیات مصالح خاک
۳-۲-۲	خصوصیات مدل میکروپایل

۶۸	آزمایش های مدل سازی فیزیکی	۳-۳
۶۹	وسایل و دستگاه های مورد نیاز	۳-۳-۱
۷۳	روش انجام آزمایش	۳-۳-۲
۷۷	ظرفیت ژئوتکنیکی میکروپایل ها	۳-۴
۷۹	نرم افزار SPSS	۳-۵
۸۱	نرم افزار EPR	۳-۶

فصل ۴: ۸۳

نتایج و تفسیر آنها ۸۳

۸۴	مقدمه	۴-۱
۸۴	تعریف آزمایش مرجع	۴-۲
۸۷	ارزیابی اثر طول و قطر میکروپایل ها	۴-۳
۱۰۱	بررسی اثر کلاhek	۴-۴
۱۰۲	ارزیابی اثر تراکم نسبی خاک	۴-۵
۱۱۱	ظرفیت طراحی ژئوتکنیکی میکروپایل ها	۴-۶
۱۱۲	تحلیل نرم افزاری SPSS	۴-۷
۱۱۳	نمونه محاسبات تحلیل SPSS	۴-۷-۱
۱۱۵	نتایج تحلیل SPSS	۴-۷-۲
۱۱۷	تحلیل های نرم افزاری EPR	۴-۸
۱۲۲	جمع بندی و نتیجه گیری	۴-۹

فصل ۵: ۱۲۵

جمع بندی و پیشنهادها ۱۲۵

۱۲۶	مقدمه	۵-۱
۱۲۶	جمع بندی و نتیجه گیری	۵-۲
۱۲۹	پیشنهادها برای تحقیقات آینده	۵-۳

مراجع ۱۳۱

فهرست اشکال

۱۲	شکل (۱-۲) ریزشمع های دسته اول (براساس نحوه ی طراحی)
۱۲	شکل (۲-۲) ریزشمع های دسته دوم (براساس نحوه ی طراحی)
۱۴	شکل (۲-۳) طبقه بندی ریزشمع (بر اساس روش اجرا)

شکل (۲-۴)	اجزای ریزشمع	۲۰
شکل (۲-۵)	مراحل اجرای ریزشمع	۲۱
شکل (۲-۶)	روش های طراحی میکروپایل و مقایسه آن ها	۲۵
شکل (۷-۲)	آرما تور عاجدار (آرما تور تقویت)	۲۷
شکل (۲-۸)	آرما تور عاجدار تو خالی (آرما تور تقویت)	۲۷
شکل (۹-۲)	مقطع لوله های فولادی (آرما تور تقویت)	۲۸
شکل (۲-۱۰)	تاثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری دوغاب	۲۹
شکل (۲-۱۱)	سیستم ریز شمع زنبوری (تاریخچه ی مختصر میکروپایل ها)	۳۵
شکل (۲-۱۲)	نمودار تاثیر تراکم های نسبی مختلف خاک در میزان ظرفیت باربری	۳۶
شکل (۲-۱۳)	مدل فیزیکی شیروانی برای تثبیت با میکروپایل	۳۷
شکل (۲-۱۴)	اتاقک ساده؛ (a) شکل شماتیک، (b) تصویر واقعی	۳۸
شکل (۱۵-۲)	تغییرات اصطکاک محلی شمع در بارگذاری یکنواخت	۳۹
شکل (۲-۱۶)	اتاقک کالیبراسیون؛ (a) تصویر شماتیک، (b) تصویر واقعی	۴۰
شکل (۲-۱۷)	نمای کلی جعبه ی برش شفاف	۴۲
شکل (۲-۱۸)	شکل شماتیک سیستم FCV؛ (a) اجزای FCV در دانشگاه فلوریدای جنوبی (b) بارهای اعمالی در FCV	۴۳
شکل (۱۹-۲)	FCV اصلاح شده، (a) شکل شماتیک؛ (b) تصویر واقعی	۴۴
شکل (۲۰-۲)	توزیع تنش در FCV اصلاح شده، (a) قائم؛ (b) افقی	۴۵
شکل (۲-۲۱)	نمودار بار-جابه جایی در FCV به منظور نشان دادن تکرارپذیری تست ها	۴۵
شکل (۲-۲۲)	نمودارهای بار-جابه جایی در FCV، (a) فشار؛ (b) کشش	۴۶
شکل (۲-۲۳)	مجموعه کامل سیستم آزمایشگاهی مطالعه رفتار پی های نواری واقع بر خاک مسلح	۴۷
شکل (۲-۲۴)	نتایج بارگذاری استاتیکی؛ (الف) نمودار بار-زمان بر پی مسلح ($U/B=0.5$)، (ب) مقایسه نمودار بار-نشست پی های مسلح و غیر مسلح	۴۷
شکل (۲-۲۵)	نتایج بارگذاری سیکلی بر پی واقع بر خاک مسلح ($U/B=0.5$)، (الف) نمودار بار-زمان، (ب) نمودار بار-نشست	۴۸
شکل (۲-۲۶)	پاسخ بار-جابه جایی در تست های بارگذاری شمع در میکروپایل ها تحت کشش یا فشار	۵۱
شکل (۲-۲۷)	پوش لنگر خمشی؛ (a) میکروپایل منفرد، (b) گروه میکروپایل	۵۴
شکل (۲-۲۸)	اثر شیب میکروپایل ها در فرکانس های طبیعی سیستم خاک-میکروپایل	۵۴
شکل (۲۹-۲)	منحنی های صحت سنجی نیرو-جابه جایی؛ (a) در فشار استاتیکی، (b) در فشار سیکلیک	۵۵
شکل (۲-۳۰)	نتایج آزمایش های تجربی و تحلیلی برای بارگذاری ضربه ای	۵۶

شکل (۳۱-۲)	نتایج آزمایش های بارگذاری میکروپایل با سیکلهای متعدد بارگذاری-باربرداری	۵۸
شکل (۳۱-۳)	تصویر مصالح مصرفی؛ ماسه فیروزکوه و مدل میکروپایل	۶۰
شکل (۳۲-۲)	تصویر مجموعه الک ها و لرزاننده	۶۱
شکل (۳۳-۳)	نمودار دانه بندی نمونه های مختلف خاک (ماسه فیروزکوه)	۶۲
شکل (۳۴-۴)	تصویر وسایل استفاده شده برای آزمایش تعیین حداقل و حداکثر وزن مخصوص ماسه	۶۴
شکل (۳۵-۳)	دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس	۶۵
شکل (۳۶-۳)	ایجاد نمونه های میکروپایل در طول های مد نظر	۶۸
شکل (۳۷-۳)	نمای کلی از دستگاه مدلسازی فیزیکی بارگذاری بزرگ مقیاس	۶۹
شکل (۳۸-۳)	سیستم بارگذاری؛ سیستم پاورپک و اکچویتور	۷۱
شکل (۳۹-۳)	سیستم کنترل قرائت و ثبت داده ها؛ دیتالاگر، سیستم کامپیوتری	۷۲
شکل (۳۱۰-۳)	نمای کلی از سیستم بارش ماسه	۷۳
شکل (۳۱۱-۳)	وضعیت نمونه های میکروپایل و خاک پیش از اعمال بارگذاری استاتیکی	۷۴
شکل (۳۱۲-۳)	وضعیت نمونه های میکروپایل و خاک پس از اعمال بارگذاری استاتیکی	۷۵
شکل (۳۱۳-۳)	تخلیه مصالح ماسه از درون مخزن دستگاه	۷۵
شکل (۳۱۴-۳)	مکانیزم ظرفیت باربری میکروپایل ها با توجه به تغییر در تنش محصور کننده در خاک ماسه ای شل و متراکم	۷۵
شکل (۳۱۵-۳)	آماده سازی نمونه های خاک در دو تراکم نسبی ۳۰ درصد (بارش ماسه) و ۹۰ درصد (متراکم سازی)	۷۶
شکل (۳۱۶-۳)	میزان جابه جایی در ازای زمان در نرخ جابه جایی ۱۰ میلیمتر بر دقیقه	۷۷
شکل (۳۱۷-۳)	نمایی از نرم افزار SPSS	۸۰
شکل (۳۱۸-۳)	محیط نرم افزار EPR	۸۲
شکل (۴۱-۴)	نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطر ۱ اینچ در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد	۸۵
شکل (۴۲-۴)	نمودار جابه جایی-زمان میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطر ۱ اینچ در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد	۸۶
شکل (۴۳-۴)	نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطر ۱ اینچ در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد	۸۶
شکل (۴۴-۴)	نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با قطر ۱ اینچ و طول های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد	۸۹
شکل (۴۵-۴)	نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با قطر ۲ اینچ و طول های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد	۸۹

- شکل (۴-۶) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با قطر ۳ اینچ و طول های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد ۹۰
- شکل (۴-۷) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطرهای مختلف در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد ۹۰
- شکل (۴-۸) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با طول ۰/۷۵ متر و قطرهای مختلف در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد ۹۱
- شکل (۴-۹) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با طول ۱ متر و قطرهای مختلف در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد ۹۱
- شکل (۴-۱۰) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با قطر ۱ اینچ و طول های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد ۹۲
- شکل (۴-۱۱) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با قطر ۲ اینچ و طول های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد ۹۳
- شکل (۴-۱۲) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با قطر ۳ اینچ و طول های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد ۹۳
- شکل (۴-۱۳) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطرهای مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد ۹۴
- شکل (۴-۱۴) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با طول ۰/۷۵ متر و قطرهای مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد ۹۴
- شکل (۴-۱۵) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با طول ۱ متر و قطرهای مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد ۹۵
- شکل (۴-۱۶) میزان افزایش ظرفیت باربری (بر حسب درصد) به ازای افزایش طول ۵۰ درصدی میکروپایل در قطرهای متفاوت و تراکم های نسبی مختلف خاک ۹۶
- شکل (۴-۱۷) میزان افزایش ظرفیت باربری (بر حسب درصد) به ازای افزایش طول ۳۳ درصدی میکروپایل در قطرهای متفاوت و تراکم های نسبی مختلف خاک ۹۷
- شکل (۴-۱۸) میزان افزایش ظرفیت باربری (بر حسب درصد) به ازای افزایش قطر ۱۰۰ درصدی میکروپایل در طولهای متفاوت و تراکم های نسبی مختلف خاک ۹۸
- شکل (۴-۱۹) میزان افزایش ظرفیت باربری (بر حسب درصد) به ازای افزایش قطر ۵۰ درصدی میکروپایل در طولهای متفاوت و تراکم های نسبی مختلف خاک ۹۹
- شکل (۲۰-۴) نسبت میزان ظرفیت باربری کلاhek به میکروپایل به ازای جابه جایی در تراکم نسبی خاک ۳۰ درصد ۱۰۱
- شکل (۲۱-۴) نسبت میزان ظرفیت باربری کلاhek به میکروپایل به ازای جابه جایی در تراکم نسبی خاک ۹۰ درصد ۱۰۲

شکل (۴-۲۲)	نمودار بار-جابه جایی برای میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطر ۱ اینچ در خاک	
۱۰۴	های با تراکم نسبی مختلف	
شکل (۴-۲۳)	نمودار بار-جابه جایی برای میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطر ۲ اینچ در خاک	
۱۰۴	های با تراکم نسبی مختلف	
شکل (۴-۲۴)	نمودار بار-جابه جایی برای میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطر ۳ اینچ در خاک	
۱۰۵	های با تراکم نسبی مختلف	
شکل (۴-۲۵)	نمودار بار-تراکم نسبی برای میکروپایل های با طول ۰/۵ متر و قطرهای مختلف	
۱۰۵		
شکل (۴-۲۶)	نمودار بار-تراکم نسبی برای میکروپایل های با قطر ۱ اینچ و طول های مختلف	
۱۰۶		
شکل (۴-۲۷)	نمودار بار-جابه جایی برای میکروپایل با طول ۰/۷۵ متر و قطر ۱ اینچ در خاک	
۱۰۶	های با تراکم نسبی مختلف	
شکل (۴-۲۸)	نمودار بار-جابه جایی برای میکروپایل با طول ۰/۷۵ متر و قطر ۲ اینچ در خاک	
۱۰۷	های با تراکم نسبی مختلف	
شکل (۴-۲۹)	نمودار بار-جابه جایی برای میکروپایل با طول ۰/۷۵ متر و قطر ۳ اینچ در خاک	
۱۰۷	های با تراکم نسبی مختلف	
شکل (۴-۳۰)	نمودار بار-تراکم نسبی برای میکروپایل های با طول ۰/۷۵ متر و قطرهای مختلف	
۱۰۸		
شکل (۴-۳۱)	نمودار بار-تراکم نسبی برای میکروپایل های با قطر ۲ اینچ و طول های مختلف	
۱۰۸		
شکل (۴-۳۲)	نمودار بار-جابه جایی برای میکروپایل با طول ۱ متر و قطر ۱ اینچ در خاک های	
۱۰۹	با تراکم نسبی مختلف	
شکل (۴-۳۳)	نمودار بار-جابه جایی برای میکروپایل با طول ۱ متر و قطر ۲ اینچ در خاک های با	
۱۰۹	تراکم نسبی مختلف	
شکل (۴-۳۴)	نمودار بار-جابه جایی برای میکروپایل با طول ۱ متر و قطر ۳ اینچ در خاک های	
۱۱۰	با تراکم نسبی مختلف	
شکل (۴-۳۵)	نمودار بار-تراکم نسبی برای میکروپایل های با طول ۱ متر و قطرهای مختلف	
۱۱۰		
شکل (۴-۳۶)	نمودار بار-تراکم نسبی برای میکروپایل های با قطر ۳ اینچ و طول های مختلف	
۱۱۱		
شکل (۴-۳۷)	قابلیت اطمینان مدل از طریق داده های	
۱۱۹	آموزشی	
شکل (۴-۳۸)	قابلیت اطمینان مدل از طریق داده های	
۱۲۰	اعتبارسنجی	
شکل (۴-۳۹)	پیش بینی مدل EPR برای نمونه میکروپایل	
۱۲۱	با طول ۱ متر، قطر ۳ اینچ و تراکم نسبی ۹۰ درصد	

شکل (۴-۴۰) پیش بینی مدل EPR برای نمونه میکروپایل
با طول ۰٫۷۵ متر، قطر ۲ اینچ و تراکم نسبی ۹۰ درصد
۱۲۱.....

شکل (۴-۴۱) پیش بینی مدل EPR برای نمونه میکروپایل
با طول ۱ متر، قطر ۲ اینچ و تراکم نسبی ۹۰ درصد ۱۲۲..

فهرست جداول

جدول (۱-۲) جزئیات طبقه‌بندی ریزشمع (بر اساس روش اجرا).....	۱۵
جدول (۲-۲) معرفی روش طراحی و روش اجرا برای هر یک از کاربردهای ریزشمع.....	۱۶
جدول (۳-۲) مشخصات فنی آرماتور ساده استاندارد (آرماتور تقویت).....	۲۶
جدول (۲-۴) تعداد آزمایش پیشنهاد شده در آیین نامه FHWA.....	۳۱
جدول (۲-۵) لیستی از پژوهشگران و کارهای صورت گرفته در عرصه ی مدلسازی فیزیکی.....	۴۸
جدول (۲-۶) ظرفیتهای بار نهایی و جابهجاییهای متناظر میکروپایلها.....	۵۰
جدول (۲-۷) نتایج آزمایش بارگذاری.....	۵۷
جدول (۳-۱) اطلاعات دانه بندی نمونه اول، دوم و سوم (ماسه فیروزکوه).....	۶۲
جدول (۳-۲) جدول ارزیابی حداقل چگالی خاک ماسه.....	۶۴
جدول (۳-۳) جدول ارزیابی حداکثر چگالی خاک ماسه.....	۶۴
جدول (۳-۴) زاویه اصطکاک داخلی بدست آمده از آزمایش برش مستقیم.....	۶۶
جدول (۳-۵) مشخصات ماسه مورد استفاده (ماسه فیروزکوه).....	۶۷
جدول (۳-۶) خصوصیات نمونه های فولادی میکروپایل.....	۶۸
جدول (۳-۷) برنامه ی آزمایش ها.....	۷۶
جدول (۳-۸) خلاصه مقادیر آلفای باند میکروپایل ها.....	۷۹
جدول (۱-۴) ظرفیت باربریهای میکروپایل به ازای طولها و قطرهای مختلف در تراکم نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد.....	۸۸
جدول (۴-۲) میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات طول در قطرهای مختلف در تراکمهای نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد.....	۹۶
جدول (۴-۳) میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات قطر در طولهای مختلف در تراکمهای نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد.....	۹۸
جدول (۴-۴) میانگین افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش طول در قطرهای مختلف در تراکمهای نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد.....	۱۰۰
جدول (۴-۵) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل ها (بر حسب درصد) در تراکم نسبی ۹۰ درصد نسبت به تراکم نسبی ۵۰ درصد به ازای طولها و قطرهای مختلف میکروپایل.....	۱۰۳
جدول (۴-۶) نمونه محاسبات ظرفیت ژئوتکنیکی میکروپایل ها.....	۱۱۲
جدول (۴-۷) جدول نرمال سازی مقادیر پارامتر طول میکروپایل.....	۱۱۳
جدول (۴-۸) جدول نرمال سازی مقادیر پارامتر قطر میکروپایل.....	۱۱۳
جدول (۴-۹) جدول نرمال سازی مقادیر پارامتر تراکم نسبی خاک.....	۱۱۳
جدول (۴-۱۰) نمونه محاسبات رگرسیون غیر خطی.....	۱۱۳
جدول (۴-۱۱) نتایج رگرسیونهای غیر خطی به ازای تراکمهای ثابت.....	۱۱۵

- جدول (۴-۱۲) نتایج رگرسیونهای غیر خطی به ازای طولهای ثابت ۱۱۶
- جدول (۴-۱۳) نتایج رگرسیون های غیر خطی به ازای قطر های ثابت ۱۱۶
- جدول (۴-۱۴) نحوه تنظیم پارامترها برای روش EPR ۱۱۸
- جدول (۴-۱۵) میزان تاثیرگذاری کمی پارامتر تراکم در ارزیابی ظرفیت باربری میکروپایل ها ... ۱۲۳
- جدول (۴-۱۶) میزان تاثیرگذاری کیفی پارامتر تراکم در ارزیابی ظرفیت باربری میکروپایل ها ... ۱۲۳

فصل ۱ :

کلیات

۱-۱- تعریف مسئله

امروزه به منظور تثبیت و بهسازی زمین‌های سست و روانگرا و افزایش ظرفیت باربری در آن‌ها روش‌های بسیار گسترده و متنوعی پیشنهاد می‌شود. یکی از مناسب‌ترین و بهینه‌ترین این روش‌ها استفاده از سیستم میکروپایل می‌باشد که کاربرد آن به دلایلی نظیر افزایش سرعت عملیات اجرایی و کاهش هزینه‌ها، صرفه‌جویی در وقت، استفاده از مصالح کمتر، امکان تجهیز کارگاه و حمل سریع‌تر وسایل اجرا و کنترل نشست‌ها (به خصوص نشست‌های نامتقارن) در حال افزایش است. میکروپایل‌ها عناصر سازه‌ای هستند که معمولاً جهت تقویت و کاهش مقادیر نشست پی سازه‌ها و افزایش ظرفیت باربری در انواع خاک‌ها به کار برده می‌شوند. میکروپایل‌ها در واقع شمع‌های درجا با قطر کم (کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر) می‌باشند که از ترکیب فولاد و دوغاب تشکیل می‌شوند.

جهت دستیابی به یک طرح ایمن، اقتصادی و بهینه باید شناخت صحیحی از رفتار بار-نشست پی واقع بر خاک مسلح وجود داشته باشد. به همین جهت و با هدف رفع معایب و کاستی‌های موجود در پژوهش‌های صورت گرفته تاکنون و همچنین نزدیک سازی نتایج به حالات واقعی‌تر، با داشتن یک مدل فیزیکی با مقیاس کاهش یافته در آزمایشگاه و با تعیین اثر پارامترهای ضروری آن می‌توان نتایج بسیار کاربردی و مفیدی را در جهت استفاده هر چه بهتر و اقتصادی‌تر از میکروپایل‌ها استخراج نمود. اکثر مطالعات صورت گرفته تاکنون بر روی میکروپایل‌ها به صورت نرم‌افزاری و یا مطالعات موردی بوده است که در نهایت نتوانسته یک دید جامع و مناسب درمورد پارامترهای موثر بر ظرفیت باربری میکروپایل‌ها و بهبود شرایط خاک ارائه کند. از این جهت، مطالعات پیش‌رو با مقیاس آزمایشگاهی و با استفاده از دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بزرگ مقیاس به جهت ارزیابی اثر پارامترهای طول و قطر میکروپایل‌ها و همچنین اثر تراکم خاک بر مقدار ظرفیت باربری انجام گرفته است.

۲-۱- ضرورت انجام تحقیق

میکروپایل‌ها به عنوان یک المان مسلح کننده در خاک دارای کاربردهای وسیعی هستند که در دو بخش کلی استفاده در بستر پی سازه‌ها و اصلاح و بهسازی برجای خاک تقسیم‌بندی می‌شوند. انجام تحقیقات گسترده در مجامع علمی-تخصصی جهان بر روی میکروپایل‌ها روز به روز در حال افزایش است. در بسیاری از تحقیقات رفتار استاتیکی، دینامیکی و لرزه‌ای آن‌ها و چگونگی رفتار و معیارهای طراحی میکروپایل‌ها در خاک‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین امروزه دامنه استفاده از میکروپایل در سطح ایران و جهان گسترش فراوانی یافته است. لذا، در گام نخست انجام تحقیقات بیشتر بر روی رفتار میکروپایل‌ها و پارامترهای تاثیرگذار آن از جمله طول، قطر و ضریب لاغری به جهت همین کاربردهای وسیع و توسعه روز افزون ضروری به نظر می‌رسد.

در این پژوهش از یکسری تست بارگذاری استاتیکی به منظور ارزیابی رفتار میکروپایل‌ها استفاده گردیده است. در طراحی میکروپایل موارد عدم اطمینانی شامل ضریب اتصال خاک و شمع وجود دارد که معمولاً جهت ارزیابی طراحی از آزمایش بارگذاری استاتیکی استفاده می‌کنند. این آزمایش می‌تواند صحت طراحی و کیفیت اجرا و... را ارزیابی نموده و در صورت امکان می‌تواند با توجه به هماهنگی و سازگاری بین نتایج آزمایش بارگذاری و طراحی، ضریب اطمینان در طراحی را کاهش دهد و باعث شود نیروهای ایجاد شده در المان مسلح کننده خاک در صفحه گسیختگی در حالت حدی خود در نظر گرفته نشده و مقدار واقعی آن‌ها با توجه به تغییر مکان وارده بر خاک در زمان گسیختگی بدست آید.

در انتها لازم به ذکر است که اغلب تحقیقات صورت گرفته در زمینه رفتار میکروپایل‌ها تاکنون با استفاده از روش‌های عددی و نرم افزاری صورت گرفته است. مدل‌سازی‌های عددی با فرض رفتارهای خطی و غیرخطی به دلیل پیچیدگی‌های رفتار خاک مشکل است. مدل‌های ریاضی علیرغم ساده، سریع و کم هزینه بودن بر پایه فرضیاتی استوارند که ممکن است در طبیعت برقرار نباشند و از طرفی ممکن است تمام پدیده‌های فیزیکی حاکم بر مسئله به درستی در مدل نظری توصیف نشده باشند. از طرفی دیگر

استفاده از نتایج آزمایش‌های درجا و میدانی علیرغم صحت و دقت بالا به دلیل هزینه‌های سنگین و نیاز به تجهیزات خاص کمتر مد نظر طراحان می‌باشد. استفاده از مدل فیزیکی هرچند در مقیاس کوچکتری انجام می‌گردد، ولی با توجه به قابلیت کنترل دقیق هندسه و شرایط مرزی واقعی مدل فیزیکی، امکان شبیه‌سازی دقیقی داشته و خطای مدل‌سازی را به صفر نزدیک می‌سازد. با توجه به این که هر مدل‌سازی عددی و تست میدانی در نهایت دارای کمی و کاستی‌هایی می‌باشد، در این مطالعه سعی شده است با طراحی و ساخت دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بارگذاری بزرگ مقیاس، علاوه بر کاهش هزینه‌ها نسبت به پروژه‌های واقعی و تمام مقیاس، قابلیت اعتماد بسیار بالای نتایج از طریق ایجاد شرایط تنش و کرنش واقعی خاک تامین شود.

۳-۱- فرضیات و محدودیت‌ها

- در این مجموعه آزمایش‌ها به علت سختی انجام نمونه‌سازی‌ها، تنها از دو تراکم نسبی خاک در مدل‌سازی استفاده شده است.
- حجم جعبه مدل‌سازی دارای محدودیت ابعاد می‌باشد که به ناچار و با توجه به شرایط آزمایشگاهی انتخاب گردیده است.
- طول‌ها و قطرهای موجود در بازار بعضاً اندازه‌هایی با ابعاد بیشتر را شامل می‌شوند که در این مجموعه آزمایش‌ها با توجه به شرایط آزمایشگاهی ابعاد کوچکتری انتخاب شده‌اند.
- داده‌های ورودی به نرم افزارهای EPR و SPSS با توجه به حجم آزمایش‌ها اعمال گردیده که با توجه به حجم نسبتاً کم، نتایج تحلیل‌ها را با تردید مواجه کرده است.

۴-۱- اهداف تحقیق

هدف از این تحقیق بررسی جوانب مهم آزمایشگاهی میکروپایل‌ها و مطالعات پارامتری بر روی ظرفیت باربری میکروپایل و همچنین تحلیل نرم‌افزاری نتایج به دست آمده می‌باشد. اهداف این تحقیق در دو دسته‌ی "اصلی" و "جانبی" قرار می‌گیرد.

• اهداف اصلی

- ارائه‌ی خصوصیات میکروپایل‌ها و نیز مطالعات صورت گرفته در این زمینه؛
- انجام مطالعات آزمایشگاهی اولیه به منظور تعیین خصوصیات خاک مصرفی از جمله آزمایش دانه-بندی، وزن مخصوص حداقل و حداکثر خاک و آزمایش برش مستقیم؛
- انجام آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی و تعیین ظرفیت باربری میکروپایل‌ها با تغییر پارامترهای طول و قطر در یک تراکم نسبی ثابت خاک؛
- انجام آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی و تعیین ظرفیت باربری با تغییر پارامتر تراکم نسبی خاک به ازای طول‌ها و قطرهای ثابت میکروپایل.

• اهداف جانبی

- طراحی و ساخت دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بزرگ مقیاس و ارزیابی صحت عملکرد و نتایج دستگاه؛
- طراحی و ساخت سیستم بارش ماسه و ارزیابی عملکرد دستگاه؛
- بررسی اثر کلاهک؛
- بررسی میزان تاثیرگذاری پارامتر طول و قطر میکروپایل بر روی ظرفیت باربری در تراکم‌های نسبی مختلف خاک با استفاده از تحلیل نرم‌افزاری SPSS؛
- بررسی میزان تاثیرگذاری پارامتر قطر و تراکم نسبی خاک بر روی ظرفیت باربری در طول‌های مختلف میکروپایل با استفاده از تحلیل نرم‌افزاری SPSS؛

- بررسی میزان تاثیرگذاری پارامتر طول و تراکم نسبی خاک بر روی ظرفیت باربری در قطره‌های مختلف میکروپایل با استفاده از تحلیل نرم افزاری SPSS؛
- پیش‌بینی رفتار میکروپایل با استفاده از مدل EPR.

۵-۱- روش انجام تحقیق

در این پژوهش و در مرحله نخست به منظور شبیه سازی شرایط کرنش مسطح و تامین شرایط مدل-سازی فیزیکی با مقیاس نیمه واقعی، یک دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بارگذاری بزرگ مقیاس با قابلیت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی طراحی و ساخته شد. پس از طراحی و ساخت دستگاه یکسری آزمایش‌های اولیه به منظور شناخت خصوصیات خاک مورد استفاده (ماسه فیروزکوه) انجام گرفت. این آزمایش‌های اولیه عبارتند از: آزمایش برش مستقیم به منظور تعیین زاویه اصطکاک داخلی خاک در تراکم‌های مختلف، آزمایش تعیین وزن مخصوص حداقل و حداکثر خاک و در نهایت آزمایش دانه‌بندی به منظور پی بردن به توزیع اندازه دانه‌ها در نمونه خاک. در ادامه، طراحی و ساخت یک سیستم جدید دیگر تحت عنوان سیستم بارش ماسه در دستور کار قرار گرفت. با استفاده از این دستگاه دستیابی به تراکم‌های نسبی مشخص ماسه (موجود در مخزن دستگاه) بر مبنای روابط حجم مخزن و وزن خاک تسهیل گردید.

در این پژوهش، خاک به صورت محیط پیوسته و با مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر کلمب در نظر گرفته شده و میکروپایل‌ها از جنس فولاد و با مدل رفتاری الاستیک فرض شده‌اند. خاک مد نظر با تعدادی میکروپایل در مدل فیزیکی مسلح گردیده و سپس به ازای طول‌ها و قطرهای متفاوت و از پیش تعیین شده در تراکم‌های مختلف در شرایط خاک غیر چسبنده، مورد آزمایش قرار گرفته است. در نهایت، پس از اعمال بار استاتیکی محوری کرنش کنترل با نرخ جابه‌جایی 10 mm/min ، میزان ظرفیت باربری فشاری میکروپایل تحت جابه‌جایی‌های مختلف و در زمان‌های متفاوت به وسیله حسگرهای

اندازه‌گیری تعیین شده و نمودارهای آن ترسیم گردیده است. پس از رسم نمودارها و ارزیابی کمی میزان ظرفیت باربری نهایی به ازای طول و قطر مشخص میکروپایل و همچنین تراکم نسبی مد نظر خاک، تحلیل نرم افزاری SPSS به منظور تعیین میزان تاثیر گذاری هر یک از پارامترها انجام گرفته است. در انتها از مدل EPR نیز به منظور پیش‌بینی نمودارهای نیرو – جابه‌جایی میکروپایل‌ها استفاده شده است.

۶-۱- ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه پیش‌رو در ۵ فصل تنظیم شده است که خلاصه مطالب ذکر شده در هر فصل به شرح ذیل می‌باشد:

فصل اول تحت عنوان مقدمه و کلیات می‌باشد که در آن شرح مختصری از موضوع تحقیق و اهمیت آن و نیز اهداف آن آورده شده است. در انتهای این فصل همچنین روش تحقیق توضیح داده شده است. فصل دوم ضمن توضیحاتی اجمالی در خصوص ویژگی میکروپایل‌ها، به پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه پرداخته است.

فصل سوم به خصوصیات مصالح مصرفی، شرح دستگاه‌های استفاده شده در تحقیق، چگونگی ساخت نمونه‌ها، انجام آزمایش‌های مربوطه و معرفی نرم‌افزارهای SPSS و EPR پرداخته است. در فصل چهارم نتایج مربوط به آزمایش‌های صورت گرفته با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی، نتایج بدست آمده با نرم افزار SPSS و نمودارهای مدل پیش‌بینی EPR ارائه شده است.

فصل پنجم به نتیجه‌گیری‌های کلی و جمع‌بندی نتایج بدست آمده پرداخته و همچنین پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده ارائه کرده است.

فصل ۲ :

مروری بر ادبیات فنی

۱-۲- مقدمه

شمع‌ها مدت‌هاست باتوجه به کاربردهای گوناگون و مفیدشان، به طور وسیع و گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. محدودیت‌های اجرا و نصب، مهندسان و طراحان را به سمت طراحی و به کار بردن شمعی‌هایی با قطر کمتر برای اجرا و نصب آسان‌تر سوق داده است. در طول تاریخ، با توجه به موقعیت پروژه و اهمیت آن و همچنین محل کاربرد میکروپایل‌ها، مزایا و مشکلات استفاده از این ابزار تسلیح-کننده به روشنی مشخص شده است. بنابراین به منظور شناخت رفتار میکروپایل‌ها، بررسی خصوصیات و تاریخچه‌ی میکروپایل‌ها و شناسایی خلاءهای تحقیقاتی در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد.

۲-۲- تعاریف، اصول و مبانی نظری

در این بخش تلاش شده است تا علاوه بر معرفی میکروپایل‌ها، سیستم‌های طبقه‌بندی، کاربردها، عوامل موثر در انتخاب، اجزای تشکیل‌دهنده، روش اجرا، محاسبات فنی، مشخصات فنی اجرا، کنترل کیفیت عملکرد و مقایسه اجرای ریز شمع با سایر روش‌های تحکیم به اختصار بیان گردد.

۱-۲-۲- معرفی ریز شمع

بطور کلی در مواجهه با خاک‌های مسئله‌دار نظیر خاک‌های سست با قابلیت باربری کم، نشست‌پذیری زیاد، روانگرا، خاک‌های دستی و... دو راه پیش روی مهندسين ژئوتکنیک قرار دارد:

الف) استفاده از المان‌های باربر در خاک

ب) بهسازی و اصلاح خواص فیزیکی- مکانیکی توده خاک

هر یک از راه حل‌های فوق دارای روش‌ها و مشخصات مربوط به خود می‌باشد که طی سالیان متمادی توسعه فراوانی یافته‌است. برخی از تکنیک‌های ابداعی نیز ماهیتی ترکیبی از دو دسته فوق را داشته و مزایای هر دو دسته را تا حدودی شامل می‌شود. از آن دسته می‌توان به استفاده از ریزشمع‌ها به همراه تزریق دوغاب سیمان اشاره نمود.

شمع‌ها عموماً به دو گروه اصلی شمع‌های جابجایی^۱ و شمع‌های جانشینی^۲ تقسیم می‌شوند. ریزشمع‌ها در واقع شمع‌های جانشینی کوچکی (معمولاً با قطر کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر) هستند که غالباً با تقویت فولادی سبک و تزریق دوغاب سیمان همراه می‌باشند. ریزشمع‌ها می‌توانند با هر زاویه‌ای طراحی و اجرا شوند و برای مقاصد متفاوتی از جمله تحمل بارهای محوری و جانبی، جایگزینی شمع‌های معمولی یا به عنوان جزئی از سیستم ترکیبی خاک و شمع، بسته به هدف طراحی به کار برده شوند. ریزشمع علاوه بر آن که به عنوان یک المان باربر و مقاوم در برابر نشست عمل می‌کند، به دلیل تزریق دوغاب سیمان، سبب بهبود مشخصات مقاومتی خاک اطراف نیز می‌گردد.

۲-۲-۲- سیستم طبقه‌بندی ریزشمع

تقسیم بندی ریزشمع‌ها بر اساس دو معیار صورت می‌گیرد:

الف) نحوه طراحی

ب) روش اجرا

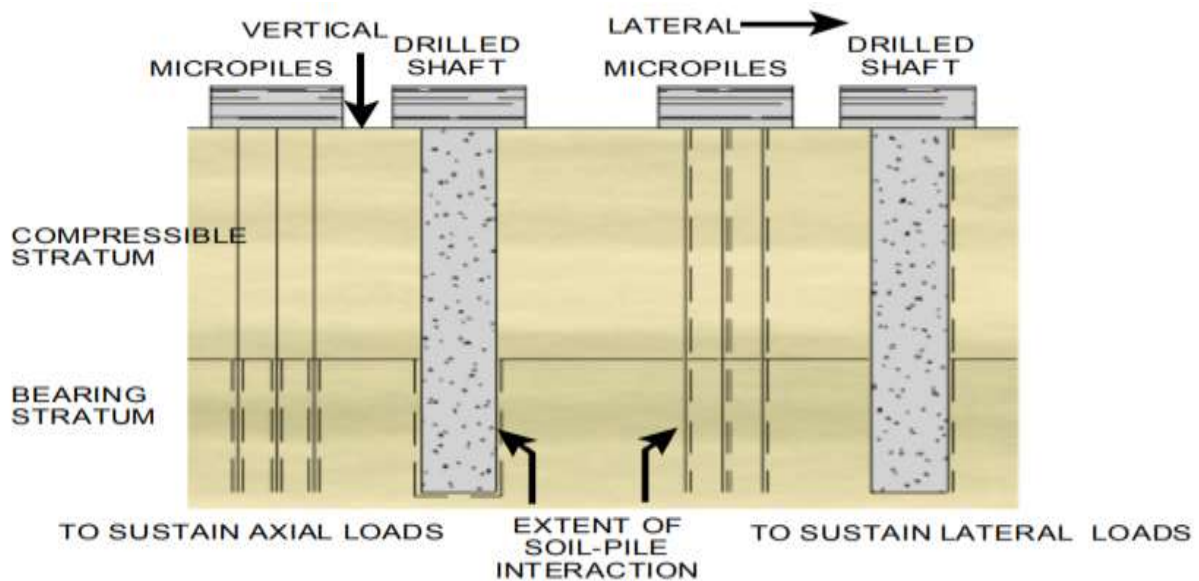
• طبقه‌بندی بر اساس نحوه‌ی طراحی

طراحی ریزشمع منفرد یا گروه ریزشمع، با طراحی ریزشمع‌های زنبوری بسیار متفاوت است. این امر سبب شده است تا دو دسته طراحی برای ریزشمع‌ها تعریف شود. در دسته اول، ریزشمع‌ها مستقیماً

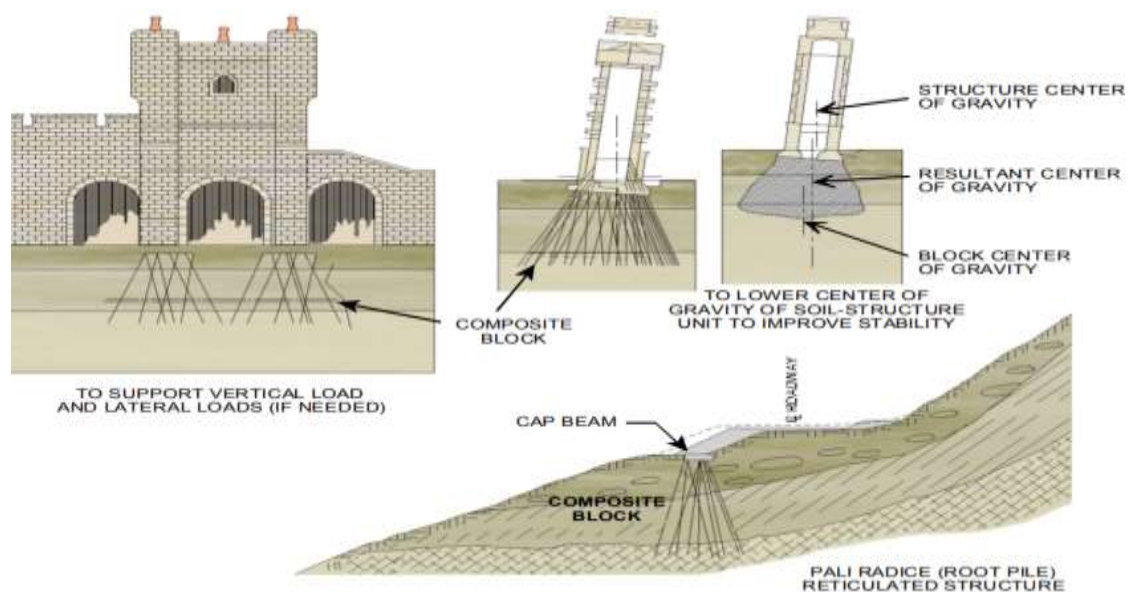
¹ displacement

² replacement

بارگذاری شده و مسلح‌کننده‌ها قسمت اعظم بار اعمالی را تحمل می‌نمایند. در دسته دوم، ریزشمع‌ها به صورت شبکه‌ای درون خاک قرار گرفته و یک سیستم ترکیبی خاک مسلح را ایجاد نموده که می‌تواند بارهای اعمالی را تحمل کند. این سیستم ترکیبی همان شبکه ریزشمع‌های زنبوری می‌باشد. ریزشمع‌های دسته اول و دوم به ترتیب در شکل‌های (۲-۱) و (۲-۲) نشان داده شده‌اند.



شکل ۲ (۱) ریزشمع‌های دسته اول (براساس نحوه طراحی) [۱]

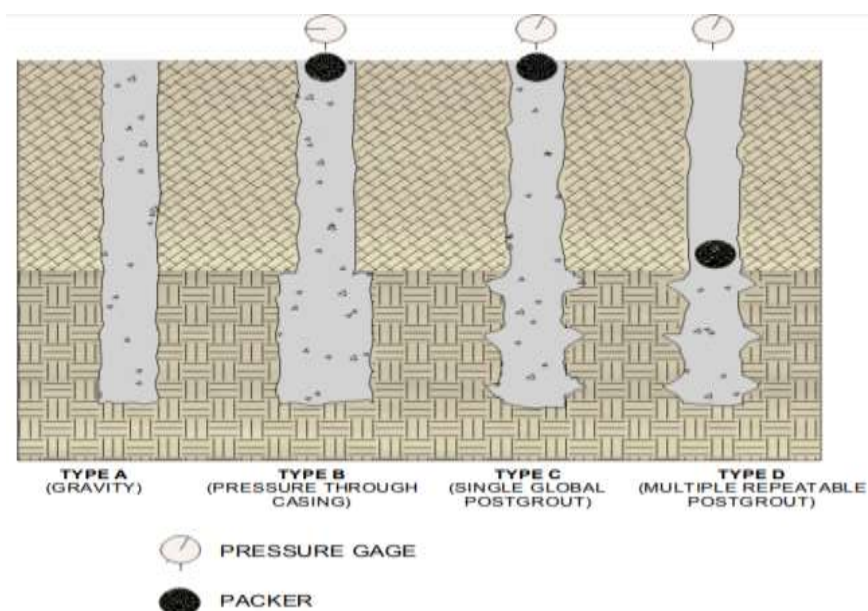


شکل ۲-۲ (۲) ریزشمع‌های دسته دوم (براساس نحوه طراحی) [۱]

در دسته اول، ریزشمع‌ها به عنوان جایگزین شمع‌های سنتی برای انتقال بار سازه به لایه‌های مقاوم زیرین استفاده می‌شوند. این ریزشمع‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که عملکرد منفرد داشته باشند حتی اگر به صورت گروهی اجرا شوند. در دسته دوم، ریزشمع‌ها دارای تقویت سبک‌تر می‌باشند زیرا مسلح-کننده‌ها مانند دسته اول مستقیماً تحت بارگذاری قرار نمی‌گیرند و این توده خاک و شمع است که بارهای اعمالی را تحمل می‌کند.

