

به نام آنکه جان را فکرت آموخت



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

ارزیابی اثر تغییرات چسبندگی جدار (آلفا باند) و شعاع تزریق  
بر ظرفیت باربری ریزشمع در خاک‌های دانه‌ای با تراکم‌های  
مختلف با استفاده از مدلسازی فیزیکی آزمایشگاهی

نگارنده:

امین رامش

استاد راهنما:

دکتر رضا نادری

دکتر محسن کرامتی

اسفند ۱۳۹۷

## دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی ژئوتکنیک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امین رامش به شماره دانشجویی: ۹۵۰۶۴۰۴

تحت عنوان: ارزیابی اثر تغییرات چسبندگی جدار (آلفا باند) و شعاع تزریق بر ظرفیت باربری ریزشمع در

خاک‌های دانه‌ای با تراکم‌های مختلف با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی آزمایشگاهی

در تاریخ ۱۳۹۷/۱۲/۱۳ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

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

| امضاء | نماینده تحصیلات تکمیلی | امضاء | اساتید داور             |
|-------|------------------------|-------|-------------------------|
|       | دکتر مهدی عجمی         |       | دکتر امیر بذرافشان مقدم |
|       |                        |       | دکتر محمد شامخی امیری   |

## تعهد نامه

اینجانب امین رامش دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارزیابی اثر تغییرات چسبندگی جدار (آلفا باند) و شعاع تزریق بر ظرفیت باربری ریزشمع در خاک های دانه ای با تراکم های مختلف با استفاده از مدلسازی فیزیکی آزمایشگاهی تحت راهنمایی دکتر رضا نادری و دکتر محسن کرامتی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

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، **پروکار یکنام**؛  
تقدیم می شود به **پروکار عزیزتر از جانم**؛ آنان که امروز، بیشتر از دیروز و نه به اندازه ی فردا،  
دوستشان دارم...

## سپاس

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

**خدايي** 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 رضانه‌ای** و **دکتر من 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 حسین مرادی مقدم**، **مهندس شاپور قاندر**، و سایر **عزیزانی** که در انجام این تحقیق مرا یاری کردن متشکرم.

## 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 ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه جهت بررسی پارامترهای مختلفی همچون شعاع تزریق، چسبندگی جدار و اثر کوبش بر ظرفیت باربری میکروپایل‌ها در خاک‌های با تراکم نسبی مختلف انجام گرفته است. در این بررسی‌ها از نرم افزار SPSS به منظور تحلیل نتایج و تعیین اثر کمی پارامترهای میکروپایل استفاده شده است. در این مطالعه از میکروپایل‌هایی با شعاع تزریق ۶۵، ۱۲۰ و ۱۷۰ میلی‌متر به طول ۱ متر استفاده شده است. خاک مورد استفاده ماسه استاندارد فیروزکوه می‌باشد که در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد مورد استفاده قرار گرفته است. که در انتها مشخص می‌شود اثر تراکم عاملی تاثیر گذار در ظرفیت باربری است که در آیین نامه توجه خاصی به آن نشده است و در نرم افزار SPSS مشاهده می‌شود که تراکم اثر ۱/۴۷ برابری افزایش ظرفیت باربری نسبت به شعاع تزریق دارد. همچنین بر اساس نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که در تراکم‌های ۴۵ و ۹۰ درصد اختلاف چسبندگی جدار به ترتیب باعث افزایش ۳۹ و ۴۳ درصدی ظرفیت باربری می‌شود.

**کلمات کلیدی:** ظرفیت باربری میکروپایل، مدلسازی آزمایشگاهی، دستگاه مدلسازی فیزیکی، شعاع تزریق، چسبندگی جدار، تحلیل SPSS.

## فهرست مطالب

|           |                                |
|-----------|--------------------------------|
| ۱         | فصل ۱: کلیات                   |
| ۱-۱-۱     | تعریف مسئله                    |
| ۱-۲-۱     | ضرورت انجام تحقیق              |
| ۱-۳-۱     | اهداف تحقیق                    |
| ۱-۴-۱     | روش انجام تحقیق                |
| ۱-۵-۱     | ساختار پایان نامه              |
| ۱۱        | فصل ۲: مروری بر ادبیات فنی     |
| ۱-۲-۱     | مقدمه                          |
| ۱-۲-۲     | تعاریف، اصول و مبانی نظری      |
| ۱-۲-۲-۱   | معرفی ریزشمع                   |
| ۱-۲-۲-۲   | سیستم طبقه بندی ریزشمع         |
| ۱-۲-۲-۲-۱ | طبقه بندی بر اساس نحوه طراحی   |
| ۱-۲-۲-۲-۲ | طبقه بندی بر اساس روش اجرا     |
| ۱-۲-۲-۳   | کاربردهای ریزشمع               |
| ۱-۲-۲-۴   | عوامل موثر در انتخاب ریزشمع ها |
| ۱-۲-۴-۱   | شرایط فیزیکی                   |
| ۱-۲-۴-۲   | شرایط زیرسطحی                  |
| ۱-۲-۴-۳   | شرایط محیطی                    |
| ۱-۲-۴-۴   | سازگاری با سازه موجود          |
| ۱-۲-۴-۵   | محدودیت ریزشمع ها              |
| ۱-۲-۴-۶   | شرایط اقتصادی                  |
| ۱-۲-۴-۵   | اجزای ریزشمع                   |
| ۱-۲-۴-۶   | روش اجرای ریزشمع               |
| ۱-۲-۴-۶-۱ | حفاری                          |
| ۱-۲-۴-۶-۲ | لوله کوبی                      |
| ۱-۲-۴-۶-۳ | تزریق                          |
| ۱-۲-۴-۶-۴ | جایگذاری آرماتور و نصب فلنج    |
| ۱-۲-۴-۷   | محاسبات فنی                    |
| ۱-۲-۴-۷-۱ | کلیات طراحی                    |
| ۱-۲-۴-۷-۲ | گام های طراحی                  |



|         |                                                                  |
|---------|------------------------------------------------------------------|
| ۲۷..... | ۳-۷-۲-۲- آیین نامه طراحی                                         |
| ۲۸..... | ۴-۷-۲-۲- روش های طراحی                                           |
| ۲۹..... | ۵-۷-۲-۲- طراحی ژئوتکنیکی                                         |
| ۲۹..... | ۶-۷-۲-۲- مقادیر $\alpha_{bond}$ برای مجموعه خاک و دوغاب          |
| ۳۱..... | ۷-۷-۲-۲- بارهای محوری کششی و فشاری مجاز برای طول پیوند ژئوتکنیکی |
| ۳۱..... | ۸-۲-۲- مشخصات فنی اجرای ریزشمع                                   |
| ۳۱..... | ۱-۸-۲-۲- مشخصات فنی حفاری                                        |
| ۳۱..... | ۲-۸-۲-۲- مشخصات فنی لوله های ریزشمع                              |
| ۳۲..... | ۳-۸-۲-۲- مشخصات فنی آرماتور تقویت                                |
| ۳۴..... | ۴-۸-۲-۲- مشخصات فنی تزریق                                        |
| ۳۶..... | ۹-۲-۲- کنترل کیفیت عملکرد                                        |
| ۳۶..... | ۱-۹-۲-۲- آزمایش نهایی                                            |
| ۳۷..... | ۲-۹-۲-۲- آزمایش تأیید                                            |
| ۳۷..... | ۳-۹-۲-۲- آزمایش اثبات                                            |
| ۳۸..... | ۴-۹-۲-۲- آزمایش خزش                                              |
| ۳۸..... | ۱۰-۲-۲- مقایسه اجرای ریزشمع با سایر روش های تحکیم                |
| ۳۸..... | ۱-۱۰-۲-۲- بعد فنی                                                |
| ۳۹..... | ۲-۱۰-۲-۲- بعد اجرایی                                             |
| ۴۰..... | ۳-۱۰-۲-۲- بعد اقتصادی                                            |
| ۴۰..... | ۴-۱۰-۲-۲- تضمین کیفیت عملکرد                                     |
| ۴۱..... | ۵-۱۰-۲-۲- مدت زمان اجرا                                          |
| ۴۱..... | ۳-۳-۲- مروری بر ادبیات موضوع                                     |
| ۴۱..... | ۱-۳-۲- تاریخچه ی مختصر میکروپایل ها                              |
| ۴۳..... | ۲-۳-۲- مطالعات آزمایشگاهی                                        |
| ۴۶..... | ۳-۳-۲- مطالعات میدانی                                            |
| ۴۷..... | ۱-۳-۳-۲- آزمایش های میدانی بارگذاری محوری                        |
| ۴۹..... | ۲-۳-۳-۲- آزمایش های میدانی بارگذاری سیکلیک                       |
| ۵۰..... | ۳-۳-۳-۲- آزمایش های میدانی بارگذاری جانبی                        |
| ۵۰..... | ۴-۳-۲- مطالعات عددی و نرم افزاری                                 |
| ۵۲..... | ۵-۳-۲- مطالعات ترکیبی                                            |
| ۵۴..... | ۶-۳-۲- تاریخچه موردی میکروپایل                                   |
| ۵۶..... | ۷-۳-۲- دستگاه های مورد استفاده در مدلسازی                        |

|         |                                                              |
|---------|--------------------------------------------------------------|
| ۵۷..... | ۲-۳-۷-۱- مدلسازی فیزیکی با اتاقک ساده.....                   |
| ۵۸..... | ۲-۳-۷-۲- مدلسازی فیزیکی با اتاقک کالیبراسیون.....            |
| ۶۰..... | ۲-۳-۷-۳- مدلسازی فیزیکی با سانتریفیوژهای ژئوتکنیکی.....      |
| ۶۱..... | ۲-۳-۷-۴- مدلسازی فیزیکی با جعبه ی برش شفاف.....              |
| ۶۲..... | ۲-۳-۷-۵- مدلسازی فیزیکی با محفظه ی مخروط ناقص.....           |
| ۶۳..... | ۲-۳-۷-۶- مدلسازی فیزیکی با محفظه ی مخروط ناقص اصلاح شده..... |
| ۶۶..... | ۲-۳-۷-۷- مدلسازی فیزیکی با جعبه ی کوچک مدلسازی.....          |
| ۶۹..... | ۲-۴- نتیجه گیری.....                                         |

### فصل ۳: روش تحقیق

|          |                                                               |
|----------|---------------------------------------------------------------|
| ۷۱.....  |                                                               |
| ۷۲.....  | ۳-۱- مقدمه.....                                               |
| ۷۲.....  | ۳-۲- خصوصیات مصالح مصرفی.....                                 |
| ۷۳.....  | ۳-۲-۱- خصوصیات مصالح خاک.....                                 |
| ۷۳.....  | ۳-۲-۱-۱- آزمایش دانه بندی خاک مصرفی.....                      |
| ۷۵.....  | ۳-۲-۱-۲- آزمایش تعیین وزن مخصوص حداقل و حداکثر خاک مصرفی..... |
| ۷۷.....  | ۳-۲-۱-۳- آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس.....                    |
| ۸۰.....  | ۳-۲-۱-۴- جمع بندی نتایج خصوصیات ماسه فیروزکوه.....            |
| ۸۱.....  | ۳-۲-۲- خصوصیات مدل میکروپایل.....                             |
| ۸۲.....  | ۳-۳- آزمایش های مدلسازی فیزیکی.....                           |
| ۸۳.....  | ۳-۳-۱- وسایل و دستگاه های مورد نیاز.....                      |
| ۸۳.....  | ۳-۳-۱-۱- دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس.....                |
| ۸۴.....  | ۳-۳-۱-۲- اجزای دستگاه مدلسازی فیزیکی.....                     |
| ۸۶.....  | ۳-۳-۱-۲-۱- تابلو برق دستگاه.....                              |
| ۸۷.....  | ۳-۳-۱-۲-۲- سیستم پاورپک.....                                  |
| ۸۹.....  | ۳-۳-۱-۲-۳- سیستم اکچویتور.....                                |
| ۹۰.....  | ۳-۳-۱-۲-۴- محفظه ی آزمایش و اجزای آن.....                     |
| ۹۱.....  | ۳-۳-۱-۲-۵- سیستم کنترل، قرائت و ثبت داده ها.....              |
| ۹۳.....  | ۳-۳-۱-۳- فونداسیون دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس.....      |
| ۹۴.....  | ۳-۳-۱-۴- مجموعه سیستم بارش ماسه.....                          |
| ۹۵.....  | ۳-۳-۱-۴-۱- خصوصیات و اجزای تشکیل دهنده.....                   |
| ۹۷.....  | ۳-۳-۲- روش انجام آزمایش.....                                  |
| ۱۰۲..... | ۳-۳-۳- کالیبره کردن دستگاه به منظور انجام آزمایش ها.....      |

|     |                            |
|-----|----------------------------|
| ۱۰۳ | ۴-۳- برنامه آزمایش ها..... |
| ۱۰۴ | ۵-۳- نرم افزار SPSS.....   |

#### فصل ۴: نتایج و تفسیر آن‌ها

|     |                                                                                                    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱۰۷ |                                                                                                    |
| ۱۰۸ | ۴-۱- مقدمه.....                                                                                    |
| ۱۰۸ | ۴-۲- تعریف آزمایش مرجع.....                                                                        |
| ۱۱۱ | ۴-۳- ارزیابی اثر شعاع تزریق، چسبندگی جدار (آلفای باند) و تراکم نسبی.....                           |
| ۱۱۱ | ۴-۳-۱- ارزیابی اثر شعاع تزریق و چسبندگی جدار بر ظرفیت باربری.....                                  |
|     | ۴-۳-۲- ارزیابی اثر تراکم نسبی بر ظرفیت باربری میکروپایل در شعاعهای تزریق و چسبندگی جدار مختلف..... |
| ۱۱۷ |                                                                                                    |
| ۱۲۱ | ۴-۴- ارزیابی اثر افزایش قطر لوله های میکروپایل و تراکم نسبی.....                                   |
| ۱۲۱ | ۴-۴-۱- ارزیابی اثر افزایش قطر لوله های میکروپایل بر ظرفیت باربری.....                              |
| ۱۲۶ | ۴-۴-۲- ارزیابی اثر تراکم بر ظرفیت باربری میکروپایلها در لوله هایی با قطرهای مختلف.....             |
| ۱۳۰ | ۴-۵- ارزیابی اثر کوبش و تراکم بر ظرفیت باربری میکروپایل ها.....                                    |
| ۱۳۰ | ۴-۵-۱- ارزیابی اثر کوبش میکروپایل ها بر ظرفیت باربری.....                                          |
| ۱۳۵ | ۴-۵-۲- ارزیابی اثر کوبش بر ظرفیت باربری میکروپایل ها در تراکم های مختلف.....                       |
| ۱۳۹ | ۴-۶- تحلیل نرم افزاری SPSS.....                                                                    |
| ۱۴۰ | ۴-۶-۲- نمونه محاسبات تحلیل SPSS.....                                                               |
| ۱۴۱ | ۴-۶-۳- نتایج تحلیل SPSS.....                                                                       |
| ۱۴۲ | ۴-۷- مقایسه نتایج.....                                                                             |
| ۱۴۲ | ۴-۷-۱- مقایسه نتایج با سایر محققین.....                                                            |
| ۱۴۳ | ۴-۷-۲- مقایسه نتایج با آیین نامه FHWA.....                                                         |
| ۱۴۴ | ۴-۸- جمع بندی و نتیجه گیری.....                                                                    |

#### فصل ۵: جمع بندی و پیشنهادها

|     |                                        |
|-----|----------------------------------------|
| ۱۴۷ |                                        |
| ۱۴۸ | ۵-۱- مقدمه.....                        |
| ۱۴۸ | ۵-۲- جمع بندی و نتیجه گیری.....        |
| ۱۵۰ | ۵-۳- پیشنهادها برای تحقیقات آینده..... |

پیوست

۱۵۳

مراجع

۱۵۹

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) ریزشمع های استفاده شده زیر تکیه گاه های پل نهر "ماهونینگ" در استان آرمسترانگ ..... ۴
- شکل (۲-۱) تقویت پی پل بتنی خیابان امرسون غربی در سیاتل، واشینگتن ..... ۴
- شکل (۳-۱) نصب و اجرای ریزشمع ها در ارتفاع سقف کم ..... ۴
- شکل (۴-۱) پروژه FH-7، جنگل بین المللی مندونیکو واقع در کالیفرنیا (پایدارسازی شیروانی) ..... ۵
- شکل (۱-۲) ریزشمع های دسته اول (براساس نحوه ی طراحی) ..... ۱۴
- شکل (۲-۲) ریزشمع های دسته دوم (براساس نحوه ی طراحی) ..... ۱۵
- شکل (۳-۲) طبقه بندی ریزشمع (بر اساس روش اجرا) ..... ۱۶
- شکل (۴-۲) اجزای ریزشمع ..... ۲۳
- شکل (۵-۲) مراحل اجرای ریزشمع ..... ۲۴
- شکل (۶-۲) روش های طراحی میکروپایل و مقایسه آن ها ..... ۲۸
- شکل (۷-۲) آرماتور عاجدار (آرماتور تقویت) ..... ۳۳
- شکل (۸-۲) آرماتور عاجدار توخالی (آرماتور تقویت) ..... ۳۳
- شکل (۹-۲) مقطع لوله های فولادی (آرماتور تقویت) ..... ۳۴
- شکل (۱۰-۲) تاثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری دوغاب ..... ۳۵
- شکل (۱۱-۲) سیستم ریز شمع زنبوری (تاریخچه ی مختصر میکروپایل ها) ..... ۴۲
- شکل (۱۲-۲) نمونه های ساخته شده توسط تسوکادا و همکارانش ..... ۴۳
- شکل (۱۳-۲) نمونه سازی در داخل جعبه توسط تسوکادا و همکارانش ..... ۴۳
- شکل (۱۴-۲) دستگاه مورد استفاده جهت بارگذاری ..... ۴۴
- شکل (۱۵-۲) نمودار تاثیر تراکم های نسبی مختلف خاک در میزان ظرفیت باربری ..... ۴۴
- شکل (۱۶-۲) نمونه های ساخته شده توسط ایرامنش جهت بررسی چسبندگی جدار ..... ۴۵
- شکل (۱۷-۲) دستگاه استفاده شده توسط ایرامنش جهت بارگذاری ..... ۴۵
- شکل (۱۸-۲) مدل فیزیکی شیروانی برای تثبیت با میکروپایل ..... ۴۶
- شکل (۱۹-۲) پاسخ بار-جابه جایی در تست های بارگذاری شمع در میکروپایل ها تحت کشش یا فشار ..... ۴۹
- شکل (۲۰-۲) پوش لنگر خمشی؛ (a) میکروپایل منفرد، (b) گروه میکروپایل ..... ۵۱
- شکل (۲۱-۲) اثر شیب میکروپایل ها در فرکانس های طبیعی سیستم خاک-میکروپایل ..... ۵۲

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| شکل (۲۲-۲) منحنی های صحت سنجی نیرو-جابه جایی؛ (a) در فشار استاتیکی، (b) در فشار سیکلیک                                                 | ۵۳ |
| شکل (۲۳-۲) نتایج آزمایش های تجربی و تحلیلی برای بارگذاری ضربه ای                                                                       | ۵۴ |
| شکل (۲۴-۲) نتایج آزمایش های بارگذاری میکروپایل با سیکل های متعدد بارگذاری-باربرداری                                                    | ۵۶ |
| شکل (۲۵-۲) اتاقک ساده؛ (a) شکل شماتیک، (b) تصویر واقعی                                                                                 | ۵۷ |
| شکل (۲۶-۲) تغییرات اصطکاک محلی شمع در بارگذاری یکنواخت                                                                                 | ۵۹ |
| شکل (۲۷-۲) اتاقک کالیبراسیون؛ (a) تصویر شماتیک، (b) تصویر واقعی                                                                        | ۵۹ |
| شکل (۲۸-۲) نمای کلی جعبه ی برش شفاف                                                                                                    | ۶۲ |
| شکل (۲۹-۲) شکل شماتیک سیستم FCV؛ (a) اجزای FCV در دانشگاه فلوریدای جنوبی (b) بارهای اعمالی در FCV                                      | ۶۳ |
| شکل (۳۰-۲) FCV اصلاح شده، (a) شکل شماتیک؛ (b) تصویر واقعی                                                                              | ۶۴ |
| شکل (۳۱-۲) توزیع تنش در FCV اصلاح شده، (a) قائم؛ (b) افقی                                                                              | ۶۵ |
| شکل (۳۲-۲) نمودار بار- جابه جایی در FCV به منظور نشان دادن تکرارپذیری تست ها                                                           | ۶۵ |
| شکل (۳۳-۲) نمودارهای بار- جابه جایی در FCV، (a) فشار؛ (b) کشش                                                                          | ۶۶ |
| شکل (۳۴-۲) مجموعه کامل سیستم آزمایشگاهی مطالعه رفتار پی های نواری واقع بر خاک مسلح                                                     | ۶۷ |
| شکل (۳۵-۲) 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 | ۶۷ |
| شکل (۳۶-۲) نتایج بارگذاری سیکلی بر پی واقع بر خاک مسلح ( $U/B=0.5$ )، (الف) نمودار بار-زمان، (ب) نمودار بار- نشست                      | ۶۸ |
| شکل (۱-۳) تصویر مصالح مصرفی؛ ماسه فیروزکوه و مدل میکروپایل                                                                             | ۷۲ |
| شکل (۲-۳) تصویر مجموعه الک ها و لرزاننده                                                                                               | ۷۳ |
| شکل (۳-۳) نمودار دانه بندی ماسه (ماسه فیروزکوه)                                                                                        | ۷۴ |
| شکل (۴-۳) تصویر وسایل استفاده شده برای آزمایش تعیین حداقل و حداکثر وزن مخصوص ماسه                                                      | ۷۶ |
| شکل (۵-۳) دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس                                                                                                 | ۷۸ |
| شکل (۶-۳) ایجاد نمونه های میکروپایل در طول های مد نظر                                                                                  | ۸۲ |
| شکل (۷-۳) نمای کلی از دستگاه مدلسازی فیزیکی بارگذاری بزرگ مقیاس                                                                        | ۸۳ |
| شکل (۸-۳) طراحی دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس با SolidWorks                                                                         | ۸۴ |
| شکل (۹-۳) شمایی از دستگاه مدلسازی بزرگ مقیاس                                                                                           | ۸۵ |
| شکل (۱۰-۳) تابلو برق دستگاه و جزئیات                                                                                                   | ۸۷ |

|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| شکل (۱۱-۳) سیستم پاورپک .....                                                                                                          | ۸۸  |
| شکل (۱۲-۳) سیستم اکچویتور .....                                                                                                        | ۹۰  |
| شکل (۱۳-۳) محفظه ی آزمایش و قاب بارگذاری .....                                                                                         | ۹۱  |
| شکل (۱۴-۳) سیستم کنترل قرائت و ثبت داده ها؛ دیتالاگر، سیستم کامپیوتری .....                                                            | ۹۲  |
| شکل (۱۵-۳) دتایل اجرایی فونداسیون .....                                                                                                | ۹۴  |
| شکل (۱۶-۳) روند ساخت فونداسیون دستگاه .....                                                                                            | ۹۴  |
| شکل (۱۷-۳) نمای کلی از سیستم بارش ماسه .....                                                                                           | ۹۷  |
| شکل (۱۸-۳) نمونه سازی جهت انجام آزمایش در تراکم نسبی ۴۵ درصد .....                                                                     | ۹۹  |
| شکل (۱۹-۳) نمونه سازی جهت انجام آزمایش در تراکم نسبی ۹۰ درصد .....                                                                     | ۱۰۰ |
| شکل (۲۰-۳) نمایش اثر گذاری چسبندگی جدار در اثر بارگذاری .....                                                                          | ۱۰۱ |
| شکل (۲۱-۳) میکروپایل های مورد استفاده به منظور بررسی اثر کوبش .....                                                                    | ۱۰۱ |
| شکل (۲۲-۳) میزان زمان-جابه جایی در نرخ جابه جایی ۱۰ میلیمتر بر دقیقه .....                                                             | ۱۰۲ |
| شکل (۲۳-۳) نمایشی از نرم افزار SPSS .....                                                                                              | ۱۰۵ |
| شکل (۱-۴) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با شعاع تزریق ۶۵ میلیمتر در خاک با تراکم نسبی ۴۵ درصد .....                                   | ۱۰۹ |
| شکل (۲-۴) نمودار زمان-جابه جایی میکروپایل با طول ۱ متر و شعاع تزریق ۶۵ میلی متر در خاک با تراکم نسبی ۴۵ درصد .....                     | ۱۱۰ |
| شکل (۳-۴) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با شعاع تزریق ۶۵ میلی متر در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد .....                                  | ۱۱۱ |
| شکل (۴-۴) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با شعاع تزریق و چسبندگی جدار مختلف در خاک با تراکم نسبی ۴۵ درصد .....                         | ۱۱۳ |
| شکل (۵-۴) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با شعاع تزریق و چسبندگی جدار مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد .....                         | ۱۱۳ |
| شکل (۶-۴) الف- نمودار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش ۸۵ درصدی شعاع تزریق، نسبت به تغییرات چسبندگی جدار در تراکم نسبی ۴۵ درصد ..... | ۱۱۵ |
| شکل (۷-۴) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با شعاع تزریق مختلف و چسبندگی جدار نرم در خاک با تراکم نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد .....                | ۱۱۷ |
| شکل (۸-۴) نمودار بار-جابه جایی میکروپایل با شعاع تزریق مختلف و چسبندگی جدار زیر در خاک با تراکم نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد .....                | ۱۱۸ |

- شکل (۴-۹) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل ها در چسبندگی جدار نرم و شعاع های تزریق مختلف در تراکم های نسبی مختلف..... ۱۲۰
- شکل (۴-۱۰) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل ها در چسبندگی جدار زبر و شعاع های تزریق مختلف در تراکم های نسبی مختلف..... ۱۲۰
- شکل (۴-۱۱) نمودار بار-جابہ جایی میکروپایل با قطر و شعاع تزریق مختلف در خاک با تراکم نسبی ۴۵ درصد..... ۱۲۳
- شکل (۴-۱۲) نمودار بار-جابہ جایی میکروپایل با قطر و شعاع تزریق مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد..... ۱۲۳
- شکل (۴-۱۳) الف- نمودار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش ۸۵ درصدی شعاع تزریق، نسبت به تغییرات قطر میکروپایل در تراکم نسبی ۴۵ درصد..... ۱۲۴
- شکل (۴-۱۴) نمودار بار-جابہ جایی میکروپایل با قطر ۲ اینچ و شعاع تزریق های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد..... ۱۲۷
- شکل (۴-۱۵) نمودار بار-جابہ جایی میکروپایل با قطر ۳ اینچ و شعاع تزریق های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد..... ۱۲۷
- شکل (۴-۱۶) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل ها با قطر ۲ اینچ و شعاع های تزریق مختلف به ازای افزایش تراکم نسبی..... ۱۲۹
- شکل (۴-۱۷) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل ها با شعاع تزریق ۳ اینچ و شعاع های تزریق مختلف در تراکم های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد..... ۱۲۹
- شکل (۴-۱۸) نمودار بار-جابہ جایی میکروپایل با قطر و نحوه ی قرارگیری کوبشی و درجا در خاک با تراکم نسبی ۴۵ درصد..... ۱۳۲
- شکل (۴-۱۹) نمودار بار-جابہ جایی میکروپایل با قطر و نحوه ی قرارگیری کوبشی و درجا در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد..... ۱۳۲
- شکل (۴-۲۰) الف- نمودار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش ۱۰۰ درصدی قطر میکروپایل، نسبت به تغییرات وضعیت قرارگیری در حالت کوبش و درجا در تراکم نسبی ۴۵ درصد..... ۱۳۳
- شکل (۴-۲۱) نمودار بار-جابہ جایی میکروپایل در وضعیت قرارگیری درجا در قطرهای مختلف و تراکم های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد..... ۱۳۶
- شکل (۴-۲۲) نمودار بار-جابہ جایی میکروپایل در وضعیت قرارگیری کوبشی در قطرهای مختلف و تراکم های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد..... ۱۳۶

شکل (۴-۲۳) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل ها در حالت درجا و قطرهای مختلف به ازای  
افزایش تراکم نسبی ..... ۱۳۸

شکل (۴-۲۴) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل ها در حالت کوبشی و قطرهای مختلف به ازای  
افزایش تراکم نسبی ..... ۱۳۸



## فهرست جداول

|                                                                |                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| جدول (۱-۲)                                                     | جزئیات طبقه بندی ریزشمع (بر اساس روش اجرا)                                         | ۱۷  |
| جدول (۲-۲)                                                     | معرفی روش طراحی و روش اجرا برای هر یک از کاربردهای ریزشمع                          | ۱۸  |
| جدول (۳-۲)                                                     | مقادیر " $\alpha_{bond}$ " (مقاومت اسمی مجموعه خاک-دوغاب) برای طراحی اولیه ریزشمع  | ۳۰  |
| جدول (۴-۲)                                                     | مشخصات فنی آرماتور ساده استاندارد (آرماتور تقویت)                                  | ۳۲  |
| جدول (۵-۲)                                                     | تعداد آزمایش پیشنهاد شده در آیین نامه FHWA                                         | ۳۷  |
| جدول (۶-۲)                                                     | ظرفیتهای بار نهایی و جابه جایی های متناظر میکروپایل ها                             | ۴۸  |
| جدول (۷-۲)                                                     | نتایج آزمایش بارگذاری                                                              | ۵۴  |
| جدول (۸-۲)                                                     | لیستی از پژوهشگران و کارهای صورت گرفته در عرصه ی مدلسازی فیزیکی                    | ۶۸  |
| جدول (۱-۳)                                                     | اطلاعات دانه بندی نمونه اول، دوم و سوم (ماسه فیروزکوه)                             | ۷۴  |
| جدول (۲-۳)                                                     | جدول ارزیابی حداقل چگالی خاک ماسه                                                  | ۷۶  |
| جدول (۳-۳)                                                     | جدول ارزیابی حداکثر چگالی خاک ماسه                                                 | ۷۶  |
| جدول (۴-۳)                                                     | زاویه اصطکاک داخلی بدست آمده از آزمایش برش مستقیم                                  | ۸۰  |
| جدول (۵-۳)                                                     | مشخصات ماسه مورد استفاده (ماسه فیروزکوه)                                           | ۸۰  |
| جدول (۶-۳)                                                     | خصوصیات نمونه های فولادی میکروپایل                                                 | ۸۲  |
| جدول (۷-۳)                                                     | برنامه آزمایش ها به منظور بررسی اثر شعاع تزریق و چسبندگی جدار                      | ۱۰۳ |
| جدول (۸-۳)                                                     | برنامه آزمایش ها به منظور بررسی اثر شعاع تزریق و چسبندگی جدار                      | ۱۰۴ |
| جدول (۱-۴)                                                     | ظرفیت باربری های میکروپایل به ازای آلفای باند، شعاع تزریق و قطر میکروپایل در تراکم |     |
| نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد                                              |                                                                                    | ۱۱۲ |
| جدول (۲-۴)                                                     | میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل به ازای افزایش شعاع تزریق و چسبندگی جدار       |     |
| مختلف در تراکم های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد                           |                                                                                    | ۱۱۵ |
| جدول (۳-۴)                                                     | میزان ظرفیت باربری میکروپایل به ازای تغییرات چسبندگی جدار در شعاع های تزریق        |     |
| مختلف در تراکم های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد                           |                                                                                    | ۱۱۶ |
| جدول (۴-۴)                                                     | میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل ها (بر حسب درصد) در تراکم نسبی ۹۰ درصد به      |     |
| تراکم نسبی ۴۵ درصد به ازای چسبندگی جدار و شعاع های تزریق مختلف |                                                                                    | ۱۲۱ |
| جدول (۵-۴)                                                     | ظرفیت باربری میکروپایل به ازای شعاع تزریق و قطر در میکروپایل های نسبی ۴۵ و ۹۰      |     |
| درصد                                                           |                                                                                    | ۱۲۲ |
| جدول (۶-۴)                                                     | میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل به ازای افزایش شعاع تزریق و قطرهای مختلف در    |     |
| تراکم های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد                                    |                                                                                    | ۱۲۵ |

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| جدول (۷-۴) میزان ظرفیت باربری میکروپایل به ازای افزایش ۳۳ درصدی قطر در شعاع های تزریق    |     |
| مختلف در تراکم های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد .....                                               | ۱۲۶ |
| جدول (۸-۴) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل ها (بر حسب درصد) در تراکم نسبی ۹۰ درصد به |     |
| تراکم نسبی ۴۵ درصد به ازای قطر ها و شعاع های تزریق مختلف .....                           | ۱۳۰ |
| جدول (۹-۴) ظرفیت باربری میکروپایل ها در حالت کوبشی و درجا در تراکم های نسبی ۴۵ و ۹۰      |     |
| درصد .....                                                                               | ۱۳۱ |
| جدول (۱۰-۴) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل به ازای افزایش قطر میکروپایل و وضعیت     |     |
| قرارگیری در حالت درجا و کوبشی میکروپایل در تراکم های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد .....             | ۱۳۴ |
| جدول (۱۱-۴) ظرفیت باربری میکروپایل به ازای وضعیت قرارگیری میکروپایل در قطر های مختلف در  |     |
| تراکم های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد .....                                                        | ۱۳۵ |
| جدول (۱۲-۴) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل ها (بر حسب درصد) در تراکم نسبی ۹۰ درصد   |     |
| به تراکم نسبی ۴۵ درصد به ازای قطر های مختلف و وضعیت قرارگیری میکروپایل در حالت درجا و    |     |
| کوبشی .....                                                                              | ۱۳۹ |
| جدول (۱۳-۴) جدول نرمال سازی مقادیر پارامتر شعاع تزریق میکروپایل .....                    | ۱۳۹ |
| جدول (۱۴-۴) جدول نرمال سازی مقادیر پارامتر تراکم نسبی میکروپایل .....                    | ۱۴۰ |
| جدول (۱۵-۴) نمونه محاسبات رگرسیون خطی .....                                              | ۱۴۰ |
| جدول (۱۶-۴) نتایج رگرسیون های غیر خطی به ازای تراکم های ثابت .....                       | ۱۴۲ |
| جدول (۱۷-۴) مقایسه ی آلفای باند به دست آمده در آزمایشگاه با آیین نامه .....              | ۱۴۴ |

# فصل ۱:

## کلیات

## ۱-۱- تعریف مسئله

افزایش روزافزون جمعیت و رشد زیر ساخت‌ها در شهرها و کلان شهرها و مشکل کمبود زمین مناسب برای احداث سازه‌های مورد نیاز و همچنین افزایش ارزش اقتصادی زمین موجب شده است صنعت ساختمان سازی به دنبال زمین‌های ارزان برای احداث ساختمان باشد، در نتیجه انسان ناگزیر به استفاده از زمین‌هایی با کیفیت مهندسی پایین‌تر شده است. در چنین شرایطی برای احداث یک سازه مناسب باید به روش‌هایی شاخصه‌های مهندسی خاک نامناسب را ارتقا داده تا در برابر تنش‌های وارده عملکرد مناسبی داشته باشد.

با توجه به فلسفه روش‌های بهسازی خاک این روش‌ها به سه دسته تراکم، تسلیح، قرار دادن اجزای تقویتی درون توده خاک و تثبیت، افزودن مواد خارجی به خاک، تقسیم می‌شوند. میکروپایل‌ها به عنوان المان‌های تسلیح‌کننده خاک و داشتن نقش سازه‌ای جهت اصلاح خصوصیات خاک‌ها در طیف وسیعی از پروژه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. میکروپایل‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری، افزایش پایداری شیب‌ها و کاهش پتانسیل روانگرایی می‌شوند.

امروزه به منظور تثبیت و بهسازی زمین‌های سست و روانگرا و افزایش ظرفیت باربری در آن‌ها روش‌های بسیار گسترده و متنوعی پیشنهاد می‌شود. میکروپایل‌ها یکی از مناسب‌ترین و بهینه‌ترین روش‌ها برای بهسازی خاک می‌باشد که کاربرد آن به دلایلی نظیر افزایش سرعت عملیات اجرایی و کاهش هزینه‌ها، صرفه جویی 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 همچنین 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.

در خصوص استفاده از میکروپایل‌ها 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 شعاع تزریق و چسبندگی جدار (آلفای باند) 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 بر جای خاک تقسیم‌بندی می‌شوند، شکل (۱-۱) الی (۴-۱). 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 شعاع تزریق، چسبندگی جدار و تراکم به جهت همین کاربردهای وسیع و توسعه روز افزون ضروری به نظر می‌رسد.



شکل (۱-۱) ریزشمع‌های استفاده شده زیر تکیه گاه‌های پل نهر "ماهونینگ" در استان آرمسترانگ [۱]



شکل (۲-۱) تقویت پی پل بتنی خیابان امرسون غربی در سیاتل، واشینگتن [۱]



شکل (۳-۱) نصب و اجرای ریزشمع‌ها در ارتفاع سقف کم [۱]



شکل (۴-۱) پروژه FH-7، جنگل بین المللی مندونیکو واقع در کالیفرنیا (پایدارسازی شیروانی) [۱]

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 آزمایش‌ها می‌تواند صحت طراحی، 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 مسلح‌کننده 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.

### ۱-۳- اهداف تحقیق

هدف از این پژوهش ارزیابی اثر تغییرات چسبندگی جدار (آلفا باند) و شعاع تزریق بر ظرفیت باربری ریزشمع در خاک‌های دانه‌ای با تراکم‌های مختلف با استفاده از مدلسازی فیزیکی آزمایشگاهی می‌باشد که جهت دستیابی به این هدف و انجام در مقیاس نیمه واقعی تصمیم به ساخت دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس و سیستم بارش ماسه شده است.

اهداف این پژوهش به صورت موردی عبارتند از:

- طراحی و ساخت دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس و ارزیابی صحت عملکرد و نتایج دستگاه؛
- طراحی و ساخت سیستم بارش ماسه همراه با سیستم جرثقیل و ارزیابی عملکرد دستگاه؛
- ارائه‌ی خصوصیات میکروپایل‌ها و نیز مطالعات صورت گرفته در این زمینه؛
- انجام مطالعات آزمایشگاهی اولیه به منظور تعیین خصوصیات خاک مصرفی از جمله آزمایش دانه‌بندی، وزن مخصوص حادقل و حداکثر خاک و آزمایش برش مستقیم؛
- انجام آزمایش‌های مدلسازی فیزیکی و بررسی شعاعی تزریق و چسبندگی جدار (آلفای باند) میکروپایل‌ها در خاک‌های دانه‌ای با تراکم‌های نسبی مختلف؛



- انجام آزمایش‌های مدلسازی فیزیکی و بررسی اثر کوبش بر ظرفیت باربری میکروپایل‌ها در خاک‌های دانه‌ای با تراکم‌های نسبی مختلف؛
- بررسی اثر قطر لوله‌های میکروپایل بر ظرفیت باربری با استفاده از مدلسازی فیزیکی آزمایشگاهی؛
- بررسی میزان تاثیرگذاری پارامتر شعاع تزریق و تراکم میکروپایل بر روی ظرفیت باربری در چسبندگی‌های جدار مختلف خاک با استفاده از تحلیل نرم افزاری SPSS؛

## ۴-۱- روش انجام تحقیق

در این پژوهش و در مرحله نخست به منظور شبیه‌سازی شرایط کرنش مسطح و تامین شرایط مدلسازی فیزیکی با مقیاس نیمه واقعی، ایده‌ی یک دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس با قابلیت بارگذاری-های استاتیکی، دینامیکی و لرزه‌ای مطرح و بعد از طراحی‌های نرم‌افزاری و تامین اعتبار مالی ساخته شد، که پس از طراحی و ساخت دستگاه روند کالیبره کردن دستگاه چند ماه به طول انجامید. بعد از طی روندهای ذکر شده یکسری آزمایش‌های اولیه به منظور شناخت خصوصیات خاک مورد استفاده (ماسه فیروزکوه) انجام گرفت. این آزمایش‌های اولیه عبارتند از: آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس به منظور تعیین زاویه اصطکاک داخلی خاک در تراکم‌های مورد آزمایش در دستگاه مدلسازی، 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 با توجه به نیاز به انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی در زمینه مکانیک خاک، تهیه نمونه کاملاً همگن از نمونه‌های ماسه از موارد بسیار مهم از دیدگاه تکرارپذیری آزمایش و نیز زمان و انرژی لازم برای نمونه‌سازی می‌باشد، که ایده‌ی طراحی و ساخت سیستم بارش ماسه مطرح و ساخت آن 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 میکروپایل ها 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 طول ها 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 ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه، 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.

## ۱-۵- ساختار پایان‌نامه

پایان نامه پیش‌رو در پنج فصل تنظیم شده است که خلاصه مطالب ذکر شده در هر فصل به صورت زیر می‌باشند:

**فصل اول:** ارائه کلیات ضرورت انجام تحقیق، اهمیت موضوع و روش تحقیق پرداخته شده است.

**فصل دوم:** در این فصل به بررسی تاریخچه و ادبیات فنی موجود در زمینه‌ی دستگاه‌های مدلسازی ساخته شده، تحقیقات انجام شده و نتایج بدست آمده در مورد ریزشمع‌ها پرداخته شده است.

**فصل سوم:** در این فصل شرح کامل دستگاه‌های ساخته شده، خصوصیات مصالح مصرفی، چگونگی ساخت مدل در دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس و نحوه انجام آزمایش به طور کامل شرح داده شده است.

**فصل چهارم:** نتایج مربوط به آزمایش‌های انجام گرفته با دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس، نتایج بدست آمده با نرم افزار SPSS، تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده و صحت سنجی نتایج ارائه شده است.

**فصل پنجم:** در این فصل به جمع‌بندی نتایج تحقیقات انجام گرفته در این پژوهش پرداخته شده و در انتها نیز پیشنهادهایی جهت انجام تحقیقات بیشتر و جامع‌تر در بحث حاضر و دستگاه ساخته شده عنوان می‌گردد.



