

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

بررسی آزمایشگاهی رفتار شمع تحت بارگذاری محوری چرخه‌ای در ماسه

نگارنده

مهرداد تحویلی

اساتید راهنما

دکتر امیر بذرافشان مقدم

دکتر جعفر بلوری بزاز

شهریور ۱۳۹۷

تقدیم به همه عزیزانم

اگر در خور تقدیم باشد...

سپاس گزارم

از پدر و مادر عزیز و همسر نازنینم که همواره برای من هم انگیزه بودند و هم هدف.

تقدیر و تشکر

اینجانب لازم می‌دانم که بدین‌وسیله از زحمات بی‌دریغ و نیز همراهی و راهنمایی‌های مستمر اساتید راهنمای این پایان‌نامه جناب آقای دکتر جعفر بلوری بزاز و جناب آقای دکتر امیر بذرافشان مقدم تشکر و قدردانی نمایم و برای هردوی ایشان آرزوی توفیق الهی داشته باشم.

همچنین از اعضای هیئت داوران جناب آقای دکتر رضا نادری و جناب آقای دکتر محسن کرامتی که قبول زحمت فرمودند و در جلسه دفاع حضور یافته و اینجانب را از نظرات ارزشمند خود بی‌دریغ نگذاشتند، کمال تشکر را دارم.

تعهدنامه

اینجانب مهرداد تحویلی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران- ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی رفتار شمع تحت بارگذاری محوری چرخه‌ای در ماسه، تحت راهنمایی دکتر امیر بذرافشان مقدم و دکتر جعفر بلوری بزاز متعهد می شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

امروزه شمع‌های تک معمول‌ترین نوع پی برای توربین‌های بادی فراساحلی می‌باشند. این شمع‌های سخت و قطور در دوران بهره‌برداری خود علاوه بر طوفان، جزرومد و باد تحت اثر میلیون‌ها بارگذاری چرخه‌ای کوچک ایجاد شده توسط نیروهای محیطی قرار می‌گیرند. بارگذاری چرخه‌ای طولانی‌مدت می‌تواند منجر به تغییرشکل ناخواسته در خاک اطراف شمع شود. این امر ممکن است باعث کاهش مقاومت سیستم شمع-خاک شده و منجر به گسیختگی سیستم گردد. هیچ روش استاندارد جهانی پذیرفته شده‌ای جهت تخمین تغییر مکان شمع، تحت بارگذاری قائم چرخه‌ای وجود ندارد، لذا به منظور متحدکردن بررسی اثر بارگذاری چرخه‌ای بلندمدت بر روی شمع، از مفهوم کاهش و نمودار ثبات چرخه‌ای استفاده می‌شود. جهت بررسی اثر پارامترهای فیزیکی شمع، مکانیکی خاک، سطح تنش و کرنش بر روی رفتار سیستم خاک-شمع از نظریه‌های ارائه شده توسط سایر محققین که در این زمینه فعالیت داشته‌اند، استفاده شده است. با ساخت یک سیستم بارگذاری کارآمد و با انجام آزمایش بر روی شمع‌های گالوانیزه کوچک مقیاس در خاک دانه‌ای خشک، اثر تغییر پارامترهای طول، سطح تنش، قطر و دانسیته نسبی خاک بر روی رفتار سیستم خاک-شمع تحت بارگذاری قائم چرخه‌ای، مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: شمع تک، بار قائم چرخه‌ای، تغییر مکان شمع، خاک دانه‌ای، کاهش مقاومت سیستم

شمع-خاک.

فهرست مطالب

فصل ۱- مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- ضرورت و اهداف انجام پروژه.....	۲
۳-۱- معرفی پژوهش.....	۴
فصل ۲- مروری بر ادبیات فنی در زمینه شمع تحت اثر بار قائم چرخه‌ای.....	۷
۱-۲- مقدمه.....	۸
۲-۲- رفتار شمع تحت بارگذاری یکنواخت.....	۹
۱-۲-۲- ظرفیت باربری استاتیکی شمع.....	۱۱
۲-۲-۲- توزیع تنش برشی در طول شمع.....	۱۲
۳-۲-۲- روش طراحی ICP برای شمع مدفون در ماسه.....	۱۴
۴-۲-۲- رفتار نیرو - جابجایی برای شمع.....	۱۶
۵-۲-۲- روش انتقال بار (T-Z).....	۱۷
۶-۲-۲- روش الاستیک.....	۱۸
۳-۲- بررسی رفتار خاک تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای.....	۲۰
۱-۳-۲- تغییرشکل ماسه تحت بارگذاری چرخه‌ای.....	۲۰
۲-۳-۲- سطوح تنش چرخه‌ای.....	۲۲
۳-۳-۲- سطح کرنش چرخه‌ای.....	۲۴
۴-۳-۲- تغییر در دانسیته ماسه تحت بارگذاری چرخه‌ای.....	۲۵
۴-۲- بررسی رفتار شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای.....	۲۶
۱-۴-۲- تجمع تغییرمکانهای دائمی.....	۲۸
۲-۴-۲- کاهش اصطکاک تحت بارگذاری چرخه‌ای.....	۳۰
۳-۴-۲- مکانیزم گسیختگی شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای.....	۳۵
۵-۲- تجزیه و تحلیل پاسخ چرخه‌ای.....	۳۷
۶-۲- نمودار ثبات چرخه‌ای.....	۴۱
۷-۲- خلاصه و جمع‌بندی.....	۴۷

فصل سوم - طراحی آزمایش‌ها جهت مدل‌سازی شمع تحت اثر بار محوری چرخه‌ای	۴۹
۱-۳- مقدمه	۵۰
۲-۳- دستگاه و مصالح آزمایش	۵۰
۱-۲-۳- خاک مورد استفاده	۵۰
۲-۲-۳- شمع‌های مورد استفاده	۵۳
۳-۲-۳- مخزن خاک	۵۶
۴-۲-۳- گیج مکانیکی	۵۶
۵-۲-۳- چگونگی اعمال نیروی قائم	۵۸
۳-۳- روش انجام آزمایش	۵۹
۴-۳- نمودارهای نیرو و تغییر مکان	۶۱
فصل چهارم - تحلیل و تفسیر نتایج	۷۵
۱-۴- مقدمه	۷۶
۲-۴- پیش‌بینی رفتار چرخه‌ای شمع‌ها	۷۶
۳-۴- پارامترهای موثر بر رفتار شمعها در خاک نامتراکم	۷۸
۱-۳-۴- اثر سطح بارگذاری بیش از ۳۰ درصد	۷۸
۲-۳-۴- اثر تغییرات طول شمع	۸۱
۲-۳-۴- اثر تغییرات قطر شمع	۸۸
۴-۴- پارامترهای موثر بر رفتار شمع در خاک متراکم	۹۲
۱-۴-۴- اثر سطح بارگذاری کمتر از ۲۰ درصد	۹۲
۲-۴-۴- اثر تغییرات طول شمع	۹۴
۳-۴-۴- اثر تغییرات قطر شمع	۱۰۱
۴-۴- اثر پارامتر تراکم بر رفتار خاک	۱۰۶
فصل پنجم - نتیجه‌گیری و پیشنهادها	۱۱۵
۱-۵- مقدمه	۱۱۶
۲-۵- نتیجه‌گیری	۱۱۶
۳-۵- پیشنهادها	۱۱۸
مراجع:	۱۲۰

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- تغییرات اصطکاک محلی شمع در بارگذاری یکنواخت ۱۰
- شکل ۲-۲- تصویر شماتیک ظرفیت باربری نهایی شمع ۱۲
- شکل ۳-۲- مقاومت اصطکاکی واحد سطح برای شمع در ماسه ۱۳
- شکل ۴-۲- مودهای تغییرشکل استوانه ۱۹
- شکل ۵-۲- نشست تجمعی سر شمع ۲۱
- شکل ۶-۲- تغییرشکل خاک در طول بارگذاری ۲۲
- شکل ۷-۲- تغییرات نرخ تنش چرخه‌ای در برابر نرخ کرنش دائمی ۲۳
- شکل ۸-۲- تغییرات مشخصات خاک با کرنش برشی ۲۴
- شکل ۹-۲- متوسط بار اعمال شده به سر شمع برای دو نوع بار یکنواخت و چرخه‌ای ۲۶
- شکل ۱۰-۲- تغییر مکان شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای ۲۹
- شکل ۱۱-۲- نمودار اندرکنش چرخه‌ای شمع ۳۲
- شکل ۱۲-۲- شرایط بارگذاری چرخه‌ای شمع ۳۲
- شکل ۱۳-۲- نمودار اندرکنش چرخه‌ای شمع در خاک غیرچسبنده ۳۳
- شکل ۱۴-۲- نمودار اندرکنش چرخه‌ای شمع ۳۳
- شکل ۱۵-۲- پیشرفت اصطکاک جدار شمع در مقابل تعداد چرخه‌های بارگذاری ۳۴
- شکل ۱۶-۲- توزیع تنش برشی ماکزیمم و مینیمم (T) در طول بارگذاری چرخه‌ای ۳۵
- شکل ۱۷-۲- الف- توزیع بار محوری در طول بارگذاری چرخه‌ای در شرایط بارگذاری ۳۵
- شکل ۱۷-۲- ب- توزیع بار محوری در طول بارگذاری چرخه‌ای در شرایط باربردای ۳۶
- شکل ۱۸-۲- تغییرات فشار افقی در طول بارگذاری چرخه‌ای ۳۶
- شکل ۱۹-۲- ویژگیهای اصلی نمودار ثبات چرخه‌ای ۴۵
- شکل ۲۰-۲- تصویر شماتیک شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای محوری ۴۶
- شکل ۱-۳- نمودار دانه‌بندی خاک مورد استفاده ۵۲
- شکل ۲-۳- نمودار تنش برشی - تغییر مکان برای ماسه با دانسیته نسبی ۳۳% ۵۲

- شکل ۳-۳ نمودار تنش برشی - تغییر مکان برای ماسه با دانسیته نسبی ۵۲
- شکل ۳-۴ نمودار تنش برشی- تنش قائم برای ماسه با دانسیته نسبی ۳۳٪ ۵۳
- شکل ۳-۵ نمودار تنش برشی- تنش قائم برای ماسه با دانسیته نسبی ۸۴٪ ۵۳
- شکل ۳-۶ شمع‌های مورد استفاده در آزمایش ۵۴
- شکل ۳-۷ دستگاه کشش جهت تعیین مقاومت کششی نهایی شمع‌های فولادی ۵۵
- شکل ۳-۸ نمودار تنش- کرنش لوله آلومینیومی و لوله گالوانیزه ۵۵
- شکل ۳-۹ مخزن خاک مورد آزمایش ۵۶
- شکل ۳-۱۰ گیج نصب شده در زیر صفحه بارگذاری ۵۷
- شکل ۳-۱۱ پایه مغناطیسی و گیج نصب شده بر روی آن ۵۷
- شکل ۳-۱۲ نحوه انتقال نیرو به شمع ۵۹
- شکل ۳-۱۳ تراز مورد استفاده جهت قرار دادن شمع در خاک به صورت قائم ۶۰
- شکل ۳-۱۴ تصویر و طرح شماتیک دستگاه آزمایش ۶۱
- شکل ۳-۱۵ نمودار نیرو - جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۲ و طول مدفون ۴۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد تا مرحله گسیختگی ۶۲
- شکل ۳-۱۶ نمودار نیرو - جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۲ و طول مدفون ۴۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد تا مرحله گسیختگی ۶۲
- شکل ۳-۱۷ نمودار نیرو - جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۲ و طول مدفون ۴۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد ۶۴
- شکل ۳-۱۸ نمودار نیرو - جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۲ و طول مدفون ۶۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد ۶۵
- شکل ۳-۱۹ نمودار نیرو - جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۲ و طول ۸۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد ۶۶
- شکل ۳-۲۰ نمودار نیرو- جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۴۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد ۶۷
- شکل ۳-۲۱ نمودار نیرو - جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۶۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد ۶۷
- شکل ۳-۲۲ نمودار نیرو - جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۸۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد ۶۸

شکل ۳-۲۳ نمودار نیرو- جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۲ و طول ۴۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴	درصد
۶۹	
شکل ۳-۲۴ نمودار نیرو- جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۲ و طول ۶۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴	درصد
۷۰	
شکل ۳-۲۵ نمودار نیرو- جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۲ و طول ۸۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴	درصد
۷۱	
شکل ۳-۲۶ نمودار نیرو- جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۴۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴	درصد
۷۱	
شکل ۳-۲۷ نمودار نیرو- جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۶۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴	درصد
۷۲	
شکل ۳-۲۸ نمودار نیرو- جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۸۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴	درصد
۷۳	
شکل ۴-۱- تغییرات تغییر مکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L۴۰-D۲۷ در خاک با دانسیته نسبی ۳۳	درصد
۷۸	
شکل ۴-۲- تغییرات تغییر مکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L۶۰-D۲۷ در خاک با دانسیته نسبی ۳۳	درصد
۷۹	
شکل ۴-۳- تغییرات تغییر مکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L۸۰-D۲۷ در خاک با دانسیته نسبی ۳۳	درصد
۸۰	
شکل ۴-۴- تغییرات تغییر مکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L۴۰-D۲۲ در خاک با دانسیته نسبی ۳۳	درصد
۸۰	
شکل ۴-۵- تغییرات تغییر مکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L۶۰-D۲۲ در خاک با دانسیته نسبی ۳۳	درصد
۸۱	
شکل ۴-۶- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد برای سیکل دهم. ۸۲	
شکل ۴-۷- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد برای سیکل پنجاهم	۸۲
شکل ۴-۸- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد برای سیکل دهم. ۸۳	
شکل ۴-۹- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد برای سیکل پنجاهم	۸۳
شکل ۴-۱۰- نمودار نیرو- جابجایی برای شمع Ga-L۴۰-D۲۷ در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم و پنجاهم	۸۴