• طبقه‌بندی بر اساس روش اجرا

روش تزریق، مهمترین عامل تاثیرگذار بر مقاومت باند بین زمین و دوغاب می‌باشد. به گونه‌ای که مقاومت باند به طور مستقیم با تغییر روش تزریق، تغییر می‌نماید. در این طبقه‌بندی، معیار روش تزریق و فشار آن می‌باشد و استفاده از غلاف^۱ و آرماتور تقویت، تعیین‌کننده زیربخش‌های این طبقه‌بندی می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است، در این طبقه‌بندی ریزشمع‌ها به ۴ دسته تقسیم می‌شوند.



¹ Casing

شکل ۳-۲ (طبقه‌بندی ریزشمع (بر اساس روش اجرا) [۱]

- نوع A : در این روش اجرا، دوغاب تحت وزن خودش در محل قرار می‌گیرد.

- نوع B : در این روش دوغاب سیمان پس از خارج شدن غلاف فولادی حفاری از گمانه، تحت فشار به داخل گمانه تزریق می‌شود. فشار تزریق معمولاً بین ۰/۵ تا ۱ مگاپاسکال تغییر می‌کند و بایستی به گونه‌ای باشد که مانع از شکست هیدرولیکی گردد.

- نوع C : نوع C یک فرآیند دو مرحله‌ای را نشان می‌دهد که در آن ابتدا دوغاب سیمان تحت وزن خودش در داخل حفره قرار می‌گیرد (همانند نوع A). سپس، قبل از سخت شدن دوغاب اولیه (بعد از حدود ۱۵ تا ۲۵ دقیقه)، همان نوع دوغاب از طریق لوله‌های تزریق مشبک و بدون استفاده از پکر، در محل تماس دوغاب با زمین و در فشار حداقل ۱ مگاپاسکال تزریق می‌شود. این نوع ریزشمع فقط در فرانسه استفاده می‌شود و به روش IGU^۱ موسوم است.

- نوع D : نوع D یک فرآیند دو مرحله‌ای از تزریق مشابه نوع C، اما با تغییراتی در مرحله دوم می‌باشد. ابتدا دوغاب سیمان یکنواخت تحت وزن خودش مانند نوع A و C و یا تحت فشار، مانند نوع B در حفره قرار می‌گیرد. بعد از سخت شدن دوغاب اولیه، دوغاب بعدی از طریق لوله‌های تزریق مشبک تحت فشار ۲ تا ۸ مگاپاسکال تزریق می‌شود. در این روش از پکر استفاده می‌شود تا در صورت نیاز بتوان سطوح خاص را چندین مرتبه اصلاح نمود. این نوع ریزشمع که در فرانسه به روش IRS^۲ موسوم است، به طور گسترده در سایر کشورها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

¹ Injection Global et Unitaire

² Injection Répétitive et Sélective

جدول ۱-۲ (جزئیات طبقه‌بندی ریزشمع (بر اساس روش اجرا) [۱]

نوع میکروپایل و روش تزریق	نام زیر بخش	غلاف حفاری	تقویت
نوع A	A ₁	موقت یا بدون پوشش	بدون تقویت، تک آرماتور، قفسه آرماتور، لوله یا مقطع سازه‌ای
	A ₂	دائم در کل طول گمانه	خود غلاف حفاری
	A ₃	دائم، استوانه فوقانی فقط	غلاف حفاری در قسمت فوقانی و آرماتور یا لوله در قسمت زیرین
نوع B	B ₁	موقت یا بدون پوشش	تک آرماتور یا لوله (از قفسه به دلیل ظرفیت سازه‌ای پایین آن به ندرت استفاده می‌شود)
	B ₂	دائم در کل طول گمانه	خود غلاف حفاری
	B ₃	دائم، فقط در قسمت فوقانی	غلاف حفاری در قسمت فوقانی و آرماتور یا لوله در قسمت زیرین
نوع C	C ₁	موقت یا بدون پوشش	تک آرماتور یا لوله (از قفسه به دلیل ظرفیت سازه‌ای پایین آن به ندرت استفاده می‌شود)
	C ₂	استفاده نمی‌شود	-
	C ₃	استفاده نمی‌شود	-
نوع D	D ₁	موقت یا بدون پوشش (گمانه باز یا اوگر)	تک آرماتور یا لوله (از قفسه به دلیل ظرفیت سازه‌ای پایین آن به ندرت استفاده می‌شود)
	D ₂	دائم در کل طول گمانه	خود غلاف حفاری

نوع میکروپایل و روش تزریق	نام زیر بخش	غلاف حفاری	تقویت
	D ₃	دائم، استوانه فوقانی فقط	غلاف حفاری در قسمت فوقانی و آرماتور یا لوله در قسمت زیرین

۳-۲-۲- کاربردهای ریزشمع

بطور کلی کاربرد ریزشمع ها در مهندسی ژئوتکنیک مشتمل بر دو بخش "استفاده در بستر پی سازه ها" و "اصلاح و بهسازی برجای خاک" می باشد. عمده استفاده از ریزشمع در بستر پی سازه ها بوده که حدود ۹۵ درصد از کاربردهای ریزشمع را شامل می شود. برای هر یک از کاربردها، نوع خاصی از روش طراحی و اجرا مورد استفاده قرار می گیرد که خلاصه آن در جدول ذیل آمده است.

جدول ۲-۲ (معرفی روش طراحی و روش اجرا برای هر یک از کاربردهای ریزشمع

کاربرد	تقویت پی سازه ها	اصلاح و بهسازی خاک			
		پایداری شیب ها و ساخت دیواره های نگهبان	افزایش مقاومت خاک	کاهش نشست	حفظ پایداری سازه ای
روش طراحی	دسته اول	دسته اول و دوم	دسته دوم و به ندرت دسته اول	دسته دوم	دسته دوم
نوع اجرا	نوع A در سنگ و رس سخت و نوع B, C و D در خاک	نوع A و نوع B در خاک	نوع A و نوع B در خاک	نوع A در خاک	نوع A در خاک
میزان کاربرد	۹۵ درصد	۰ تا ۵ درصد			

۴-۲-۲- عوامل موثر در انتخاب ریزشمع‌ها

عوامل مختلفی در انتخاب ریزشمع برای پی سازه و پایداری شیب‌ها موثرند. این عوامل عبارتند از: شرایط فیزیکی، شرایط زیرزمینی، شرایط محیطی، سازگاری با سازه موجود، محدودیت ریزشمع‌ها و شرایط اقتصادی.

• شرایط فیزیکی

تجهیزات حفاری و تزریق مورد استفاده برای نصب ریزشمع‌ها، نسبتاً کوچک هستند و می‌توانند در نواحی محدود که امکان عبور تجهیزات نصب شمع وجود ندارد وارد شوند. ریزشمع‌ها می‌توانند در داخل دیوارها و پی‌های با ابعاد چند میلی‌متر نصب شوند. نصب آن‌ها تحت تأثیر نیروی فوقانی آن‌ها یا سایر موانع که در نصب شمع‌ها وجود دارد نمی‌باشد. تجهیزات نصب می‌توانند در نواحی با شیب تند و تیز نقاط دورافتاده حرکت کنند. همچنین عملیات حفاری و تزریق مرتبط با نصب ریزشمع‌ها اگر به شیوه صحیح اجرا گردد، باعث آسیب به ساختمان‌های مجاور نمی‌شود.

• شرایط زیرسطحی

ریزشمع‌ها می‌توانند در نواحی با شرایط زمین‌شناسی سخت، متغیر و غیر قابل پیش‌بینی مثل زمین‌های دارای قلوه سنگ و تخته سنگ و تاسیسات زیرزمینی یا واریزه‌های گوناگون و لنزهای نامرتبی از مواد و اجزای ضعیف نصب شوند. رس‌های نرم، ماسه‌های روان و سطح آب زیرزمینی بالا که در روش نصب سنتی شرایط نامساعد تلقی می‌شوند، کمترین تأثیر را بر روی نصب ریزشمع دارند. ریزشمع‌ها در سرتاسر جهان در سازندهای آهکی کارستی کاربرد دارند.

• شرایط محیطی

ریزشمع‌ها می‌توانند در خاک‌های پر خطر و آلوده نصب شوند. قطر کوچک آن‌ها باعث کاهش میزان تلفات در هنگام نصب نسبت به شمع‌های سنتی جانشینی می‌شود. مخلوط دوغاب می‌تواند به گونه‌ای

طراحی شود که در برابر فعالیت شیمیایی آب و خاک مقاوم باشد. در طرح اختلاط دوغاب، می‌توان از افزودنی‌ها استفاده نمود تا از زوال بتن در محیط‌های اسیدی و خورنده جلوگیری شود.

ریزشمع‌ها می‌توانند در نواحی حساس مثل نواحی با طبیعت شکننده نصب شوند. تجهیزات نصب آن‌ها به بزرگی و یا به سنگینی تجهیزات حفاری و نصب شمع‌های معمولی نیست و می‌تواند در نواحی باتلاقی (لجن زار) یا نواحی دیگر با خاک سطحی نرم و مرطوب، با کمترین تاثیر بر روی محیط استفاده شود. تجهیزات حفاری قابل حمل، به طور متداول در نواحی با دسترسی محدود استفاده می‌گردد. نصب ریزشمع همچنین صدا و لرزش کمتری نسبت به تکنیک‌های رایج نصب شمع‌های سنتی مانند شمع کوبی ایجاد می‌نماید. لرزش‌های ایجاد شده در حین حفاری، ابتدا به خاک و سپس از خاک به ساختمان‌های مجاور منتقل می‌شود. استفاده از ریزشمع در نواحی شهری قدیمی و صنعتی، می‌تواند مانع از ایجاد این اثر مخرب بر تجهیزات و سازه‌های حساس مجاور شود.

ریزشمع‌ها می‌توانند در مناطقی که یک لایه آبدار آلوده بر روی یک لایهٔ باربر قرار دارد، نصب شوند. بر خلاف شمع‌های کوبیدنی که ممکن است یک مجرای عمودی برای انتقال آلودگی ایجاد کنند، ریزشمع‌ها می‌توانند به گونه‌ای نصب شوند که مانع از آلودگی لایه‌های آبدار زیرین شوند.

• سازگاری با سازه موجود

ریزشمع‌ها می‌توانند به کلاhek شمع‌های موجود اضافه شوند. بنابراین نیاز به افزایش ابعاد پی از بین می‌رود. این عمل باعث تامین مقاومت فشاری، کششی و خمشی موردنیاز اضافی، هنگام افزایش بار سازه می‌شود. گاهی محدودیت‌های سازه‌های مجاور، امکان افزایش ابعاد کلاhek شمع موجود را به ما نمی‌دهند. بنابراین نیاز به سیستم‌های معمول نصب شمع از بین می‌رود.

• محدودیت ریزشمع‌ها

در برخی شرایط، ریزشمع‌های عمودی ممکن است از لحاظ ظرفیت باربری جانبی و کاهش هزینه‌ها دارای محدودیت باشند. همچنین فرض می‌شود به خاطر قطر نسبی کوچک آن‌ها، ظرفیت باربری

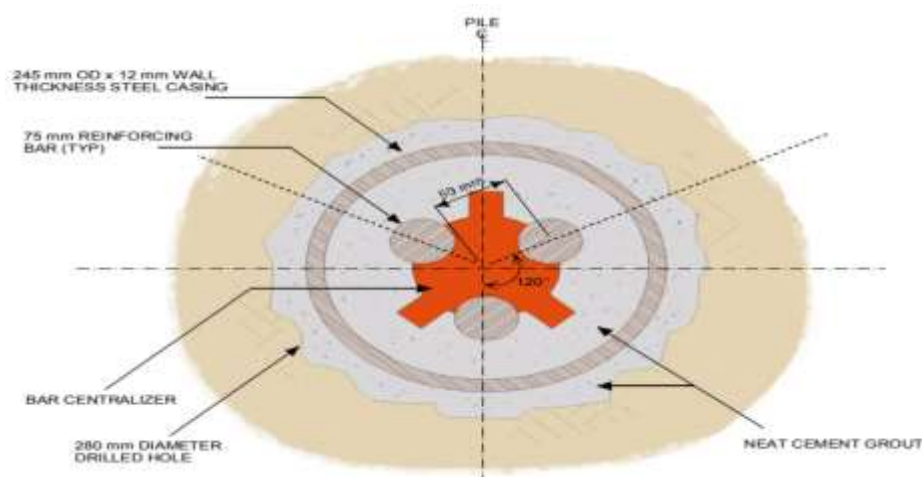
محوری محدودی داشته باشند. اگر چه در آزمایش، ریزشمع‌ها تا بار محوری ۴۵۰۰ کیلونیوتن در ماسه متراکم را تحمل کرده‌اند. بنابراین انتظار می‌رود با تحقیقات و آزمایشات بیشتر بتوان ظرفیت باربری جانبی را نیز افزایش داد. امکان نصب ریزشمع به صورت مایل به طراحان برای رسیدن به ظرفیت باربری جانبی مورد نیاز کمک می‌کند. به خاطر بالابودن ضریب لاغری (نسبت طول به قطر)، ریزشمع‌ها برای کاربردهای لرزه‌ای مرسوم در مناطقی که احتمال روانگرایی وجود دارد، مناسب نیستند. هزینه اجرای ریزشمع‌ها معمولاً از سیستم‌های نصب شمع سنتی و به خصوص شمع‌های کوبیدنی بیشتر می‌باشد. اما، در برخی شرایط خاص ریزشمع‌ها به عنوان گزینه دارای صرفه اقتصادی و در عین حال تنها راه حل ممکن برای ساخت و اجرای پروژه معرفی می‌گردند. استفاده از ریزشمع در پایدارسازی شیب‌ها در ارتفاع‌های محدود و بر اساس تجربیات محدود گذشته صورت گرفته است. به خاطر تعداد محدود پروژه‌های اجرا شده، پیشنهاد می‌شود که در کاربردهای پایدارسازی، شیب‌ها ابزار بندی و پایش شوند.

• شرایط اقتصادی

صرفه اقتصادی ریزشمع‌ها به فاکتورهای بسیاری بستگی دارد. بسیار مهم است که هزینه اجرای ریزشمع‌ها با توجه به شرایط فیزیکی، محیطی و زیرسطحی که در بالا توضیح داده شد، ارزیابی شود. به عنوان مثال برای یک سایت با خاک نرم، تمیز و یکنواخت و دسترسی آسان، ریزشمع نمی‌تواند راه حلی قابل رقابت با سایر راه‌کارها باشد. به هر حال، برای پی‌سازی حساس در زیر پایه‌های پل در نواحی مسکونی یا صنعتی قدیمی با ترافیک سنگین، ریزشمع‌ها می‌توانند به عنوان راه‌حلی با صرفه اقتصادی مطرح گردند. تحلیل هزینه‌ها بایستی با در نظر گرفتن کلیه هزینه‌های مربوط به پروژه و نه فقط هزینه‌های مربوط به حفاری، شمع کوبی و خاکریزی، اجرای پی، حمل مصالح پر خطر، پایین آوردن سطح آب زیر زمینی، کنترل فرسایش، محدودیت‌های دسترسی، بهسازی زمین و ... باشند.

۵-۲-۲- اجزای ریزشمع

در شکل (۲-۴) اجزای یک ریزشمع که به صورت ترکیبی (آرماتور و غلاف) مسلح شده است، به صورت شماتیک نشان داده شده است.

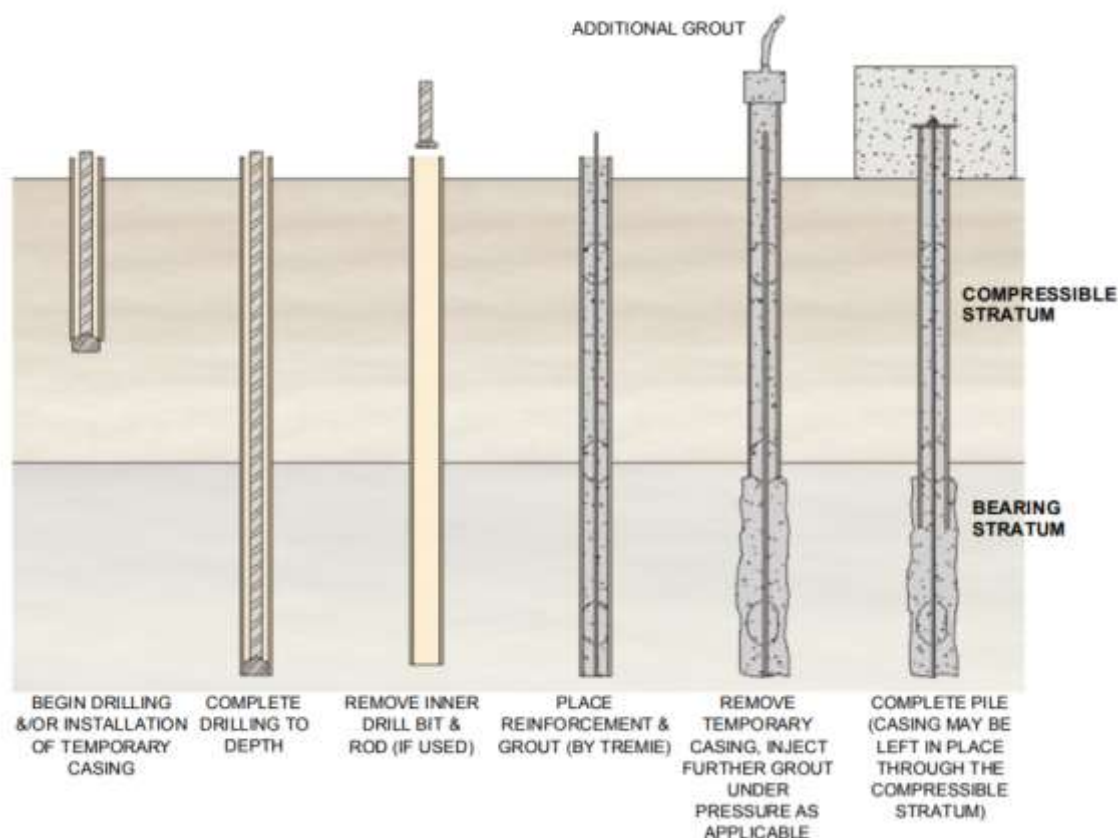


شکل (۲-۴) اجزای ریزشمع [۱]

همان گونه که در شکل نیز مشاهده می شود، اجزای اصلی ریزشمع ها عبارتند از: آرماتور تقویت، دوجاب سیمان، غلاف، فلنج (مهار انتهایی ریزشمع) و سنترالایزر.

۶-۲-۲- روش اجرای ریزشمع

روش اجرای ریزشمع مشتمل بر چهار مرحله ی حفاری (در صورت نیاز)، لوله کوبی، تزریق و تقویت می باشد که مراحل اجرای آن در ادامه تشریح شده است. به طور کلی تکنیک و تجهیزاتی که در حفاری و تزریق ریزشمع ها مورد استفاده قرار می گیرد، مشابه تجهیزات مورد استفاده در نیلینگ می باشد. در شکل (۲-۵) مراحل اجرای ریزشمع به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۵-۲ (مراحل اجرای ریزشمع [۱]

• حفاری

در صورتی که امکان کوبش لوله‌های ریزشمع از ابتدا به دلایل مختلف نظیر وجود کف‌سازی، بتن مگر، لایه متراکم خاک و... میسر نباشد، می‌بایست نسبت به انجام عملیات حفاری اقدام نمود. حفاری می‌بایست تا عمقی که امکان کوبش میسر گردد ادامه یابد. گاهی ممکن است حفاری در کل ارتفاع ریزشمع نیز صورت گیرد. در بخش‌های ریزشی، حفاری ممکن است به روش حفاری و تزریق مجدد تا رسیدن به عمق مورد نظر انجام گیرد.

• لوله‌کوبی

به منظور استقرار لوله‌های ریزشمع در محل گمانه، غالباً از عملیات لوله‌کوبی استفاده می‌گردد. برای این منظور در مرحله اول عملیات از لوله نوک‌تیز ریزشمع استفاده می‌شود و پس از فرو رفتن لوله اول،

لوله دوم به لوله اول متصل گردیده و کوبیده می‌شود و عملیات کوبش به همین منوال ادامه می‌یابد. جهت اتصال کامل لوله‌ها به یکدیگر علاوه بر استفاده از بوشن‌های رزوه شده، لوله‌ها به لبه بوشن نیز جوش داده می‌شوند. عملیات کوبش تا زمانی که امکان کوبیدن لوله‌ها میسر باشد ادامه می‌یابد و اگر در ازای ۳۰ ضربه متوالی لوله کوب، لوله بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر فرو نرود، عملیات کوبش لوله ریزشمع متوقف می‌گردد. در این حالت تا رسیدن به عمق طراحی، حفاری انجام شده و سپس لوله‌های مربوط به ریزشمع در درون گمانه نصب می‌گردند.

• تزریق

عملیات ساخت و تزریق دوغاب سیمان بایستی با دقت صورت گیرد. مجموعه دستگاه‌های تزریق از سه بخش میکسر اولیه، میکسر ثانویه و پمپ تزریق تشکیل می‌گردد. اختلاط در میکسر اولیه از نوع سیستم چرخش سریع آب^۱ می‌باشد و میکسر ثانویه از نوع پره‌ای می‌باشد.

ساخت دوغاب تزریق در همزن‌های میکسر اولیه صورت می‌گیرد. ابتدا آب به میزان مورد نظر ریخته شده و سپس متناسب با نسبت آب به سیمان (WCR) مورد نیاز، سیمان به آن افزوده می‌شود. زمان حداقل هم زدن دوغاب سیمان، ۳۰ ثانیه می‌باشد. نسبت آب به سیمان مورد استفاده با توجه به شرایط زمین بین ۰/۴ تا ۰/۵ مطلوب می‌باشد. پس از آماده شدن دوغاب، جهت نگهداری، دوغاب در داخل همزن ثانویه ریخته شده و سپس بوسیله پمپ‌های تزریق مخصوص تزریق می‌گردد. به دلیل اینکه دوغاب سیمان بایستی تحت فشار زیاد در لایه‌های خاک نفوذ کند، جهت تزریق دوغاب سیمان از یک‌سری شلنگ دو جداره به نام پکر^۲ استفاده می‌شود. پکرها بعد از این که به درون لوله ریزشمع فرستاده شدند جداره دوم آن‌ها بوسیله پمپ هوا باد می‌شود که با این کار پکر کاملاً به بدنه لوله می‌چسبد و مانع خروج دوغاب در حین تزریق از بالای لوله می‌شود. برای مثال مرحله اول بستن پکر

¹ circulation

² packer

برای ریزشمع ۸ تا ۱۰ متری در عمق ۶ متری گمانه بوده و پس از اتمام عملیات تزریق عمق ۶ متری، پکر در عمق ۴ متری بسته می‌شود و پس از اتمام تزریق در این مرحله، پکر در عمق ۲ متری بسته می‌شود و نهایتاً پس از تزریق در این مرحله، پکر سرچاهی بسته می‌شود و عملیات تزریق به اتمام می‌رسد. در صورتی که نشستی دوغاب از سطح یا ریزشمع‌های جانبی مشاهده شود، عملیات تزریق متوقف می‌گردد. در صورتی که درون لوله ریزشمع قبل از تزریق دوغاب سیمان، کثیف باشد بایستی درون لوله توسط فشار آب یا هوای فشرده تمیز شود.

• جایگذاری آرماتور و نصب فلنج

گام نهایی در اجرای ریزشمع، عملیات جاگذاری آرماتور تقویت در داخل لوله ریزشمع و نصب فلنج (در صورت نیاز) می‌باشد. بدیهی است که آرماتور تقویت می‌بایست قبل از گیرش سیمان، در داخل گمانه نصب شود. فلنج که به منظور ایجاد اتصال کامل بین ریزشمع و بتن فونداسیون و همچنین جلوگیری از برش پانچ سر ریزشمع در داخل بتن پی به کار می‌رود می‌بایست در آخرین مرحله به آرماتور تقویت ریزشمع جوش شود.

۷-۲-۲- محاسبات فنی

در شرایطی که ریزشمع‌ها با هدف تحکیم و بهسازی بستر پی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، محاسبات فنی ریزشمع‌ها مشابه با محاسبات فنی شمع‌های متداول است.

• کلیات طراحی

با توجه به بار محوری، جانبی و یا ترکیب این دو، طراحی ریزشمع شامل دو جنبه اساسی است:

- تعیین ظرفیت باربری ژئوتکنیکی ریزشمع، که مستلزم تخمین صحیح پارامترهای خاک در محل تماس خاک و دوغاب و تعیین سطح تنش بستر پس از نصب ریزشمع می‌باشد.

- تعیین ظرفیت باربری سازه‌ای و سختی ریزشمع، که عمدتاً وابسته به سطح مقطع ریزشمع مسلح شده و مقاومت مصالح می‌باشد.

• گام‌های طراحی

گام‌های طراحی عبارتند از: بررسی اطلاعات در دسترس درباره طرح، بررسی داده‌های ژئوتکنیکی و تخمین پارامترهای ژئوتکنیکی مورد نیاز برای طراحی، طراحی ژئوتکنیکی اولیه شمع، طراحی سازه‌ای اجزای مختلف شمع، ملاحظات طراحی ترکیبی ژئوتکنیکی و سازه‌ای و سایر ملاحظات طراحی ریزشمع.

• آیین‌نامه طراحی

طراحی ریزشمع بر اساس آیین‌نامه طراحی اداره بزرگراه‌های آمریکا^۱ انجام می‌گیرد [۲].

• روش‌های طراحی

- روش طراحی بار مجاز (SLD)^۲ یا تنش مجاز

در این روش طراحی که اغلب مورد استفاده مهندسان ژئوتکنیک قرار می‌گیرد، طراحی به گونه‌ای است که بار مجاز همواره از بار طراحی بزرگ‌تر می‌باشد.

- روش طراحی ضرایب بار یا مقاومت (LFD)^۳

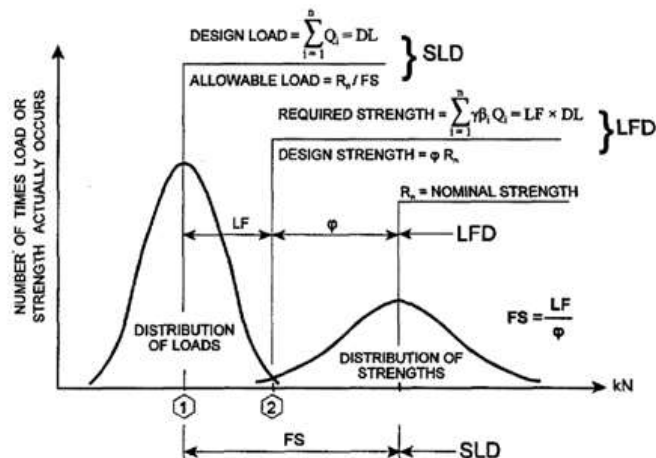
در این روش با استفاده از ضرایب افزایش بار و کاهش مقاومت، طراحی به گونه‌ای انجام می‌گیرد که همواره مقاومت طراحی از مقاومت مورد نیاز بزرگ‌تر باشد.

¹ Federal High Way Administration

² Service Load Design Method

³ Load Factor Design Method

در هر دو روش طراحی با اعمال ضریب اطمینان سعی می‌شود، عدم قطعیت‌های موجود در بارگذاری و خصوصیات خاک و مصالح که از ماهیت تصادفی ذاتی آن‌ها ناشی می‌شود، جبران گردد. در شکل زیر خلاصه‌ای از روش‌های طراحی و مقایسه آن‌ها ارائه شده است.



شکل ۶-۲ (روش‌های طراحی میکروپایل و مقایسه آن‌ها) [۱]

۸-۲-۲- مشخصات فنی اجرای ریزشمع

• مشخصات فنی حفاری

عملیات حفاری به روش‌های مختلف نظیر حفاری دورانی (Rotary) و یا دورانی-ضربه‌ای (D.T.H) صورت می‌پذیرد که بر حسب نیاز حفاری می‌تواند به صورت مایل یا قائم انجام گیرد.

• مشخصات فنی لوله‌های ریزشمع

لوله‌های ریزشمع معمولاً به قطر خارجی ۷۶ میلی‌متر و قطر داخلی ۶۸ میلی‌متر در قطعات دو متری می‌باشند. این لوله‌ها در دو سر رزوه شده و در یک سر به وسیله بوشن و جوش به یکدیگر متصل می‌شوند. قطعه اول هر ریزشمع به صورت سرنیزه می‌باشد. هر ریزشمع دارای ۸۰ سوراخ به قطر ۸

میلی‌متر، در هر متر طول می‌باشد. محیط داخلی لوله‌ها بایستی برقوزده باشد تا در تزریق دوغاب اثرات منفی نداشته باشد.

• مشخصات فنی آرماتور تقویت

فولاد مسلح‌کننده که در ریزشمع‌ها استفاده می‌شود، در یکی از ۴ دسته ذیل قرار می‌گیرد.

۱. آرماتورهای استاندارد^۱

آرماتور استاندارد با مقاومت تسلیم ۴۲۰ تا ۵۲۰ مگاپاسکال و قطر ۲۵ تا ۶۳ میلی‌متر که مشخصات فنی این آرماتورها در تصویر ذیل آمده است. از این آرماتورها به صورت تکی یا گروهی استفاده می‌شود. در صورت به کارگیری بیش از یک آرماتور، بایستی برای جداکردن آن‌ها از سنترالایزر استفاده نمود.

جدول ۲-۳ (مشخصات فنی آرماتور ساده استاندارد (آرماتور تقویت) [۱]

Steel Grade	Rebar Size, mm (in)	Area, mm ² (in. ²)	Yield Strength, kN (kip)
Grade 420 ⁽¹⁾	19 (#6)	284 (0.44)	117 (26)
	22 (#7)	387 (0.60)	160 (36)
	25 (#8)	510 (0.79)	211 (47)
Grade 520 ⁽²⁾	19 (#6)	284 (0.44)	147 (33)
	22 (#7)	387 (0.60)	200 (45)
	25 (#8)	510 (0.79)	264 (59)
	29 (#9)	645 (1.0)	334 (75)
	32 (#10)	819 (1.27)	424 (95)
	36 (#11)	1006 (1.56)	520 (117)
	43 (#14)	1452 (2.25)	751 (169)
	57 (#18)	2581 (4.0)	1335 (3000)
Grade 550 ⁽³⁾	63 (2.5 in)	3168 (4.91)	1747 (393)

Notes: ⁽¹⁾Grade 420 steel has yield stress of $f_y = 420$ MPa (60 ksi) and tensile strength of $f_u = 620$ MPa (92 ksi)

⁽²⁾Grade 520 steel has yield stress of $f_y = 520$ MPa (75 ksi) and tensile strength of $f_u = 690$ MPa (102 ksi)

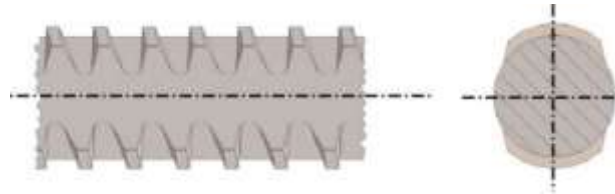
⁽³⁾Grade 550 steel has yield stress of $f_y = 550$ MPa (80 ksi) and tensile strength of $f_u = 700$ MPa (104 ksi)

۲. آرماتورهای عاج دار^۲

¹ Concrete Reinforcing Steel Bars (rebar)

^۲ Continuous-Thread Steel Bars

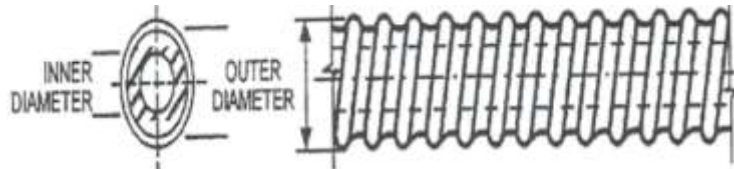
آرماتورهای عاج دار به طور گسترده برای تقویت در سیستم ریزشمع استفاده می‌شوند. این آرماتورها با مقاومت تسلیم ۴۲۰، ۵۲۰ و ۵۵۰ مگاپاسکال دارای قطر ۱۹ تا ۶۳ میلی‌متر بوده و بایستی دارای مشخصات فنی مطابق با استاندارد ASTM A615/AASHTO M31 باشد.



شکل ۷-۲ (آرماتور عاجدار (آرماتور تقویت) [۱]

۳. آرماتورهای عاج دار توخالی^۱

تو خالی بودن این آرماتورهای عاج دار این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان در حفاری گمانه ریزشمع از آن استفاده نمود.



شکل ۸-۲ (آرماتور عاجدار توخالی (آرماتور تقویت) [۱]

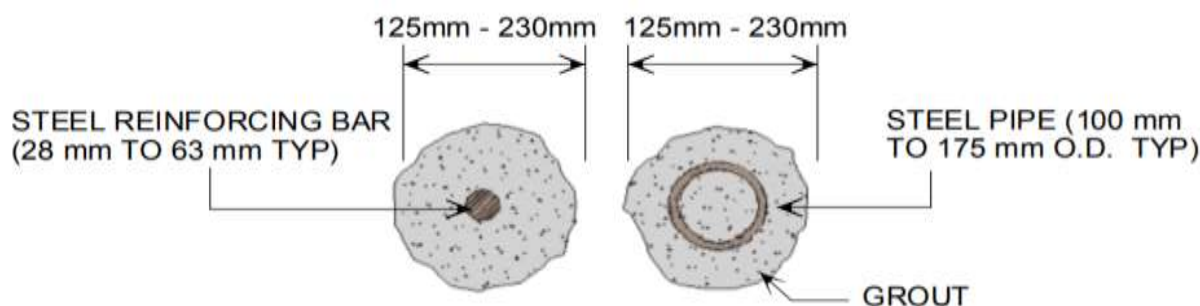
۴. لوله‌های فولادی^۲

از این لوله‌های فولادی هم به عنوان غلاف گمانه و هم به عنوان تقویت با قطر کمتر، در داخل غلاف اصلی می‌توان استفاده نمود. قطر این لوله‌ها معمولاً بین ۱۰۰ تا ۱۷۵ میلی‌متر و مقاومت تسلیم آنها

¹ Continuous-Thread Hollow –core Steel Bars

² Steel Pipe Casing

۲۴۱ مگاپاسکال می باشد. مشخصات فنی این مسلح کننده ها بایستی مطابق استاندارد ASTM A53, A519, A252, A106 باشد.



شکل ۹-۲ (مقطع لوله های فولادی (آرماتور تقویت) [۱]

• مشخصات فنی تزریق

۱. فشار تزریق

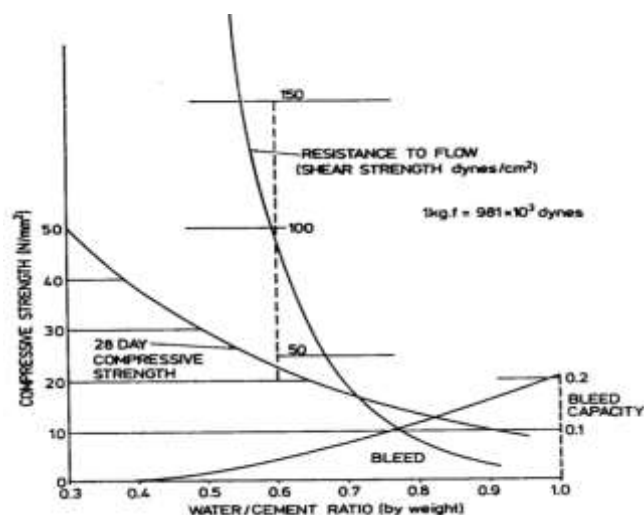
فشار تزریق در مراحل مختلف تزریق، در اعماق مختلف، تحت تاثیر جنس زمین و شرایط ژئوتکنیکی متغیر می باشد. حداکثر فشار تزریق به ۱۰ اتمسفر محدود می گردد.

۲. مقدار سیمان مصرفی

باتوجه به شرایط ژئوتکنیکی و میزان باربری طراحی ریزشمع ها، مقدار سیمان برآوردی معادل هر متر طول ریزشمع می تواند تا ۱۰۰ کیلوگرم باشد. البته با توجه به این امر که باید تزریق تا فشار ۱۰ اتمسفر ادامه یابد، ممکن است مقدار سیمان از برآورد اولیه بیشتر گردد. البته مقدار سیمان مصرفی در خاک های مختلف با هم متفاوت بوده و رابطه مستقیم با ابعاد دانه ها، تراکم، شرایط آب زیرزمینی و... دارد.

۳. نسبت آب به سیمان دوغاب تزریق

نسبت آب به سیمان در دوغاب تزریق مورد استفاده، ۰/۴ تا ۰/۵ توصیه می شود. اما با توجه به شرایط اجرا می تواند بین ۰/۵ تا ۱/۵ نیز متغیر باشد. شکل زیر تاثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری دوغاب را نشان می دهد.



شکل ۱۰-۲) تاثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری دوغاب [۱]

۴. نوع سیمان مصرفی

نوع سیمان مصرفی در ملات تزریق سیمان از نوع سیمان پرتلند تیپ دو و یا سیمان تیپ پنج با توجه به شرایط شیمیایی محل مورد نظر تعیین می‌گردد.

۵. آب مصرفی

آبی که در تهیه دوغاب تزریق بکار می‌رود، باید تمیز و صاف بوده و دارای کلیه شرایط لازم برای آب مصرفی در ساخت بتن باشد. آب مصرفی بایستی عاری از هر نوع ماده‌ای از قبیل اسیدها، قلیاها، مواد قندی، نمک‌ها و مواد آلی که منجر به ایجاد صدمه به بتن می‌شود باشد. آب مورد استفاده در ساخت دوغاب تزریق باید دارای ذرات جامد معلق کمتر از ۰/۲ درصد، مواد محلول کمتر از ۳/۵ درصد، کلر کمتر از ۱ درصد، درصد سولفات کمتر از ۰/۳ و درصد قلیایی کمتر از ۰/۰۶ باشد. در حالت کلی آب قابل شرب جهت ساخت دوغاب مناسب می‌باشد.

۹-۲-۲- کنترل کیفیت عملکرد

برای اطمینان از اینکه ریزشمع‌ها قابلیت تحمل بار طراحی در نظر گرفته شده را بدون جابجایی اضافی و با ضریب اطمینان کافی در طول عمر خدمت خود دارا می‌باشند، آزمایش بارگذاری صحرایی بر روی ریزشمع‌ها انجام می‌گیرد. علاوه بر آن با استفاده از این تست‌ها امکان کنترل عملکرد پیمانکار در حین اجرا و پس از عملیات حفاری، نصب و تزریق وجود خواهد داشت.

در تمامی آزمایش‌های بارگذاری مقاصد پیش‌رو مد نظر می‌باشند: رسیدن به یک بار ماکزیمم از پیش تعیین شده، رسیدن به جابجایی محوری از پیش تعیین شده، رسیدن به آستانه خزش از پیش تعیین شده.

آزمایش‌های بارگذاری به ۴ دسته کلی تقسیم می‌شوند:

• آزمایش نهایی^۱

در این آزمایش، بارگذاری تا مرحله ایجاد گسیختگی (بدون افزایش بار تغییر مکان‌ها افزایش می‌یابد) بین خاک و دوغاب ادامه می‌یابد.

• آزمایش تأیید^۲

این آزمایش برای کنترل این که آیا روش اجرا، قابلیت تامین مقاومت باند در نظر گرفته شده را دارد، انجام می‌گیرد. بزرگی بار آزمایش با توجه به ضریب اطمینان در نظر گرفته شده تعیین می‌گردد. به عنوان مثال اگر ضریب اطمینان ۲/۵ در نظر گرفته شده باشد، بار آزمایش ۲۵۰ برابر بار طراحی می‌باشد. در آزمایش تایید، ریزشمع ضرورتاً به نقطه گسیختگی نمی‌رسد. این آزمایش معمولاً بر روی ریزشمع "قربانی" پیش از آغاز ساخت انجام می‌شود. همچنین در حین اجرا، برای تعیین ظرفیت‌ها در شرایط

¹ Ultimate Test

² Verification Test

مختلف خاک و روش‌های متفاوت اجرا انجام می‌شود. تعداد این آزمایش مطابق جدول ذیل تعیین می‌گردد.

جدول ۲-۴) تعداد آزمایش پیشنهاد شده در آیین نامه [۱] FHWA

تعداد آزمایش	تعداد ریزشمع
۱	۱-۲۴۹
۲	۲۵۰-۴۹۹
۳	بیشتر از ۵۰۰

۱۰-۲-۲- مقایسه اجرای ریزشمع با سایر روش‌های تحکیم

ریزشمع در مقایسه با سایر روش‌های بهسازی خاک دارای ویژگی‌های بارزی می‌باشد که در ذیل به صورت فهرست‌وار به آن‌ها اشاره می‌گردد.

• بعد فنی

ریزشمع از یکسو با دارا بودن عناصر تقویت شامل غلاف ضخیم فولادی و آرماتور تقویت، قابلیت انتقال و پخش بار به لایه‌های مقاوم زیرین و نیز کنترل نشست به دلیل سختی بالای فولاد و تقویت عمقی خاک را دارا می‌باشد. از سوی دیگر بدلیل تزریق دوغاب سیمان، مشخصات مکانیکی خاک، نظیر سختی، تراکم پذیری، ظرفیت باربری، زاویه اصطکاک و چسبندگی را نیز بهبود می‌بخشد. لذا ریزشمع در مقایسه با سایر روش‌ها مانند حفاری و تزریق، تثبیت خاک با سیمان و یا آهک، تراکم دینامیکی و استفاده از ژئوسنتتیک‌ها که صرفاً خصوصیات مکانیکی خاک را تغییر می‌دهند و یا استفاده از شمع که صرفاً به عنوان عنصر باربر عمل می‌کند، بدلیل عملکرد مرکب (استفاده از عناصر باربر و اصلاح خاک) دارای برتری می‌باشد. لازم به ذکر است، به علت تزریق دوغاب سیمان و افزایش چشمگیر چسبندگی بین

جدار ریزشمع و توده خاک، استفاده از ریزشمع با قطر کم و با عمق نفوذ کمتر نسبت به شمع‌های بتنی یا فولادی قطور و عمیق، قابلیت تامین باربری لازم و کنترل نشست پی را خواهد داشت. همچنین بایستی توجه نمود که عملیات کوبش ریزشمع‌ها باعث انتقال انرژی جنبشی و ارتعاشی به توده خاک گردیده و منجر به تحکیم و تراکم توده خاکی اطراف ریزشمع خواهد شد. این امر به خصوص در خاک‌های دانه‌ای مشهودتر می‌باشد. همچنین در شرایطی که به علت وجود لایه‌های متراکم زیرسطحی، کوبش شمع‌های قطور مشکل یا غیر ممکن می‌باشد، ریزشمع می‌تواند بهترین راه حل باشد.