## **فصل ۲:**

### **مروری بر ادبیات فنی**

## ۲-۱- 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 شمع‌هایی 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. از آنجا که پایان نامه حاضر به بررسی شعاع تزریق و چسبندگی جدار در میکروپایل‌ها می‌پردازد، فصل پیش‌رو را با معرفی میکروپایل از جمله کاربردها، نحوه طراحی، نحوه‌ی اجرا و... شروع و در ادامه به بیان تحقیقات و مطالعاتی که توسط محققان در این زمینه صورت گرفته خواهیم پرداخت.

## 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 به اختصار بیان گردد.

### ۲-۲-۱- معرفی ریزشمع

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 راه‌حل‌های فوق دارای روش‌ها و مشخصات مربوط به خود می‌باشد که طی سالیان متمادی توسعه فراوانی یافته است. 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<sup>۱</sup> و شمع‌های جانشینی<sup>۲</sup> 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

تقسیم‌بندی ریزشمع‌ها بر اساس دو معیار صورت می‌گیرد:

الف) نحوه طراحی

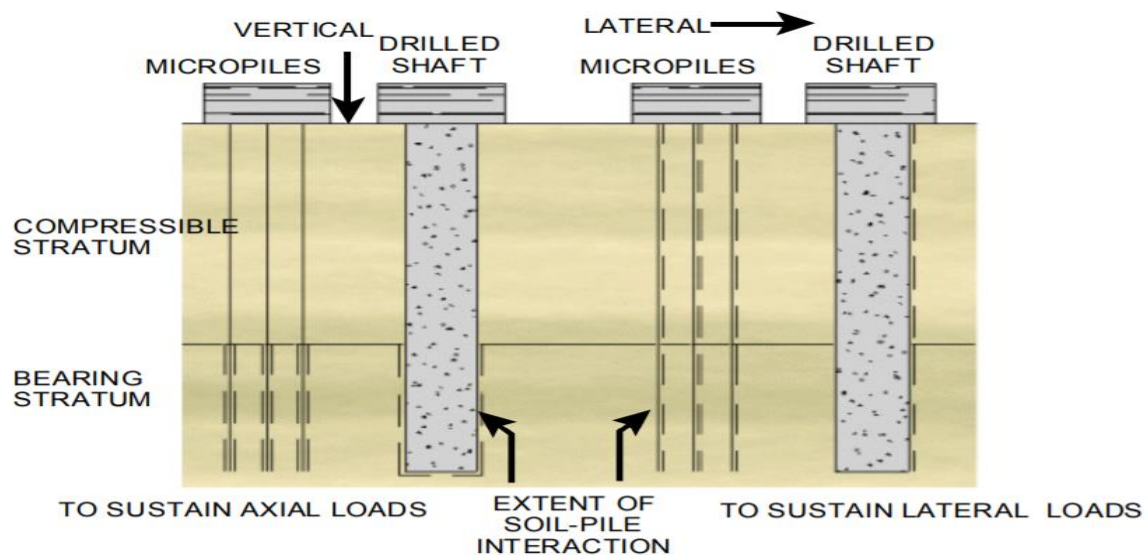
ب) روش اجرا

<sup>۱</sup> displacement

<sup>۲</sup> replacement

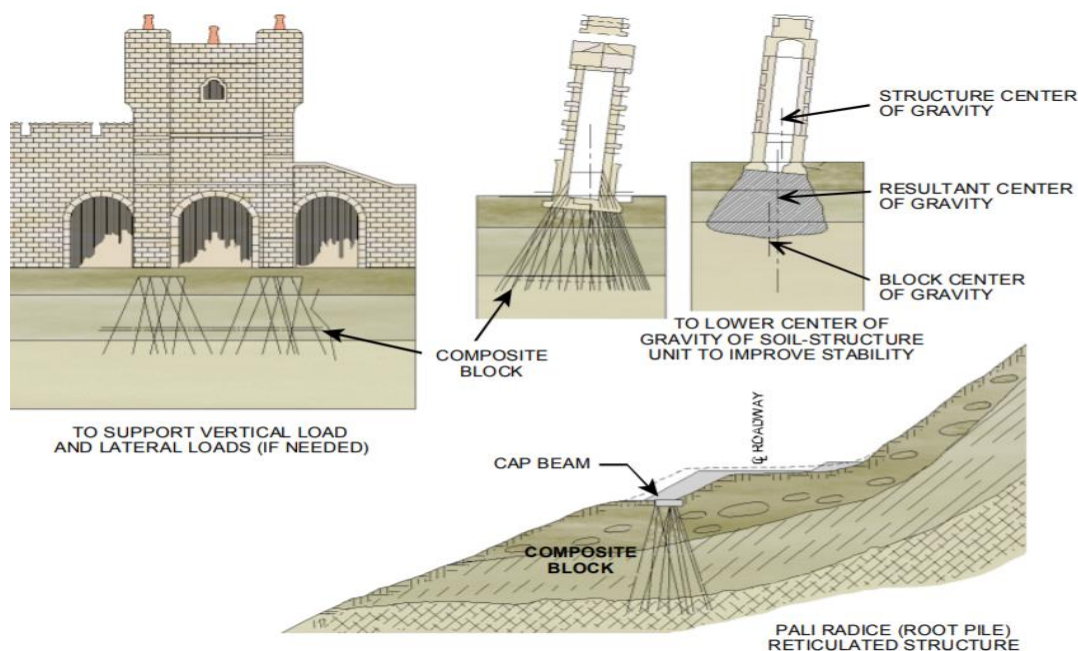
## ۲-۲-۱- طبقه‌بندی بر اساس نحوه‌ی طراحی

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 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 (۱-۲) و (۲-۲) نشان داده شده‌اند.



شکل (۱-۲) ریزشمع‌های دسته اول (بر اساس نحوه‌ی طراحی) [۱]





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

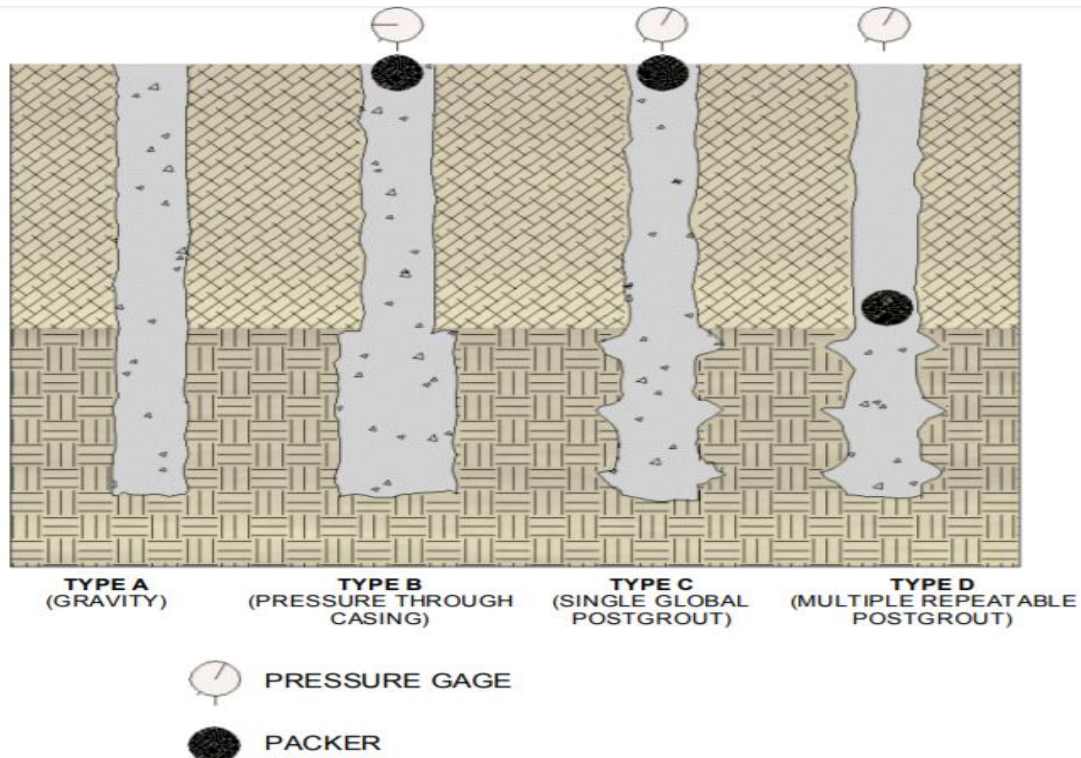
در دسته اول، ریزشمع‌ها به عنوان جایگزین شمع‌های سنتی برای انتقال بار سازه به لایه‌های مقاوم زیرین استفاده می‌شوند. این ریزشمع‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که عملکرد منفرد داشته باشند حتی اگر به صورت گروهی اجرا شوند. در دسته دوم، ریزشمع‌ها دارای تقویت سبک‌تر می‌باشند زیرا مسلح-کننده‌ها مانند دسته اول مستقیماً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

## ۲-۲-۲-۲- 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<sup>۱</sup> و آرماتور تقویت، تعیین‌کننده زیربخش‌های این طبقه‌بندی می‌باشد.

<sup>۱</sup> Casing

همان گونه که در شکل (۳-۲) نشان داده شده است، در این طبقه‌بندی ریزشمع‌ها به ۴ دسته تقسیم می‌شوند.



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<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> موسوم است، به طور گسترده در سایر کشورها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. جدول (۱-۲)

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 <sub>1</sub> | موقت یا بدون پوشش        | بدون تقویت، تک آرماتور، قفسه آرماتور، لوله یا مقطع سازه‌ای                         |
|                           | A <sub>2</sub> | دائم در کل طول گمانه     | خود غلاف حفاری                                                                     |
|                           | A <sub>3</sub> | دائم، استوانه فوقانی فقط | غلاف حفاری در قسمت فوقانی و آرماتور یا لوله در قسمت زیرین                          |
| نوع B                     | B <sub>1</sub> | موقت یا بدون پوشش        | تک آرماتور یا لوله (از قفسه به دلیل ظرفیت سازه‌ای پایین آن به ندرت استفاده می‌شود) |
|                           | B <sub>2</sub> | دائم در کل طول گمانه     | خود غلاف حفاری                                                                     |
|                           | B <sub>3</sub> | دائم، فقط در قسمت فوقانی | غلاف حفاری در قسمت فوقانی و آرماتور یا لوله در قسمت زیرین                          |

<sup>۱</sup> Injection Global et Unitaire

<sup>۲</sup> Injection Répétitive et Sélective

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

## ۲-۳- کاربردهای ریزشمع

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

جدول (۲-۳) معرفی روش طراحی و روش اجرا برای هر یک از کاربردهای ریزشمع [۱]

| کاربرد    | تقویت پی سازه‌ها      | اصلاح و بهسازی خاک                         |                             |           |                     |
|-----------|-----------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|-----------|---------------------|
|           |                       | پایداری شیب‌ها و ساخت دیواره‌های نگهدارنده | 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 | نوع A و نوع B در خاک                       | نوع A و نوع B               | نوع A در  | نوع A در            |

| خاک | خاک | در خاک | و نوع B, C و D در خاک | میزان کاربرد |
|-----|-----|--------|-----------------------|--------------|
|     |     |        | ۰ تا ۵ درصد           | ۹۵ درصد      |

## ۲-۲-۴- 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.

### ۲-۲-۴-۱- 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 دور افتاده حرکت کنند. همچنین عملیات حفاری و تزریق مرتبط با نصب ریزشمع‌ها اگر به شیوه صحیح اجرا گردد، باعث آسیب به ساختمان‌های مجاور نمی‌شود.

### ۲-۲-۴-۲- شرایط زیرسطحی

ریزشمع‌ها می‌توانند در نواحی با شرایط زمین شناسی 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 تاثیر را بر روی نصب ریزشمع دارند. ریزشمع‌ها در سرتاسر جهان در سازندهای آهکی کارستی کاربرد دارند.

## ۲-۲-۳- 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 (لجن‌زار) 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.

## ۲-۴-۴-۲- 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 مورد نیاز 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.

## ۲-۴-۵- 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 ابزاربندی و پایش شوند.

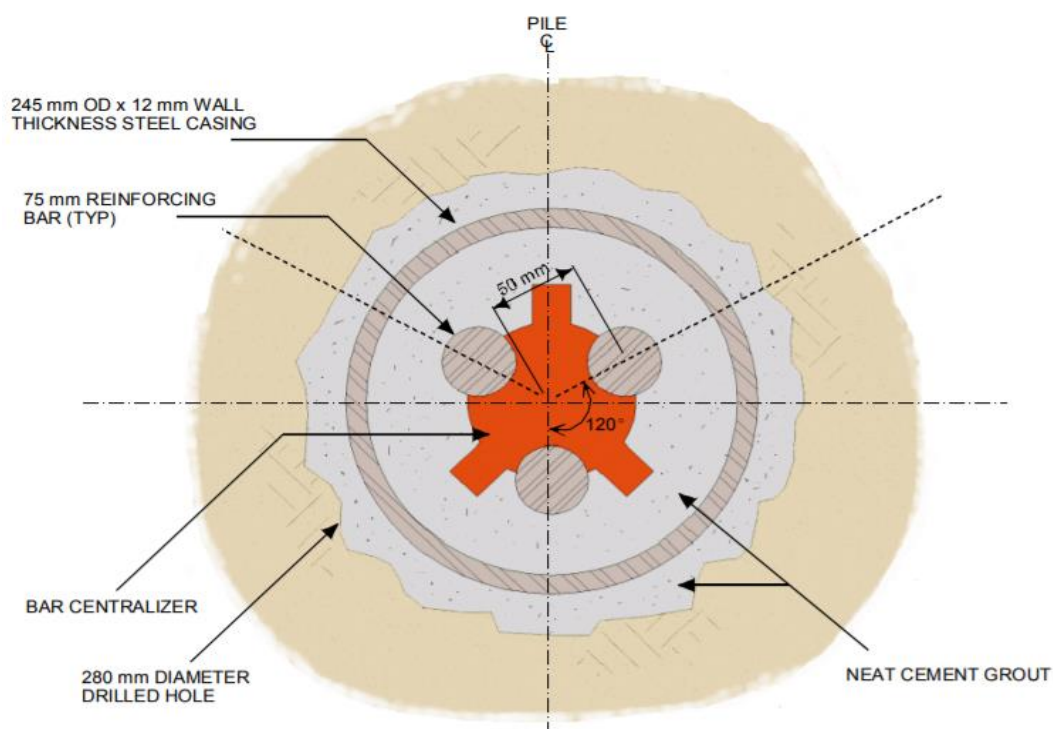
## ۲-۲-۴-۶- شرایط اقتصادی

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 نصب شمع، انجام گردد. این هزینه‌ها ممکن است شامل مواردی همچون نیازمندی‌های 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.

## ۲-۲-۵- 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.



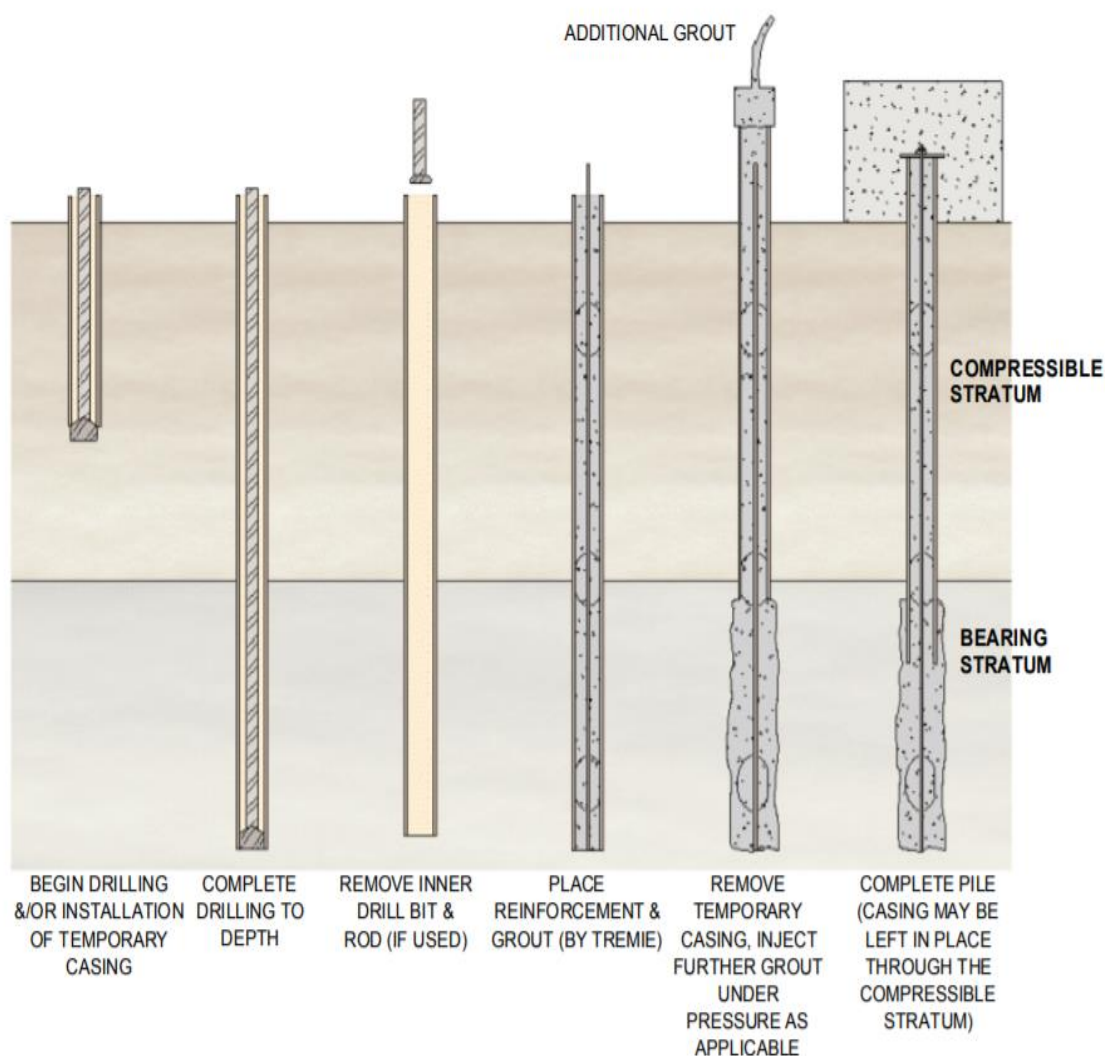


شکل (۴-۲) اجزای ریزشمع [۱]

همان گونه که در شکل نیز مشاهده می شود، اجزای اصلی ریزشمع ها عبارتند از: آرماتور تقویت، دوغاب 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 (۵-۲) مراحل اجرای ریزشمع به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل (۵-۲) مراحل اجرای ریزشمع [۱]

## ۲-۲-۶-۱- 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.

## ۲-۲-۶-۲- لوله کوبی

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 لوله‌کوب، 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.

## ۲-۲-۶-۳- 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<sup>۱</sup> 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

<sup>۱</sup> circulation

دوغاب سیمان بایستی تحت فشار زیاد در لایه‌های خاک نفوذ کند، جهت تزریق دوغاب سیمان از یک‌سری شیلنگ دو جداره به نام پکر<sup>۱</sup> 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 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 سر چاهی 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.

## ۲-۲-۶-۴- 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.

<sup>۱</sup> packer

## 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.

## ۷-۲-۲-۱- 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.

## ۷-۲-۲-۲- 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.

## ۷-۲-۳- آیین‌نامه طراحی

طراحی ریزشمع بر اساس آیین‌نامه طراحی اداره بزرگراه‌های آمریکا<sup>۱</sup> انجام می‌گیرد. [۱]

<sup>۱</sup> Federal Highway Administration

## ۲-۲-۴- روش‌های طراحی

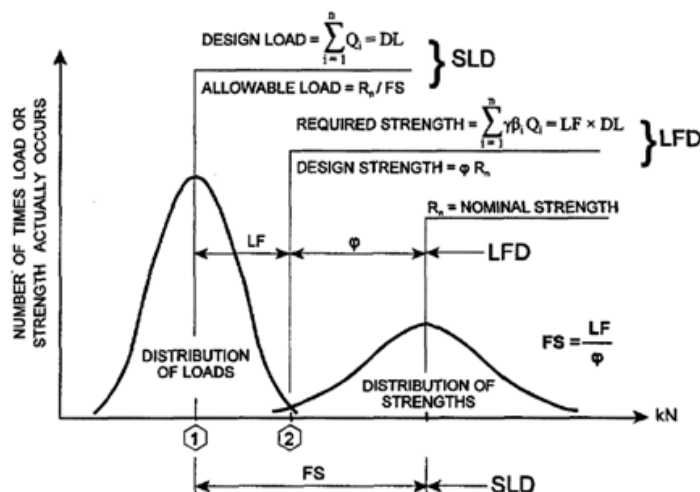
- روش طراحی بار مجاز<sup>۱</sup> (SLD) یا تنش مجاز

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<sup>۲</sup> (LFD)

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.

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 (۲-۶) خلاصه‌ای از روش‌های طراحی و مقایسه آن‌ها ارائه شده است.



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

<sup>1</sup> Service Load Design Method

<sup>2</sup> Load Factor Design Method

## ۲-۷-۵- طراحی ژئوتکنیکی

به دلیل عوامل زیر ممولا در طراحی‌ها فرض می‌شود که بار ریزشمع‌ها بدون هیچ‌گونه مشارکتی ظرفیت باربری نوک و صرفاً از طریق اصطکاک جلدی بین خاک-دوغاب به زمین انتقال می‌یابد:

- ظرفیت بالای مجموعه خاک-دوغاب که می‌تواند با اجرای متوالی مراحل ساخت ریز شمع به دست آید. این ظرفیت برای ریزشمع‌های با قطر معمول ناحیه پیوند (۱۵۰-۳۰۰ میلی‌متر)، در خاک‌های دانه‌ای متراکم به مقدار نهایی فراتر از ۳۶۵ کیلونیوتن بر هر متر از طول پیوند و در سنگ‌های مستحکم فراتر از ۷۵۰ کیلونیوتن بر هر متر طول پیوند می‌رسد.
- سطح جانبی (اصطکاک جلدی) به طور قابل توجهی بیشتر از مساحت انتهای ریزشمع می‌باشد. برای شمعی با قطر ۲۰۰ میلی‌متر و طول ۶ متر، سطح جانبی ۱۲۰ برابر بیشتر از سطح مقطع انتهای شمع می‌باشد.
- حرکت مورد نیاز شمع جهت بسیج مقاومت اصطکاکی به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مقدار مشابه برای بسیج مقاومت انتهایی شمع می‌باشد.

وابستگی شمع‌ها به اصطکاک جلدی به لحاظ ژئوتکنیکی در کشش و فشار یکسان در نظر گرفته می‌شود. این یک فرض طراحی رایج در تعیین طول پیوند، در یک شمع فشاری-کششی می‌باشد.

## ۲-۷-۶- مقادیر $\alpha_{bond}$ برای مجموعه خاک و دوغاب

جدول (۳-۲) زیر رهنمودهای ارزیابی مقادیر مقاومت اسمی (نهایی) مجموعه خاک-دوغاب را ارائه می‌کند. این جدول شامل مقادیری برای ۴ روش تزریق شمع‌ها (نوع A، نوع B، نوع C و نوع D) تحت شرایط زمینی مختلف می‌باشد. مقادیر مقاومت اسمی خاک-دوغاب عموماً مبتنی بر تجارب پیمانکاران و

مهندسين ژئوتكنيكي است. جدول زیر محدوده‌ای از مقادير معمول مقاومت اسمي را برای روش‌های مختلف اجرا و شرایط زميني متفاوت، ارائه می‌کند.

جدول (۲-۳) مقادير " $\alpha_{bond}$ " (مقاومت اسمي مجموعه خاک-دوغاب) برای طراحی اولیه ریزشمع [۱]

| محدوده مقاومت اسمي مجموعه خاک-دوغاب (کیلوپاسکال) |         |         |           | تشریح سنگ/خاک                                                   |
|--------------------------------------------------|---------|---------|-----------|-----------------------------------------------------------------|
| نوع D                                            | نوع C   | نوع B   | نوع A     |                                                                 |
| ۵۰-۱۴۵                                           | ۵۰-۱۲۰  | ۳۵-۹۵   | ۳۵-۷۰     | سیلت و رس (مقداری ماسه)<br>(نرم، حد پلاستیک متوسط)              |
| ۹۵-۱۹۰                                           | ۹۵-۱۹۰  | ۷۰-۱۹۰  | ۵۰-۱۲۰    | سیلت و رس (مقداری ماسه)<br>(سفت، متراکم تا خیلی متراکم)         |
| ۹۵-۲۴۰                                           | ۹۵-۱۹۰  | ۷۰-۱۹۰  | ۷۰-۱۴۵    | ماسه (مقداری سیلت)<br>(نرم، سست-متراکم متوسط)                   |
| ۱۴۵-۳۸۵                                          | ۱۴۵-۳۶۰ | ۱۲۰-۳۶۰ | ۹۵-۲۱۵    | ماسه (مقداری سیلت و شن)<br>(نرم-تیز گوشه، متوسط-خیلی متراکم)    |
| ۱۴۵-۳۸۵                                          | ۱۴۵-۳۶۰ | ۱۲۰-۳۶۰ | ۹۵-۲۶۵    | شن (مقداری ماسه)<br>(متوسط-خیلی متراکم)                         |
| ۱۲۰-۳۳۵                                          | ۱۲۰-۳۱۰ | ۹۵-۳۱۰  | ۹۵-۱۹۰    | تیل‌های یخچالی (سیلت، ماسه و شن)<br>(متوسط-خیلی متراکم، سیمانه) |
| -                                                | -       | -       | ۲۰۵-۵۵۰   | شیل‌های نرم<br>(ترک خوردگی کم، متوسط، کمی هوازده)               |
| -                                                | -       | -       | ۵۱۵-۱۳۸۰  | شیل‌های سخت و تخته سنگ<br>(ترک خوردگی کم-متوسط، کمی هوازده)     |
| -                                                | -       | -       | ۱۰۳۵-۲۰۷۰ | سنگ آهک<br>(ترک خوردگی کم-متوسط، کمی هوازده)                    |
| -                                                | -       | -       | ۵۲۰-۱۷۲۵  | ماسه سنگ<br>(ترک خوردگی کم-متوسط، کمی هوازده)                   |
| -                                                | -       | -       | ۱۳۸۰-۲۴۰۰ | گرانیت و بازالت<br>(ترک خوردگی کم-متوسط، کمی هوازده)            |

نوع A- فقط تزریق وزنی

نوع B- تزریق فشاری از میان غلاف در حین بیرون کشیدن غلاف

نوع C- ابتدا تزریق ثقلی، سپس تزریق تک مرحله‌ای دوغاب ثانویه تحت فشار

نوع D- ابتدا تزریق ثقلی، سپس تزریق یک یا چند مرحله‌ای دوغاب ثانویه تحت فشار



## ۲-۷-۲- بارهای محوری کششی و فشاری مجاز برای طول پیوند ژئوتکنیکی

بارهای محوری کششی و فشاری مجاز برای طول پیوند ژئوتکنیکی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$P_{G-allowable} = \frac{\alpha_{bond}}{F.S.} \times \pi \times D_b \times L_b \quad (۱)$$

$P_{G-allowable}$  = بار محوری مجاز طول پیوند ژئوتکنیکی؛

$\alpha_{bond}$  = مقاومت ژئوتکنیکی مجموعه خاک-دوغاب؛

$L_b$  = طول غوطه‌وری و  $D_b$  = قطر ناحیه پیوند خاک دوغاب می‌باشد.

برای ترکیب بارهای غیر لرزه‌ای (در خاک یا سنگ)، از  $F.S. = ۲/۵$  استفاده نمایند.

## ۲-۸-۲- مشخصات فنی اجرای ریزشمع

در ادامه مشخصات فنی حفاری، لوله‌های ریزشمع، آرماتورهای تقویت و تزریق شرح داده خواهد شد.

### ۲-۸-۲-۱- 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.

### ۲-۸-۲-۲- 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

میلی متر، در هر متر طول می باشد. محیط داخلی لوله ها بایستی برقوزده باشد تا در تزریق دوغاب اثرات منفی نداشته باشد.

## ۲-۸-۳-۲- مشخصات فنی آرماتور تقویت

فولاد مسلح کننده که در ریزشمع ها استفاده می شود، در یکی از ۴ دسته ذیل قرار می گیرد.

### ۱. آرماتورهای استاندارد<sup>۱</sup>

آرماتور استاندارد با مقاومت تسلیم ۴۲۰ تا ۵۲۰ مگاپاسکال و قطر ۲۵ تا ۶۳ میلی متر که مشخصات فنی این آرماتورها در جدول (۴-۲) ذیل آمده است. از این آرماتورها به صورت تکی یا گروهی استفاده می شود. در صورت به کارگیری بیش از یک آرماتور، بایستی برای جداکردن آن ها از سنترالایزر استفاده نمود.

جدول (۴-۲) مشخصات فنی آرماتور ساده استاندارد (آرماتور تقویت) [۱]

| نوع فولاد            | اندازه میلگرد (میلی متر) | مساحت (میلی متر مربع) | تنش تسلیم (کیلو نیوتون) |
|----------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|
| نوع ۴۲۰ <sup>۱</sup> | ۱۹                       | ۲۸۴                   | ۱۱۷                     |
|                      | ۲۲                       | ۳۸۷                   | ۱۶۰                     |
|                      | ۲۵                       | ۵۱۰                   | ۲۱۱                     |
| نوع ۵۲۰ <sup>۲</sup> | ۱۹                       | ۲۸۴                   | ۱۴۷                     |
|                      | ۲۲                       | ۳۸۷                   | ۲۰۰                     |
|                      | ۲۵                       | ۵۱۰                   | ۲۶۴                     |
|                      | ۲۹                       | ۶۴۵                   | ۳۳۴                     |
|                      | ۳۲                       | ۸۱۹                   | ۴۲۴                     |
|                      | ۳۶                       | ۱۰۰۶                  | ۵۲۰                     |
|                      | ۴۳                       | ۱۴۵۲                  | ۷۵۱                     |
|                      | ۵۷                       | ۲۵۸۱                  | ۱۳۳۵                    |
| نوع ۵۵۰ <sup>۳</sup> | ۶۳                       | ۳۱۶۸                  | ۱۷۴۷                    |

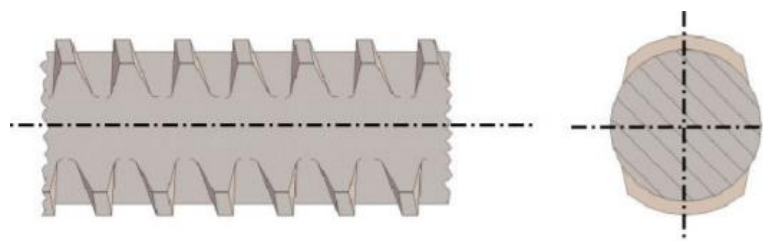
<sup>۱</sup> Concrete Reinforcing Steel Bars (rebar)

نکته:

- ۱- فولاد نوع ۴۲۰ دارای تنش تسلیم  $f_y=420$  Mpa و مقاومت کششی نهایی  $f_u=620$  Mpa
- ۲- فولاد نوع ۵۲۰ دارای تنش تسلیم  $f_y=520$  Mpa و مقاومت کششی نهایی  $f_u=690$  Mpa
- ۳- فولاد نوع ۵۵۰ دارای تنش تسلیم  $f_y=550$  Mpa و مقاومت کششی نهایی  $f_u=700$  Mpa

## ۲. آرماتورهای عاج دار<sup>۱</sup>

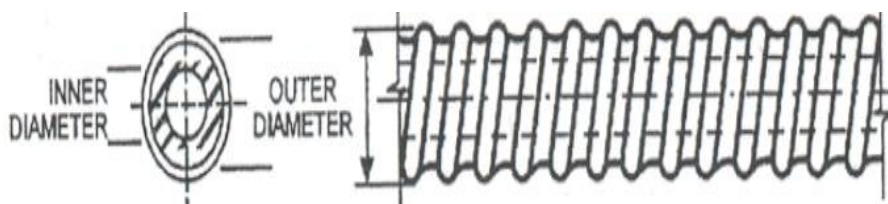
آرماتورهای عاج دار به طور گسترده برای تقویت در سیستم ریزشمع استفاده می شوند. این آرماتورها با مقاومت تسلیم ۴۲۰، ۵۲۰ و ۵۵۰ مگاپاسکال دارای قطر ۱۹ تا ۶۳ میلی متر بوده و بایستی دارای مشخصات فنی مطابق با استاندارد ASTM A615/AASHTO M31 باشد. شکل (۷-۲)



شکل (۷-۲) آرماتور عاجدار (آرماتور تقویت) [1]

## ۳. آرماتورهای عاج دار توخالی<sup>۲</sup>

تو خالی بودن این آرماتورهای عاج دار این امکان را فراهم می آورد که بتوان در حفاری گمانه ریزشمع از آن استفاده نمود. شکل (۸-۲)



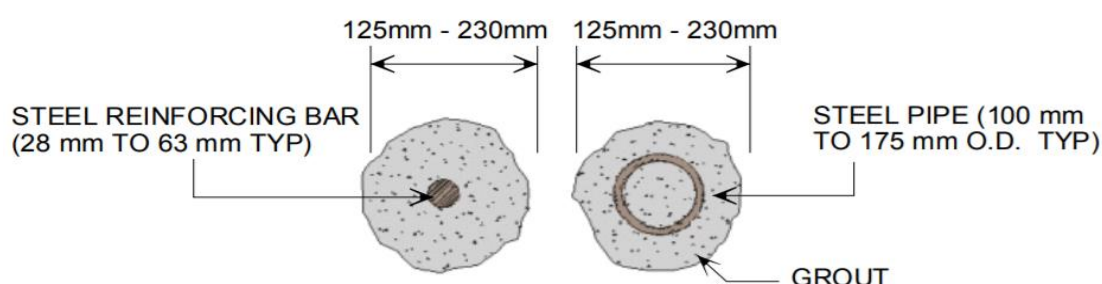
شکل (۸-۲) آرماتور عاجدار توخالی (آرماتور تقویت) [1]

<sup>1</sup> Continuous-Thread Steel Bars

<sup>2</sup> Continuous-Thread Hollow –core Steel Bars

#### ۴. لوله‌های فولادی<sup>۱</sup>

از 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 ۲۴۱ مگاپاسکال می‌باشد. مشخصات فنی این مسلح‌کننده‌ها بایستی مطابق استاندارد ASTM A53, A519, A252, A106 باشد. شکل (۹-۲)



شکل (۹-۲) مقطع لوله‌های فولادی (آرماتور تقویت)[1]

#### ۲-۸-۴-۲- مشخصات فنی تزریق

در ادامه خصوصیات مصالح و فشار تزریق شرح داده خواهد شد.

##### ۱. فشار تزریق

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

##### ۲. مقدار سیمان مصرفی

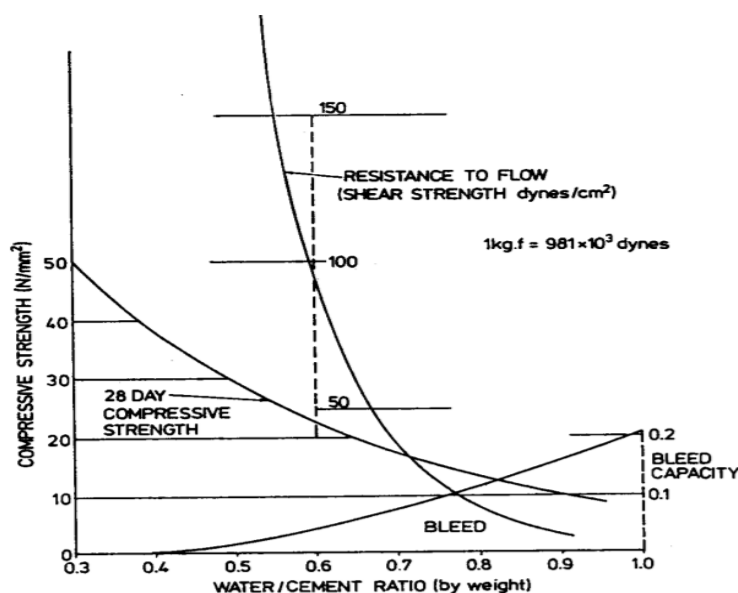
باتوجه به شرایط ژئوتکنیکی و میزان باربری طراحی ریزشمع‌ها، مقدار سیمان برآوردی معادل هر متر طول ریزشمع می‌تواند تا ۱۰۰ کیلوگرم باشد. البته با توجه به این امر که باید تزریق تا فشار ۱۰ اتمسفر

<sup>۱</sup> Steel Pipe Casing

ادامه یابد، ممکن است مقدار سیمان از برآورد اولیه بیشتر گردد. البته مقدار سیمان مصرفی در خاک‌های مختلف با هم متفاوت بوده و رابطه مستقیم با ابعاد دانه‌ها، تراکم، شرایط آب زیرزمینی و... دارد.

### ۳. نسبت آب به سیمان دوغاب تزریق

نسبت آب به سیمان در دوغاب تزریق مورد استفاده،  $0/4$  تا  $0/5$  توصیه می‌شود. اما با توجه به شرایط اجرا می‌تواند بین  $0/5$  تا  $1/5$  نیز متغیر باشد. شکل زیر تاثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری دوغاب را نشان می‌دهد. شکل (۱۰-۲)



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 به کار 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  $0/2$  درصد، مواد محلول کمتر از  $3/5$  درصد، کلر کمتر از  $1$  درصد، درصد سولفات کمتر از  $0/3$  و درصد قلیایی کمتر از  $0/06$  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 جابه‌جایی 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:

## ۹-۲-۲-۱- آزمایش نهایی<sup>۱</sup>

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

<sup>۱</sup> Ultimate Test

## ۲-۹-۲-۲-۲ آزمایش تأیید<sup>۱</sup>

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  $2/5$  در نظر گرفته شده باشد، بار آزمایش  $250$  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 مختلف خاک و روش‌های متفاوت اجرا انجام می‌شود. تعداد این آزمایش مطابق جدول (۲-۵) ذیل تعیین می‌گردد.

جدول (۲-۵) تعداد آزمایش پیشنهاد شده در آیین نامه FHWA [۱]

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

## ۲-۹-۲-۳-۲ آزمایش اثبات<sup>۲</sup>

این آزمایش معمولاً بر روی درصدی از ریزشمع‌ها (حدود ۵٪) انجام می‌شود. این آزمایش به صورت افزایش بار مرحله ای تا رسیدن به درصدی از بار طراحی، (توصیه آیین نامه ۱۶۷ درصد) انجام می‌شود.

<sup>1</sup> Verification Test

<sup>2</sup> Proof Test

با استفاده از این آزمایش، توانایی ریزشمع در تحمل بارهای سرویس بدون تغییر مکان های زیاد کنترل می گردد.

## ۲-۲-۹-۴- آزمایش خزش<sup>۱</sup>

این آزمایش معمولاً در ضمن سه آزمایش قبلی (نهایی، تأیید و اثبات) انجام می شود. آزمایش خزش شامل اندازه گیری میزان جابجایی، در بار ثابت و در فواصل زمانی مشخص است. حداکثر تغییر مکان حدود ۲ میلیمتر در هر مرحله زمانی، معیار پذیرش محسوب می شود. هدف از انجام این آزمایش بررسی ایمنی سیستم در مقابل بارهای طراحی در زمان بهره برداری است.

## ۲-۲-۱۰- مقایسه اجرای ریزشمع با سایر روش های تحکیم

ریزشمع در مقایسه با سایر روش های بهسازی خاک دارای ویژگی های بارزی می باشد که در ذیل به صورت فهرستوار به آن ها اشاره می گردد.

## ۲-۲-۱۰-۱- بعد فنی

ریزشمع از یکسو با دارا بودن عناصر تقویت شامل غلاف ضخیم فولادی و آرماتور تقویت، قابلیت انتقال و پخش بار به لایه های مقاوم زیرین و نیز کنترل نشست به دلیل سختی بالای فولاد و تقویت عمقی خاک را دارا می باشد. از سوی دیگر به دلیل تزریق دوغاب سیمان، مشخصات مکانیکی خاک، نظیر سختی، تراکم پذیری، ظرفیت باربری، زاویه اصطکاک و چسبندگی را نیز بهبود می بخشد. لذا ریزشمع

---

<sup>1</sup> Creep Test



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.

## ۲-۱۰-۲- 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 جابه‌جایی 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.