- شکل ۴-۱۱- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L۶۰-D۲۷ در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم و پنجاهم ۸۴
- شکل ۴-۱۲- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L۸۰-D۲۷ در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم و پنجاهم ۸۵
- شکل ۴-۱۳- نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد ۸۵
- شکل ۴-۱۴- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L۴۰-D۲۲ در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم و پنجاهم ۸۶
- شکل ۴-۱۵- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L۶۰-D۲۲ در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم و پنجاهم ۸۶
- شکل ۴-۱۶- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L۸۰-D۲۲ در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم و پنجاهم ۸۷
- شکل ۴-۱۷- نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد ۸۷
- شکل ۴-۱۸- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل دهم ۸۸
- شکل ۴-۱۹- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل پنجاهم ۸۸
- شکل ۴-۲۰- نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۴۰۰ میلی‌متر و قطرهای ۲۲ و ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد ۸۹
- شکل ۴-۲۱- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم ۹۰
- شکل ۴-۲۲- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل پنجاهم ۹۰
- شکل ۴-۲۳- نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۶۰۰ میلی‌متر و قطرهای ۲۲ و ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد ۹۱
- شکل ۴-۲۴- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل دهم ۹۲
- شکل ۴-۲۵- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل پنجاهم ۹۲

- شکل ۴-۲۶- تغییرات تغییرمکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L۶۰-D۲۷ در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد ۹۳
- شکل ۴-۲۷- تغییرات تغییرمکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L۸۰-D۲۷ در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد ۹۴
- شکل ۴-۲۸- تغییرات تغییرمکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L۴۰-D۲۲ در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد ۹۴
- شکل ۴-۲۹- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۷ میلیمتر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد برای سیکل دهم ۹۵
- شکل ۴-۳۰- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۷ میلیمتر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد برای سیکل پنجاهم ۹۵
- شکل ۴-۳۱- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۲ میلیمتر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد برای سیکل دهم ۹۶
- شکل ۴-۳۲- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۲ میلیمتر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد برای سیکل پنجاهم ۹۶
- شکل ۴-۳۳- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L۴۰-D۲۷ در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم و پنجاهم ۹۷
- شکل ۴-۳۴- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L۶۰-D۲۷ در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم و پنجاهم ۹۷
- شکل ۴-۳۵- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L۸۰-D۲۷ در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم و پنجاهم ۹۸
- شکل ۴-۳۶- نمودار سیکل-تغییرمکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلیمتر و قطر ۲۷ میلیمتر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد ۹۸
- شکل ۴-۳۷- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L۴۰-D۲۲ در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم و پنجاهم ۹۹
- شکل ۴-۳۸- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L۶۰-D۲۲ در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم و پنجاهم ۹۹
- شکل ۴-۳۹- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L۸۰-D۲۲ در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم و پنجاهم ۱۰۰
- شکل ۴-۴۰- نمودار سیکل-تغییرمکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلیمتر و قطر ۲۲ میلیمتر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد ۱۰۰

- شکل ۴-۴۱- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۴۰۰ میلیمتر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم ۱۰۱
- شکل ۴-۴۲- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۴۰۰ میلیمتر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل پنجاهم ۱۰۲
- شکل ۴-۴۳- نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۴۰۰ میلیمتر و قطرهای ۲۲ و ۲۷ میلیمتر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد ۱۰۲
- شکل ۴-۴۴- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۶۰۰ میلیمتر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم ۱۰۳
- شکل ۴-۴۵- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۶۰۰ میلیمتر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل پنجاهم ۱۰۴
- شکل ۴-۴۶- نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۶۰۰ میلیمتر و قطرهای ۲۲ و ۲۷ میلیمتر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد ۱۰۴
- شکل ۴-۴۷- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۸۰۰ میلیمتر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم ۱۰۵
- شکل ۴-۴۸- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۸۰۰ میلیمتر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل پنجاهم ۱۰۵
- شکل ۴-۴۹- نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۸۰۰ میلیمتر و قطرهای ۲۲ و ۲۷ میلیمتر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد ۱۰۶
- شکل ۴-۵۰- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل یکم برای شمع به قطر ۲۲ میلیمتر و طول ۴۰۰ میلیمتری .. ۱۰۷
- شکل ۴-۵۱- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل پنجاهم برای شمع به قطر ۲۲ میلیمتر و طول ۴۰۰ میلیمتری ۱۰۷
- شکل ۴-۵۲- نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۴۰۰ میلیمتر و قطرهای ۲۲ میلیمتر در خاک با تراکم متغیر ۱۰۸
- شکل ۴-۵۳- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل یکم برای شمع به قطر ۲۷ میلیمتر و طول ۴۰۰ میلیمتری .. ۱۰۸
- شکل ۴-۵۴- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل پنجاهم برای شمع به قطر ۲۷ میلیمتر و طول ۴۰۰ میلیمتری ۱۰۹
- شکل ۴-۵۵- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل اول برای شمع به قطر ۲۲ میلیمتر و طول ۶۰۰ میلیمتری .. ۱۰۹
- شکل ۴-۵۶- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل پنجاهم برای شمع به قطر ۲۲ میلیمتر و طول ۶۰۰ میلیمتری ۱۱۰

- شکل ۴-۵۷- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل اول برای شمع به قطر ۲۷ میلیمتر و طول ۶۰۰ میلیمتری .. ۱۱۰
- شکل ۴-۵۸- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل پنجاهم برای شمع به قطر ۲۷ میلیمتر و طول ۶۰۰ میلیمتری..... ۱۱۱
- شکل ۴-۵۹- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل اول برای شمع به قطر ۲۲ میلیمتر و طول ۸۰۰ میلیمتری .. ۱۱۱
- شکل ۴-۶۰- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل پنجاهم برای شمع به قطر ۲۲ میلیمتر و طول ۸۰۰ میلیمتری..... ۱۱۲
- شکل ۴-۶۱- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل اول برای شمع به قطر ۲۷ میلیمتر و طول ۸۰۰ میلیمتری .. ۱۱۲
- شکل ۴-۶۲- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل پنجاهم برای شمع به قطر ۲۷ میلیمتر و طول ۸۰۰ میلیمتری..... ۱۱۳
- شکل ۴-۶۳- نمودار سیکل-تغییر مکان در شمع‌های با سطح بارگذاری بین ۲۰ تا ۳۰ درصد ۱۱۴

فهرست جداول

- جدول ۱-۲- مشخصات خاک لابن [Lehane et al., (۱۹۹۳)] ۱۴
- جدول ۲-۲- مشخصات لایه‌های خاک لابن [Lehane et al., (۱۹۹۳)] ۱۴
- جدول ۳-۲- بررسی رفتار ماسه تحت بارگذاری چرخه‌ای محوری ۲۳
- جدول ۴-۲- آزمون‌های بارگذاری چرخه‌ای بر روی مدل‌های آزمایشگاهی ۲۸
- جدول ۵-۲- تعداد چرخه‌های منجر به گسیختگی در سطح بار چرخه‌ای [Chan and Hanna, ۱۹۸۰] ۲۹
- جدول ۶-۲- خلاصه‌ای از پارامترهای استاتیکی مورد نیاز برای تجزیه و تحلیل پاسخ‌های چرخه‌ای [Poulos, ۱۹۸۸]؛ ۳۸
- جدول ۷-۲- خلاصه‌ای از پارامترهای چرخه‌ای مورد نیاز برای تجزیه و تحلیل پاسخ‌های چرخه‌ای [Poulos, ۱۹۸۸]؛ ۴۰
- جدول ۱-۳- زاویه اصطکاک داخلی بدست آمده از آزمایش برش مستقیم (کشاورز و بلوری، ۱۳۹۰) ۵۳
- جدول ۲-۳- مشخصات لوله‌های مورد استفاده (کشاورز و بلوری، ۱۳۹۰) ۵۶
- جدول ۳-۳- مشخصات آزمایش‌های انجام شده ۶۳
- جدول ۴-۱- پیش‌بینی تجمع تغییر مکان‌ها در شمع‌ها ۷۷

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- مقدمه

شمع‌ها عموماً عضوهای قائم یا اندکی مایل سازه‌ای هستند و در مقایسه با طول خود دارای سطح مقطع بسیار کمی می‌باشند. شمع‌ها به داخل خاک وارد می‌گردند تا بارها و نیروهای ناشی از سازه فوقانی را به خاک منتقل نمایند. بنابراین شمع‌ها شالوده‌هایی عمیق هستند که در صورت مناسب نبودن ظرفیت باربری زمین برای استفاده از شالوده‌های سطحی، از آنها استفاده می‌شود. تقریباً تمام شمع‌ها تحت تأثیر بارهای قائم قرار می‌گیرند. در مواردی، شمع‌ها تحت بارهای قائم قابل توجهی قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال در پی سازه‌های ساحلی تحت اثر باد و امواج دریا، در پی برج‌های انتقال نیرو و همچنین سازه‌های مربوط به حمل و نقل مانند؛ پل راه‌آهن که تحت اثر بار ترافیکی است، نیروی قائم قابل توجهی در طول عمر خود به پی شمعی انتقال می‌یابد.

جهت بررسی اثر بار چرخه‌ای محوری بر روی شمع‌ها روش‌های متفاوت با میزان دقت متغیر مانند؛ آزمایش‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس در ترکیب با روش‌های ساده یا پیشرفته عددی به‌کار برده شده است که در فصل بعد به توضیح هر یک پرداخته خواهد شد.

۱-۲- ضرورت و اهداف انجام پروژه

بسیاری از محققان پاسخ محوری شمع‌های حفاری و یا کوبیده شده در معرض بارهای محوری سیکلی را مورد بررسی قرار داده‌اند [Chan and Hanna, 1980]. به عنوان مثال، [Boulon et al. 1980] از یک فرمولی هذلولی در تجزیه و تحلیل المان محدود جهت محاسبه کرنش غیر قابل برگشت خاک و در نتیجه برای پیش بینی جابجایی انباشته دائمی شمع حفاری شده در هنگام بارگذاری چرخه‌ای محوری استفاده کرده است.

Poulos [1981, 1989] به بررسی داده‌های حاصل از آزمون‌های صحرایی بر روی شمع‌های کوبیده

و حفاری شده، تحت بارگذاری محوری چرخه‌ای پرداخته است و در این راستا روش بررسی المان مرزی اصلاح شده را که در آن کاهش چرخه‌ای مقاومت و همچنین افزایش جابجایی دائمی شمع می‌تواند برآورد شود، توسعه داده‌اند.

[Poulos and Fellow 1988] ایده استفاده از یک نمودار پایدار چرخه‌ای را به عنوان ابزاری مفید جهت تعیین پاسخ شمع به ترکیبات مختلف بارگذاری چرخه‌ای ارائه داده‌اند. مدل‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط [Chan and Hanna 1980] نشان داده است که پاسخ چرخه‌ای شمع جابجا شده در ماسه تحت تأثیر تعداد چرخه (N)، فرکانس چرخه بارگذاری (f)، عمق مدفون شمع (L)، دامنه بارگذاری چرخه‌ای (Qcyclic)، دامنه متوسط بارگذاری (Qmean)، مشخصات خاک و سابقه بارگذاری می‌باشد.

براساس نتایج تست‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط [Jardine and Standing 2000] بر روی ۷ شمع فولادی توخالی به قطر ۴۵۷ میلی‌متر کوبیده شده در خاک ماسه‌ای متراکم تا نیمه متراکم در بالا و پایین سطح آب نمودار گسیختگی سیستم شمع-خاک ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصله از این نمودار می‌توان مشاهده کرد؛ تعداد چرخه‌های بارگذاری تا قبل از رسیدن به گسیختگی تابع Qmean و Qcyclic است و اثرات فشار منفذی با توجه به نرخ بارگذاری ناچیز است.

[Jardine et al. 2012] به بررسی اثرات بالقوه بارگذاری چرخه‌ای بر روی شمع سازه‌های فراساحلی پرداخته است و کاربرد عملی این بررسی‌ها در طراحی سازه‌های خاکی را مورد ملاحظه قرار داده است. [Jardine et al. 2012] بر پایه ۱۵ تست صحرایی دریافتند که بارگذاری با وزن سکو، عمق آب، شرایط جوی اقیانوس و فرم سازه متفاوت است.

بهره‌برداری ایمن از تاسیساتی مانند سازه‌های فراساحلی، توربین‌های بادی، دکل و سیلوا متکی بر توانایی شمع این سازه‌ها در تحمل بارگذاری چرخه‌ای محوری وارد بر این فونداسیون‌ها است [C.H.C. Tsuha et al., 2012].

آیین‌نامه و راهنماهای بسیار محدودی پیرامون جابجایی تجمعی و پاسخ سختی شمع تحت بارگذاری محوری چرخه‌ای وجود دارد [Rimoy S et al., 2013].

با توجه به آنچه ذکر شد، درحالی که بارگذاری چرخه‌ای محوری می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر روی شمع بگذارد، غالباً اثرات بالقوه این نوع بارگذاری در طراحی مورد غفلت قرار می‌گیرد. در نتیجه هدف از انجام این پایان‌نامه، بررسی آزمایشگاهی رفتار شمع تحت بارگذاری محوری چرخه‌ای به منظور شناخت دقیق‌تر عوامل مؤثر بر روی اندرکنش سیستم شمع-خاک در این نوع از بارگذاری و همچنین صحت‌سنجی نتایج حاصل از این آزمایش با تحقیق دیگر محققین می‌باشد. از این رو بر آنیم تا با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی کوچک مقیاس در این زمینه، به بررسی هر چه دقیق‌تر رفتار این پی‌ها تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای بپردازیم.

۱-۳- معرفی پژوهش

در پژوهش حاضر به منظور آشنایی هرچه بیشتر با رفتار شمع تحت بارگذاری محوری چرخه‌ای در ماسه خشک، با مبانی و مطالعات صورت گرفته در این زمینه آشنا شده و در انتها نیز با انجام آزمون‌هایی به بررسی دقیق رفتار این گونه از پی‌ها خواهیم پرداخت. در زمینه شمع تحت اثر بار محوری چرخه‌ای تئوری‌های متفاوتی ارائه شده است که بدلیل اختلاف در نتایج این تئوری‌ها، انتخاب روش مناسب برای مهندسان دشوار است. همچنین رفتار شمع، تحت تاثیر تغییر طول و قطر شمع و تغییر دانسیته نسبی خاک تحت اثر بار محوری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل اول که از پیش روی گذشت به معرفی کلی این پژوهش شامل معرفی شمع تحت بارگذاری محوری چرخه‌ای، ضرورت و هدف انجام پژوهش حاضر می‌پردازد.