• بعد اجرایی

ماشین‌آلات اجرای ریزشمع در مقایسه با ماشین‌آلات اجرایی سایر روش‌ها دارای ابعاد و حجم کمتری می‌باشند، لذا علاوه بر آن که دارای قابلیت حمل و جابجایی آسان در کارگاه می‌باشند، امکان اجرای عملیات در چند جبهه کاری مختلف بدون تداخل کاری را فراهم می‌نماید. با توجه به ابعاد کوچک بدنه ریزشمع، قطر ناچیز حفاری و همچنین کوبش ریزشمع با انرژی کم، میزان لرزش و سایر اثرات جانبی بر روی سازه‌های مجاور در مقایسه با سایر روش‌ها نظیر اجرای شمع، به حداقل ممکن کاهش می‌یابد. یکی از برترین ویژگی‌های ریزشمع قابلیت اجرای بسیار ساده در شرایط وجود آب زیر زمینی است. در مناطقی که سطح آب زیر زمینی بالا بوده و حفاری‌های با قطر بزرگ جهت اجرای شمع‌های بتنی نیازمند پایدارسازی دیواره چاهک‌ها و تخلیه آب زیرزمینی می‌باشد، اجرای ریزشمع در سطح زمین و تزریق دوغاب سیمان از داخل آن با سرعت فراوان انجام پذیرفته و به علت چگالی و ویسکوزیته بیشتر دوغاب سیمان، آب حفره‌ای در اثر فشار دوغاب سیمان تخلیه و با دوغاب سیمان جایگزین می‌گردد.

• بعد اقتصادی

با توجه به این امر که اجرای ریزشمع مبتنی بر استفاده از حجم کم مصالح مشتمل بر فولاد و سیمان، هزینه‌های پائین تجهیز کارگاه و نیز حجم بالای کار نیروی انسانی در زمان کوتاه می‌باشد، روش ریزشمع

در مقایسه با سایر روش‌های بهسازی نظیر اجرای شمع بتنی و فولادی، تثبیت با سیمان، اجرای ستون-های شنی، تراکم دینامیکی و... که مبتنی بر استفاده از حجم زیاد مصالح و یا بکارگیری ماشین‌آلات سنگین و گران‌قیمت می‌باشند، اقتصادی‌تر است.

• تضمین کیفیت عملکرد

انجام تست بارگذاری ریزشمع با روش‌های ساده و ارزان یکی از مزایای بسیار بزرگ این روش در مقایسه با روش‌های دیگر نظیر اجرای شمع‌های قطور بتنی یا فولادی می‌باشد. با توجه به باربری کمتر ریزشمع‌ها نسبت به شمع‌های قطور و عمیق، انجام تست بارگذاری با استفاده از جک‌های سبک، با تامین نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاهی کافی، با دقت بالا و به سادگی امکان‌پذیر خواهد بود. با استفاده از نتایج تست بارگذاری ریزشمع، امکان بررسی رفتار، میزان باربری، نشست‌های الاستیک و تغییر شکل‌های پسماند در حین بارگذاری وجود خواهد داشت. بدین ترتیب امکان ارزیابی صحت فرضیات طراحی فراهم گردیده و امکان تعدیل و تغییر طرح، تعداد و چیدمان ریزشمع‌ها با توجه به مشاهده رفتار واقعی و میزان باربری نهایی آن‌ها در محل وجود خواهد داشت. علاوه بر آن مطابق استاندارد، تست بارگذاری بایستی تنها بر روی ۵ درصد از ریزشمع‌های اجرا شده انجام گیرد.

• مدت زمان اجرا

همان گونه که قبلاً ذکر گردید، اجرای ریزشمع بدلیل سهولت فراوان اجرایی، امکان اجرا در چند جبهه مختلف کاری و اجرای پی در پی و همزمان کلیه مراحل ساخت، در مقایسه با روش‌های دیگر از سرعت بسیار بالایی برخوردار خواهد بود. همچنین عدم نیاز به امکانات خاص برای تجهیز و در نتیجه عدم اتلاف وقت جهت آغاز عملیات اجرایی در مقایسه با سایر روش‌ها، از مزیت‌های این روش به حساب می‌آید.

۲-۳- مروری بر ادبیات موضوع

در این بخش و در ابتدا تاریخچه‌ای مختصر از میکروپایل‌ها ارائه خواهد شد. سپس، تحقیقات انجام گرفته بر روی شمع‌ها و میکروپایل‌ها بر اساس مطالعات آزمایشگاهی، میدانی و عددی صورت گرفته مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در انتها نیز مطالعات ترکیبی و تاریخچه موردی میکروپایل‌ها بیان خواهد شد.

۲-۳-۱- تاریخچه مختصر میکروپایل‌ها

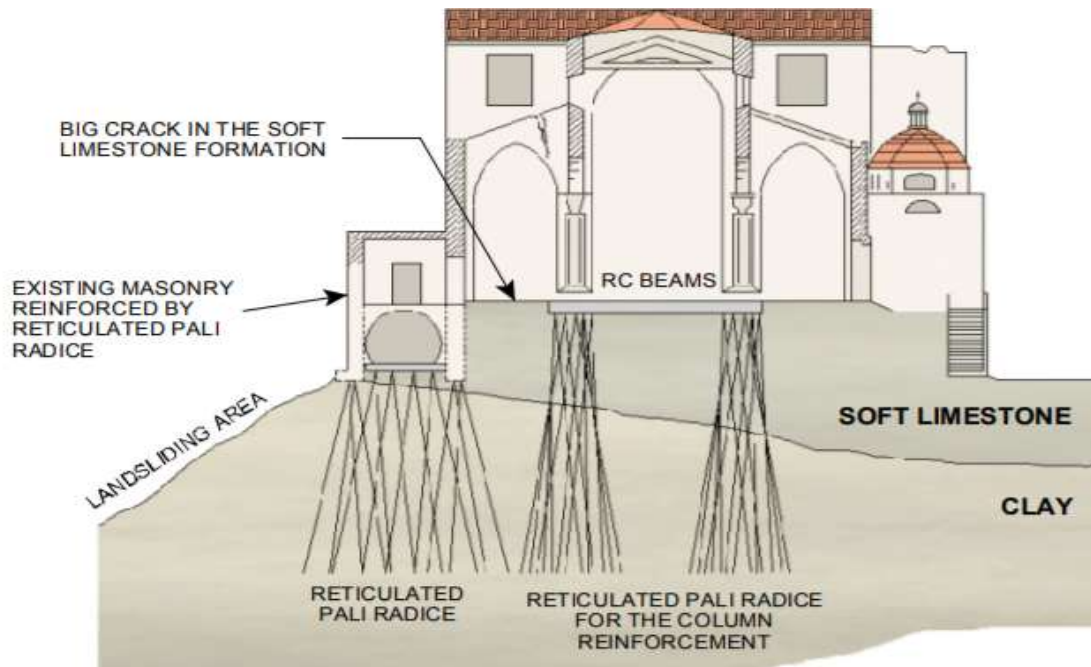
ریزشمع‌ها در اوایل دهه ۱۹۵۰ در ایتالیا به منظور تقویت پی ساختمان‌های تاریخی و آثار باستانی، که به مرور زمان و به خصوص در طول جنگ جهانی دوم دچار آسیب شده بودند، ابداع شدند. پیمانکار ایتالیایی به نام فوندیدایل^۱ اولین بار شمع‌های ریشه‌ای^۲ را معرفی نمود. این شمع‌های درجا ریز کوچک دارای قطر کمی بودند که غالباً با مسلح‌کننده فولادی سبک و تزریق دوغاب سیمان تقویت شده بودند. در ابتدا، کاربرد اغلب ریزشمع‌ها به تقویت زیر سازه‌های موجود در محیط‌های شهری محدود می‌شد، ولی در سال ۱۹۵۷ نیازهای جدید مهندسی منجر به معرفی سیستم‌های جدید موسوم به ریزشمع‌های زنبوری^۳ گردید. این سیستم همان گونه که در شکل (۱۱-۲) نشان داده شده است شامل شبکه‌ای سه بعدی از ریزشمع‌های قائم و مورب بوده که یک سازه ترکیبی از خاک و شمع را ایجاد می‌نماید و به طور جانبی محدود شده است. فوندیدایل در سال ۱۹۶۲ از این روش برای تقویت ساختمان‌های تاریخی انگلستان استفاده نمود. همچنین در سال ۱۹۶۵، این روش در سیستم حمل و نقل زیرزمینی درون

¹ Fondedile

² palo radice

³ Reticulated Micropile

شهری آلمان مورد استفاده قرار گرفت که پس از آن اصطلاح ریزشمع^۱ جایگزین نام شمع ریشه‌ای گردید.



شکل (۱۱-۲) سیستم ریز شمع زنبوری (تاریخچه‌ی مختصر میکروپایل‌ها) [۱]

۲-۳-۲- مطالعات آزمایشگاهی

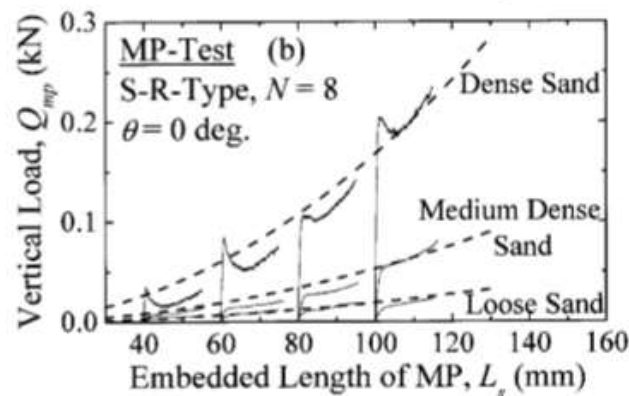
مدل‌سازی فیزیکی-آزمایشگاهی، به عنوان بهترین نوع مدل‌سازی، اطلاعات کمی و کیفی درباره رفتار سازه‌های مهندسی در اختیار می‌گذارد که می‌تواند جهت بررسی درستی، تصحیح و ریزسنجی فرضیات و مدل‌های تئوریک و عددی بکار رود. مدل‌سازی فیزیکی یک روش بسیار مهم و پیچیده برای مطالعه‌ی پی‌های عمیقی هست که از اواسط دهه‌ی ۵۰ توسط مهندسان ژئوتکنیک مورد توجه قرار گرفته است. مسأله مدل‌سازی فیزیکی به ویژه در مسائل ژئوتکنیکی بدلیل پیچیدگی‌های رفتاری و تأثیر پارامترهای فراوان از اهمیت خاصی برخوردار بوده و می‌تواند شناخت و اطلاعات مهمی را در اختیار قرار دهد.

^۱ micropile

مدل‌سازی فیزیکی می‌تواند در سیستم‌های مختلفی اجرا شود: اتاقک ساده ($1g$)، اتاقک کالیبراسیون (CC)، دستگاه سانتریفیوژ (ng)، جعبه‌ی برش شفاف، محفظه‌ی مخروط ناقص (FCV) و جعبه کوچک مدل‌سازی فیزیکی. اکثر مدل‌ها در این دست‌ورعمل‌ها به صورت کوچک‌تر نسبت به سازه‌های حقیقی ساخته شده‌اند و تنها تعداد کمی از مطالعات در مقیاس کامل انجام گرفته است. تجهیزات شناخته شده‌تر مورد استفاده به طور خلاصه در ادامه معرفی خواهند شد.

• نمونه مدل‌سازی آزمایشگاهی

در پژوهش انجام گرفته توسط تسوکادا (۲۰۰۶)^۱ و همکاران، مکانیزم ظرفیت باربری پی‌های مسلح شده با میکروپایل‌ها توسط دستگاه بارگذاری آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور به جهت ارزیابی رفتار نیرو - جابه‌جایی پی‌های سطحی از میکروپایل‌های منفرد در ماسه‌های با تراکم‌های نسبی شل، متوسط و متراکم استفاده شده است. نتایج بررسی‌ها نشان دهنده‌ی تاثیر قابل توجه پارامتر تراکم در میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها می‌باشد به گونه‌ای که تراکم زیاد بدلیل خاصیت اتساع دانه‌ها منجر به افزایش تنش محصورکننده‌ی افقی شده و در نهایت با افزایش مقاومت جداره همراه می‌باشد [۳].



شکل ۱۲-۲ (نمودار تاثیر تراکم‌های نسبی مختلف خاک در میزان ظرفیت باربری [۱])

• نمونه مدل‌سازی فیزیکی

¹ Tsukada et al.(2006)

لور و بوکمن^۱ (۲۰۰۵)، در موضوع فرآیند انتقال بار توسط اعضای تسلیح کننده، تاثیر آرایش هندسی بر انتقال بار، تاثیرات شبکه میکروپایل ها و بر هم کنش میان خاک و اعضای فولادی، مطالعاتی را با استفاده از مدل فیزیکی با مقیاس بزرگ انجام دادند. مدل سازی آن ها برای بررسی تاثیر میکروپایل ها بر روی تثبیت شیب شیروانی ها بود. آن ها در نهایت، نمودارهای فاکتور ضریب اطمینان بر حسب جابجایی شیب، جابجایی-زمان، فشار-زمان و ممان ایجاد شده در هر فاصله از انتهای میکروپایل را ارائه کردند [۴].



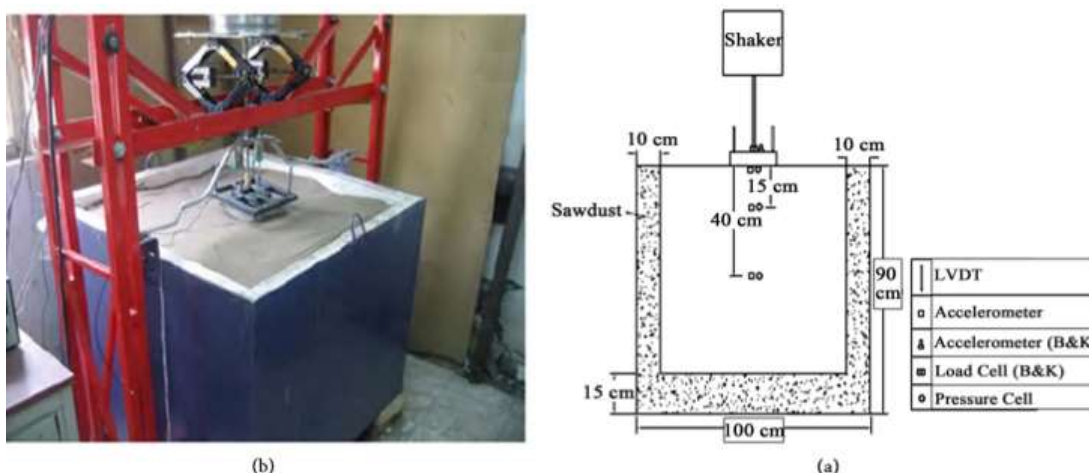
شکل (۱۳-۲) مدل فیزیکی شیروانی برای تثبیت با میکروپایل [۱]

• مدل سازی فیزیکی با اتاقک ساده

همان گونه که پیشتر ذکر شد مدل های فیزیکی و کوچک مقیاس به منظور مطالعه ی پی های عمیق می توانند در روش های مختلف به کار بسته شوند. اتاقک های ساده (1g) بعلت سادگی و هزینه ی کم، دستگاه مورد علاقه ای محسوب می شوند. مهمترین محدودیت اتاقک های ساده، سطح پایین تنش در مقایسه با شرایط واقعی شمع های محصور در خاک و پی های عمیق در محل می باشد. تنش میدانی 1g با توزیع تنش سربار نمونه اصلی شمع ها ناسازگار بوده و در آن یک رابطه ساده نمی تواند به کار بسته

¹ Loer, Boeckmann (2005)

شود. هتler و گادهاس^۱ (۱۹۸۵)، فرانک و ماس^۲ (۱۹۸۵) تلاش کردند تا اعوجاج‌های تنش را در پاسخ-های مدل مورد احتساب قرار دهند [۵، ۶]. این دستورالعمل‌ها اکثراً برای مدل‌های ساده تحت حالت سرویس و یا پاسخ‌های شبه الاستیک خاک توسعه یافته‌اند و نمی‌توانند در مساله بارگذاری بر روی مدل‌های شمع 1g استفاده شوند. یک اتاقک ساده در شکل ذیل نشان داده شده است.



شکل ۱۴- (۲) اتاقک ساده؛ (a) شکل شماتیک، (b) تصویر واقعی [۱]

• مدل‌سازی فیزیکی با اتاقک کالیبراسیون

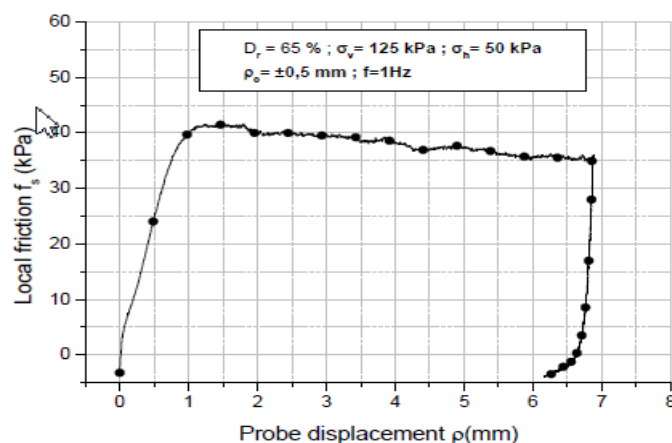
با توجه به پژوهش انجام گرفته توسط بازیار و ضیایی موید (۲۰۰۶)، اتاقک‌های کالیبراسیون برای کمک به فرآیند توسعه‌ی روابط بین نتایج تست‌های درجا و پارامترهای مختلف خاک استفاده شدند [۷]. از هنگام توسعه‌ی زود هنگام این مدل‌ها در اواخر دهه‌ی ۱۹۶۰، اتاقک‌های کالیبراسیون یک ابزار پژوهشی مهم برای مطالعه‌ی اندرکنش‌های خاک و پی بوده است. همان‌طور که زارع و اسلامی تایید کردند (۲۰۱۴)، این روش می‌تواند همچنین برای مدل‌سازی تست‌هایی همچون CPT و PMT استفاده شود [۸]. در مدل‌سازی اتاقک‌های کالیبراسیون، سطوح تنش قائم و جانبی می‌تواند افزایش یابد، اگرچه ایجاد تنش‌های ثابت جانبی گرادین‌های تنش واقعی را ایجاد نمی‌کند، بویژه افزایش خطی تنش‌ها با

¹ Hettler, Gudehus (1985)

² Franke, Muth (1985)

عمق که به طور رایج شمع‌های دارای بارگذاری محوری را کنترل می‌کند. بنابراین، برای غلبه بر نقص‌ها مدل سانتریفیوژ توسعه یافته است.

کواکی و همکاران^۱ (۲۰۱۸)، با مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای شمع-ماسه در اتاق کالیبراسیون تغییرات اصطکاک جدار شمع در طول فرآیند بارگذاری یکنواخت را در شکل (۲-۱۵) نشان داده‌اند. رفتار الاستیک خطی اولیه در جایی که حداکثر مقدار اصطکاک محلی ۴۲ کیلوپاسکال و جابجایی کاوشگر ۱/۱ میلی‌متر است، مشاهده می‌شود. پس از آن، مقدار اصطکاک محلی با مقدار نهایی ۳۵ کیلو پاسکال، در پایان مرحله بارگذاری یکنواخت کمی کاهش می‌یابد [۹].

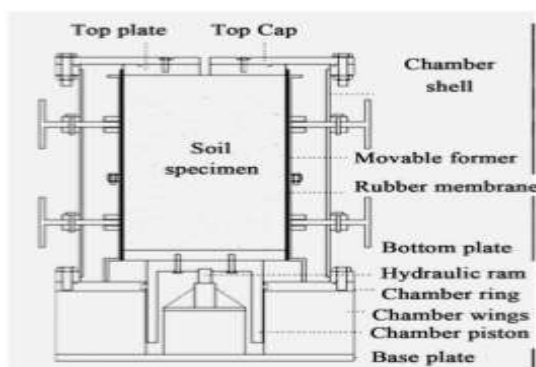


شکل (۲-۱۵) تغییرات اصطکاک محلی شمع در بارگذاری یکنواخت [۱]

گیونا و جامیول کوفسکی^۲ (۱۹۹۱)، اتاقک‌های کالیبراسیون بسیاری در سراسر جهان را بررسی کردند و شرایط مرزی مختلف در این سیستم‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۰]. شکل (۲-۱۶) تصویر شماتیک و تصویر واقعی اتاقک کالیبراسیون را نشان می‌دهد.

¹ Khouaouci et al (2018)

² Ghionna, Jamiolkowski (1991)



(a)



(b)

شکل ۱۶-۲ (اتاقک کالیبراسیون؛ (a) تصویر شماتیک، (b) تصویر واقعی [۱])

• مدل سازی فیزیکی با سانتریفیوژهای ژئوتکنیکی

مدل سازی سانتریفیوژ ژئوتکنیکی یک ابزار مناسب برای تحلیل مسائل ژئوتکنیکی محسوب می شود. این دستگاه می تواند شرایط واقعی خاک را شبیه سازی کند چرا که مدل ها و نمونه های خاک در سانتریفیوژ تحت یک شتاب شعاعی صحیح قرار می گیرند. این شتاب به عنوان شتاب جاذبه با بزرگی ای که با چندین برابر شتاب جاذبه برابر است عمل می کند و تنش در سطح بالایی خاک تقریباً صفر می باشد. تنش در مقایسه با عمق مدل با توجه به چگالی خاک و شتاب اعمالی افزایش می یابد که به همین علت سانتریفیوژها به طور گسترده در مهندسی ژئوتکنیک مورد استفاده قرار گرفته اند.

باکی^۱ (۱۹۳۱)، قوانین مدل سازی سانتریفیوژ برای مطالعه ی گسیختگی سازه های معادن را تشریح کرد [۱۱] و محققان دیگر همچون پانک^۲ (۱۹۵۲)، اسکوفیلد^۳ (۱۹۶۹)، شن و همکاران^۴ (۱۹۸۲) و میکاسا و تاکادا^۵ (۱۹۸۴) تئوری ها و سیستم های سانتریفیوژ را توسعه دادند [۱۵-۱۲]. بزرگترین سانتریفیوژ ژئوتکنیکی در سراسر جهان در دانشگاه کالیفرنیا در دهه ی اخیر ساخته شد. این دستگاه شعاعی برابر

¹ Bucky (1931)

² Panek (1952)

³ Schofield (1969)

⁴ Shen et al (1982)

⁵ Mikasa, Takada (1984)

۳۰ فوت (تقریباً ۹ متر) دارد که می‌تواند حداکثر شتاب $133g$ را ایجاد کند. مهمترین محدودیت مدل سانتریفیوژ علاوه بر کمیابی هزینه‌ی بالای آن می‌باشد.

• مدل‌سازی فیزیکی با جعبه‌ی برش شفاف

استفاده از دیواره‌های انعطاف‌پذیر برای مدل‌سازی خاک از سال‌های ۱۹۷۰ مورد توجه قرار گرفت. در طی این سال‌ها برخی از پژوهشگران سیستم‌های دیواره مختلف را طراحی کردند. هاشمند و همکاران^۱ (۱۹۸۸)، فیلیپ و همکاران^۲ (۱۹۸۶)، گیبسون^۳ (۱۹۹۷)، پراساد و همکاران^۴ (۲۰۰۴)، جعفرزاده (۲۰۰۴) و اسلامی و همکاران (۲۰۰۹) مطالعات بسیاری بر روی رفتار خاک با این روش را انجام دادند [۲۱-۱۶] و آن را به یک جعبه‌ی چند لایه که جابه‌جایی‌های افقی آن بر سطوح مختلف تجهیزات اعمال می‌گردد توسعه دادند. با توجه به احمدی، اسلامی و عربانی (۲۰۱۶)، در حال حاضر جعبه‌های شفاف معمولاً مجموعه‌ای از قطعات شفاف با ارتفاع‌هایی هر کدام ۵۰ میلی‌متر یا کمتر را شامل می‌شوند که می‌توانند در یک جهت به طور آزاد حرکت کنند [۲۲]. برای مدل بارگذاری یک جک در بالای جعبه قرار داده شده است که یک بار ثابت قائم بر سطح خاک قرار گرفته در جعبه منتقل می‌کند. جک بارگذاری می‌تواند برای شبیه‌سازی بارها و نشست‌های مدل کوچک مقیاس در خاک زمانی که جعبه در معرض لرزش‌های جانبی سیکلیک قرار گرفته است استفاده شود.

¹ Hushmand et al (1988)

² Philip et al (1986)

³ Gibson (1997)

⁴ Prasad et al (2004)



شکل ۱۷-۲ (نمای کلی جعبه‌ی برش شفاف [۲۲])

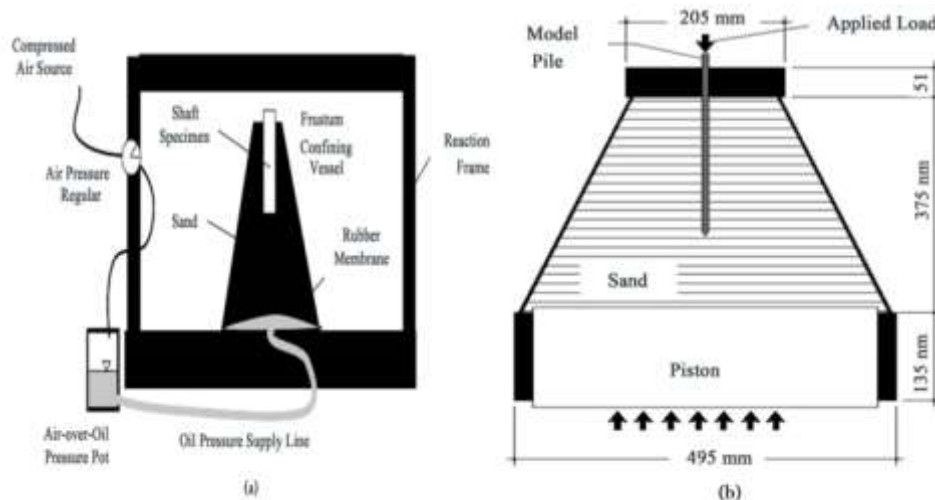
• مدل‌سازی فیزیکی با محفظه‌ی مخروط ناقص

با توجه به هوروات و اشتول^۱ (۱۹۹۶)، محفظه‌ی مخروطی ناقص یک دستگاه جدید می‌باشد که برای مدل‌سازی شمع‌ها توسعه یافته است [۲۳]. این وسیله یک ابزار مناسب برای مدل‌سازی رفتار شمع‌ها و آزمایش CPT می‌باشد. این وسیله دارای شکل مخروطی منقطع می‌باشد که بار ثابت را به کف خود اعمال می‌کند، بنابراین توزیع تنش خطی در راستای هسته‌ی مرکزی قائم بوجود می‌آید. مشخصات این دستگاه دلیلی بر مزیت محفظه‌ی مخروطی ناقص (FCV) می‌باشد چرا که شرایط تنش جانبی و سربار واقعی در محل را شبیه‌سازی می‌کند. تنش قائم در بالای خاک صفر می‌باشد و با عمق تارسیدن به مقدار تنشی که در انتها توسط سیستم فشار اعمال شده است افزایش می‌یابد. FCV ایده‌ی پاتریک بیرمنگام بود و در ابتدا در دانشگاه مک مستر کانادا در سال ۱۹۹۶ ساخته شد. هوروات و اشتول (۱۹۹۶) و سدران^۲ (۱۹۹۹) مدل‌های شمع متعددی را با FCV در فشارهای پایه و نسبت‌های تخلخل مختلف

^۱ Horvath, stole (1996)

^۲ Sedran (1999)

تست کردند [۲۴]. آن‌ها توضیح دادند که یک توزیع تنش خطی با عمق در FCV وجود دارد. شکل ذیل نشان دهنده‌ی فرم و سیستم FCV می‌باشد.



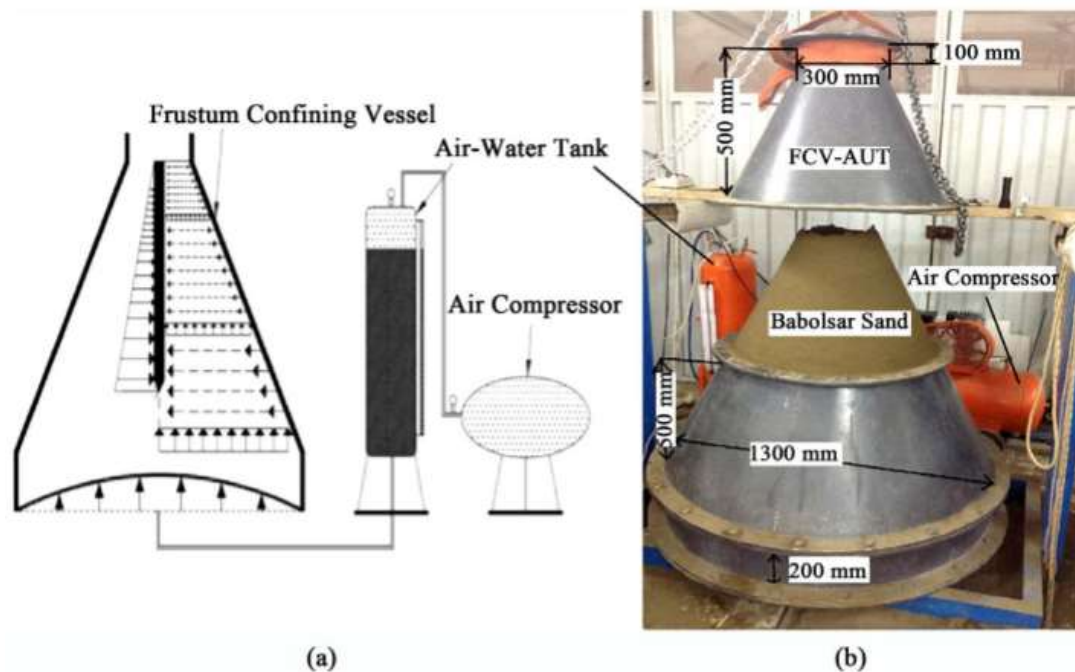
شکل ۱۸-۲ (شکل شماتیک سیستم FCV ؛ (a) اجزای FCV در دانشگاه فلوریدای جنوبی (b) بارهای اعمالی در FCV [۲۴]

مزیت دیگر FCV امکان ساخت در جای مدل‌های شمع به صورت مجزا در محفظه‌ی FCV می‌باشد. برای استفاده از نتایج آزمایش FCV، ضرایب مقیاس باید به نتایج آزمایش اعمال گردد. ضرایب مقیاس FCV می‌تواند با تئوری‌های شبیه‌سازی با توجه به درجه‌ای که تحت فشار قرار می‌گیرد محاسبه شود. با توجه به قسمت‌های قبل FCV بهترین محفظه‌ی مناسب برای مطالعه‌ی شمع‌ها می‌باشد.

• مدل‌سازی فیزیکی با محفظه‌ی مخروط ناقص اصلاح شده

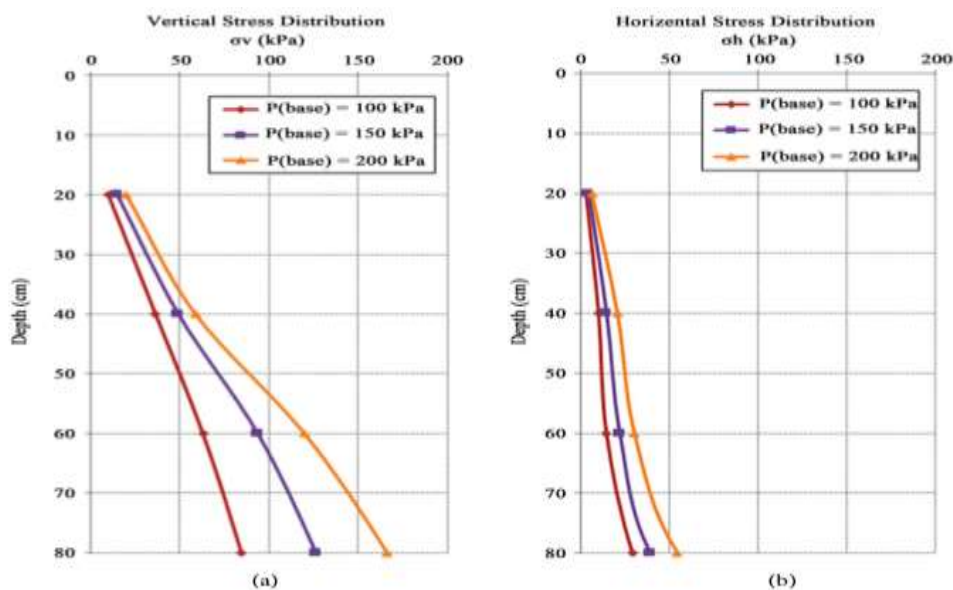
FCV مورد توجه در این مطالعه توسط زارع و اسلامی در دانشگاه امیرکبیر ساخته شده است (FCV-AUT). دستگاه FCV اصلاح شده شامل ۳ بخش اصلی همچون بدنه‌ی مخروطی، سیستم فشار کف و سیستم بارگذاری (قاب بارگذاری، پمپ دستی هیدرولیکی و جک هیدرولیکی) به منظور اعمال بارهای تنش و فشار، طراحی و ساخته شده است. برای برنامه تست در FCV، از ۶ مدل شمع

مطابق فرم شمع‌های معمولی و ۳ مدل شمع به عنوان شمع‌های مارپیچی استفاده شده است. برای خاک اطراف، ماسه‌ی خوب دانه‌بندی شده تقریباً یکنواخت از شهر ساحلی بابلسر در شمال ایران در سه تراکم نسبی شل، متوسط و متراکم استفاده شده است.



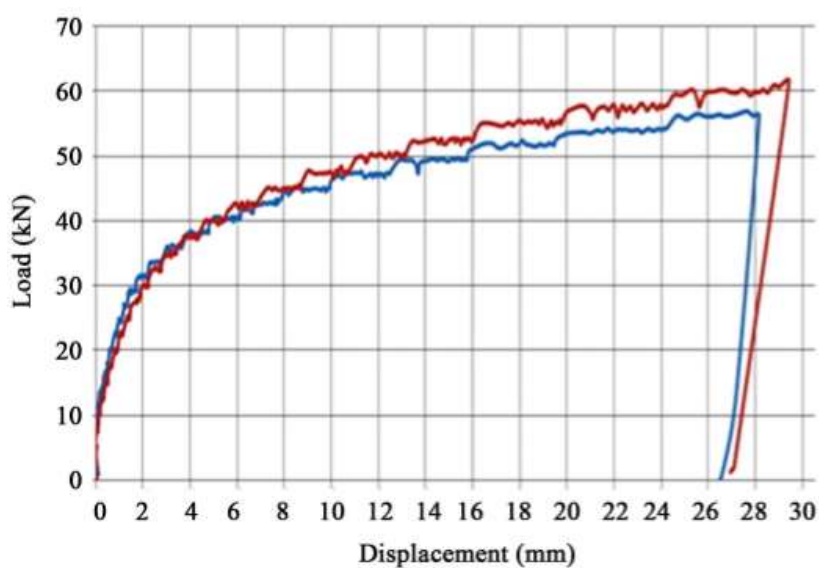
شکل ۱۹-۲ (FCV اصلاح شده، (a) شکل شماتیک؛ (b) تصویر واقعی [۱])

نتایج تست‌ها در این مطالعه نشان می‌دهد که FCV می‌تواند به خوبی برای مدل‌سازی فیزیکی شمع‌ها استفاده شود. شکل (۲-۲۱) نشان می‌دهد که یک افزایش نسبتاً خطی در تنش‌های افقی و قائم در راستای خط مرکزی FCV وجود دارد. همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود تنش در بالا صفر و در پایین متناسب با فشار پایه FCV می‌باشد.



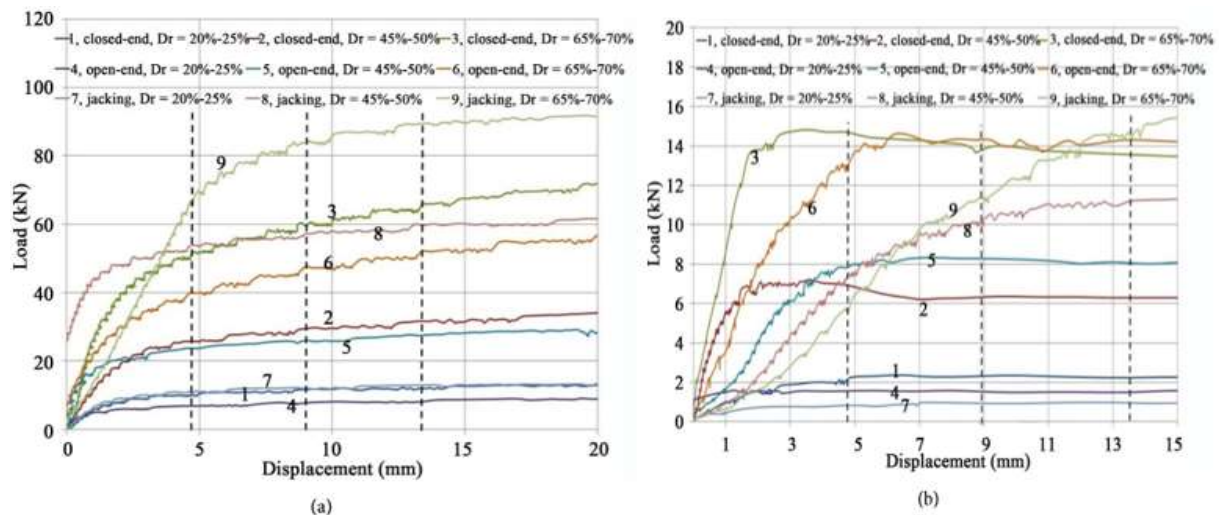
شکل (۲۰-۲) توزیع تنش در FCV اصلاح شده، (a) قائم؛ (b) افقی [۱]

تست اساسی دیگر که به منظور ارزیابی عملکرد FCV انجام گرفت تکرارپذیری بارگذاری مدل‌های شمع بود. مدل‌های شمع بتنی در FCV نصب شدند و ۲ بار به صورت پی در پی تست شدند. همان‌طور که در شکل معلوم است شبیه‌سازی، نتایج قابل اعتماد و قابل قبولی را ارائه کرده است.



شکل (۲۱-۲) نمودار بار-جاب‌جایی در FCV به منظور نشان دادن تکرارپذیری تست‌ها [۱]

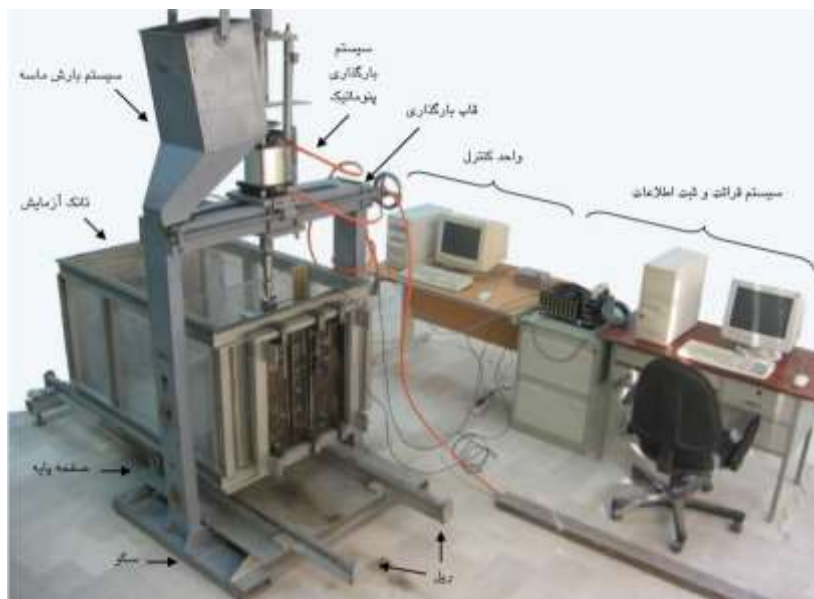
سه مدل شمع شامل یک مدل شمع انتها باز و ۲ مدل شمع انتها بسته توسط FCV تست شد. مدل شمع انتها باز توسط ضربه و مدل‌های انتها بسته توسط ضربه و جک زنی نصب شدند. شکل (۲۲-۲) دیگرام‌های رفتاری مدل‌های شمع تست شده در FCV را ارائه می‌دهد.



شکل (۲۲-۲) نمودارهای بار-جابجایی در FCV، (a) فشار؛ (b) کشش [۱]

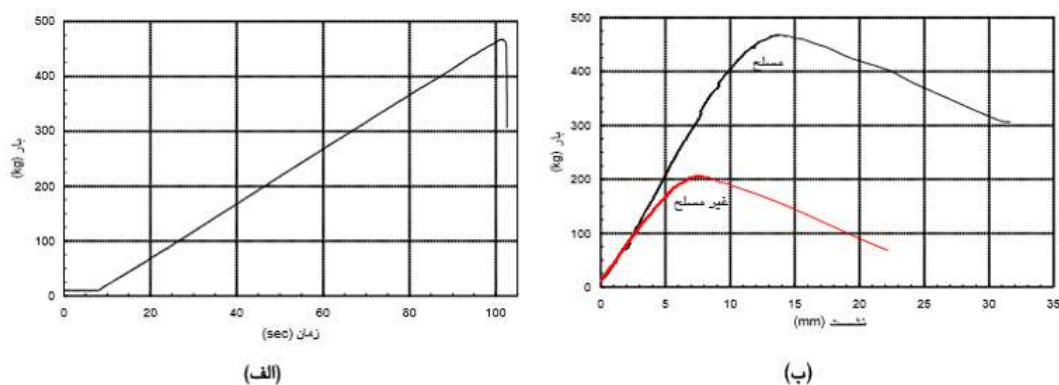
• مدل‌سازی فیزیکی با جعبه‌ی کوچک مدل‌سازی

در مطالعه‌ی انجام شده توسط ابریشمی (۲۰۰۹)، چگونگی طراحی و ساخت سیستمی جدید، برای مدل‌سازی آزمایشگاهی مسأله بارگذاری و ظرفیت باربری استاتیکی و سیکلی پی‌های نواری در حالت کرنش مسطح به تفصیل، تشریح گردیده است. این دستگاه از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده‌اند که عبارتند از: سیستم بارش، سیستم و قاب بارگذاری، سیستم قرائت و ثبت اطلاعات، واحد کنترل و تانک آزمایش. در این مدل‌سازی به منظور تسلیح خاک با ژئوگرید از یک جعبه کوچک خاک تحت سیستم بارگذاری پنوماتیک، سربار استاتیکی ۱۵۲ کیلوگرم و سربار سیکلی ۸۷ کیلوگرم استفاده شده است [۱].