## ۲-۲-۱۰-۳- 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.

## ۲-۲-۱۰-۴- 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.

## ۲-۱۰-۵- 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.

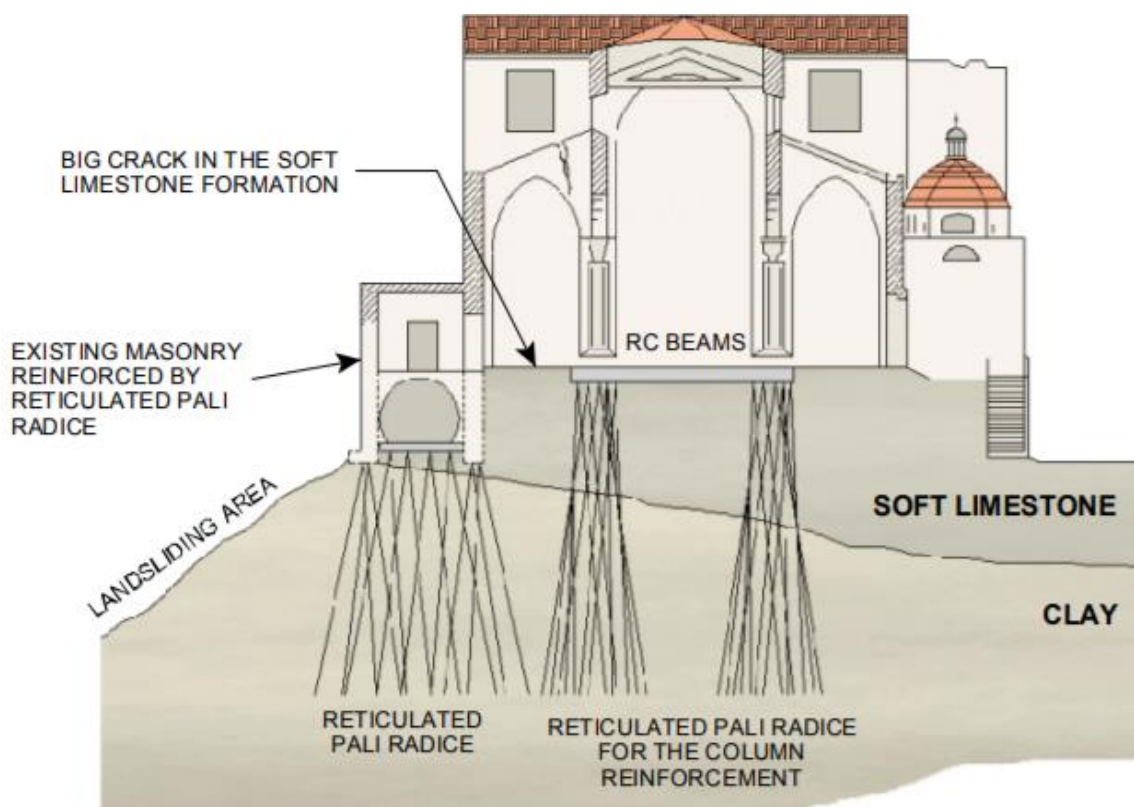
## ۲-۳-۱- تاریخچه مختصر میکروپایل‌ها

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<sup>۱</sup> اولین بار شمع‌های ریشه‌ای<sup>۲</sup> 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.

<sup>۱</sup> Fondedile

<sup>۲</sup> palo radice

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<sup>۱</sup> گردید. این سیستم همان گونه که در شکل (۲-۱۱) 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 شهری آلمان مورد استفاده قرار گرفت که پس از آن اصطلاح ریزشمع<sup>۲</sup> جایگزین نام شمع ریشه‌ای گردید.



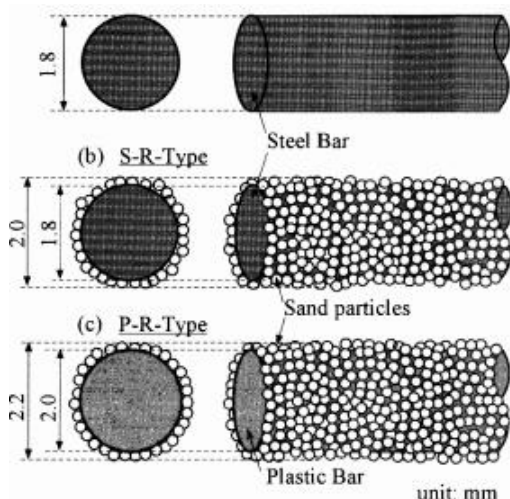
شکل (۲-۱۱) سیستم ریز شمع زنبوری (تاریخچه‌ی مختصر میکروپایل‌ها) [۱]

<sup>۱</sup> Reticulated Micropile

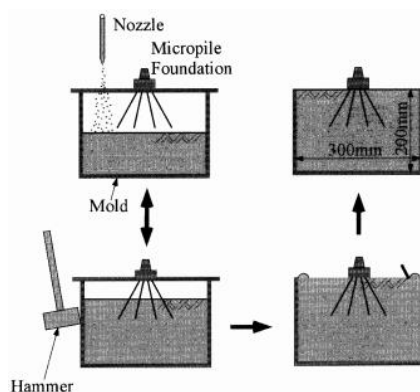
<sup>۲</sup> micropile

## ۲-۳-۲ مطالعات آزمایشگاهی

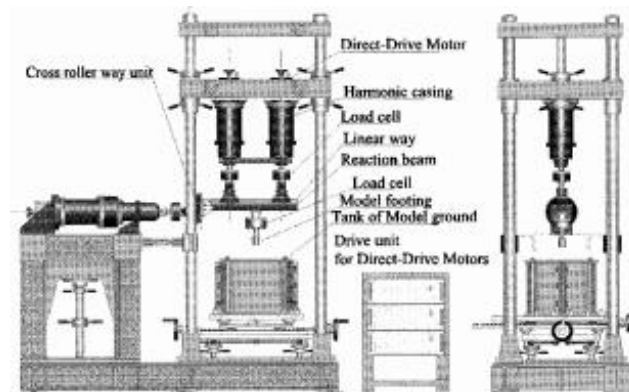
تسوکادا و همکاران در سال ۲۰۰۶ آزمایش‌های را بر روی پی منفرد مسلح شده با میکروپایل انجام دادند. مصالح مورد استفاده تعدادی میله به طول ۱۰ سانتی‌متر، یک کلاهک به ابعاد ۴ سانتی‌متر مقدار ماسه، شن و چسب. تسوکادا و همکارانش همانند شکل (۲-۱۲) برای ایجاد چسبندگی جدار مختلف دانه‌های شن و ماسه را با چسب به میله‌ها چسباندن و داخل استوانه‌ای به قطر ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر قرار دادند شکل (۲-۱۳) و همانند شکل (۲-۱۴) برای بارگذاری جعبه را در زیر دستگاه مد نظر قرار دادند. [۲]



شکل (۲-۱۲) نمونه‌های ساخته شده توسط تسوکادا و همکارانش [۲]

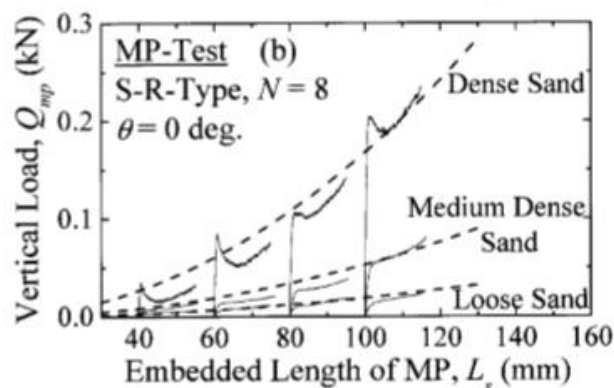


شکل (۲-۱۳) نمونه سازی در داخل جعبه توسط تسوکادا و همکارانش [۲]



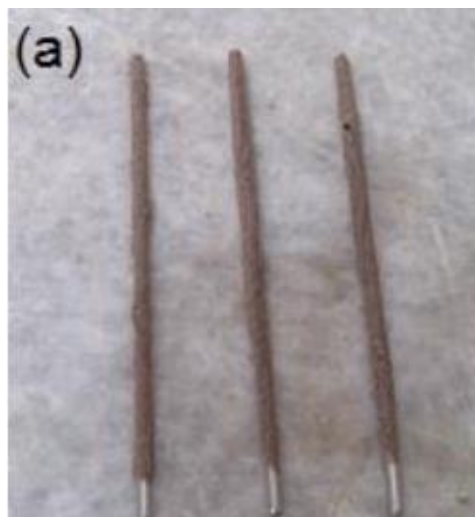
شکل (۲-۱۴) دستگاه مورد استفاده جهت بارگذاری [۲]

در پایان اثر قابل توجهی در ظرفیت باربری در اثر افزایش تراکم مشاهده کردند و همچنین مشاهده کردن که در اثر افزایش زبری چسبندگی جدار ظرفیت باربری افزایش می‌یابد [۲]. شکل (۲-۱۵)



شکل (۲-۱۵) نمودار تاثیر تراکم‌های نسبی مختلف خاک در میزان ظرفیت باربری [۲]

ایران منش و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۵ در یک برنامه آزمایشگاهی به بررسی تعداد، طول، فاصله، زاویه، چیدمان و زبری سطحی میکروپایل‌ها پرداختند. جهت نمونه سازی از میله‌های به قطر ۳ میلی‌متر و طول‌های مختلف استفاده شده است که به یک کلاهک پلاستیکی فشرده چسبانده شده است. همچنین جهت بررسی زبری دانه‌های ماسه را با چسب به میل‌ها چسبانده شده است، شکل (۲-۱۶). همچنین جهت بارگذاری از دستگاه مارشال استفاده شده است. شکل (۲-۱۷)



شکل (۲-۱۶) نمونه‌های ساخته شده توسط ایرامنش جهت بررسی چسبندگی جدار



شکل (۲-۱۷) دستگاه استفاده شده توسط ایرامنش جهت بارگذاری

در این تحقیق مشاهده شد که ایجاد زبری سطحی بر روی میکروپایل‌ها، تاثیر چشمگیری در بهبود ظرفیت باربر دارد به گونه‌ای که در تراکم‌های نسبی پایین باعث افزایش ۳۰ درصدی ظرفیت باربری می‌شود. که این تاثیر به دلیل افزایش اصطکاک بین میکروپایل و خاک به وجود آمده است.

لور و بوکمن<sup>۱</sup> (۲۰۰۵)، در موضوع فرآیند انتقال بار توسط اعضای تسلیح‌کننده، تاثیر آرایش هندسی بر انتقال بار، تاثیرات شبکه میکروپایل‌ها و برهم کنش میان خاک و اعضای فولادی، مطالعاتی را با استفاده از مدل فیزیکی با مقیاس بزرگ انجام دادند. مدلسازی آن‌ها برای بررسی تاثیر میکروپایل‌ها بر روی تثبیت شیب شیروانی‌ها بود. آن‌ها در نهایت، نمودارهای فاکتور ضریب اطمینان بر حسب جابه‌جایی شیب، جابه‌جایی-زمان، فشار-زمان و ممان ایجاد شده در هر فاصله از انتهای میکروپایل را ارائه کردند [۳]. شکل (۲-۱۸)



شکل (۲-۱۸) مدل فیزیکی شیروانی برای تثبیت با میکروپایل [۳]

## ۲-۳-۳- مطالعات میدانی

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

<sup>۱</sup> Loer, Boeckmann (2005)



## ۲-۳-۱- آزمایش‌های میدانی بارگذاری محوری

در اولین مورد مطالعاتی، گرونک و همکاران<sup>۱</sup> (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 [۴].

روسو<sup>۲</sup> (۲۰۰۴) دو آزمایش بارگذاری تمام مقیاس بر روی میکروپایل‌های ابزاربندی شده از نوع C پس تزریق شده انجام داد. او همچنین یک تکنیک ابداعی برای نصب گیج‌های کرنش را استفاده نمود. نتایج بارگذاری‌ها نشان‌دهنده‌ی این بود که رویه‌های مختلف نصب تاثیر قابل توجهی در عملکرد و ظرفیت باربری میکروپایل‌ها دارد [۵].

هان و یه<sup>۳</sup> (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 شانگ‌های چین نصب گردیدند. میکروپایل‌ها توسط گیج‌های کرنش سنج به منظور بررسی مکانیزم انتقال بار ابزاربندی گردیدند. مطابق جدول (۲-۶) 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

<sup>1</sup> Gronck

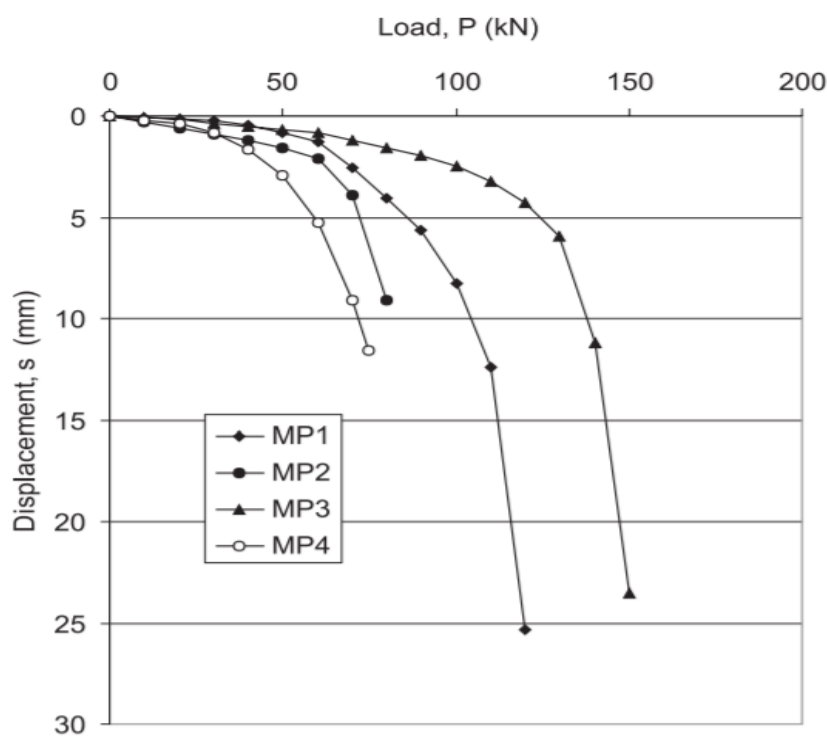
<sup>2</sup> Russo

<sup>3</sup> Han and Ye

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 راه‌حل 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 [۶]. شکل (۲-۱۹)

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

| شماره شمع | نوع بارگذاری | روش تست بارگذاری | ظرفیت نهایی بار (کیلو نیوتن) | جابه‌جایی قائم (میلی‌متر) | زمان تا لحظه‌ی گسیختگی (ساعت) |
|-----------|--------------|------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 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                             |



شکل (۲-۱۹) پاسخ بار-جابجایی در تست‌های بارگذاری شمع در میکروپایل‌ها تحت کشش یا فشار [۶]

## ۲-۳-۳-۲- آزمایش‌های میدانی بارگذاری سیکلیک

کاوی و همکاران<sup>۱</sup> (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 نشان‌دهنده‌ی 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 [۷].

گومز<sup>۲</sup> و همکاران (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 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 [۸].

<sup>1</sup> Cavey

<sup>1</sup> Gomez

## ۲-۳-۳- آزمایش‌های میدانی بارگذاری جانبی

ریچاردز و روتبائر<sup>۱</sup> (۲۰۰۴)، نتایج تست‌های بارگذاری جانبی که به عنوان بخشی از ۸ پروژه مختلف اجرا شده بود را با پیش‌بینی‌های پاسخ LPILE (رییز و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۰)، NAVFAC، (۱۹۸۶) [۱۱] و روش بار مشخصه CLM (دانکن و همکاران<sup>۳</sup>، ۱۹۹۴) [۱۲] 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<sup>۴</sup> (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 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 [۱۳].

## ۲-۳-۴- مطالعات عددی و نرم افزاری

در بحث مطالعه‌ی میکروپایل‌ها، مطالعات عددی و بررسی‌های نرم افزاری سهم قابل توجهی را تاکنون

<sup>۱</sup> Richards, Rothbauer

<sup>۲</sup> Reese

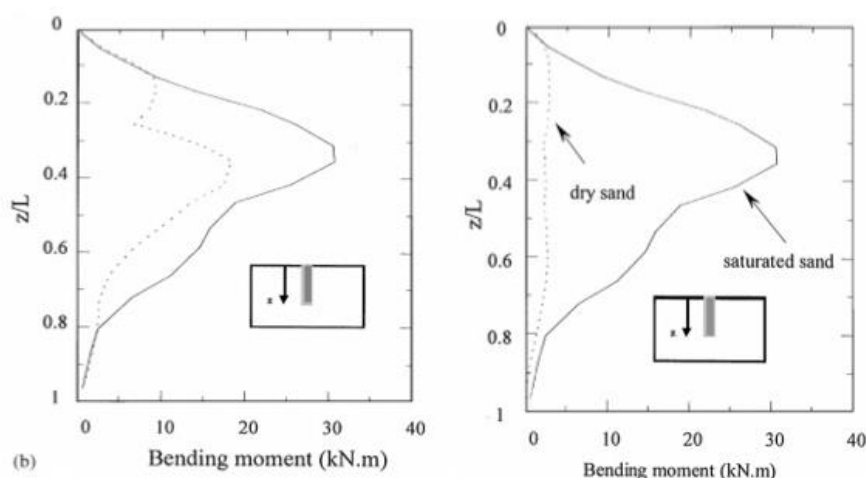
<sup>۳</sup> Duncan

<sup>۴</sup> Long

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<sup>۱</sup> (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 [۱۴]. شکل

(۲۰-۲)



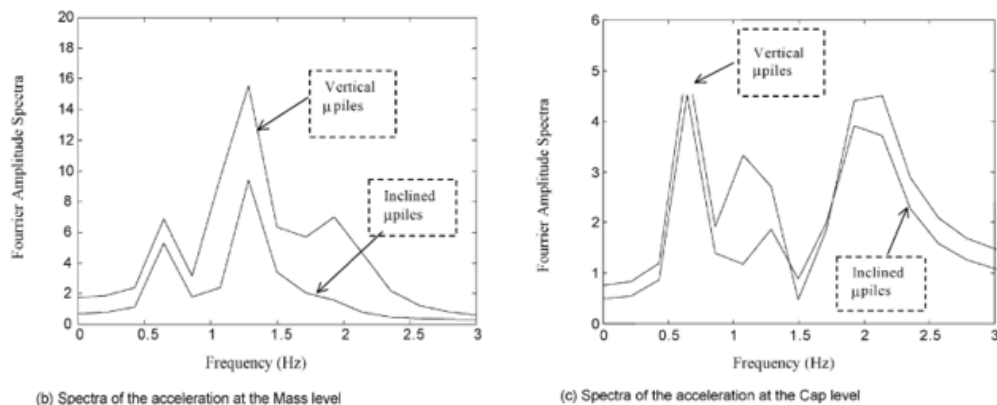
شکل (۲۰-۲) پوش لنگر خمشی؛ (a) میکروپایل منفرد، (b) گروه میکروپایل [۱۴]

سادک و شاهرور<sup>۲</sup> (۲۰۰۴)، از یک مدلسازی اجزا محدودی سه بعدی به منظور تحلیل اثر زاویه‌ی شیب میکروپایل‌ها بر روی پاسخ لرزه‌ای آن‌ها استفاده نمودند. این مطالعه دو مورد را شامل

<sup>۱</sup> Ousta, Shahrour

<sup>۲</sup> Sadek and Shahrour

می‌شد؛ میکروپایل‌های 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 لرزه‌ای را در مقایسه با شمع‌های قائم افزایش می‌دهد. این زاویه شیب سبب بسیج بهتر سختی محوری میکروپایل‌ها و در نتیجه کاهش نیروهای برشی و لنگر خمشی ایجاد شده با بار لرزه‌ای می‌گردد [۱۵]. شکل (۲-۲۱)



شکل (۲-۲) اثر شیب میکروپایل‌ها در فرکانس‌های طبیعی سیستم خاک-میکروپایل [۱۵]

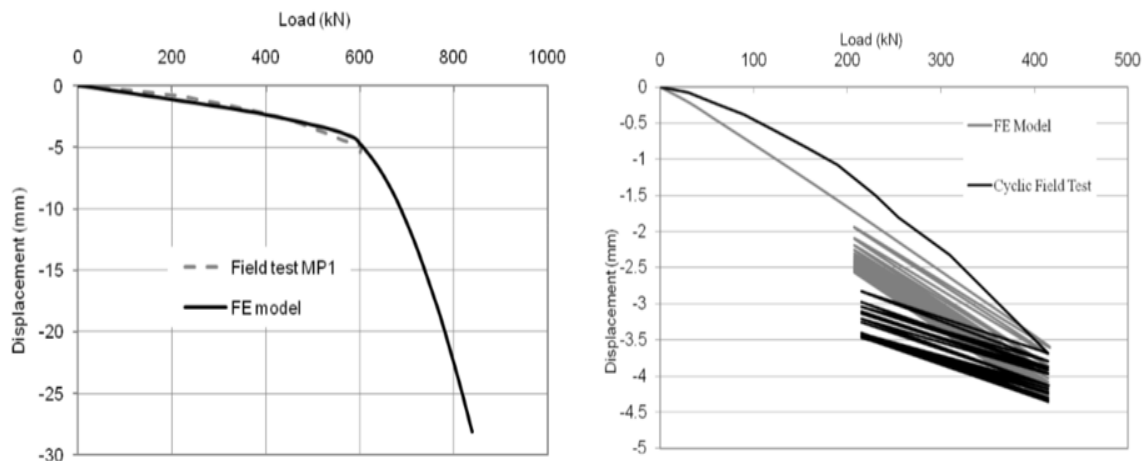
### ۵-۳-۲- مطالعات ترکیبی

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<sup>۱</sup> (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

<sup>۱</sup> Abd Elaziz

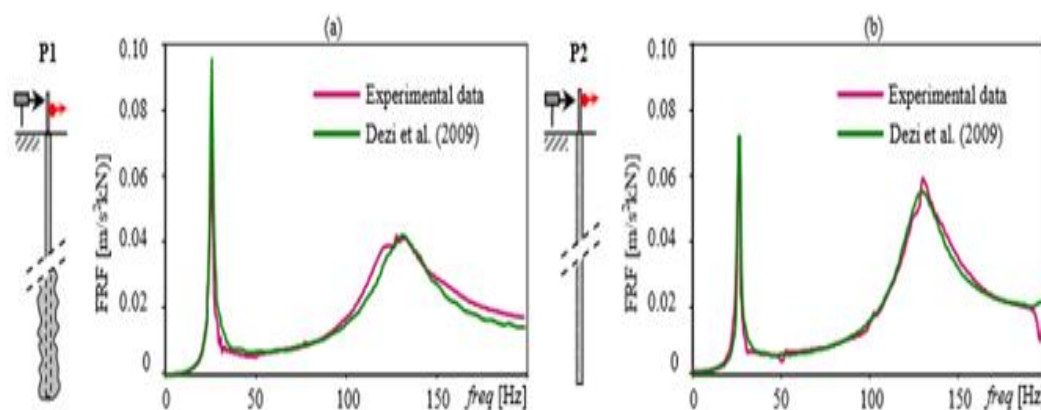
میکروپایل انجام گرفته است که شامل ۵ آزمایش بار یکنواخت و ۵ آزمایش بار سیکلیک محوری بر روی میکروپایل‌های منفرد، ۴ آزمایش بار محوری یکنواخت بر روی جفت میکروپایل‌های تو خالی، ۲ آزمایش بارگذاری یکنواخت و ۶ آزمایش بارگذاری سیکلیک جانبی بر روی میکروپایل‌های منفرد می‌گردد. نتایج هر مجموعه از آزمایش‌ها برای صحت سنجی مدل عددی به کار رفته است [۱۶]. ش (۲۲-۲)



شکل (۲۲-۲) منحنی‌های صحت سنجی نیرو-جاب‌جایی؛ (a) در فشار استاتیکی، (b) در فشار سیکلیک [۱۶]

در پژوهش انجام گرفته توسط کاپاتی و همکاران<sup>۱</sup>، 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 [17]. شکل (۲۳-۲)

<sup>۱</sup> Capatti



شکل (۲-۲۳) نتایج آزمایش های تجربی و تحلیلی برای بارگذاری ضربه ای [۱۷]

## ۲-۳-۶- تاریخچه موردی میکروپایل

تریلور و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۲)، استفاده از میکروپایل ها را در زمینی آهکی به منظور ایجاد تکیه گاه سازه ای برای سیستم پی ها بررسی کردند. آن ها سه تاریخچه ی موردی از میکروپایل های نوع A در بستر سنگی آهکی را گزارش نمودند. بار اجرایی فشاری در محدوده ی ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلونیوتن بود. آن ها مقادیر نهایی و میانگین اتصال شمع های نوع A در توده ی سخت سنگ را عددی بیشتر از ۱۷/۵ مگاپاسکال برآورد کردند. آن ها همچنین بیان کردند که برای لنگرهای موجود در سنگ، طول های تقریبی اتصال بیشتر از ۳ متر به ندرت سبب افزایش در ظرفیت می گردد [۱۸]. جدول (۲-۷)

جدول (۲-۷) نتایج آزمایش بارگذاری [۱۸]

| آزمایش بارگذاری | مجموع طول غلاف (متر) | ناحیه اتصال (متر) | قطر ناحیه تزریق (متر) | حداکثر بار (کیلونیوتن) | حداکثر خیز (سانتی متر) |
|-----------------|----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 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                    |

<sup>۱</sup> Traylor

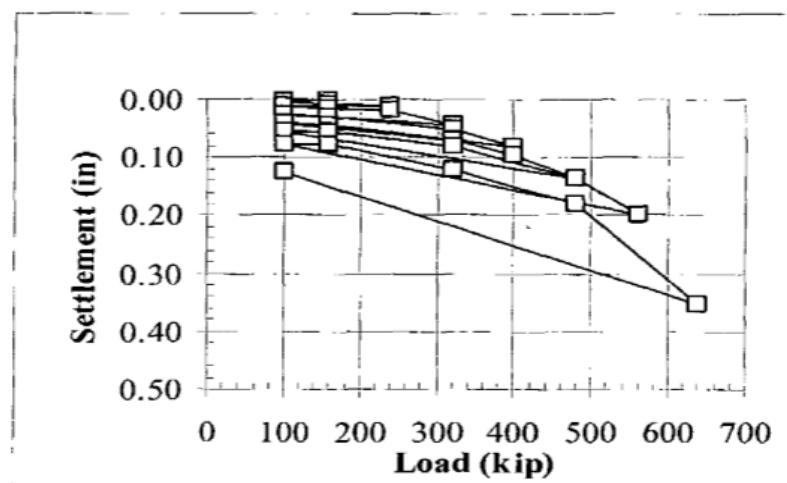


|     |      |     |     |      |    |
|-----|------|-----|-----|------|----|
| ۱/۳ | ۲۶۶۹ | ۲۱۸ | ۴/۶ | ۱۰/۴ | ۵  |
| ۲/۳ | ۳۶۳۸ | ۱۸۸ | ۳   | ۱۱/۹ | ۶  |
| ۳/۳ | ۲۶۶۹ | ۱۸۸ | ۳/۲ | ۳۰/۵ | ۷  |
| ۴/۸ | ۲۶۶۹ | ۱۸۸ | ۳/۲ | ۲۱/۵ | ۸  |
| ۱/۹ | ۲۶۶۹ | ۱۸۸ | ۳   | ۱۰/۷ | ۹  |
| ۳/۳ | ۲۶۶۹ | ۱۸۸ | ۴/۶ | ۱۲/۲ | ۱۰ |

کادن و همکاران<sup>۱</sup> (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 آیین‌نامه‌های 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 آیین‌نامه‌ها ظرفیت میکروپایل‌ها را 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 زمین‌شناسی مختلف و در نهایت ارتقای آیین‌نامه‌های پیشنهادی برای طراحی را کمتر مورد بررسی قرار می‌دهند [۱۹]. شکل (۲)-

(۲۴)

<sup>۱</sup> Cadden



شکل (۲-۲۴) نتایج آزمایش‌های بارگذاری میکروپایل با سیکل‌های متعدد بارگذاری-باربرداری [۱۹]

### ۷-۳-۲- دستگاه‌های مورد استفاده در مدلسازی

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.

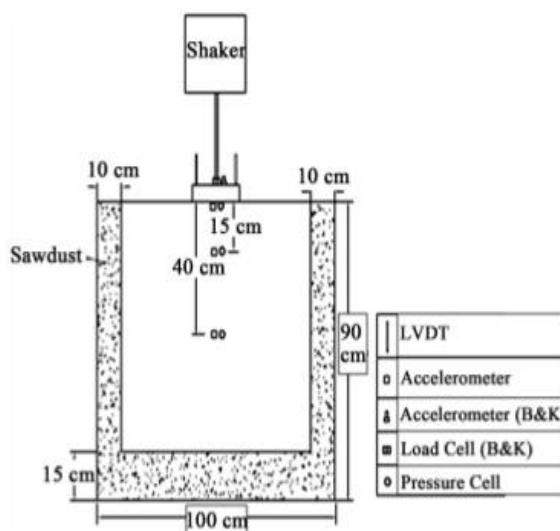
مدلسازی فیزیکی می‌تواند در سیستم‌های مختلفی اجرا شود: اتاقک ساده (1g)، اتاقک کالیبراسیون (CC)، دستگاه سانتریفیوژ (ng)، جعبه‌ی برش شفاف، محفظه‌ی مخروط ناقص (FCV) و جعبه کوچک مدلسازی فیزیکی. اکثر مدل‌ها در این دستورات عمل‌ها به صورت کوچک‌تر نسبت به سازه‌های حقیقی ساخته شده‌اند و تنها تعداد کمی از مطالعات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

## ۲-۳-۷-۱- مدلسازی فیزیکی با اتاقک ساده

همان‌گونه که پیشتر ذکر شد مدل‌های فیزیکی و کوچک مقیاس به منظور مطالعه‌ی پی‌های عمیق می‌توانند در روش‌های مختلف به کار بسته شوند. اتاقک‌های ساده (1g) به علت سادگی و هزینه‌ی کم، دستگاه مورد علاقه‌ای محسوب می‌شوند. مهمترین محدودیت اتاقک‌های ساده، سطح پایین تنش در مقایسه با شرایط واقعی شمع‌های محصور در خاک و پی‌های عمیق در محل می‌باشد. تنش میدانی 1g با توزیع تنش سربار نمونه اصلی شمع‌ها ناسازگار بوده و در آن یک رابطه ساده نمی‌تواند به کار بسته شود. هتler و گادهاس<sup>۱</sup> (۱۹۸۵)، فرانک و ماس<sup>۲</sup> (۱۹۸۵) تلاش کردند تا اعوجاج‌های تنش را در پاسخ-های مدل مورد احتساب قرار دهند [۲۰، ۲۱]. 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 (۲-۲۵) نشان داده شده است.



(b)



(a)

شکل (۲-۲۵) اتاقک ساده؛ (a) شکل شماتیک، (b) تصویر واقعی [۲۱]

<sup>۱</sup> Hettler, Gudehus (1985)

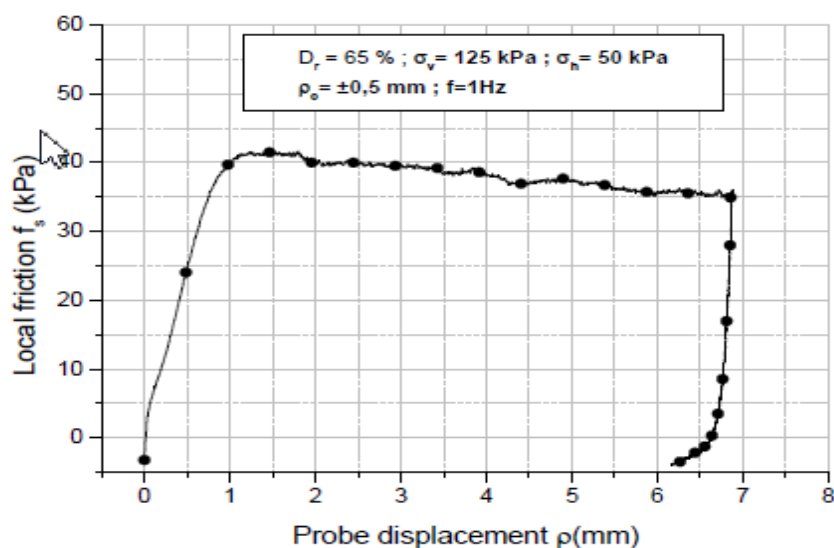
<sup>۲</sup> Franke, Muth (1985)

## ۲-۷-۳-۲- مدلسازی فیزیکی با اتاقت کالیبراسیون

با توجه به پژوهش انجام گرفته توسط بازیار و ضیایی موید (۲۰۰۶)، اتاقت‌های کالیبراسیون برای کمک به فرآیند توسعه‌ی روابط بین نتایج تست‌های درجا و پارامترهای مختلف خاک استفاده شدند [۲۲]. از هنگام توسعه‌ی زود هنگام این مدل‌ها در اواخر دهه‌ی ۱۹۶۰، اتاقت‌های کالیبراسیون یک ابزار پژوهشی مهم برای مطالعه‌ی اندرکنش‌های خاک و پی بوده است. همان‌طور که زارع و اسلامی (۲۰۱۴) تایید کردند، این روش می‌تواند همچنین برای مدلسازی تست‌هایی همچون CPT و PMT استفاده شود [۲۳]. در مدلسازی اتاقت‌های کالیبراسیون، سطوح تنش قائم و جانبی می‌تواند افزایش یابد، اگرچه ایجاد تنش‌های ثابت جانبی گرادیان‌های تنش واقعی را ایجاد نمی‌کند، بویژه افزایش خطی تنش‌ها با عمق که به طور رایج شمع‌های دارای بارگذاری محوری را کنترل می‌کند. بنابراین، برای غلبه بر نقص‌ها مدل سانتریفیوژ توسعه یافته است.

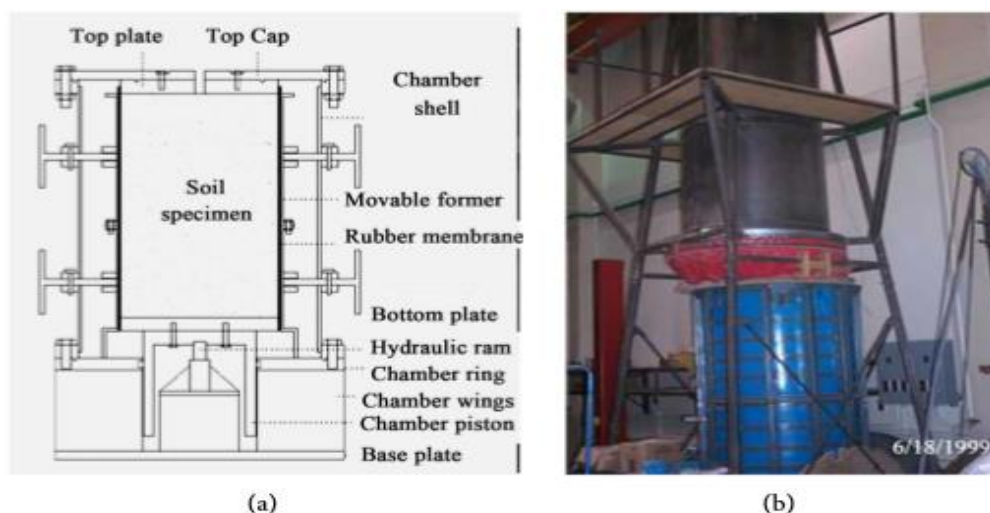
کواکی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، با مدلسازی رفتار چرخه‌ای شمع-ماسه در اتاقت کالیبراسیون تغییرات اصطکاک جدار شمع در طول فرآیند بارگذاری یکنواخت را در شکل (۲-۲۶) نشان داده‌اند. رفتار الاستیک خطی اولیه در جایی که حداکثر مقدار اصطکاک محلی ۴۲ کیلوپاسکال و جابجایی کاوشگر ۱/۱ میلی‌متر است، مشاهده می‌شود. پس از آن، مقدار اصطکاک محلی با مقدار نهایی ۳۵ کیلوپاسکال، در پایان مرحله بارگذاری یکنواخت کمی کاهش می‌یابد [۲۴].

<sup>۱</sup> Khouaouci



شکل (۲-۲۶) تغییرات اصطکاک محلی شمع در بارگذاری یکنواخت [۲۴]

گیونا و جامیول کوفسکی<sup>۱</sup> (۱۹۹۱)، اتاقک‌های کالیبراسیون بسیاری در سراسر جهان را بررسی کردند و شرایط مرزی مختلف در این سیستم‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند [۲۵]. شکل (۲-۲۷) تصویر شماتیک و تصویر واقعی اتاقک کالیبراسیون را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۲۷) اتاقک کالیبراسیون؛ (a) تصویر شماتیک، (b) تصویر واقعی [۲۵]

<sup>۱</sup> Ghionna, Jamiolkowski (1991)

## ۲-۳-۷-۳- مدلسازی فیزیکی با سانتریفیوژهای ژئوتکنیکی

مدلسازی سانتریفیوژ ژئوتکنیکی یک ابزار مناسب برای تحلیل مسائل ژئوتکنیکی محسوب می‌شود. این دستگاه می‌تواند شرایط واقعی خاک را شبیه سازی کند چرا که مدل‌ها و نمونه‌های خاک در سانتریفیوژ تحت یک شتاب شعاعی صحیح قرار می‌گیرند. این شتاب به عنوان شتاب جاذبه با بزرگی‌ای که با چندین برابر شتاب جاذبه برابر است عمل می‌کند و تنش در سطح بالایی خاک تقریباً صفر می‌باشد. تنش در مقایسه با عمق مدل با توجه به چگالی خاک و شتاب اعمالی افزایش می‌یابد که به همین علت سانتریفیوژها به طور گسترده در مهندسی ژئوتکنیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

باکی<sup>۱</sup> (۱۹۳۱)، قوانین مدلسازی سانتریفیوژ برای مطالعه‌ی گسیختگی سازه‌ای معادن را تشریح کرد [۲۶] و محققان دیگر همچون پانک<sup>۲</sup> (۱۹۵۲)، اسکوفیلد<sup>۳</sup> (۱۹۶۹)، شن و همکاران<sup>۴</sup> (۱۹۸۲) و میکاسا و تاکادا<sup>۵</sup> (۱۹۸۴) تئوری‌ها و سیستم‌های سانتریفیوژ را توسعه دادند [۲۷-۳۰]. یکی از بزرگترین سانتریفیوژهای ژئوتکنیکی در سراسر جهان در دانشگاه کالیفرنیا در دهه‌ی اخیر ساخته شد. این دستگاه شعاعی برابر 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.

<sup>۱</sup> Bucky

<sup>۲</sup> Panek

<sup>۳</sup> Schofield

<sup>۴</sup> Shen

<sup>۵</sup> Mikasa, Takada

## ۲-۳-۷-۴- مدل‌سازی فیزیکی با جعبه‌ی برش شفاف

۱ 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<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۸۸)، فیلیپ<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۸۶)، گیسون<sup>۳</sup> (۱۹۹۷)، پراساد<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۴)، جعفرزاده (۲۰۰۴) و اسلامی و همکاران (۲۰۰۹) مطالعات بسیاری بر روی رفتار خاک با این روش را انجام دادند [۳۱-۳۶] 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 هرکدام ۵۰ میلی‌متر یا کمتر را شامل می‌شوند که می‌توانند در یک جهت به طور آزاد حرکت کنند [۳۷]. 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. شکل (۲-۲۸) تصویر یک دستگاه جعبه‌ی برش شفاف را نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> Hushmand<sup>۲</sup> Philip<sup>۳</sup> Gibson<sup>۴</sup> Prasad



شکل (۲-۲۸) نمای کلی جعبه‌ی برش شفاف [۳۷]

## ۲-۳-۷-۵- مدلسازی فیزیکی با محفظه‌ی مخروط ناقص

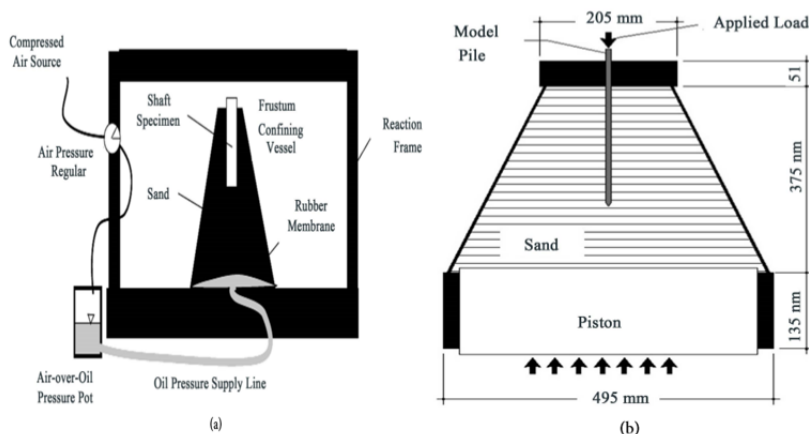
با توجه به هوروات و اشتول<sup>۱</sup> (۱۹۹۶)، محفظه‌ی مخروطی ناقص یک دستگاه جدید می‌باشد که برای مدلسازی شمع‌ها توسعه یافته است [۳۸]. این وسیله یک ابزار مناسب برای مدلسازی رفتار شمع‌ها و آزمایش CPT می‌باشد. این وسیله دارای شکل مخروطی منقطع می‌باشد که بار ثابت را به کف خود اعمال می‌کند، بنابراین توزیع 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 شبیه سازی می‌کند. تنش قائم در بالای خاک صفر می‌باشد و با عمق تا رسیدن 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<sup>۲</sup> (۱۹۹۹) مدل‌های شمع متعددی را با FCV در فشارهای پایه و نسبت‌های تخلخل

<sup>۱</sup> Horvath, stole

<sup>۲</sup> Sedran



مختلف تست کردند [۳۹]. آن‌ها توضیح دادند که یک توزیع تنش خطی با عمق در FCV وجود دارد. شکل (۲-۲۹) نشان دهنده‌ی فرم و سیستم FCV می‌باشد.



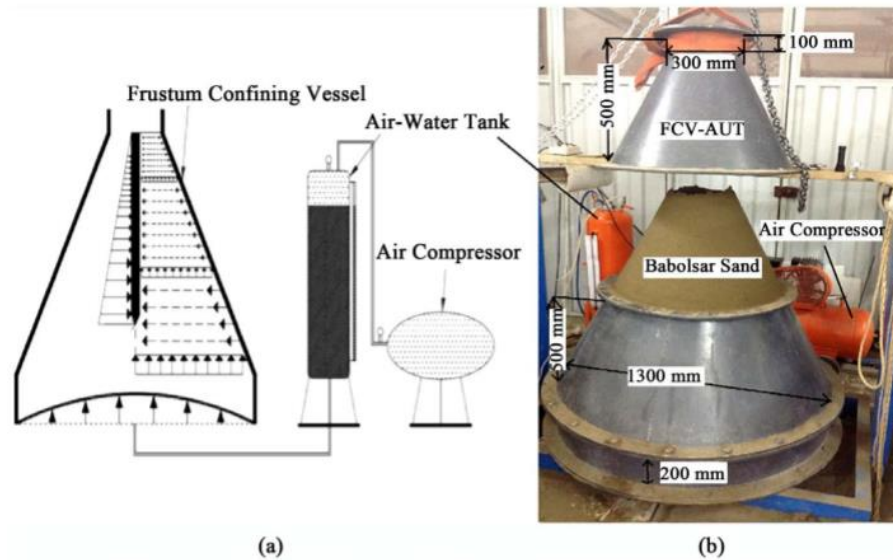
شکل (۲-۲۹) شکل شماتیک سیستم FCV ؛ (a) اجزای FCV در دانشگاه فلوریدای جنوبی (b) بارهای اعمالی در FCV [۳۹]

مزیت دیگر FCV امکان ساخت درجای 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.