در فصل دوم به بررسی بارهای محوری چرخه‌ای، تأثیر این نوع از بارگذاری بر خاک ماسه‌ای، پاسخ شمع به این بارگذاری، تئوری‌های ارائه شده در زمینه شمع تحت اثر بار محوری چرخه‌ای، روش‌های

آزمایشگاهی و کاستی این روش‌ها پرداخته شده است.

برای بررسی رفتار شمع تحت اثر بار محوری چرخه‌ای دستگاه آزمایشی طراحی شده است. در این آزمایش از لوله‌های فلزی، به عنوان شمع استفاده شده است. شمع در داخل یک محفظه پر از خاک قرار گرفته و تحت اثر نیروی محوری چرخه‌ای قرار می‌گیرد. جابجایی شمع تحت اثر بار جانبی چرخه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. شرح کامل دستگاه و نحوه انجام آزمایش در فصل سوم آورده شده است. همچنین نتایج دیگر آزمایش‌های لازم جهت حصول پارامترهای مورد نیاز و نمودارهای بدست آمده از آزمایش‌ها در این فصل آورده شده است. در فصل چهارم رفتار شمع‌ها تحت اثر بار محوری چرخه‌ای، تغییر طول شمع، تغییر قطر و تغییر دانسیته نسبی خاک با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده، بررسی شده است. فصل پنجم شامل نتیجه‌گیری و پیشنهادها به عنوان آخرین فصل این پایان‌نامه در نظر گرفته شده است. نتیجه‌گیری بیان شده در این فصل با توجه به تئوری و تحلیل‌های صورت گرفته در فصل چهارم می‌باشد.

فصل ۲

مروری بر ادبیات فنی در زمینه شمع تحت
اثر بار قائم چرخه‌ای

در ساخت بزرگراه‌ها و خطوط راه‌آهن، شمع‌ها بدلیل ظرفیت باربری بالا و نشست کم اولین انتخاب خواهند بود. بارهای چرخه‌ای اعمال شده توسط ترافیک و ... بر روی نشست تجمعی و ظرفیت باربری شمع‌ها اثر می‌گذارد. بار چرخه‌ای بندرت در طراحی‌ها مورد ملاحظه قرار می‌گیرد و یا با ملاحظات موجود پوشش داده می‌شود. لذا بررسی اثر بارگذاری چرخه‌ای بر روی ظرفیت باربری، سختی و نشست تجمعی شمع بسیار اهمیت دارد [Zhang et al., 2016]. چنانچه ذکر شد، شمع و پی‌های شمعی اغلب تحت اثر بارهای محوری چرخه‌ای قرار دارند. این موضوع به خصوص برای شمع سازه‌های دریایی فراساحلی، که در معرض حرکات گهواره‌ای ناشی از اثر باد یا موج قرار دارند، درست است [Chan and Hanna, 1980]. همچنین برای سازه‌های مربوط به حمل و نقل تحت اثر بارگذاری ترافیکی، مانند پل راه‌آهن که همواره در طول عمر خود بار محوری چرخه‌ای قابل توجهی را به فونداسیون خود وارد می‌کنند، صدق می‌کند. به عنوان مثال؛ سازه پل در ریل سیستم‌های حمل و نقل سریع سنگاپور توسط یک ردیف ستون پشتیبانی می‌شوند، که این ستون‌ها بارهای تناوبی حاصل از ترافیک بالای سر را به گروه شمع منتقل می‌کنند [Copsey et al., 1989]. به طور مشخص، در طول دوره عملیات، شمع صلب پی کامپوزیت خاکریز بزرگراه، نه تنها باید بار مرده حاصل از وزن خاکریز را تحمل کند، بلکه باید بارهای چرخه‌ای دینامیکی دوره‌ای حرکت خودروها را نیز تاب آورد [Zheng et al., 2017].

عملیات ایمن تاسیسات مانند؛ سازه‌های دریایی فراساحلی، توربین‌های بادی، شاه‌تیرهای برق و یا سیلواها به توانایی پی آن‌ها برای تحمل بارگذاری چرخه‌ای متکی است [Tsuha et al., 2012]. بارهای جانبی و لحظه‌ای اعمال شده توسط باد یا موج می‌تواند در مقایسه با وزن خود سازه بزرگ باشد و منجر به چندین حالت بارگذاری چرخه‌ای محوری و جانبی پی‌های شمعی شود. اگر نشست بیش از حد سر شمع یا نشست جزئی آن تحت اثر بار چرخه‌ای محوری در طول طراحی با دقت در نظر گرفته نشود، ممکن است باعث تغییر شکل قابل توجه یا چرخش سازه‌های بالای خود گردد [Rimoy et al., 2013]. در حالی که بار محوری چرخه‌ای می‌تواند به طور قابل توجهی بر شمع تاثیر بگذارد، اثرات بالقوه آن

اغلب در طراحی نادیده گرفته می‌شود. بسیاری از محققان به بررسی پاسخ محوری شمع حفاری شده و یا رانده شده در معرض بارهای محوری چرخه‌ای پرداخته‌اند، در ادامه به تفصیل به بررسی آن پرداخته خواهد شد. بوولون و همکاران (۱۹۸۰) در تحلیل المان محدود برای محاسبه کرنش‌های غیرقابل برگشت خاک فرمول هذلولی را اتخاذ کردند و از آن برای پیش‌بینی جابجایی انباشته دائمی شمع‌های حفاری شده در طول بارگذاری چرخه‌ای محوری استفاده کردند. پولوس (۱۹۸۱، ۱۹۸۹) داده‌های آزمایش میدانی پاسخ شمع حفاری شده و رانده شده به بار محوری چرخه‌ای را مورد بررسی قرار داد و تحلیل عنصر مرزی اصلاح شده را توسعه داد که در آن کاهش چرخه‌ای مقاومت جدار و جابجایی دائمی افزایشی می‌تواند تخمین زده شود.

هنگامی که شمع تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرد، خاک اطراف آن تنش و کرنش چرخه‌ای را تجربه می‌کنند. بنابراین پاسخ چرخه‌ای شمع بستگی به پاسخ خاک اطراف آن و سطح تماس خاک-شمع در اثر بارگذاری چرخه‌ای دارند. بر این اساس به بررسی موارد زیر می‌پردازیم:

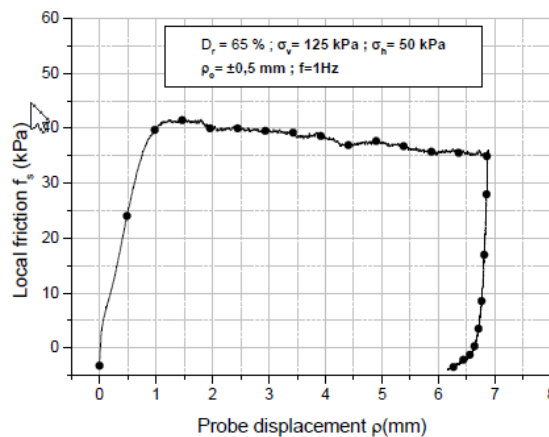
- بررسی رفتار شمع تحت بارگذاری یکنواخت محوری
- بررسی رفتار خاک تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای محوری
- بررسی رفتار شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای محوری

۲-۲- رفتار شمع تحت بارگذاری یکنواخت

هنگامی که به شمع بار محوری یکنواخت اعمال می‌شود، شمع تحت تأثیر جابجایی نسبی مربوط به خاک اطراف خود قرار می‌گیرد. تغییرمکان نسبی وابسته به شمع و خاک باعث ایجاد تنش و کرنش برشی در خاک می‌شود [Cook, 1974] و [Gallagher, 1984] و [Zheng et al., 2017]. کرنش برشی خاک و تغییرشکل الاستیک شمع با افزایش تغییرمکان شمع ادامه می‌یابد. تغییرمکان شمع تحت اثر افزایش بار تا جایی ادامه می‌یابد که تنش برشی بر روی سطح شمع به میزان بیشینه خود برسد. هنگامی

که تنش برشی در امتداد طول شمع به میزان ماکزیمم خود رسید، شمع گسیخته خواهد شد.

Khouaouci et al., [2018] با مدلسازی رفتار چرخه‌ای شمع-ماسه در اتاق کالیبراسیون تغییرات اصطکاک جدار شمع در طول فرآیند بارگذاری یکنواخت را در شکل (۲-۱) نشان داده‌اند. رفتار الاستیک خطی اولیه در جایی که حداکثر مقدار اصطکاک محلی ۴۲ kPa و جابجایی کاوشگر ۱/۱ میلی‌متر است، مشاهده می‌شود. پس از آن، مقدار اصطکاک محلی با مقدار نهایی ۳۵ کیلو پاسکال، در پایان مرحله بارگذاری یکنواخت کمی کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۱- تغییرات اصطکاک محلی شمع در بارگذاری یکنواخت [Khouaouci et al., 2018].

تحت تأثیر بار عمودی، خاک از هر دو بخش، بدنه جانبی شمع و نوک شمع، بار بالای شمع را به اشتراک می‌گیرد. بخشی از بار توسط بخش جانبی شمع و از طریق اندرکنش سطح تماس شمع-خاک به صورت تنش برشی به بدنه خاک انتقال یافته و بقیه بار به لایه باربری در زیر نوک شمع از طریق نوک شمع منتقل می‌شود. در طول انتقال بار محوری، به علت عملکرد مقاومت بدنه شمع توزیع غیریکنواخت نیروی محوری در امتداد بدنه شمع ایجاد می‌شود. با توجه به قابلیت فشردگی مواد بدنه شمع، تغییر شکل فشاری بدنه شمع تا حد مشخصی ایجاد می‌شود. از سوی دیگر، خاک در زیر نوک شمع تا حدودی تحت تغییر شکل فشرده از طریق اثر مشترک بار نوک شمع و انتقال رو به پایین بار ایجاد شده از مقاومت بدنه شمع قرار می‌گیرد. این امر موجب تغییر شکل نشست بالای شمع تحت تاثیر بار عمودی می‌شود. بنابراین، می‌توان مشاهده کرد که، ظرفیت باربری و تغییر شکل پی‌های شمعی تحت

بارگذاری قائم، یک نتیجه از اندرکنش شمع-خاک است که متناسب با اندازه شمع، مشخصات مواد تشکیل دهنده شمع، ویژگی‌های خاک در سطح تماس بدنه و نوک شمع، مشخصات بارگذاری و غیره متفاوت است و در نتیجه یک روند بسیار پیچیده از اثر متقابل شمع-خاک است [Zheng et al., 2017].

۲-۱-۲- ظرفیت باربری استاتیکی شمع

ظرفیت یک شمع تحت بارگذاری استاتیکی (بار یکنواخت) اساس هر گونه ارزیابی بعدی برای بارگذاری چرخه‌ای است. بنابراین ضروری است که با برآورد واقع بینانه‌ای از ظرفیت باربری محوری آغاز کنیم. ظرفیت باربری نهایی شمع را می‌توان مجموع ظرفیت باربری نوک شمع و ظرفیت باربری اصطکاکی جدار شمع در نظر گرفت (شکل ۲-۲):

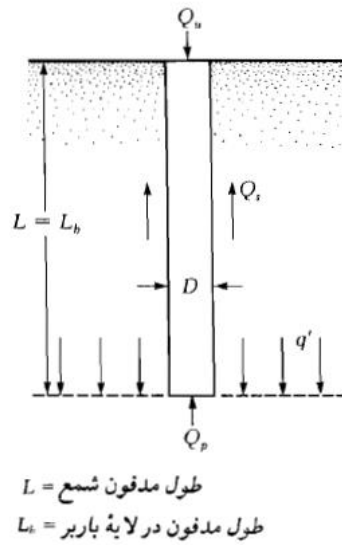
$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (1-2)$$

که در آن :

$$Q_u = \text{ظرفیت باربری نهایی شمع}$$

$$Q_p = \text{ظرفیت باربری نوک شمع}$$

$$Q_s = \text{ظرفیت باربری اصطکاکی جدار شمع (ظرفیت باربری جلدی)}$$



شکل ۲-۲- تصویر شماتیک ظرفیت باربری نهایی شمع (براجا. ام. داس، ۱۳۹۰).

مطالعات متعددی برای تخمین مقادیر Q_p و Q_s انجام شده است. وسیک (۱۹۷۷)، مایرهوف (۱۹۷۶)، کویل و کاستلو (۱۹۸۱) جمع‌آوری‌های خوبی روی مقالات ارائه شده در این زمینه انجام داده‌اند. چهار روش طراحی مبتنی بر CPT برای طراحی شمع‌های مدفون در ماسه سیلیسی در ISO 19902:2007 مورد بحث قرار گرفته است [DIN, 2008]. در ادامه به بررسی روش ICP که مخفف Imperial College Pile است، به طور اجمالی به عنوان روشی جدید و دقیق ارائه می‌شود. در استاندارد ISO 19902 یک نسخه ساده از این روش گنجانده شده است [Jardine et al., 2008]، اما در اینجا روش اصلی ارائه شده است، که در ادامه به بررسی آن پرداخته‌ایم.