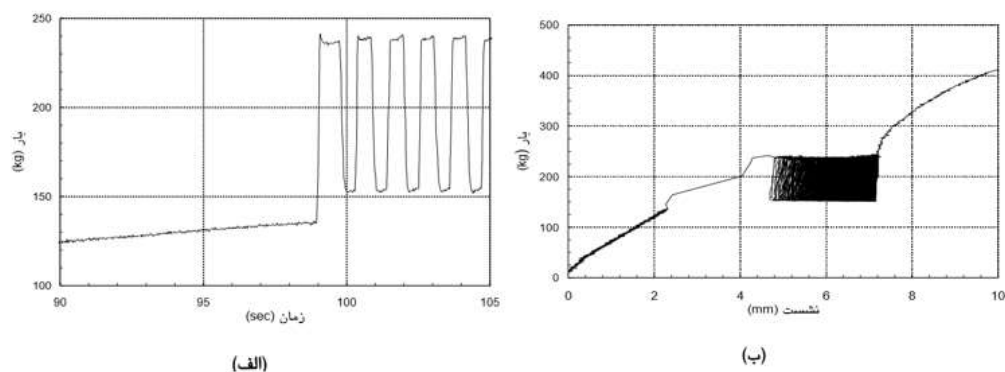
شکل (۲۳-۲) مجموعه کامل سیستم آزمایشگاهی مطالعه رفتار پی‌های نواری واقع بر خاک مسلح [۱]

نتایج ثبت شده در ادامه مورد تحلیل قرار می‌گیرند. شکل (۲۴-۲) بارگذاری استاتیکی وارده به پی را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، نیرو به صورت خطی نسبت به زمان افزایش می‌یابد. با افزایش نیرو، مدل پی در توده خاک فرو رفته و نشست آن ثبت می‌گردد. با توجه به جنس مصالح، نمودار بار-نشست در غالب قسمت خود به صورت خطی می‌باشد.



شکل (۲۴-۲) نتایج بارگذاری استاتیکی؛ (الف) نمودار بار-زمان بر پی مسلح ($U/B=0.5$)، (ب) مقایسه نمودار بار-نشست پی‌های مسلح و غیر مسلح [۱]

شکل (۲-۲۵) نمونه‌ای از بارگذاری توام استاتیکی و سیکلی اعمال شده بر پی مسلح توسط این سیستم را نشان می‌دهد. ابتدا بار به صورت استاتیکی افزایش می‌یابد و به میزان مورد نظر می‌رسد. سپس سیستم، بار سیکلی را با دامنه و فرکانس مورد نظر اعمال می‌نماید. در مرحله نخست، نشست‌ها مطابق آزمایش استاتیکی به تدریج افزایش می‌یابد. با اعمال بار سیکلی، نشست‌های رفت و برگشتی در خاک رخ می‌دهد. بخشی از نشست رخ داده الاستیک است و با برداشتن بار حذف می‌گردد در صورتی که بخشی از آن ماندگار است.



شکل (۲-۲۵) نتایج بارگذاری سیکلی بر پی واقع بر خاک مسلح ($U/B=0.5$)، (الف) نمودار بار - زمان، (ب) نمودار بار - نشست [۱]

در پایان این قسمت لیست محققین و کارهای صورت گرفته با دستگاه‌های پیش ذکر شده در عرصه ی مدل‌سازی فیزیکی به اختصار توضیح داده خواهد شد.

جدول (۲-۵) لیستی از پژوهشگران و کارهای صورت گرفته در عرصه ی مدل‌سازی فیزیکی

موضوع	محققین	مدل فیزیکی
رفتار دینامیکی پی‌ها بر روی ماسه. رفتار دینامیکی گروه شمع. رفتار پی‌های کامپوزیت مسلح.	جعفرزاده و قاسم زاده (۲۰۰۹) مهدی‌زاده و همکاران (۲۰۰۹) ونگ و همکاران (۲۰۱۰)	اتاقک ساده
تست CPT در خاک‌های غیر اشباع. اثر نرخ نفوذ بر نتایج نفوذ مخروط در رس.	پور نقی آذر و همکاران (۲۰۰۵) کیم و همکاران (۲۰۰۸)	اتاقک کالیبراسیون

جعبه شفاف	تاکاهاشی و همکاران (۲۰۰۱) اسلامی و همکاران (۲۰۰۹) لی و همکاران (۲۰۱۲)	رفتار ماسه تحت بارهای سیکلیک. رفتار ماسه انزلی. رفتار لرزه‌ای ماسه‌ای.
سانتریفیوژ ژئوتکنیکی	کیمورا (۱۹۹۸) الیس و همکاران (۲۰۰۶) وینوگرادوف و همکاران (۲۰۱۵)	پایداری سد. نشست زمین در خاک‌های نرم. تغییر شکل بالاست ماسه‌ای خطوط راه آهن.
محفظه‌ی مخروط ناقص	سدران (۱۹۹۹) مولینز (۲۰۰۱) کریمی و اسلامی (۲۰۱۶)	مطالعه‌ی مدل شمع‌ها. مطالعه‌ی مدل شمع‌ها. اثرات مکان بر عملکرد مدل شمع‌ها.

۳-۲- مطالعات میدانی

مطالعات میدانی بررسی شده در این تحقیق شامل آزمایش‌های میدانی بارگذاری محوری، آزمایش های میدانی بارگذاری سیکلیک و آزمایش‌های میدانی بارگذاری جانبی می‌شود.

• آزمایش‌های میدانی بارگذاری محوری

در اولین مورد مطالعاتی، گرونک و همکاران^۱ (۱۹۹۳) میکروپایل‌های استفاده شده برای بهسازی پی ساختمان اصلی غلات ونکوور را مورد بررسی قرار دادند. پروژه شامل میکروپایل‌هایی با قطر ۷۶۰*۸۴۰ میلی‌متر بود. سه آزمایش بارگذاری تا حداکثر ۲۰۰ درصد بار اجرایی (۳۰۰ تن) انجام گردید. خیز شمع اندازه‌گیری شده در بار اجرایی ۹/۵ میلی‌متر بود و خاک مورد بررسی نیز یک زلزله را بعد از اتمام ساخت تجربه کرده بود. حداکثر نشست مشاهده شده در خاک نیز کمتر از ۹/۵ میلی‌متر بدست آمد [۲۵].

روسو^۲ (۲۰۰۴) دو آزمایش بارگذاری تمام مقیاس بر روی میکروپایل‌های ابزار بندی شده از نوع C پس تزریق شده انجام داد. او همچنین یک تکنیک ابداعی برای نصب گیج‌های کرنش را استفاده نمود.

¹ Gronek et al (1993)

² Russo (2004)

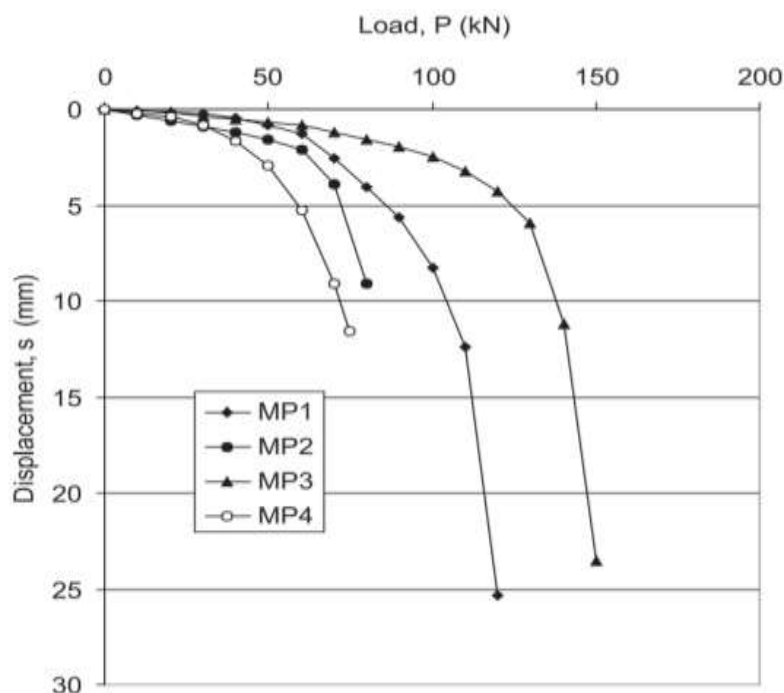
نتایج بارگذاری‌ها نشان دهنده‌ی این بود که روبه‌های مختلف نصب تاثیر قابل توجهی در عملکرد و ظرفیت باربری میکروپایل‌ها دارد [۲۶].

هان و یه^۱ (۲۰۰۶)، در پژوهشی رفتار میکروپایل‌ها را در رس نرم مورد ارزیابی قرار دادند. چهار میکروپایل از نوع A تحت اثر وزن خود تزریق و در رس شنگ‌های چین نصب گردیدند. میکروپایل‌ها توسط گیج‌های کرنش سنج به منظور بررسی مکانیزم انتقال بار ابزاربندی گردیدند. دو مجموعه آزمایش در این مطالعه‌ی میدانی انجام گرفت: آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی بر روی میکروپایل‌های منفرد شامل دو آزمایش فشاری و دو آزمایش کششی و یک آزمایش گروه شمع بر روی چهار میکروپایل به منظور شبیه سازی رفتار پی‌های پایه بندی شده با میکروپایل‌ها. نتایج آزمایش‌های بارگذاری شمع منفرد نشان داد که اصطکاک سطح نهایی میکروپایل‌ها بین ۰/۹ تا ۱/۲ پارامتر مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی خاک احاطه کننده بود. آن‌ها همچنین پی بردند انتقال بار در پنجه‌ی شمع در هنگام آزمایش‌های بارگذاری شمع منفرد بین ۸/۷ تا ۱۲/۵ درصد بار اعمالی بود. در گروه میکروپایل‌های چهارتایی، نویسندگان با استفاده از قرائت گیج‌های کرنش سنج تایید کردند که میکروپایل‌ها یک راه حل مناسب برای دوختن و پایه‌بندی پی‌ها می‌باشند. میکروپایل‌ها مقداری در حدود ۸۰ درصد بار اضافی اعمال شده در هنگام آزمایش بارگذاری گروه شمع را تحمل می‌کنند و بقیه توسط شناژ روی زمین تحمل می‌شود [۲۷].

جدول ۶-۲ (ظرفیت‌های بار نهایی و جابه‌جایی‌های متناظر میکروپایل‌ها [۲۷])

شماره شمع	نوع بارگذاری	روش تست بارگذاری	ظرفیت نهایی بار (KN)	جابه جایی قائم (mm)	زمان تا لحظه ی گسیختگی (h)
MP1	فشاری	آرام	۱۱۰	۱۲/۴	۷۲
MP2	کششی	سریع	۷۵	۶	۸
MP3	فشاری	سریع	۱۳۵	۹/۵	۱۵
MP4	کششی	سریع	۷۰	۹/۱	۸

¹ Han and Ye (2006)



شکل ۲۶-۲ (پاسخ بار- جابه‌جایی در تست‌های بارگذاری شمع در میکروپایل‌ها تحت کشش یا فشار [۲۷]

• آزمایش‌های میدانی بارگذاری سیکلیک

کاوی و همکاران^۱ (۲۰۰۰) نتایج یکسری از تست‌های بارانداز سیکلیک را بر روی میکروپایل‌های نوع B دوغاب‌ریزی شده تحت فشار و مدفون در ماسه‌ی شل و متوسط و همچنین سیلت ثبت و بررسی نمودند. نتایج نشان دهنده‌ی این بود که بارگذاری معکوس سیکلیک یک کاهش قابل ملاحظه در ظرفیت میکروپایل ایجاد می‌کند. مشاهدات همچنین نشان داد که میکروپایل‌های نصب شده در خاک‌های بدون چسبندگی، یک سطح اساسی از بارگذاری تکراری را در خود دارند که در ذیل ظرفیت نهایی میکروپایل تحت شرایط استاتیکی عالی می‌باشد [۲۸].

گومز و همکاران^۲ (۲۰۰۳)، یک آزمایش بارگذاری ابزاربندی شده بر روی میکروپایل موجود در سنگ تحت افزایش بارهای سیکلیک انجام دادند. تحلیل نتایج آزمایش یک بینش مفید در رابطه با مکانیزم

¹ Cavey et al (2000)

² Gomez et al (2003)

انتقال بار ایجاد نمود. آن‌ها همچنین بر مبنای مقادیر مقاومت اتصالی محاسبه شده بر اساس نتایج آزمایش‌ها نتیجه گرفتند که گسیختگی فیزیکی در سطح زمین دوغاب‌ریزی شده رخ نمی‌دهد. اگرچه، کاهش مقاومت اتصالی که یک افزایش پیش رونده در طول و ضریب الاستیک میکروپایل تحت بارهای افزایشی ایجاد کرده بود مشاهده گردید. آن‌ها تایید کردند که تعیین طول الاستیک میکروپایل به منظور ارزیابی پاسخ میکروپایل مفید می‌باشد. گومز و همکارانش بر محدودیت روش طول الاستیک در مواردی که فشار الاستیک پسماند قابل توجهی بر روی باربرداری با توجه به تنش‌های اتصالی قفل شده در طول میکروپایل وجود دارد تاکید کردند. این موضوع ممکن است یک برآیند محافظه کارانه از مقاومت اتصالی ایجاد کند [۲۹].

• آزمایش‌های میدانی بارگذاری جانبی

ریچاردز و روتبائر^۱ (۲۰۰۴)، [۳۰]، نتایج تست‌های بارگذاری جانبی که به عنوان بخشی از ۸ پروژه مختلف اجرا شده بود را با پیش‌بینی‌های پاسخ LPILE (رییز و همکاران^۲، ۲۰۰۰)، [۳۱] NAVFAC، (۱۹۸۶) [۳۲] و روش بار مشخصه CLM (دانکن و همکاران^۳، ۱۹۹۴)، [۳۳] مورد مقایسه قرار دادند. خیزهای مشاهده شده حاصل از تست‌های بارگذاری جانبی به طور معمول کمتر از مقادیر پیش‌بینی شده بود. آن‌ها این موضوع را به محافظه کاری رایج در پارامترهای نسبت داده شده به خاک و یا در نظر نگرفتن سربار مجهول الاستیک با توجه به قسمت بالایی شمع که در زیر سطح خاک قرار می‌گیرد نسبت دادند. پاسخ‌های مشاهده شده نشان داد که عملکرد بار جانبی بسیار به نوع خاک و همچنین مقاومت برشی در ۲ تا ۵ متر بالایی شمع حساس می‌باشد.

لانگ و همکاران^۴ (۲۰۰۴)، نتایج ده تست بارگذاری جانبی بر روی میکروپایلهایی با طول ۱۵/۲ متر و قرارگرفته در خاک رس پوشیده شده با ماسه را ارائه دادند. میکروپایل‌ها با یک نوار رشته مرکزی پر

¹ Richards, Rothbauer (2004)

² Reese et al (2000)

³ Duncan et al (1994)

⁴ Long et al (2004)

قدرت در تمام طول خود تسلیح شده بودند. سختی خمشی و ظرفیت در ۹ متر بالایی میکروپایل با در نظر گرفتن غلاف با قطر خارجی ۲۴۴ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۱۳/۸ میلی‌متر افزایش پیدا کرد. آن‌ها نتایج آزمایش‌ها را با رفتار پیش‌بینی شده توسط روش مرسوم منحنی‌های P-Y برنامه LPILE مقایسه کردند. جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری و محاسبه شده در یک تطابق تقریباً ۱۰ درصدی بودند [۳۴].

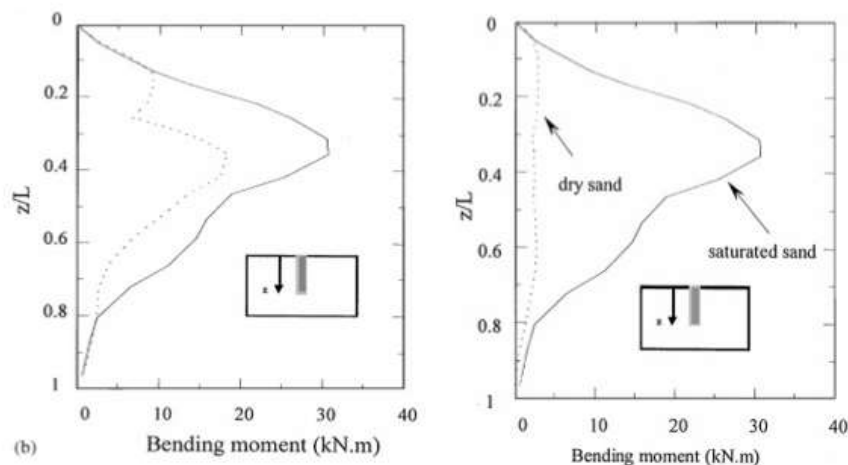
۴-۳-۲- مطالعات تئوری، عددی و نرم افزاری

در بحث مطالعه ی میکروپایل‌ها، مطالعات عددی و بررسی‌های نرم افزاری سهم قابل توجهی را تاکنون به خود اختصاص داده است. پژوهش‌های عددی و تئوری به علت سهولت مدل‌سازی‌ها و کسب سریع نتایج همواره در اولویت کار محققین بوده است. لازم به ذکر است که صحت کامل نتایج کارهای عددی، منوط به انجام صحت سنجی توسط کارهای میدانی و آزمایشگاهی می‌باشد.

استا و شاهرور^۱ (۲۰۰۱)، رفتار لرزه‌ای میکروپایل‌های استفاده شده در تسلیح خاک‌های اشباع را به صورت عددی ارزیابی کردند. نویسندگان نشان دادند که وجود میکروپایل‌ها به آرامی فشار منفذی ایجاد شده در اثر زلزله را افزایش داده است. همچنین آن‌ها ملاحظه نمودند هنگامی که میکروپایل‌ها در ماسه‌ی شل تا متوسط قرار می‌گیرد بار لرزه‌ای یک افزایش در فشار منفذی ایجاد نموده، که منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ی مقاومت و سختی خاک و در نتیجه یک افزایش بزرگ در لنگر خمشی می‌گردد.

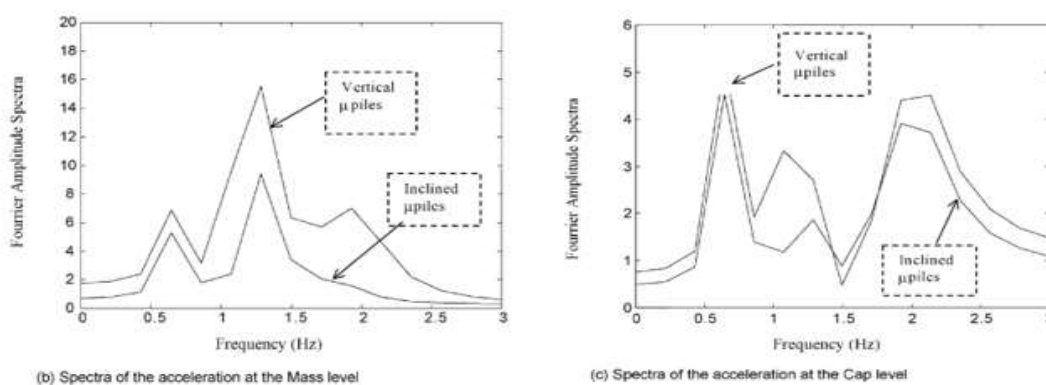
اگر چه اثر گروه میکروپایل منجر به یک کاهش قابل ملاحظه در لنگر خمشی گردیده است [۳۵].

¹ Ousta, Shahrour (2001)



شکل (۲۷-۲) پوش لنگر خمشی؛ (a) میکروپایل منفرد، (b) گروه میکروپایل [۲۷]

سادک و شاهرور^۱ (۲۰۰۴)، از یک مدل سازی اجزا محدودی سه بعدی به منظور تحلیل اثر زاویه ی شیب میکروپایل ها بر روی پاسخ لرزه ای آن ها استفاده نمودند. این مطالعه دو مورد را شامل می شد؛ میکروپایل های مدفون شده در یک لایه خاک همگن با سختی ثابت و یک لایه خاک با سختی افزایش یافته بر مبنای عمق. نتایج نشان داد که زاویه شیب میکروپایل عملکرد لرزه ای را در مقایسه با شمع های قائم افزایش می دهد. این زاویه شیب سبب بسیج بهتر سختی محوری میکروپایل ها و در نتیجه کاهش نیروهای برشی و لنگر خمشی ایجاد شده با بار لرزه ای می گردد [۳۶].



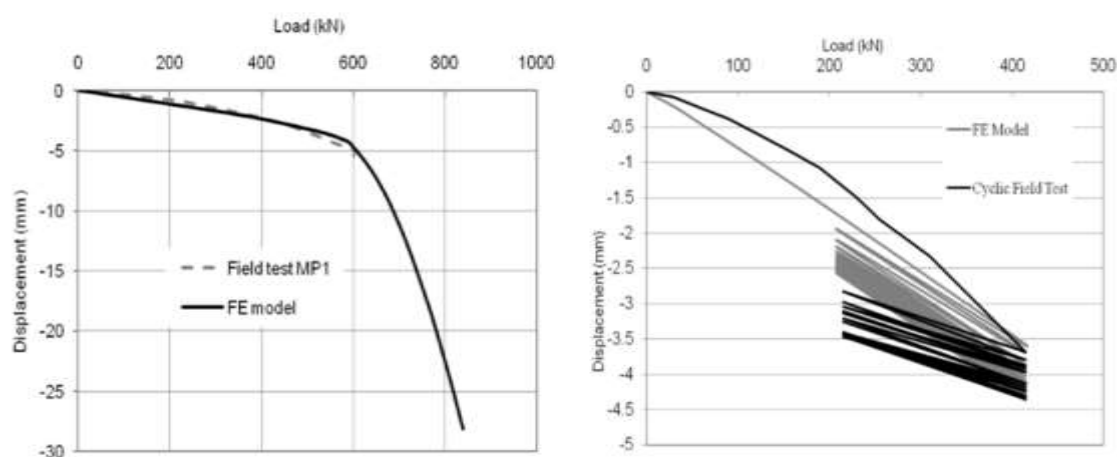
شکل (۲۸-۲) اثر شیب میکروپایل ها در فرکانس های طبیعی سیستم خاک-میکروپایل [۲۷]

¹ Sadek and Shahrour (2004)

۵-۳-۲- مطالعات ترکیبی

در این قسمت پژوهش‌های انجام گرفته توسط عبدالعزیز و کاپاتی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعات ترکیبی از روش‌های میدانی و عددی به منظور بررسی رفتار میکروپایل‌ها مورد استفاده قرار گرفته و در نهایت مدل‌های عددی استفاده شده صحت سنجی گردیده‌اند.

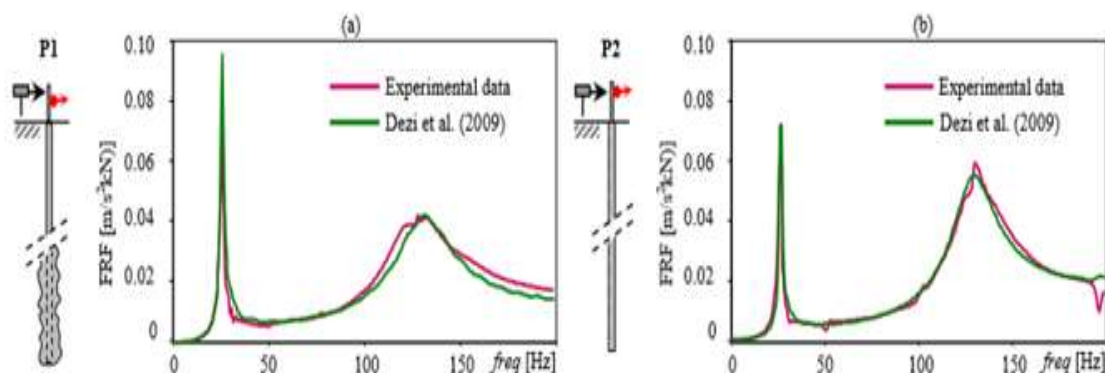
در مطالعه انجام گرفته توسط عبدالعزیز^۱ (۲۰۱۲)، یک روش پژوهشی شامل ۲ عنصر اصلی مورد استفاده قرار گرفته است. اولین عنصر مجموعه‌ای از مطالعات تمام مقیاس میدانی بر روی میکروپایل‌های توخالی نصب شده در خاک‌های چسبنده می‌باشد، در حالی که عنصر دوم، ارزیابی‌های عددی (استفاده از روش اجزا محدودی FEM و نرم افزار آباکوس) را شامل می‌شود. در مجموع ۲۲ تست بارگذاری بر روی ۴ میکروپایل انجام گرفته است که شامل ۵ آزمایش بار یکنواخت و ۵ آزمایش بار سیکلیک محوری بر روی میکروپایل‌های منفرد، ۴ آزمایش بار محوری یکنواخت بر روی جفت میکروپایل‌های تو خالی، ۲ آزمایش بارگذاری یکنواخت و ۶ آزمایش بارگذاری سیکلیک جانبی بر روی میکروپایل‌های منفرد می‌گردد. نتایج هر مجموعه از آزمایش‌ها برای صحت سنجی مدل عددی به کار رفته است [۳۷].



شکل ۲-۲۹ (منحنی‌های صحت سنجی نیرو-جاب‌جایی؛ (a) در فشار استاتیکی، (b) در فشار سیکلیک [۲۷])

¹ Abd Elaziz (2012)

در پژوهش انجام گرفته توسط کاپاتی و همکاران^۱ (۲۰۱۶)، رفتار دینامیکی میکروپایل‌ها تحت بارگذاری افقی (برای مثال زلزله) مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش گام‌های نخستین مطالعه‌ی جامع تجربی بر روی ۲ میکروپایل قائم (P) در خاک سیلتی آبرفتی برداشته شده و نتایج نیز گزارش گردیده است. یکی از میکروپایل‌های قائم تحت فشار بالا تزریق شده است در حالی که میکروپایل دیگر به صورت عادی تزریق شده است. به طور خاص، نتایج تجربی آزمایش‌های لرزه محیطی و آزمایش‌های بار ضربه‌ای گزارش شده است و مقایسه‌ای بین رفتار میکروپایل‌های تزریقی و غیر تزریقی صورت گرفته است. داده‌های تجربی آزمایش‌های بار ضربه‌ای نیز همچنین با نتایج کسب شده از مدل تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه نتایج با مدل تحلیلی نیز نشان‌دهنده صحت روش تئوری در ارزیابی پاسخ سیستم خاک-میکروپایل در کرنش‌های کوچک می‌باشد [38].



شکل (۳۰-۲) نتایج آزمایش‌های تجربی و تحلیلی برای بارگذاری ضربه‌ای [۲۷]

۶-۳-۲- تاریخچه موردی میکروپایل

تریلور و همکاران^۲ (۲۰۰۲)، استفاده از میکروپایل‌ها را در زمینی آهکی به منظور ایجاد تکیه‌گاه سازه‌ای برای سیستم پی‌ها بررسی کردند. آن‌ها سه تاریخچه‌ی موردی از میکروپایل‌های نوع A در بستر سنگی

^۱ Capatti et al (2016)

^۲ Traylor et al (2002)

آهکی را گزارش نمودند. بار اجرایی فشاری در محدوده ی ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلونیوتن بود. آن‌ها مقادیر نهایی و میانگین اتصال شمع‌های نوع A در توده‌ی سخت سنگ را عددی بیشتر از ۱۷/۵ مگاپاسکال برآورد کردند. آن‌ها همچنین بیان کردند که برای لنگرهای موجود در سنگ، طول‌های تقریبی اتصال بیشتر از ۳ متر به ندرت سبب افزایش در ظرفیت می‌گردد [۳۹].

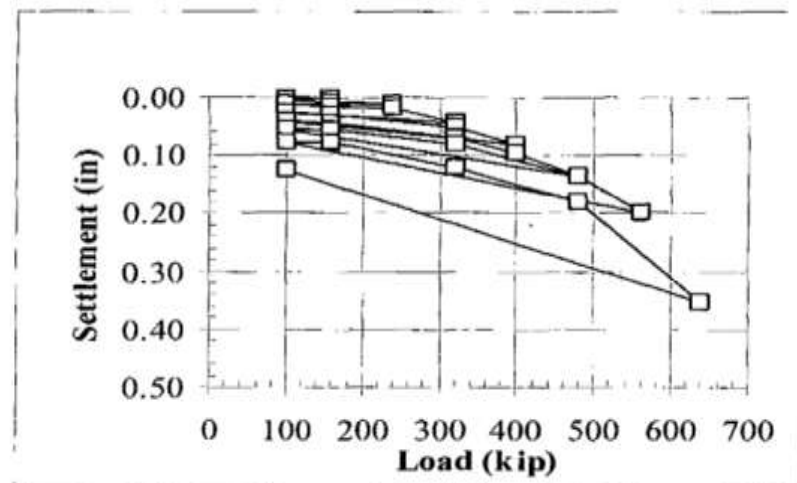
جدول ۲-۷ (نتایج آزمایش بارگذاری [۲۷])

آزمایش بارگذاری	مجموع طول غلاف (m)	ناحیه اتصال (m)	قطر ناحیه تزریق (m)	حداکثر بار (KN)	حداکثر خیز (cm)
۱	۶/۱	۰	۲۱۸	۶۶۷	—
۲	۶/۱	۳	۲۱۸	۲۶۶۹	۱۱/۴
۳	۱۰/۶	۳	۲۱۸	۳۳۳۶	۲/۳
۴	۸/۸	۳	۲۱۸	۲۶۶۹	۱/۳
۵	۱۰/۴	۴/۶	۲۱۸	۲۶۶۹	۱/۳
۶	۱۱/۹	۳	۱۸۸	۳۶۳۸	۲/۳
۷	۳۰/۵	۳/۲	۱۸۸	۲۶۶۹	۳/۳
۸	۲۱/۵	۳/۲	۱۸۸	۲۶۶۹	۴/۸
۹	۱۰/۷	۳	۱۸۸	۲۶۶۹	۱/۹
۱۰	۱۲/۲	۴/۶	۱۸۸	۲۶۶۹	۳/۳

کادن و همکاران^۱ (۲۰۰۴)، ۱۴ مطالعه موردی گزارش شده در ادبیات فنی شامل انواع مختلف میکروپایل ساخته شده در سنگ را خلاصه کردند. آن‌ها ظرفیت مجاز میکروپایل با قطر خارجی ۱۷۸ میلی‌متر و دیواره‌ی ۱۲/۵ میلی‌متر نصب شده در گمانه‌ی حفاری ۲۰۳ میلی‌متر را با استفاده از آیین نامه‌های مختلف ارزیابی کردند. آن‌ها ظرفیت سازه‌ای مجاز را بین ۸۰۰ تا ۲۱۰۰ کیلونیوتن برآورد نمودند اگرچه آزمایش بارگذاری این شمع تحمل بار بیش از ۴۰۰۰ کیلونیوتن را بدون نشان دادن هرگونه علامت گسیختگی مورد تایید قرار داد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که اکثر آیین نامه‌ها ظرفیت میکروپایل‌ها را

¹ Cadden et al (2004)

کمتر از حد تخمین می‌زنند و همچنین نیاز به پایگاه‌های داده بیشتر در تنش‌های اتصالی بدست آمده و یا در مقاومت اتصالی اندازه‌گیری شده در میکروپایل نصب شده در شرایط زمین شناسی مختلف و در نهایت ارتقای آیین نامه‌های پیشنهادی برای طراحی را کمتر مورد بررسی قرار می‌دهند [۴۰].



شکل ۳-۲) نتایج آزمایش‌های بارگذاری میکروپایل با سیکل‌های متعدد بارگذاری-باربرداری [۲۷]

۴-۲- نتیجه‌گیری

با مرور تاریخچه کلی میکروپایل‌ها، این موضوع روشن می‌شود که استفاده از میکروپایل‌ها در کشور ما به دلایل گوناگون مانند سایر نقاط دنیا رواج پیدا نکرده است. به نظر می‌رسد که به علت نیاز به ساخت و سازهای گوناگون، بسیار ضروریست که به مسئله طرح و اجرای میکروپایل‌ها بیشتر پرداخته شود. یکی از مواردی که می‌تواند جالب توجه باشد، بحث تاثیر پارامترهای مختلف در بهبود ظرفیت باربری میکروپایل‌هاست. به دلیل آن‌که برخی از این پارامترها در تحقیقات عددی و نرم افزاری موردتوجه قرار گرفته و بررسی شده‌اند، به نظر می‌رسد کار بر روی مدل‌های آزمایشگاهی می‌تواند یک بحث جدید را پیگیری نماید و صحت و یا عدم صحت مطالعات عددی را بررسی نماید. همچنین در این تحقیق سعی شده است که پارامترهای جدیدی مانند طول، قطر و ضریب لاغری میکروپایل‌ها که کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند، بیشتر مطالعه شوند.

فصل ۳ :

روش تحقیق

۱-۳- مقدمه

در فصل پیش‌رو مباحث مرتبط به بخش آزمایشگاهی تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح مورد بررسی و پس از آن مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده و روش‌های نمونه‌سازی و خصوصیات نمونه‌ها برای هر آزمایش ارزیابی شده است. در انتها نیز نرم افزار تحلیل داده‌ها SPSS، نرم افزار EPR و چگونگی آنالیز ابعادی به اختصار توضیح داده شده است.

۲-۳- خصوصیات مصالح مصرفی

مصالح مورد استفاده در این تحقیق ماسه فیروزکوه (D_{11})، نوعی از ماسه سیلیکاته می‌باشد که مشخصات بدست آمده از آن به کمک آزمایش‌های مختلف از قبیل دانه‌بندی، تعیین وزن مخصوص حداقل و حداکثر و آزمایش برش مستقیم در ادامه آمده است. مصالح مصرفی دیگر لوله‌های فولادی یا همان میکروپایل‌ها می‌باشند که خصوصیات و ویژگی‌های آن در ادامه مطالب گفته خواهد شد.



شکل ۱-۳ (تصویر مصالح مصرفی؛ ماسه فیروزکوه و مدل میکروپایل)

۳-۲-۱ خصوصیات مصالح خاک

(۱) آزمایش دانه‌بندی خاک مصرفی

خاک مورد استفاده در این تحقیق ماسه فیروزکوه می‌باشد که برای تعیین مشخصات اندازه ذرات این خاک، سه مرتبه آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM D422 انجام گرفته است [۴۱].

• روش انجام آزمایش

برای این آزمایش از الک‌های ویژه‌ای استفاده شده است. ابتدا نمونه‌ی خشک را که تمام کلوخه‌های آن شکسته شده باشد را وزن کرده و بر روی بالاترین الک مجموعه‌ی الک‌ها قرار داده می‌شود. پس از آن که الک‌ها به ترتیب درشت به ریز روی هم و روی دستگاه لرزاننده قرار داده شد، در زیر ریزترین الک باید یک سینی گذاشته شود تا ریزترین دانه‌ها که از الک آخر عبور می‌کنند در آن سینی ریخته شوند. پس از آن که الک‌ها به اندازه‌ی کافی لرزانده شد باید سنگدانه‌های مانده روی هر الک را وزن کرده و نتایج را یادداشت نمود.



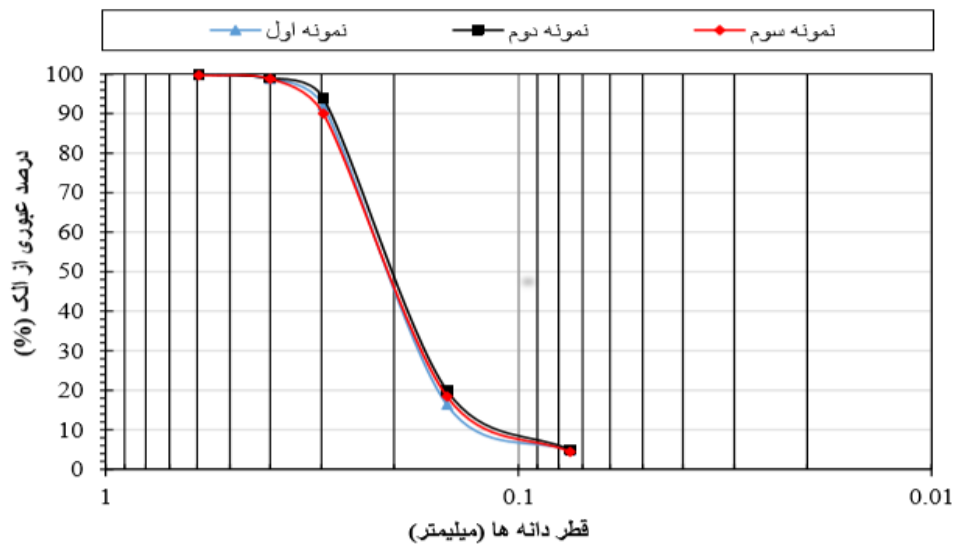
شکل (۲-۳) تصویر مجموعه الک‌ها و لرزاننده

۱. نتایج آزمایش

نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی مطابق جدول (۳-۱) و منحنی‌های دانه‌بندی مطابق شکل (۳-۳) ارائه شده است.

جدول ۳-۱ (اطلاعات دانه بندی نمونه اول، دوم و سوم (ماسه فیروزکوه))

نمونه سوم	نمونه دوم	نمونه اول	نمونه خاک
وزن مانده (gr)	وزن مانده (gr)	وزن مانده (gr)	اندازه الک
۰	۰	۰	#۴
۳	۳	۴	#۸
۶۴۱	۶۴۲	۶۴۱	#۱۶
۳۴۹	۳۵۰	۳۵۱	#۵۰
۳	۳	۲	#۱۰۰
۲	۲	۱	#۲۰۰
۲	۰	۱	pan
۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	وزن کل نمونه



شکل ۳-۳ (نمودار دانه‌بندی نمونه‌های مختلف خاک (ماسه فیروزکوه))

۲) آزمایش تعیین وزن مخصوص حداکثر و حداقل خاک مصرفی

به جهت محاسبه وزن مخصوص حداکثر و حداقل خاک می‌بایست طبق استانداردهای ASTM D4253/D4254 ، [۴۲, ۴۳] خاک در دو حالت درون استوانه ریخته و چگالی خاک ارزیابی شود. با داشتن اعداد مربوط به چگالی حداکثر و حداقل خاک، محاسبه میزان دانسیته نسبی ماسه در ادامه ممکن خواهد گردید. وسایل مورد نیاز عبارتند از: مخزن استوانه‌ای، ماسه، ترازو، وزنه آهنی، چکش پلاستیکی و...

۲. روش انجام آزمایش

در ابتدا مخزن استوانه‌ای را وزن کرده و ماسه به آرامی از طریق سیستم بارش ماسه درون استوانه ریخته می‌شود. باید توجه کنیم که در تمام مدت ریختن ماسه در مخزن، فاصله انتهای سیستم بارش ماسه تا خاک درون استوانه حدود ۲/۵ سانتی متر باشد. بعد از این که استوانه پر از ماسه شد، سر مخزن را کاملاً صاف کرده و آن را وزن می‌کنیم و با توجه به اینکه وزن قبلی استوانه موجود است می‌توان وزن خاک را محاسبه کرد. با تقسیم وزن خاک بر حجم استوانه، چگالی خاک در این حالت بدست می‌آید. این آزمایش را ۳ بار تکرار کرده و از نتایج میانگین گرفته می‌شود. این قسمت از آزمایش وزن مخصوص حداقل را می‌دهد.

اکنون نوبت به آن رسیده است که وزن مخصوص حداکثر بدست آورده شود، بدین منظور ماسه را باید با فاصله توسط سیستم بارش و به صورت متراکم درون استوانه ریخت. به این صورت که ماسه را در ۵ لایه درون استوانه ریخته و در هر لایه وزنه‌ای به وزن حدود ۱۲ کیلوگرم بر روی ماسه قرار داده و با چکش لاستیکی ۲۵ ضربه به اطراف استوانه اعمال می‌گردد. این بار نیز چگالی ماسه در حالت حداکثری بدست می‌آید. این آزمایش را نیز ۳ بار انجام داده و در نهایت از نتایج میانگین گرفته می‌شود.



شکل ۴-۳ (تصویر وسایل استفاده شده برای آزمایش تعیین حداقل و حداکثر وزن مخصوص ماسه

• نتایج آزمایش

با توجه به وزن استوانه که برابر است با ۱۷/۱ کیلوگرم و حجم استوانه که برابر است با ۲۶۶۶۳/۳۸ سانتی متر مکعب، خواهیم داشت:

جدول ۲-۳ (جدول ارزیابی حداقل چگالی خاک ماسه

مرتبۀ	وزن استوانه + ماسه (kg)	چگالی حداقل (gr/cm^3)
۱	۵۵/۷۷	۱/۳۴
۲	۵۶/۳۵	۱/۳۶
۳	۵۶/۰۶	۱/۳۵
میانگین چگالی های حداقل = $1.35 \text{ gr}/\text{cm}^3$		

جدول ۳-۳ (جدول ارزیابی حداکثر چگالی خاک ماسه

مرتبۀ	وزن استوانه + ماسه (kg)	چگالی حداقل (gr/cm^3)
۱	63.57	1.61
۲	63	1.59
۳	63.28	1.60
میانگین چگالی های حداقل = $1.60 \text{ gr}/\text{cm}^3$		

۳) آزمایش برش مستقیم خاک مصرفی

زاویه اصطکاک داخلی خاک، تابع تراکم نسبی ماسه، اندازه دانه‌ها، شکل و توزیع دانه‌ها در توده‌ی خاک می‌باشد. به همین جهت مقدار زاویه اصطکاک داخلی در دو تراکم نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد مطابق استاندارد ASTM D380 ارائه شده است [۴۴].