## ۲-۳-۶- مدلسازی فیزیکی با محفظه‌ی مخروط ناقص اصلاح شده

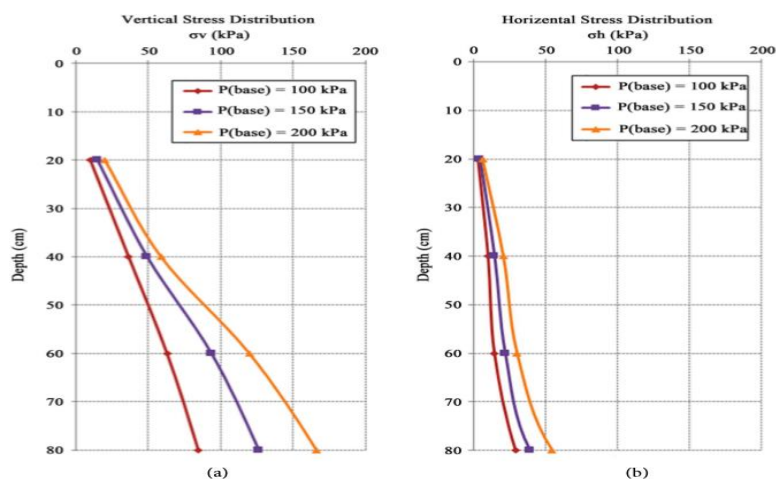
FCV مورد توجه در این مطالعه توسط زارع و اسلامی در دانشگاه امیرکبیر مطابق شکل (۲-۳۰) ساخته شده است (FCV-AUT). دستگاه FCV اصلاح شده شامل ۳ بخش اصلی همچون بدنه‌ی مخروطی، سیستم فشار کف و سیستم بارگذاری (قاب بارگذاری، پمپ دستی هیدرولیکی و جک هیدرولیکی) به منظور اعمال بارهای تنش و فشار، طراحی و ساخته شده است. 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.



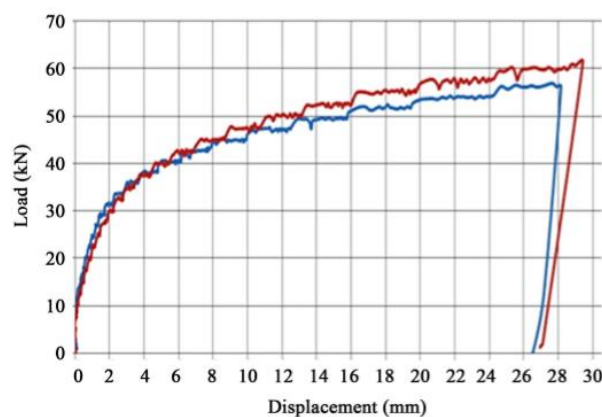
شکل (۳۰-۲) FCV اصلاح شده، (a) شکل شماتیک؛ (b) تصویر واقعی [۴۰]

نتایج تست‌ها در این مطالعه نشان می‌دهد که FCV می‌تواند به خوبی برای مدلسازی فیزیکی شمع‌ها استفاده شود. شکل (۳۱-۲) 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.



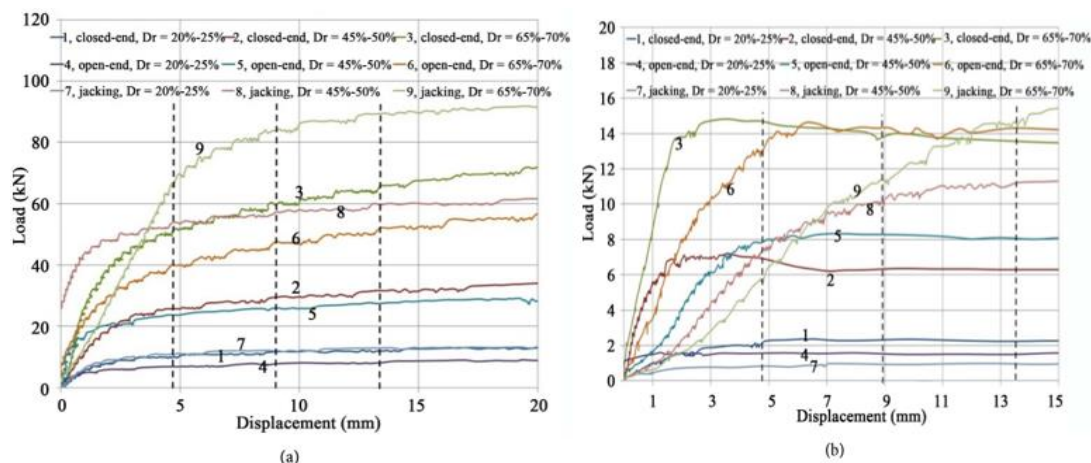
شکل (۳۱-۲) توزیع تنش در FCV اصلاح شده، (a) قائم؛ (b) افقی [۴۰]

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 (۳۲-۲) معلوم است، شبیه‌سازی نتایج قابل اعتماد و قابل قبولی را ارائه کرده است.



شکل (۳۲-۲) نمودار بار-جاب‌جایی در FCV به منظور نشان دادن تکرارپذیری تست‌ها [۴۰]

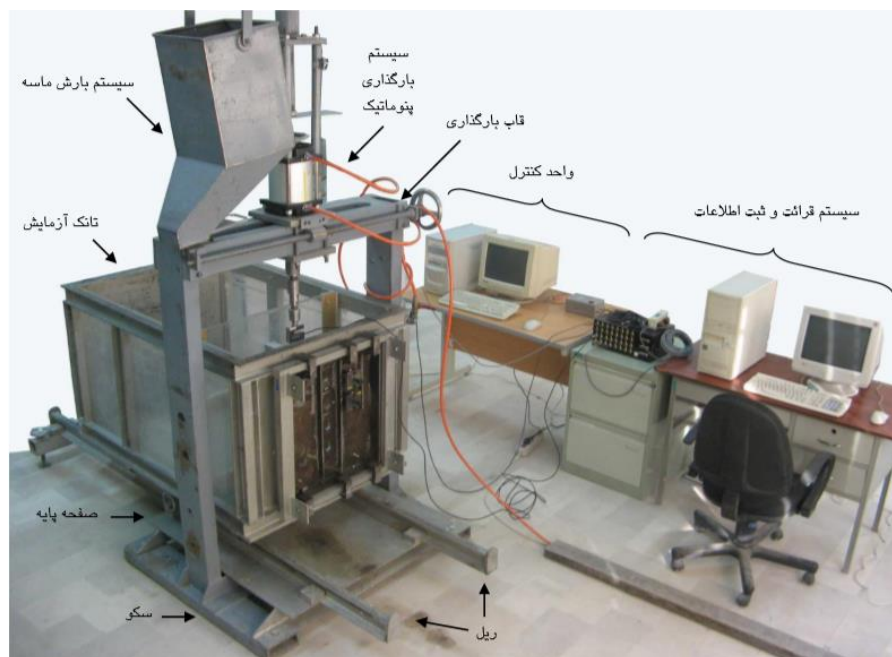
سه مدل شمع شامل یک مدل شمع انتها باز و ۲ مدل شمع انتها بسته توسط FCV تست شد. مدل شمع انتها باز توسط ضربه و مدل‌های انتها بسته توسط ضربه و جک زنی نصب شدند. شکل (۳۳-۲) دی‌گرام‌های رفتاری مدل‌های شمع تست شده در FCV را ارائه می‌دهد.



شکل (۲-۳۳) نمودارهای بار-جاب‌جایی در FCV، (a) فشار؛ (b) کشش [۴۰]

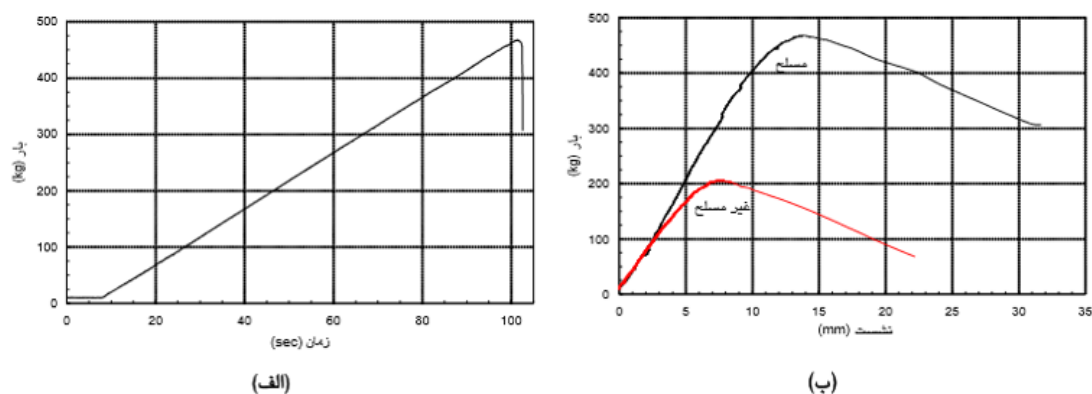
## ۲-۳-۷-۲-مدلسازی فیزیکی با جعبه‌ی کوچک مدلسازی

در مطالعه‌ی انجام شده توسط ابریشمی (۲۰۰۹)، چگونگی طراحی و ساخت سیستمی جدید، برای مدلسازی آزمایشگاهی مسأله بارگذاری و ظرفیت باربری استاتیکی و سیکی 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 سیکی ۸۷ کیلوگرم استفاده شده است [۴۰]. شکل (۲-۳۴)



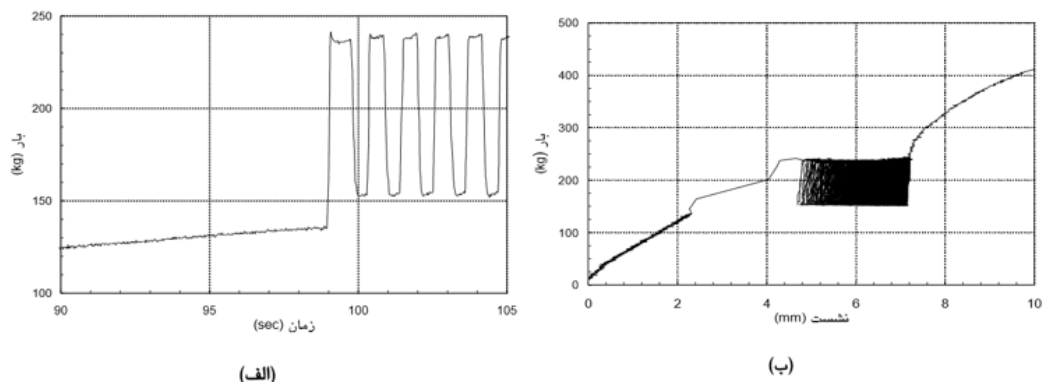
شکل (۲-۳۴) مجموعه کامل سیستم آزمایشگاهی مطالعه رفتار پی‌های نواری واقع بر خاک مسلح [۴۰]

نتایج ثبت شده در ادامه مورد تحلیل قرار می‌گیرند. شکل (۲-۳۵) 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 (۲-۳۵) نتایج بارگذاری استاتیکی؛ (الف) نمودار بار-زمان بر پی مسلح ( $U/B=0.5$ )، (ب) مقایسه نمودار بار-نشست پی‌های مسلح و غیر مسلح [۴۰]

شکل (۲-۳۶) 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 (۲-۳۶) نتایج بارگذاری سیکلی بر پی واقع بر خاک مسلح ( $U/B=0.5$ )، (الف) نمودار بار - زمان، (ب) نمودار بار - نشست [۴۰]

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 (۲-۸)

جدول (۲-۸) لیستی از پژوهشگران و کارهای صورت گرفته در عرصه ی مدلسازی فیزیکی

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

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

## 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 آن که برخی از این پارامترها در تحقیقات عددی و نرم افزاری مورد توجه قرار گرفته و بررسی شده‌اند، به نظر می‌رسد کار بر روی مدل‌های آزمایشگاهی می‌تواند یک بحث جدید را پیگیری نماید و یا عدم صحت مطالعات عددی را بررسی نماید. همچنین در این تحقیق سعی شده است که پارامترهای شعاع تزریق، چسبندگی جدار، کوبش، قطر لوله‌ها و تراکم جدیدی میکروپایل‌ها که کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند، مطالعه شوند.





## فصل ۳:

### روش تحقیق

### ۳-۱- مقدمه

در فصل پیش رو 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 نمونه سازی و خصوصیات نمونه‌ها برای هر آزمایش ارزیابی شده است. در انتها نیز نرم افزار تحلیل داده‌ها SPSS به اختصار توضیح داده شده است.

### ۳-۲- 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 (۳-۱)



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

### ۱-۲-۳ خصوصیات مصالح خاک

در ادامه خصوصیات مواد و مصالح مصرفی معرفی می‌شود.

#### ۱-۲-۳-۱ 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].

##### ۱. روش انجام آزمایش

برای این آزمایش از الک‌های ویژه‌ای استفاده شده است. ابتدا نمونه‌ی خشک 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)



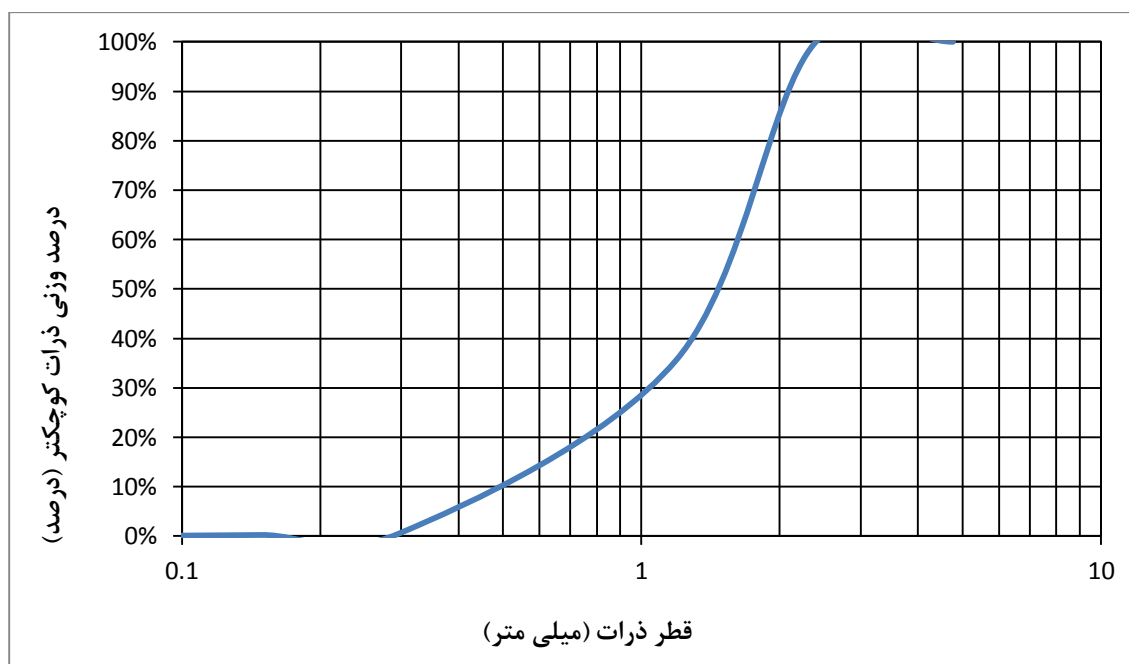
شکل (۲-۳) تصویر مجموعه الک‌ها و لرزاننده

## ۲. نتایج آزمایش

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

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

| نمونه سوم       | نمونه دوم       | نمونه اول       | نمونه خاک         |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| وزن مانده (گرم) | وزن مانده (گرم) | وزن مانده (گرم) | اندازه الک (نمره) |
| 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 ماسه (ماسه فیروزکوه)

### ۳-۲-۱-۲- آزمایش تعیین وزن مخصوص حداقل و حداکثر 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 حداقل و حداکثر 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....

#### ۱. 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 سانتی‌متر 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. شکل (۳-۴)

برای بدست آوردن وزن مخصوص حداکثر 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 (۳-۴)



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

## ۲. 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 (۳-۲) و (۳-۳)

جدول (۳-۲) جدول ارزیابی حداقل چگالی خاک ماسه

| مرتبۀ                                                   | وزن استوانه + ماسه (kg) | چگالی حداقل ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) |
|---------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------|
| 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 حداکثر ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) |
|----------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------|
| ۱                                                        | ۶۳/۵۷                   | ۱/۶۱                                     |
| ۲                                                        | ۶۳                      | ۱/۵۹                                     |
| ۳                                                        | ۶۳/۲۸                   | ۱/۶۰                                     |
| میانگین چگالی های حداکثر = $1.60 \text{ gr}/\text{cm}^3$ |                         |                                          |

### ۳-۲-۱-۳- آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس

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 ۴۵ و ۹۰ درصد مطابق استاندارد ASTM D380 ارائه شده است [۴۴].

در این آزمایش، ابتدا خاک تحت تنش قائم معینی قرار گرفته و سپس تنش برشی با سرعت تنظیم شده به خاک وارد می‌شود تا نمونه گسیخته شود. حداکثر تنش قابل تحمل قرائت شده و بدین ترتیب در دستگاه مختصات "تنش برشی-تنش قائم" چند نقطه به دست می‌آید. با ترسیم بهترین خط عبور کننده از این نقاط پارامترهای برشی خاک تعیین می‌شوند.

در آزمایش برش مستقیم، برای اعمال بار می‌توان یکی از دو روش زیر را به کار گرفت:

الف) آزمایش کنترل تنش

ب) آزمایش کنترل کرنش (دستگاه مذکور به این روش کار می‌کند)

در روش کنترل کرنش، نرخ تغییر شکل یا کرنش ثابت است و مقدار نیروی برشی اندازه‌گیری می‌شود. مزیت این دستگاه توانایی به دست آوردن مقاومت برشی نهایی که از حداکثر مقاومت برشی کمتر است، می‌باشد. در حالی که در حالت کرنش کنترل تنش فقط مقاومت حداکثر بدست می‌آید. شکل (۳-۵) شمای کلی این دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۵) دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس

آزمایش برش مستقیم در مقایسه با آزمایش سه محوری هزینه کمتری دارد ولی از دقت کمتری برخوردار است. زیرا اولاً شرایط تنش تطابق چندانی با شرایط واقعی ندارد، ثانیاً برش در امتداد یک سطح افقی از قبل تعیین شده روی می دهد که ممکن است صفحه گسیختگی واقعی نباشد. اجزای مهم دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس عبارتند از: جعبه برش، لودسل<sup>۱</sup>، سنسورهای اندازه‌گیری جابجایی افقی و قائم، پمپ باد، سیستم بارگذاری، دیتالاگر و سیستم کنترل.

#### ۱. تجهیزات آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس

جعبه برش: جعبه مکعب شکل فلزی که از دو نیمه تشکیل شده است در حین آزمایش نیمه بالایی ثابت و نیمه پایینی با اعمال تغییر مکان افقی توسط جک مربوطه حرکت نموده، باعث اعمال برش به

<sup>1</sup> Loadcell



نمونه و سرانجام گسیختگی آن می شود. جعبه برش تماما در مخزن بزرگتری قرار دارد تا در صورت نیاز، عمل زهکشی نمونه به راحتی انجام شود. ابعاد جعبه برش  $30 \times 30$  سانتی متر و ارتفاع نمونه در آن ۱۵ سانتی متر است.

مقدار تنش قائم بواسطه یک بازو که متصل به یک اهرم می باشد توسط وزنه های مربوطه به جعبه برش اعمال می شود.

برای کاهش میزان اصطکاک جعبه ی متحرک، از سه پیچ استفاده می شود که فاصله بین دو نیمه را تنظیم می کند و در این حالت تنها سطوح نوک این پیچ ها با نیمه پایین در تماس هستند. سرعت حرکت افقی جعبه تحتانی توسط یه سیستم چرخ دنده ای قابل تنظیم است و میزان حداکثر جابه جایی برابر ضخامت جعبه و حداکثر ۱۵ میلی متر می باشد.

- سنسورهای اندازه گیری جابه جایی افقی و قائم

- لودسل<sup>۱</sup> برای اندازه گیری نیروی برشی وارد به نمونه.

## ۲. روش انجام آزمایش

دستگاه برش مستقیم عملیات برش را به صورت کرنش کنترل انجام می دهد. پس از آماده سازی تجهیزات آزمایش، مراحل تهیه و ساخت نمونه ها شروع می شود. ابتدا پیچ های جعبه برش بسته و سنگ متخلخل داخل آن قرار داده می شود و ابعاد آن توسط کولیس اندازه گیری شده تا حجم جعبه برش محاسبه گردد. با داشتن وزن مخصوص های متناسب با تراکم ۴۵ و ۹۰ درصد در نظر گرفته شده برای این تحقیق، وزن مخلوط مورد نیاز برای پرکردن جعبه برش را محاسبه می کنند. پس از محاسبه مقدار ماسه مورد نظر، مصالح در سه مرحله درون قالب ریخته شده است و هر لایه با استفاده از چکش پلاستیکی متناسب با درصد تراکم، فشرده می شود. پس از آماده شدن قالب، نمونه به روی دستگاه برش

<sup>۱</sup> Loadcell

برده می‌شود. پس از تراز نمودن بازوی دستگاه، سنسورها صفر شده و پیچ جعبه برش باز می‌شود. در انتها با تنظیم دستگاه روی سرعت مشخص و تعیین سربارهای ۴۵۰، ۹۰۰ و ۱۳۵۰ کیلوگرم نیرو، عملیات برش آغاز شده و زمانی خاتمه می‌یابد که نمونه به اندازه ۱۵ میلی‌متر ضلع جعبه برش تغییر مکان دهد یا لودسل ثابت مانده یا به عقب بازگردد.

### ۳. نتایج آزمایش

زاویای اصطکاک بدست آمده از آزمایش برش مستقیم در جدول (۳-۴) آورده شده است.

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

| تراکم نسبی (درصد) | زاویه اصطکاک داخلی |
|-------------------|--------------------|
| ۴۵                | ۳۲                 |
| ۹۰                | ۳۹                 |

### ۳-۲-۱-۴- جمع بندی نتایج خصوصیات ماسه فیروزکوه

پس از انجام آزمایش‌های سه گانه فوق مشاهده می‌شود ماسه‌ی مورد استفاده ماسه‌ی فیروزکوه با دانه‌بندی یکنواخت و بد دانه‌بندی شده (SP) می‌باشد. خلاصه‌ای از مشخصات ماسه مورد استفاده در جدول (۳-۵) آورده شده است.

جدول (۳-۵) 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 |

### ۳-۲-۲- 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 جابه‌جایی‌های 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<sup>۱</sup>، ۱۹۸۰) [۴۵] و نیز توجه به شرایط و امکانات آزمایشگاه لحاظ و انتخاب نمود. برای مدلسازی میکروپایل‌ها، از لوله‌های توخالی از جنس فولاد به قطرهای ۲ و ۳ اینچ استفاده شده است. طول مد نظر در این تحقیق ۱ متر می‌باشد که توسط سنگ فرز برش داده شده است. شکل (۳-۶)

<sup>۱</sup> Poulos , Davis



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

جدول (۳-۶) خصوصیات نمونه‌های فولادی میکروپایل

|                       |                               |
|-----------------------|-------------------------------|
| ۰/۱۱۹                 | سختی خمشی (نیوتن بر متر مربع) |
| ۳/۱۵۱*۱۰ <sup>۸</sup> | مدول ینگ (کیلوپاسکال)         |
| ۱ و ۰/۹               | طول (متر)                     |
| ۳ و ۲،۱               | قطر (اینچ)                    |

### 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.

### ۳-۳-۱- وسایل و دستگاه‌های مورد نیاز

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 بزرگ مقیاس" و "سیستم بارش ماسه" به اختصار توضیح داده شوند.

### ۳-۳-۱-۱- دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس

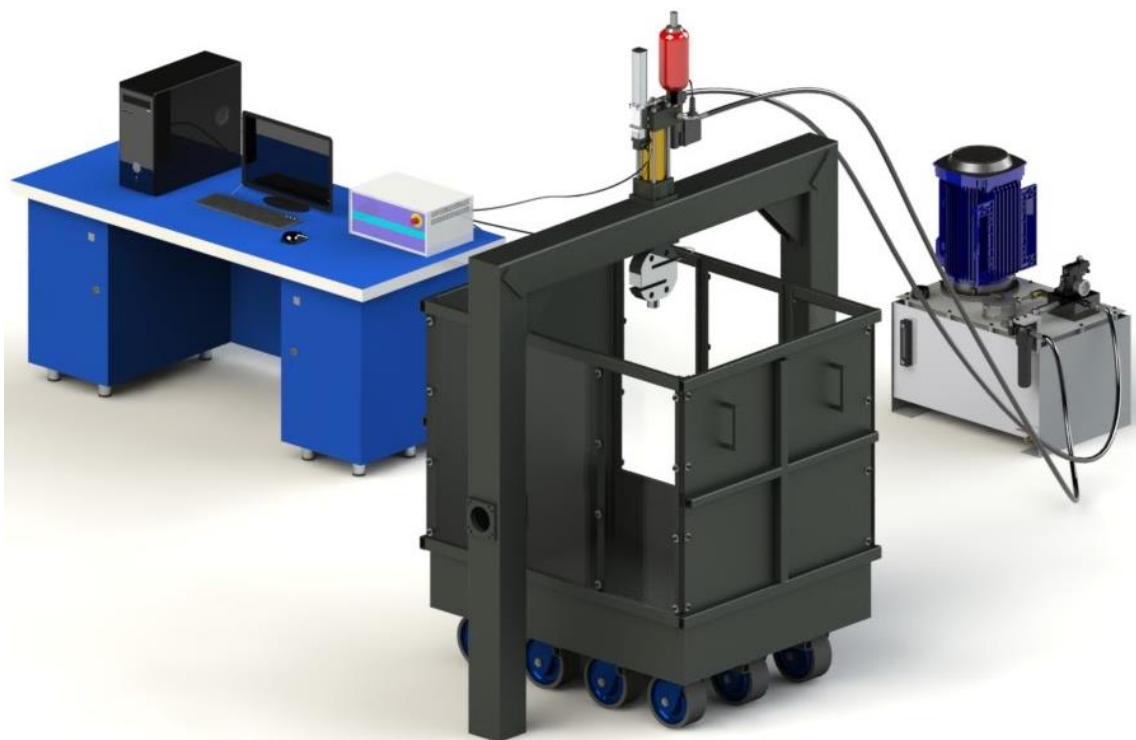
در این مطالعه تلاش شده است تا در ابتدا با طراحی و ساخت یک دستگاه مدلسازی فیزیکی با مقیاس کاهش یافته در آزمایشگاه، یک طرح ایمن و اقتصادی به منظور شناخت صحیح رفتار بار-نشست پی واقع بر خاک مسلح ارائه شود. دستگاه ساخته شده علاوه بر تجهیز آزمایشگاه بدون شک می‌تواند افق‌های جدیدی از مطالعه سازه‌های ژئوتکنیکی 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. در ادامه اهداف ساخت دستگاه، ویژگی‌ها و قطعات دستگاه به تفصیل شرح داده خواهد شد. شکل (۷-۳)



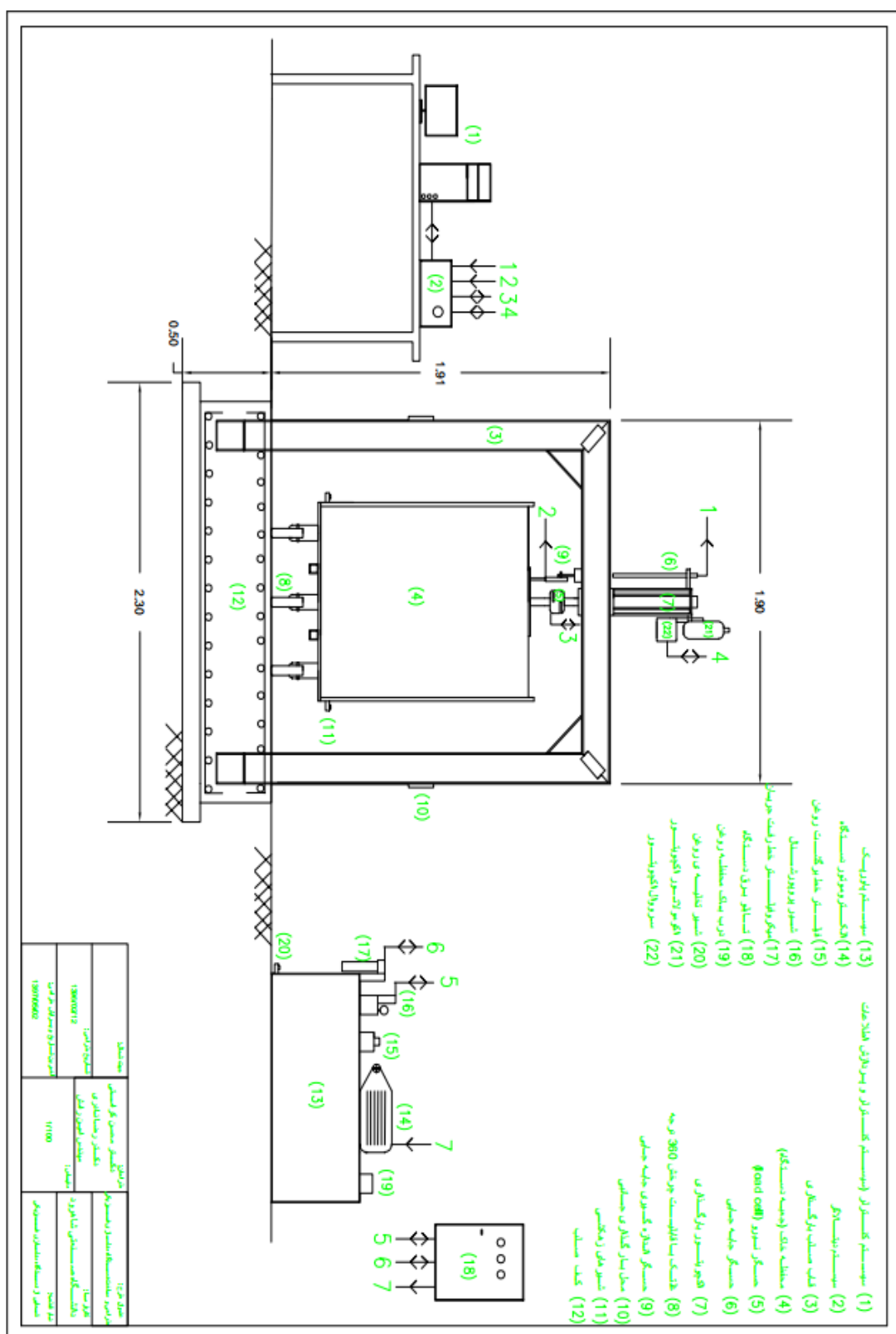
شکل (۷-۳) نمای کلی از دستگاه مدلسازی فیزیکی بارگذاری بزرگ مقیاس

### ۳-۳-۱-۲- اجزای دستگاه مدلسازی فیزیکی

اجزای دستگاه مدلسازی فیزیکی جدید عبارتند از: تابلو برق دستگاه، سیستم پاورپک، سیستم اکچویتور، محفظه‌ی دستگاه و قاب بارگذاری و سیستم کنترل، قرائت و ثبت داده‌ها. طراحی و عملکرد این قسمت‌ها در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۳-۸) و (۳-۹)



شکل (۳-۸) طراحی دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس با SolidWorks

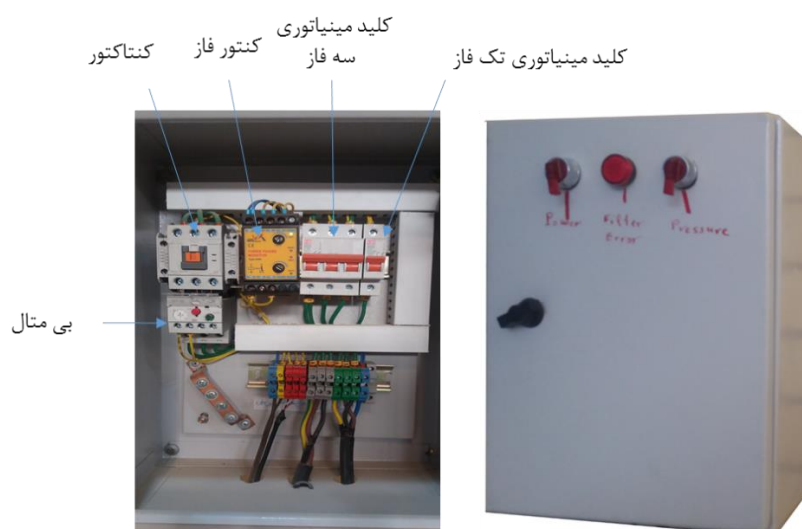


شکل (۳-۹) شمایی از دستگاه مدل سازی بزرگ مقیاس





بی‌متال: برای حفاظت از موتورهای الکتریکی در مقابل اضافه بار از رله‌های حرارتی (بی‌متال) استفاده می‌شود. اساس کار این رله‌ها بر پایه اختلاف ضریب انبساط طولی دو فلز به کار رفته است. بر اثر عبور جریان از بی‌متال، دو فلز گرم می‌شوند و طول آن‌ها افزایش می‌یابد. از آنجایی که ضریب انبساط طولی یکی از فلزات بیشتر از دیگری است. دو فلز با هم به سمت فلزی که ضریب انبساط طولی کمتری دارد خم می‌شود. در نتیجه مسیر عبور جریان کنتاکت‌ها باز و مدار قطع می‌شود. وظیفه‌ی بی‌متال برای جلوگیری از ورود اضافه جریان می‌باشد که با ورود جریان اضافی دستگاه خاموش می‌شود.



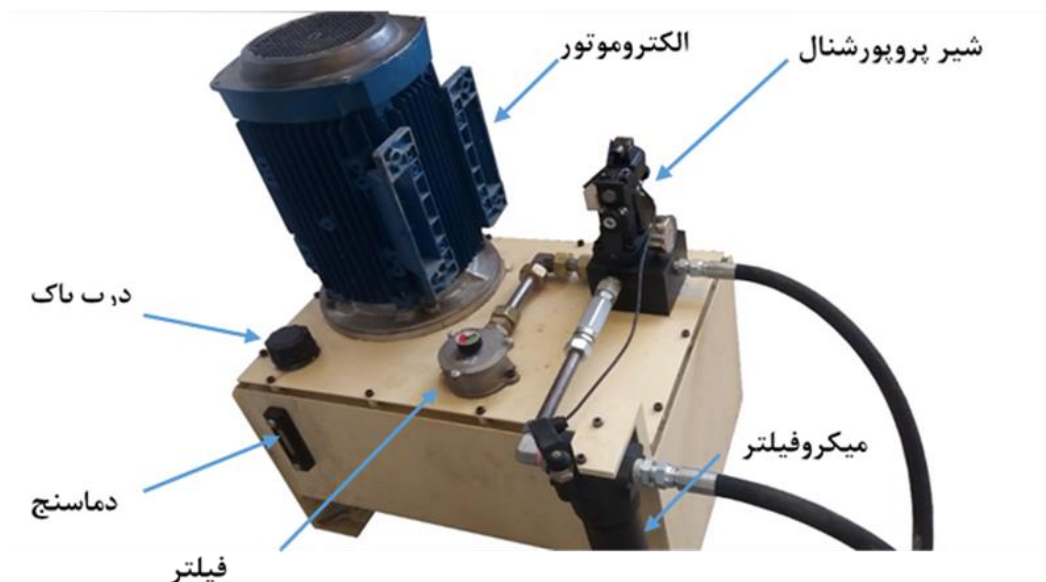
شکل (۳-۱۰) تابلو برق دستگاه و جزئیات

### ۳-۳-۱-۲-۲- سیستم پاورپک

وظیفه تامین نیروی دستگاه و سیستم بارگذاری مجموعه پاورپک می‌باشد، پاورپک دستگاه شامل یک موتور ۱۱ کیلو وات سه فاز، یک شیر پروپورشنال که جریان را به اکچویتور ارسال می‌کند و با گیجی که بر روی آن وجود دارد می‌توان فشار را تنظیم کرد. فشار کاری این گیج حداکثر تا ۲۰۰ بار می‌باشد و با رگلاتوری که روی شیر پروپورشنال قرار دارد می‌توانیم فشار را دستی تنظیم کرده و روی گیج مشاهده کنیم.

قسمت بعدی پاورپک هیدرولیک، میکروفیلترها و فیلترها هستند در این دستگاه یک میکروفیلتر در خط فشار داریم دقت این میکروفیلتر ۵ میکرون بوده و اگر احيانا ذراتی که در روغن وجود دارد به هر دلیلی از جمله کارکرد بیش از حد روغن و موارد مشابه، اندازه‌ی این ذرات از ۵ میکرون بیشتر شود، فیلتر بسته شده و خود دستگاه به صورت اتوماتیک از طریق سنسوری که دارد، سیستم را قطع می‌کند تا آسیبی به سرووال و تجهیزات اکچویتور وارد نشود. در فیلتری که در خط برگشت در نظر گرفته شده یک اندیکاتور<sup>۱</sup> بر روی آن در نظر گرفته شده که اگر این اندیکاتور از ناحیه سبز رنگ به ناحیه‌ی قرمز رنگ وارد شود، بیانگر این هست که ذرات ۲۵ میکرون روغن دستگاه از حد مجازش بیشتر شده و باید روغن تعویض شود. یک شیر هم در پایین پاورپک در نظر گرفته شده که برای تخلیه روغن می‌باشد. همچنین یک دماسنج هم در قسمت کناری برای کنترل دمای روغن در نظر گرفته شده است. ظرفیت مخزن پاورپک ۱۰۰ لیتر می‌باشد و برای پر کردن روغن هم از یک درب باک مانند استفاده شده است.

شکل (۳-۱۱)



شکل (۳-۱۱) سیستم پاورپک

<sup>1</sup> indicator

### ۳-۳-۱-۲-۳- سیستم اکچویتور

اکچویتور بارگذاری در فشار ۲۱۰ بار دارای ظرفیت بارگذاری ۱۰ تن و در فشار ۱۶۰ بار دارای ظرفیت بارگذاری دینامیکی ۶ تن می‌باشد، فشارهای فوق مبنای طراحی با نرم‌افزار SAP می‌باشد. اکومولاتوری (مخزن قرمز رنگ) که در اکچویتور در نظر گرفته شده وظیفه‌ی تامین فشار روغن در اکچویتور را دارد. اکومولاتور بیش از ۵۰ بار با گاز ازت پر شده است، اگر در بارگذاری‌های دینامیکی دبی کم بیاید اکومولاتور مقدار کمبود دبی را جبران کرده و روغن را به اکچویتور تزریق می‌کند.

سرووالی که بر روی اکچویتور نصب شده دارای دبی ۴۰ لیتر بر دقیقه بوده و با استفاده از آن می‌توانیم بارهای هارمونیک سینوسی و حتی با ارتقاء کد بارهای لرزه‌ای را به نمونه وارد کنیم، که با استفاده از یک کابل به سیستم دیتالاگر و کنترلر دستگاه (سیستم کامپیوتری) متصل شده است.

حسگر جابه‌جایی که برای اکچویتور در نظر گرفته شده دارای کورس ۱۵۰ میلی‌متر بوده (به اندازه‌ی کورس اکچویتور) و به صورت مغناطیسی (غیر تماسی) عمل می‌کند. به این علت، به صورت غیر تماسی در نظر گرفته شده که خطرات ناشی از بارهای دینامیکی و ضربه‌های وارده را حذف کند و آسیبی به حسگر وارد نشود. حسگر در نظر گرفته شده دارای دقت بسیار بالایی بوده به گونه‌ای که در کورس ۱۵۰ میلی‌متر میزان خطا ۰/۰۱ میلی‌متر می‌باشد.