۲-۲-۲- توزیع تنش برشی در طول شمع

تنش برشی بر روی سطح شمع با افزایش جابجایی نسبی شمع-خاک، افزایش می‌یابد. ماکزیمم تنش برشی (مقاومت جدار)، بر روی سطح شمع مدفون در خاک ماسه‌ای با رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$\tau_{\zeta}^{\xi} = k \bar{\sigma}_v \tan \delta \quad (2-2)$$

که در آن:

$$\tau_{\xi} = \text{تنش برشی بیشینه}$$

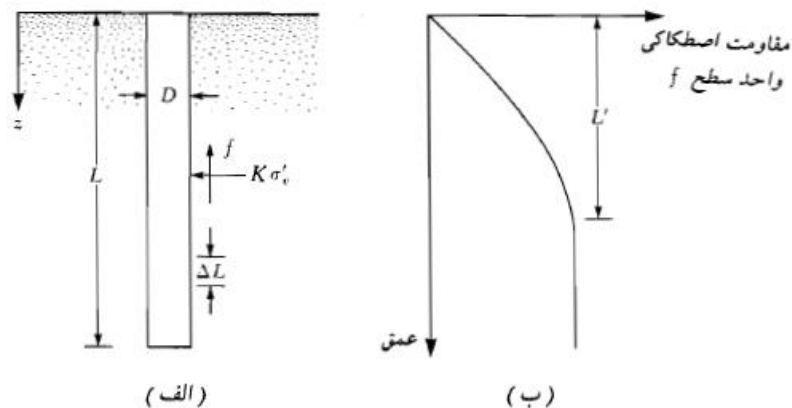
$$k = \text{ضریب فشار جانبی خاک}$$

$$\sigma'_v = \text{فشار مؤثر سربار}$$

$$\delta = \text{زاویه اصطکاک داخلی بین شمع و ماسه}$$

اگر در معادله (۲-۲) ضریب k ثابت باشد، مقاومت جدار با عمق افزایش می‌یابد. اگر چه با توجه به تحقیقات محلی و آزمایشگاهی [Kraft, 1991]، [Coyle and Castello, 1981] و ... مشاهده شده است، مقاومت جدار با افزایش عمق شمع تا مقدار بحرانی مشخصی زیاد شده و پس از آن افزایش نمی‌یابد (شکل ۲-۳). این عمق بحرانی، L' به عوامل متعددی نظیر زاویه اصطکاک داخلی خاک، قابلیت فشردگی و دانسیته ماسه بستگی دارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ضریب فشار جانبی خاک، k مقدار ثابتی نبوده و تابعی از حالت خاک، دانسیته و طول شمع است.

$$L' = 15D \quad (۳-۲)$$



شکل ۲-۳- مقاومت اصطکاک واحد سطح برای شمع در ماسه (براجا. ام. داس، ۱۳۹۰).

Lehane et al., [1993] به بررسی مکانیزم اصطکاک در جداره شمع در ماسه و محاسبه ظرفیت

باربری دقیق شمع با استفاده از آن پرداخته‌اند که به اختصار این روش ICP نامیده نمی‌شود. این بررسی

میدانی در لابن (Labenne) فرانسه انجام شده است. مشخصات خاک در محل در جدول (۱-۲) و (۲-۲) ارائه شده است. مشخصات شمع به همراه نصب آن مطابق مشخصات ارائه شده توسط Bond et al., [1991] می‌باشد. در ادامه به بررسی این روش می‌پردازیم.

جدول ۱-۲- مشخصات خاک لابن [Lehane et al., (1993)]

Mean Particle size, D50 (mm)	Uniformity Coefficient D60/D10	Specific Gravity	Maximum Void Ratio e_{max}	Minimum Void Ratio e_{min}
0/32±0/02	1/85±0/05	2/65±0/01	0/81±0/02	0/45±0/02

جدول ۲-۲- مشخصات لایه‌های خاک لابن [Lehane et al., (1993)]

شماره لایه	عمق (m)	دانسیتة نسبی	Void Ratio e	Bulk Density γ_b (kn/m ³)
1	0/0-2/2	60	0/60	16/9
1A	2/2-2/8	Transition zone	Transition zone	Transition zone
2	2/8-3/8	25	0/72	19/2
3	3/8/2006	40	0/67	19/5

۲-۲-۳- روش طراحی ICP برای شمع مدفون در ماسه

ظرفیت باربری نهایی یک شمع، Q_u اغلب معیار حاکم در هنگام طراحی شمع مدفون در ماسه است. نتایج آزمایش‌های [Lehane et al., 1993]، ICP نشان می‌دهد، که برای خاک مشخص مورد مطالعه تنش مؤثر شعاعی در نزدیک نوک شمع بیشینه بوده و با حرکت به سمت بالای شمع کاهش می‌یابد. در نتیجه تنش شعاعی در هر نقطه از طول شمع نه تنها بستگی به مشخصات خاک، که به موقعیت

قرارگیری از نوک شمع در ارتباط با لایه زیرین خود نیز دارد که با رابطه $h/R0$ ، h فاصله نقطه مورد نظر از نوک شمع و $R0$ شعاع شمع می‌باشد). در نتیجه، تنش برشی بر روی جدار شمع برابر:

$$\tau = \bar{\sigma}'_r \cdot \tan \delta_{cv} \quad (4-2)$$

$\bar{\sigma}'_r =$ تنش مؤثر شعاعی بر روی سطح شمع که تابعی از Dr ، $h/R0$ و $\bar{\sigma}'_v$ است.

نتایج آزمایش‌های ICP نشان دهنده افزایش $\bar{\sigma}'_r$ بر روی سطح شمع در هنگام بارگذاری، به گونه‌ای است که در هنگام مقاومت برشی بیشینه، تنش شعاعی مؤثر σ'_{rf} ، $1/4$ برابر بیشتر از مقدار آن در شرایط متعادل استاتیکی σ'_{rc} است. این افزایش در تنش σ'_{rf} در فشار و کشش مشاهده می‌شود. Boulon and Foray [1986] علت این افزایش در تنش شعاعی را اتساع سطح تماس در هنگام لغزش می‌دانند. همچنین اثر اتساع سطح تماس در لغزش و این افزایش تنش شعاعی در هنگام بارگذاری را در شمع‌هایی با قطر کم محتمل‌تر دانسته‌اند. این موضوع نشان دهنده، کاهش متوسط مقاومت برشی در هنگام گسیختگی با افزایش قطر شمع است.

با توجه به توضیحات فوق و نتایج آزمایشات انجام شده توسط ICP، شکست تنش‌های برشی محلی بر روی جدار شمع τ_f در ماسه از معیار ساده گسیختگی کلمب پیروی می‌کند. بدین ترتیب تنش برشی در هنگام گسیختگی بر روی سطح شمع برابر است با:

$$\tau_f = \sigma'_{rf} \cdot \tan \delta_{cv} \quad (5-2)$$

که در آن، δ_{cv} مقدار نهایی زاویه اصطکاک عملی سطح تماس است و زمانی که خاک در سطح تماس از اتساع یا انقباض متوقف شود، بدست می‌آید. همچنین با توجه به این که، تنش مؤثر شعاعی σ'_{rf} تابعی از تنش شعاعی پس از نصب شمع و متعادل‌سازی σ'_{rc} (هنگامی که فشارهای منفذی و تنش شعاعی نسبتاً پایدار می‌باشد) است، تغییرات ایجاد شده در تنش مؤثر شعاعی در هنگام بارگذاری شمع، $\Delta\sigma'_{rd}$ و زاویه اصطکاک سطح تماس، δ_{cv} :

$$\sigma'_{rf} = \sigma'_{rc} + \Delta\sigma'_{rd} \quad (6-2)$$

$$\tau_f = (\sigma'_{rc} + \Delta\sigma'_{rd}) \cdot \tan \delta_{cv} \quad (7-2)$$

$$\tau_f = 0.9(0.8 \cdot \sigma'_{rc} + \Delta\sigma'_{rd}) \cdot \tan \delta_{cv} \quad (8-2)$$

قابل ذکر است، که روابط (۲-۴) و (۲-۵) به ترتیب برای فشار و کشش می‌باشند.

چنانچه ذکر شد، تغییر در تنش مؤثر شعاعی، $\Delta\sigma'_r$ در طول بارگذاری شمع به اتساع در سطح تماس وابسته است و توسط جابجایی شعاعی Δr ، که باید در سطح تماس برشی گسترش یابد تا لغزش رخ دهد، ایجاد می‌شود [Jardine et al., 2008].

اگر شمع کوتاه و غیر قابل فشرده‌سازی باشد (شمع صلب)، تغییرمکان نسبی شمع و خاک در سطوح مختلف تقریباً ثابت است. در صورتی که شمع قابل فشرده‌سازی و خیلی بلند باشد (شمع انعطاف‌پذیر)، تغییرمکان نسبی شمع در بالا بیشینه بوده و با افزایش عمق کاهش می‌یابد. بدین ترتیب در شمع‌های انعطاف‌پذیر، تنش برشی محدود کننده ابتدا در لایه‌های بالایی بدست آمده و سپس در لایه‌های زیرین بدست می‌آید.

نتیجه این روش، مقادیر پیک اصطکاک جدار شمع در امتداد طول شمع است. این مقادیر بیشینه اصطکاک جدار شمع به همراه عامل کاهش، که در ادامه توضیح داده خواهد شد، به عنوان پایه‌ای برای ارزیابی بارگذاری چرخه‌ای استفاده می‌شود [Seidel and Coronel, 2011].

۲-۲-۴- رفتار نیرو - جابجایی برای شمع

تا کنون تحقیقات فراوانی پیرامون بررسی رفتار شمع در فشار و کشش انجام شده است. Solaiman and Coyle [1976] روش خود را به منظور بررسی رفتار شمع تحت بارگذاری کششی بهبود داده‌اند که در ادامه به بررسی آن پرداخته خواهد شد. [Randolph and Wroth [1978 to 1979] روش الاستیک را بمنظور بررسی شمع‌های فشاری پیشنهاد داده‌اند. در ادامه پیرامون رابطه بین اصطکاک و میزان جابجایی ارائه شده در این روش بحث خواهد شد.

۲-۲-۵- روش انتقال بار (T-Z)

این روش توسط Solaiman and Coyle [1976] برای شمع‌های کششی در ماسه ارائه شده است. بر اساس این روش شمع به بخش‌هایی مجزا تقسیم می‌شود. رابطه بین تغییرمکان محلی بخش‌های مختلف شمع و اصطکاک جدار بسیج شده بر روی سطح شمع با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی تخمین زده شده است. مقدار حرکت رو به بالای نوک شمع تخمین زده شده و تا بالای شمع ادامه می‌یابد، جابجایی محلی و اصطکاک جدار (پوسته) بسیج شده برای هر بخش محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن تغییرشکل الاستیک شمع، بار و تغییرمکان در سر شمع بدست می‌آید. با تکرار این روش برای مقادیر متفاوت جابجایی نوک شمع، منحنی بار-جابجایی برای شمع بدست می‌آید.

[1976] Solaiman and Coyle فرض کردند:

۱- تغییرشکل الاستیک شمع منجر به بسیج شدن مقاومت اصطکاکی جدار نمی‌شود، و این تغییرمکان برابر:

$$\delta = PL/(AE) \quad (۹-۲)$$

که در آن:

P = مقدار بار کششی اعمالی

L = طول شمع

A = سطح مقطع شمع

E = مدول یانگ

۲- تنش شعاعی مؤثر σ_r ، بر روی سطح شمع از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_r' = k\sigma_v' \quad (۱۰-۲)$$

که در آن:

$$K = 0/75$$

فشار مؤثر قائم σ_v

روش انتقال بار (T-Z) که در بالا اشاره شد، روشی ساده می‌باشد و به راحتی قابل استفاده است، اما محدودیت‌هایی دارد که به چند مورد در زیر اشاره شده است:

۱- تغییر شکل الاستیک در شمع‌های انعطاف‌پذیر ممکن است جزء مهمی در تغییر مکان شمع باشد و لازم است که در محاسبه میزان اصطکاک بسیج شده لحاظ شود.

۲- در محاسبه تنش مؤثر شعاعی بر روی سطح شمع؛ مقدار K ثابت در نظر گرفته شده است. با این حال معادله (۲-۵) نشان دهنده ثابت نبودن مقدار k است و k تابعی از تراکم نسبی و فاصله نقطه مورد نظر نسبت به نوک شمع است.

۳- در این روش محاسبات با تخمین مقدار جابجایی نوک شمع آغاز می‌شود (تمام طول شمع جابجا می‌شود)، بدین ترتیب متناظر با اولین نقطه روی منحنی بار-جابجایی شمع، نیرویی که به تمام طول شمع اعمال می‌شود، فرض شده است. این نتایج در بخش ابتدایی منحنی بار-جابجایی با دقت مشخص نشده‌اند.

۲-۲-۶- روش الاستیک

Randolph and Wroth [1978 to 1979] روشی را بمنظور تخمین رفتار بار-جابجایی شمع تحت بارگذاری فشاری ارائه داده‌اند. تغییر مکان کلی شمع با اضافه کردن تغییر مکان‌های ایجاد شده بدلیل تغییر شکل خاک اطراف که خود بدلیل تغییر شکل در زیر نوک شمع ایجاد شده‌اند، بدست می‌آید.

بر اساس این روش، خاک اطراف شمع به تعدادی دایره متحدالمرکز تقسیم شده (شکل ۲-۴) و مقدار بار بر روی سر شمع فرض می‌شود. با تقسیم کردن بار بر روی سر شمع در سطح زمین $(2\pi R_0 L)$ ، تنش برشی بر روی سطح شمع، τ_0 محاسبه می‌شود. تنش برشی در خاک در فاصله شعاعی r به روش زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau = \tau_0 R_0 / r \quad (11-2)$$

که در آن:

τ = تنش برشی در خاک به فاصله شعاعی r از مرکز شمع

τ_0 = تنش برشی بر روی سطح شمع

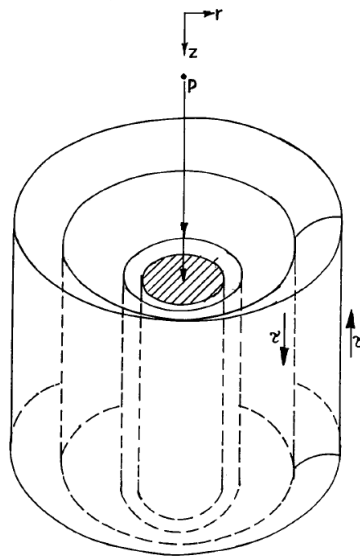
R_0 = شعاع شمع

با در نظر گرفتن ضخامت هر لایه خاک به میزان dr و G برای مدول برشی خاک، تغییر مکان شمع

بدلیل جابجایی خاک اطراف آن، در میزان بار مورد نظر برابر خواهد بود با:

$$(\tau_0 R_0 / G) \int_{R_0}^{rm} dr / r \quad (12-2)$$

rm = فاصله شعاعی از مرکز شمع که در آن مقدار تنش برشی ناچیز است.