شکل (۵-۳) دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس

• روش انجام آزمایش

دستگاه برش مستقیم عملیات برش را به صورت کرنش کنترل انجام می‌دهد. پس از آماده سازی تجهیزات آزمایش، مراحل تهیه و ساخت نمونه‌ها شروع می‌شود. ابتدا پیچ‌های جعبه برش بسته و سنگ متخلخل داخل آن قرار داده می‌شود و ابعاد آن توسط کولیس اندازه گیری شده تا حجم جعبه برش محاسبه گردد. با داشتن وزن مخصوص‌های متناسب با تراکم ۳۰ و ۹۰ درصد در نظر گرفته شده برای این تحقیق، وزن مخلوط مورد نیاز برای پرکردن جعبه برش را محاسبه می‌کنند. پس از محاسبه مقدار ماسه مورد نظر، مصالح در سه مرحله درون قالب ریخته شده است و هرلایه با استفاده از چکش پلاستیکی متناسب با درصد تراکم، فشرده می‌شود. پس از آماده شدن قالب، نمونه به روی دستگاه برش برده می‌شود. پس از تراز نمودن بازوی دستگاه، گیج‌ها روی صفر تنظیم شده و پیچ جعبه برش باز

می‌شود. در انتها با تنظیم موتور روی سرعت مشخص و تعیین سربارهای ۵۰، ۲۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال، عملیات برش آغاز شده و زمانی خاتمه می‌یابد که نمونه به اندازه ۲۰٪ ضلع جعبه برش تغییر مکان دهد یا نیروسنج ثابت مانده یا به عقب بازگردد.

• نتایج آزمایش

نتایج آزمایش‌های برش مستقیم ارائه شده در این تحقیق بر مبنای نتایج آزمایش برش مستقیم کشاورز و بلوری (۱۳۹۰) ارائه شده است. زاویای اصطکاک بدست آمده از آزمایش برش مستقیم در جدول ذیل آورده شده است.

جدول ۴-۳ (زاویه اصطکاک داخلی بدست آمده از آزمایش برش مستقیم)

تراکم نسبی (درصد)	زاویه اصطکاک داخلی
۳۰	۳۱
۹۰	۴۳

۴) جمع بندی نتایج آزمایش‌های تعیین خصوصیات ماسه

پس از انجام آزمایش‌های سه گانه فوق مشاهده می‌شود ماسه‌ی مورد استفاده ماسه‌ی فیروزکوه با دانه‌بندی یکنواخت و بد (SP) می‌باشد. خلاصه ای از مشخصات ماسه مورد استفاده در جدول ذیل آورده شده است.

جدول ۵-۳ (مشخصات ماسه مورد استفاده (ماسه فیروزکوه)

نام ماسه	ماسه فیروزکوه (D ₁₁)
D ₅₀ (mm)	۱/۱
C _u	۱/۵۷
C _c	۱/۱۷
G _s	۲/۶۵
e _{max}	۰/۹۶
e _{min}	۰/۶۶
$\gamma_{min}(\text{ton/m}^3)$	۱/۳۵
$\gamma_{max}(\text{ton/m}^3)$	۱/۶۰

۲-۲-۳- خصوصیات مدل میکروپایل

تاکنون از ابعاد متفاوتی برای مدل نمودن شمع در آزمایشگاه استفاده شده است. هر چه شمع‌های مدل‌سازی شده در آزمایشگاه کوچکتر باشند دقت اندازه‌گیری باید افزایش یابد به گونه‌ای که بتوان نیروی محوری کوچک وارد به شمع و همچنین جابجایی‌های کوچک شمع را به دقت اندازه‌گیری نمود. بنابراین، جهت دستیابی به این مهم نیاز به وسایل اندازه‌گیری با دقت بسیار بالا می‌باشد. از طرفی مدل‌سازی شمع در ابعاد بزرگ نیاز به امکانات ویژه‌ای برای پر نمودن و کوبیدن خاک در مخزن و نحوه انتقال نیرو به شمع دارد. ابعاد مدل آزمایش را باید با در نظر گرفتن سختی نسبی خاک و شمع، تاثیر منطقه تنش که باید ۱۰ برابر قطر شمع در جهت اعمال نیرو برای شمع تحت اثر بار محوری در حالت استاتیکی باشد (پولوس و داویس^۱، ۱۹۸۰) [۴۵] و نیز توجه به شرایط و امکانات آزمایشگاه لحاظ و انتخاب نمود. برای مدل‌سازی میکروپایل‌ها، از میله‌هایی توخالی از جنس فولاد به قطرهای ۱، ۲ و ۳

^۱ Poulos , Davis (1980)

اینچ استفاده شده است. طول‌های مد نظر نیز در این سری آزمایش‌ها به ترتیب ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ متر می‌باشند.



شکل ۳-۶) ایجاد نمونه‌های میکروپایل در طول‌های مد نظر

جدول ۳-۶) خصوصیات نمونه‌های فولادی میکروپایل

۰/۱۱۹	سختی خمشی ($N \cdot m^2$)
$3/151 \times 10^8$	مدول ینگ (KPa)
۰/۵، ۰/۷۵، ۱	طول (m)
۳، ۲، ۱	قطر (inch)

۳-۳- آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی

در این قسمت وسایل و دستگاه‌های مورد نیاز به منظور انجام آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی و نیز روش انجام آزمایش‌ها به اختصار توضیح داده شده است.

۱-۳-۳- وسایل و دستگاه‌های موردنیاز

در این بخش، وسایل و دستگاه‌های موردنیاز برای انجام آزمایش‌ها معرفی شده است. در ابتدا تلاش شده است تا به صورت مختصر خصوصیات و اجزای دو دستگاه طراحی و ساخته شده تحت عناوین "دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بارگذاری بزرگ مقیاس" و "سیستم بارش ماسه" به اختصار توضیح داده شوند.

۱. دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بارگذاری بزرگ مقیاس

در این مطالعه تلاش شده است تا در ابتدا با طراحی و ساخت یک دستگاه مدل‌سازی فیزیکی با مقیاس کاهش یافته در آزمایشگاه، یک طرح ایمن و اقتصادی به منظور شناخت صحیح رفتار بار-نشست پی واقع بر خاک مسلح ارائه شود. دستگاه ساخته شده علاوه بر تجهیز آزمایشگاه بدون شک می‌تواند افق‌های جدیدی از مطالعه سازه‌های ژئوتکنیکی را برای محققین بگشاید. قابلیت اعتماد بالا به نتایج، کاهش هزینه‌ها، رفع محدودیت‌های مدل‌سازی و کاهش خطاهای انسانی و سیستماتیک از جمله مزایای دستگاه ساخته شده می‌باشد.



شکل ۳-۷) نمای کلی از دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بارگذاری بزرگ مقیاس

• اجزای دستگاه مدل سازی فیزیکی

اجزای دستگاه مدل سازی فیزیکی جدید عبارتند از: محفظه ی آزمایش، سیستم و قاب بارگذاری و سیستم کنترل، قرائت و ثبت داده ها. طراحی و عملکرد این قسمت ها در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

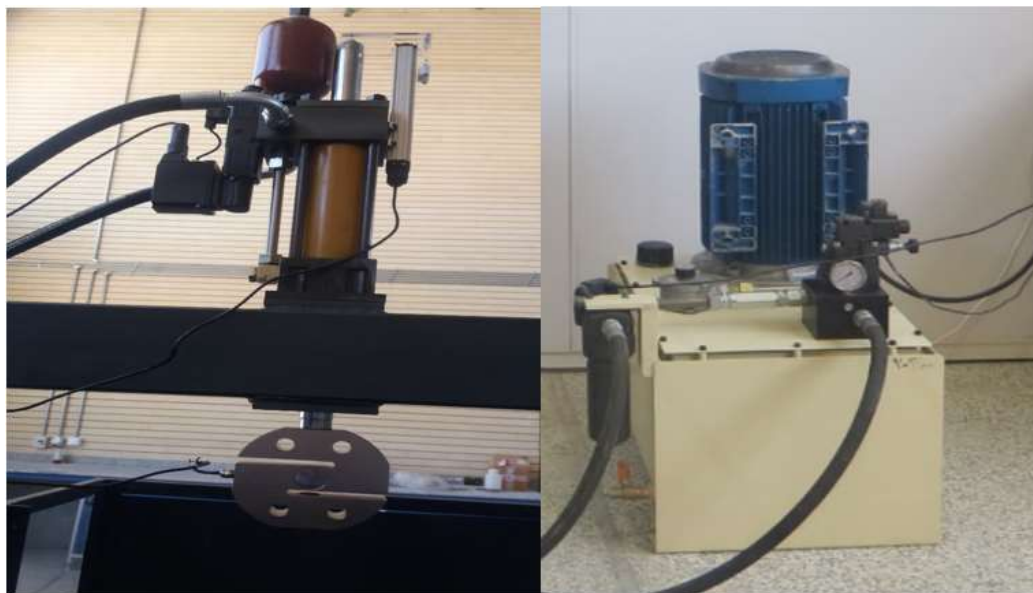
• محفظه ی آزمایش و اجزای آن

مخزن خاک طراحی شده قابلیت نگهداری نمونه های خاک و پتانسیل انواع مدل سازی ها را دارا می باشد که به شکل یک مکعب مستطیل با ابعاد $1 \times 1/20 \times 1/27$ متر طراحی گردیده است. مدل مکعبی طراحی شده فلزی بوده که در دو سمت طولی آن از پلاکسی گلاس استفاده شده است. محفظه به صورت آب بند به جهت انجام آزمایش های اشباع و در کف به صورت صلب به منظور جلوگیری از هرگونه تغییر شکل ساخته شده است. در جداره های عرضی درب های کشویی برای بارگذاری های جانبی و تخلیه مصالح تعبیه شده است. لازم به ذکر است غلتک های با قابلیت چرخش 360° درجه به منظور جابه جایی و سهولت در آماده سازی نمونه، عملیات بارش و تخلیه استفاده گردیده است.

• سیستم بارگذاری

به منظور اعمال بارهای استاتیکی و سیکی مد نظر از سیستم اکچویتور استفاده شده است. سیستم بارگذاری قابلیت اعمال بارهای دینامیکی و استاتیکی را دارا می باشد. با استفاده از این دستگاه می توان بارهای مونوتونیک و هارمونیک سینوسی را تا فرکانس های مشخص روی سازه ی مورد نظر بارگذاری کرد، بارگذاری وارده می تواند هم به صورت کرنش کنترل و هم تنش کنترل باشد. این دستگاه دارای یک چارچوب فلزی H شکل بوده که در داخل بتن به ضخامت ۴۰ سانتی متر به منظور نصب سیستم بارگذاری به صورت قائم و جانبی دفن شده است. سیستم بارگذاری شامل یک پمپ هیدرولیک (سیستم

پاورپک) به منظور تامین فشار و یک اکچویتور می‌باشد. سیستم بارگذاری همچنین از یک سرووال، حسگر جابه‌جایی و اکومولاتور^۱ به منظور جبران کمبود دبی روغن در بارگذاری‌های دینامیکی تشکیل شده است.



شکل ۸-۳ (سیستم بارگذاری؛ سیستم پاورپک و اکچویتور)

• سیستم کنترل، قرائت و ثبت داده‌ها

به منظور سرعت بالای پردازش داده‌های دریافتی از مدل و همچنین دقت و صحت انجام آزمایش‌ها از سیستم کامپیوتری همراه با نرم‌افزار استفاده گردیده است. سیستم نرم‌افزاری قادر به کنترل بارگذاری از طریق اعمال بارهای استاتیکی تا میزان و سرعت معین و همچنین اعمال بارهای دینامیکی تا فرکانس و دامنه مشخص می‌باشد. دریافت داده‌ها از سنسورهای تعبیه شده در مدل با قابلیت اطمینان بالا و البته توانایی ذخیره‌سازی از دیگر دلایل استفاده از سیستم کامپیوتری می‌باشد. لازم به ذکر است بهره‌برداری‌ها و قرائت‌های دستی خطاهای آزمایش را زیاد می‌کند. اکچویتور خطی دارای یک سنسور موقعیت و یک فشارسنج می‌باشد. سنسور اندازه‌گیری جابه‌جایی^۲ جهت اندازه‌گیری تغییر مکان‌ها

¹ Accumulator

² LVDT

استفاده می‌شود. سنسور اندازه‌گیری بار محوری^۱ نیز دارای ظرفیت کششی و فشاری مشخص و دارای کیفیت و دقت مناسب برای انجام آزمایش‌های سیکلی می‌باشد. دیتالاگر^۲ در نظر گرفته شده نیز وظیفه‌ی تبادل اطلاعات بین سیستم کنترلر و سنسورها را برعهده دارد. در انتها لازم به ذکر است وظیفه‌ی تامین برق سیستم بر عهده تابلو برق می‌باشد.



شکل ۹-۳) سیستم کنترل قرائت و ثبت داده‌ها؛ دیتالاگر، سیستم کامپیوتری

۲. سیستم بارش ماسه

در این مطالعه همچنین تلاش شده است تا با طراحی و ساخت یک دستگاه دیگر تحت عنوان "سیستم بارش ماسه"، گام مهمی در جهت انجام آزمایش‌های پیش رو و تجهیز آزمایشگاه برداشته شود.

• خصوصیات و اجزای تشکیل دهنده

¹ Load cell

² Data logger

روش بارش ماسه یک روش مناسب به جهت آماده سازی نمونه به ویژه برای خاک‌های ماسه‌ای خشک می‌باشد. هدف استفاده از این روش، رسیدن به دانسیته مشخص برای مصالح و تکرارپذیری شرایط آزمایشگاهی می‌باشد. قسمت‌های مختلف سیستم بارش ماسه عبارتند از: مخزن ماسه، صفحه فلزی و چوبی مشبک، مجموعه‌ی الک‌ها و سیستم جرثقیل دستی. به منظور جابه‌جایی سیستم بارش ماسه از جرثقیل دستی استفاده شده است. این سیستم می‌تواند با جابه‌جایی قائم مخزن در ارتفاع معین ثابت گردیده و همچنین با حرکات دستی مخزن در صفحه‌ی افقی و یا جهت دلخواه جابه‌جا گردد.



شکل (۱۰-۳) نمای کلی از سیستم بارش ماسه

۲-۳-۳- روش انجام آزمایش

هدف از انجام برنامه آزمایش‌ها، بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر ظرفیت باربری و نشست فونداسیون بر روی خاک ماسه ای می‌باشد. در این آزمایش‌ها تلاش شده است تا اثر پارامترهای طول و قطر میکروپایل‌ها و همچنین تراکم نسبی خاک بر ظرفیت باربری میکروپایل‌ها مورد بررسی قرار بگیرد. پس از تعیین خصوصیات اولیه خاک از جمله دانه‌بندی، وزن مخصوص حداقل و حداکثر و زاویه اصطکاک داخلی، خاک مورد بررسی در حجم مد نظر آماده شد. در ابتدا به منظور بررسی پارامترهای طول و قطر

در تراکم نسبی ۳۰ درصد از سیستم بارش ماسه استفاده شده است. حجم خاک مد نظر توسط سیستم بارش ماسه با کمترین ارتفاع از کف جعبه به منظور رسیدن به تراکم نسبی مد نظر حداقل (۳۰ درصد)، به درون جعبه منتقل شد. پس از قرارگیری حجم کامل خاک درون جعبه، سطح خاک تسطیح و برای کوبیدن میکروپایل‌ها آماده گردید. میکروپایل‌ها با فاصله از هم به گونه‌ای کوبیده شدند که تقریباً ۴ cm از طول آن از خاک بیرون باشد. پس از قرارگیری میکروپایل‌ها در زیر اهرم بارگذاری (لودسل)، میزان جابه‌جایی نهایی میکروپایل توسط سیستم دستگاه بارگذاری اعمال گردید. کلیه بارگذاری‌های استاتیکی و کرنش کنترل با حداکثر جابه‌جایی ۷۰ mm و نرخ جابه‌جایی ۱۰ mm/min در نظر گرفته شد. به منظور انجام آزمایش‌ها در تراکم نسبی ۹۰ درصد نیز خاک به صورت دستی به درون جعبه منتقل گردید و سپس در لایه‌های ۱۰ cm کوبیده و تحت تراکم قرار گرفت. لازم به ذکر است پس از هر آزمایش می‌بایست خاک مخزن به دلیل برهم خوردن میزان تراکم تخلیه گردد.



شکل (۱۱-۳) وضعیت نمونه‌های میکروپایل و خاک پیش از اعمال بارگذاری استاتیکی



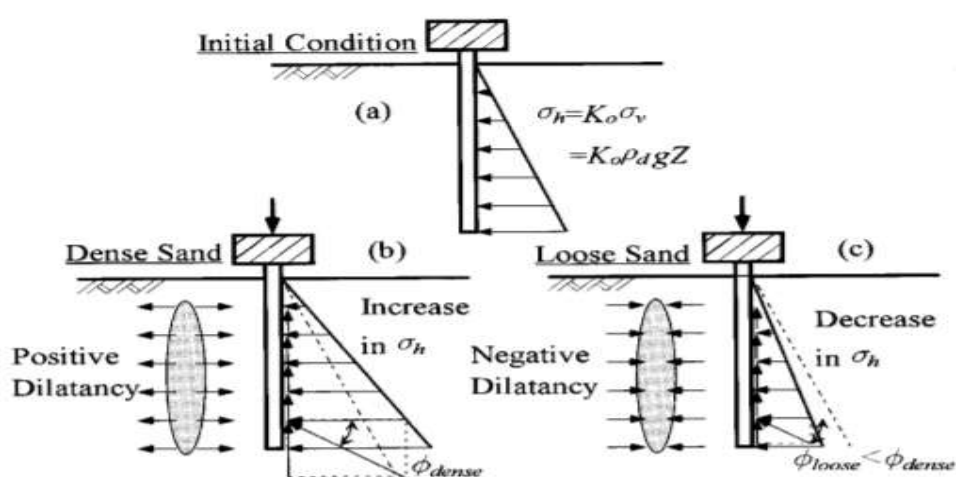
شکل ۱۲-۳) وضعیت نمونه‌های میکروپایل و خاک پس از اعمال بارگذاری استاتیکی



شکل ۱۳-۳) تخلیه مصالح ماسه از درون مخزن دستگاه

به‌منظور رسیدن به تراکم‌های مد نظر در مخزن دستگاه پس از ارزیابی مقادیر حجم مخزن و نیز میزان خاک نهایی موجود در مخزن (پس از عملیات بارش و یا متراکم سازی)، از فرمول تراکم نسبی به شرح ذیل استفاده شده است.

$$D_r = \frac{\gamma_d - \gamma_{d \min}}{\gamma_{d \max} - \gamma_{d \min}} \times \frac{\gamma_{d \max}}{\gamma_d} \quad (1)$$



شکل ۱۴-۳) مکانیزم ظرفیت باربری میکروپایل‌ها با توجه به تغییر در تنش محصور کننده در خاک ماسه ای شل و متراکم [۱]



شکل ۱۵-۳) آماده سازی نمونه های خاک در دو تراکم نسبی ۳۰ درصد (بارش ماسه) و ۹۰ درصد (متراکم سازی)

جدول ۷-۳) برنامه ی آزمایش ها

شماره	کد آزمایش	طول میکروپایل (m)	قطر میکروپایل (inch)	تراکم نسبی خاک (%)
۱	MP-0.5-1-30	۰/۵	۱	۳۰
۲	MP-0.75-1-30	۰/۷۵	۱	۳۰
۳	MP-1-1-30	۱	۱	۳۰
۴	MP-0.5-2-30	۰/۵	۲	۳۰
۵	MP-0.75-2-30	۰/۷۵	۲	۳۰
۶	MP-1-2-30	۱	۲	۳۰
۷	MP-0.5-3-30	۰/۵	۳	۳۰
۸	MP-0.75-3-30	۰/۷۵	۳	۳۰
۹	MP-1-3-30	۱	۳	۳۰
۱۰	MP-0.5-1-90	۰/۵	۱	۹۰
۱۱	MP-0.75-1-90	۰/۷۵	۱	۹۰
۱۲	MP-1-1-90	۱	۱	۹۰
۱۳	MP-0.5-2-90	۰/۵	۲	۹۰
۱۴	MP-0.75-2-90	۰/۷۵	۲	۹۰
۱۵	MP-1-2-90	۱	۲	۹۰
۱۶	MP-0.5-3-90	۰/۵	۳	۹۰
۱۷	MP-0.75-3-90	۰/۷۵	۳	۹۰
۱۸	MP-1-3-90	۱	۳	۹۰

• کالیبراسیون دستگاه

لازم به ذکر است قبل از نصب دستگاه، عملیات کالیبراسیون بر روی سنسورها انجام گرفته و معادلات کالیبراسیون به دستگاه وارد گردید. همان طور که ذکر شد در این مطالعه در کلیه آزمایش‌ها از نرخ جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. مبنای این انتخاب توصیه‌ی ادبیات فنی و نیز دقت عملکرد و کارایی دستگاه ساخته شده در این نرخ جابه‌جایی می‌باشد. شکل ذیل میزان جابه‌جایی در ازای زمان در نرخ جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه را نشان می‌دهد.

Time (s)	Displacement (mm)	Time (s)	Displacement (mm)
60.5940018	6.360000134	90.888	11.56000042
61.6040001	6.300000191	91.897003	11.73999977
62.6139984	6.53000021	92.906998	12.05000019
63.6240005	6.940000057	93.917	12
64.6330032	7.139999866	94.927002	12.81000042
65.6429977	7.289999962	95.936996	12.35000038
66.6529999	7.5	96.946999	12.43000031
67.663002	7.659999847	97.957001	12.65999985
68.6719971	7.900000095	98.967003	12.72999954
69.6819992	7.829999924	99.975998	13.01000023
70.6910019	8.130000114	100.986	13.11999989
71.7020035	8.300000191	101.996	13.35999966
72.711998	8.609999657	103.006	13.56000042
73.7220001	8.81000042	104.016	13.73999977
74.7310028	8.949999809	105.025	13.93000031
75.7409973	9.06000042	106.035	13.92000008
76.7509995	9.159999847	107.044	14.31000042
77.7610016	9.140000343	108.055	14.10999966
78.7710037	9.550000191	109.065	14.75
79.7799988	9.770000458	110.075	14.78999996
80.7900009	9.760000229	111.084	14.89000034
81.8000031	9.989999771	112.094	15.10000038
82.8099976	10.18999958	113.104	15.18999958
83.8199997	10.30000019	114.114	15.53999996
84.8290024	10.5	115.124	15.60000038
85.8389969	10.65999985	116.133	15.80000019
86.848999	10.88000011	117.143	15.93999958
87.8590012	11.03999996	118.153	16.11000061
88.8679962	11.14000034	119.163	16.29000092
89.8779984	11.31000042	120.172	16.32999992

شکل ۱۶-۳) میزان جابه‌جایی در ازای زمان در نرخ جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه

۳-۴ ظرفیت ژئوتکنیکی میکروپایل‌ها

به منظور مقایسه نتایج با تئوری کلاسیک، ظرفیت ژئوتکنیکی میکروپایل‌ها بر اساس سه پارامتر طول، قطر و آلفای باند مورد ارزیابی قرار گرفته است.

$$Q_g = \frac{\alpha_{bond}}{F.S.} \times \pi \times D_b \times L_B \quad (2)$$

در این رابطه Q_g ظرفیت باربری ژئوتکنیکی، α_{bond} مقاومت اتصالی نهایی دوغاب به خاک، D_b قطر چاله حفاری و L_b طول ناحیه اتصال می باشد. به منظور دستیابی به ظرفیت باربری ژئوتکنیکی مجاز، ظرفیت باربری نهایی بر مقدار ضریب اطمینان تقسیم گردیده است. لازم به ذکر است ضریب اطمینان در نظر گرفته شده در این مطالعه نیز مقادیر ۱ و ۲ لحاظ شده است. جدول (۸-۳) نشان دهنده‌ی مقاومت‌های اتصالی نهایی خاک به دوغاب پیشنهاد شده توسط آیین نامه (FHWA NHI 2005) می باشد. این جدول طیف‌های وسیعی از α بر مبنای نوع خاک و شیوه‌ی تزریق (A,B,C,D) را شامل می شود. مطابق جدول، روش دوغاب ریزی بر مبنای نوع A و میزان α_b برای خاک های با تراکم نسبی کم ۱۰۰ کیلوپاسکال و برای خاک‌های متراکم ۱۵۰ کیلوپاسکال لحاظ گردیده است. نمونه‌ای از محاسبات ارزیابی ظرفیت باربری ژئوتکنیکی و مقایسه آن با نتایج کسب شده در ادامه آورده شده است.

جدول ۸-۳ (خلاصه مقادیر آلفای باند میکروپایل ها

Soil / Rock Description	Grout-to-Ground Bond Ultimate Strengths, kPa (psi)			
	Type A	Type B	Type C	Type D
Silt & Clay (some sand) (soft, medium plastic)	35-70 (5-10)	35-95 (5-14)	50-120 (5-17.5)	50-145 (5-21)
Silt & Clay (some sand) (stiff, dense to very dense)	50-120 (5-17.5)	70-190 (10-27.5)	95-190 (14-27.5)	95-190 (14-27.5)
Sand (some silt) (fine, loose-medium dense)	70-145 (10-21)	70-190 (10-27.5)	95-190 (14-27.5)	95- 240 (14-35)
Sand (some silt, gravel) (fine-coarse, med.-very dense)	95-215 (14-31)	120-360 (17.5-52)	145-360 (21-52)	145-385 (21-56)
Gravel (some sand) (medium-very dense)	95-265 (14-38.5)	120-360 (17.5-52)	145-360 (21-52)	145-385 (21-56)
Glacial Till (silt, sand, gravel) (medium-very dense, cemented)	95-190 (14-27.5)	95-310 (14-45)	120-310 (17.5-45)	120-335 (17.5-48.5)
Soft Shales (fresh-moderate fracturing, little to no weathering)	205-550 (30-80)	N/A	N/A	N/A
Slates and Hard Shales (fresh- moderate fracturing, little to no weathering)	515-1,380 (75-200)	N/A	N/A	N/A
Limestone (fresh-moderate fracturing, little to no weathering)	1,035-2,070 (150-300)	N/A	N/A	N/A
Sandstone (fresh-moderate fracturing, little to no weathering)	520-1,725 (75.5-250)	N/A	N/A	N/A
Granite and Basalt (fresh- moderate fracturing, little to no weathering)	1,380-4,200 (200-609)	N/A	N/A	N/A

Type A: Gravity grout only

Type B: Pressure grouted through the casing during casing withdrawal

Type C: Primary grout placed under gravity head, then one phase of secondary "global" pressure grouting

Type D: Primary grout placed under gravity head, then one or more phases of secondary "global" pressure grouting

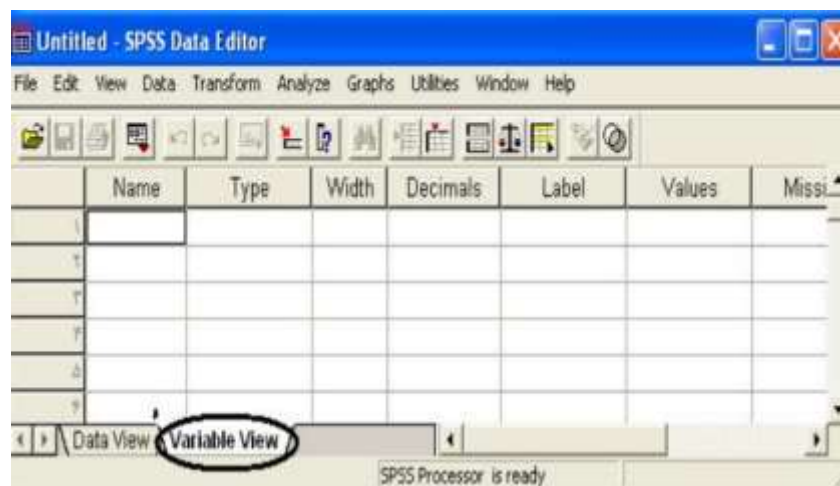
۵-۳- نرم افزار SPSS^۱

در اکثر تحقیقات با حجم زیادی از داده‌ها مواجه هستیم که اجرای عملیات بر روی داده‌ها حجم وسیعی از محاسبات را نیز در پی خواهد داشت. استفاده از یک نرم افزار مناسب آماری در این مواقع ضروری به نظر می‌رسد. در حال حاضر نرم افزارهای بسیاری با کارایی و قدرت متفاوت موجود می‌باشد که ما قصد

¹ Statistical Package for the Social Science

داریم به روش استفاده از نرم افزار SPSS در زمینه آمار توصیفی بپردازیم [۴۶]. تحلیل‌های آماری، مدیریت داده‌ها و مستند سازی داده‌ها از ویژگی‌های این نرم افزار می‌باشند.

علت استفاده اکثر محققان از نرم افزار SPSS استفاده راحت، ارائه خروجی‌های با محیط گرافیکی بسیار عالی و انجام اکثر روش‌های آماری بدون نیاز به برنامه نویسی و نیز دارا بودن محیط برنامه نویسی (SYNTAX SPSS EDITOR) برای کاربران حرفه‌ای می‌باشد. این نرم افزار به واسطه سادگی و پوشش نسبتاً مطلوب روش‌های آماری، تبدیل به یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای آماری در جهان شده است. برای استفاده از این نرم افزار آشنایی کلی با محیط سیستم عامل ویندوز کافی است.



شکل ۱۷-۳) نمایی از نرم افزار SPSS

در تحلیل داده‌ها با استفاده از SPSS سه مرحله‌ی اساسی وجود دارد. نخست، باید داده‌های خام را وارد کنید و آن‌ها را در یک پرونده ذخیره کنید. دوم، باید تحلیل مورد نیاز را برگزینید و آن را مشخص کنید و در نهایت برونداد را واریسی نمایید.

۶-۳- نرم افزار EPR^۱

روش EPR، تکنیک بسیار جدیدی است که در سال‌های اخیر توسعه یافته و در ابتدا برای مدل‌سازی پدیده‌های زیست محیطی توسط ارائه دهندگان آن بکار گرفته شد. پس از آن، کارهای دیگری از جمله ارزیابی قابلیت بالاکشیدگی در حفاری‌های صندوقه‌ای برای مکش، مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح عریض، پیش بینی نشست پی‌های سطحی و تعیین پتانسیل روانگرایی ماسه‌ها توسط روش EPR انجام شده است.

بر پایه ایده ارائه شده توسط داویدسون^۲ [۴۷]، روش EPR در سال ۲۰۰۴ توسط گیوستولیسی^۳ و همکارانش [۴۸] معرفی شد و در سال‌های بعد توسعه یافت. روش EPR یک تکنیک دو مرحله‌ای برای ساخت مدل‌های سمبولیک شامل تعیین ساختار و تخمین پارامتر می‌باشد. در روش EPR، از یک الگوریتم ژنتیک ساده استفاده می‌شود. این نرم افزار بر پایه برنامه نویسی در محیط MATLAB ارائه شده است.

¹ Evolutionary Polynomial Regression

² Davidson

³ Giustolisi

Evolutionary Polynomial Regression

1 EPR Type

$Y = \sum(a_i X_1^{n_1} X_2^{n_2} \dots X_k^{n_k}) + a_0$

2 Regression Type

Dynamical

3 Function

Logarithm

4 Terms

[1:10]

5 Expon

[0.5 1 2]

6 na, nb+nl

[4 4]

7 Scale Input-Output

[0 1] [0 1]

8 Solution

LS

9 Gen

10

10

Seed
Plot
Bias

11

☒ Car ☐ PCS ☐ Czi

12 MOGA strategy

No

13

OK

14

Name of the File

xxxData

15

شکل ۱۸-۳ (محیط نرم افزار EPR

فصل ۴ :

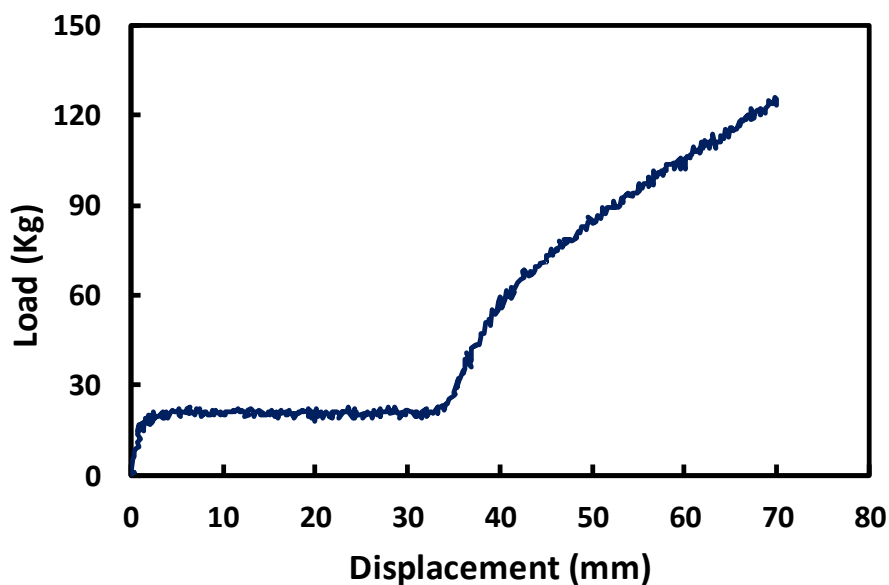
نتایج و تفسیر آنها

۱-۴- مقدمه

در این فصل تلاش شده است تا نتایج آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی بارگذاری استاتیکی کرنش کنترل بر روی میکروپایل‌های با طول و قطر مختلف در خاک‌های با تراکم نسبی متفاوت بیان گردد. نحوه‌ی ارائه‌ی اطلاعات به صورت جدول و نمودار خواهد بود که تفسیر هر یک در ادامه گفته خواهد شد. نتایج آزمایش‌های مرجع در هر تراکم نسبی خاک، میزان اثرگذاری پارامتر طول، قطر و تراکم خاک، میزان تاثیر کلاهدک در تحمل ظرفیت باربری، تحلیل حساسیت با نرم‌افزار SPSS، مدل‌های پیش‌بینی EPR و نتیجه‌گیری کلی، از مباحث مطرح شده در این فصل خواهند بود.

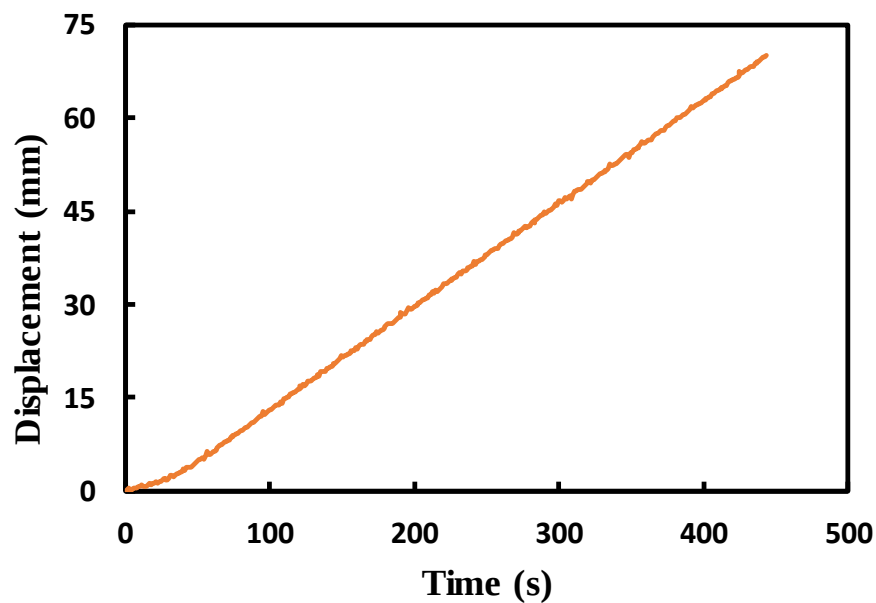
۲-۴- تعریف آزمایش مرجع

در ابتدا نتایج یکسری آزمایش مرجع به منظور مقایسه هرچه راحت‌تر دیگر آزمایش‌ها آورده شده است. آزمایش‌های مرجع در هر دو تراکم نسبی خاک ۳۰ و ۹۰ درصد در کمترین طول (۰/۵ متر) و کمترین قطر (۱ اینچ) ارائه شده است. در ادامه رفتار تغییر ظرفیت باربری در ازای افزایش جابه‌جایی برای هر نمودار مورد تفسیر قرار گرفته است.



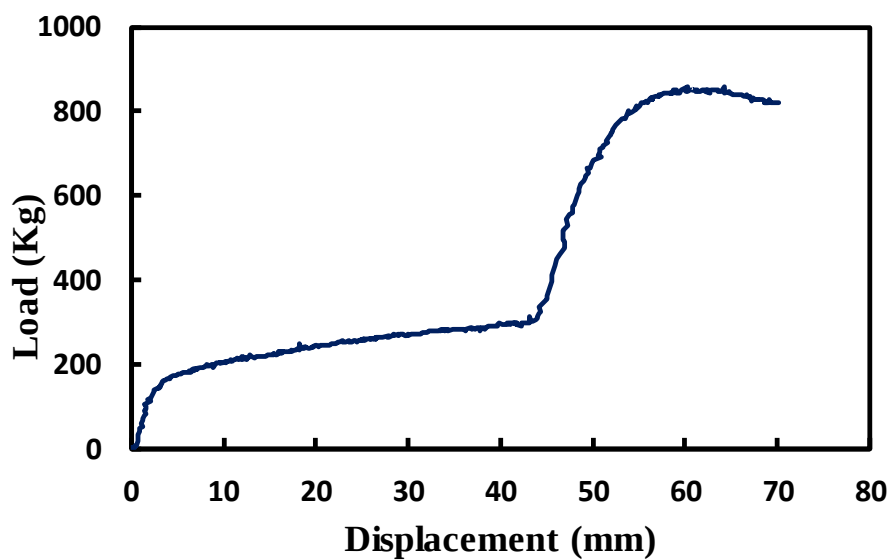
شکل ۱-۴) نمودار بار- جابه‌جایی میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطر ۱ اینچ در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد

در ابتدا با اعمال نیرو به صورت استاتیکی و با نرخ جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه، میکروپایل تحت اثر نیروی فشاری به منظور رسیدن به حداکثر جابه‌جایی ۷۰ میلی‌متر شروع به حرکت می‌کند. مشاهده می‌گردد در ابتدا میکروپایل تا رسیدن به یک میزان جابه‌جایی کم (۳ میلی‌متر) افزایش تقریباً ۲۰ کیلوگرمی در نیرو را تجربه می‌کند. در ادامه خاک گسیخته شده و به ازای افزایش جابه‌جایی دیگر تغییرات نیرو وجود ندارد. پس از رسیدن کلاهک به خاک ناگهان نیرو افزایش یافته و تغییرات بسیاری را نسبت به قبل تجربه می‌کند. این اختلاف در ظرفیت باربری قبل و بعد از رسیدن کلاهک به خاک را می‌توان ناشی از اثرگذاری مشترک کلاهک و میکروپایل در تحمل بار اعمالی و سهم قابل توجه کلاهک دانست. در نهایت با رسیدن میکروپایل به حداکثر جابه‌جایی تعریف شده ۷۰mm، میکروپایل دیگر افزایش نیرو را تجربه نکرده و نیرو شروع به کاهش می‌کند.



شکل ۴-۲ (نمودار جابه‌جایی-زمان میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطر ۱ اینچ در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد

نمودار جابه‌جایی-زمان میکروپایل نشان دهنده‌ی افزایش میزان جابه‌جایی و فرو رفتگی میکروپایل در خاک با گذشت زمان می‌باشد. این نشست با زمان سپری شده رابطه خطی داشته و برای همه نمودارها برقرار می‌باشد.



شکل ۴-۳ (نمودار بار-جابه‌جایی میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطر ۱ اینچ در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد

در این نمودار نیز ملاحظه می‌گردد با افزایش مقدار کم جابه‌جایی در ابتدا، نیرو به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد (افزایش ۱۶۵ کیلوگرمی در ازای ۴ میلی‌متر جابه‌جایی). در ادامه نمودار با شیب ملایم افزایش نیرو به جابه‌جایی‌های بیشتر رسیده تا این‌که کلاhek به خاک می‌رسد. با رسیدن کلاhek به خاک، نیرو به صورت ناگهانی افزایش یافته تا در نهایت به حداکثر جابه‌جایی خود رسیده است. لازم به ذکر است برخلاف نمودار قبل، تغییرات نیرو بر حسب جابه‌جایی پیش از رسیدن به جابه‌جایی ۷۰mm خطی شده و دیگر افزایش در نیرو مشاهده نمی‌گردد. ترکیب تراکم زیاد خاک و کوبیدن منجر به افزایش قابل ملاحظه نیرو در این حالت گردیده است.

نتایج نمودارهای بار – جابه‌جایی در هر دو آزمایش مرجع نتایج مطالعات پیشین در ابعاد آزمایشگاهی و میدانی را تایید می‌کند. بررسی‌های انجام شده پیشین در ادبیات فنی به منظور بررسی رفتار نیرو – جابه‌جایی مدل‌های میکروپایل تحت بارهای استاتیکی از جمله نتایج ارائه شده توسط عبدالعزیز^۱ (۲۰۱۲) که با استفاده از آزمایش‌های میدانی و بررسی‌های عددی بر روی میکروپایل‌های توخالی صورت گرفت و نیز پژوهش میدانی انجام گرفته توسط هان و یه^۲ (۲۰۰۶) در میکروپایل‌های تحت فشار، صحت نتایج بدست آمده را تایید می‌کند.

۳-۴- ارزیابی اثر طول و قطر میکروپایل‌ها

در این قسمت اثر طول و قطر به عنوان دو پارامتر اساسی در ارزیابی رفتار میکروپایل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. طول‌های مورد بررسی به ترتیب ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ متر و قطرهای مورد بررسی به ترتیب ۱، ۲ و ۳ اینچ می‌باشند. در ادامه میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها به ازای طول‌ها و قطرهای مختلف در جدول ذیل و همچنین نمودارهای مربوطه به همراه تجزیه و تحلیل نتایج آورده شده است.