قسمت بعدی سیستم بارگذاری اکچویتور لودسل<sup>۱</sup> می‌باشد که به قسمت پایین شفت اکچویتور پیچ شده است، لودسل در نظر گرفته شده S شکل بوده که ظرفیت کشش و فشار ۱۰ تن را دارد. دنده‌های پیچ لودسل پیچ M30 با گام ۲ می‌باشد که می‌توان هر عنصری که قرار هست بارگذاری به روی آن انجام شود را با شفت در هر طول دل‌خواهی به لودسل متصل کرد. شکل (۳-۱۲)

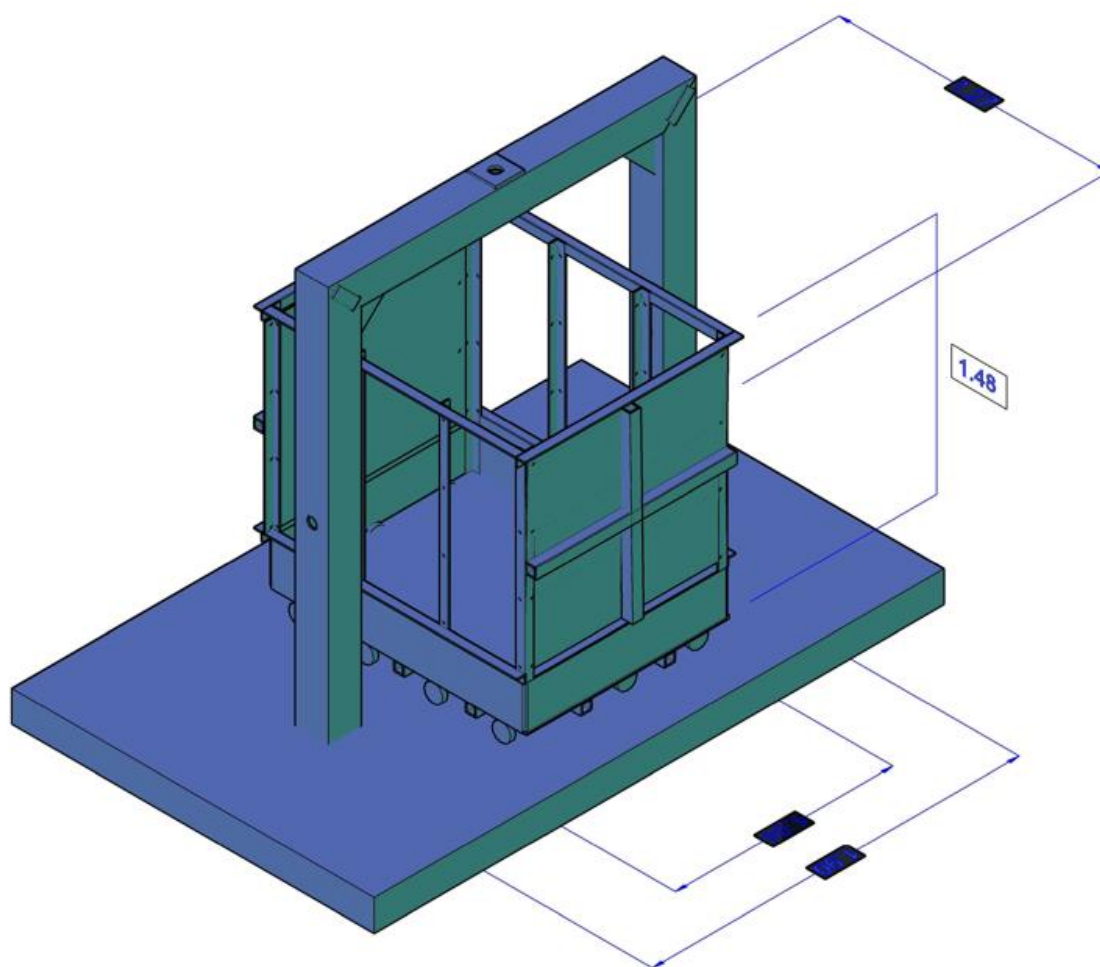
<sup>۱</sup> Loadcell



شکل (۳-۱۲) سیستم اکچویتور

### ۳-۳-۱-۲-۴- محفظه‌ی آزمایش و اجزای آن

مخزن خاک طراحی شده قابلیت نگهداری نمونه‌های خاک و پتانسیل انواع مدلسازی‌ها را دارا می‌باشد 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 آب‌بند به جهت انجام آزمایش‌های اشباع و در کف به صورت صلب به منظور جلوگیری از هرگونه تغییر شکل ساخته شده است. در جداره‌های عرضی درب‌های کشویی برای بارگذاری‌های جانبی و تخلیه مصالح تعبیه شده است. لازم به ذکر است غلتک‌های با قابلیت چرخش  $360^\circ$  درجه به منظور جابه‌جایی و سهولت در آماده‌سازی نمونه، عملیات بارش و تخلیه استفاده گردیده است. شکل (۳-۱۳)



شکل (۳-۱۳) محفظه‌ی آزمایش و قاب بارگذاری

### ۳-۳-۱-۲-۵- 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 جامع 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 ذخیره سازی از دیگر دلایل استفاده از سیستم کامپیوتری می‌باشد. لازم به ذکر است بهره‌برداری‌ها و قرائت‌های دستی خطاهای آزمایش را زیاد می‌کند. اکچویاتور خطی دارای یک سنسور

موقعیت و یک فشارسنج می‌باشد. سنسور اندازه‌گیری جابه‌جایی<sup>۱</sup> جهت اندازه‌گیری تغییر مکان‌ها استفاده می‌شود. سنسور اندازه‌گیری بار محوری<sup>۲</sup> نیز دارای ظرفیت کششی و فشاری مشخص و دارای کیفیت و دقت مناسب برای انجام آزمایش‌های سیکلی می‌باشد. دیتالاگر<sup>۳</sup> در نظر گرفته شده نیز وظیفه-ی تبادل اطلاعات بین سیستم کنترلر و سنسورها را برعهده دارد. شکل (۳-۱۴)



شکل (۳-۱۴) سیستم کنترل قرائت و ثبت داده‌ها؛ دیتالاگر، سیستم کامپیوتری

#### ۱. دیتالاگر:

این قسمت از دستگاه شامل ۸ کانال ورودی و با دقت ۱۶ بیت و سرعت داده برداری ۲۰۰ کیلو هرتز برای هر کانال بوده و با استفاده از آن می‌توان خروجی حسگرهای مختلف را پردازش، اندازه‌گیری، مشاهده و ثبت نمود. همچنین این دستگاه دارای ۲ کانال خروجی با دقت ۱۶ بیت و سرعت ۲۰۰ کیلو

<sup>۱</sup> LVDT

<sup>۲</sup> Load cell

<sup>۳</sup> Data logger

هرتز برای کنترل و فرمان دهی سیستم‌های بارگذاری سیکلی می‌باشد.

## ۲. نرم افزار دستگاه:

برای انجام کلیه مراحل آزمایش مونوتونیک و سیکلی یک نرم افزار جامع طراحی شده است. با استفاده از این نرم افزار امکان کالیبراسیون حسگرهای مختلف فراهم شده است. همچنین از جمله قابلیت‌های دیگر این نرم افزار شامل تعریف الگوهای مختلف بارگذاری سیکلی، کنترل و فرماندهی سیستم‌های محرک سیکلی افقی و قائم، پردازش، مشاهده و ثبت داده‌های خروجی حسگرهای مختلف در طول آزمایش و به صورت لحظه‌ای و نیز تهیه خروجی‌های آزمایش در قالب فایل با فرمت نرم افزار اکسل<sup>۱</sup> می‌باشد.

## ۳. کالیبراسیون دستگاه:

همانطور که گفته شد دستگاه ساخته شده به صورت PID کنترل کار می‌کند که باید قبل از انجام تست‌های اصلی، آزمایشاتی به منظور کالیبره کردن دستگاه انجام شود. به همین منظور کلیه‌ی سنسورهای نصب شده بر روی دستگاه کالیبره شده و عملیات کالیبراسیون بر روی سنسورها انجام گرفته و معادلات کالیبراسیون به دستگاه وارد گردیده است.

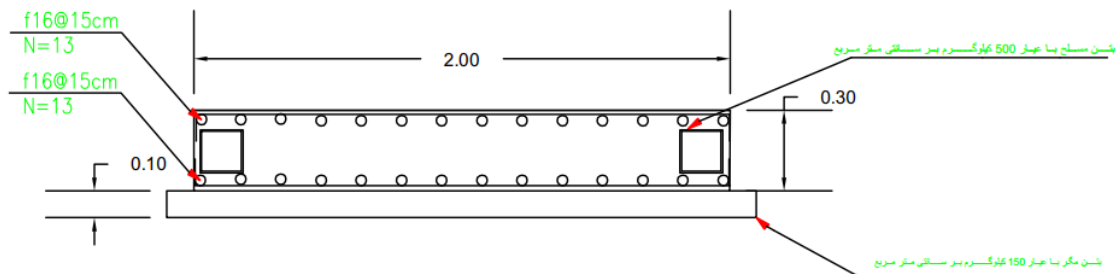
## ۳-۱-۳-۳- فونداسیون دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس

جهت طراحی فونداسیون دستگاه مدلسازی فیزیکی از نرم افزار Etabs و SAP استفاده شده است. همان‌طور که گفته شد سیستم بارگذاری این دستگاه قابلیت اعمال نیروی استاتیکی ۱۰ تن و اعمال نیروی دینامیکی ۶ تن را دارا می‌باشد، طبق آزمایشات انجام گرفته دستگاه قادر است تا ۴۰ تن بارگذاری استاتیکی و ۱۵ تن بارگذاری دینامیکی انجام دهد، که در مدلسازی در نرم افزار ایتبس بر روی هر یک از پایه‌ها ۲۰ تن بار استاتیکی و ۷/۵ تن بار دینامیکی (بار دینامیکی به صورت ضربه‌ای)

<sup>۱</sup> Excel



اعمال گردید. با در نظر گرفتن محدودیت اجرای ضخامت ۴۰ سانتی متری نتایج طبق دتایل زیر به دست آمد. شکل (۲۰-۳) و (۲۱-۳)



شکل (۱۵-۳) دتایل اجرایی فونداسیون



شکل (۱۶-۳) روند ساخت فونداسیون دستگاه

### ۳-۳-۱-۴- مجموعه سیستم بارش ماسه

با توجه به نیاز به انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی در زمینه مکانیک خاک، تهیه نمونه کاملاً همگن از نمونه‌های ماسه از موارد بسیار مهم از دیدگاه تکرارپذیری آزمایش و نیز زمان و انرژی لازم برای نمونه‌سازی می‌باشد. در بسیاری از موارد، این کار به صورت دستی انجام می‌گردد که در این حالت نحوه



مهارت و دقت و حوصله فردی که بارش ماسه را انجام می‌دهد، در یکنواختی نمونه از دیدگاه دانسیته بسیار تاثیرگذار است. علاوه بر آن، زمان و انرژی قابل توجهی در هر آزمایش صرف تهیه نمونه می‌گردد و خصوصاً در شرایطی که نمونه دارای ابعاد قابل توجهی است، این کار بسیار مشکل می‌شود. لذا با هدف ساخت نمونه همگن ماسه در آزمایشگاه و نیز صرفه‌جویی در زمان کاربر دستگاه مکانیزه جهت این کار در آزمایشگاه پژوهشی ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی شاهرود ساخته شده است.

در سیستم‌های موجود برای تهیه نمونه ماسه‌ای در آزمایشگاه معمولاً این کار به روش دستی انجام می‌گیرد که علاوه بر اتلاف زمان و انرژی قابل توجه (خصوصاً در تست‌های بزرگ مقیاس) بسته به میزان دقت فردی که عملیات بارش ماسه را انجام می‌دهد، میزان دقت در همگنی و یکنواختی نمونه نیز متفاوت است.

به منظور امکان تهیه نمونه‌های ماسه‌ای در کمترین زمان ممکن و کمترین صرف انرژی و نیز با دقت بالا از نظر میزان یکنواختی و همگنی نمونه، سیستم بارش مکانیزه برای تهیه نمونه ماسه با دانسیته‌های متفاوت طراحی و اجرا گردیده است.

در این مطالعه 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.

### ۳-۱-۴-۱- خصوصیات و اجزای تشکیل دهنده

در این دستگاه از یک سیستم سازه‌ای برای نگهداری جرثقیل و مخزن خاک استفاده شده است که مشخصات آن به طور کلی عبارت است از:

۱- سازه نگهدارنده‌ی جرثقیل و مخزن بارش:

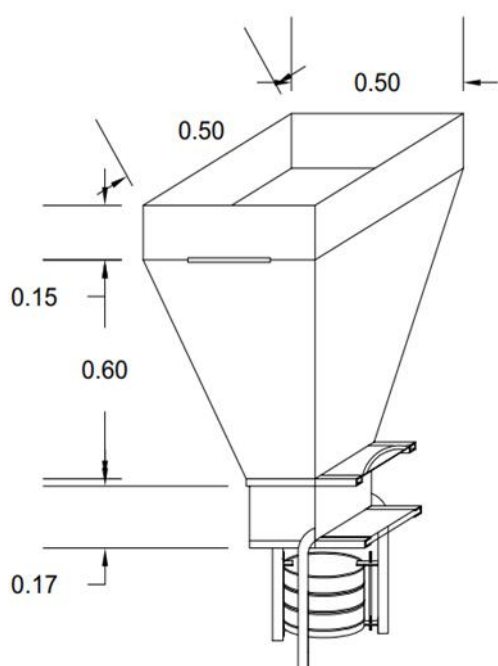
سازه نگهدارنده‌ی جرثقیل شامل ۲ پایه بوده که دارای ۳/۲۰ متر ارتفاع از کف بوده و دارای ۱/۴۷ متر عرض می‌باشد که از قوطی ۵\*۹۰\*۹۰ میلی‌متر ساخته شده است. جهت حرکت جرثقیل بر روی دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس و یا استفاده در سایر قسمت‌های آزمایشگاه به صورت چرخدار ساخته شده و متحرک می‌باشد.

## ۲- جرثقیل دستگاه:

جرثقیل با توجه به نیاز دارای ظرفیت ۱ تن بوده و دارای ارتفاع ۲/۸۰ متر می‌باشد. شکل (۳-۲۲)

## ۳- سیستم بارش ماسه:

باکس سیستم بارش ماسه از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت اول مخزن سیستم بارش ماسه می‌باشد که دارای ظرفیت ۱۵۰ کیلوگرم بوده و از ورق فلزی به ضخامت دو میلی‌متر می‌باشد. قسمت بعدی سیستم بارش ماسه مخزن ساعت شنی دستگاه بوده که با یک ورق با ضخامت ۲ میلی‌متر و به صورت کشویی از مخزن جدا شده است، و در قسمت تحتانی دارای یک صفحه چوبی مشبک بوده که ماسه پس از ریختن بر روی این صفحه‌ی چوبی به صورت ساعت شنی بر روی قسمت دیگر ریخته می‌شود. این قسمت نیز به صورت کشویی بوده و قابل تعویض و استفاده از صفحات چوبی با قطرهای متفاوت می‌باشد، که در حال حاضر ۲ صفحه‌ی مشبک مجزا با قطرهای ۵ و ۱۰ میلی‌متر ساخته شده است. این قسمت نیز دارای ابعاد ۱۹\*۱۹ سانتی‌متر بوده و دارای ظرفیت تقریبی ۵ کیلوگرم می‌باشد. قسمت بعدی دستگاه الک‌ها می‌باشند که در این دستگاه حتی برای جای‌گذاری ۵ الک نیز فضا در نظر گرفته شده و هدف از ساخت این قسمت گرفتن سرعت ریزش و استفاده از شرایط استاندارد می‌باشد که الک‌های استاندارد این شرایط را فراهم می‌کنند. این قسمت دارای سه پایه لوله‌ای شکل بوده که دارای قطر ۲۵ میلی‌متر که هم محلی برای نگهداری الک‌های از طریق متصل کردن الک‌های همراه با واشر و مهره به سیستم بارش برای جلوگیری از به هم خوردن تعادل و هم تکیه‌گاهی جهت نگهداری سایر قسمت‌های سیستم بارش می‌باشد. شکل (۳-۱۷)



شکل (۳-۱۷) نمای کلی از سیستم بارش ماسه

### ۳-۲-۳- روش انجام آزمایش

هدف از انجام برنامه آزمایش‌ها، بررسی تاثیر پارامترهای مختلف ظرفیت باربری ریزشمع‌ها بر روی خاک ماسه‌ای می‌باشد. در این آزمایش‌ها تلاش شده است تا اثر شعاع تزریق، چسبندگی جدار، کوبش و تغییرات قطر لوله‌های 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 حادقل و حداکثر و زاویه اصطکاک داخلی، خاک مورد بررسی در حجم مد نظر آماده شد. در ابتدا برای بررسی شعاع تزریق نمونه‌ها به صورت دستی در بیرون ساخته شد، به این صورت لوله‌های PVC در قطرهای ۹۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ میلی‌متر به طول ۱۱۰ سانتی‌متر برش داده شد، بعد لوله‌های PVC مد نظر را در جهت طولی به ۲ قسمت مساوی برش داده و بر روی زمین قرار داده شد. در ادامه لوله‌های فلزی به طول ۹۰ سانتی‌متر و قطر ۲ اینچ را که درون آن میلگرد قرار داده شده را روی آن قرار داده و بعد دوغاب آماده شده را روی لوله فلزی ریخته و ماسه بر روی آن پاشیده می‌شود و به منظور حذف ظرفیت

باربری نوک بعد از گیرش سیمان با سنگ فرز نوک نمونه تیز گردید، این روند برای هر ۳ شعاع تزریق و هر دو سمت لوله انجام شد. حال به منظور بررسی شعاع تزریق در تراکم نسبی ۴۵ 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 (۴۵ درصد)، تا ۳۰ سانتی‌متری (به گونه‌ای که انتهای میکروپایل از کف جعبه حداقل ۳۰ سانتی‌متر فاصله داشته باشد). ریخته و بعد میکروپایل‌ها درون جعبه منتقل شد. پس از قرارگیری میکروپایل‌ها ادامه‌ی روند قبلی برای پر کردن جعبه به گونه‌ای که ۴ سانتی‌متر از لوله‌ها بیرون باشد، انجام گرفت. در ادامه پس از پر کردن جعبه سطح روی جعبه صاف و کلاهی به ابعاد ۲۰\*۱۰۰\*۱۰۰ میلی‌متر بر روی لوله قرار گرفت، پس از قرارگیری میکروپایل‌ها در زیر سیستم اکچویتور، میزان جابه‌جایی نهایی میکروپایل توسط سیستم دستگاه بارگذاری اعمال گردید. کلیه بارگذاری‌های استاتیکی و کرنش کنترل با حداکثر جابه‌جایی ۷۰ میلی‌متر و نرخ جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است پس از هر آزمایش می‌بایست خاک مخزن به دلیل بر هم خوردن میزان تراکم تخلیه گردیده است. شکل (۳-۱۸) روند نمونه سازی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۸) نمونه سازی جهت انجام آزمایش در تراکم نسبی ۴۵ درصد



در ادامه به منظور انجام آزمایش‌ها در تراکم نسبی ۹۰ درصد نیز خاک به صورت دستی به درون جعبه منتقل گردید و سپس در لایه‌های ۱۰ سانتی‌متر کوبیده و تحت تراکم قرار گرفت. لازم به ذکر است پس از هر آزمایش می‌بایست خاک مخزن به دلیل برهم خوردن میزان تراکم تخلیه گردیده است. شکل (۱۹-۳)

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 رابطه‌ی (۱) تراکم نسبی به شرح ذیل استفاده شده است.

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

$D_r$ : تراکم نسبی؛

$\gamma_d$ : وزن مخصوص؛

$\gamma_{d \min}$ : وزن مخصوص حداقل ماسه؛

$\gamma_{d \max}$ : وزن مخصوص حداکثر ماسه؛



شکل (۱۹-۳) نمونه سازی جهت انجام آزمایش در تراکم نسبی ۹۰ درصد

همانطور که در شکل (۳-۲۰) مشاهده می‌شود در زمان بارگذاری میکروپایل‌ها به دلیل اثر گذاری چسبندگی جدار ماسه اطراف میکروپایل‌ها و ایجاد اصطکاک حالت ریزشی به سمت داخل پیدا کرده است.



شکل (۳-۲۰) نمایش اثر گذاری چسبندگی جدار در اثر بارگذاری

در ادامه آزمایش‌های به منظور بررسی اثر کوبش بر ظرفیت باربری میکروپایل‌های به طول ۱ متر و قطرهای ۱، ۲ و ۳ اینچ به صورت درجا و کوبشی در داخل جعبه دستگاه قرار داده شد و نتایج آن به منظور مقایسه‌ی اثر کوبش بر ظرفیت باربری مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۳-۲۱).



شکل (۳-۲۱) میکروپایل‌های مورد استفاده به منظور بررسی اثر کوبش

### ۳-۳-۳- کالیبره کردن دستگاه به منظور انجام آزمایش‌ها

همان‌طور که ذکر شد در این مطالعه در کلیه‌ی آزمایش‌ها از نرخ جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. در شکل زیر پس از بالا و پایین کردن عددهای PID کالیبراسیون برای تغییر در نرخ جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه آورده شده که صحت انجام آزمایش‌ها در حالت کالیبراسیون در تمامی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. شکل (۳-۲۲)

| Displacement (mm) | Time       | Displacement (mm) | Time       |
|-------------------|------------|-------------------|------------|
| 17.51000023       | 131.449997 | 12.35000038       | 100.147003 |
| 17.73999977       | 132.459    | 12.60999966       | 101.155998 |
| 17.55999947       | 133.470001 | 12.71000004       | 102.165001 |
| 18.23999977       | 134.479996 | 12.93999958       | 103.175003 |
| 18.07999992       | 135.490005 | 13.11999989       | 104.184998 |
| 18.43000031       | 136.498993 | 13.22999954       | 105.195999 |
| 18.47999954       | 137.509003 | 13.38000011       | 106.205002 |
| 18.77000046       | 138.518997 | 13.65999985       | 107.214996 |
| 18.71999931       | 139.529007 | 13.93000031       | 108.224998 |
| 18.89999962       | 140.539001 | 13.60000038       | 109.235001 |
| 19.01000023       | 141.548004 | 13.18999958       | 110.245003 |
| 19.29000092       | 142.557007 | 14.14000034       | 111.253998 |
| 19.61000061       | 143.567993 | 14.40999985       | 112.263    |
| 19.64999962       | 144.578003 | 14.43999958       | 113.274002 |
| 20.05999947       | 145.587997 | 14.73999977       | 114.283997 |
| 20.11000061       | 146.597    | 15.06999969       | 115.292999 |
| 20.20000076       | 147.606995 | 15.10000038       | 116.303001 |
| 20.47999954       | 148.617004 | 15.31999969       | 117.311996 |
| 20.46999931       | 149.626999 | 15.35000038       | 118.322998 |
| 20.61000061       | 150.636993 | 15.60999966       | 119.333    |
| 20.86000061       | 151.647003 | 15.64999962       | 120.343002 |
| 21.03000069       | 152.656006 | 15.69999981       | 121.351997 |
| 21.18000031       | 153.666    | 16.05999947       | 122.361    |
| 21.46999931       | 154.675003 | 16.5              | 123.372002 |
| 21.60000038       | 155.686996 | 16.32999992       | 124.382004 |
| 21.70000076       | 156.697006 | 16.56999969       | 125.391998 |
| 21.59000015       | 157.707001 | 16.79999924       | 126.401001 |
| 22.03000069       | 158.716995 | 16.95999908       | 127.410004 |
| 22.21999931       | 159.725006 | 17.05999947       | 128.421997 |
| 22.34000015       | 160.735001 | 17.12000084       | 129.431    |
|                   |            | 17.96999931       | 130.440994 |

شکل (۳-۲۲) میزان زمان-جابه‌جایی در نرخ جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه



### ۴-۳- برنامه آزمایش‌ها

همانطور که مشاهده می‌شود در جدول (۷-۳) آزمایش‌های که به منظور بررسی شعاع تزریق و چسبندگی جدار در قطرهای مختلف انجام خواهد شد، آورده شده است. در خصوص نام گذاری کد آزمایشات از مخفف  $MP^1$  برای میکروپایل‌ها از کلمه‌ی  $B^2$  برای حالت درجا،  $D^3$  برای حالت کوبشی،  $S^4$  برای حالت نرم (پاشیدن ماسه)،  $R^5$  برای حالت زبر (پاشیدن نخودی) استفاده شده است.

جدول (۷-۳) برنامه آزمایش‌ها به منظور بررسی اثر شعاع تزریق و چسبندگی جدار

| شماره | کد آزمایش       | وضعیت قرارگیری میکروپایل | آلفای باند | قطر میکروپایل (اینچ) | شعاع تزریق (میلی‌متر) | تراکم نسبی خاک (درصد) |
|-------|-----------------|--------------------------|------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| ۱     | MP-B-S-2-65-45  | B                        | S          | ۲                    | ۶۵                    | ۴۵                    |
| ۲     | MP-B-S-2-120-45 | B                        | S          | ۲                    | ۱۲۰                   | ۴۵                    |
| ۳     | MP-B-S-2-170-45 | B                        | S          | ۲                    | ۱۷۰                   | ۴۵                    |
| ۴     | MP-B-R-2-65-45  | B                        | R          | ۲                    | ۶۵                    | ۴۵                    |
| ۵     | MP-B-R-2-120-45 | B                        | R          | ۲                    | ۱۲۰                   | ۴۵                    |
| ۶     | MP-B-R-2-170-45 | B                        | R          | ۲                    | ۱۷۰                   | ۴۵                    |
| ۷     | MP-B-S-2-65-90  | B                        | S          | ۲                    | ۶۵                    | ۹۰                    |
| ۸     | MP-B-S-2-120-90 | B                        | S          | ۲                    | ۱۲۰                   | ۹۰                    |
| ۹     | MP-B-S-2-170-90 | B                        | S          | ۲                    | ۱۷۰                   | ۹۰                    |
| ۱۰    | MP-B-R-2-65-90  | B                        | R          | ۲                    | ۶۵                    | ۹۰                    |
| ۱۱    | MP-B-R-2-120-90 | B                        | R          | ۲                    | ۱۲۰                   | ۹۰                    |
| ۱۲    | MP-B-R-2-170-90 | B                        | R          | ۲                    | ۱۷۰                   | ۹۰                    |
| ۱۳    | MP-B-S-3-80-45  | B                        | S          | ۸۰                   | ۳                     | ۴۵                    |
| ۱۴    | MP-B-S-3-147-45 | B                        | S          | ۱۴۷                  | ۳                     | ۴۵                    |

<sup>1</sup> Micropile

<sup>2</sup> Broed

<sup>3</sup> Driven

<sup>4</sup> Soft

<sup>5</sup> Rough

|    |   |     |   |   |                 |    |
|----|---|-----|---|---|-----------------|----|
| ۴۵ | ۳ | ۲۰۹ | S | B | MP-B-S-3-209-45 | ۱۵ |
| ۹۰ | ۳ | ۸۰  | S | B | MP-B-S-3-80-90  | ۱۶ |
| ۹۰ | ۳ | ۱۴۷ | S | B | MP-B-S-3-147-90 | ۱۷ |
| ۹۰ | ۳ | ۲۰۹ | S | B | MP-B-S-3-209-90 | ۱۸ |

در ادامه نیز در جدول (۸-۳) از برنامه‌های که برای بررسی اثر کوبش آورده شده است مشاهده می‌شود.

جدول (۸-۳) برنامه آزمایش‌ها به منظور بررسی اثر شعاع تزریق و چسبندگی جدار

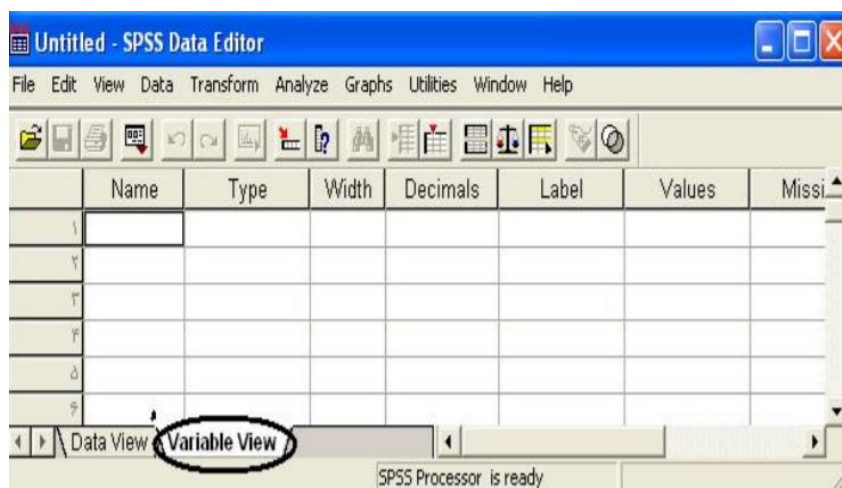
| شماره | کد آزمایش | وضعیت<br>قرارگیری | قطر میکروپایل<br>(اینچ) | تراکم نسبی<br>خاک (درصد) |
|-------|-----------|-------------------|-------------------------|--------------------------|
| ۱     | MP-B-1-45 | B                 | ۱                       | ۴۵                       |
| ۲     | MP-B-2-45 | B                 | ۲                       | ۴۵                       |
| ۳     | MP-B-3-45 | B                 | ۳                       | ۴۵                       |
| ۴     | MP-D-1-45 | D                 | ۱                       | ۴۵                       |
| ۵     | MP-D-2-45 | D                 | ۲                       | ۴۵                       |
| ۶     | MP-D-3-45 | D                 | ۳                       | ۴۵                       |
| ۷     | MP-B-1-45 | B                 | ۱                       | ۹۰                       |
| ۸     | MP-B-2-45 | B                 | ۲                       | ۹۰                       |
| ۹     | MP-B-3-45 | B                 | ۳                       | ۹۰                       |
| ۱۰    | MP-D-1-90 | D                 | ۱                       | ۹۰                       |
| ۱۱    | MP-D-2-90 | D                 | ۲                       | ۹۰                       |
| ۱۲    | MP-D-3-90 | D                 | ۳                       | ۹۰                       |

### ۳-۵- نرم افزار SPSS<sup>۱</sup>

در اکثر تحقیقات با حجم زیادی از داده‌ها مواجه هستیم که اجرای عملیات بر روی داده‌ها حجم وسیعی

<sup>۱</sup> Statistical Package for the Social Science

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 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.



نمایی از نرم افزار SPSS ۱-۱-۴-۱-۳-۳

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



## **فصل ۴: نتایج و تفسیر آن‌ها**

#### ۴-۱- مقدمه

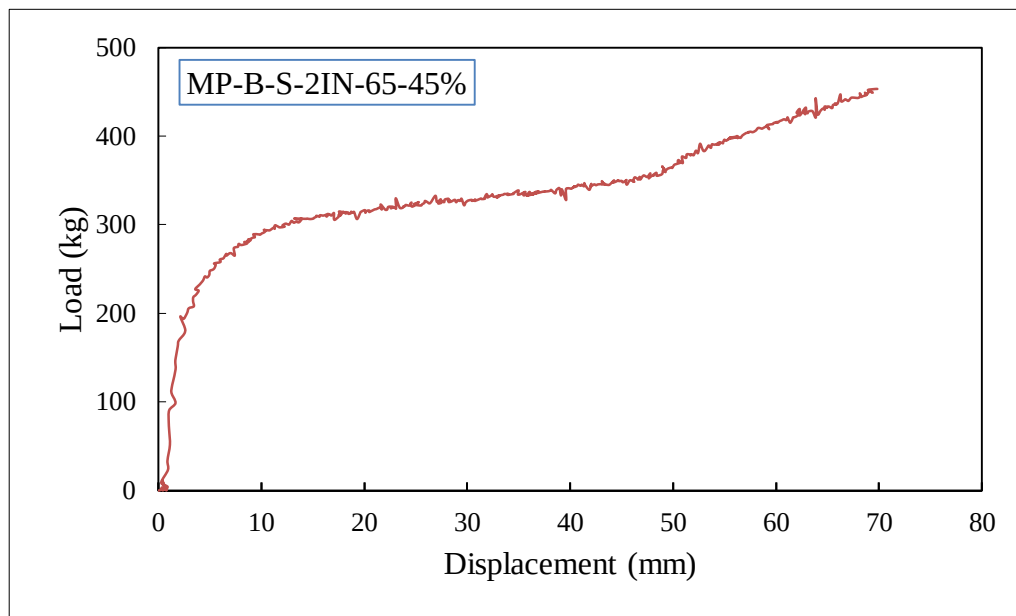
در این فصل تلاش شده است تا نتایج آزمایش‌های مدلسازی فیزیکی بارگذاری استاتیکی کرنش کنترل بر روی میکروپایل‌های با شعاع تزریق، آلفای باند و قطرهای مختلف در خاک‌های با تراکم نسبی متفاوت بیان گردد. همچنین در ادامه تعدادی آزمایش بر روی لوله‌های کوبشی و درجا نیز انجام شده که بتوان اثر کوبش در ظرفیت باربری را نیز بررسی کرد. 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 اثر گذاری پارامتر شعاع تزریق، قطر، چسبندگی جدار (آلفای باند)، تراکم نسبی مختلف در تحمل ظرفیت باربری، تحلیل حساسیت با نرم‌افزار SPSS و نتیجه‌گیری کلی، از مباحث مطرح شده در این فصل خواهند بود.

#### ۴-۲- 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 ۴۵ و ۹۰ درصد در کمترین شعاع تزریق (۶۵ میلی‌متر) ارائه شده است. در ادامه رفتار تغییر ظرفیت باربری در ازای افزایش جابه‌جایی برای هر نمودار مورد تفسیر قرار گرفته است.

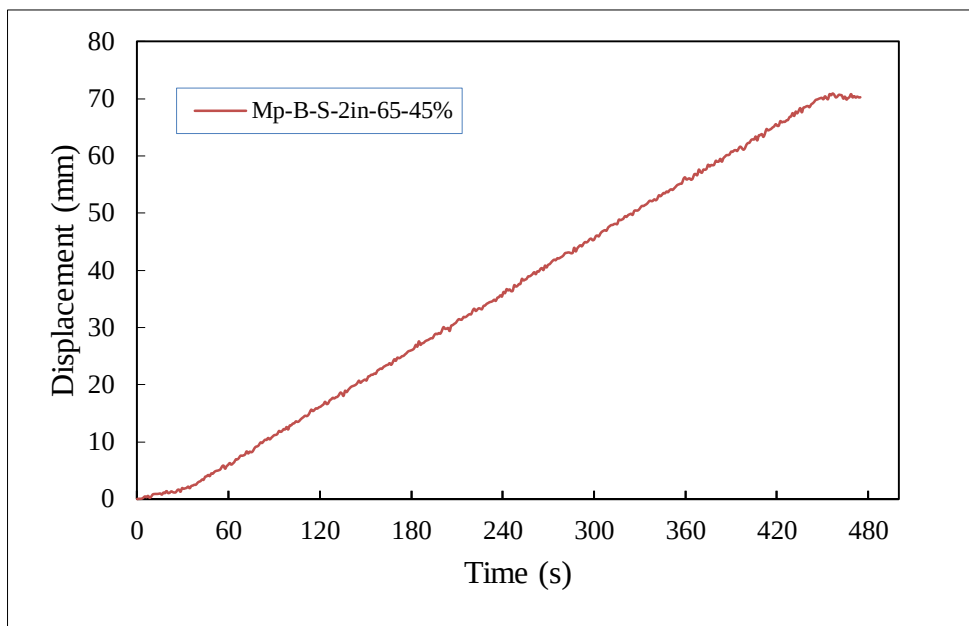
همانطور که در شکل (۴-۱) مشاهده می‌شود، در ابتدا با اعمال نیرو به صورت استاتیکی و با نرخ جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه، میکروپایل تحت اثر نیروی فشاری به منظور رسیدن به حداکثر جابه‌جایی ۷۰ میلی‌متر شروع به حرکت می‌کند. با توجه به شکل (۴-۱) مشاهده می‌گردد در ابتدا میکروپایل تا رسیدن به یک میزان جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر افزایش تقریباً ۲۹۳ کیلوگرمی نیرو را تجربه می‌کند، در ادامه خاک گسیخته شده و به ازای افزایش جابه‌جایی تغییرات کم نیرو مشاهده می‌شود. پس از

رسیدن کلاهک به خاک ناگهان نیرو افزایش یافته و از ۳۵۴ کیلوگرم به ۴۵۳ کیلوگرم می‌رسد. این اختلاف در ظرفیت باربری قبل و بعد از رسیدن کلاهک به خاک را می‌توان ناشی از اثر گذاری مشترک کلاهک و میکروپایل در تحمل بار اعمالی و سهم قابل توجه کلاهک دانست. در نهایت با رسیدن میکروپایل به حداکثر جابه‌جایی تعریف شده ۷۰ میلی‌متر، میکروپایل دیگر افزایش نیرو را تجربه نکرده و نیرو شروع به کاهش می‌کند. قابل ذکر است که اثر گذاری کلاهک در شعاع تزریق ۶۵ میلی‌متر به دلیل قطر کم قابل مشاهده است در شعاع تزریق‌های بیشتر به دلیل افزایش قطر اثر کلاهک کمتر به چشم می‌خورد.



شکل (۴-۱) نمودار بار-جابه‌جایی میکروپایل با شعاع تزریق ۶۵ میلی‌متر در خاک با تراکم نسبی ۴۵ درصد

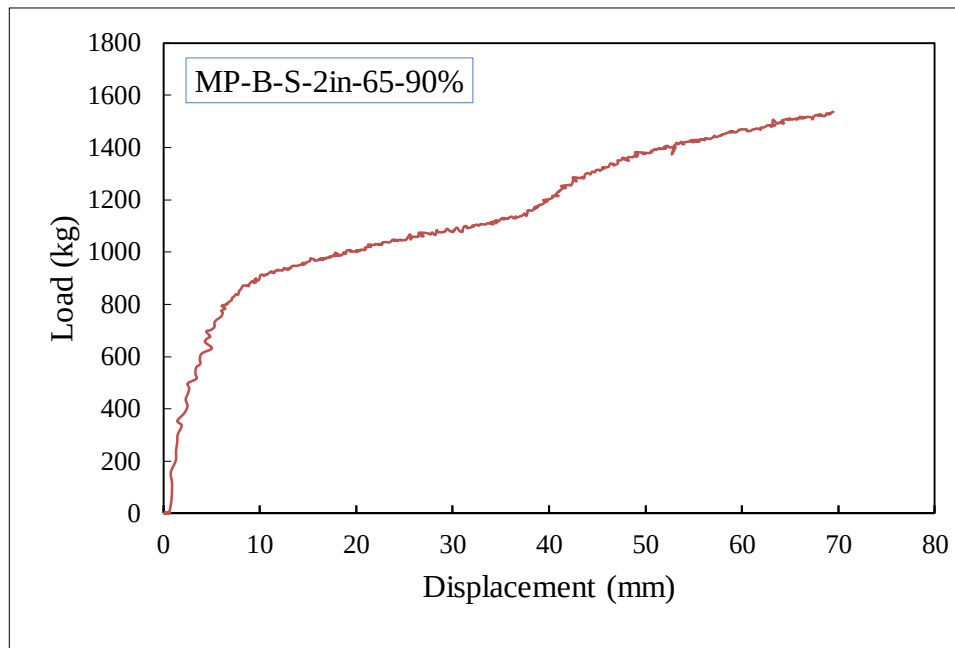
در شکل (۴-۲) نمودار زمان-جابه‌جایی میکروپایل نشان دهنده‌ی افزایش میزان جابه‌جایی و فرو رفتگی میکروپایل در خاک با گذشت زمان می‌باشد. این نشست با زمان سپری شده رابطه خطی داشته و برای همه نمودارها برقرار می‌باشد.



شکل (۲-۴) نمودار زمان-جاب‌جایی میکروپایل با طول ۱ متر و شعاع تزریق ۶۵ میلی‌متر در خاک با تراکم نسبی ۴۵ درصد

در شکل (۳-۴) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با شعاع تزریق ۶۵ میلی‌متر در تراکم نسبی ۹۰ درصد ملاحظه می‌گردد با افزایش مقدار جاب‌جایی ۱۰ میلی‌متر در ابتدا، نیرو به صورت ناگهانی به میزان ۹۱۰ کیلوگرم افزایش می‌یابد. در ادامه نمودار با شیب ملایم افزایش نیرو به جاب‌جایی‌های بیشتر رسیده تا اینکه کلاhek به خاک می‌رسد. با رسیدن کلاhek به خاک، نیرو به صورت ناگهانی از جاب‌جایی ۳۵ میلی‌متر به میزان ۱۱۳۰ کیلوگرم به جاب‌جایی ۷۰ میلی‌متر به میزان ۱۵۳۳ کیلوگرم افزایش یافته و به حداکثر جاب‌جایی خود می‌رسد.





شکل (۳-۴) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با شعاع تزریق ۶۵ میلی‌متر در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد

### ۳-۴- ارزیابی اثر شعاع تزریق، چسبندگی جدار (آلفای باند) و تراکم نسبی

در ادامه اثر شعاع تزریق و چسبندگی جدار در تراکم‌های نسبی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۳-۴-۱- ارزیابی اثر شعاع تزریق و چسبندگی جدار بر ظرفیت باربری

در این قسمت اثر شعاع تزریق و چسبندگی جدار به عنوان دو پارامتر اساسی در ارزیابی رفتار میکروپایل-ها مورد بررسی قرار گرفته است. شعاع‌های تزریق مورد بررسی به ترتیب ۶۵، ۱۲۰ و ۱۷۰ میلی‌متر می‌باشند. همچنین برای بررسی چسبندگی جدار دو نوع چسبندگی مختلف بر روی لوله‌ها ایجاد شد که با نام نرم (S)<sup>۱</sup> و زبر (R)<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند. در ادامه میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها به

<sup>۱</sup> Soft

<sup>۲</sup> Rough

ازای شعاع‌های تزریق، چسبندگی جدار و تراکم‌های نسبی مختلف در جدول (۴-۱) و همچنین نمودارهای مربوطه به همراه تجزیه و تحلیل نتایج آورده شده است.