شکل ۲-۴- مودهای تغییر شکل استوانه [Randolph and Wroth, 1978]

مقدار بار جدیدی بر روی شمع فرض شده و تغییر مکان متناظر آن محاسبه می‌شود. با تکرار این

پروسه، منحنی بار-تغییر مکان برای شمع بدست می‌آید. در تحقیقات انجام شده در Imperial College

Jardine and Potts [1988] در روشی که برای محاسبه رابطه تغییرمکان-بار در شمع‌های بزرگ ارائه دادند، تاثیر روش نصب را نیز لحاظ کردند. منطقه تماس در نزدیکی استوانه شمع با محدود کردن زاویه اصطکاک در سطح تماس شمع-خاک منظور شده است [Jardine et al., 1992]. این روش با بکارگیری آنالیز اجزاء محدود برای پیش‌بینی رفتار شمع در پایه سکوه‌های هیوتون، Hutton و سکوه‌های غلاف تمام استیل مگنوس، Magnus عملی شده است [Jardine and Potts, 1988].

۲-۳- بررسی رفتار خاک تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای

روش بارگذاری بارهای دینامیکی به دو روش تنش - کنترل و تغییرمکان - کنترل برای بارهای چرخه‌ای تقسیم می‌شود. ضریب بارگذاری چرخه‌ای نیز اهمیت زیادی در بررسی خواص دینامیکی شمع-خاک در مدل‌های آزمایشگاهی دارد. در درجه اول ضریب بارگذاری توسط دو عامل تعیین می‌شود: دامنه بارگذاری چرخه‌ای عمودی و ظرفیت باربری نهایی پی‌های شمعی [Zheng et al., 2017]. تحقیقات زیادی پیرامون پاسخ ماسه تحت بارگذاری چرخه‌ای انجام شده است. این تحقیقات نشان می‌دهد؛ در ماسه تحت بارگذاری چرخه‌ای کرنش‌های بازگشت‌پذیر و همچنین دائمی ایجاد می‌شود که اکثراً با تغییر در دانسیته خاک همراه است. بنابراین رفتار خاک ماسه‌ای با توجه به دو مورد زیر بررسی شده است:

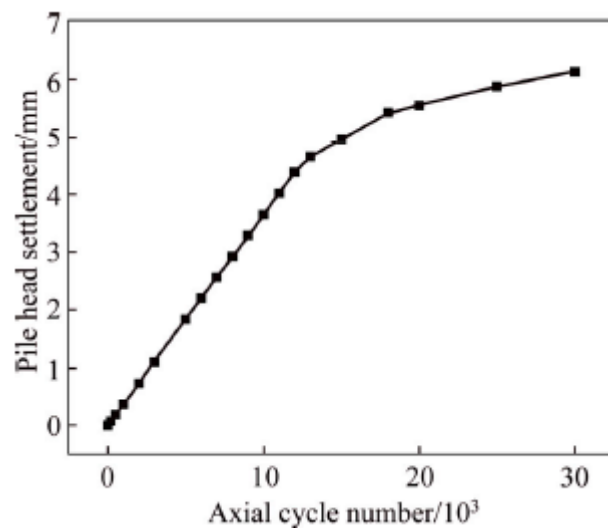
۱- تغییر شکل ماسه تحت بارگذاری چرخه‌ای

۲- تغییر در دانسیته ماسه تحت بارگذاری چرخه‌ای

۲-۳-۱- تغییر شکل ماسه تحت بارگذاری چرخه‌ای

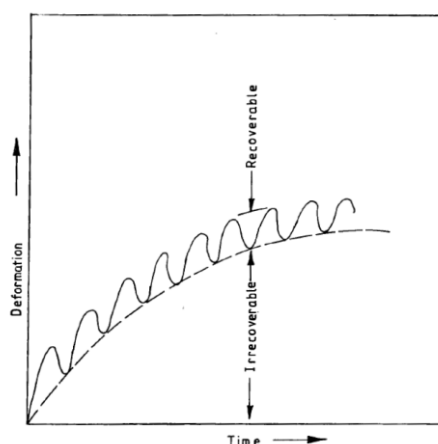
به نظر می‌رسد که تحت بار دینامیکی درازمدت، مشخصات تغییر شکل خاک به طور عمده تغییر شکل انباشته شده است. محققان اصطلاحات محاسباتی و تجربی پیرامون انواع انباشته شده تغییر شکل به طور خاص از طریق آزمون سه محوری چرخه‌ای و تحقیق در مدل‌های آزمایشگاهی، پیشنهاد داده‌اند.

شکل (۲-۵) نشان می‌دهد: زمانی که دوره نوسان نسبتاً کوچک است (زمانی که $N > 12000$ در نمودار) نشست تجمعی سر شمع‌ها به سرعت رشد می‌کند. نشست سر شمع دارای تغییرات خطی در طول دوره ارتعاش است. بنابراین، می‌توان دید که دوره‌های ارتعاش کوچکتر بار قادر به ایجاد ظرفیت باربری نهایی شمع نیستند. در مقابل، مشاهده شده است که نرخ نشست سر شمع با افزایش ثابت دوره ارتعاش به تدریج کاهش می‌یابد، این امر نشان می‌دهد که در این زمان سیستم خاک-شمع فشرده می‌شود [Zheng et al., 2017].



شکل ۲-۵- نشست تجمعی سر شمع [Zheng et al., 2017].

چنانچه ذکر شد: در طول بارگذاری چرخه‌ای در ماسه کرنش‌های بازگشت‌پذیر و همچنین دائمی ایجاد می‌شود. برای بارگذاری چرخه‌ای داده شده کرنش‌های بازگشت‌پذیر معمولاً ثابت است و کرنش‌های دائمی با افزایش چرخه‌ها بر روی هم جمع می‌شوند که در شکل (۲-۶) نمایش داده شده است [O'Reilly and Brown, 1992].



شکل ۲-۶- تغییر شکل خاک در طول بارگذاری [O'Reilly and Brown, 1992].

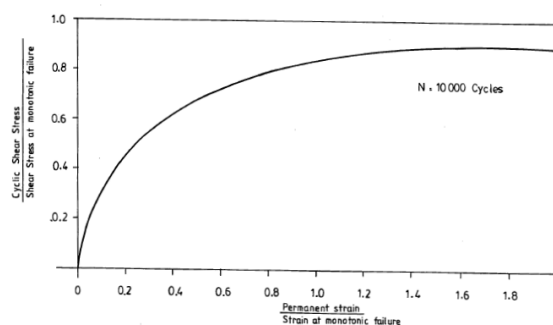
گسیختگی پی‌ها معمولاً در ارتباط با کرنش‌های دائمی در خاک می‌باشد. در جدول (۲-۳) مشخصات نمونه‌هایی از آزمایش‌های انجام شده به منظور بررسی ماسه تحت بارگذاری چرخه‌ای ارائه شده است. در اکثر این بررسی‌ها گزارش شده است که نرخ تجمع کرنش‌های دائمی تابعی از تنش چرخه‌ای و سطوح کرنش است.

۲-۳-۲- سطوح تنش چرخه‌ای

Lentz and Baladi [1980] تعدادی آزمایش سه‌محوری چرخه‌ای بر روی ماسه یکنواخت انجام دادند. این آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای تحت سطوح بارگذاری چرخه‌ای متفاوتی و با فرکانس ۱ هرتز انجام شد. در هر یک از تست‌های بارگذاری چرخه‌ای، پس از اتمام 10,000 چرخه بارگذاری مجموع کرنش محوری اندازه‌گیری شده است. کرنش محوری تحت سطوح مختلف بارگذاری در شکل (۲-۷) نشان داده شده است. با استفاده از نتایج این آزمون‌ها و شکل (۲-۶) می‌توان نتیجه گرفت؛

۱- کرنش‌های دائمی کلی با افزایش سطوح تنش چرخه‌ای افزایش می‌یابد.

۲- نرخ افزایش کرنش دائمی هنگامی که بارگذاری چرخه‌ای (تنش چرخه‌ای) درصد کوچکی از ظرفیت استاتیکی خاک است، به آهستگی است و هنگامی که میزان تنش چرخه‌ای به ظرفیت باربری نهایی استاتیکی می‌رسد، بسیار سرعت می‌گیرد.



شکل ۲-۷- تغییرات نرخ تنش چرخه‌ای در برابر نرخ کرنش دائمی [Lentz and Baladi, 1980].

جدول ۲-۳- بررسی رفتار ماسه تحت بارگذاری چرخه‌ای محوری

Reference	Soil Properties	Type of Test	Method of Loading	Maximum Number of Cycles
Yamanouchi and Aoto [1969]	Sand	Cyclic triaxial test. 35 mm Dia. & 81/5-82/5 mm high sample	Cyclic Loading was in a rectangular wave form at a frequency of 0/25 Hz	50,000
Youd [1972]	Ottawa Sand $e_{min}=0/484$, $e_{max}=0/752$, $Dr=75-79\%$	Cyclic Simple Shear Test.		150,000
Lentz and Baladi [1980]	Medium Sand $D_{10}=0/25$ mm, $D_{50}=0/40$ mm $D_{60}=0/50$ mm, $Dr=99\%$	Cyclic Triaxial Test. 50/8 mm Dia. & 137/16 mm high sample	Loads were measured using load cell beneath the sample: deformation was measured by LVDT.	10,000
Marr and Christian [1981]	Uniform Graded Aluvial Sand $D_{50}=0/17$ mm, $e_{min}=0/526$ $e_{max}=0/846$, $Dr=28\%$	Cyclic Triaxial Test. 36/0 mm Dia. & 76/0 mm high sample	A nearly sinusoidal cyclic load was applied at a frequency of 0/125 Hz	10,000
Chen et al. [1988]	Glass Spheres sample is composed of 0/3-0/425 mm and 0/18-0/25 mm size particles $G_s=2/472$, $Dr=60\%$	Torsional simple shear resonant coulumn test. A hallow cylinder of 71 mm inner & 102 mm outer diameter and 193 mm high sample	Each specimen was isotropically consolidated under a pressure of 138 kPa before the application of cyclic loading.	-
Georgiannou et al. [1991]	Clayey Sand $C_u=102-1047$ kPa, $OCR=1-2$	computer controlled Cyclic Triaxial test	The deviator stress was applied at a frequency of 0/016Hz	-
Airey et al. [1992]	Carbonate Sand $e_{min}=0/520$, $e_{max}=1/090$, $Dr=90\%$	Modified cyclic shear box test. 60*60*2 mm high sample	Cyclic shear tests were conducted under a normal stress of 50-400 kPa.	80

Marr and Christian [1981] بر روی ماسه آبرفتی آزمون‌های سه‌محوری چرخه‌ای زهکشی

شده انجام دادند. آن‌ها بر اساس نتایج آزمایش‌های خود پیشنهاد کردند؛ کرنش دائمی در خاک تنها تابعی از تنش برشی چرخه‌ای نیست، بلکه به نرخ تنش برشی متوسط، تنش نرمال متوسط و تخلخل اولیه خاک نیز وابسته است. [Diyaljee and Raymand 1982] نیز آزمایش‌های سه-محوری چرخه‌ای بر روی ماسه انجام دادند و نتایج مشابهی بدست آوردند.

بر اساس نتایج تست‌های سه‌محوری چرخه‌ای بر روی ماسه، [Luong 1980] گزارش کرده است که نرخ افزایش تغییرشکل‌های دائمی با تعداد چرخه‌ها، اگر سطح بارگذاری چرخه‌ای از مقدار آستانه کمتر باشد، کاهش می‌یابد و اگر بارگذاری چرخه‌ای از این مقدار بیشتر باشد، افزایش خواهد یافت. با این حال، هیچ روشی جهت محاسبه مقدار این آستانه پیشنهاد نشده است و همچنین، هیچ سطح تنش نهایی (محدود شده) امنی برای بارگذاری چرخه‌ای مشخص نشده است.

۲-۳-۳- سطح کرنش چرخه‌ای

[Sagasetta et al. 1991] به بررسی پژوهش‌های انجام شده بر روی رفتار خاک تحت کرنش‌های برشی با اندازه‌های متفاوت پرداخته‌اند. در شکل (۲-۸) رفتار متفاوت خاک در ارتباط با محدوده کرنش‌های متفاوت نمایش داده شده است.

Shear strain	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
	Small strain	Medium strain		Large strain	Failure strain	
Elastic	[Bar chart showing a linear increase in stress with strain up to 10^{-4}]					
Elasto plastic	[Bar chart showing a non-linear increase in stress with strain from 10^{-4} to 10^{-2}]					
Failure	[Bar chart showing a sharp drop in stress after 10^{-2}]					
Effect of load repetition	[Bar chart showing a higher stress level for repeated loading]					
Effect of loading rate	[Bar chart showing a higher stress level for faster loading]					
Model	Linear elastic model		Visco elastic model		Load history tracing type model	

شکل ۲-۸- تغییرات مشخصات خاک با کرنش برشی [Ishihara, 1982].

بررسی‌های [Sagasetta et al., 1991] نشان می‌دهد که:

۱- برای کرنش‌های برشی کمتر از 10^{-5} رفتار خاک کاملاً الاستیک است.

۲- برای کرنش‌های برشی در محدوده 10^{-5} تا 10^{-3} رفتار خاک الاستوپلاستیک است اما منجر به کرنش‌های دائمی نمی‌شود.

۳- بالاتر از سطح کرنش برشی 10^{-3} ، مشخصات خاک تمایل به تغییر با تعداد چرخه‌ها به سمت کرنش‌های دائمی (پلاستیک) دارد.

با توجه به موارد فوق مشخص است، در طول بارگذاری چرخه‌ای در ماسه کرنش‌های دائمی و برگشت‌پذیر ایجاد می‌شود. مقدار کرنش‌های برگشت‌پذیر در بار چرخه‌ای داده شده در تمام چرخه‌ها ثابت است. مقدار نرخ افزایش کرنش‌های دائمی در تنش‌ها و کرنش‌های چرخه‌ای کوچکتر بسیار کم است. اگر چه در صورتی که بار چرخه‌ای به میزان ظرفیت باربری استاتیکی خود و کرنش‌های چرخه‌ای به بیش از 10^{-3} برسد، نرخ این افزایش بسار زیاد شده و منجر به گسیختگی می‌شود.