¹ Abd Elaziz (2012)

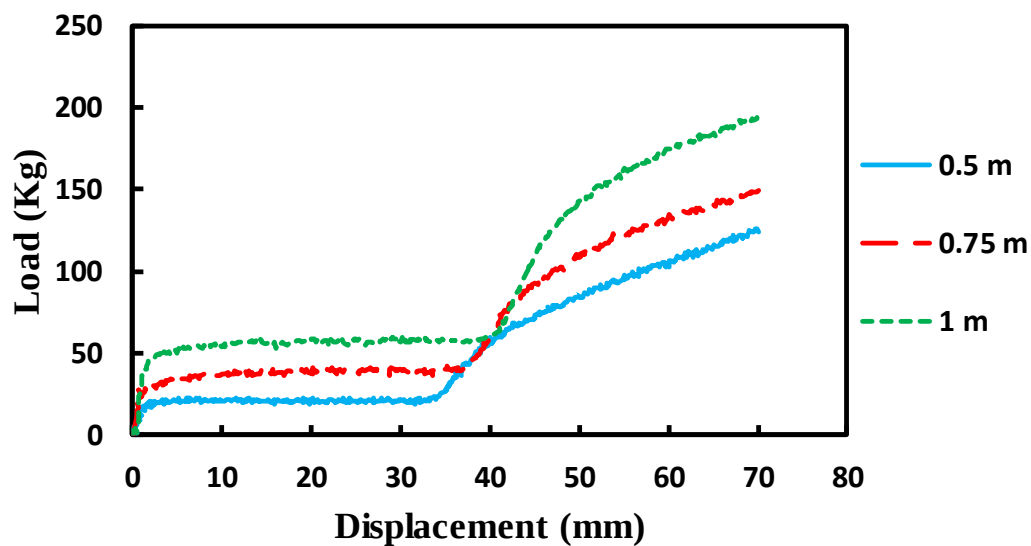
² Han and Ye (2006)

جدول ۴-۱) ظرفیت باربری های میکروپایل به ازای طول ها و قطرهای مختلف در تراکم نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد

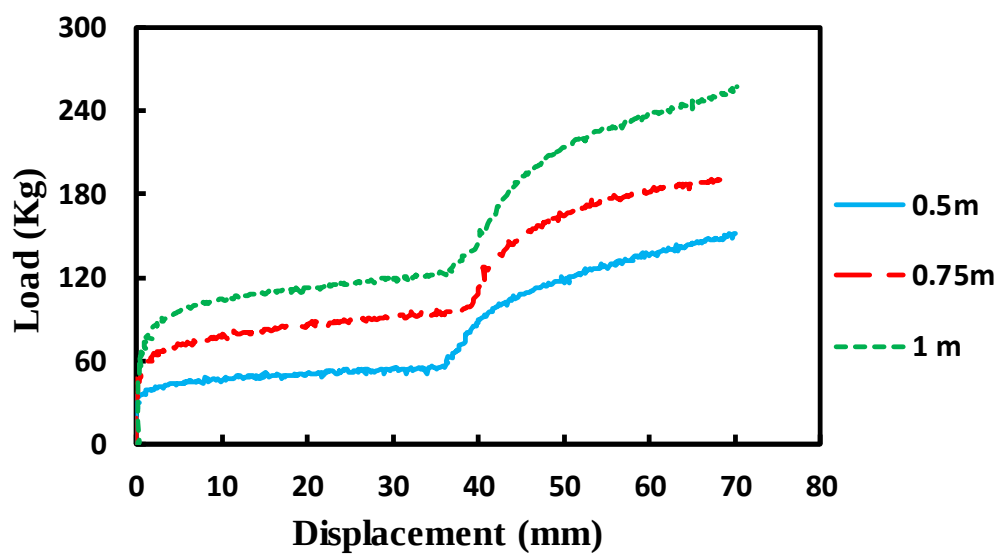
شماره	کد آزمایش	طول میکروپایل (m)	قطر میکروپایل (inch)	تراکم نسبی خاک(%)	ظرفیت باربری خاک (Kg)
۱	MP-0.5-1-30	۰/۵	۱	۳۰	۱۲۳
۲	MP-0.75-1-30	۰/۷۵	۱	۳۰	۱۴۹
۳	MP-1-1-30	۱	۱	۳۰	۱۹۴
۴	MP-0.5-2-30	۰/۵	۲	۳۰	۱۵۱
۵	MP-0.75-2-30	۰/۷۵	۲	۳۰	۱۹۳
۶	MP-1-2-30	۱	۲	۳۰	۲۵۶
۷	MP-0.5-3-30	۰/۵	۳	۳۰	۲۱۱
۸	MP-0.75-3-30	۰/۷۵	۳	۳۰	۳۱۴
۹	MP-1-3-30	۱	۳	۳۰	۵۷۴
۱۰	MP-0.5-1-90	۰/۵	۱	۹۰	۸۲۰
۱۱	MP-0.75-1-90	۰/۷۵	۱	۹۰	۱۱۰۰
۱۲	MP-1-1-90	۱	۱	۹۰	۱۶۰۸
۱۳	MP-0.5-2-90	۰/۵	۲	۹۰	۱۰۹۲
۱۴	MP-0.75-2-90	۰/۷۵	۲	۹۰	۱۶۴۲
۱۵	MP-1-2-90	۱	۲	۹۰	۲۵۳۶
۱۶	MP-0.5-3-90	۰/۵	۳	۹۰	۱۶۲۰
۱۷	MP-0.75-3-90	۰/۷۵	۳	۹۰	۲۸۸۴
۱۸	MP-1-3-90	۱	۳	۹۰	۶۱۲۰

نمودارهای بار-جابجایی به ازای قطر ها و طول های مختلف میکروپایل در تراکم نسبی ۳۰ درصد

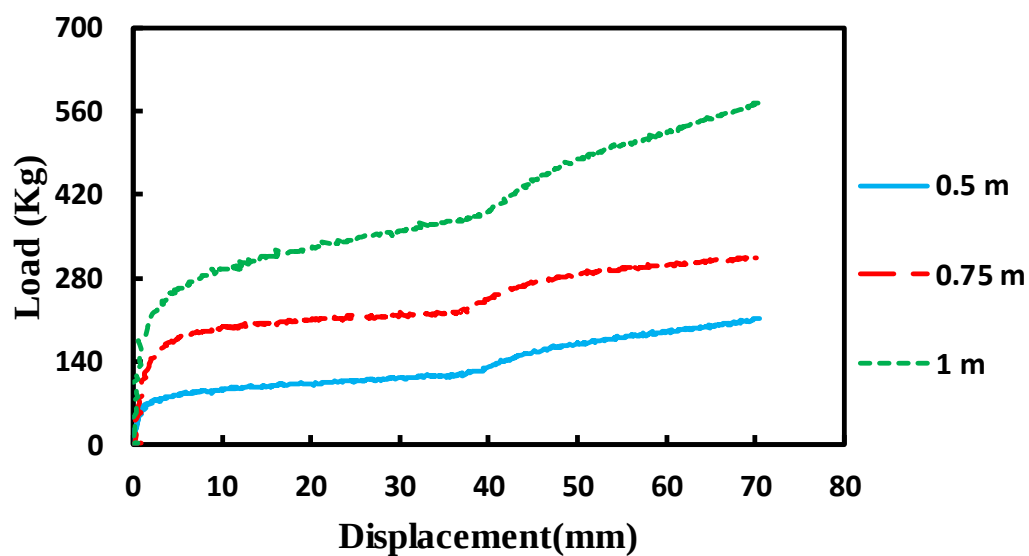
خاک به شرح ذیل می باشد:



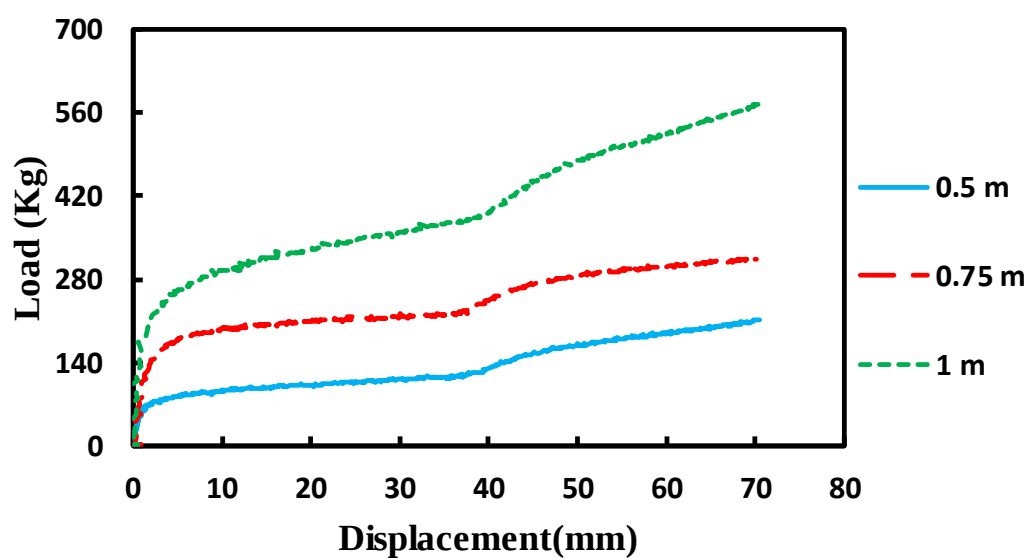
شکل ۴-۴) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با قطر ۱ اینچ و طول‌های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد



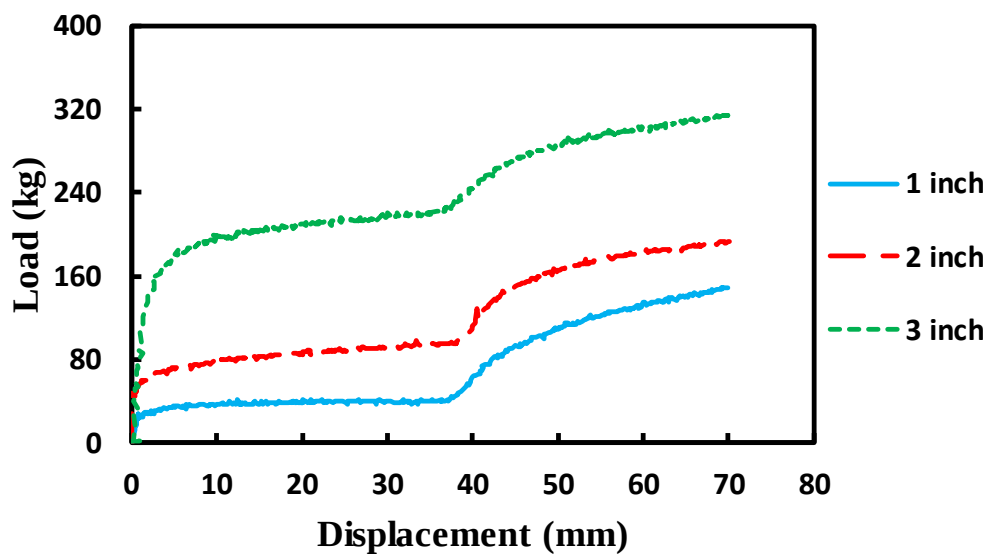
شکل ۴-۵) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با قطر ۲ اینچ و طول‌های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد



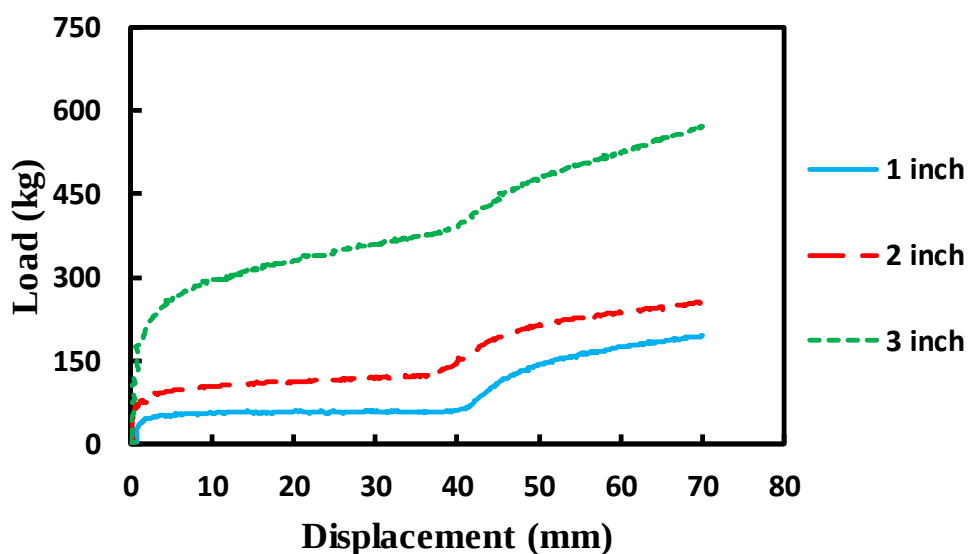
شکل ۴-۶) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با قطر ۳ اینچ و طول‌های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد



شکل ۴-۷) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطرهای مختلف در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد



شکل ۴-۸) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با طول ۰/۷۵ متر و قطرهای مختلف در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد



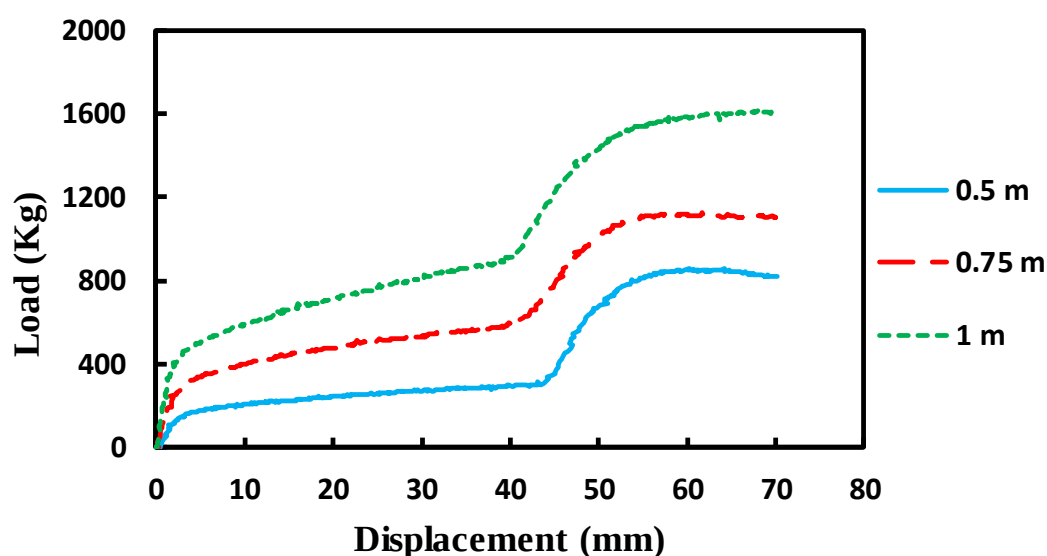
شکل ۴-۹) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با طول ۱ متر و قطرهای مختلف در خاک با تراکم نسبی ۳۰ درصد

همان گونه که در نمودارهای (۴-۴) تا (۴-۹) نشان داده شده است در تراکم نسبی خاک ۳۰ درصد، در یک قطر ثابت، افزایش در طول میکروپایل منجر به افزایش ظرفیت باربری می‌گردد. با افزایش قطر میکروپایل نیز در یک طول ثابت، افزایش ظرفیت باربری در همین میزان تراکم خاک مشاهده می‌گردد. این موضوع نشان دهنده‌ی ارتباط مستقیم میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها با طول و قطر آنها

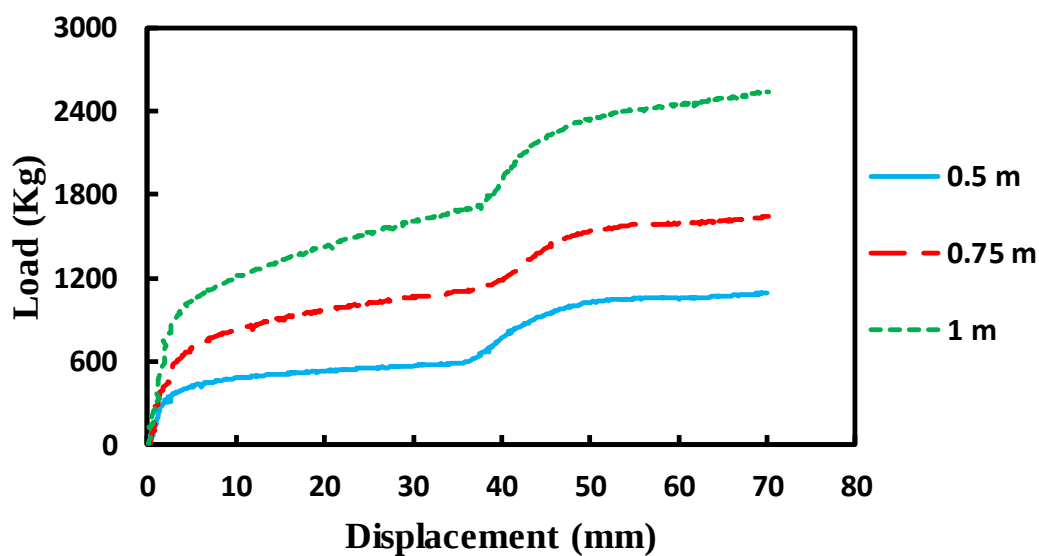
می‌باشد. علت این افزایش ظرفیت باربری را می‌توان به افزایش سطح تماس خاک و میکروپایل و در نتیجه افزایش اصطکاک جداره مرتبط دانست.

مقایسه‌ی روند تغییر نمودارها همچنین نشان دهنده‌ی این است که در تراکم نسبی ۳۰ درصد با افزایش میزان قطر در طول‌های مختلف و افزایش طول در قطرهای مختلف، میزان تغییرات ظرفیت باربری قبل و بعد از رسیدن کلاهک به خاک کاهش یافته و شیب نمودار بار-جاب‌جایی در طرفین تقریباً یکسان می‌شود. این سبک از رفتار نشان دهنده‌ی این است که در این حالت تقریباً تمام ظرفیت باربری توسط میکروپایل تامین می‌شود.

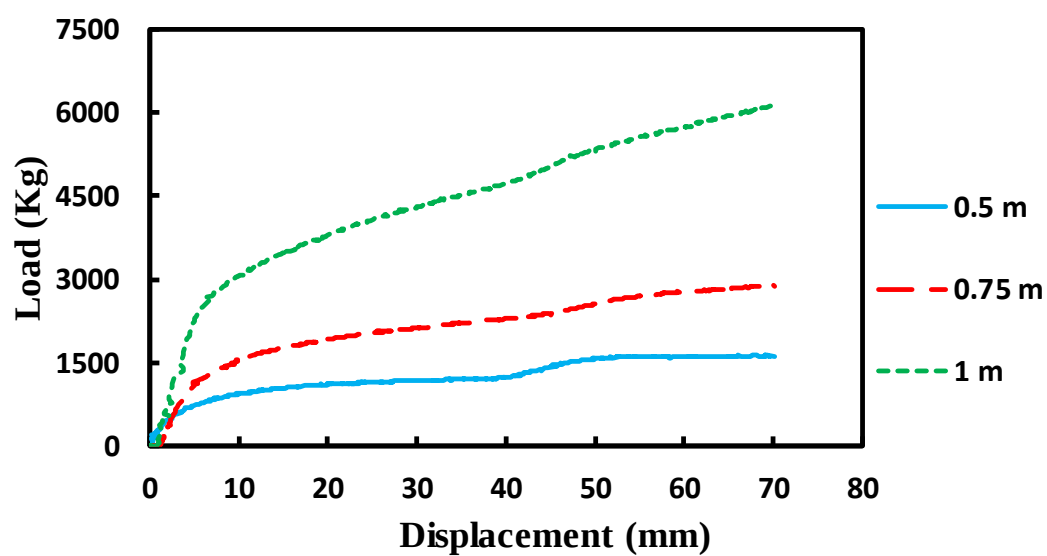
نمودارهای بار-جاب‌جایی به ازای قطرهای و طول‌های مختلف میکروپایل در تراکم نسبی ۹۰ درصد خاک به شرح ذیل می‌باشد:



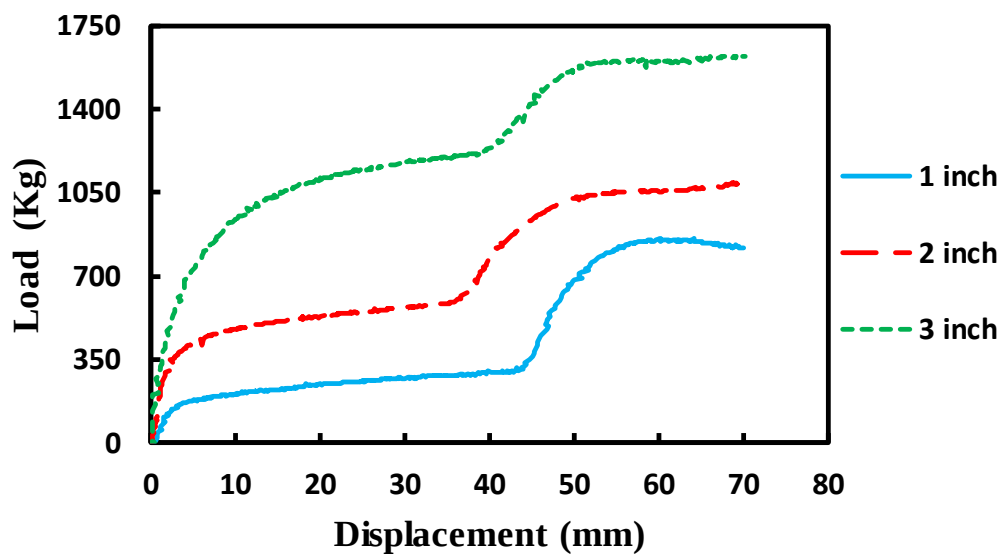
شکل ۱۰-۴) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با قطر ۱ اینچ و طول‌های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد



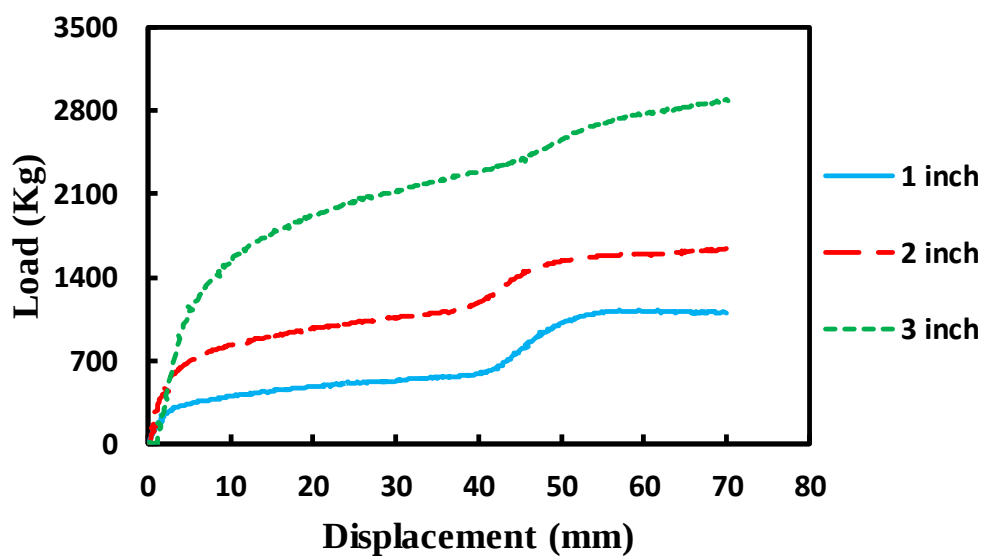
شکل ۴-۱۱) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با قطر ۲ اینچ و طول‌های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد



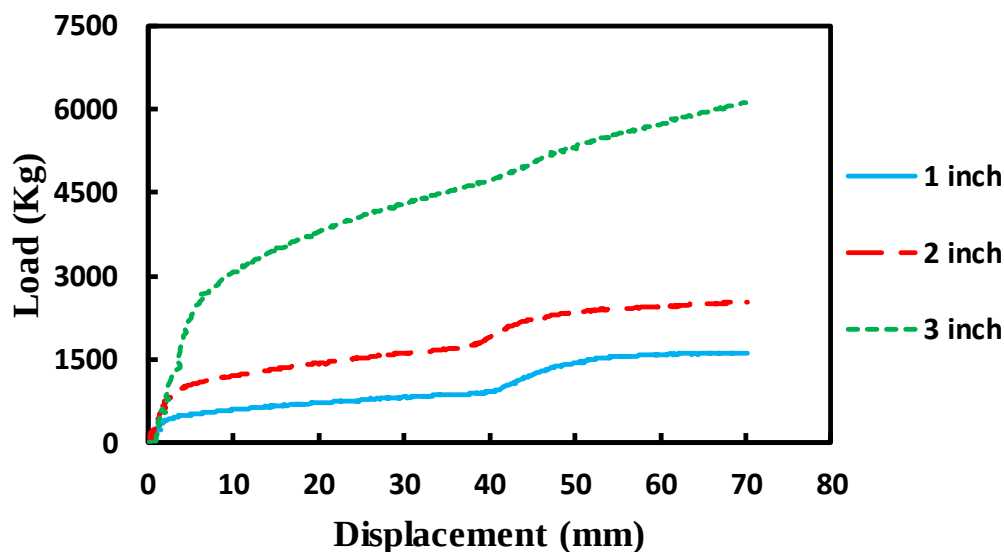
شکل ۴-۱۲) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با قطر ۳ اینچ و طول‌های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد



شکل ۴-۱۳) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطرهای مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد



شکل ۴-۱۴) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با طول ۰/۷۵ متر و قطرهای مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد



شکل ۴-۱۵) نمودار بار-جابجایی میکروپایل با طول ۱ متر و قطرهای مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد

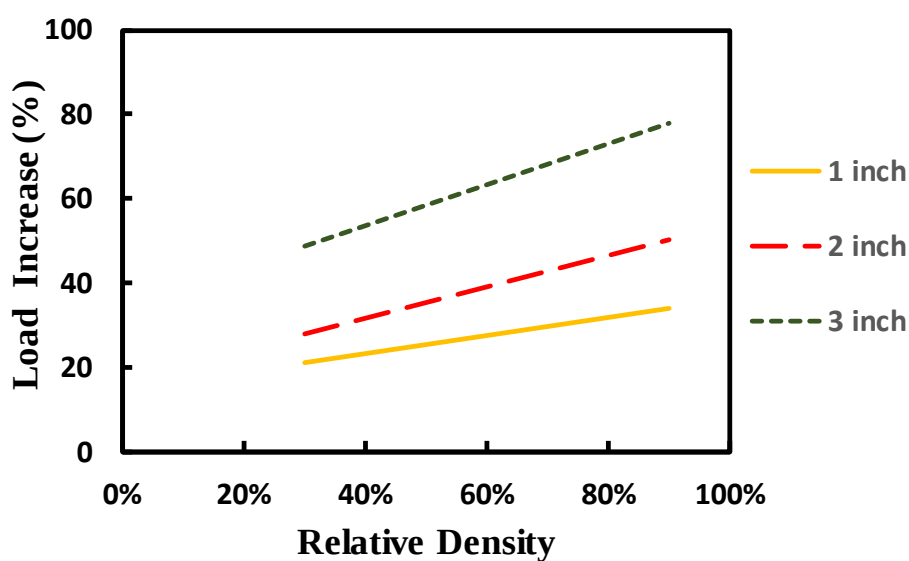
همان گونه که در نمودارهای (۴-۱۰) تا (۴-۱۵) نشان داده شده است، در تراکم نسبی خاک ۹۰ درصد، در یک قطر ثابت، افزایش در طول میکروپایل منجر به افزایش ظرفیت باربری می‌گردد. با افزایش قطر میکروپایل نیز در یک طول ثابت، افزایش ظرفیت باربری در همین میزان تراکم خاک مشاهده می‌شود. ارتباط مستقیم افزایش ظرفیت باربری با افزایش پارامتر طول و قطر میکروپایل‌ها از دیگر نتایج تحلیل نمودارها می‌باشد که علت آن پیشتر توضیح داده شد.

مقایسه‌ی روند تغییر نمودارها در این قسمت نیز همانند قسمت قبل نشان دهنده‌ی این است که در تراکم نسبی ۹۰ درصد با افزایش میزان قطر در طول‌های مختلف و افزایش طول در قطرهای مختلف، میزان تغییرات ظرفیت باربری قبل و بعد از رسیدن کلاهی به خاک کاهش یافته و شیب نمودارهای بار-جابجایی در طرفین تقریباً یکسان می‌شود که علت آن پیشتر توضیح داده شد.

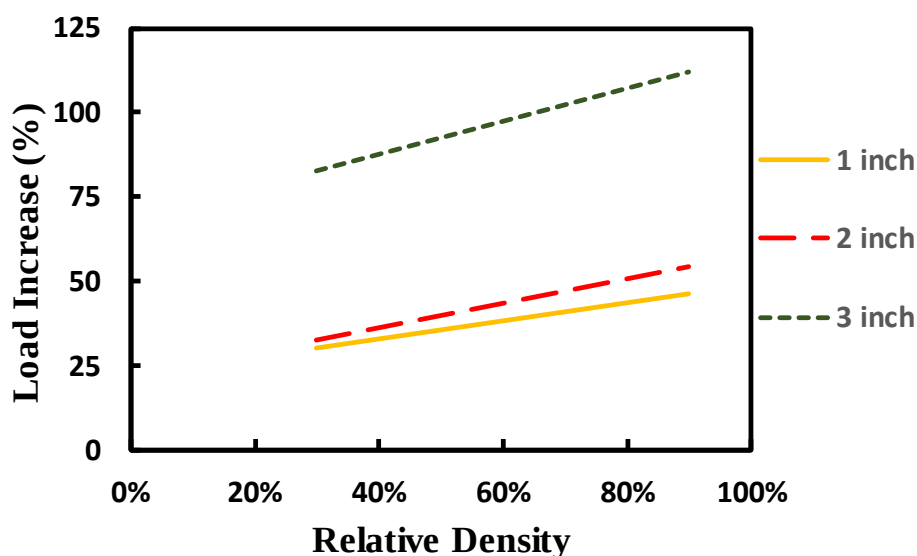
در ادامه میزان افزایش ظرفیت باربری (برحسب درصد) به ازای تغییرات طول در تراکم‌های نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد ارائه شده است. نمودارهای (۴-۱۶) تا (۴-۱۷) نیز به جهت نشان دادن میزان تاثیر تغییرات پارامتر طول در افزایش ظرفیت باربری ترسیم گشته‌اند.

جدول ۴-۲ (میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات طول در قطرهای مختلف در تراکم‌های نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد

تراکم نسبی	تغییرات طول	قطر	افزایش ظرفیت باربری
۳۰٪	۰,۷۵ متر به ۰,۷۵ متر	۱ اینچ	٪ ۲۱,۱۳
		۲ اینچ	٪ ۲۷,۸۱
		۳ اینچ	٪ ۴۸,۸۱
	۰,۷۵ متر به ۱ متر	۱ اینچ	٪ ۳۰,۲
		۲ اینچ	٪ ۳۲,۶۴
		۳ اینچ	٪ ۸۲,۸
۹۰٪	۰,۷۵ متر به ۰,۷۵ متر	۱ اینچ	٪ ۳۴,۱۴
		۲ اینچ	٪ ۵۰,۳۶
		۳ اینچ	٪ ۷۸,۰۲
	۰,۷۵ متر به ۱ متر	۱ اینچ	٪ ۴۶,۸
		۲ اینچ	٪ ۵۴,۴۴
		۳ اینچ	٪ ۱۱۲,۲



شکل ۴-۱۶ (میزان افزایش ظرفیت باربری (بر حسب درصد) به ازای افزایش طول ۵۰ درصدی میکروپایل در قطرهای متفاوت و تراکم‌های نسبی مختلف خاک



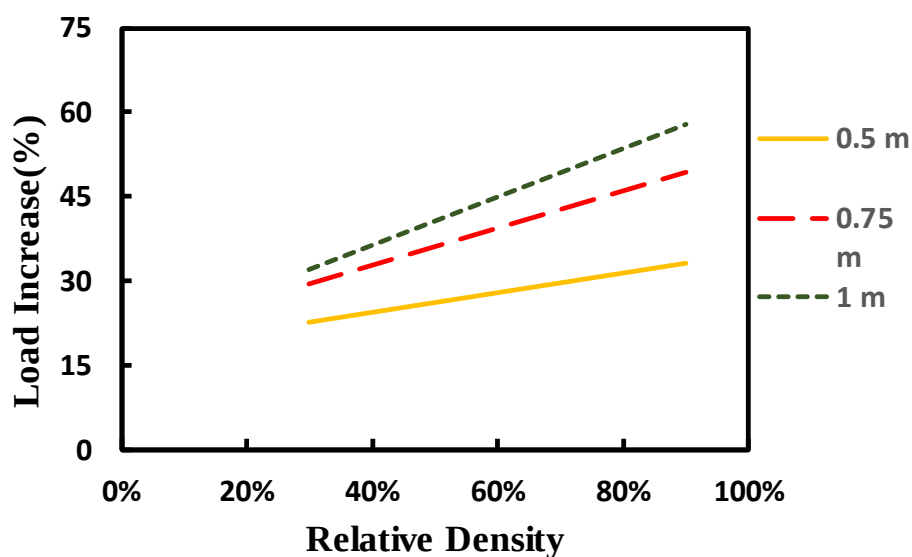
شکل ۴-۱۷) میزان افزایش ظرفیت باربری (بر حسب درصد) به ازای افزایش طول ۳۳ درصدی میکروپایل در قطرهای متفاوت و تراکم‌های نسبی مختلف خاک

پس از بررسی جدول و نمودارهای ارائه شده مرتبط با میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات طول ۵۰ و ۳۳ درصدی در قطرهای و تراکم‌های نسبی مختلف، ذکر نکات ذیل ضروری به نظر می‌رسد: نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد بر خلاف انتظار و علیرغم افزایش طول کمتر در حالت دوم (۳۳ درصد) نسبت به حالت اول (۵۰ درصد)، ظرفیت‌های باربری در هر دو تراکم نسبی در حالت دوم نسبت به حالت اول بیشتر افزایش یافته است. این موضوع نشان دهنده‌ی این است که علیرغم ارتباط مستقیم میزان افزایش ظرفیت باربری و طول میکروپایل، ظرفیت باربری بیشتر تابع طول نهایی باشد تا میزان درصد افزایش طول میکروپایل.

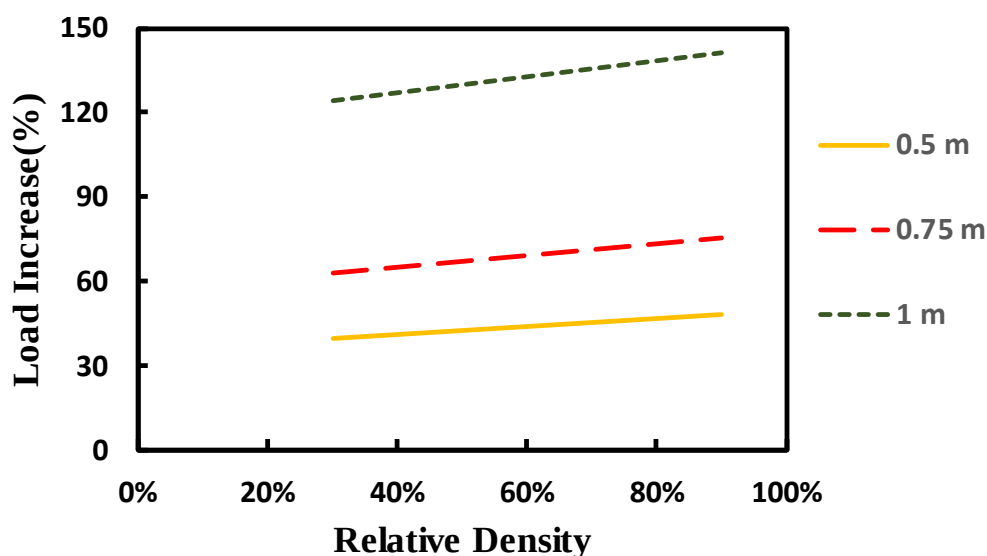
در ادامه میزان افزایش ظرفیت باربری (بر حسب درصد) به ازای تغییرات قطر در تراکم‌های نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد ارائه شده است. نمودارهای (۴-۱۸) تا (۴-۱۹) نیز به جهت نشان دادن میزان تاثیر پارامتر قطر در افزایش ظرفیت باربری ترسیم گشته‌اند.

جدول ۳-۴ (میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات قطر در طول‌های مختلف در تراکم‌های نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد)

تراکم نسبی	تغییرات قطر	طول	افزایش ظرفیت باربری
۳۰٪	۱ اینچ به ۲ اینچ	۰/۵ متر	۲۲/۷۶٪
		۰/۷۵ متر	۲۹/۵۳٪
		۱ متر	۳۱/۹۵٪
	۲ اینچ به ۳ اینچ	۰/۵ متر	۳۹/۷۳٪
		۰/۷۵ متر	۶۲/۶۹٪
		۱ متر	۱۲۴/۲۱٪
۹۰٪	۱ اینچ به ۲ اینچ	۰/۵ متر	۳۳/۱۷٪
		۰/۷۵ متر	۴۹/۲۷٪
		۱ متر	۵۷/۷۱٪
	۲ اینچ به ۳ اینچ	۰/۵ متر	۴۸/۳۵٪
		۰/۷۵ متر	۷۵/۶۳٪
		۱ متر	۱۴۱/۳۲٪



شکل ۳-۴ (میزان افزایش ظرفیت باربری (بر حسب درصد) به ازای افزایش قطر ۱۰۰ درصدی میکروپایل در طول‌های متفاوت و تراکم‌های نسبی مختلف خاک)



شکل ۴-۱۹ (میزان افزایش ظرفیت باربری (بر حسب درصد) به ازای افزایش قطر ۵۰ درصدی میکروپایل در طول‌های متفاوت و تراکم‌های نسبی مختلف خاک

پس از بررسی جدول و نمودارهای ارائه شده مرتبط با میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات قطر ۱۰۰ و ۵۰ درصدی در طول‌ها و تراکم‌های نسبی مختلف، ذکر نکات ذیل ضروری به نظر می‌رسد: نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد بر خلاف انتظار و علیرغم افزایش قطر کمتر در حالت دوم (۵۰ درصد) نسبت به حالت اول (۱۰۰ درصد)، ظرفیت‌های باربری در هر دو تراکم نسبی در حالت دوم نسبت به حالت اول بیشتر افزایش یافته است. این موضوع نشان دهنده‌ی این است که علیرغم ارتباط مستقیم میزان افزایش ظرفیت باربری و قطر میکروپایل، ظرفیت باربری بیشتر تابع قطر نهایی باشد تا میزان افزایش قطر میکروپایل.

در ادامه میانگین افزایش ظرفیت باربری (بر حسب درصد) به ازای افزایش طول و قطر در تراکم‌های نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد ارزیابی خواهد شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد در هر ۲ تراکم نسبی میانگین تغییرات ظرفیت باربری به ازای افزایش طول، در قطر کمتر میکروپایل (۱ اینچ)، بسیار کمتر از قطر بیشتر (۳ اینچ) می‌باشد. همچنین، میانگین تغییرات ظرفیت باربری به ازای افزایش قطر، در طول کمتر میکروپایل (۰/۵ متر)، بسیار کمتر از طول بیشتر (۱ متر) می‌باشد.