جدول (۴-۱) ظرفیت باربری‌های میکروپایل به ازای آلفای باند، شعاع تزریق و قطر میکروپایل در تراکم نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد

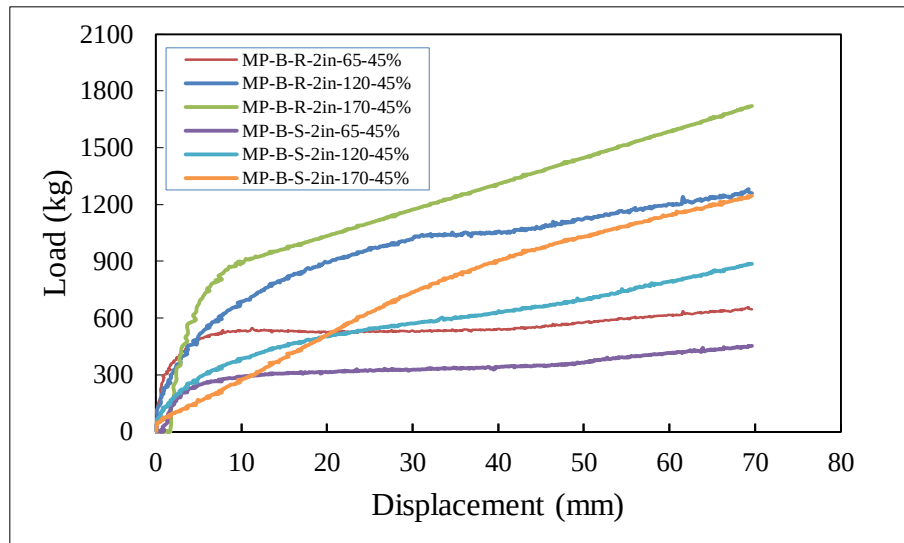
| شماره | کد آزمایش       | وضعیت قرارگیری میکروپایل | آلفای باند | قطر میکروپایل (اینچ) | شعاع تزریق (میلی-متر) | تراکم نسبی خاک (درصد) | ظرفیت باربری خاک (کیلوگرم) | مقایسه با آزمایش مرجع (درصد) |
|-------|-----------------|--------------------------|------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------|
| ۱     | MP-B-S-2-65-45  | B                        | S          | ۲                    | ۶۵                    | ۴۵                    | ۴۵۳                        | ۰                            |
| ۲     | MP-B-S-2-120-45 | B                        | S          | ۲                    | ۱۲۰                   | ۴۵                    | ۸۹۱                        | ٪۹۷                          |
| ۳     | MP-B-S-2-170-45 | B                        | S          | ۲                    | ۱۷۰                   | ۴۵                    | ۱۲۴۸                       | ٪۱۷۵                         |
| ۴     | MP-B-R-2-65-45  | B                        | R          | ۲                    | ۶۵                    | ۴۵                    | ۶۴۸                        | ٪۴۳                          |
| ۵     | MP-B-R-2-120-45 | B                        | R          | ۲                    | ۱۲۰                   | ۴۵                    | ۱۲۲۵                       | ٪۱۷۰                         |
| ۶     | MP-B-R-2-170-45 | B                        | R          | ۲                    | ۱۷۰                   | ۴۵                    | ۱۶۹۰                       | ٪۲۷۳                         |
| ۷     | MP-B-S-2-65-90  | B                        | S          | ۲                    | ۶۵                    | ۹۰                    | ۱۵۳۷                       | ۰                            |
| ۸     | MP-B-S-2-120-90 | B                        | S          | ۲                    | ۱۲۰                   | ۹۰                    | ۳۰۳۳                       | ٪۹۷                          |
| ۹     | MP-B-S-2-170-90 | B                        | S          | ۲                    | ۱۷۰                   | ۹۰                    | ۴۵۴۸                       | ٪۱۹۶                         |
| ۱۰    | MP-B-R-2-65-90  | B                        | R          | ۲                    | ۶۵                    | ۹۰                    | ۲۳۱۱                       | ٪۵۰                          |
| ۱۱    | MP-B-R-2-120-90 | B                        | R          | ۲                    | ۱۲۰                   | ۹۰                    | ۴۳۲۱                       | ٪۱۸۱                         |
| ۱۲    | MP-B-R-2-170-90 | B                        | R          | ۲                    | ۱۷۰                   | ۹۰                    | ۶۲۰۰                       | ٪۳۰۳                         |

در ادامه نمودارهای بار-جاب‌جایی به ازای شعاع‌های تزریق و چسبندگی جدارهای مختلف میکروپایل در تراکم‌های نسبی مختلف شرح داده می‌شود:

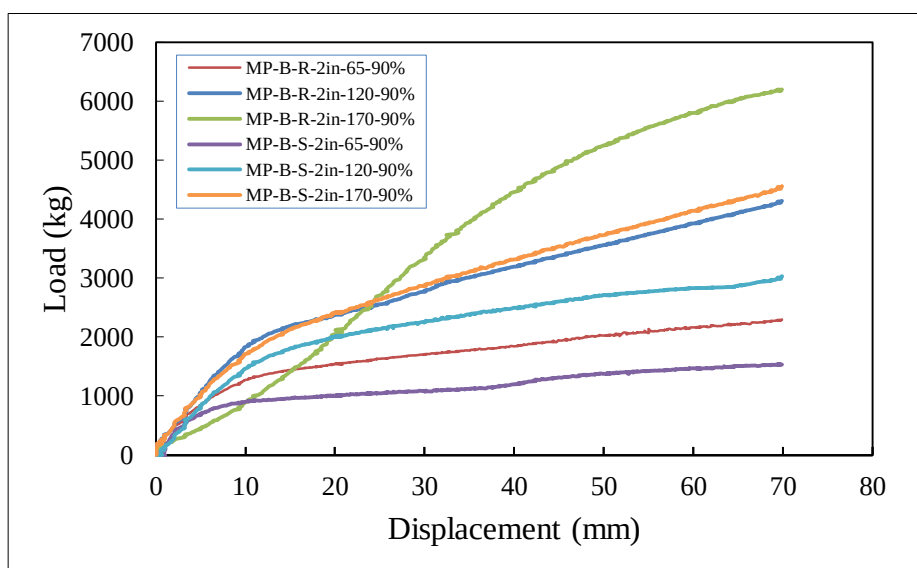
همان گونه که در نمودارهای (۴-۴) و (۵-۴) برای تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد نشان داده شده است، مشاهده می‌شود به ازای افزایش شعاع تزریق و چسبندگی جدار ظرفیت باربری افزایش می‌یابد که نشان از اثرگذاری چسبندگی جدار و شعاع تزریق دارد. همچنین با بررسی نمودارها مشاهده می‌شود که در شعاع تزریق ۶۵ میلی‌متر در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد گسیختگی زودتر در میکروپایل‌ها

اتفاق می‌افتد که اثر گذاری شعاع تزریق در ظرفیت باربری را نشان می‌دهد، که هر مقدار شعاع تزریق افزایش پیدا کند، میکروپایل بار بیشتری را تحمل کرده و دیرتر به گسیختگی می‌رسد.

نمودارهای بار-جاب‌جایی به ازای شعاع‌های تزریق و چسبندگی جدار مختلف میکروپایل در تراکم نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد خاک به شرح ذیل می‌باشد:



شکل (۴-۴) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با شعاع تزریق و چسبندگی جدار مختلف در خاک با تراکم نسبی ۴۵ درصد



شکل (۴-۵) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با شعاع تزریق و چسبندگی جدار مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد

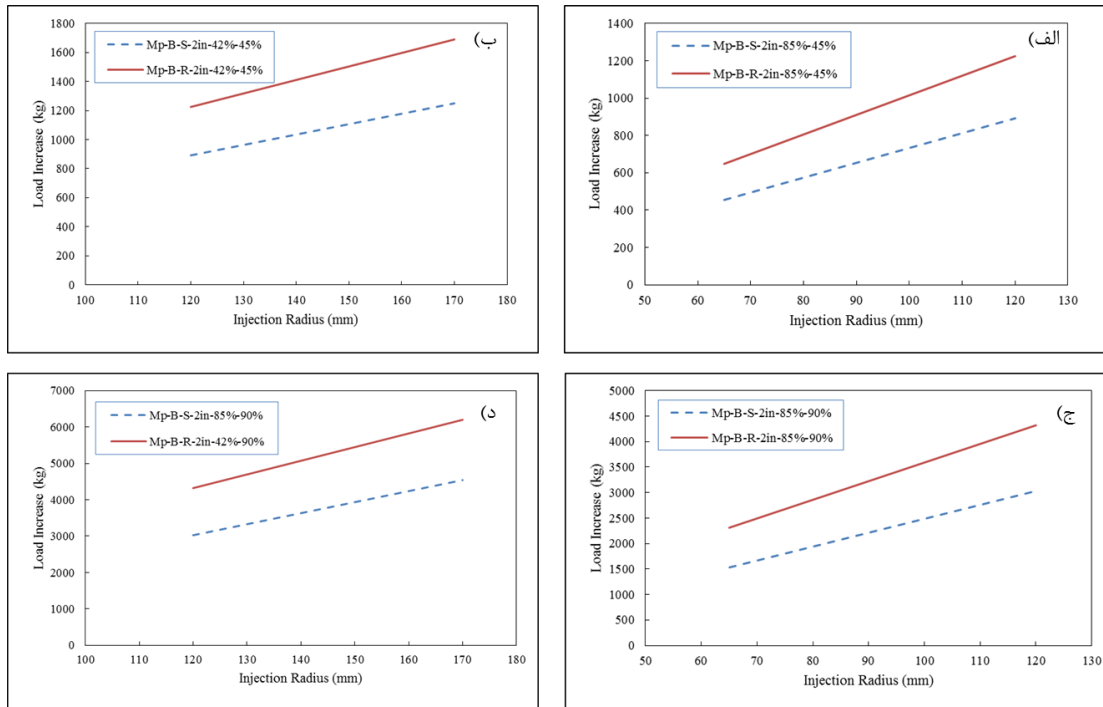
پس از بررسی جدول (۹-۴) و نمودارهای (۶-۴) الی (۹-۴) مرتبط با میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات شعاع تزریق ۸۵ و ۴۲ درصدی در چسبندگی جدار و تراکم‌های نسبی مختلف، ذکر نکات ذیل ضروری به نظر می‌رسد:

در تراکم نسبی ۴۵ درصدی خاک، ۸۵ درصد افزایش شعاع تزریق میکروپایل (افزایش شعاع تزریق از ۶۵ میلی‌متر به ۱۲۰ میلی‌متر) در چسبندگی جدار مختلف، به صورت میانگین منجر به افزایش ۹۲/۸۷ درصدی در ظرفیت باربری می‌گردد.

در تراکم نسبی ۴۵ درصدی خاک، ۴۲ درصد افزایش شعاع تزریق میکروپایل (افزایش شعاع تزریق از ۱۲۰ میلی‌متر به ۱۷۰ میلی‌متر) در چسبندگی جدار مختلف، به صورت میانگین منجر به افزایش ۳۹/۰۴ درصدی در ظرفیت باربری می‌گردد.

در تراکم نسبی ۹۰ درصدی خاک، ۸۵ درصد افزایش شعاع تزریق میکروپایل (افزایش شعاع تزریق از ۶۵ میلی‌متر به ۱۲۰ میلی‌متر) در چسبندگی جدار مختلف، به صورت میانگین منجر به افزایش ۹۲/۱۰ درصدی در ظرفیت باربری می‌گردد.

در تراکم نسبی ۹۰ درصدی خاک، ۴۲ درصد افزایش شعاع تزریق میکروپایل (افزایش شعاع تزریق از ۱۲۰ میلی‌متر به ۱۷۰ میلی‌متر) در چسبندگی جدار مختلف، به صورت میانگین منجر به افزایش ۴۶/۷۰ درصدی در ظرفیت باربری می‌گردد.



شکل (۴-۶) الف- نمودار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش ۸۵ درصدی شعاع تزریق، نسبت به تغییرات چسبندگی جدار در تراکم نسبی ۴۵ درصد ب- نمودار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش ۴۲ درصدی شعاع تزریق، نسبت به تغییرات چسبندگی جدار در تراکم نسبی ۴۵ درصد ج- نمودار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش ۸۵ درصدی شعاع تزریق، نسبت به تغییرات چسبندگی جدار در تراکم نسبی ۹۰ درصد د- نمودار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش ۴۲ درصدی شعاع تزریق، نسبت به تغییرات چسبندگی جدار در تراکم نسبی ۹۰ درصد

جدول (۴-۲) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل به ازای افزایش شعاع تزریق و چسبندگی جدار مختلف در تراکم-های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد

| تراکم نسبی (درصد) | تغییرات شعاع تزریق (میلی‌متر) | تغییرات چسبندگی جدار | افزایش ظرفیت باربری (درصد) |
|-------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------------|
| ۴۵٪               | ۶۵ میلی‌متر به ۱۲۰ میلی‌متر   | نرم                  | ۹۶/۷٪                      |
|                   |                               | زبر                  | ۸۹/۰۴٪                     |
|                   | ۱۲۰ میلی‌متر به ۱۷۰ میلی‌متر  | نرم                  | ۴۰/۰۷٪                     |
|                   |                               | زبر                  | ۳۸/۰۱٪                     |
| ۹۰٪               | ۶۵ میلی‌متر به ۱۲۰ میلی‌متر   | نرم                  | ۹۷/۳٪                      |
|                   |                               | زبر                  | ۸۶/۹۰٪                     |
|                   | ۱۲۰ میلی‌متر به ۱۷۰ میلی‌متر  | نرم                  | ۴۹/۹٪                      |
|                   |                               | زبر                  | ۴۳/۵٪                      |

پس از بررسی جدول (۳-۴) ارائه شده مرتبط با میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات چسبندگی جدار در شعاع‌های تزریق و تراکم‌های نسبی مختلف، ذکر نکات ذیل ضروری به نظر می‌رسد:

در تغییرات چسبندگی جدار خاک، در شعاع تزریق ۶۵ میلی‌متر و در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد به ترتیب منجر به افزایش ۴۳ و ۵۰ درصدی ظرفیت باربری می‌گردد.

در تغییرات چسبندگی جدار خاک، در شعاع تزریق ۱۲۰ میلی‌متر و در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد به ترتیب منجر به افزایش ۳۷/۵ و ۴۲/۵ درصدی ظرفیت باربری می‌گردد.

در تغییرات چسبندگی جدار خاک، در شعاع تزریق ۱۷۰ میلی‌متر و در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد به ترتیب منجر به افزایش ۳۵/۴۰ و ۳۶/۳۰ درصدی ظرفیت باربری می‌گردد.

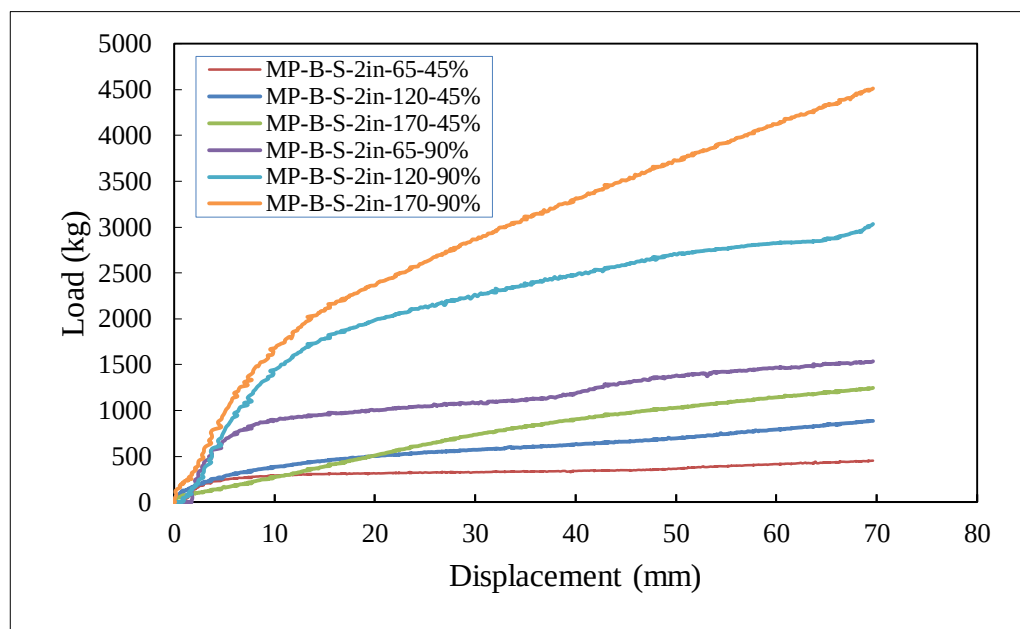
در انتها می‌توان نتیجه گرفت که در تغییرات چسبندگی جدار در شعاع‌های تزریق ۶۵، ۱۲۰ و ۱۷۰ میلی‌متر در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد به ترتیب ۳۸/۶۳ و ۴۲/۹۳ درصد ظرفیت باربری مشاهده می‌گردد.

جدول (۳-۴) میزان ظرفیت باربری میکروپایل به ازای تغییرات چسبندگی جدار در شعاع‌های تزریق مختلف در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد

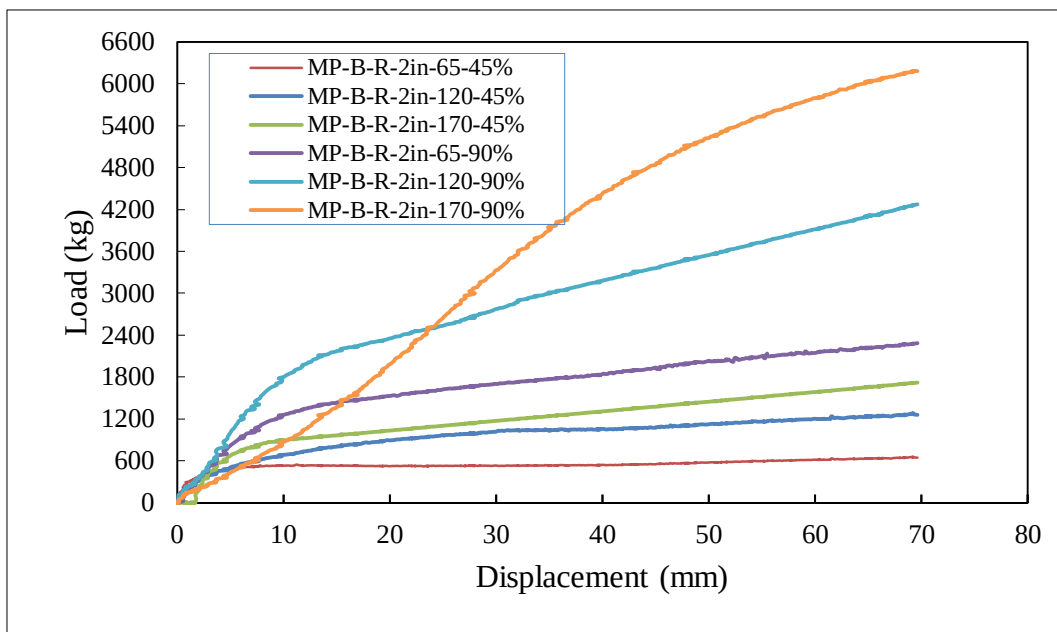
| تغییرات چسبندگی جدار | شعاع تزریق (میلی‌متر) | تراکم نسبی (درصد) | افزایش ظرفیت باربری (درصد) |
|----------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|
| نرم به زبر           | ۶۵                    | ۴۵                | ٪۴۳                        |
|                      |                       | ۹۰                | ٪۵۰                        |
|                      | ۱۲۰                   | ۴۵                | ٪۳۷/۵                      |
|                      |                       | ۹۰                | ٪۴۲/۵                      |
|                      | ۱۷۰                   | ۴۵                | ٪۳۵/۴                      |
|                      |                       | ۹۰                | ٪۳۶/۳                      |

### ۴-۳-۲- ارزیابی اثر تراکم نسبی بر ظرفیت باربری میکروپایل در شعاع‌های تزریق و چسبندگی جدار مختلف

در این قسمت اثر تراکم نسبی به عنوان پارامتر اساسی و تاثیر گذار در ارزیابی رفتار میکروپایل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. تراکم‌های نسبی مختلف مورد استفاده ۴۵ و ۹۰ درصد می‌باشند. در ادامه میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها به ازای چسبندگی جدار و شعاع‌های تزریق مختلف در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد در جدول ذیل و همچنین نمودارهای مربوطه به همراه تجزیه و تحلیل نتایج آورده شده است. همان گونه که در نمودارهای (۴-۱۰) و (۴-۱۱) برای تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد نشان داده شده است، مشاهده می‌شود به ازای افزایش تراکم نسبی ظرفیت باربری به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد که نشان از اهمیت بالای تراکم نسبی در طراحی‌های میکروپایل دارد. همچنین با بررسی جدول (۴-۴) مشاهده می‌شود اثر چسبندگی جدار نیز در تراکم ۹۰ درصد به صورت میانگین ۱۰ درصد در حالت زبر نسبت به حالت نرم بیشتر است.



شکل (۴-۷) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با شعاع تزریق مختلف و چسبندگی جدار نرم در خاک با تراکم نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد



شکل (۴-۸) نمودار بار-جابجایی میکروپایل با شعاع تزریق مختلف و چسبندگی جدار زیر در خاک با تراکم نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد

پس از بررسی جدول (۴-۴) و نمودارهای (۴-۱۲) و (۴-۱۳) مرتبط با میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات تراکم نسبی ۴۵ و ۹۰ درصدی در چسبندگی جدار و شعاع‌های تزریق مختلف، ذکر نکات ذیل ضروری به نظر می‌رسد:

در چسبندگی جدار نرم و شعاع تزریق ۶۵ میلی‌متر در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۴۵۳ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۱۵۳۷ کیلوگرم به دست می‌آید که نسبت افزایش ظرفیت باربری آن ۲۳۹ درصد می‌باشد.

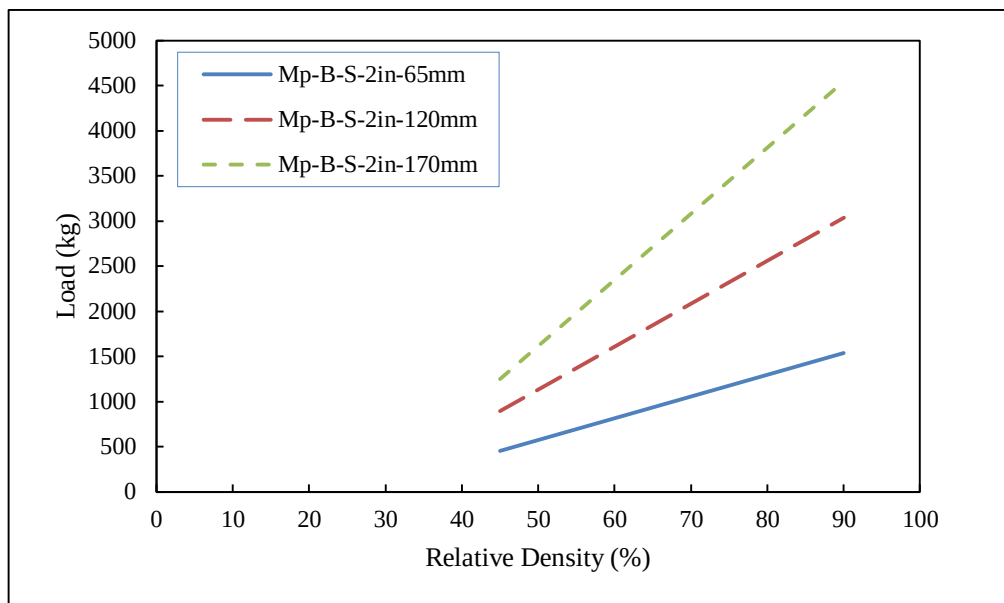
در چسبندگی جدار نرم و شعاع تزریق ۱۲۰ میلی‌متر در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۸۹۱ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۳۰۳۳ کیلوگرم به دست می‌آید که نسبت افزایش ظرفیت باربری آن ۲۴۰ درصد می‌باشد. در چسبندگی جدار نرم و شعاع تزریق ۱۷۰ میلی‌متر در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۱۲۴۸ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۴۵۴۸ کیلوگرم به دست می‌آید که نسبت افزایش ظرفیت باربری آن ۲۶۳ درصد می‌باشد.



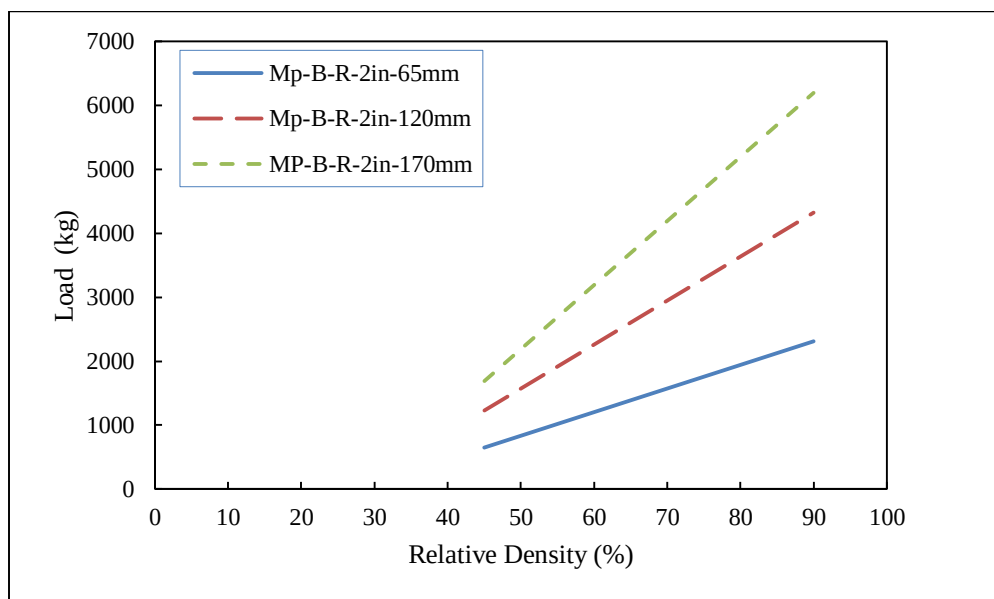
در چسبندگی جدار زیر و شعاع تزریق ۶۵ میلی‌متر در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۶۴۸ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۲۳۱۱ کیلوگرم به دست می‌آید که نسبت افزایش ظرفیت باربری آن ۲۵۶ درصد می‌باشد.

در چسبندگی جدار زیر و شعاع تزریق ۱۲۰ میلی‌متر در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۱۲۲۵ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۴۳۲۱ کیلوگرم به دست می‌آید که نسبت افزایش ظرفیت باربری آن ۲۵۳ درصد می‌باشد.

در چسبندگی جدار زیر و شعاع تزریق ۱۷۰ میلی‌متر در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۱۶۹۰ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۶۲۰۰ کیلوگرم به دست می‌آید که نسبت افزایش ظرفیت باربری آن ۲۶۶ درصد می‌باشد.



شکل (۴-۹) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل‌ها در چسبندگی جدار نرم و شعاع‌های تزریق مختلف در تراکم‌های نسبی مختلف



شکل (۴-۱۰) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل‌ها در چسبندگی جدار زبر و شعاع‌های تزریق مختلف در تراکم‌های نسبی مختلف

جدول (۴-۴) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل‌ها (بر حسب درصد) در تراکم نسبی ۹۰ درصد به تراکم نسبی ۴۵ درصد به ازای چسبندگی جدار و شعاع‌های تزریق مختلف

| چسبندگی جدار | شعاع تزریق (میلی‌متر) | ظرفیت باربری در تراکم ۴۵ درصد (کیلوگرم) | ظرفیت باربری در تراکم ۹۰ درصد (کیلوگرم) | اختلاف در ظرفیت باربری |
|--------------|-----------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------|
| نرم          | ۶۵                    | ۴۵۳                                     | ۱۵۳۷                                    | ٪۲۳۹                   |
|              | ۱۲۰                   | ۸۹۱                                     | ۳۰۳۳                                    | ٪۲۴۰                   |
|              | ۱۷۰                   | ۱۲۴۸                                    | ۴۵۴۸                                    | ٪۲۶۳                   |
| زبر          | ۶۵                    | ۶۴۸                                     | ۲۳۱۱                                    | ٪۲۵۶                   |
|              | ۱۲۰                   | ۱۲۲۵                                    | ۴۳۲۱                                    | ٪۲۵۳                   |
|              | ۱۷۰                   | ۱۶۹۰                                    | ۶۲۰۰                                    | ٪۲۶۶                   |

#### ۴-۴- ارزیابی اثر افزایش قطر لوله‌های میکروپایل و تراکم نسبی

در ادامه اثر افزایش قطر میکروپایل‌ها در تراکم‌های نسبی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۴-۱- ارزیابی اثر افزایش قطر لوله‌های میکروپایل بر ظرفیت باربری

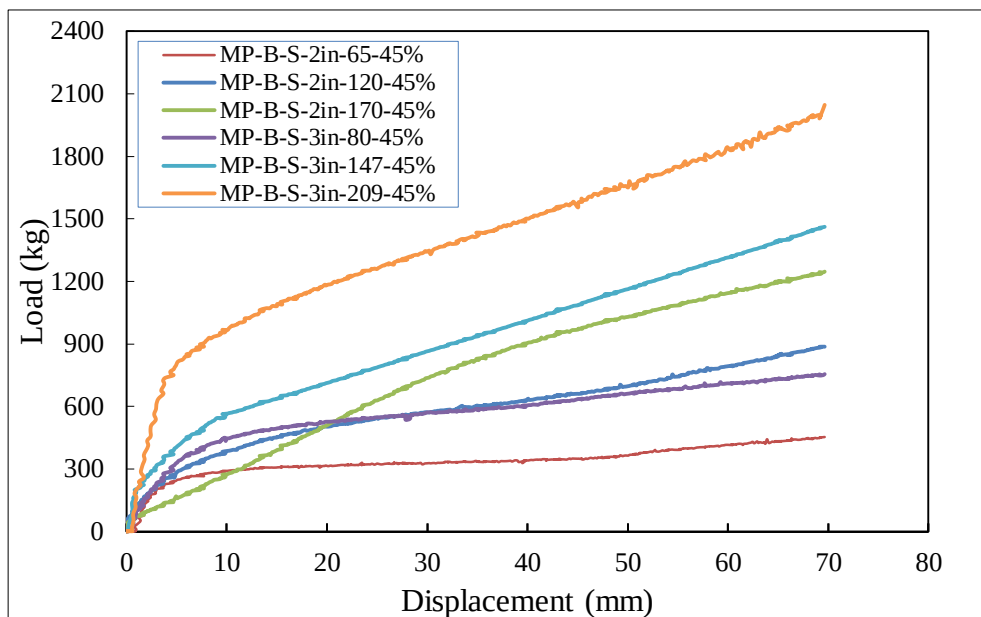
در این قسمت اثر قطر میکروپایل که یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی رفتار میکروپایل است مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت از تحقیق از میکروپایل‌های با قطر ۲ اینچ و ۳ اینچ که در همه‌ی شعاع‌های تزریق باعث افزایش ۲۳ درصدی شعاع تزریق شده، استفاده شده است. در ادامه میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها به ازای قطرهای مختلف در قالب نمودار و جدول ارائه شده، که مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول (۴-۵) ظرفیت باربری میکروپایل به ازای شعاع تزریق و قطر در میکروپایل‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد

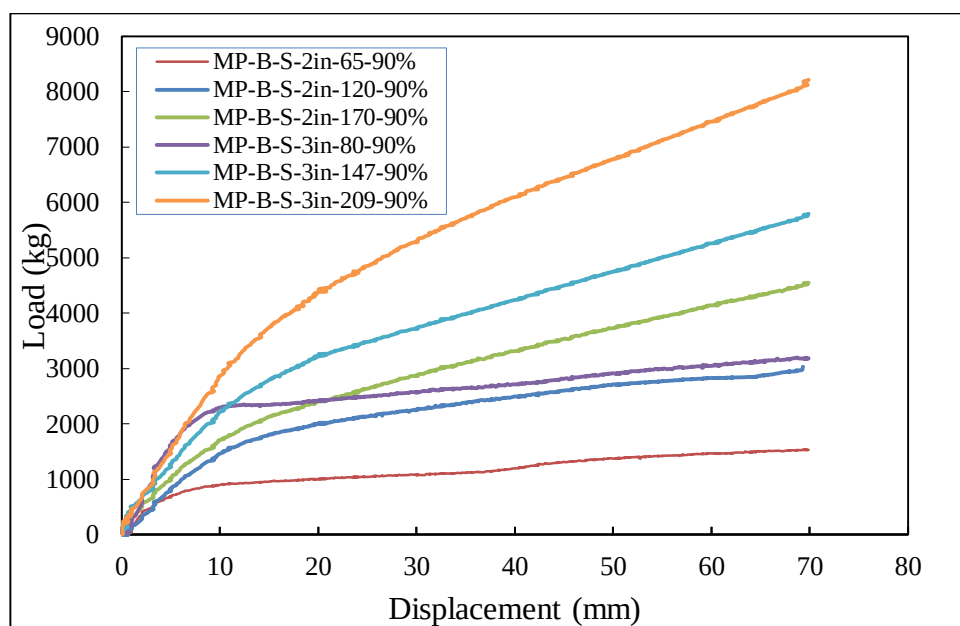
| شماره | کد آزمایش       | وضعیت<br>قرارگیری<br>میکروپایل | آلفای<br>باند | شعاع<br>تزریق<br>(میلی-<br>متر) | قطر<br>میکروپایل<br>(اینچ) | تراکم<br>نسبی<br>خاک<br>(درصد) | ظرفیت<br>باربری<br>خاک<br>(کیلوگرم) | مقایسه<br>با<br>آزمایش<br>مرجع<br>(درصد) |
|-------|-----------------|--------------------------------|---------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|
| ۱     | MP-B-S-2-65-45  | B                              | S             | ۶۵                              | ۲                          | ۴۵                             | ۴۵۳                                 | ۰                                        |
| ۲     | MP-B-S-2-120-45 | B                              | S             | ۱۲۰                             | ۲                          | ۴۵                             | ۸۹۱                                 | ٪۹۷                                      |
| ۳     | MP-B-S-2-170-45 | B                              | S             | ۱۷۰                             | ۲                          | ۴۵                             | ۱۲۴۸                                | ٪۱۷۵                                     |
| ۴     | MP-B-S-3-80-45  | B                              | S             | ۸۰                              | ۳                          | ۴۵                             | ۷۵۵                                 | ٪۶۷                                      |
| ۵     | MP-B-S-3-147-45 | B                              | S             | ۱۴۷                             | ۳                          | ۴۵                             | ۱۴۷۶                                | ٪۲۲۶                                     |
| ۶     | MP-B-S-3-209-45 | B                              | S             | ۲۰۹                             | ۳                          | ۴۵                             | ۲۰۴۶                                | ٪۳۵۲                                     |
| ۱۰    | MP-B-S-2-65-90  | B                              | S             | ۶۵                              | ۲                          | ۹۰                             | ۱۵۳۷                                | ۰                                        |
| ۱۱    | MP-B-S-2-120-90 | B                              | S             | ۱۲۰                             | ۲                          | ۹۰                             | ۳۰۳۳                                | ٪۹۷                                      |
| ۱۲    | MP-B-S-2-170-90 | B                              | S             | ۱۷۰                             | ۲                          | ۹۰                             | ۴۵۴۸                                | ٪۱۹۶                                     |
| ۱۳    | MP-B-S-3-80-90  | B                              | S             | ۸۰                              | ۳                          | ۹۰                             | ۳۱۸۵                                | ٪۱۰۷                                     |
| ۱۴    | MP-B-S-3-147-90 | B                              | S             | ۱۴۷                             | ۳                          | ۹۰                             | ۵۶۰۵                                | ٪۲۶۵                                     |
| ۱۵    | MP-B-S-3-209-90 | B                              | S             | ۲۰۹                             | ۳                          | ۹۰                             | ۸۲۱۳                                | ٪۴۳۴                                     |

در ادامه نمودارهای بار-جاب‌جایی به ازای قطرهای و شعاع‌های تزریق مختلف میکروپایل در تراکم‌های نسبی مختلف شرح داده می‌شود:

همان گونه که در نمودارهای (۴-۱۴) و (۴-۱۵) برای تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که به ازای افزایش قطر میکروپایل‌ها ظرفیت باربری افزایش می‌یابد که نشان از اثرگذاری قطر میکروپایل‌ها دارد. همچنین با بررسی نمودارها مشاهده می‌شود که به ازای افزایش قطر میکروپایل‌ها و شعاع تزریق گسیختگی در ظرفیت باربری بیشتری اتفاق افتاده است.



شکل (۴-۱۱) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با قطر و شعاع تزریق مختلف در خاک با تراکم نسبی ۴۵ درصد



شکل (۴-۱۲) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با قطر و شعاع تزریق مختلف در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد

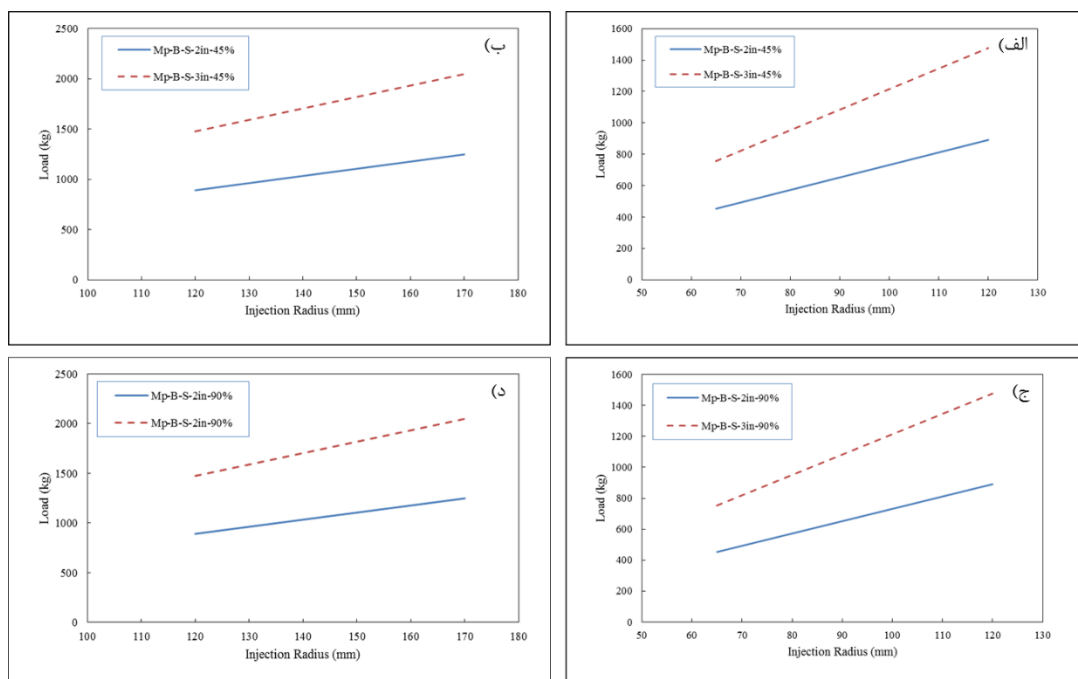
پس از بررسی جدول (۴-۶) و نمودارهای (۴-۱۶) الی (۴-۱۹) ارائه شده مرتبط با میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات شعاع تزریق ۸۵ و ۴۲ درصدی در قطرهای ۲ اینچ و ۳ اینچ، ذکر نکات ذیل ضروری به نظر می‌رسد:

در تراکم نسبی ۴۵ درصدی خاک، ۸۵ درصد افزایش شعاع تزریق میکروپایل در قطرهای ۲ و ۳ اینچ، به صورت میانگین منجر به افزایش ۹۶/۱۰ درصدی در ظرفیت باربری می‌گردد.

در تراکم نسبی ۴۵ درصدی خاک، ۴۲ درصد افزایش شعاع تزریق میکروپایل در قطرهای ۲ و ۳ اینچ، به صورت میانگین منجر به افزایش ۳۹/۳۴ درصدی در ظرفیت باربری می‌گردد.

در تراکم نسبی ۹۰ درصدی خاک، ۸۵ درصد افزایش شعاع تزریق میکروپایل در قطرهای ۲ و ۳ اینچ، به صورت میانگین منجر به افزایش ۹۴/۴۰ درصدی در ظرفیت باربری می‌گردد.

در تراکم نسبی ۹۰ درصدی خاک، ۴۲ درصد افزایش شعاع تزریق میکروپایل در قطرهای ۲ و ۳ اینچ، به صورت میانگین منجر به افزایش ۴۵/۶۵ درصدی در ظرفیت باربری می‌گردد.



شکل (۴-۱۳) الف- نمودار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش ۸۵ درصدی شعاع تزریق، نسبت به تغییرات قطر میکروپایل در تراکم نسبی ۴۵ درصد ب- نمودار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش ۴۲ درصدی شعاع تزریق، نسبت به تغییرات قطر میکروپایل در تراکم نسبی ۴۵ درصد ج- نمودار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش ۸۵ درصدی شعاع تزریق، نسبت به تغییرات قطر میکروپایل در تراکم نسبی ۹۰ درصد د- نمودار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش ۴۲ درصدی شعاع تزریق، نسبت به تغییرات قطر میکروپایل در تراکم نسبی ۹۰ درصد

جدول (۴-۶) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل به ازای افزایش شعاع تزریق و قطرهای مختلف در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد

| تراکم نسبی<br>(درصد) | تغییرات شعاع تزریق<br>(میلی‌متر) | تغییرات قطر<br>(اینچ) | افزایش ظرفیت باربری<br>(درصد) |
|----------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| ۴۵٪                  | ۶۵ میلی‌متر به ۱۲۰ میلی‌متر      | ۲                     | ۹۶/۷۰٪                        |
|                      | ۱۲۰ میلی‌متر به ۱۷۰ میلی‌متر     | ۲                     | ۴۰/۰۷٪                        |
|                      | ۸۰ میلی‌متر به ۱۴۷ میلی‌متر      | ۳                     | ۹۵/۵۰٪                        |
|                      | ۱۴۷ میلی‌متر به ۲۰۹ میلی‌متر     | ۳                     | ۳۸/۶۰٪                        |
| ۹۰٪                  | ۶۵ میلی‌متر به ۱۲۰ میلی‌متر      | ۲                     | ۹۷/۳۰٪                        |
|                      | ۱۲۰ میلی‌متر به ۱۷۰ میلی‌متر     | ۲                     | ۴۹/۹۰٪                        |
|                      | ۸۰ میلی‌متر به ۱۴۷ میلی‌متر      | ۳                     | ۹۱/۵۰٪                        |
|                      | ۱۴۷ میلی‌متر به ۲۰۹ میلی‌متر     | ۳                     | ۴۱/۴۰٪                        |

پس از بررسی جدول (۴-۷) ارائه شده مرتبط با میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات قطر میکروپایل‌ها در شعاع‌های تزریق و تراکم‌های نسبی مختلف، ذکر نکات ذیل ضروری به نظر می‌رسد:

در افزایش قطر میکروپایل‌ها از ۲ به ۳ اینچ، در شعاع تزریق ۶۵ میلی‌متر و در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد به ترتیب منجر به افزایش ۶۶/۶۷ و ۱۰۷ درصدی ظرفیت باربری می‌گردد.