۲-۳-۴- تغییر در دانسیته ماسه تحت بارگذاری چرخه‌ای

در طی بارگذاری چرخه‌ای، دانسیته ماسه تغییر می‌کند. بررسی‌های مربوط به تغییر در دانسیته ماسه تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط Youd [1972] و Airey et al. [1992] انجام شده است. Youd [1972] به بررسی رفتار فشاری ماسه اتاوا ($DR=75-90\%$) تحت برش چرخه‌ای پرداخته است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد، در طول هر چرخه بارگذاری دانسیته ماسه به مقدار محدودی افزایش می‌یابد و در نتیجه ضریب تخلخل آن کاهش می‌یابد. این کاهش در ضریب تخلخل ادامه می‌یابد تا به مقدار کمینه حدی $0/412$ برسد. این مقدار ضریب تخلخل کمتر از مقدار $e_{min} (0/484)$ بدست آمده برای همان ماسه توسط روش ASTM است.

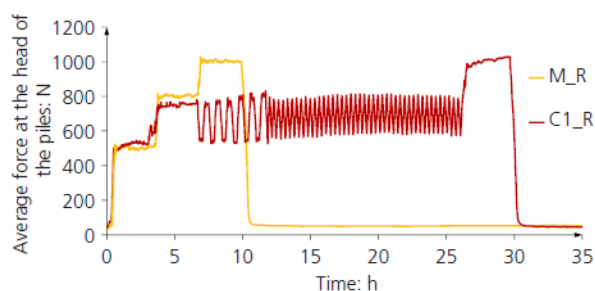
نتایج مشابهی توسط Airey et al., [1992] گزارش شده است. آنها بر روی ماسه کربناتی ($DR=90\%$) آزمایش بارگذاری چرخه‌ای انجام دادند. آنها مشاهده کردند، که در چرخه اول ماسه افزایش حجم می‌دهد. اما در تمام چرخه‌های بعدی میزان انقباض خالصی مشاهده شد. با افزایش تعداد

چرخه‌های بارگذاری نرخ انقباض خاک کاهش یافت. همچنین فشرده‌شدن خاک‌های دانه‌ای در زیر بارگذاری برشی تکراری توسط Ansell and Brown [1978] و Chan [1990] گزارش شده است.

مطالعات فوق نشان می‌دهد که خاک تحت بارگذاری چرخه‌ای میزان کاهش خالصی در حجم را با تعداد چرخه‌ها متحمل می‌شود، تا به دانسیته ماکزیمم خود برسد. حتی اگر تراکم نسبی اولیه ماسه بیش از ۹۰٪ باشد، در طی بارگذاری چرخه‌ای خاک فشرده می‌شود.

۲-۴- بررسی رفتار شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای

Houda et al., [2018] به مقایسه اثر دو نوع بارگذاری چرخه‌ای و بار یکنواخت بر روی رفتار شمع و تغییر مکان تجمعی شمع تحت اثر این دو نوع بارگذاری هنگامی که فونداسیون صلب بر روی شمع قرار دارد، پرداخته‌اند. Houda et al., [2018] با استفاده از آزمایش کوچک-مقیاس 1g بر روی چهار شمع صلب و اعمال بارگذاری یکنواخت و دو نوع بارگذاری چرخه‌ای نشان دادند، که میزان بار متوسط بر روی سر شمع‌ها بعد از اعمال چرخه‌های بارگذاری برابر است با بار یکنواخت اعمالی، هنگامی که فشار اعمالی به حداکثر مقدار خود (۳۰ کیلو پاسکال) می‌رسد (شکل ۲-۹). این بدان معنی است که برای تنظیمات مورد بررسی در آزمایش انجام شده توسط Houda et al., [2018] مکانیزمی که توسط چرخه‌ها القا می‌شود در پی رادیه و خاک با قابلیت فشرده شدن، تاثیر مهمی بر روی نیروی اعمال شده به سر شمع‌ها ندارند. نتیجه بدست آمده توسط Houda et al., [2018] با مشاهدات Okyay et al., [2013] که آزمون سانتریفیوژ و ۱۰ چرخه بارگذاری بر روی شمع انجام دادند، سازگاری دارد.



شکل ۲-۹- متوسط بار اعمال شده به سر شمع برای دو نوع بار یکنواخت و چرخه‌ای [Houda et al., 2018].

بررسی‌های فراوانی پیرامون رفتار چرخه‌ای شمع در خاک رسی توسط [Grosch and Reese 1980]، [1982] Mc.Anoy et al.، [1983] Karlsrud and Haugen، [1986, 1992] Karlsrud et al. و [1987, 1988a, 1988b, 1989] Norwegian Geotechnical institute انجام شده است. همچنین به منظور بررسی رفتار ماسه تحت بارگذاری چرخه‌ای در ماسه نیز تحقیقات فراوانی توسط Angemeer [1973]، et al.، [1976] Chan، [1980] Chan and Hanna، [1982] Puech و [1989] Abood گزارش شده است. نتایج این پژوهش‌ها در سه زمینه زیر بررسی شده است:

۱- تجمع تغییر مکان‌های دائمی

۲- کاهش اصطکاک جدار تحت بارگذاری چرخه‌ای

۳- مکانیزم گسیختگی شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای

جزئیات برخی از این تست‌های آزمایشگاهی به طور خلاصه در جدول (۲-۴) ارائه شده است.

که در آن D_p ، قطر شمع و D_c قطر محفظه آزمایش است.

جدول ۲-۴- آزمون‌های بارگذاری چرخه‌ای بر روی مدل‌های آزمایشگاهی

Reference	Soil Type	Diameter of Pile and test chamber	Method of Pile installation & testing	Maximum Number of Cycles
Chan and Hanna [1980] & Chan [1979]	Sand Dr = 62 %	$D_p = 19$ mm $D_c = 380$ mm $D_c / D_p = 20$	Sand was placed in tank by rainfall method. 100 kPa surcharge pressure was applied. Instrumented pile was then jacked-in and tested at a frequency of 0/0167 Hz	200000
Poulos [1981]	Clays LL = 65 PL = 20 LL = 55 PL = 33	$D_p = 20$ mm $D_c = 152$ mm $D_c / D_p = 7/6$	Soil was placed in the container and the pile was jacked into it. Loading was applied at a frequency of 0/4 – 0/5 Hz	1000
Poulos [1984]	Calcareous soil. $D_{50} = 0/3$ mm Carbonate Content 88%	$D_p = 20$ mm $D_c = 180$ mm $D_c / D_p = 9$	Piles were jacked into the sand. Few tests were also conducted on buried pile. In which case the pile was initially positioned and the sand was rained around.	100
Proctor and Khaffaf [1987]	Clay LL = 17 % PL = 23 %	$D_p = 25$ mm $D_c = 250$ mm $D_c / D_p = 10$	Soil was Placed. The Pile was jacked-in and 100 kPa surcharge pressure was applied. Cyclic Load frequency was 0/017 – 0/2 Hz	500
Abood [1989]	Sand $D_{10} = 0/162$ mm $D_{60} = 0/254$ mm $e_{max} = 0/845$ $e_{min} = 0/523$ Dr = 75%	$D_p = 25/4$ mm $D_c = 584$ mm $D_c / D_p = 23$	Instrumented piles were tested .The pile was initially placed in position and the sand was compacted around it. A surcharge pressure of 0 – 200 kPa was applied. Loading frequency = 0/0167 Hz	100000

۲-۴-۱- تجمع تغییر مکان‌های دائمی

Chan and Hanna [1980] بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی شمع در ماسه، بار چرخه‌ای اعمال کردند.

رفتار شمع تحت این بارگذاری‌ها توسط آن‌ها در شکل (۲-۱۰) و جدول (۲-۵) ارائه شده است. نتایج

گزارش شده توسط Chan and Hanna [1980] نشان می‌دهد که:

۱- هنگامی که بار اعمالی چرخه‌ای کوچک است (۱۵ تا ۲۰ درصد ظرفیت باربری نهایی استاتیکی

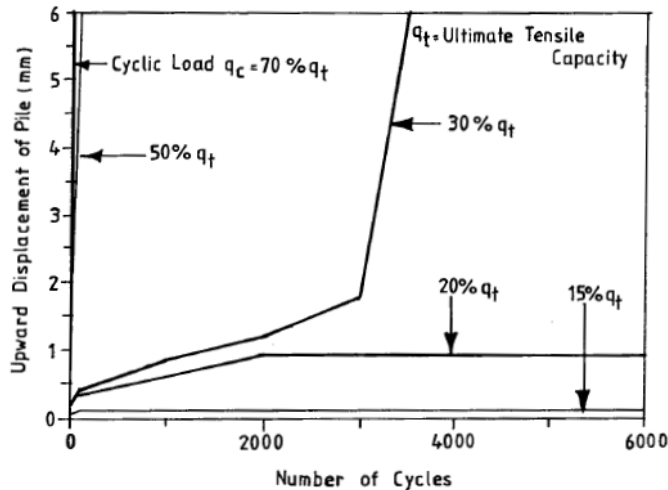
است)، شمع متحمل تغییر مکان‌های کمی می‌شود و با افزایش تعداد چرخه‌ها نرخ تغییرات

جابجایی کاهش می‌یابد.

۲- هنگامی که بار اعمالی چرخه‌ای بزرگ است، (۳۰ تا ۷۰ درصد ظرفیت باربری نهایی استاتیکی

است)، شمع

تغییر مکان‌های بزرگی می‌دهد و با تعداد کمی چرخه بارگذاری گسیخته می‌شود.



شکل ۲-۱۰- تغییر مکان شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای [Chan and Hanna, 1980].

جدول ۲-۵- تعداد چرخه‌های منجر به گسیختگی در سطح بار چرخه‌ای [Chan and Hanna, 1980]

q_c (% q_t)	N_f
20	24347
30	3420
50	157
70	63

نتایج تست‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط Abood [1989] نتایج بالا را تأیید می‌کند. Puech [1982] نتایج تست‌های انجام شده، بر روی شمعی فولادی قرارداده شده در لای و ماسه شل را گزارش کرده است. این تست‌های برجا بر روی شمعی به قطر ۲۷۳ متر و طول ۱۳ متر انجام شده است. این شمعی‌ها به منظور ثبت بار، فشار شعاعی و فشار منفذی نصب شده‌اند. نتایج این تست‌ها نشان می‌دهد:

- تغییر مکان شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌تواند به فاز گذار، که نشان دهنده پاسخ سریع خاک به تنش‌های چرخه‌ای است و فاز خزش چرخه‌ای که مشخص کننده رفتار بلند-مدت

شمع در بارگذاری چرخه‌ای است، تقسیم شود.

- فاز گذار تعداد ده‌ها چرخه را پوشش می‌دهد و مشخصه آن افزایش تغییرمکان شمع است. این تغییرمکان در ابتدا سریع است و سپس به تدریج کاهش می‌یابد.
- در فاز خزش چرخه‌ای هر چرخه بارگذاری باعث افزایش جزئی تغییرمکان می‌شود. سرعتی که این تغییرمکان‌ها در آن رخ می‌دهد، به سطح بارگذاری چرخه‌ای بستگی دارد.
- برای سطوح بارگذاری کاهش یافته (کمتر از ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی استاتیکی)، نرخ تغییرات تغییرمکان‌ها کاهش می‌یابد، که نشان دهنده به تعادل رسیدن است. برای سطوح بالای بارگذاری (بیشتر از ۵۰ درصد) نرخ تغییرات تغییرمکان‌ها افزایش می‌یابد، که منجر به گسیختگی می‌شود.

۲-۴-۲- کاهش اصطکاک تحت بارگذاری چرخه‌ای

تحت بارهای محوری چرخه‌ای، کاهش اصطکاک نهایی جدار و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری شمع انتظار می‌رود. دلیل اصلی این امر، تراکم خاک در زیر شمع به دلیل برش چرخه‌ای است، که منجر به کاهش تنش‌های تماسی نرمال بین شمع و خاک و در نتیجه منجر به افزایش تغییرمکان تجمعی شمع می‌شود [Achmus et al., 2017].

Poulos به بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی بر روی شمع‌های کوچک مقیاس در ماسه پرداخته است، که به تفصیل در ادامه به توضیح آن‌ها خواهیم پرداخت. کاهش اصطکاک جداره با اندازه‌گیری ظرفیت استاتیکی شمع قبل و بعد از بارگذاری چرخه‌ای محاسبه می‌شود. نتایج بررسی‌های Poulos برای محاسبه فاکتور کاهش نشان می‌دهد:

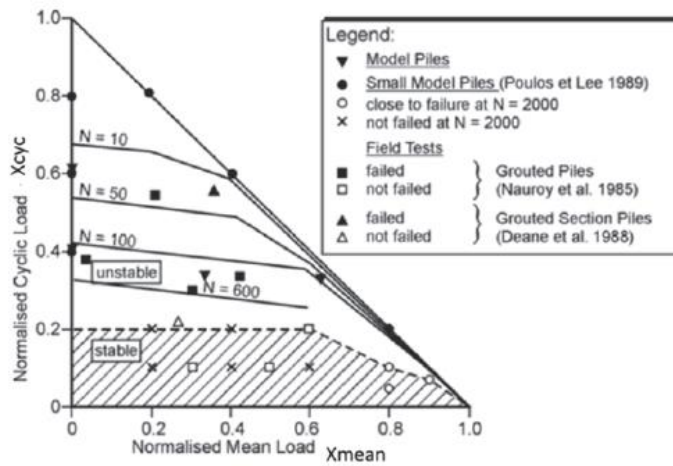
- برای شمع‌ها در ماسه، کاهش چرخه‌ای مقاومت اصطکاکی جدار توسط دامنه جابجایی چرخه‌ای که متناسب با تغییرمکان بحرانی است، کنترل می‌شود. این تغییرمکان بحرانی برابر با تغییرمکان استاتیکی لازم برای لغزش کامل است. برای تغییرمکان‌های چرخه‌ای

نسبی بزرگ، کاهش مقاومت اصطکاکی در حدود ۵۰ درصد رخ می‌دهد.