جدول ۴-۴) میانگین افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش طول در قطرهای مختلف در تراکم‌های نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد

تراکم نسبی خاک	طول	قطر	میانگین افزایش ظرفیت باربری
۳۰ درصد	همه طول‌ها	۱ اینچ	٪۲۵/۶۶
		۲ اینچ	٪۳۰/۲۲
		۳ اینچ	٪۶۵/۸۰
۹۰ درصد	همه طول‌ها	۱ اینچ	٪۴۰/۱۶
		۲ اینچ	٪۵۲/۴۰
		۳ اینچ	٪۹۵/۱۱

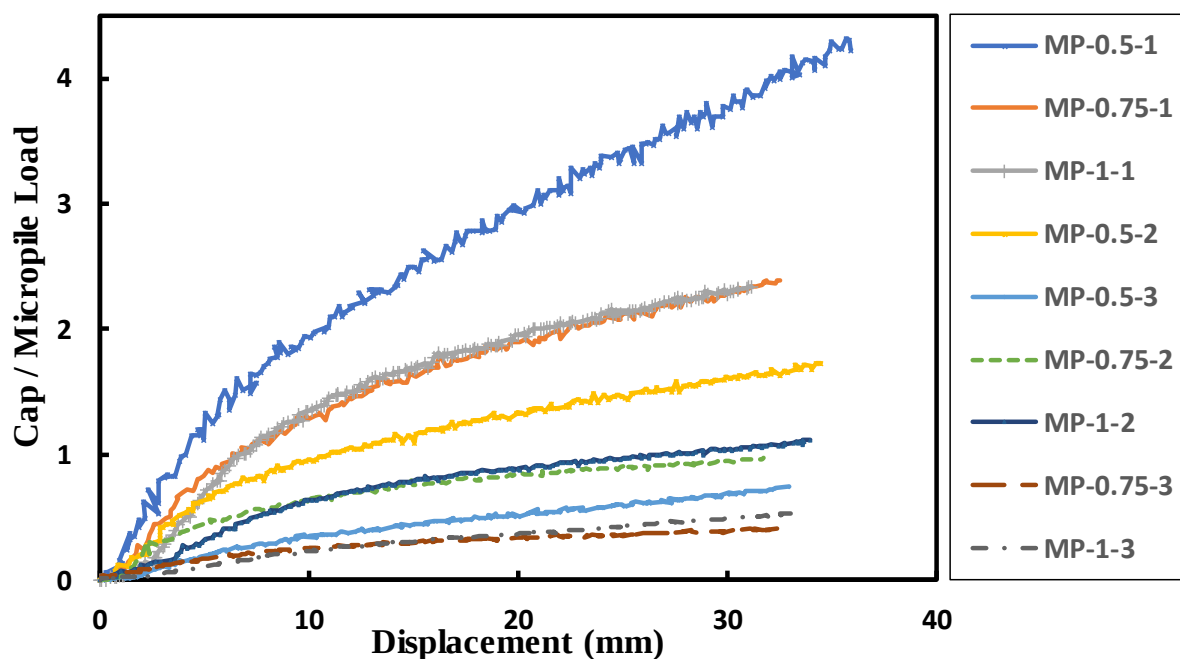
جدول (۴-۵) میانگین افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش قطر در طول‌های مختلف در تراکم‌های نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد

تراکم نسبی خاک	قطر	طول	میانگین افزایش ظرفیت باربری
۳۰ درصد	همه قطر‌ها	۰/۵ متر	٪ ۳۱/۲۴
		۰/۷۵ متر	٪ ۴۶/۱۱
		۱ متر	٪ ۷۸/۰۸
۹۰ درصد	همه قطر‌ها	۰/۵ متر	٪ ۴۰/۷۶
		۰/۷۵ متر	٪ ۶۲/۴۵
		۱ متر	٪ ۹۹/۵۱

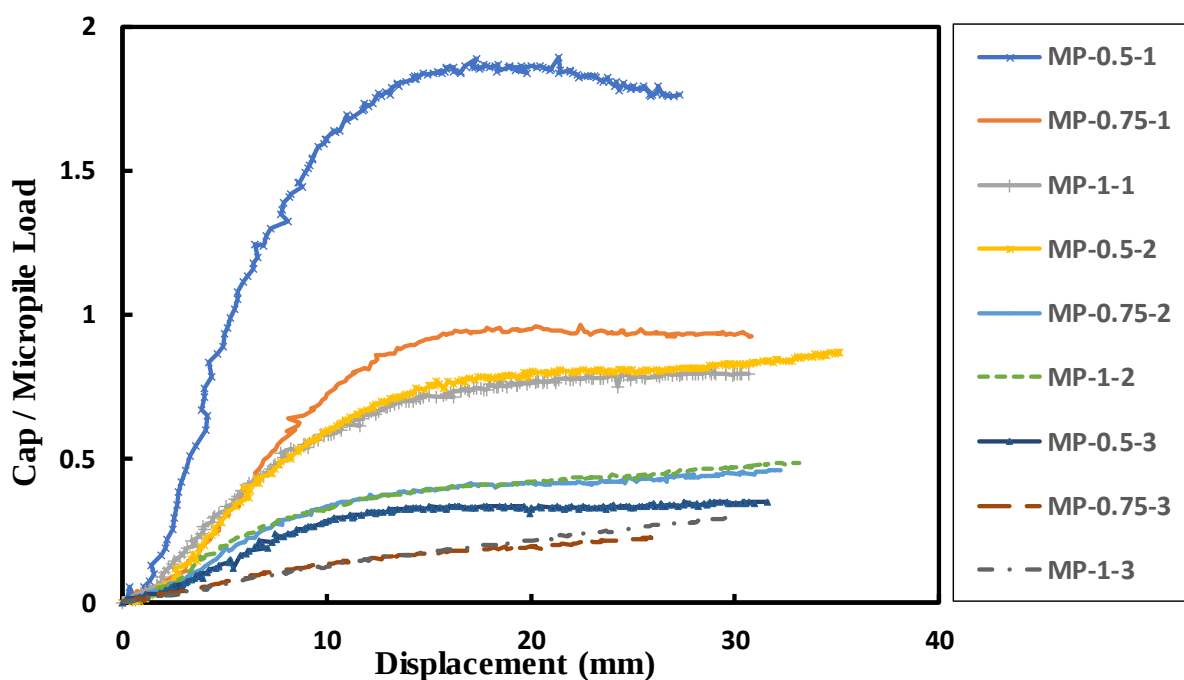
نتایج اثر افزایش طول بر افزایش ظرفیت باربری نتایج مطالعات پیشین در ابعاد آزمایشگاهی را تایید می‌کند. بررسی‌های انجام شده پیشین در ادبیات فنی به منظور بررسی رفتار نیرو جابه‌جایی مدل‌های میکروپایل تحت بارهای استاتیکی از جمله نتایج ارائه شده توسط ایرانمش (۲۰۱۵) که با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی میکروپایل‌های با طول‌های ۶ و ۹ و ۱۲ سانتی متر انجام گرفت نیز صحت نتایج بدست آمده را تایید می‌کند.

۴-۴- بررسی اثر کلاهک

با رسیدن کلاهک به خاک، خاک متراکم شده و این تراکم باعث ایجاد تنش های بیشتر و در نهایت افزایش ظرفیت باربری می شود. تحلیل نمودارهای ذیل نشان می دهد با افزایش مقدار طول و قطر میکروپایل ها در هر دو تراکم نسبی خاک ۳۰ و ۹۰ درصد، از توان کلاهک در تحمل ظرفیت باربری کاسته شده و اثر آن به تدریج کمرنگ می شود، در این حالت بخش عمده بار توسط میکروپایل ها تحمل می شود. به تعبیر دیگر با افزایش تراکم خاک از نقش کلاهک در تحمل ظرفیت باربری کاسته و بر نقش میکروپایل افزوده می شود.



شکل (۴-۲۰) نسبت میزان ظرفیت باربری کلاهک به میکروپایل به ازای جابه جایی در تراکم نسبی خاک ۳۰ درصد



شکل ۴-۲۱) نسبت میزان ظرفیت باربری کلاهک به میکروپایل به ازای جابه‌جایی در تراکم نسبی خاک ۹۰ درصد

۴-۵- ارزیابی اثر تراکم نسبی خاک

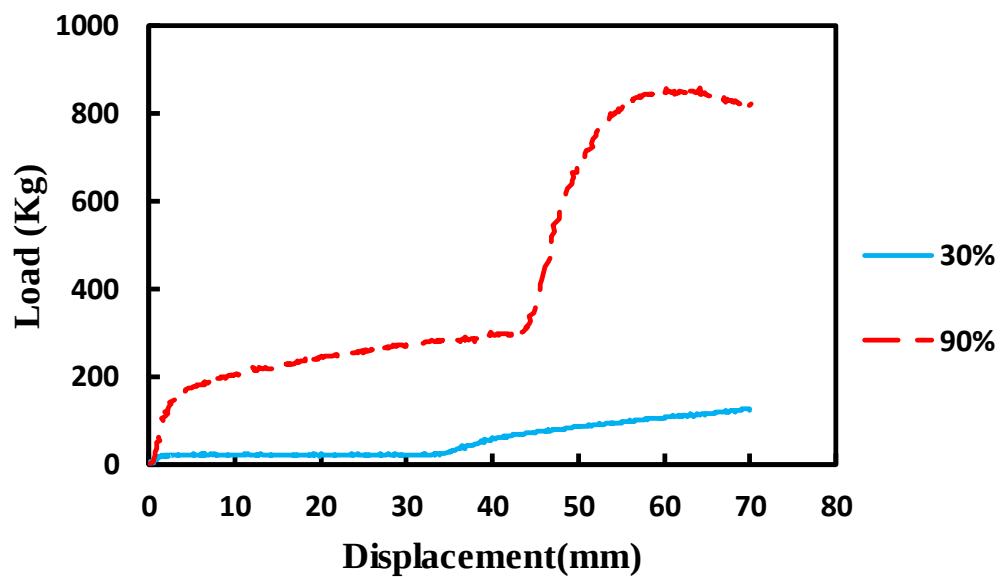
تراکم نسبی خاک در حقیقت وضعیت تراکم یک خاک درشت‌دانه و غیر چسبنده را نشان می‌دهد. تراکم‌های نسبی خاک مورد استفاده در این مدل‌سازی به ترتیب ۳۰ و ۹۰ درصد می‌باشند. در این مرحله تلاش شده است تا در گام نخست میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل در هر طول و قطر مد نظر در تراکم‌های نسبی مختلف مقایسه گردد تا اثر تراکم خاک با پارامترهای ثابت طول و قطر بیشتر ارزیابی گردد.

جدول ۴-۵) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل ها (بر حسب درصد) در تراکم نسبی ۹۰ درصد نسبت به تراکم نسبی ۵۰ درصد به ازای طولها و قطرهای مختلف میکروپایل

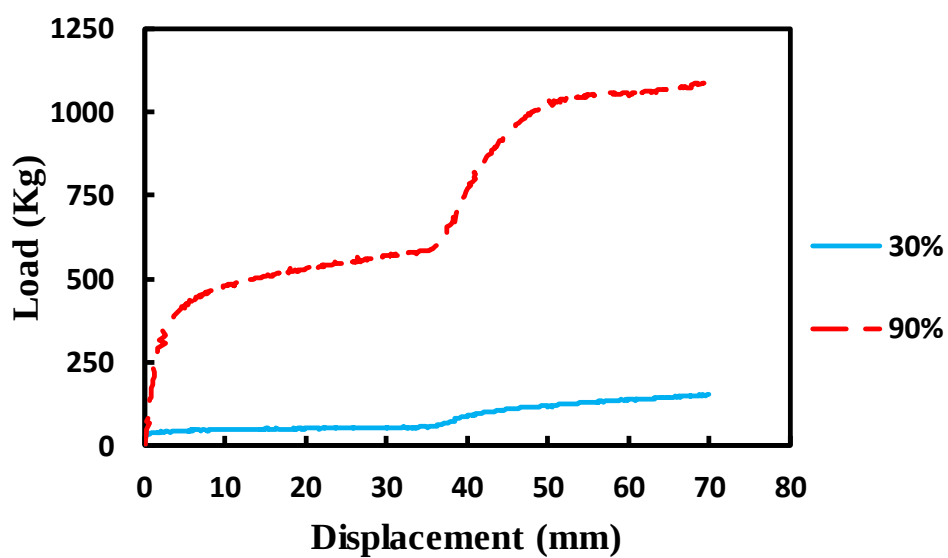
طول	قطر	ظرفیت باربری در تراکم ۳۰ درصد (کیلوگرم)	ظرفیت باربری در تراکم ۹۰ درصد (کیلوگرم)	اختلاف در ظرفیت باربری
۰/۵ متر	۱ اینچ	۱۲۳	۸۲۰	٪ ۵۶۶
۰/۷۵ متر	۱ اینچ	۱۴۹	۱۱۰۰	٪ ۶۳۸
۱ متر	۱ اینچ	۱۹۴	۱۶۰۸	٪ ۷۲۸
۰/۵ متر	۲ اینچ	۱۵۱	۱۰۹۲	٪ ۶۲۳
۰/۷۵ متر	۲ اینچ	۱۹۳	۱۶۴۲	٪ ۷۵۰
۱ متر	۲ اینچ	۲۵۶	۲۵۳۶	٪ ۸۹۰
۰/۵ متر	۳ اینچ	۲۱۱	۱۶۲۰	٪ ۶۶۷
۰/۷۵ متر	۳ اینچ	۳۱۴	۲۸۸۴	٪ ۸۱۸
۱ متر	۳ اینچ	۵۷۴	۶۱۲۰	٪ ۹۶۶

با بررسی هر طول و قطر ثابت در هر ۲ تراکم نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد ملاحظه می گردد که با افزایش تراکم خاک، ظرفیت باربری به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. اما نکته ی قابل توجه این است که در تراکم ۹۰ درصد هرچه طول و قطر افزایش یابد، افزایش ظرفیت باربری نسبت به تراکم ۳۰ درصد تصاعدی می شود بطوری که قطر ۳ اینچ و طول ۱ متر بیشترین تغییر در ظرفیت باربری را تجربه می کند (۹۶۶ درصد افزایش ظرفیت باربری در تراکم ۹۰ درصد نسبت به ۳۰ درصد)، در حالی که قطر ۱ اینچ و طول ۰/۵ متر کمترین تغییر در ظرفیت باربری را تجربه می کند (۵۶۶ درصد افزایش ظرفیت باربری در تراکم ۹۰ درصد نسبت به ۳۰ درصد).

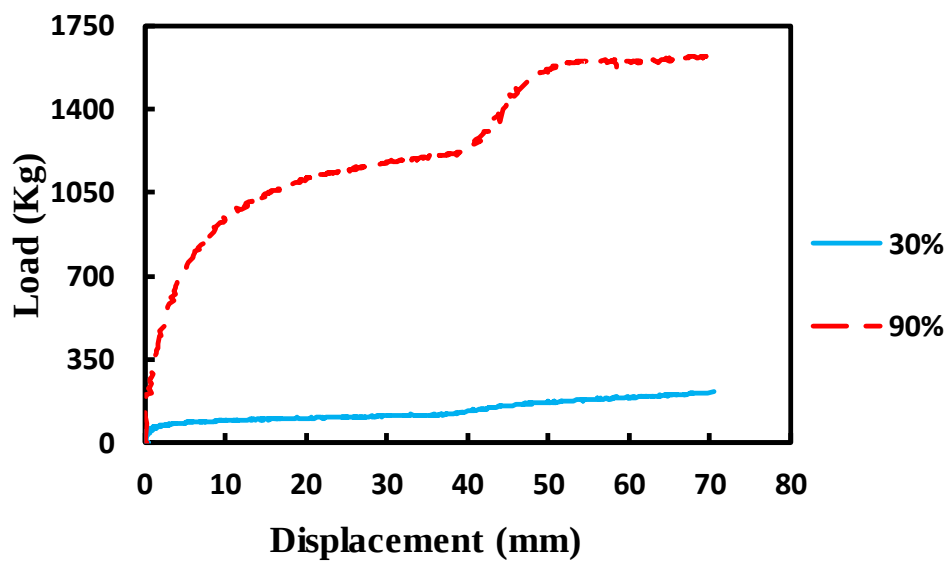
در ادامه نمودارهای (۲۲-۴) تا (۳۶-۴) میزان افزایش ظرفیت باربری در تراکم های نسبی خاک ۹۰ درصد نسبت به ۳۰ درصد را نشان می دهد:



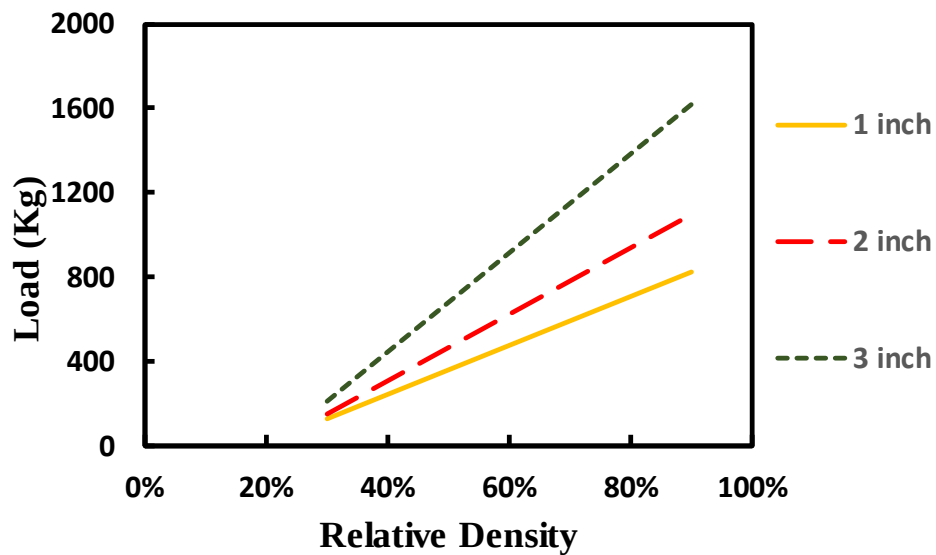
شکل (۴-۲۲) نمودار بار-جاب‌جایی برای میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطر ۱ اینچ در خاک‌های با تراکم نسبی مختلف



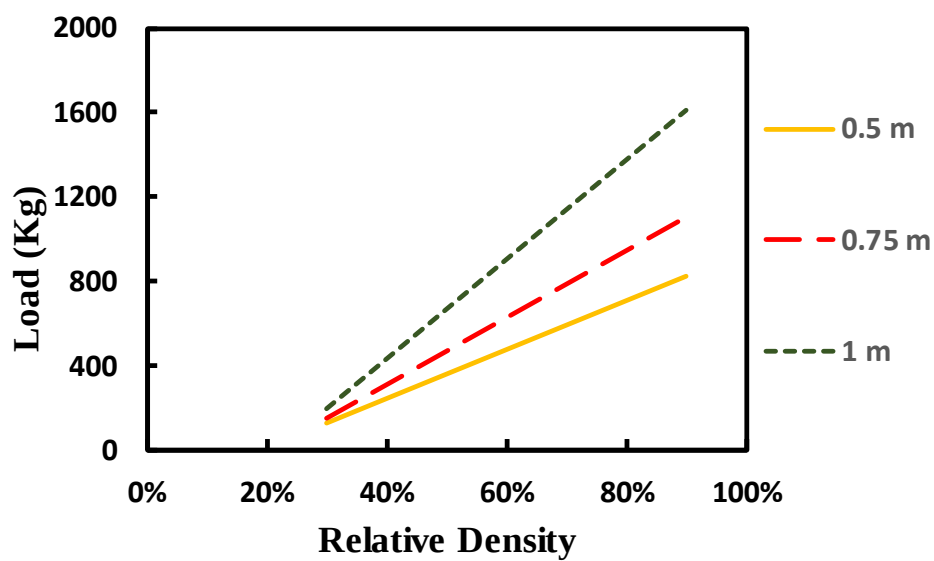
شکل (۴-۲۳) نمودار بار-جاب‌جایی برای میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطر ۲ اینچ در خاک‌های با تراکم نسبی مختلف



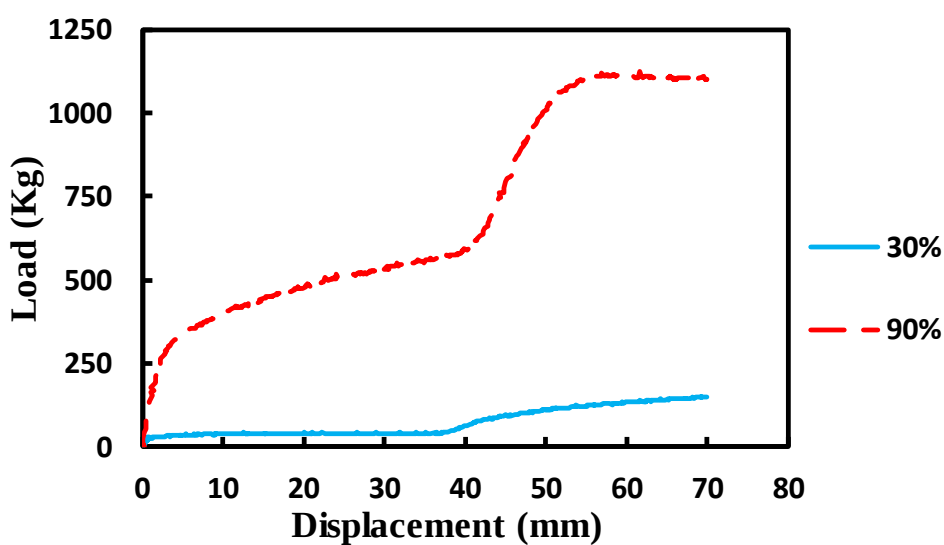
شکل ۴-۲۴) نمودار بار-جابجایی برای میکروپایل با طول ۰/۵ متر و قطر ۳ اینچ در خاک‌های با تراکم نسبی مختلف



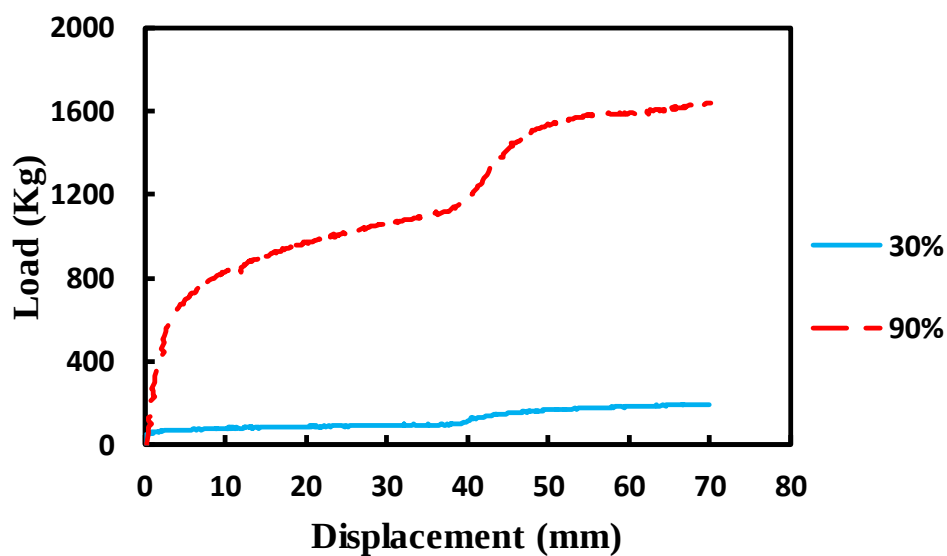
شکل ۴-۲۵) نمودار بار-تراکم نسبی برای میکروپایل‌های با طول ۰/۵ متر و قطرهای مختلف



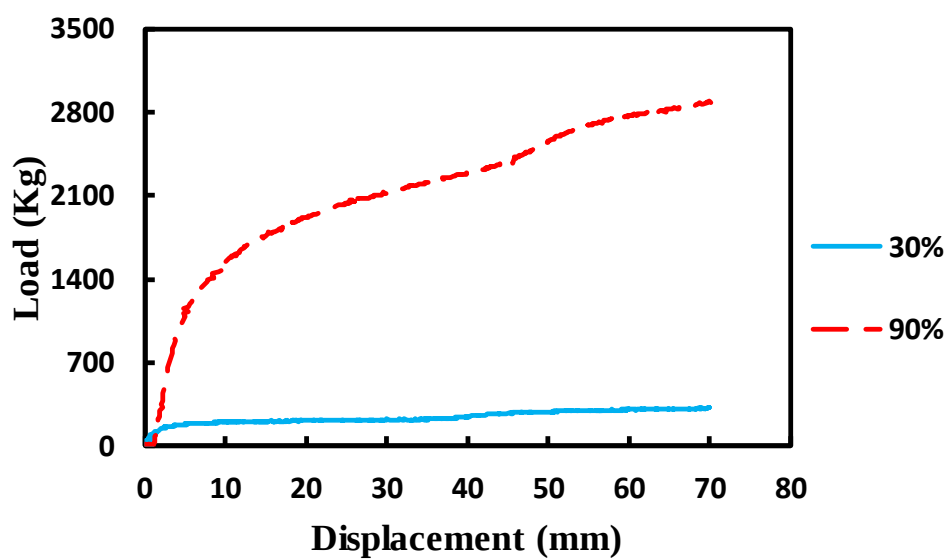
شکل ۴-۲۶ (نمودار بار-تراکم نسبی برای میکروپایل‌های با قطر ۱ اینچ و طول‌های مختلف



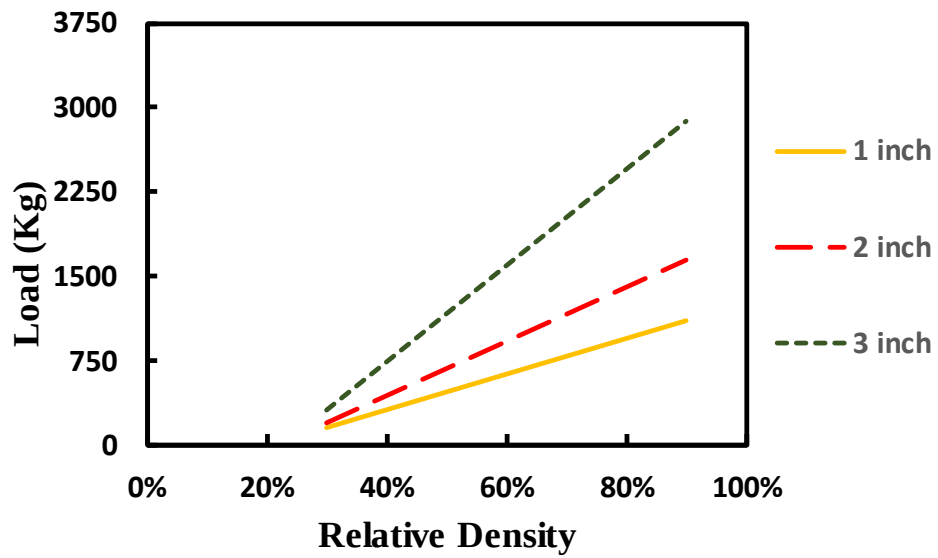
شکل ۴-۲۷ (نمودار بار-جاب‌جایی برای میکروپایل با طول ۰/۷۵ متر و قطر ۱ اینچ در خاک‌های با تراکم نسبی مختلف



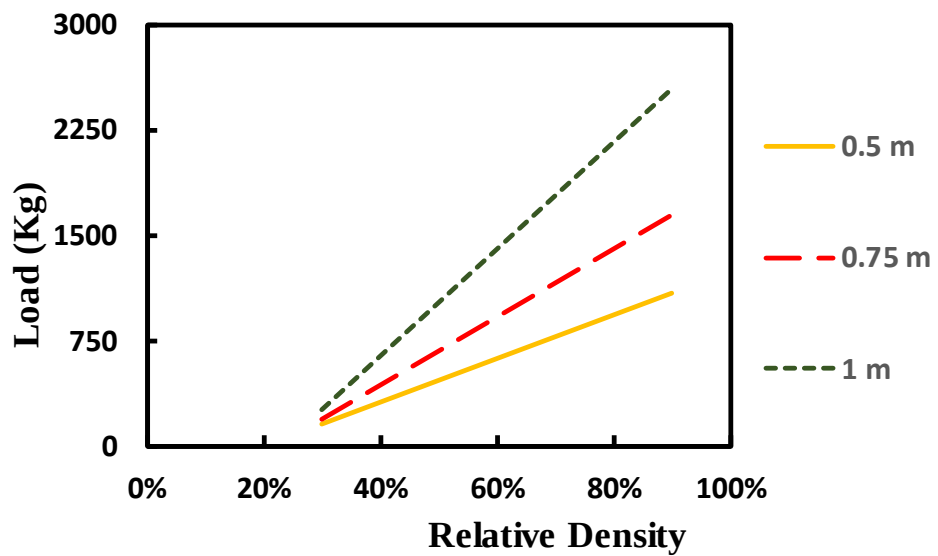
شکل ۲۸-۴) نمودار بار-جابہ‌جایی برای میکروپایل با طول ۰/۷۵ متر و قطر ۲ اینچ در خاک‌های با تراکم نسبی مختلف



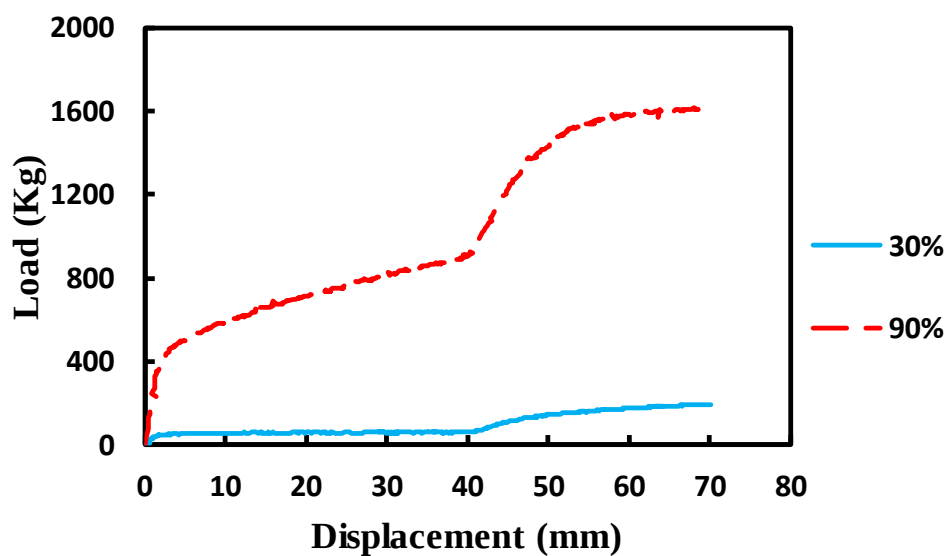
شکل ۲۹-۴) نمودار بار-جابہ‌جایی برای میکروپایل با طول ۰/۷۵ متر و قطر ۳ اینچ در خاک‌های با تراکم نسبی مختلف



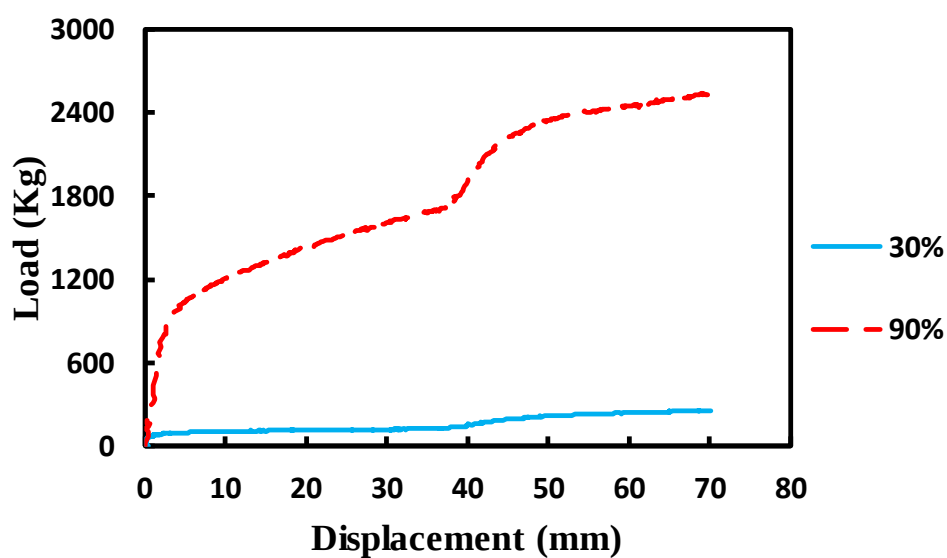
شکل ۳۰-۴) نمودار بار-تراکم نسبی برای میکروپایل‌های با طول ۰/۷۵ متر و قطرهای مختلف



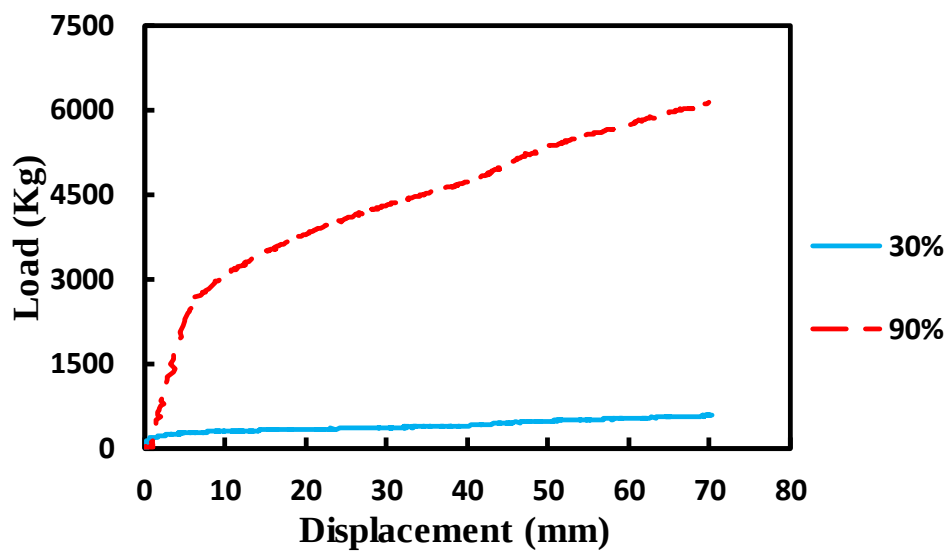
شکل ۳۱-۴) نمودار بار-تراکم نسبی برای میکروپایل‌های با قطر ۲ اینچ و طول‌های مختلف



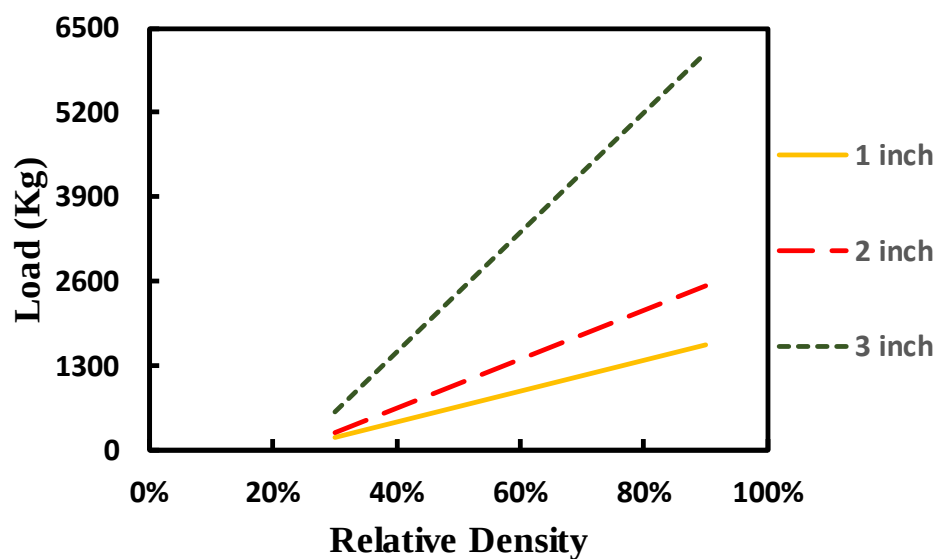
شکل ۳۲-۴) نمودار بار-جاب‌جایی برای میکروپایل با طول ۱ متر و قطر ۱ اینچ در خاک‌های با تراکم نسبی مختلف



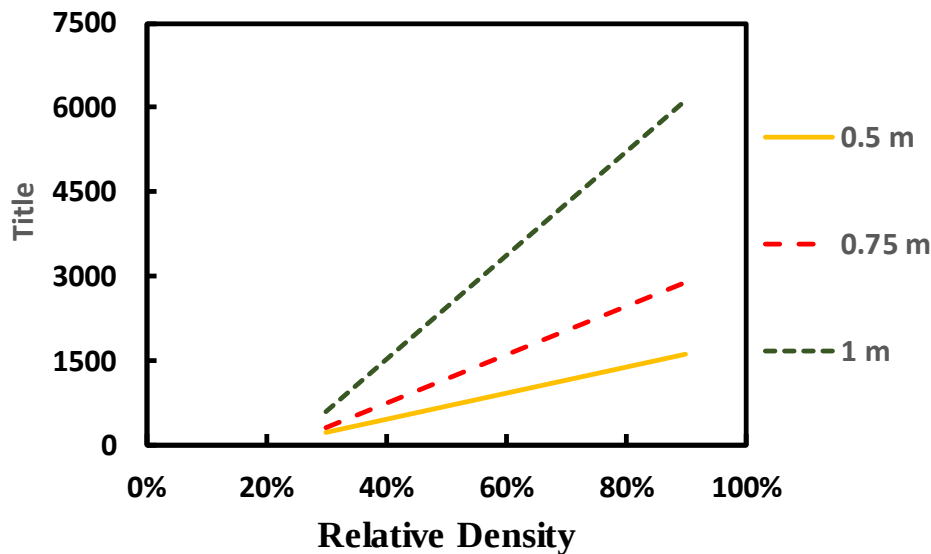
شکل ۳۳-۴) نمودار بار-جاب‌جایی برای میکروپایل با طول ۱ متر و قطر ۲ اینچ در خاک‌های با تراکم نسبی مختلف



شکل ۴-۳۴) نمودار بار-جاب‌جایی برای میکروپایل با طول ۱ متر و قطر ۳ اینچ در خاک‌های با تراکم نسبی مختلف



شکل ۴-۳۵) نمودار بار-تراکم نسبی برای میکروپایل‌های با طول ۱ متر و قطرهای مختلف



شکل (۴-۳۶) نمودار بار-تراکم نسبی برای میکروپایل‌های با قطر ۳ اینچ و طول‌های مختلف

بررسی ادبیات فنی و مطالعه‌ی انجام شده توسط تسوکادا^۱ ۲۰۰۶، تایید کننده‌ی نتایج بدست آمده می‌باشد. تراکم نقش قابل توجهی در ارزیابی میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها دارد به گونه‌ای که تراکم زیاد به دلیل خاصیت منبسط شوندگی منجر به افزایش تنش محصورکننده‌ی افقی شده و منجر به افزایش مقاومت جداره می‌گردد. همچنین بایستی توجه نمود که عملیات کوبش ریزشمع‌ها باعث انتقال انرژی جنبشی و ارتعاشی به توده خاک گردیده و منجر به تحکیم و تراکم توده خاکی اطراف ریزشمع خواهد شد. این امر به خصوص در خاک‌های دانه‌ای مشهودتر می‌باشد.

۴-۶- ظرفیت طراحی ژئوتکنیکی میکروپایل‌ها

نمونه محاسبات ارزیابی ظرفیت باربری ژئوتکنیکی برای دو تراکم نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد در طول‌ها و قطرهای مختلف.

$$Q_g = \frac{\alpha_{bond}}{F.S} \pi D_b L_b = \frac{100}{2.5} * 3/14 * 2/54 * 0.15 = 159 \text{ kg}$$

¹Tsukada (2006)

ظرفیت باری به ازای طول ۰/۵ متر و قطر ۱ اینچ در تراکم نسبی ۳۰ درصد خاک طبق ارزیابی‌های آزمایشگاهی مقدار ۱۲۳ کیلوگرم بدست آمده است، در صورتی که طی ارزیابی‌های تئوری این مقدار ۱۵۹ کیلوگرم می‌باشد.

در مجموع مشاهده می‌شود نتایج تئوری با آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد. اختلاف در میزان ظرفیت-های باربری نیز ناشی از پارامترهایی نظیر اثر تزریق تزریق دوغاب، تراکم خاک، ضرایب اطمینان و... می‌باشد. جدول (۴-۶)

جدول (۴-۶) نمونه محاسبات ظرفیت ژئوتکنیکی میکروپایل‌ها

ظرفیت باربری آزمایشگاهی	ظرفیت باربری تئوری	الفای باند	ضریب اطمینان	قطر (اینچ)	طول (متر)	تراکم (درصد)
۱۲۳	۱۵۹	۱۰۰	۲/۵	۱	۰/۵	۳۰
۲۵۶	۶۳۸	۱۰۰	۲/۵	۲	۱	۳۰
۱۱۰۰	۱۱۹۶	۱۵۰	۱	۱	۰/۷۵	۹۰
۱۶۲۰	۱۷۹۴	۱۵۰	۱	۳	۰/۵	۹۰

۴-۷- تحلیل نرم افزاری SPSS

پس از انجام آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی-آزمایشگاهی، اکنون تلاش شده است تا با استفاده از نرم افزار SPSS اثر کمی پارامترهای طول، قطر و تراکم خاک بررسی شود. به همین جهت از یکسری رگرسیون غیر خطی استفاده شده است. کمیت‌های مربوط به پارامترهای طول، قطر و تراکم در این تحلیل‌ها نرمال شده‌اند تا اثرات واحد در آن حذف شده و پاسخ‌های حقیقی‌تر بدست آید. داده نرمال شده برابر است با اختلاف داده‌ی اصلی از میانگین داده‌ها، تقسیم بر انحراف معیار داده‌ها. در ادامه نتایج نرمال سازی داده‌ها به منظور استفاده در نرم افزار ارائه شده است.

جدول ۴-۷ (جدول نرمال سازی مقادیر پارامتر طول میکروپایل

شماره ردیف	طول اولیه (متر)	میانگین داده ها	انحراف از معیار	طول نرمال شده
۱	۰/۵	۰/۷۵	۰/۲۱۰۰۴۲	-۱/۱۹۰۲۴
۲	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۲۱۰۰۴۲	۰
۳	۱	۰/۷۵	۰/۲۱۰۰۴۲	۱/۱۹۰۲۴

جدول ۴-۸ (جدول نرمال سازی مقادیر پارامتر قطر میکروپایل

شماره ردیف	قطر اولیه (اینچ)	میانگین داده ها	انحراف از معیار	قطر نرمال شده
۱	۲	۲	۰/۸۴۰۱۶۸	-۱/۱۹۰۲۴
۲	۲	۲	۰/۸۴۰۱۶۸	۰
۳	۳	۲	۰/۸۴۰۱۶۸	۱/۱۹۰۲۴

جدول ۴-۹ (جدول نرمال سازی مقادیر پارامتر تراکم نسبی خاک

شماره ردیف	تراکم اولیه	میانگین داده ها	انحراف از معیار	تراکم نرمال شده
۱	٪۳۰	۰/۶	۰/۳۰۸۶۹۷	-۰/۹۷۱۸۲۵
۲	٪۹۰	۰/۶	۰/۳۰۸۶۹۷	۰/۹۷۱۸۲۵

۴-۷-۱- نمونه محاسبات تحلیل SPSS

نمونه‌ای از محاسبات رگرسیون غیر خطی با نرم افزار SPSS در طول ۰/۵ متر به منظور ارزیابی اثر قطر و تراکم خاک در ظرفیت باربری آورده شده است.

جدول ۴-۱۰ (نمونه محاسبات رگرسیون غیر خطی

Variables Entered/Removed

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Compaction 0.5, Diameter0.5m	0	Enter

All requested variables entered.

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	0.963 ^a	0.927	0.878	214.343442

a. Predictors: (Constant), Compaction0.5m, Diameter0.5m

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1744504.167	2	872252.083	18.985	0.020 ^a
	Residual	137829.333	3	45943.111		
	Total	1882333.500	5			

a. Predictors: (Constant), Compaction0.5m, Diameter0.5m

b. Dependent Variable: Load0.5m

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		
		B	Std. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constant)	669.500	87.505		7.651	0.005
	Diameter0.5m	186.517	90.042	0.324	2.071	0.130
	Compaction0.5m	522.556	90.042	0.907	5.803	0.010

a. Dependent Variable: Load0.5m

همان گونه که مشاهده می‌کنید برای بررسی هریک از الگوهای مطرح شده سه جدول اصلی ارائه شده است.

۱. در جدول Model Summary ضریب همبستگی رگرسیون (R)، ضریب تعیین (R Square) همراه با ضریب تعیین تعدیل شده (Adjusted R Square) و انحراف معیار برآورد (Std. Error of the Estimate) را مشاهده می‌کنید. در این جدول هر چه ضریب تعیین تعدیل شده بالاتر باشد نشان می‌دهد که سهم بیشتری از تغییرات متغیر وابسته مربوط به متغیر مستقل است. ضریب تعیین که به آن ضریب تشخیص نیز گفته می‌شود (Coefficient of Determination) و تقریباً همه جا با علامت R^2 نمایش داده می‌شود، معروف‌ترین معیار سنجش نیکویی برازش مدل بوده و بین صفر و یک قرار خواهد داشت. اگر این همبستگی زیاد باشد، مدل داده‌ها را خوب برازش کرده است، در حالی که اگر همبستگی پایین (نزدیک به صفر) باشد، مدل برازش خوبی از داده‌ها ارائه نداده است.