در تغییرات قطر میکروپایل‌ها از ۲ به ۳ اینچ، در شعاع تزریق ۱۲۰ میلی‌متر و در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد به ترتیب منجر به افزایش ۶۵/۶۰ و ۹۱/۵۰ درصدی ظرفیت باربری می‌گردد.

در تغییرات قطر میکروپایل‌ها از ۲ به ۳ اینچ، در شعاع تزریق ۱۷۰ میلی‌متر و در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد به ترتیب منجر به افزایش ۶۳/۹۰ و ۸۰/۶۰ درصدی ظرفیت باربری می‌گردد.

در انتها می‌توان نتیجه گرفت که در تغییرات قطر میکروپایل‌ها در شعاع تزریق ۶۵، ۱۲۰ و ۱۷۰ میلی‌متر در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد به ترتیب منجر به افزایش ۶۵/۳۹ و ۹۳/۰۴ درصد ظرفیت باربری شده است.

جدول (۴-۷) میزان ظرفیت باربری میکروپایل به ازای افزایش ۳۳ درصدی قطر در شعاع‌های تزریق مختلف در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد

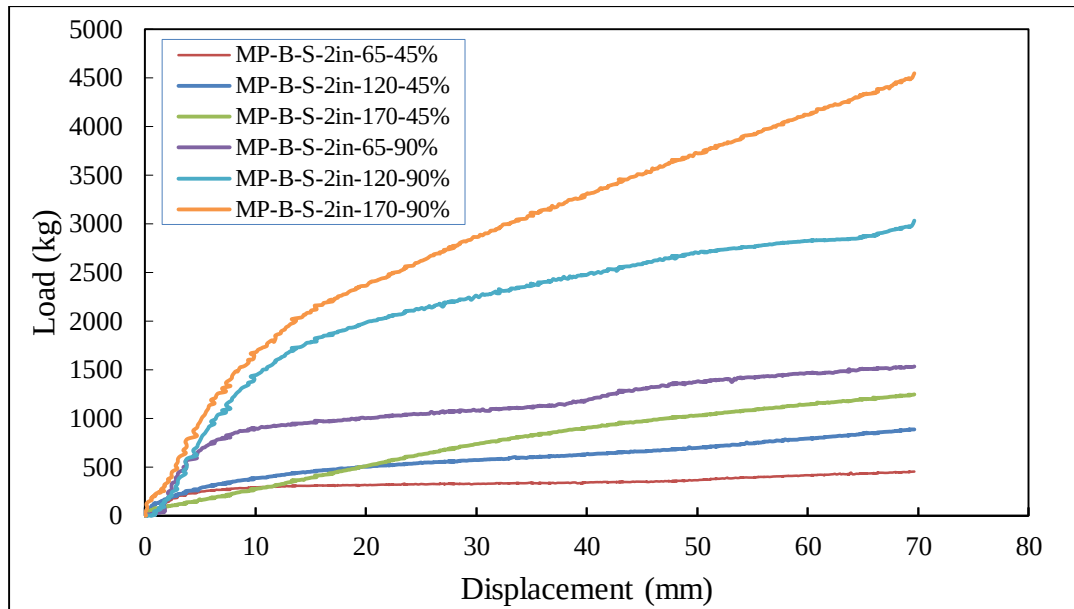
| تغییرات قطر<br>(اینچ) | شعاع تزریق<br>(میلی‌متر) | تراکم نسبی<br>(درصد) | افزایش ظرفیت باربری<br>(درصد) |
|-----------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------------|
| ۲ اینچ به ۳ اینچ      | ۶۵                       | ۴۵                   | ٪۶۶/۶۷                        |
|                       |                          | ۹۰                   | ٪۱۰۷                          |
|                       | ۱۲۰                      | ۴۵                   | ٪۶۵/۶۰                        |
|                       |                          | ۹۰                   | ٪۹۱/۵۰                        |
|                       | ۱۷۰                      | ۴۵                   | ٪۶۳/۹۰                        |
|                       |                          | ۹۰                   | ٪۸۰/۶۰                        |

#### ۴-۴-۲- ارزیابی اثر تراکم بر ظرفیت باربری میکروپایل‌ها در لوله‌هایی با قطرهای مختلف

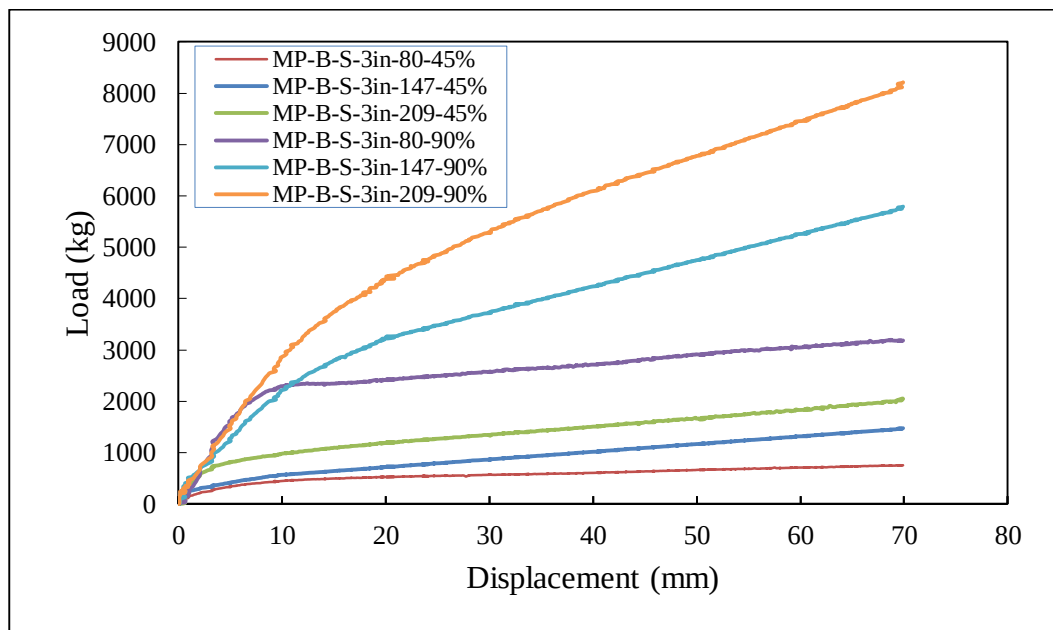
در این قسمت اثر تراکم نسبی به عنوان پارامتر اساسی و تاثیر گذار در ارزیابی رفتار میکروپایل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. تراکم‌های نسبی مختلف مورد استفاده ۴۵ و ۹۰ درصد می‌باشند. در ادامه میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها به ازای قطر و شعاع‌های تزریق مختلف در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد در جدول ذیل و همچنین نمودارهای مربوطه به همراه تجزیه و تحلیل نتایج آورده شده است.



همان گونه که در نمودارهای (۲۰-۴) و (۲۱-۴) برای تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد نشان داده شده است، مشاهده می‌شود به ازای افزایش تراکم نسبی ظرفیت باربری به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد که نشان از اهمیت بالای تراکم نسبی در طراحی‌های میکروپایل دارد.



شکل (۴-۱۴) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با قطر ۲ اینچ و شعاع تزریق‌های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد



شکل (۴-۱۵) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با قطر ۳ اینچ و شعاع تزریق‌های مختلف در خاک با تراکم نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد

پس از بررسی جدول و نمودارهای ارائه شده مرتبط با میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات تراکم نسبی ۴۵ و ۹۰ درصدی در قطر و شعاع‌های تزریق مختلف، ذکر نکات ذیل ضروری به نظر می‌رسد:

در میکروپایل با شعاع تزریق ۲ اینچ و شعاع تزریق ۶۵ میلی‌متر در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۴۵۳ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۱۵۳۷ کیلوگرم به دست می‌آید که نسبت افزایش ظرفیت باربری آن ۲۳۹ درصد می‌باشد.

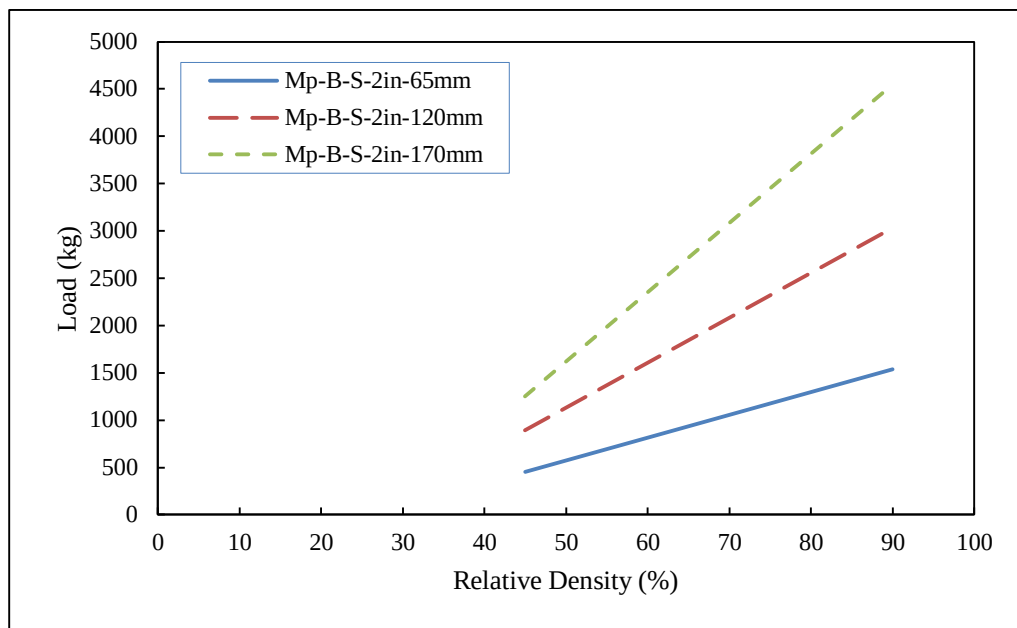
در میکروپایل با شعاع تزریق ۲ اینچ و شعاع تزریق ۱۲۰ میلی‌متر در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۸۹۱ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۳۰۳۳ کیلوگرم به دست می‌آید که نسبت افزایش ظرفیت باربری آن ۲۴۰ درصد می‌باشد.

در میکروپایل با شعاع تزریق ۲ اینچ و شعاع تزریق ۱۷۰ میلی‌متر در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۱۲۴۸ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۴۵۴۸ کیلوگرم به دست می‌آید که نسبت افزایش ظرفیت باربری آن ۲۶۳ درصد می‌باشد.

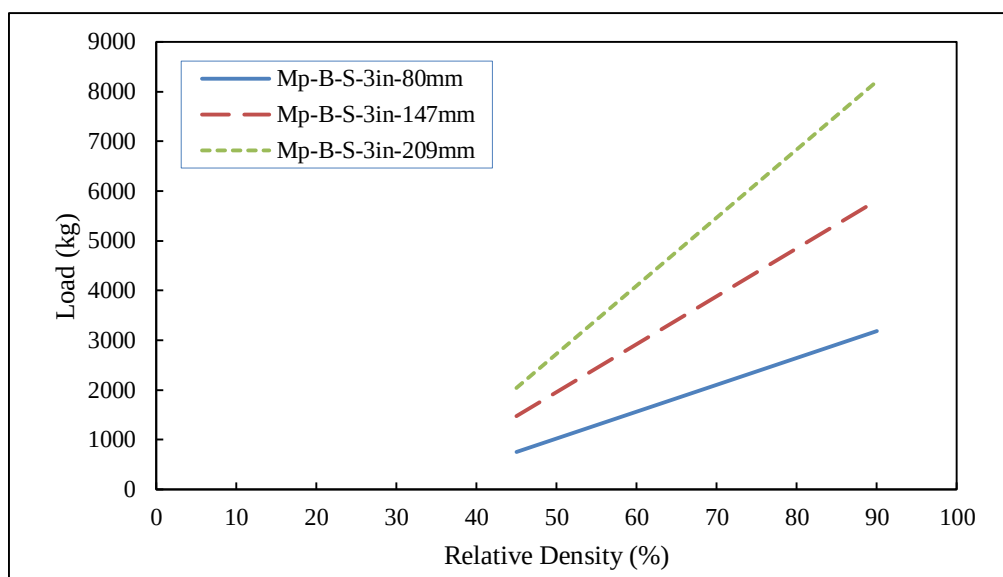
در میکروپایل با شعاع تزریق ۳ اینچ و شعاع تزریق ۸۰ میلی‌متر در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۷۵۵ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۳۱۸۵ کیلوگرم به دست می‌آید که نسبت افزایش ظرفیت باربری آن ۳۲۲ درصد می‌باشد.

در میکروپایل با شعاع تزریق ۳ اینچ و شعاع تزریق ۱۴۷ میلی‌متر در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۱۴۷۶ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۵۸۰۹ کیلوگرم به دست می‌آید که نسبت افزایش ظرفیت باربری آن ۲۹۴ درصد می‌باشد.

در میکروپایل با شعاع تزریق ۳ اینچ و شعاع تزریق ۲۰۹ میلی‌متر در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۲۰۴۶ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۸۲۱۳ کیلوگرم به دست می‌آید که نسبت افزایش ظرفیت باربری آن ۳۰۱ درصد می‌باشد.



شکل (۴-۱۶) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل‌ها با قطر ۲ اینچ و شعاع‌های تزریق مختلف به ازای افزایش تراکم نسبی



شکل (۴-۱۷) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل‌ها در میکروپایل‌ها با شعاع تزریق ۳ اینچ و شعاع‌های تزریق مختلف در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد

جدول (۴-۸) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل‌ها (بر حسب درصد) در تراکم نسبی ۹۰ درصد به تراکم نسبی ۴۵ درصد به ازای قطرهای و شعاع‌های تزریق مختلف

| قطر (اینچ) | شعاع تزریق<br>(میلی متر) | ظرفیت باربری در<br>تراکم ۴۵ درصد<br>(کیلوگرم) | ظرفیت باربری<br>در تراکم ۹۰ درصد<br>(کیلوگرم) | اختلاف در<br>ظرفیت<br>باربری |
|------------|--------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------|
| ۲          | ۶۵                       | ۴۵۳                                           | ۱۵۳۷                                          | ٪۲۳۹                         |
|            | ۱۲۰                      | ۸۹۱                                           | ۳۰۳۳                                          | ٪۲۴۰                         |
|            | ۱۷۰                      | ۱۲۴۸                                          | ۴۵۴۸                                          | ٪۲۶۳                         |
| ۳          | ۸۰                       | ۷۵۵                                           | ۳۱۸۵                                          | ٪۳۲۲                         |
|            | ۱۴۷                      | ۱۴۷۶                                          | ۵۸۰۹                                          | ٪۲۹۴                         |
|            | ۲۰۹                      | ۲۰۴۶                                          | ۸۲۱۳                                          | ٪۳۰۱                         |

#### ۴-۵- ارزیابی اثر کوبش و تراکم بر ظرفیت باربری میکروپایل‌ها

در ادامه اثر کوبش میکروپایل‌ها بر ظرفیت باربری در تراکم‌های نسبی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۵-۱- ارزیابی اثر کوبش میکروپایل‌ها بر ظرفیت باربری

در این قسمت اثر کوبش بر ظرفیت باربری میکروپایل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. قطر میکروپایل‌های مورد استفاده ۱، ۲ و ۳ اینچ بوده و بدون شعاع تزریق و اثرگذاری چسبندگی جدار مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها به ازای افزایش قطر در حالت کوبشی و درجا و تراکم‌های نسبی مختلف در جدول ذیل و همچنین نمودارهای مربوط به همراه تجزیه و تحلیل نتایج آورده شده است.

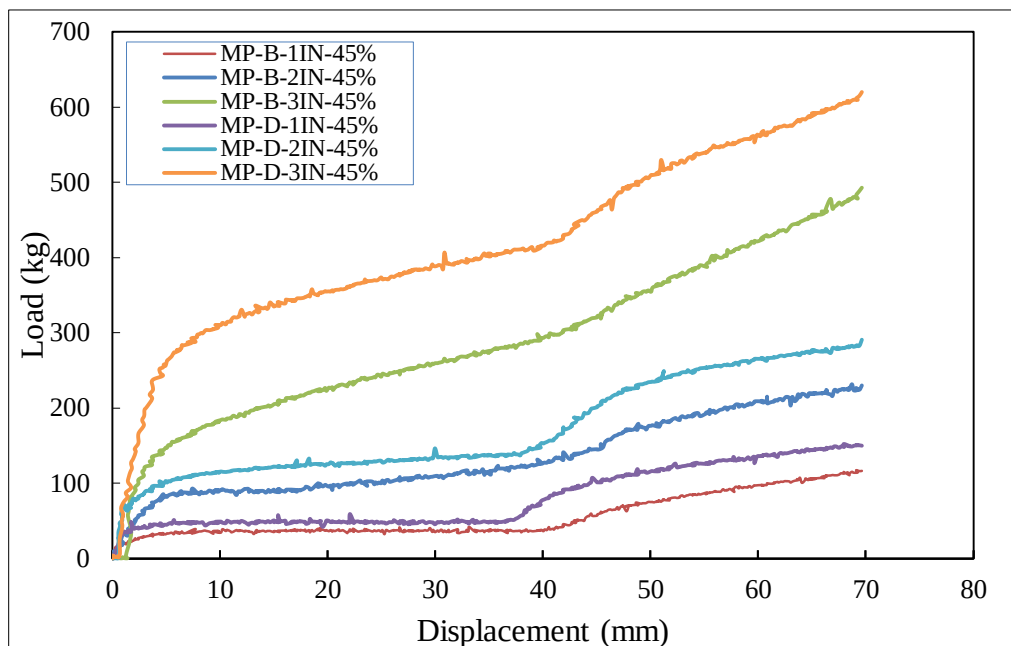
جدول (۴-۹) ظرفیت باربری میکروپایل‌ها در حالت کوبشی و درجا در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد

| شماره | کد آزمایش | وضعیت قرارگیری | قطر میکروپایل (اینچ) | تراکم نسبی خاک (درصد) | ظرفیت باربری خاک (کیلوگرم) |
|-------|-----------|----------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|
| ۱     | MP-B-1-45 | B              | ۱                    | ۴۵                    | ۱۱۶                        |
| ۲     | MP-B-2-45 | B              | ۲                    | ۴۵                    | ۲۳۰                        |
| ۳     | MP-B-3-45 | B              | ۳                    | ۴۵                    | ۴۹۳                        |
| ۴     | MP-D-1-45 | D              | ۱                    | ۴۵                    | ۱۵۲                        |
| ۵     | MP-D-2-45 | D              | ۲                    | ۴۵                    | ۲۹۰                        |
| ۶     | MP-D-3-45 | D              | ۳                    | ۴۵                    | ۶۲۰                        |
| ۷     | MP-B-1-90 | B              | ۱                    | ۹۰                    | ۸۷۰                        |
| ۸     | MP-B-2-90 | B              | ۲                    | ۹۰                    | ۱۵۶۵                       |
| ۹     | MP-B-3-90 | B              | ۳                    | ۹۰                    | ۳۲۴۵                       |
| ۱۰    | MP-D-1-90 | D              | ۱                    | ۹۰                    | ۱۶۰۶                       |
| ۱۱    | MP-D-2-90 | D              | ۲                    | ۹۰                    | ۲۵۳۶                       |
| ۱۲    | MP-D-3-90 | D              | ۳                    | ۹۰                    | ۴۵۳۰                       |

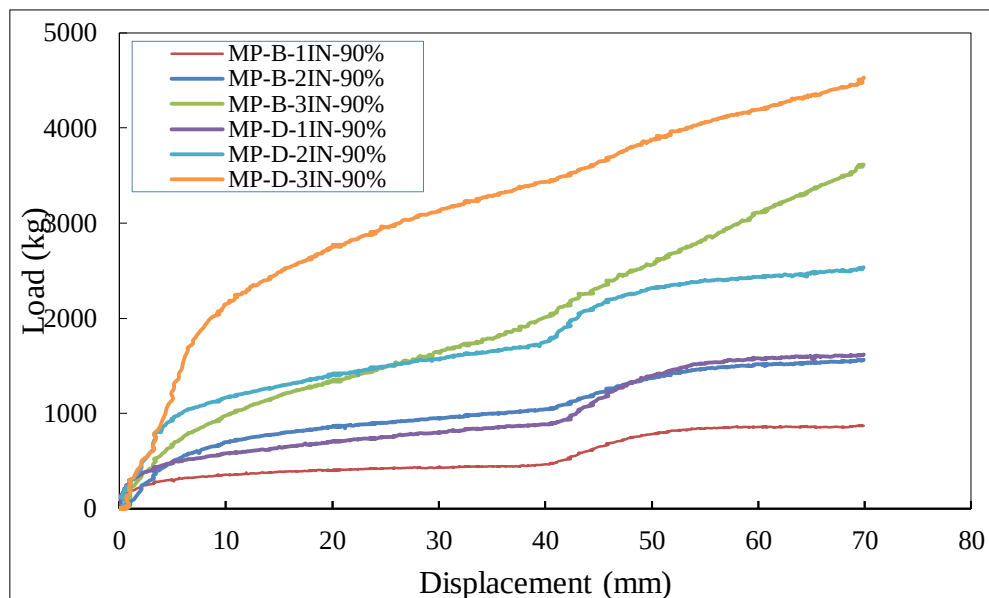
در ادامه نمودارهای بار-جابجایی به ازای قطرها و وضعیت‌های قرارگیری مختلف میکروپایل در تراکم-

های نسبی مختلف شرح داده می‌شود:

همان گونه که در شکل‌های (۴-۲۴) و (۴-۲۵) برای تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که به ازای افزایش قطر میکروپایل‌ها و کوبش ظرفیت باربری به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده است که نشان از اثرگذاری قطر و کوبش بر ظرفیت باربری میکروپایل‌ها دارد. با بررسی نمودارها مشاهده می‌شود که به ازای افزایش قطر در حالت کوبش ظرفیت باربری نسبت به درجا در همان قطر افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر هرچه قطر میکروپایل افزایش پیدا کند ظرفیت باربری نسبت به حالت درجا در همان قطر و نسبت به قطر کمتر بیشتر افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی نمودارها مشاهده می‌شود که در جابجایی ۴۰ میلی متر ظرفیت باربری به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده است که نشان از اثرگذاری کلاhek بر ظرفیت باربری دارد.



شکل (۴-۱۸) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با قطر و نحوه‌ی قرارگیری کوبشی و درجا در خاک با تراکم نسبی ۴۵ درصد



شکل (۴-۱۹) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل با قطر و نحوه‌ی قرارگیری کوبشی و درجا در خاک با تراکم نسبی ۹۰ درصد

پس از بررسی جدول (۴-۱۰) و نمودار شکل‌های (۴-۲۶) الی (۴-۲۹) ارائه شده مرتبط با میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای نحوه‌ی قرارگیری در حالت کوبشی و درجا تغییرات در قطرهای ۱، ۲ و

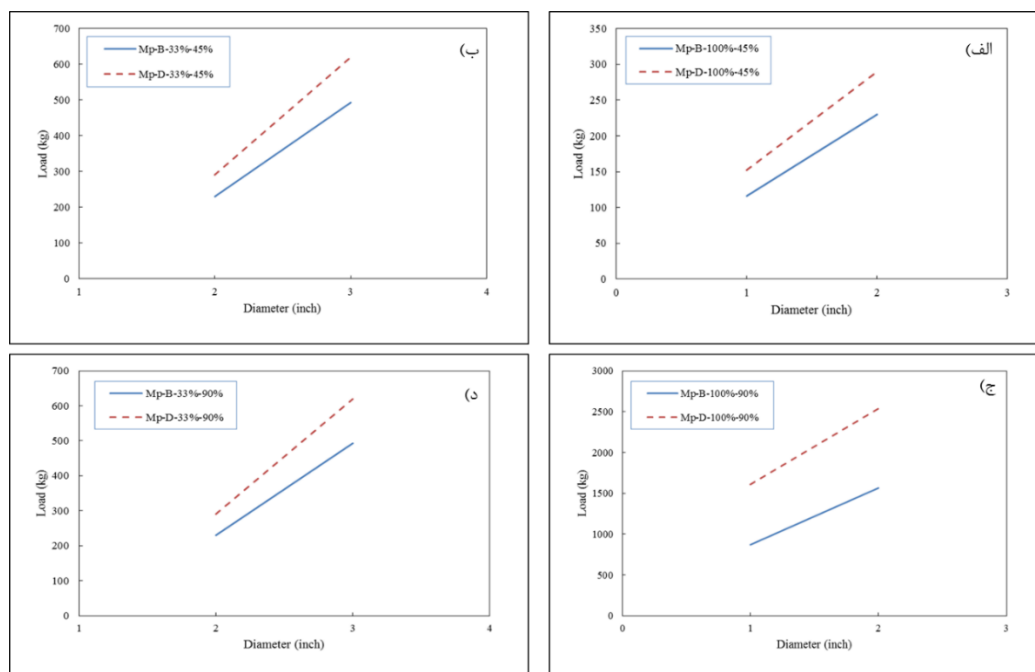
۳ اینچ، ذکر نکات ذیل ضروری به نظر می‌رسد:

در تراکم نسبی ۴۵ درصدی خاک، ۱۰۰ درصد افزایش قطر میکروپایل از ۱ به ۲ اینچ در حالت درجا و کوبشی به ترتیب منجر به افزایش ۹۸/۳۰ و ۹۰/۷۰ درصد شده است.

در تراکم نسبی ۴۵ درصدی خاک، ۳۳ درصد افزایش قطر میکروپایل از ۲ به ۳ اینچ در حالت درجا و کوبشی به ترتیب منجر به افزایش ۱۱۴/۳۰ و ۱۱۳/۸۰ درصد شده است.

در تراکم نسبی ۹۰ درصدی خاک، ۱۰۰ درصد افزایش قطر میکروپایل از ۱ به ۲ اینچ در حالت درجا و کوبشی به ترتیب منجر به افزایش ۷۹/۸۰ و ۵۷/۷۰ درصد شده است.

در تراکم نسبی ۹۰ درصدی خاک، ۳۳ درصد افزایش قطر میکروپایل از ۲ به ۳ اینچ در حالت درجا و کوبشی به ترتیب منجر به افزایش ۱۰۷/۳۰ و ۷۸/۶۰ درصد شده است.



شکل (۴-۲۰) الف- نمودار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش ۱۰۰ درصدی قطر میکروپایل، نسبت به تغییرات وضعیت قرارگیری در حالت کوبش و درجا در تراکم نسبی ۴۵ درصد ب- نمودار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش ۳۳ درصدی قطر میکروپایل، نسبت به تغییرات وضعیت قرارگیری در حالت کوبش و درجا در تراکم نسبی ۴۵ درصد ج- نمودار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش ۱۰۰ درصدی قطر میکروپایل، نسبت به تغییرات وضعیت قرارگیری در حالت کوبش و درجا در تراکم نسبی ۹۰ درصد د- نمودار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش ۳۳ درصدی قطر میکروپایل، نسبت به تغییرات وضعیت قرارگیری در حالت کوبش و درجا در تراکم نسبی ۹۰ درصد

جدول (۴-۱۰) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل به ازای افزایش قطر میکروپایل و وضعیت قرارگیری در حالت درجا و کوبشی میکروپایل در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد

| تراکم نسبی<br>(درصد) | تغییرات قطر<br>(اینچ) | وضعیت قرارگیری<br>میکروپایل | افزایش ظرفیت باربری<br>(درصد) |
|----------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| ۴۵٪                  | ۱ اینچ به ۲ اینچ      | درجا                        | ۹۸/۳٪                         |
|                      |                       | کوبشی                       | ۹۰/۷۰٪                        |
|                      | ۲ اینچ به ۳ اینچ      | درجا                        | ۱۱۴/۳۰٪                       |
|                      |                       | کوبشی                       | ۱۱۳/۸۰٪                       |
| ۹۰٪                  | ۱ اینچ به ۲ اینچ      | درجا                        | ۷۹/۸٪                         |
|                      |                       | کوبشی                       | ۵۷/۷۰٪                        |
|                      | ۲ اینچ به ۳ اینچ      | درجا                        | ۱۰۷/۳٪                        |
|                      |                       | کوبشی                       | ۷۸/۶٪                         |

پس از بررسی جدول (۴-۱۱) ارائه شده مرتبط با میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات قطر میکروپایل‌ها در حالت درجا و کوبشی در تراکم‌های نسبی مختلف، ذکر نکات ذیل ضروری به نظر می‌رسد:

در وضعیت قرارگیری میکروپایل‌ها حالت کوبشی نسبت به حالت درجا در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد در قطر ۱ اینچ منجر به افزایش ۳۱/۰۰ و ۸۴/۸۰ درصد ظرفیت باربری شده است.

در وضعیت قرارگیری میکروپایل‌ها حالت کوبشی نسبت به حالت درجا در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد در قطر ۲ اینچ منجر به افزایش ۲۶/۰۳ و ۶۲/۰۰ درصد ظرفیت باربری شده است.

در وضعیت قرارگیری میکروپایل‌ها حالت کوبشی نسبت به حالت درجا در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد در قطر ۳ اینچ منجر به افزایش ۲۵/۷۰ و ۴۰/۰۰ درصد ظرفیت باربری شده است.

در انتها می‌توان نتیجه گرفت که در بررسی تغییرات وضعیت قرارگیری میکروپایل‌ها در قطرهای ۱، ۲ و ۳ اینچ در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد که کوبش عاملی تاثیرگذار در ظرفیت باربری است به



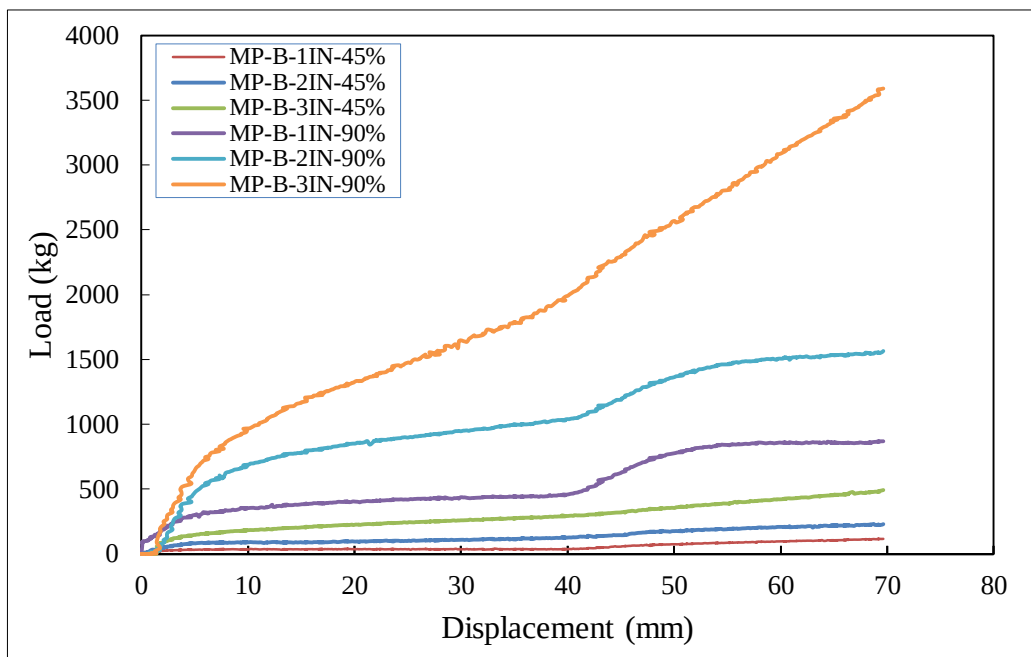
گونه‌ای که در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد به صورت میانگین منجر به افزایش ۲۷/۵۸ و ۶۲/۲۷ درصد ظرفیت باربری شده است.

جدول (۴-۱۱) ظرفیت باربری میکروپایل به ازای وضعیت قرارگیری میکروپایل در قطرهای مختلف در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد

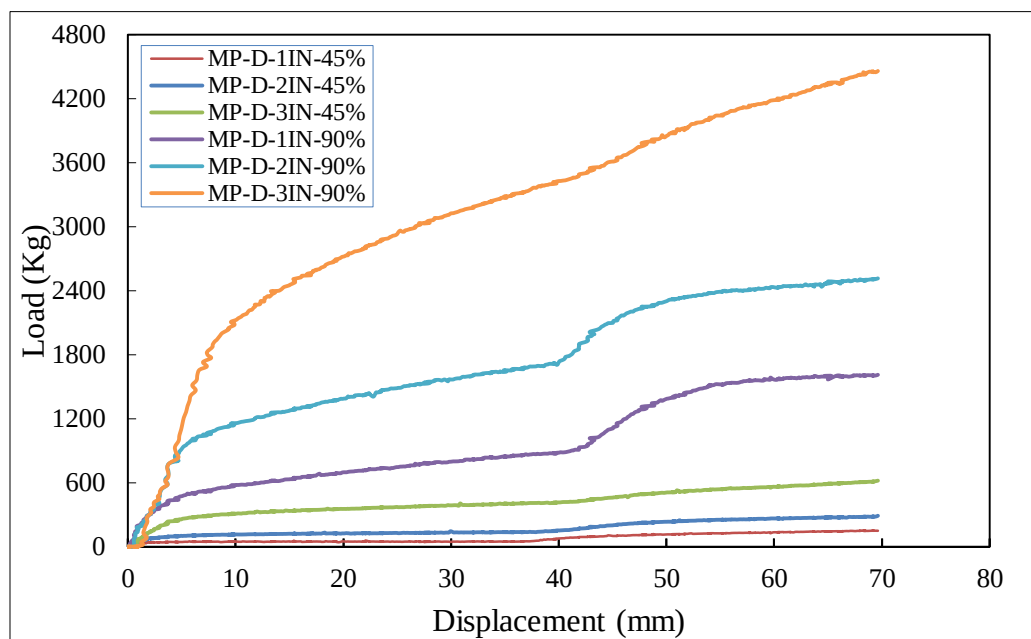
| وضعیت قرارگیری میکروپایل | تراکم نسبی (درصد) | قطر لوله‌ها (اینچ) | افزایش ظرفیت باربری (درصد) |
|--------------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|
| درجا به کوبشی            | ۴۵                | ۱                  | ٪۳۱/۰۰                     |
|                          |                   | ۲                  | ٪۲۶/۰۳                     |
|                          |                   | ۳                  | ٪۲۵/۷۰                     |
|                          | ۹۰                | ۱                  | ٪۸۴/۸۰                     |
|                          |                   | ۲                  | ٪۶۲/۰۰                     |
|                          |                   | ۳                  | ٪۴۰/۰۰                     |

#### ۴-۵-۲- ارزیابی اثر کوبش بر ظرفیت باربری میکروپایل‌ها در تراکم‌های مختلف

در این قسمت اثر ترکم نسبی به عنوان پارامتر اساسی و تاثیر گذار در ارزیابی رفتار میکروپایل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. تراکم‌های نسبی مختلف مورد استفاده ۴۵ و ۹۰ درصد می‌باشند. در ادامه میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها به ازای قطرهای و وضعیت‌های قرارگیری مختلف در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد در جدول ذیل و همچنین نمودارهای مربوطه به همراه تجزیه و تحلیل نتایج آورده شده است. همان گونه که در نمودار شکل‌های (۴-۳۰) و (۴-۳۱) برای تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد نشان داده شده است، مشاهده می‌شود به ازای افزایش تراکم نسبی در حالت کوبشی نسبت به درجا ظرفیت باربری به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد که نشان از اهمیت بالای تراکم نسبی در طراحی-های میکروپایل دارد.



شکل (۴-۲۱) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل در وضعیت قرارگیری درجا در قطرهای مختلف و تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد



شکل (۴-۲۲) نمودار بار-جاب‌جایی میکروپایل در وضعیت قرارگیری کوبشی در قطرهای مختلف و تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد

پس از بررسی جدول (۴-۱۲) و نمودار شکل‌های (۴-۳۲) و (۴-۳۳) ارائه شده مرتبط با میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات تراکم نسبی ۴۵ و ۹۰ درصدی در قطر و وضعیت‌های قرارگیری میکروپایل در حالت درجا و کوبشی، ذکر نکات ذیل ضروری به نظر می‌رسد:

در وضعیت قرارگیری میکروپایل در حالت درجا و قطر ۱ اینچ و در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۱۱۶ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۸۷۰ کیلوگرم به دست می‌آید که ظرفیت باربری آن ۶۵۰ درصد افزایش یافته است.

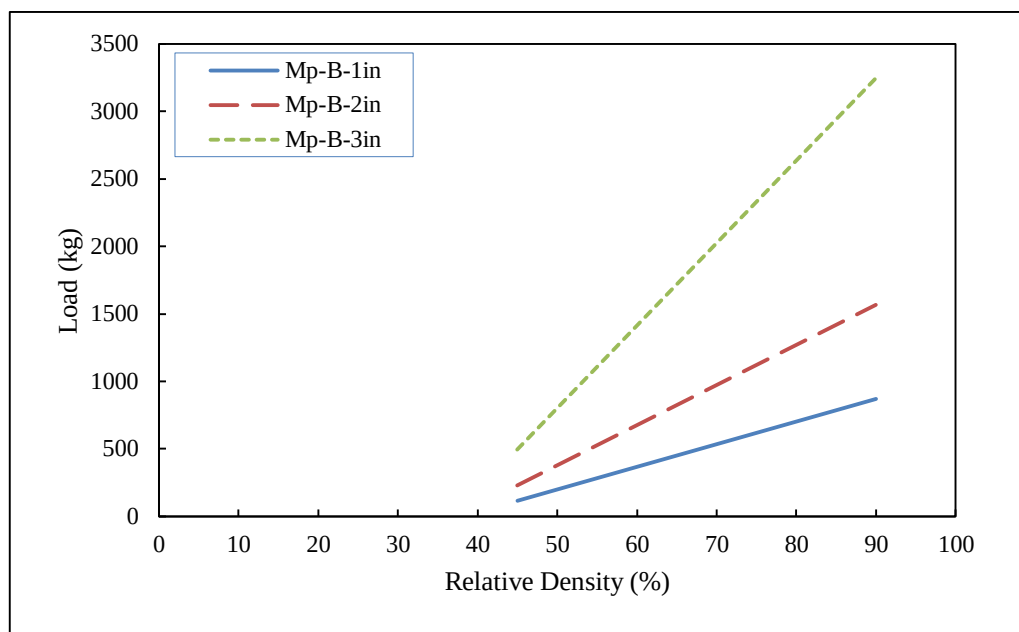
در وضعیت قرارگیری میکروپایل در حالت درجا و قطر ۲ اینچ و در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۲۳۰ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۱۵۶۵ کیلوگرم به دست می‌آید که ظرفیت باربری آن ۵۸۰ درصد افزایش یافته است.

در وضعیت قرارگیری میکروپایل در حالت درجا و قطر ۳ اینچ و در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۴۹۳ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۳۲۴۵ کیلوگرم به دست می‌آید که ظرفیت باربری آن ۶۳۳ درصد افزایش یافته است.

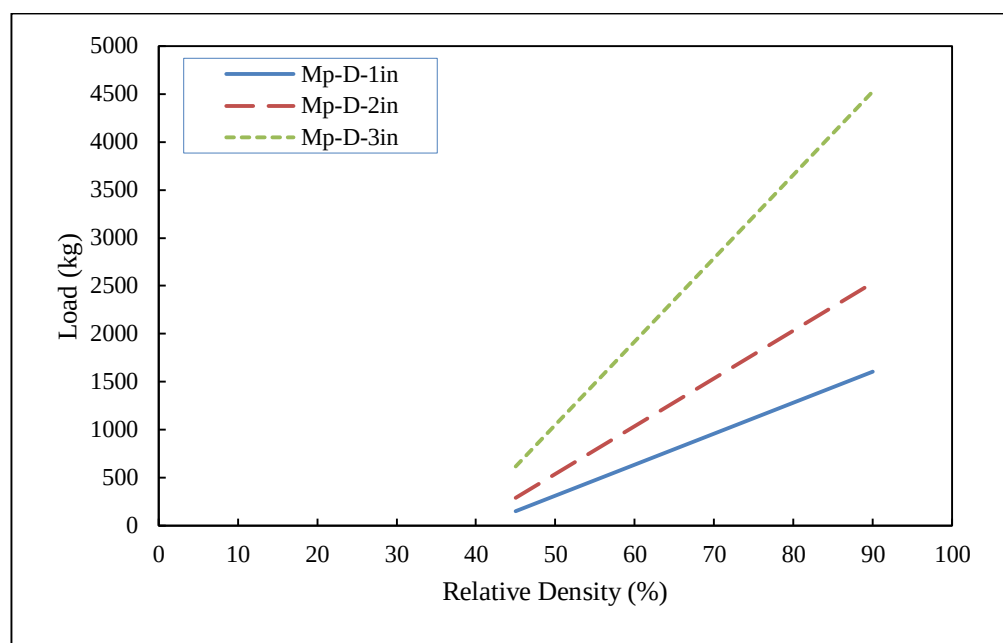
در وضعیت قرارگیری میکروپایل در حالت کوبشی و قطر ۱ اینچ و در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۱۵۲ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۱۶۰۶ کیلوگرم به دست می‌آید که ظرفیت باربری آن ۷۲۹ درصد افزایش یافته است.

در وضعیت قرارگیری میکروپایل در حالت کوبشی و قطر ۲ اینچ و در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۲۹۰ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۲۵۳۶ کیلوگرم به دست می‌آید که ظرفیت باربری آن ۸۹۰ درصد افزایش یافته است.