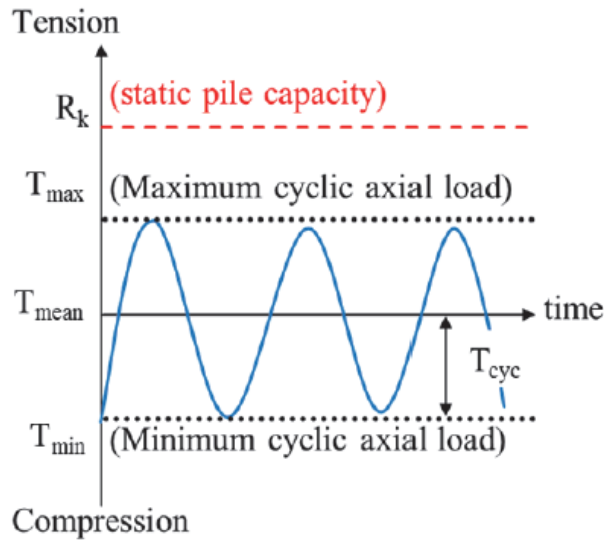
- برای شمع در رس، مقاومت اصطکاکی جدار به طور جدی تحت تأثیر بار چرخه‌ای قرار نمی‌گیرد، اگر بار چرخه‌ای کمتر از ۴۰ درصد ظرفیت استاتیکی و تعداد چرخه‌ها کمتر از ۱۰۰۰ باشد. برای بارهای چرخه‌ای بیش از ۴۰ درصد ظرفیت استاتیکی، کاهش اصطکاک جدار قابل توجهی رخ می‌دهد.

- کاهش ظرفیت شمع تحت بار چرخه‌ای به (الف) تعداد چرخه‌های بارگذاری، (ب) بار متوسط و (ج) بار چرخه‌ای اعمالی به شمع بستگی دارد. پایداری شمع را می‌توان به کمک نمودار ثبات چرخه‌ای، که در ادامه بررسی شده است، بدست آورد.

Poulos [1988] نمودار اندرکنش چرخه‌ای را برای شمع‌های محوری بارگذاری شده ارائه کرد (شکل ۲-۱۱). بر اساس چندین مدل و آزمایشهای میدانی، تعداد چرخه‌های بار که منجر به گسیختگی شمع می‌شود وابسته به میانگین بار نرمال شده X_{mean} و دامنه بار چرخه‌ای X_{cyc} می‌باشد. منطقه پایدار در اینجا با $X_{cyc} \leq 0.2$ برای $X_{mean} \leq 0.6$ تعریف می‌شود. R_k ظرفیت استاتیکی شمع است. با استفاده از نمودار، دامنه بحرانی بار چرخه‌ای (منجر به شکست) می‌تواند بر اساس بار محوری میانگین و تعداد چرخه بارگذاری برآورد شود. بار نرمال شده میانگین X_{mean} و دامنه چرخه بارگذاری X_{cyc} را می‌توان از حداکثر بار T_{max} و حداقل بار T_{min} چنانچه در شکل (۲-۱۲) نشان داده شده است، تعیین کرد، که در آن W_s وزن شمع است [Achmus et al., 2017].



شکل ۲-۱۱- نمودار اندرکنش چرخه‌ای شمع [Poulos, 1988].



شکل ۲-۱۲- شرایط بارگذاری چرخه‌ای شمع [Achmus et al., 2017].

$$X_{mean} = \frac{R_{mean}}{R_k} = \frac{T_{mean} - W_s}{R_k} \quad (13-2)$$

$$R_{mean} = T_{mean} - W_s \quad (14-2)$$

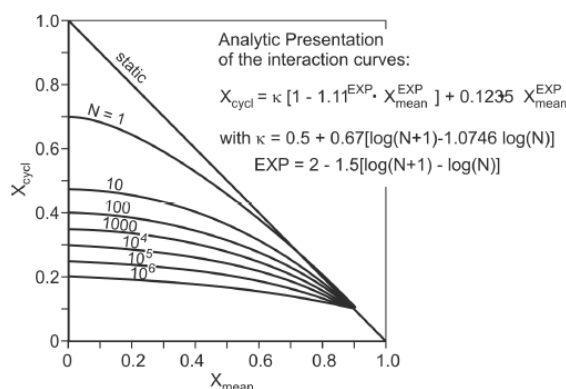
$$T_{mean} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (15-2)$$

$$X_{cyc} = \frac{R_{cyc}}{R_k} \quad (16-2)$$

$$R_{cyc} = T_{cyc} \quad (17-2)$$

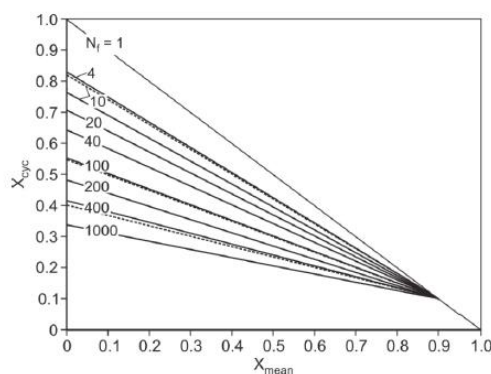
$$T_{cyc} = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \quad (18-2)$$

کیرش و همکاران (۲۰۱۱) نمودار اندرکنش خاک‌های غیر چسبنده را ارائه داده‌اند (شکل ۲-۱۳)، که توسط دستورالعمل EAP آلمان توصیه می‌شود [EAP, 2012]. این نمودار از آزمون‌های بارگذاری چرخه‌ای بدست آمده است که توسط دیگر محققین گزارش شده است.



شکل ۲-۱۳- نمودار اندرکنش چرخه‌ای شمع در خاک غیرچسبنده [Kirsch et al., 2010].

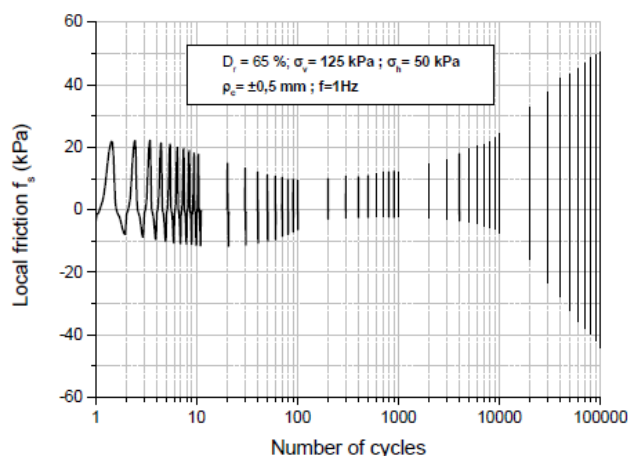
بر اساس آزمون‌های برجای انجام شده در Dunkirk, Standing & Jardine [2012] نیز یک نمودار اندرکنش ایجاد کردند (شکل ۲-۱۴). آزمایشات برجا در خاک‌های ماسه‌ای با شمع‌های فولادی با قطر بیرونی ۴۵۷ میلی‌متر انجام شد.



شکل ۲-۱۴- نمودار اندرکنش چرخه‌ای شمع [Jardine & Standing, 2012].

همانطور که در مقایسه با شکل‌های (۲-۱۱)، (۲-۱۳) و (۲-۱۴) دیده می‌شود، نمودارهای اندرکنش

ارائه شده مشابه است، اما یکسان نیست. در حالی که نمودارهای اندرکنش ارائه شده توسط Poulos [1988] و Kirsch et al., [2011] خطوط کانتور کاملاً منحنی نشان می‌دهد، نمودار اندرکنش Standing & Jardine [2012] خطوط خطی شکل را ارائه می‌دهد. این امر ممکن است توسط پایگاه داده‌های مختلف و یا با تفسیر متفاوت داده‌ها ایجاد شود. لازم به ذکر است که نمودارهای اندرکنش پیشنهاد شده برای هندسه شمع و یا شرایط خاک در نظر گرفته نشده است. هنوز مشخص نیست که چگونه این پارامترها بر رفتار شمع‌ها تحت بارگذاری محوری چرخه‌ای تاثیر می‌گذارد [Achmus et al., 2017]. نوسانات اصطکاک نسبت به تعداد سیکل‌ها در بارگذاری چرخه‌ای که در مدلسازی اتاق کالیبراسیون توسط Khouaouci et al., [2018] بررسی شده است در شکل (۲-۱۵) ارائه شده است. کاهش اولیه اصطکاک محلی تا ۳۰۰ سیکل ثبت شده است. با حداکثر مقدار ۲۲ کیلو پاسکال برای فشار و ۱۲ کیلو پاسکال برای کشش. سپس، افزایش پیش رونده در مقادیر ثبت شده مشاهده می‌شود، که تا پایان دوره بارگذاری چرخه‌ای ادامه دارد. حداکثر و حداقل مقادیر ثبت شده توسط Khouaouci et al., [2018] در پایان این مرحله به ترتیب ۵۰ کیلو پاسکال و ۴۲ - کیلو پاسکال می‌باشد. بخش اول توسط نویسندگان مختلف مشاهده شده است که به دلیل تراکم خاک در سطح تماس است و موجب کاهش تنش نرمال می‌شود.

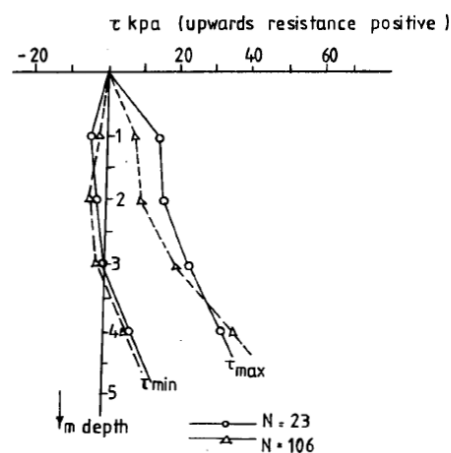


شکل ۲-۱۵- پیشرفت اصطکاک جدار شمع در مقابل تعداد چرخه‌های بارگذاری [Khouaouci et al., 2018].

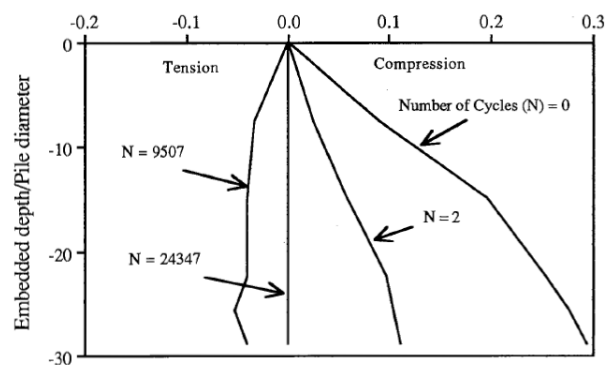
۳-۴-۲- مکانیزم گسیختگی شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای

Karlsrud and Hauges [1983] و Puech [1982] به ترتیب روی شمع‌های بزرگ-مقیاس مدفون در رس و ماسه آزمایش انجام داده‌اند. Chan and Hanna [1980] بر روی مدل‌های کوچک-مقیاس آزمایشگاهی در خاک ماسه‌ای آزمایش کردند.

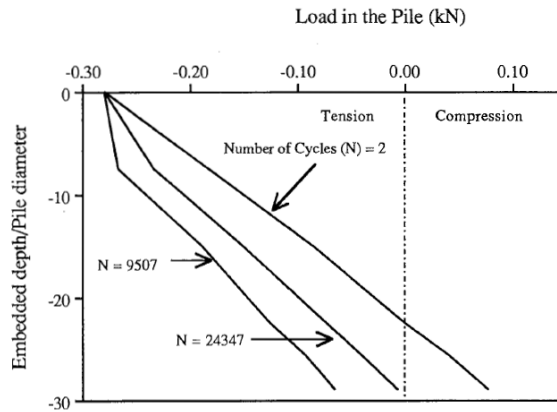
Karlsrud and Hauges [1983] مقدار تنش برشی در طول شمع را در دو حالت بارگذاری و باربرداری ثبت کردند. همانطور که در شکل (۲-۱۶) نشان داده شده است، نتایج براساس تغییرات تنش برشی در عمق نمایش داده شده است. نتایج Chan and Hanna [1980] براساس توزیع بار با عمق برای تعداد چرخه‌های متفاوت در شکل (۲-۱۷-الف) و (۲-۱۷-ب) نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱۶- توزیع تنش برشی ماکزیمم و مینیمم (τ) در طول بارگذاری چرخه‌ای [Karlsrud and Hauges, 1983].



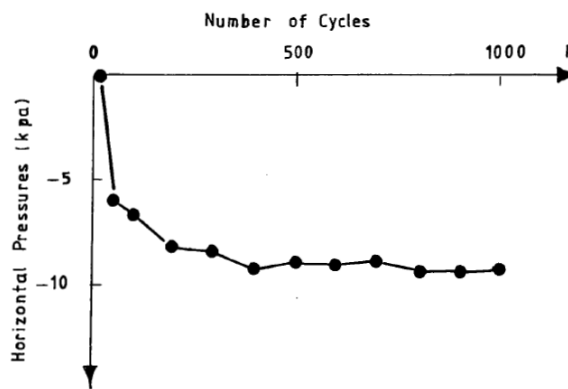
شکل ۲-۱۷-الف- توزیع بار محوری در طول بارگذاری چرخه‌ای در شرایط بارگذاری [Chan and Hanna, 1980].



شکل ۲-۱۷-ب- توزیع بار محوری در طول بارگذاری چرخه‌ای در شرایط باربردی [Chan and Hanna, 1980].
 با توجه به شکل‌های (۲-۱۶)، (۲-۱۷-الف) و (۲-۱۷-ب) می‌توان دریافت:

- در آزمایش‌های چرخه‌ای، در بارگذاری و باربرداری، برش دوطرفه بر روی سطح شمع، به خصوص در قسمت بالای آن تشکیل می‌شود. تنش برشی دوطرفه منجر به کاهش مقاومت برشی شمع و گسیختگی آن با افزایش تعداد چرخه‌ها می‌شود.
- کاهش مقاومت برشی در قسمت‌های بالای شمع منجر به انتقال بار به قسمت‌های پایینی شمع شده، که خود باعث کاهش پیش‌رونده مقاومت برشی شمع در طول آن و نهایتاً گسیختگی می‌شود.

[Puech 1982] نتایج آزمایشات خود را به صورت تغییرات تنش شعاعی بر روی سطح شمع به تعداد چرخه‌ها نشان داد (شکل ۲-۱۸).



شکل ۲-۱۸- تغییرات فشار افقی در طول بارگذاری چرخه‌ای [Puech, 1982].