۲. در جدول ANOVA این موضوع که آیا واقعا این الگو برازنده داده‌ها است، آزمون شده است. اگر در این جدول sig کمتر از ۵ درصد باشد نشانه این است که الگو مناسب و برازنده داده‌ها می‌باشد.

۳. محتوای جدول Coefficients ضرایب رگرسیون (B) و ضرایب همبستگی جزئی (Beta) یا اوزان (بتا) را نشان می‌دهد. هرچه وزن بتا برای یک متغیر بیشتر باشد نشانه تاثیر بیشتر آن متغیر در معادله رگرسیون است. در ستون آخر جدول نیز آزمون موجه بودن هریک از پارامترهای برآورد شده در الگوی رگرسیون انجام شده است.

۲-۷-۴- نتایج تحلیل SPSS

در ادامه نتایج رگرسیون‌ها به ازای طول‌ها، قطر‌ها و تراکم‌های ثابت ارائه شده است.

جدول ۱۱-۴ (نتایج رگرسیون‌های غیر خطی به ازای تراکم‌های ثابت)

تراکم ثابت	ضریب تعیین (R^2)	ضریب تاثیر طول	ضریب تاثیر قطر	پارامتر غالب	اثر افزایشی پارامتر غالب	میانگین اثر افزایشی پارامتر غالب
٪۳۰	۰/۷۵۶	۷۵/۴۷۵	۸۸/۶۳۸	قطر	٪ ۱۷/۴۴	٪ ۱۱/۴۲
٪۹۰	۰/۷۵۰	۹۴۲/۶۶۹	۹۹۳/۶۳۹	قطر	٪۵,۴۰	

همان طور که در جدول بالا مشاهده می‌شود در تراکم‌های مختلف خاک، اثر متقابل پارامترهای طول و قطر در میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها ارزیابی شده است. مشاهده می‌شود در هر دو تراکم خاک، پارامتر تاثیرگذارتر میزان قطر میکروپایل می‌باشد، همچنین ملاحظه می‌گردد در تراکم‌های نسبی کم (۳۰ درصد)، اختلاف میزان تاثیرگذاری پارامتر طول و قطر تقریبا ۱۷ درصد می‌باشد، در حالی که با افزایش تراکم خاک به ۹۰ درصد تاثیرگذاری ۲ پارامتر طول و قطر تقریبا یکسان می‌شود (حدود ۵

درصد). به طور میانگین ملاحظه می‌گردد در خاک‌های با تراکم‌های نسبی مختلف پارامتر قطر اثر ۱/۱ برابری نسبت به پارامتر طول در میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها را دارا می‌باشد.

جدول ۴-۱۲) نتایج رگرسیون‌های غیر خطی به ازای طول‌های ثابت

طول ثابت (متر)	ضریب تعیین (R^2)	ضریب تاثیر قطر	ضریب تاثیر تراکم	پارامتر غالب	اثر افزایشی پارامتر غالب	میانگین اثر افزایشی پارامتر غالب
۰/۵	۰/۹۲۷	۱۸۶/۵۱۷	۵۲۲/۵۵۶	تراکم	٪ ۱۸۰/۱۶	.
۰/۷۵	۰/۸۷۳	۴۰۹/۳۷۲	۸۵۲/۳۴۸	تراکم	٪ ۱۰۸/۲۰	٪ ۱۱۴/۱۹
۱	۰/۸۷۸	۱۰۲۷/۵۲۶	۱۵۸۴/۶۴۸	تراکم	٪ ۵۴/۲۱	

نتایج بررسی‌های بالا در طول‌های مختلف خاک، ارزیابی اثر متقابل پارامترهای قطر و تراکم در میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در هر سه طول مورد بررسی میکروپایل‌ها، پارامتر تاثیر گذارتر میزان تراکم نسبی خاک می‌باشد، همچنین ملاحظه می‌گردد در طول‌های میکروپایل کم (۰/۵ متر)، تاثیرگذاری پارامتر تراکم نسبت به قطر کمتر از ۳ برابر می‌باشد (۲/۸ برابر)، در حالی که با افزایش طول میکروپایل به ۰/۷۵ متر و ۱ متر، اختلاف تاثیرگذاری پارامتر تراکم نسبت به قطر به ۱/۵ برابر کاهش می‌یابد. به طور میانگین ملاحظه می‌گردد در میکروپایل‌های با طول‌های مختلف پارامتر تراکم اثری ۲/۱ برابری نسبت به پارامتر قطر در میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها را دارا می‌باشد.

جدول ۴-۱۳) نتایج رگرسیون‌های غیر خطی به ازای قطر‌های ثابت

قطر ثابت (اینچ)	ضریب تعیین (R^2)	ضریب تاثیر طول	ضریب تاثیر تراکم	پارامتر غالب	اثر افزایشی پارامتر غالب (درصد)	میانگین اثر افزایشی پارامتر غالب (درصد)
-----------------	----------------------	----------------	------------------	--------------	---------------------------------	---

٪۱۳۲/۳۷	٪۱۹۱/۰۴	تراکم	۵۲۵/۱۲۹	۱۸۰/۴۲۶	۰/۹۲۷	۱
	٪۱۴۶/۱۶	تراکم	۸۰۰/۸۹۸	۳۲۵/۳۵۵	۰/۹۰۰	۲
	٪۵۹/۹۲	تراکم	۱۶۳۳/۵۲۴	۱۰۲۱/۴۳۴	۰/۸۱۰	۳

در جدول بالا و در قطرهای مختلف خاک، اثر متقابل پارامترهای طول و تراکم در میزان ظرفیت باری میکروپایل‌ها ارزیابی شده است. مشاهده می‌شود در هر سه قطر مورد بررسی میکروپایل‌ها، پارامتر تاثیرگذارتر میزان تراکم نسبی خاک می‌باشد، همچنین ملاحظه می‌گردد در قطرهای میکروپایل کم (۱ اینچ)، تاثیرگذاری پارامتر تراکم نسبت به طول تقریباً ۲ برابر می‌باشد (۱/۹ برابر)، در حالی که با افزایش قطر میکروپایل به ۲ اینچ و ۳ اینچ، اختلاف تاثیرگذاری پارامتر تراکم نسبت به طول به ۱/۶ برابر کاهش می‌یابد. به طور میانگین ملاحظه می‌گردد در میکروپایل‌های با قطرهای مختلف پارامتر تراکم اثری ۲/۳ برابری نسبت به پارامتر طول در میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها را دارا می‌باشد.

۴-۸- تحلیل‌های نرم افزاری EPR

در فصل قبل کارایی و توضیحات کلی مربوط به این نرم افزار به اختصار بیان گردید. اکنون و در گام نخست نحوه‌ی تعیین پارامترهای مد نظر نرم افزار در ذیل آورده شده است.

جدول ۱۴-۴ (نحوه تنظیم پارامترها برای روش EPR)

پارامتر	تنظیمات	فیلد
نوع EPR	$Y = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j \cdot (X_1)^{ES(j,1)} \cdot \dots \cdot (X_k)^{ES(j,k)} \cdot f((X_1)^{ES(j,k+1)}) \cdot \dots \cdot f((X_k)^{ES(j,2k)})$	۱
نوع رگرسیون	استاتیکی	۲
تابع	توانی (برای مدل‌های τ)	۳
تعداد جملات	۱۱ جمله [۱ ۱۰]	۴
مجموعه توانها	[-۵ -۴ -۳ -۲ -۱ -۰/۵ ۰ ۰/۵ ۱ ۲ ۳ ۴ ۵]	۵
na, nb + nk	-	۶
- مقیاس کردن ورودی خروجی	-	۷
روش حل	LS	۸
تعداد نسل	۱۰	۹
Seed, Plot, Bias	Plot, Bias	۱۰
تابع هدف	-	۱۱
استراتژی MOGA	کاهش مجموع مجذور خطاها و تعداد جملات	۱۲

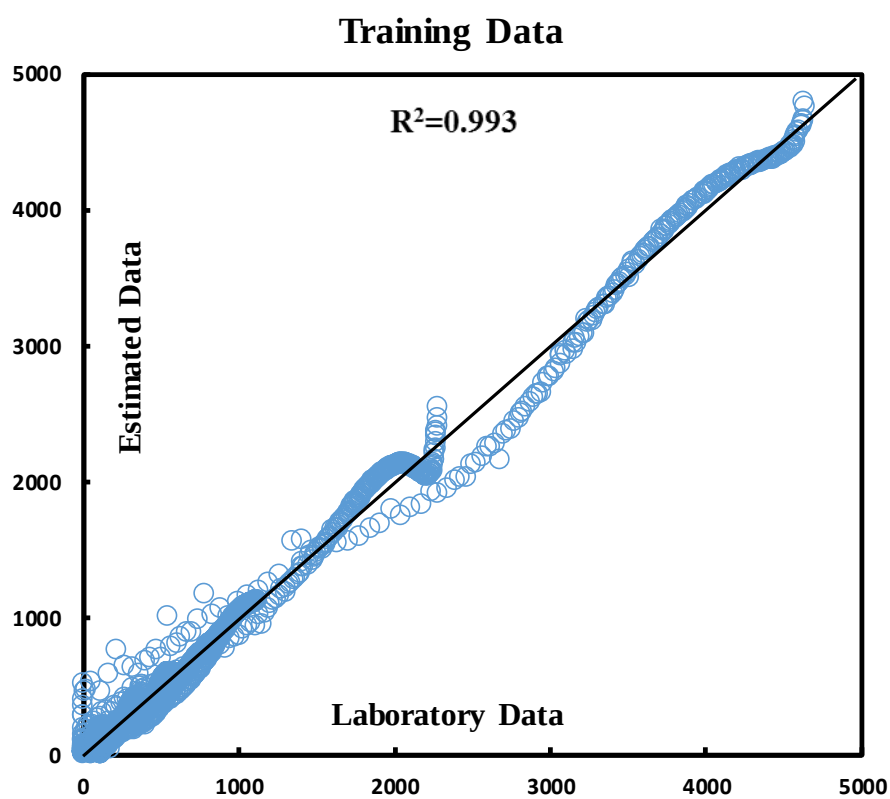
روش EPR می‌تواند در عرض چند دقیقه مدل‌های با برآزش نسبتاً بالا تولید نماید. با استفاده از این روش، چندین رابطه چند جمله‌ای با تعداد جملات و دقت‌های متفاوت ارائه شده است. در ادامه ایده آل‌ترین این مدل‌ها با روابط و شرایط تحلیل مختلف آورده شده است. رابطه زیر برای ارزیابی رفتار میکروپایل‌ها با توجه به آزمایش‌های انجام شده ارائه شده است:

$$Q = -0.032833 * L^{0.5} * D^2 * R * e^{(+2*D+2*R)} + 9.6116 * S^{0.5} * R^2 * e^{(+2*L+D)} - 0.01129 * S^2 * L^{0.5} * D * R * e^{(D+R)} + 2.3745 * e^{-12} * S^2 * L^{0.5} * D^2 * R * e^{(0.5*S+L+D+0.5*R)} \quad (2)$$

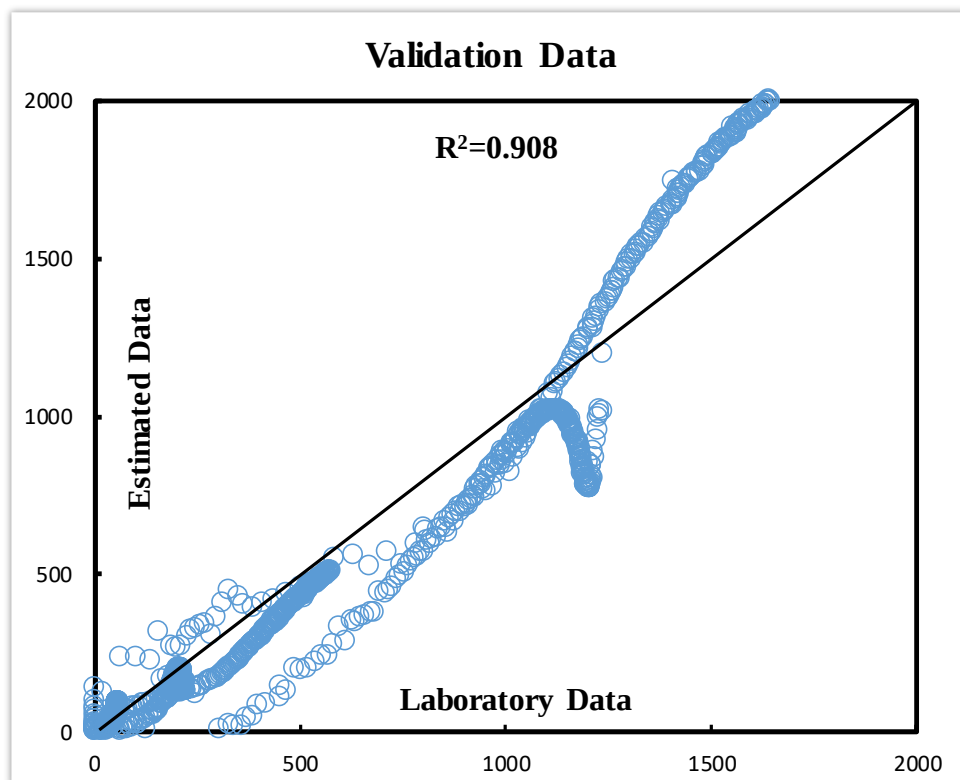
در این رابطه Q ظرفیت باربری، L طول میکروپایل، D قطر میکروپایل، R تراکم نسبی خاک و S میزان جابه جایی میکروپایل می‌باشد.

در ادامه منحنی‌های مربوط به دقت این مدل بر اساس داده‌های ارزیابی شده توسط مدل نسبت به داده‌های آزمایشگاهی برای هر دو سری داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی ارائه شده است. بالاترین دقت

وقتی حاصل می‌شود که تمرکز این داده‌ها حول محور $y=x$ باشد. برای این مدل پارامتر R^2 برابر ۰/۹۹ است.



شکل (۳۷-۴) قابلیت اطمینان مدل از طریق داده‌های آموزشی

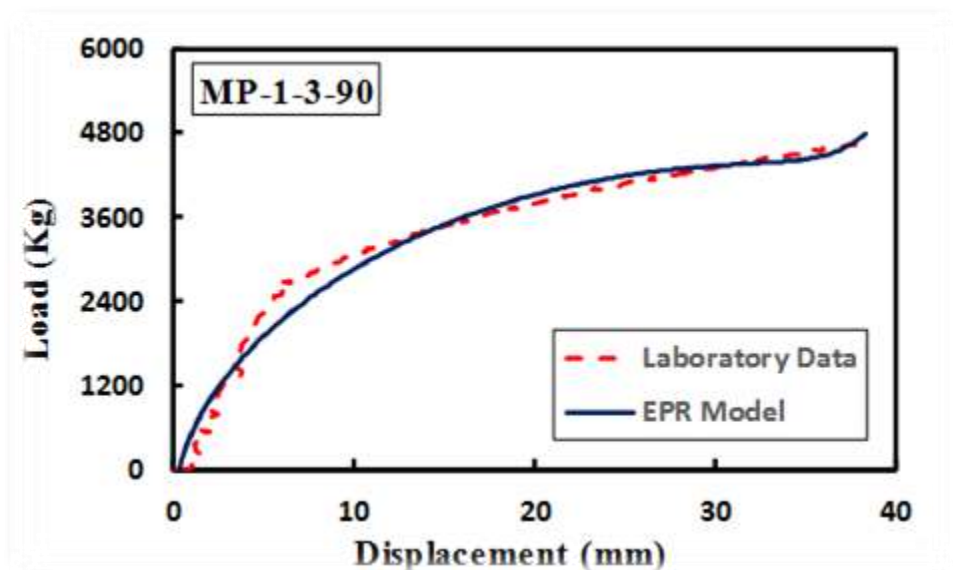


شکل (۳۸-۴) قابلیت اطمینان مدل از طریق داده‌های اعتبارسنجی

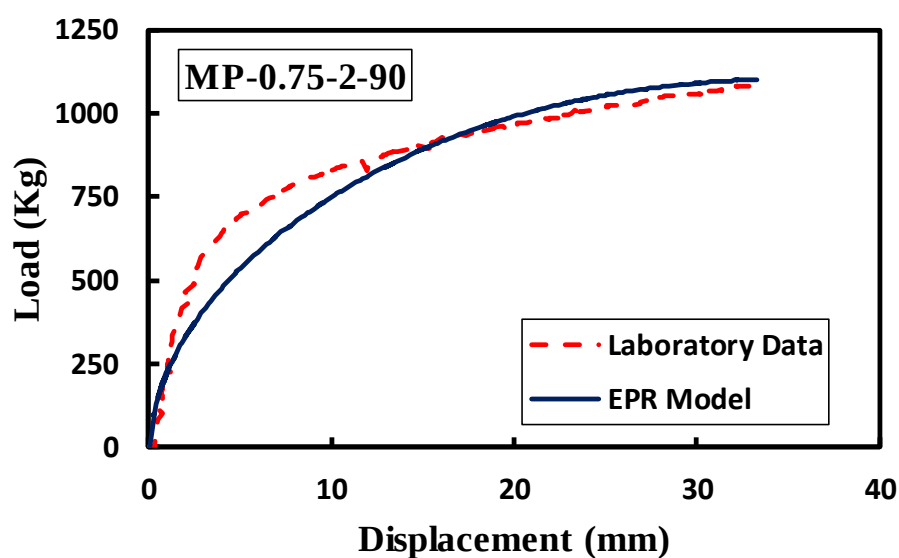
به منظور پیش بینی نمودارهای جابه جایی - زمان، داده های آزمایشگاهی بدست آمده در این پژوهش به دو دسته‌ی آموزشی و اعتبار سنجی تقسیم شده اند. در این مطالعه ۶۶ درصد داده ها آموزشی و ۳۳ درصد اعتبار سنجی می‌باشند.

• پیش بینی مدل برای داده‌های آموزشی

گزیده‌ای از منحنی‌های نیرو - جابه جایی پیش‌بینی شده توسط مدل‌های EPR ارائه شده برای شرایط اولیه مختلف داده‌های آموزشی در ذیل آورده شده است.



شکل ۴-۳۹) پیش بینی مدل EPR برای نمونه میکروپایل با طول ۱ متر، قطر ۳ اینچ و تراکم نسبی ۹۰ درصد

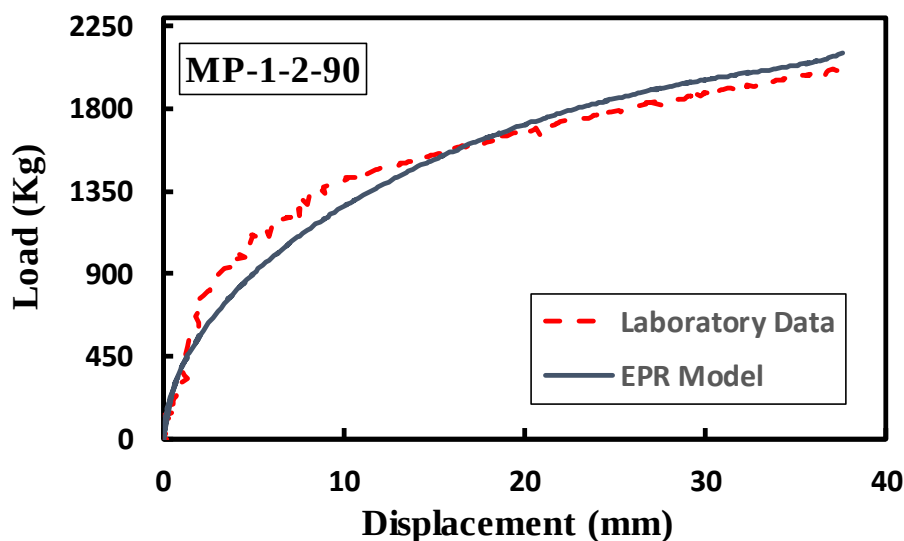


شکل ۴-۴۰) پیش بینی مدل EPR برای نمونه میکروپایل با طول ۰,۷۵ متر، قطر ۲ اینچ و تراکم نسبی ۹۰ درصد

• پیش بینی مدل برای داده‌های اعتبار سنجی

یک نمونه از منحنی‌های نیرو – جابه جایی پیش‌بینی شده توسط مدل‌های EPR ارائه شده برای

شرایط اولیه مختلف داده‌های اعتبارسنجی در ذیل آورده شده است.



شکل ۴-۴۱) پیش بینی مدل EPR برای نمونه میکروپایل با طول ۱ متر، قطر ۲ اینچ و تراکم نسبی ۹۰ درصد

همانطور که مشاهده می‌شود از مدل EPR می‌توان برای پیش‌بینی رفتار میکروپایل‌ها با شرایط اولیه مختلف استفاده کرد، این مدل از دقت بالایی برخوردار بوده و دارای محیط کاربری آسان می‌باشد. این مدل با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده بر مبنای طول، قطر و جابه‌جایی‌های مختلف میکروپایل در تراکم‌های نسبی متفاوت خاک بدست آمده است. البته این مدل قابلیت درونیابی، برونیابی و پیش‌بینی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی میکروپایل با مقادیر پارامترهای دیگر تعریف نشده در این تحقیق را نیز دارد. ولی برای افزایش دقت آن در پیش‌بینی‌هایی خارج از محدوده تعریف شده، پیشنهاد می‌شود تا یکسری آزمایش‌های تکمیلی با طول‌ها و قطرهای بالاتر میکروپایل و نیز تراکم‌های نسبی پراکنده انجام شده و به مدل اضافه گردد.

۴-۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل با استفاده از یکسری آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی تحت بار گذاری استاتیکی، رفتار میکروپایل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله پارامترهای تاثیرگذار در رفتار میکروپایل‌ها

پارامترهای طول و قطر میکروپایل ها و همچنین تراکم خاک می باشد. در این مطالعه علاوه بر آزمایش - های آزمایشگاهی از تحلیل های نرم افزاری SPSS به منظور تعیین تاثیرگذاری کمی این پارامترها استفاده شده است. در جدول ذیل میزان این تاثیر گذاری ها بیان شده است. ملاحظه می گردد پارامتر تراکم دارای بیشترین تاثیر و پارامتر طول دارای کمترین تاثیر می باشد. مدل EPR ارائه شده در این فصل نیز دارای دقت بالایی بوده و می تواند برای پیش بینی نمودارهای جابه جایی - نیرو در میکروپایل ها استفاده گردد.

جدول ۴-۱۵) میزان تاثیرگذاری کمی پارامتر تراکم در ارزیابی ظرفیت باربری میکروپایل ها

پارامتر ثابت	میزان تاثیر گذاری دیگر پارامترها
طول میکروپایل	تاثیر ۲/۱ برابری پارامتر تراکم نسبت به قطر
قطر میکروپایل	تاثیر ۲/۳ برابری پارامتر تراکم نسبت به طول
تراکم نسبی خاک	تاثیر ۱/۱ برابری پارامتر قطر نسبت به طول

جدول ۴-۱۶) میزان تاثیرگذاری کیفی پارامتر تراکم در ارزیابی ظرفیت باربری میکروپایل ها

پارامتر	تراکم ثابت	طول ثابت	قطر ثابت
تراکم نسبی	—	بسیار مهم	بسیار مهم
طول میکروپایل	مهم	—	مهم
قطر میکروپایل	مهم	مهم	—

فصل ۵ :

جمع بندی و پیشنهادها

۱-۵- مقدمه

میکروپایل‌ها یا همان ریز شمع‌ها به عنوان یک المان باربر نقش به سزایی در مقابله با خاک‌های مسئله‌دار بر عهده دارند. میکروپایل‌ها ابتدا برای ترمیم پی‌ها و ساختمان‌های موجود به کار گرفته می‌شدند اما با پیشرفت تجهیزات حفاری و تزریق به سرعت ذهن محققین و مهندسان عرصه ژئوتکنیک را به خود معطوف کرده تا در نهایت بتوانند به صورت بهینه‌تر و کاربردی‌تر مورد استفاده قرار بگیرند. مطالعات بسیاری نیز بر روی رفتار میکروپایل‌ها و پارامترهای تاثیرگذار آن در ابعاد عددی و میدانی صورت گرفته است. پارامترهای مورد مطالعه در این پژوهش طول و قطر میکروپایل‌ها و همچنین تراکم خاک در ابعاد آزمایشگاهی می‌باشد. در این مطالعه تلاش شده است تا در گام نخست با طراحی و ساخت دستگاه مدل سازی فیزیکی بارگذاری بزرگ مقیاس، شرایط خاک و بارگذاری به صورت واقعی‌تری شبیه سازی گردد. نتایج آزمایش‌های استاتیکی کرنش کنترل به همراه تحلیل‌های نرم افزاری درک جامعی نسبت به پارامترهای مورد بررسی، میزان تاثیرگذاری هریک و پیش‌بینی رفتار میکروپایل‌ها ارائه کرده است. در ادامه جمع‌بندی نتایج و پیشنهادات مطالعات آتی به اختصار آورده شده است.

۲-۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش حاصل مطالعات آزمایشگاهی و تحلیل‌های نرم‌افزاری داده‌ها توسط برنامه SPSS و EPR می‌باشد. بررسی این نتایج نقش به سزایی در ارزیابی رفتار میکروپایل‌ها و شناخت میزان تاثیرگذاری پارامترهای مختلف دارا می‌باشد.

- بررسی نتایج آزمایش‌های استاتیکی کرنش کنترل بر روی میکروپایل‌ها در گام نخست نشان دهنده‌ی تایید صحت عملکرد و نتایج دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بزرگ مقیاس طراحی و ساخته شده می‌باشد.

- نتایج آزمایش‌های اولیه بر روی خاک مورد مطالعه (ماسه فیروزکوه) شامل آزمایش‌های دانه-بندی، تعیین وزن مخصوص حداقل و حداکثر خاک و آزمایش برش مستقیم به اختصار نشان دهنده‌ی یک ماسه با دانه‌بندی یکنواخت و بد (SP) و زاویه اصطکاک داخلی حدوداً ۳۲ درجه می‌باشد.
- نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی در تراکم‌های نسبی مختلف خاک، نشان دهنده‌ی ارتباط مستقیم میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها با طول و قطر آن‌ها می‌باشد. علت این افزایش ظرفیت باربری را می‌توان به افزایش سطح تماس خاک و میکروپایل و در نتیجه افزایش اصطکاک جداره مرتبط دانست.
- نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات طول میکروپایل نشان دهنده‌ی این است که علیرغم ارتباط مستقیم میزان افزایش ظرفیت باربری و پارامتر طول، ظرفیت باربری بیشتر تابع طول نهایی باشد تا میزان افزایش طول، به طوری که افزایش ظرفیت باربری به ازای ۳۳ درصد افزایش طول (در طول‌های زیاد) بیشتر از افزایش ظرفیت باربری به ازای ۵۰ درصد افزایش طول (در طول‌های کم) می‌باشد.
- نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات قطر میکروپایل نشان دهنده‌ی این است که علیرغم ارتباط مستقیم میزان افزایش ظرفیت باربری و پارامتر قطر، ظرفیت باربری بیشتر تابع قطر نهایی باشد تا میزان افزایش قطر، به طوریکه افزایش ظرفیت باربری به ازای ۵۰ درصد افزایش قطر (در قطرهای زیاد) بیشتر از افزایش ظرفیت باربری به ازای ۱۰۰ درصد افزایش قطر (در قطرهای کم) می‌باشد.
- بررسی اثر کلاhek نشان می‌دهد با افزایش تراکم خاک به طور مستقیم و یا تحت اثر افزایش طول و قطر میکروپایل‌ها، از نقش کلاhek در تحمل ظرفیت باربری کاسته و بر نقش میکروپایل افزوده می‌شود.

- نتایج آزمایش‌های مدل‌سازی نشان دهنده‌ی این است که با افزایش تراکم خاک ظرفیت باربری میکروپایل‌ها به طور قابل توجهی در طول‌ها و قطرهای ثابت افزایش می‌یابد.
- در تراکم‌های زیاد (۹۰ درصد) نسبت به تراکم‌های کم (۳۰ درصد)، تغییرات ظرفیت باربری نسبت به تغییرات طول و قطر تصاعدی می‌شود به طوریکه در تراکم ۹۰ درصد، طول ۰/۵ متر و قطر ۱ اینچ دارای کمترین تغییر در ظرفیت باربری نسبت به تراکم ۳۰ درصد می‌باشد. طول ۱ متر و قطر ۳ اینچ نیز در تراکم ۹۰ درصد بیشترین تغییر در ظرفیت باربری نسبت به تراکم ۳۰ درصد را دارا می‌باشد.
- تحلیل‌های نرم افزاری SPSS نشان می‌دهد در تراکم‌های مختلف خاک، اثر قطر از طول بیشتر می‌باشد و به طور میانگین میتوان اثر پارامتر قطر را حدودا ۱۱ درصد بیشتر از پارامتر طول در تراکم‌های مختلف خاک دانست. همچنین، ملاحظه می‌گردد با افزایش تراکم خاک از ۳۰ به ۹۰ درصد، اثرگذاری ۲ پارامتر طول و قطر تقریبا یکسان می‌شود.
- تحلیل‌های نرم افزاری SPSS نشان می‌دهد در طول‌های مختلف مورد بررسی میکروپایل، تراکم خاک یک پارامتر بسیار تاثیر گذارتر از قطر در ظرفیت باربری می‌باشد. نکته حائز اهمیت در این است که با افزایش طول میکروپایل تاثیر گذاری پارامتر تراکم نسبت به قطر کمتر می‌شود. به طور میانگین می‌توان اثر پارامتر تراکم را حدودا ۲ برابر پارامتر قطر در طول‌های مختلف میکروپایل دانست.
- تحلیل‌های نرم افزاری SPSS نشان می‌دهد در قطرهای مختلف مورد بررسی میکروپایل، تراکم خاک یک پارامتر بسیار تاثیر گذارتر از طول در ظرفیت باربری می‌باشد. نکته حائز اهمیت در این است که با افزایش قطر میکروپایل تاثیر گذاری پارامتر تراکم نسبت به طول کمتر می‌شود. به طور میانگین می‌توان اثر پارامتر تراکم را بیش از ۲ برابر پارامتر طول در قطرهای مختلف میکروپایل دانست.

- با ارزیابی کلی نتایج تحلیل نرم افزاری SPSS ملاحظه می‌گردد پارامترهای تراکم، قطر و طول میکروپایل به ترتیب دارای بیشترین اهمیت در ارزیابی مقدار ظرفیت باری می‌باشند.
- در محاسبات عددی و نرم افزارهای موجود، تاثیر تراکم خاک و انرژی ناشی از کوبش به صورت مستقیم گنجانده نشده و اثر تراکم فقط به عنوان یک ضریب اطمینان لحاظ می‌شود، در صورتیکه بررسی‌ها نشان می‌دهد تراکم خاک سهم به سزایی در ظرفیت باربری دارد و می‌بایست به عنوان یک ضریب مستقل مد نظر قرار گیرد.
- مدل ارائه شده توسط روش‌های الگوریتم ژنتیک (EPR) از دقت قابل قبولی برخوردار است. این مدل قادر است رفتار نیرو – جابه جایی میکروپایل را با وارد کردن مقادیر مد نظر پارامترها پیش بینی کند. از این مدل می‌توان برای انجام پیش بینی‌ها بدون نیاز به انجام آزمایش‌های مربوطه استفاده کرد.

۳-۵- پیشنهادها برای تحقیقات آینده

پژوهش ارائه شده در این پایان نامه شامل مطالعات آزمایشگاهی به منظور ارزیابی پاسخ میکروپایل‌ها به بارگذاری محوری استاتیکی می‌باشد. براساس نتایج این مطالعات، افق‌های جدیدی از پژوهش‌ها شناسایی شده است. عناوین و موضوعات پیشنهادی برای تحقیقات آتی در زمینه میکروپایل را می‌توان به صورت موارد ذیل مطرح نمود:

- انجام یکسری آزمایش مدل‌سازی فیزیکی به طور مشابه در خاک‌های رسی.
- آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی در خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری‌های دینامیکی محوری و جانبی.
- انجام یکسری آزمایش با نرخ‌های جابه‌جایی متفاوت و میزان جابه‌جایی نهایی بیشتر.

- اجرای آزمایش‌های محوری و جانبی استاتیکی و سیکی به صورت توام.
- ارزیابی رفتار گروه میکروپایل‌ها با استفاده از مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و نیز تکنیک‌های جدید بارگذاری.
- ارزیابی اثر بارهای ترکیبی بر روی میکروپایل‌ها با استفاده از روش‌های مدل‌سازی عددی یا اجزا محدودی شامل تحلیل‌های ۲ و ۳ بعدی و کالیبره سازی مدل‌ها با استفاده از داده‌های حاصل از مدل مقیاس و آزمایش‌های بارگذاری تمام مقیاس. در نهایت، بررسی حالت‌هایی که مدل کردن آن در آزمایشگاه ممکن نیست و یا بسیار مشکل است با استفاده از روش‌های عددی و نرم افزاری.

مراجع

1. Abrishami, S. and M.H.S. MIR, *Design and development of a new physical model of strip footings on reinforced soil media under cyclic loadings*. 2010.p. 19-29
2. FHWA, M.D., *Construction Guidelines, Implementation Manual*. Publication No. 2000, FHWA-SA-97-070.p. 121-154
3. Tsukada, Y., et al., *Mechanism of bearing capacity of spread footings reinforced with micropiles*. Soils and Foundations, 2006. **46**(3): p. 367-376.
4. Boeckmann, A.Z., *Load transfer in micropiles for slope stabilization from tests of large-scale physical models*. 2006, University of Missouri--Columbia.p. 214-232
5. Hettler, A. and G. Gudehus, *A pressure-dependent correction for displacement results from 1 g model tests with sand*. Géotechnique, 1985. **35**(4): p. 497-510.
6. Franke, E. and G. Muth, *SCALE EFFECT IN 1G-MODEL TESTS ON HORIZONTALLY LOADED PILES. PROCEEDINGS OF THE ELEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, SAN FRANCISCO, 12-16 AUGUST 1985*. Publication of: Balkema (AA), 1985.p. 36-63
7. Baziar, M.H. and M.R. ZIAEI, *Evaluation of cone penetration resistance in loose silty sand using calibration chamber*. 2006.p. 45-63
8. Zare, M. and A. Eslami, *Study of deep foundations performance by frustum confining vessel (FCV)*. International Journal of Civil Engineering (IJCE), IUST University, Tehran, Iran, 2014.p. 58-74
9. Khouaouci, M., et al., *SINGLE PILE BEHAVIOR UNDER CYCLIC AXIAL LOADING IN SAND-PHYSICAL MODELING IN CALIBRATION CHAMBER*. 2018.p. 112-125
10. Ghionna, V. and M. Jamiolkowski. *A critical appraisal of calibration chamber testing of sands*. in *Proceedings of the 1st International Symposium on Calibration Chamber Testing (ISOCCTI)*, Potsdam, NY Elsevier. 1991.p. 68-89
11. Bucky, P.B., *Use of models for the study of mining problems*. 1931: American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Incorporated.p. 38-98
12. Panek, L.A., *Centrifugal testing apparatus for mine-structure stress analysis*. Vol. 4883. 1952: US Dept. of the Interior, Bureau of Mines.p. 15-27
13. Schofield, A.N., *Cambridge geotechnical centrifuge operations*. Geotechnique, 1980. **30**(3): p. 227-268.
14. Shen, C., et al., *Centrifuge modeling of lateral earth support*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982. **108**(9): p. 1150-1164.
15. Mikasa, M. and N. Takada. *Selfweight consolidation of very soft clay by centrifuge*. in *Sedimentation Consolidation Models—Predictions and Validation*. 1984. ASCE.
16. Hushmand, B., R. Scott, and C. Crouse, *Centrifuge liquefaction tests in a laminar box*. Geotechnique, 1988. **38**(2): p. 253-262.
17. Whitman, R.V. and P.C. Lambe, *Effect of boundary conditions upon centrifuge experiments using ground motion simulation*. Geotechnical Testing Journal, 1986. **9**(2): p. 61-71.
18. Gibson, A.D., *Physical scale modeling of geotechnical structures at one-G*. 1997, California Institute of Technology.p. 251-268
19. Prasad, S., et al., *Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering*. Current science, 2004: p. 1398-1404.

20. Jafarzadeh, B. *Design and evaluation concepts of laminar shear box for 1g shaking table tests*. in *Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering*, Vancouver, paper. 2004.p. 325-365
21. Asefi, A., A.A. ESLAMI, and N.M. LASHTEH, *Investigation of Anzali harbor sand behavior using a glass tank and a vibration table*. 2009.p. 256-267
22. Ahmadi, H., A. Eslami, and M. Arabani, *Experimental study on the settlement of marine deposits of Anzali under cyclic loading by laminar box apparatus*. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2017. **35**(3): p. 330-338.
23. Horvath, R.G. and D. Stolle, *Frustum confining vessel for testing model piles*. *Canadian geotechnical journal*, 1996. **33**(3): p. 499-504.
24. Sedran, G., *Experimental and analytical study of a frustum confining vessel*. 1999.
25. Groneck, P.B., et al., *Pin piles save silos*. *Civil Engineering*, 1993. **63**(9): p. 66.
26. Russo, G., *Full-scale load tests on instrumented micropiles*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2004. **157**(3): p. 127-135.
27. Han, J. and S.-L. Ye, *A field study on the behavior of micropiles in clay under compression or tension*. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006. **43**(1): p. 19-29.
28. Cavey, J., et al., *Observations of minipile performance under cyclic loading conditions*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2000. **4**(1): p. 23-29.
29. Gomez, J., et al. Keough, L. 2007. *Hollow core bar micropiles—installation, testing, and interpolation of design parameter of 260 micropiles*. in *Proceedings of the 8th International Workshop on Micropiles*, Toronto, Ont. 2007.p. 365-368
30. Richards, J., Thomas D and M.J. Rothbauer, *Lateral loads on pin piles (micropiles)*, in *GeoSupport 2004: Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods, and Specialty Foundation Systems*. 2004. p. 158-174.
31. Reese, L.C., et al., *A program for the analysis of piles and drilled shafts under lateral loads*. *Computer Program LPILE Plus*, Version 4.0, Ensoft Inc, 2000.p. 145-149
32. Manual, D., 7.02: *Foundations & Earth Structures*. Naval Facilities Engineering Command, Alexandria, Va, 1986.p. 165-201
33. Duncan, J.M., L.T. Evans Jr, and P.S. Ooi, *Lateral load analysis of single piles and drilled shafts*. *Journal of geotechnical engineering*, 1994. **120**(6): p. 1018-1033.
34. Long, J., et al., *Results of lateral load tests on micropiles*, in *GeoSupport 2004: Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods, and Specialty Foundation Systems*. 2004. p. 122-133.
35. Ousta, R. and I. Shahrour, *Three-dimensional analysis of the seismic behaviour of micropiles used in the reinforcement of saturated soil*. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2001. **25**(2): p. 183-196.
36. Sadek, M. and S. Isam, *Three-dimensional finite element analysis of the seismic behavior of inclined micropiles*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004. **24**(6): p. 473-485.
37. El-aziz, A. and A. Yehia, *Performance of hollow bar micropiles under axial and lateral loads in cohesive soils*. 2012. p. 48-95
38. Capatti, M.C., F. Dezi, and M. Morici, *Field tests on micropiles under dynamic lateral loading*. *Procedia Engineering*, 2016. **158**: p. 236-241.
40. Cadden, A., et al., *Micropiles: recent advances and future trends*, in *Current Practices and Future Trends in Deep Foundations*. 2004. p. 140-165.

41. ASTM, D., *Standard test method for particle-size analysis of soils*. 2007.p. 311-325
42. Testing, A.S.f. and Materials, *Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density*. 2006: ASTM International.p. 248-268
43. Presti, D.L., S. Pedroni, and V. Crippa, *Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D 4253-83: A comparative study*. Geotechnical Testing Journal, 1992. **15**(2): p. 180-189.
44. ASTM, D., 3080, *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. ASTM International, West Conshohocken, USA, 2002.p. 254-265
45. Poulos, H., *Some aspects of skin friction of piles in clay under cyclic loading*. NASA STI/Recon Technical Report N, 1980. 8.p. 25-35
46. Green, S.B. and N.J. Salkind, *Using SPSS for Windows and Macintosh, Books a la Carte*. 2016: Pearson.p. 112-128
47. Davidson, J.W., D. Savic, and G.A. Walters, *Method for the identification of explicit polynomial formulae for the friction in turbulent pipe flow*. Journal of Hydroinformatics, 1999. **1**(2): p. 115-126.
48. GIUSTOLISI, O., D. SAVIC, and A. DOGLIONI, *Data reconstruction and forecasting by evolutionary polynomial regression*, in *Hydroinformatics: (In 2 Volumes, with CD-ROM)*. 2004, World Scientific. p. 1245-1252.

ABSTRACT:

The need for various construction projects has usually caused problems such as settlement or shortage of load bearing capacity for civil engineers. Among the measures taken to stabilize the soil is the use of a variety of improvement methods. One of these applications is the use of micropile or small pile as a structural element in soil. In this research and in a laboratory program, after design and construct of a large-scale physical modeling apparatus, multiple static strain- control loading tests with a displacement rate of 10mm / min were performed to examine various factors such as length, diameter and slenderness ratio of micropiles in soils with different relative densities. In this study, SPSS software was used to analyze the results and determine the quantitative effect of parameters and EPR genetic algorithm-based method was used to predict the behavior of micropiles. The length sizes of the used micropiles are 0.5, 0.75 and 1 meter and the diameter sizes of them are 1, 2, and 3 inch. The soil used is standard Firoozkooh sand, which is used in relative densities of 30% and 90%. The results of the study, in addition to confirm the performance of the device and accuracy of its results, show an impact of the diameter parameter approximately 1.1 times of the length at different densities, the effect of the density parameter 2.1 times of the diameter in different lengths and the effect of the density parameter 2.3 times of the length in different diameters. Finally, it is observed that EPR model has high accuracy in prediction and based on SPSS results, density, diameter and length are respectively the most important parameters in assess and evaluate the amount of load bearing capacity in micropiles.

Keywords: Micropile, Load bearing capacity, Laboratory modeling, SPSS analysis, EPR model



Shahrood University of Technology
Faculty of Civil Engineering
M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

**Evaluate the effect of slenderness ratio, diameter and length
on micropile bearing capacity in granular soils with different
densities using physical laboratory modeling**

By:
Hosseyn Moradi Moghaddam

Supervisors:
Dr. Reza Naderi
Dr. Mohsen Keramati

January, 2019