در وضعیت قرارگیری میکروپایل در حالت کوبشی و قطر ۳ اینچ و در تراکم نسبی ۴۵ درصد ظرفیت باربری خاک ۶۲۰ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۹۰ درصد ظرفیت باربری خاک ۴۵۳۰ کیلوگرم به دست می‌آید که ظرفیت باربری آن ۶۹۰ درصد افزایش یافته است.



شکل (۴-۲۳) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل‌ها در حالت درجا و قطرهای مختلف به ازای افزایش تراکم نسبی



شکل (۴-۲۴) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل‌ها در حالت کوبشی و قطرهای مختلف به ازای افزایش تراکم نسبی

جدول (۴-۱۲) میزان افزایش ظرفیت باربری میکروپایل‌ها (بر حسب درصد) در تراکم نسبی ۹۰ درصد به تراکم نسبی ۴۵ درصد به ازای قطرهای مختلف و وضعیت قرارگیری میکروپایل در حالت درجا و کوبشی

| وضعیت قرار<br>گیری<br>میکروپایل | قطر لوله<br>(اینچ) | ظرفیت باربری در<br>تراکم ۴۵ درصد<br>(کیلوگرم) | ظرفیت باربری<br>در تراکم ۹۰ درصد<br>(کیلوگرم) | اختلاف در<br>ظرفیت<br>باربری (درصد) |
|---------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------|
| درجا                            | ۱                  | ۱۱۶                                           | ۸۷۰                                           | ٪۶۵۰                                |
|                                 | ۲                  | ۲۳۰                                           | ۱۵۶۵                                          | ٪۵۸۰                                |
|                                 | ۳                  | ۴۹۳                                           | ۳۲۴۵                                          | ٪۶۳۳                                |
| کوبشی                           | ۱                  | ۱۵۲                                           | ۱۶۰۶                                          | ٪۷۲۹                                |
|                                 | ۲                  | ۲۹۰                                           | ۲۵۳۶                                          | ٪۸۹۰                                |
|                                 | ۳                  | ۶۲۰                                           | ۴۵۳۰                                          | ٪۶۹۰                                |

#### ۴-۶- 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 شعاع تزریق و تراکم خاک بررسی شود. به همین جهت از یک سری رگرسیون غیر خطی استفاده شده است. کمیت‌های مربوط به پارامترهای شعاع تزریق 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 (۴-۱۳) جدول نرمال سازی مقادیر پارامتر شعاع تزریق میکروپایل

| شماره ردیف | شعاع تزریق اولیه (متر) | میانگین داده ها | انحراف از معیار | شعاع تزریق نرمال شده |
|------------|------------------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| ۱          | ۶۵                     | ۱۱۸/۳۳          | ۴۴/۷۸۹۰۷        | -۱/۱۹۰۷۷             |
| ۲          | ۱۲۰                    | ۱۱۸/۳۳          | ۴۴/۷۸۹۰۷        | ۰/۰۳۷۲۱۱             |
| ۳          | ۱۷۰                    | ۱۱۸/۳۳          | ۴۴/۷۸۹۰۷        | ۱/۱۵۳۵۵۵             |

جدول (۴-۱۴) جدول نرمال سازی مقادیر پارامتر تراکم نسبی میکروپایل

| شماره ردیف | تراکم اولیه | میانگین داده‌ها | انحراف از معیار | تراکم نرمال شده |
|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ۱          | ٪۴۵         | ۰/۶۷۵           | ۰/۲۳۵۰۰۵        | -۰/۹۵۷۴۳        |
| ۲          | ٪۹۰         | ۰/۶۷۵           | ۰/۲۳۵۰۰۵        | ۰/۹۵۷۴۲۷        |

#### ۴-۶-۲- نمونه محاسبات تحلیل SPSS

نمونه‌ای از محاسبات رگرسیون غیر خطی با نرم افزار SPSS در چسبندگی جدار مختلف به منظور ارزیابی اثر شعاع تزریق و تراکم خاک در ظرفیت باربری آورده شده است.

جدول (۴-۱۵) نمونه محاسبات رگرسیون خطی

Variables Entered/Removed

| Model | Variables Entered                           | Variables Removed | Method |
|-------|---------------------------------------------|-------------------|--------|
| 1     | Compaction Rough, Radius Rough <sup>a</sup> | 0                 | Enter  |

All requested variables entered.

Model Summary

| Model | R                  | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
|-------|--------------------|----------|-------------------|----------------------------|
| 1     | 0.954 <sup>a</sup> | 0.910    | 0.849             | 821.86534                  |

a. Predictors: (Constant), compaction rough, radius rough

ANOVA<sup>b</sup>

| Model |            | Sum of Squares | df | Mean Square | F      | Sig.               |
|-------|------------|----------------|----|-------------|--------|--------------------|
| 1     | Regression | 2.040E7        | 2  | 1.020E7     | 15.103 | 0.027 <sup>a</sup> |
|       | Residual   | 2026387.919    | 3  | 675462.640  |        |                    |
|       | Total      | 2.243E7        | 5  |             |        |                    |

a. Predictors: (Constant), compactionrough, radiusrough

b. Dependent Variable: loadrough

Coefficients<sup>a</sup>

| Model |                | Unstandardized Coefficients |            | Standardized Coefficients |       |       |
|-------|----------------|-----------------------------|------------|---------------------------|-------|-------|
|       |                | B                           | Std. Error | Beta                      | t     | Sig.  |
| 1     | (Constant)     | 2732.500                    | 335.525    |                           | 8.144 | 0.004 |
|       | Diameter0.5m   | 1051.718                    | 350.445    | 0.521                     | 3.001 | 0.058 |
|       | Compaction0.5m | 1613.526                    | 350.445    | 0.799                     | 4.604 | 0.019 |

a. Dependent Variable: loadrough

همان گونه که مشاهده می‌کنید برای بررسی هر یک 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.

#### ۴-۶-۳- نتایج تحلیل SPSS

همان طور که در جدول (۴-۱۶) مشاهده می‌شود در چسبندگی جدار مختلف خاک، اثر متقابل پارامترهای شعاع تزریق و تراکم نسبی در میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها ارزیابی شده است. مشاهده

می‌شود در هر دو چسبندگی جدار، پارامتر تاثیرگذار میزان تراکم نسبی میکروپایل می‌باشد، همچنین ملاحظه می‌گردد در چسبندگی جدار نرم (Soft)، اختلاف میزان تاثیرگذاری شعاع تزریق و تراکم نسبی تقریباً ۴۰ درصد می‌باشد، در حالی که در چسبندگی جدار زبر (Rough)، اختلاف میزان تاثیرگذاری شعاع تزریق و تراکم نسبی تقریباً ۵۳ می‌باشد. به طور میانگین ملاحظه می‌گردد در خاک‌های با چسبندگی جدار مختلف پارامتر تراکم اثر ۱/۴۷ برابری نسبت به شعاع تزریق در میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها را دارا می‌باشد.

جدول (۴-۱۶) نتایج رگرسیون‌های غیر خطی به ازای تراکم‌های ثابت

| چسبندگی جدار | ضریب تعیین ( $R^2$ ) | ضریب تاثیر شعاع تزریق | ضریب تاثیر تراکم نسبی | پارامتر غالب | اثر افزایشی پارامتر غالب | میانگین اثر افزایشی پارامتر غالب |
|--------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|--------------------------|----------------------------------|
| Soft         | ۰/۸۹۷                | ۸۱۱/۳۴۵               | ۱۱۳۶/۰۳۱              | تراکم نسبی   | ٪۴۰/۰۱                   | ٪۴۶/۸۵                           |
| Rough        | ۰/۹۱۰                | ۱۰۵۱/۷۱۸              | ۱۶۱۳/۵۲۶              | تراکم نسبی   | ٪۵۳/۷۰                   |                                  |

#### ۷-۴- مقایسه نتایج

در ادامه نتایج به دست آمده با محققین دیگر و آیین نامه FHWA مقایسه می‌شود.

#### ۷-۴-۱- مقایسه نتایج با سایر محققین

تسوکادا و همکاران در سال ۲۰۰۶ آزمایش‌های را بر روی پی منفرد مسلح شده با میکروپایل انجام دادند که اثر قابل توجهی در ظرفیت باربری در اثر افزایش تراکم مشاهده کردند، که صحت نتایج تحقیق حاضر را در افزایش تراکم نسبی نشان می‌دهد. [۲]



ایران منش و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۵ در یک برنامه آزمایشگاهی به بررسی تعداد، طول، فاصله، زاویه، چیدمان و زبری سطحی میکروپایل‌ها پرداختند. و به این نتیجه رسیدند که در حالت‌های سست و متراکم کوبیدن میکروپایل‌ها به ترتیب منجر به افزایش ۳۰ و ۶۰ درصدی ظرفیت باربری می‌شود. که در تحقیق حاضر نیز کوبیدن میکروپایل‌ها در تراکم ۴۵ و ۹۰ درصد به ترتیب منجر به افزایش ۲۸ و ۶۲ درصدی ظرفیت باربری شد. که صحت نتایج آزمایشات تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. [۴۷]

#### ۴-۷-۲- مقایسه نتایج با آیین نامه FHWA

مقادیر مقاومت اسمی خاک-دوغاب عموماً مبتنی بر تجارب پیمانکاران و مهندسين ژئوتکنیکی است، که برای محدوده‌ای از مقادیر معمول مقاومت اسمی را برای روش‌های مختلف اجرا و شرایط زمینی متفاوت ارائه شده است. این مقادیر را می‌توان برای ارزیابی مقادیر طرح محوری فشاری و کششی ژئوتکنیکی شمع در روش‌های SLD و LFD بکار برد. زمانی که این مقادیر بر حسب شرایط عملی زمین، حفاری، تزریق و پروسه‌های اجرای شمع، تغییر می‌کند طرح نهایی شمع بایستی توسط یک پیمانکار حرفه‌ای که صلاحیت طراحی، اجرا و ساخت ریز شمع را دارا است، تکمیل شود. مقادیر ارائه شده در آیین‌نامه با هدف مساعدت طراح در طراحی اولیه و ارزیابی عمومی طرح پایانی پیمانکار ارائه شده است. بر اساس مستندات مناسب و اطلاعات دقیق از آزمایش بارگذاری، می‌توان مقادیر بیشتری را استفاده نمود. [۱]

همانطور که در جدول (۴-۱۷) مشاهده می‌شود، مقادیر آلفای باند به دست آمده در آزمایشگاه در ردیف ۱ الی ۶ با مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه مطابقت دارد. اما مقادیر ردیف‌های ۷ الی ۱۲ بیش از مقادیر آیین‌نامه می‌باشد که دلیل آن را می‌توان به این صورت بیان نمود که میکروپایل‌ها برای زمین‌های سست جهت افزایش ظرفیت باربری استفاده می‌شود و مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه برای زمین‌های سست و نیمه متراکم می‌باشد. قابل ذکر است که مقادیر پیشنهادی آلفای باند آیین‌نامه بر

اساس تجارب پیمانکاران است و در آیین نامه اعلام شده با توجه به شرایط محل طراح می‌تواند آلفای باند بیشتری را انتخاب کند.

جدول (۴-۱۷) مقایسه‌ی آلفای باند به دست آمده در آزمایشگاه با آیین‌نامه

| ردیف | کد آزمایش       | آلفای باند به دست آمده در آزمایشگاه (کیلوپاسکال) | میانگین آلفای باند به دست آمده در آزمایشگاه (کیلو پاسکال) | مقادیر پیشنهادی آلفای باند آیین نامه (کیلوپاسکال) |
|------|-----------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| ۱    | MP-B-S-2-65-45  | ۶۴                                               | ۶۵                                                        | ۲۱۵-۷۰                                            |
| ۲    | MP-B-S-2-120-45 | ۶۷                                               |                                                           |                                                   |
| ۳    | MP-B-S-2-170-45 | ۶۵                                               |                                                           |                                                   |
| ۴    | MP-B-R-2-65-45  | ۹۲                                               | ۹۲                                                        |                                                   |
| ۵    | MP-B-R-2-120-45 | ۹۳                                               |                                                           |                                                   |
| ۶    | MP-B-R-2-170-45 | ۹۲                                               |                                                           |                                                   |
| ۷    | MP-B-S-2-65-90  | ۲۱۸                                              | ۲۳۰                                                       |                                                   |
| ۸    | MP-B-S-2-120-90 | ۲۳۲                                              |                                                           |                                                   |
| ۹    | MP-B-S-2-170-90 | ۲۴۵                                              |                                                           |                                                   |
| ۱۰   | MP-B-R-2-65-90  | ۳۲۶                                              | ۳۳۰                                                       |                                                   |
| ۱۱   | MP-B-R-2-120-90 | ۳۳۰                                              |                                                           |                                                   |
| ۱۲   | MP-B-R-2-170-90 | ۳۳۵                                              |                                                           |                                                   |

#### ۴-۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل با استفاده از یکسری آزمایش‌های مدلسازی فیزیکی تحت بارگذاری استاتیکی، رفتار میکروپایل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله پارامترهای تاثیرگذار در رفتار میکروپایل‌ها پارامترهای شعاع تزریق، چسبندگی جدار و تراکم می‌باشد. در این مطالعه علاوه بر آزمایش‌های

آزمایشگاهی از تحلیل‌های نرم افزاری SPSS به منظور تعیین تاثیرگذاری کمی این پارامترها استفاده شده است که مشاهده می‌شود تراکم اثر  $1/47$  برابری نسبت به شعاع تزریق دارد.



## فصل ۵: جمع بندی و پیشنهادها

## ۵-۱- مقدمه

میکروپایل ها یا همان ریز شمع ها به عنوان یک المان باربر نقش به سزایی در مقابله با خاک های مسئله دار بر عهده دارند. میکروپایل ها ابتدا برای ترمیم پی ها و ساختمان های موجود به کار گرفته می شدند 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 بهینه تر و کاربردی تر مورد استفاده قرار بگیرند. مطالعات بسیاری نیز بر روی رفتار میکروپایل ها و پارامترهای تاثیرگذار آن در ابعاد عددی و میدانی صورت گرفته است. پارامترهای مورد مطالعه در این پژوهش شعاع تزریق، چسبندگی جدار (آلفای باند) و اثر کوبش میکروپایل ها و همچنین تراکم خاک در ابعاد آزمایشگاهی می باشد. در این مطالعه تلاش شده است تا در گام نخست با طراحی و ساخت دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس، شرایط خاک و بارگذاری به صورت واقعی تری شبیه سازی گردد. نتایج آزمایش های استاتیکی کرنش کنترل به همراه تحلیل نرم افزاری درک جامعی نسبت به پارامترهای مورد بررسی، میزان تاثیرگذاری هریک و پیش بینی رفتار میکروپایل ها ارائه کرده است. در ادامه جمع بندی نتایج و پیشنهادات مطالعات آتی به اختصار آورده شده است.

## ۵-۲- جمع بندی و نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش حاصل مطالعات آزمایشگاهی و تحلیل نرم افزاری داده ها توسط برنامه SPSS می باشد. بررسی این نتایج نقش به سزایی در ارزیابی رفتار میکروپایل ها و شناخت میزان تاثیرگذاری پارامترهای مختلف دارا می باشد.

- 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) می‌باشد.
- نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی در تراکم‌های نسبی مختلف خاک، نشان دهنده‌ی ارتباط مستقیم میزان ظرفیت باربری میکروپایل‌ها با شعاع تزریق و چسبندگی جدار 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 شعاع تزریق میکروپایل نشان دهنده‌ی این است که علیرغم ارتباط مستقیم میزان افزایش ظرفیت باربری و پارامتر شعاع تزریق، ظرفیت باربری بیشتر تابع شعاع تزریق نهایی باشد تا میزان افزایش شعاع تزریق، به طوریکه افزایش ظرفیت باربری به ازای ۴۲ درصد افزایش شعاع تزریق (در شعاع‌های تزریق زیاد) بیشتر از افزایش ظرفیت باربری به ازای ۸۵ درصد افزایش شعاع تزریق (در شعاع‌های تزریق کم) می‌باشد.
- نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی میزان افزایش ظرفیت باربری به ازای تغییرات چسبندگی جدار میکروپایل نشان دهنده‌ی این است که چسبندگی جدار عاملی تاثیرگذار در ظرفیت باربری نهایی است به گونه‌ای که در شعاع‌های تزریق مختلف و تراکم‌های ۴۵ و ۹۰ درصد ظرفیت باربری به صورت میانگین ۴۰ درصد افزایش می‌یابد.

- نتایج آزمایش‌های مدلسازی نشان دهنده‌ی این است که با افزایش تراکم خاک ظرفیت باربری میکروپایل‌ها به طور قابل توجهی حدود ۲۵۰ درصد در شعاع‌های تزریق و چسبندگی‌های جدار مختلف باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود.
- نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی میزان افزایش ظرفیت باربری در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد به ازای اثر کوبش میکروپایل نشان دهنده‌ی این است که هر چه تراکم افزایش یابد ظرفیت باربری نیز افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در قطرهای مختلف میکروپایل در تراکم‌های ۴۵ و ۹۰ درصد کوبش به ترتیب باعث افزایش ۳۰ و ۶۰ درصدی ظرفیت باربری می‌شود.
- نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی میزان افزایش ظرفیت باربری در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۰ درصد به ازای اثر تراکم در حالت‌های درجا و کوبشی میکروپایل نشان دهنده‌ی این است که در حالت درجا و کوبشی افزایش تراکم نسبی به ترتیب باعث افزایش ۶۲۰ و ۷۷۰ درصدی ظرفیت باربری می‌شود.
- تحلیل‌های نرم افزاری SPSS نشان می‌دهد در چسبندگی جدار مختلف مورد بررسی میکروپایل، تراکم خاک یک پارامتر تاثیر گذارتر از شعاع تزریق در ظرفیت باربری می‌باشد. نکته حائز اهمیت در این است که با افزایش تراکم ظرفیت باربری میکروپایل ۱/۴۷ برابر افزایش می‌یابد.

### ۵-۳- پیشنهادها برای تحقیقات آینده

پژوهش ارائه شده در این پایان نامه شامل طراحی و ساخت دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس و 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 دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس را می‌توان به صورت موارد ذیل مطرح نمود:



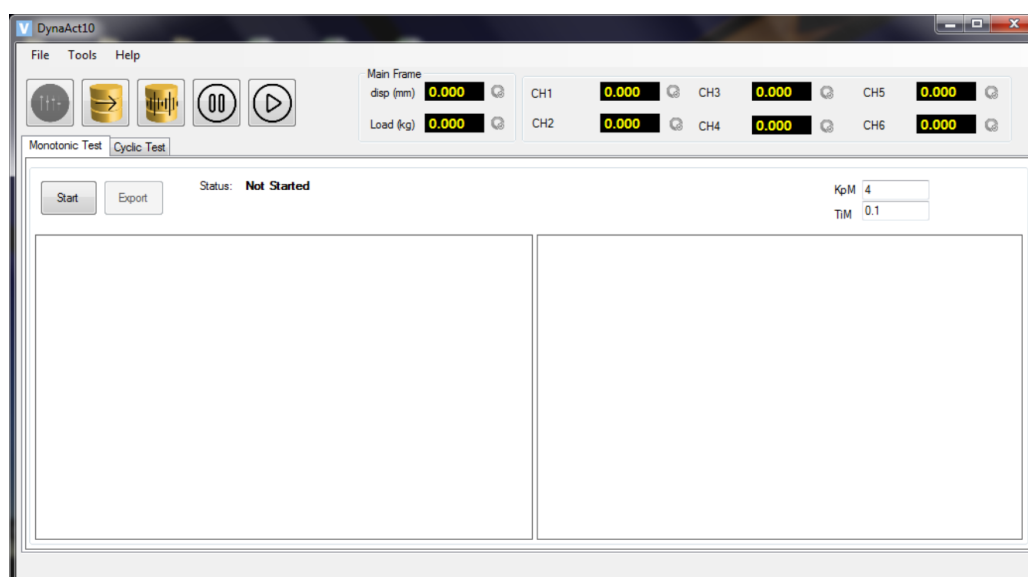
- شبیه سازی بارهای ترافیک، ماشین آلات صنعتی، زلزله و...؛
  - ثبت فشارهای افقی ناشی از بار پی در نقاط مختلف دیواره ی مدل؛
  - امکان استفاده از انواع مختلف مسلح کننده ها از قبیل: ژئوگرید، ژئوتکستایل، ژئوسل و...؛
  - مدلسازی های فیزیکی در کاربردهای مختلف همانند پی، دیوار حایل، شمع ها، شیروانی ها و...؛
  - محاسبه پارامترهای مختلف همانند مقدار نشست، تغییر شکل جانبی، فشار خاک و...؛
  - تاثیر مواد مختلف همانند لاستیک، الیاف ها و... بر مدل فیزیکی؛
  - مدلسازی خاک در حالت زهکشی شده و زهکشی نشده؛
- و... اشاره کرد.
- عناوین و موضوعات پیشنهادی برای تحقیقات آتی در زمینه میکروپایل را می توان به صورت موارد ذیل مطرح نمود:
- انجام یکسری آزمایش مدلسازی فیزیکی به طور مشابه در خاک های رسی؛
  - آزمایش های مدلسازی فیزیکی در خاک ماسه ای تحت بارگذاری های دینامیکی محوری و جانبی؛
  - انجام یکسری آزمایش با نرخ های جابه جایی متفاوت و میزان جابه جایی نهایی بیشتر؛
  - اجرای آزمایش های محوری و جانبی استاتیکی و سیکی به صورت توام؛
  - ارزیابی رفتار گروه میکروپایل ها با استفاده از مدلسازی های آزمایشگاهی؛
  - ارزیابی دیگر پارامترهای مربوط به میکروپایل همچون چیدمان و آرایش میکروپایل ها، فاصله میکروپایل ها از یکدیگر، زاویه قرارگیری، زبری سطحی میکروپایل ها و...؛
  - ارزیابی اثر بارهای ترکیبی بر روی میکروپایل ها با استفاده از روش های میدانی و در محل و مقایسه داده های حاصل با نتایج حاصل از مدل سازی فیزیکی و آزمایشگاهی انجام شده.



## پیوست

## نرم افزار دستگاه

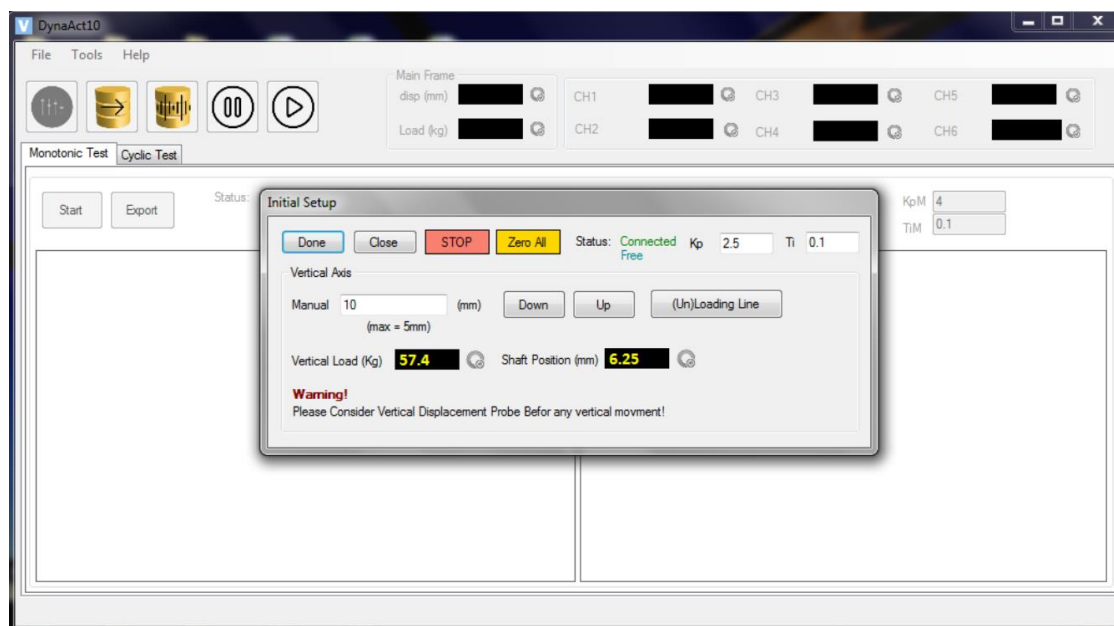
در این قسمت به دلیل اهمیت بالای نرم افزار دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس معرفی می شود: همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است نرم افزار طراحی شده دارای سه منوی File، Tools، Help می باشد که در منوی File می توان نتایج را Export کرد و همچنین گزینه ای به نام Exit برای خروج قرار داده شده است. در منوی Tools نیز می توان مطابق شکل (۱) عملیات کالیبراسیون سنسورها و دستگاه را انجام داد. در منوی Help نیز در مورد نرم افزار دستگاه توضیحاتی داده شده است.



شکل (۱) نرم افزار دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس

همانند شکل (۲) در قسمت Initial Setup می توان تنظیمات دستی از جمله قرار دادن شفت در موقعیت مورد نظر همراه با مشاهده ی زنده تغییرات را انجام داد. که با استفاده از گزینه ی Down و Up شفت را در موقعیت مورد نظر تنظیم می کنیم، همچنین با استفاده از گزینه ی (Un)Loading Line شفت به موقعیت اولیه ( صفر) خود برمی گردد. با کلیک بر روی گزینه ی Done و Close پنجره تنظیمات دستی بسته می شود، همچنین در صورت نیاز برای قرارگیری شفت در موقعیت مورد نظر پس از مشاهده می توان از گزینه ی Stope استفاده کرد و با گزینه ی Zero all می توان دیتاها را صفر

کرد. با استفاده از گزینه‌ی Status می‌توان وضعیت اکچویتور را مشاهده کرد که اگر در حالت Free باشد یعنی سیستم آزاد بوده و می‌توان به دستگاه دستورات مد نظر را داد و اگر سیستم در حالت Busy باشد یعنی سیستم در حال انجام دستورات است و تا زمانی که آزاد نشده نباید دستوری به دستگاه داده شود.



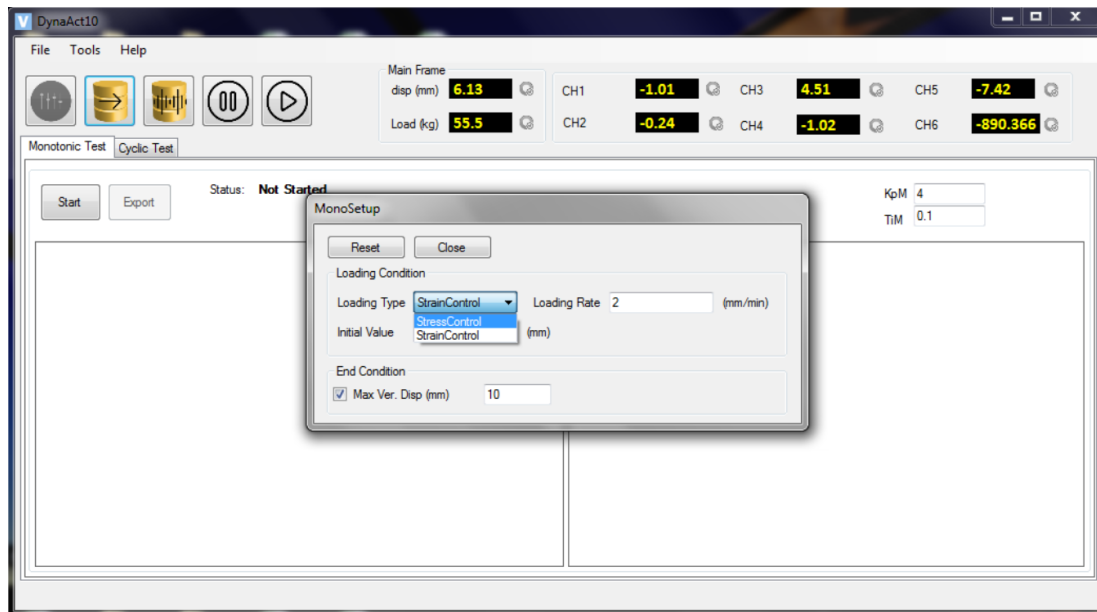
شکل (۲) منوی تنظیمات دستی دستگاه (Initial Setup)

در قسمت MonoSetup چند گزینه وجود دارد که در گزینه‌ی Loading Type می‌توان نوع بارگذاری تنش کنترل و کرنش کنترل را بسته به نیاز آزمایش انتخاب کرد. در قسمت Loading Rate می‌توان نرخ بارگذاری را بسته به نیاز وارد کرد که در حالت تنش کنترل<sup>۱</sup> بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و در حالت کرنش کنترل<sup>۲</sup> بر حسب میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد. در گزینه‌ی Initial Value می‌توان به سیستم دستگاه اعلام کرد که از مقدار جابه‌جایی که مدنظر کاربر می‌باشد با نرخ جابه‌جایی که تعریف شده شروع به بارگذاری کند. همچنین در قسمت Max Var.Dis می‌توان به دستگاه اعلام کرد که به مقدار جابه‌جایی مدنظر رسید بارگذاری دستگاه متوقف شود. بعد از وارد کردن اطلاعات آزمایش با

<sup>1</sup> Strain Control

<sup>2</sup> Stress Control

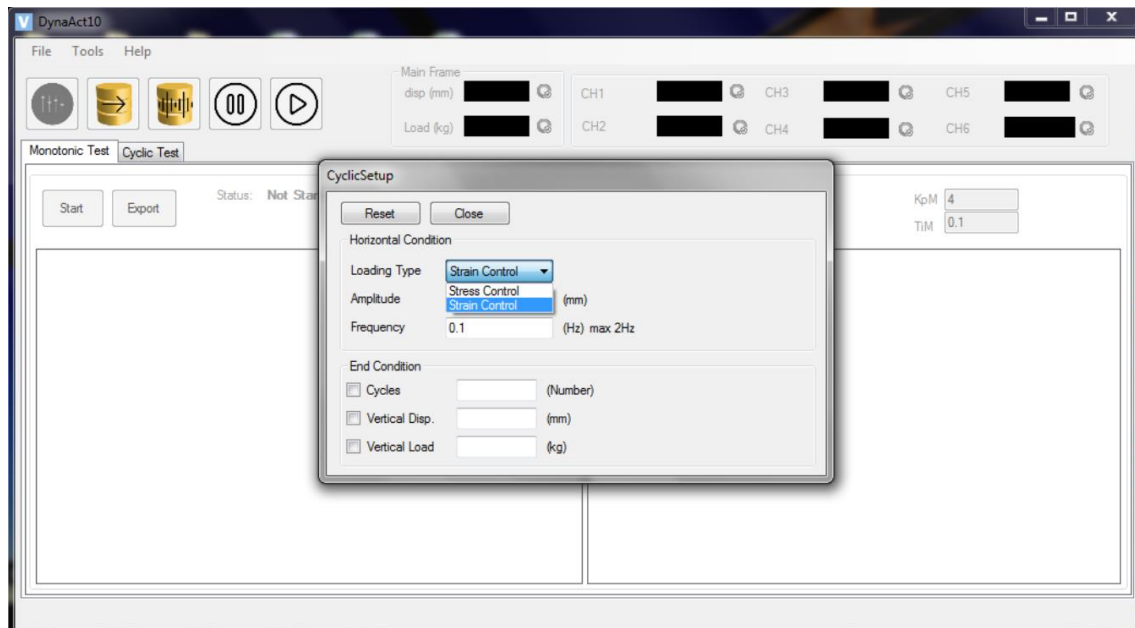
کلیک روی گزینه‌ی Close منوی MonoSetup بسته می‌شود. شکل (۳)



شکل (۳) منوی بارگذاری مونوتونیک (MonoSetup)

در منوی CyclicSetup نیز چند گزینه وجود دارد که در قسمت Loading Type نوع بارگذاری تنش کنترل و کرنش کنترل را بسته به نوع آزمایش انتخاب کرد. در گزینه‌ی Amplitude می‌توان دامنه بارگذاری را وارد کرد که در حالت تنش کنترل واحدش بر حسب کیلوگرم و در حالت کرنش کنترل بر حسب میلی‌متر می‌باشد. در گزینه‌ی Frequency می‌توان فرکانس مورد نظر را بر حسب هرتز وارد کرد. در قسمت End Condition داده‌های را بسته به نوع آزمایش باید وارد کرد در Cycles تعداد سیکل‌های مورد نظر وارد می‌شود که واحد آن بر حسب تعداد می‌باشد، در قسمت Vertical Dis. به دستگاه اعلام می‌شود که در بارگذاری سیکلی به جابه‌جایی مدنظر بر حسب میلی‌متر که رسید بارگذاری را متوقف کند، در گزینه‌ی Vertical Load. به دستگاه اعلام می‌شود که به مقدار بار مد نظر که رسید بارگذاری متوقف شود. گزینه‌های که در قسمت End Condition ذکر شد نیازی بر این نیست که حتما همه را وارد کرد بسته به نوع آزمایش و خروجی‌های مدنظر هر کدام از گزینه‌های مورد نظر انتخاب می‌شود، همچنین قابل ذکر است که امکان وارد کردن اطلاعات مربوط به هر ۳ گزینه محیا شده است. بعد از وارد کردن اطلاعات با استفاده از گزینه‌ی Close منوی SyclicSetup بسته شده و اطلاعات تا پایان

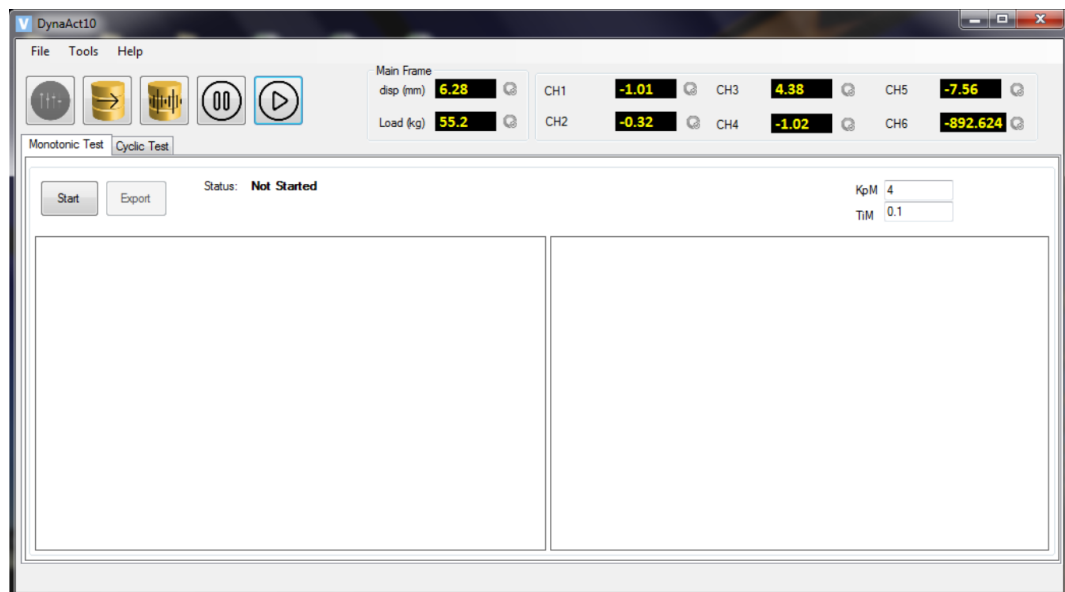
آزمایش در آن ذخیره می‌ماند. شکل (۴)



شکل (۴) منوی بارگذاری سیکلی (SyclicSetup)

از آنجایی که دستگاه ساخته شده به صورت PID کنترلر کار می‌کند در سمت راست نرم افزار قسمت‌های به نام KpM و TiM قرار داده شده است که اعداد پیشنهادی در این قسمت‌های Monotonic Test و Cyclic Test بسته به نوع آزمایش مونوتونیک و سیکلی متفاوت می‌باشد.

بعد از انجام تنظیمات دستی و وارد کردن اطلاعات مربوط به بارگذاری استاتیکی و دینامیکی و کلیک گزینه‌ی Play دیتاها به صورت زنده نمایش داده می‌شود، همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است در صفحه‌ی اصلی دو کانال به نام‌های dis (mm) و Load (kg) که جابه‌جایی و بارها را به صورت زنده نمایش می‌دهد، همچنین ۶ کانال دیگر نیز روی صفحه وجود دارد، که مربوط به سایر سنسورهای اتصالی به دیتالاگر می‌باشد. روبه‌روی تمامی کانال‌ها یک دکمه وجود دارد که با کلیک روی هر دکمه دیتاهای موجود صفر می‌شود و نویزهای وجود دارد که قابل صرف نظر کردن است.



شکل (۵) نمایش دیتاهای زنده‌ی دستگاه



## مراجع

1. Sabatini, P.J., et al., *Micropile design and construction*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, Report No. FHWA-NHI-05-039, 2005.
2. Tsukada, Y., et al., *Mechanism of bearing capacity of spread footings reinforced with micropiles*. Soils and Foundations, 2006. **46**(3): p. 367-376.
3. Boeckmann, A.Z., *Load transfer in micropiles for slope stabilization from tests of large-scale physical models*. 2006, University of Missouri--Columbia.
4. Groneck, P.B., et al., *Pin piles save silos*. Civil Engineering, 1993. **63**(9): p. 66.
5. Russo, G., *Full-scale load tests on instrumented micropiles*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2004. **157**(3): p. 127-135.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Manual, D., 7.02: *Foundations & Earth Structures*. Naval Facilities Engineering Command, Alexandria, Va, 1986.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. El-aziz, A. and A. Yehia, *Performance of hollow bar micropiles under axial and lateral loads in cohesive soils*. 2012.
17. Capatti, M.C., F. Dezi, and M. Morici, *Field tests on micropiles under dynamic lateral loading*. Procedia Engineering, 2016. **158**: p. 236-241.
18. Traylor, R., A. Cadden, and D. Bruce, *High capacity micropiles in karst: challenges and opportunities*, in *Deep Foundations 2002: An International*

- Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance*. 2002. p. 743-759.
19. Cadden, A., et al., *Micropiles: recent advances and future trends*, in *Current Practices and Future Trends in Deep Foundations*. 2004. p. 140-165.
  20. 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.
  21. 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.
  22. Baziar, M.H. and M.R. ZIAEI, *Evaluation of cone penetration resistance in loose silty sand using calibration chamber*. 2006.
  23. 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.
  24. Khouaouci, M., et al., *SINGLE PILE BEHAVIOR UNDER CYCLIC AXIAL LOADING IN SAND-PHYSICAL MODELING IN CALIBRATION CHAMBER*. 2018.
  25. 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.
  26. Bucky, P.B., *Use of models for the study of mining problems*. 1931: American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Incorporated.
  27. Panek, L.A., *Centrifugal testing apparatus for mine-structure stress analysis*. Vol. 4883. 1952: US Dept. of the Interior, Bureau of Mines.
  28. Schofield, A.N., *Cambridge geotechnical centrifuge operations*. *Geotechnique*, 1980. **30**(3): p. 227-268.
  29. Shen, C., et al., *Centrifuge modeling of lateral earth support*. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1982. **108**(9): p. 1150-1164.
  30. Mikasa, M. and N. Takada. *Selfweight consolidation of very soft clay by centrifuge*. in *Sedimentation Consolidation Models—Predictions and Validation*. 1984. ASCE.
  31. Hushmand, B., R. Scott, and C. Crouse, *Centrifuge liquefaction tests in a laminar box*. *Geotechnique*, 1988. **38**(2): p. 253-262.
  32. 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.
  33. Gibson, A.D., *Physical scale modeling of geotechnical structures at one-G*. 1997, California Institute of Technology.
  34. Prasad, S., et al., *Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering*. *Current science*, 2004: p. 1398-1404.
  35. 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.
  36. Asefi, A., A.A. ESLAMI, and N.M. LASHTEH, *Investigation of Anzali harbor sand behavior using a glass tank and a vibration table*. 2009.

37. 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.
38. Horvath, R.G. and D. Stolle, *Frustum confining vessel for testing model piles*. Canadian geotechnical journal, 1996. **33**(3): p. 499-504.
39. Sedran, G., *Experimental and analytical study of a frustum confining vessel*. 1999.
40. 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.
41. ASTM, D., *Standard test method for particle-size analysis of soils*. 2007.
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.
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.
45. Poulos, H., *Some aspects of skin friction of piles in clay under cyclic loading*. NASA STI/Recon Technical Report N, 1980. **82**.
46. Green, S.B. and N.J. Salkind, *Using SPSS for Windows and Macintosh, Books a la Carte*. 2016: Pearson.

۴۷. ایرانمنش ع، (۱۳۹۴)، پایان نامه ارشد: "مطالعات آزمایشگاهی تعیین ظرفیت باربری میکروپایل‌ها"، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه باهنر کرمان.

**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 micropiles or small piles as a structural element in soils. 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 injection radius, wall cohesion and pounding effect on bearing capacity 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. In this study, micropiles with injection radius of 65, 120 and 170 mm with length of 1 meter were used. The soil used is standard Firoozkooh sand, which is used in relative densities of 45% and 90%. Finally, it is determined that the effect of density is considerable on load capacity, which is not mentioned in the code and SPSS software shows that the density effect is 1.47 times of the injection radius in increasing the load bearing capacity. Also, according to laboratory results, in the densities of 45% and 90%, the wall cohesion difference, increased bearing capacity 39% and 43%, respectively.

**Keywords:** Bearing capacity of micropile, Laboratory modeling, Physical modeling apparatus, Injection radius, Wall cohesion, SPSS analysis.



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Civil Engineering**

**M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering**

**Evaluation of the effect of wall adhesion (alpha band) changes and the  
radius of the injection on micropile's bearing capacity in granular soils  
with different densities using physical laboratory modeling**

**By:**

**Amin Ramesh**

**Supervisors:**

**Dr. Reza Naderi**

**Dr. Mohsen Keramati**

**March 2019**