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۲-۱۸) مکانیزم شکست شمع را به صورت زیر می‌توان توضیح

داد:

- با افزایش تعداد چرخه‌ها تنش شعاعی کاهش می‌یابد. این کاهش تنش شعاعی به طور محتمل به دلیل تراکم خاک اطراف شمع است.
- کاهش تنش شعاعی منجر به کاهش مقاومت برشی شده و نهایتاً باعث گسیختگی شمع خواهد شد.

۲-۵- تجزیه و تحلیل پاسخ چرخه‌ای

توسعه یک نمودار ثبات چرخه‌ای نیاز به تجزیه و تحلیلی دارد که بتواند سه منطقه نمودار را تعریف کرده و اجازه اثرات کاهش به علت بارگذاری چرخه‌ای و رفتار نرم‌شونده کرنشی ممکن را بدهد. روش‌های موجود برای تجزیه و تحلیل پاسخ محوری چرخه‌ای شمع می‌تواند به طور گسترده‌ای به سه دسته تقسیم شود:

۱. تجزیه و تحلیل انتقال بار محوری (t-z)، روش انتقال بار [Solaiman and Coyle, 1976] اصلاح شده

برای بررسی اثرات کاهش چرخه‌ای [Randolph, 1985] و [Matlock and Foo, 1979].

۲. تجزیه و تحلیل اجزاء مرزی اصلاح شده برای کاهش چرخه‌ای و اثرات نرخ بارگذاری [Poulos, 1988].

۳. روش‌های اجزاء محدود، که شامل یک توضیح ساده از اثرات بارگذاری چرخه‌ای است [Boulon et al.,

1983]

تحلیل ارائه شده توسط پولوس (۱۹۸۸) از یک فرم ساده تجزیه و تحلیل اجزاء مرزی استفاده می‌کند، که در

آن شمع به عنوان یک سیلندر الاستیک در نظر گرفته شده است و توده خاک اطراف آن به عنوان یک محیط

پیوسته الاستیک در نظر گرفته می‌شود. برای بارگذاری استاتیکی پارامترهای استاتیکی در جدول (۲-۶) برای

موارد زیر ارائه شده است:

(۱) لغزش شمع و خاک، هنگامی که تنش برشی به مقدار مقاومت مشخص شده محدود برای بدنه می‌رسد.

(۲) پس از آن که مقاومت جدار با افزایش جابه‌جایی به میزان مقدار باقی‌مانده به پیک نرم‌شوندگی خطی

رسید.

(۳) پروفیل خاک غیر همگن (به طور تقریبی).

(۴) تعامل بین شمع‌ها در صورت وجود یک گروه شمع.

جدول ۲-۶- خلاصه‌ای از پارامترهای استاتیکی مورد نیاز برای تجزیه و تحلیل پاسخ‌های چرخه‌ای [Poulos, 1988]؛

Symbol	Definition	Source of data
(a) Static Soil Stiffness		
E_s	Young's modulus of soil	Pile load tests, correlations with other properties [e.g., Poulos and Davis (1980)]
ν_s	Poisson's ratio of soil	
(b) Static Soil Pile Resistance		
τ_{ap}	Peak shaft resistance	Pile load tests; pile section tests; empirica correlations [e.g., Fleming et al. (1985)]
τ_{ar}	Residual shaft resistance	
ρ_{sp}	Peak to residual displacement for shaft resistance	
τ_{bp}	Peak base resistance	
τ_{br}	Residual shaft resistance	
ρ_{pp}	Peak to residual displacement for base resistance	

در حالی که برای بارگذاری چرخه‌ای، پارامترهایی اضافی در جدول (۲-۷) به منظور موارد ۱ الی ۳ آمده است:

(۱) کاهش چرخه‌ای مقاومت جدار، ظرفیت باربری نهایی، مدول یانگ خاک.

(۲) اثرات نرخ بارگذاری بر این پارامترها.

(۳) انباشت جابجایی دائمی تحت بار متوسط غیر صفر.

جدول ۲-۷- خلاصه‌ای از پارامترهای چرخه‌ای مورد نیاز برای تجزیه و تحلیل پاسخ‌های چرخه‌ای [Poulos, 1988]؛

Symbol	Definition	Source of data
(c) Cyclic Degradation Parameters for Soil Stiffness		
D_{Elim}	Limiting modulus degradation factor	Laboratory model tests; field pile tests
λ_E	Rate factor for modulus degradation	
(d) Cyclic Degradation Parameters for Shaft Resistance		
D_{rlim}	Limiting shaft resistance degradation factor	Laboratory model tests; field pile tests
λ_τ	Rate factor for shaft resistance degradation	
ρ_{csl}	Cyclic slip displacement to develop limiting shaft resistance degradation	
(e) Cyclic Degradation Parameters for Base Resistance		
D_{blim}	Limiting base resistance degradation factor	Laboratory model tests
λ_B	Rate factor for base resistance degradation	
(f) Loading Rate Parameter		
D_R	Loading rate factor (assumed to be same for shaft and base resistances and soil modulus)	Laboratory model tests; field pile tests
(g) Permanent Displacement Parameters		
m_s	Cycle parameter for permanent shaft-displacement	Laboratory model tests; field pile tests (backfigured from permanent displacement data)
n_s	Stress-level parameter for permanent shaft displacement	
m_b	Cycle parameter for permanent base displacement	
n_b	Stress-level parameter for permanent base displacement	

در مدل‌سازی اثرات بارگذاری چرخه‌ای [Matlock and Foo 1979] پیشنهاد می‌کنند که:

(۱) تضعیف چرخه‌ای مقاومت باربری نهایی و مدول خاک به نظر قابل توجه نمی‌رسد.

(۲) تضعیف چرخه‌ای مقاومت جدار به راحتی می‌تواند رخ دهد.

(۳) اثرات نرخ بارگذاری ممکن است برای شمع در ماسه مقدار قابل توجهی نباشد، اگر چه ممکن است برای شمع در خاک رس اهمیت داشته باشد.

چنانچه ذکر شد، پارامترهای ارائه شده در جدول (۲-۷) و (۲-۶) جهت تحلیل پاسخ چرخه‌ای شمع تحت بارگذاری محوری چرخه‌ای و تشکیل نمودار ثبات چرخه‌ای مورد نیاز است. اطلاعات موجود پیرامون موارد ذکر شده، حتی برای پارامترهای استاتیکی به طور کلی ناقص است. بعضی از داده‌های مورد نیاز، عمدتاً از آزمون‌های مدل‌سازی شمع حاصل شده‌اند. در نتیجه برای تحلیل صحیح پاسخ چرخه‌ای شمع نیاز به استخراج میزان دقیق‌تر پارامترهای فوق می‌باشد.

۲-۶- نمودار ثبات چرخه‌ای

در پاسخ به نیاز جهت ارزیابی پاسخ شمع به بارگذاری چرخه‌ای، به ویژه در ارتباط با طراحی پی سازه‌های فراساحلی و برج‌های انتقال، پولوس و فلو (۱۹۸۹) ایده یک نمودار ثبات چرخه‌ای را توسعه دادند.

بارگذاری چرخه‌ای می‌تواند در بار متوسط رخ دهد، که ممکن است فشاری (مانند؛ سکوه‌های ثابت مرسوم فراساحلی)، کششی (مانند سکوهایی دریایی با پایه تنشی) و یا تقریباً صفر (در مورد برج‌های انتقال) باشد. در میان پارامترهای مؤثر بر روی پاسخ شمع به بارگذاری چرخه‌ای محوری که مورد علاقه طراحان پی است، می‌توان موارد زیر را به عنوان مهمترین عوامل نام برد [Poulos and Fellow, 1988]:

- اثر بارگذاری چرخه‌ای بر ظرفیت باربری محوری، به عنوان مثال؛ ظرفیت باربری در هر دو حالت تنش کششی و فشاری پس از آن که شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت.
- تعداد چرخه‌های اعمالی به شمع، قبل از آن که شمع به مرحله گسیختگی برسد.
- مجموع جابجایی شمع در طول بارگذاری چرخه‌ای

تجزیه و تحلیل پاسخ چرخه‌ای محوری شمع نیازمند بررسی برخی از اثرات، شامل موارد زیر است:

۱. کاهش محتمل اصطکاک جدار شمع، مقاومت نهایی، مدول خاک به علت خرد شدن ذرات خاک و تغییرات حجم به علت برش و تغییر در جهت ذرات.

۲. اثرات نرخ بارگذاری.

۳. انباشت جابجایی دائمی به دلیل بارگذاری چرخه‌ای برای تنش‌های متوسط غیر صفر.

برای اندازه‌گیری اثرات کاهش خاک به دلیل بارگذاری چرخه‌ای استفاده از عامل کاهش مرسوم می‌باشد. عامل کاهش توسط [Poulos et al., 1989] به صورت زیر تعریف شده است:

$$D = \frac{\text{property after cyclic loading}}{\text{property for static loading}} \quad (19-2)$$

عوامل کاهش برای اصطکاک محدود شده جدار شمع، مقاومت نهایی محدود شده و مدول خاک به ترتیب به صورت D_τ ، D_b و D_E نشان داده می‌شوند.

هر دو مقاومت شمع و سختی نوک شمع تمایل دارند، با لگاریتم سرعت بارگیری به طور خطی افزایش یابند [Ben et al., 1980]. بنابراین، اگر سرعت بارگذاری چرخه‌ای نسبتاً بالا باشد، اثرات نرخ بارگذاری تمایل به مقابله با کاهش ناشی از بارگذاری چرخه‌ای دارد [Kraft et al., 1981].
وارد کردن جابجایی دائمی در تجزیه و تحلیل نیازمند اصلاح تعریف جابجایی افزایشده خاک است. جابجایی افزایشی خاک در مجاورت هر عنصر شمع می‌تواند به عنوان مجموع دو جزء در نظر گرفته شود:

۱. با توجه به تنش‌های افزایشی شمع-خاک بر روی عناصر خاک.

۲. به علت انباشت جابجایی دائمی تحت تنش برشی متوسط غیر صفر، بر روی عنصر.

بنابراین بردار جابجایی دائمی افزایشی خاک، $\{ASP\}$ ناشی از بارگذاری چرخه‌ای می‌تواند به معادله جابجایی افزایشده خاک به علت تنش‌های ناشی از اندرکنش خاک-شمع اضافه

گردد [Kraft et al., 1981].

پس از در نظر گرفتن اثرات کاهش و نرخ بارگذاری در محاسبات، پیک اصطکاک جدار محدود شده، τ_{ac} پس از بارگذاری چرخه‌ای توسط [Poulos et al., 1989] به صورت زیر بیان شده است:

$$\tau_{ac} = D_R D_\tau \tau_a \quad (2-20)$$

که در آن τ_a پیک استاتیکی اصطکاک جداره، D_τ ضریب کاهش برای اصطکاک جداره و D_R فاکتور نرخ بارگذاری است. معادله‌ای مشابه برای مقاومت پایه محدود شده، P_{bc} و مدول یانگ خاک، E_c به کار برده می‌شود. عوامل کاهش مربوطه به ترتیب به صورت D_b و D_E نشان داده می‌شوند. پاسخ شمع پس از N چرخه بارگذاری یکنواخت (حداکثر مقدار P_{max} ، حداقل مقدار P_{min}) می‌توان با شبیه‌سازی هر چرخه به صورت زیر تحلیل کرد [Poulos et al., 1989]:

۱. مقادیر استاتیکی E_s ، مدول یانگ استاتیکی خاک و p_b ، پیک مقاومت پایه استاتیکی که توسط فاکتور نرخ بارگذاری، D_R اصلاح شده است، شروع کرده و شمع برای بار افزایشی P_{max} تحلیل می‌شود.

۲. سپس بار به P_{min} کاهش می‌یابد و تجزیه و تحلیل تکرار می‌شود. در نهایت بار به مقدار متوسط بازگشته است، بنابراین اولین چرخه بارگذاری تکمیل شده است.

۳. برای مدل کاهش مشخص شده، عوامل کاهش D_τ و D_b و D_E تعیین می‌شوند.

۴. افزایش در جابجایی دائمی تعیین می‌شود. این مقدار معمولاً به تعداد چرخه‌ها و سطح تنش میانگین بستگی دارد.

۵. مقادیر مدول یانگ E_c ، اصطکاک جدار محدود شده τ_{ac} و مقاومت پایه P_{bc} برای چرخه بعدی با ضرب کردن مقادیر استاتیکی در فاکتور کاهش مناسب و عامل نرخ بارگذاری D_R تعیین می‌شود.

۶. مراحل ۱ و ۲ برای تعیین پاسخ افزایشی در طول چرخه بعدی با استفاده از مقادیر به روز شده p_{bc} ، τ_{ac} ، E_c دوباره انجام می‌شود.

۷. این روش تا زمانی که تعداد مورد نیاز N چرخه شبیه‌سازی گردد، تکرار می‌شود.

اگر دنباله دیگری از بارگذاری چرخه‌ای با بارگذاری‌های متفاوت مورد نظر باشد، همان روش می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، به جز اینکه مقادیر اولیه مدول خاک، اصطکاک جداره و مقاومت پایه در مرحله ۱ مقادیر موجود در انتهای سیکل قبلی بارگذاری هستند. به این ترتیب، یک توالی کامل از "بارگذاری طوفان" را می‌توان در نظر گرفت.

در حالی که بارگذاری یک‌طرفه شامل اعمال بارهای چرخه‌ای تنها با یک علامت (کشش یا فشار) به سر شمع است، به احتمال زیاد، به خصوص در سطوح بار بالاتر، ایجاد شکست دو طرفه در قسمت بالایی جدار شمع خواهد کرد. بخش بالای شمع بیشتر از خاک حرکت می‌کند و باعث ایجاد کشیدگی‌های رو به پایین در هنگام ضربه‌های روبه پایین و برعکس در هنگام ضربه‌های رو به بالا می‌شود. این مکانیزم منجر به پیشرفت کاهش چرخه‌ای از بالا به پایین شمع می‌شود. اگر ظرفیت باربری محلی جدار شمع در قسمت‌های بالایی شمع کاسته شود، می‌تواند با انتقال بار به پنجه شمع متعادل شود، یا می‌توان با افزایش ظرفیت جدار شمع در عمق شرایط پایدار را برقرار کرد. بارگذاری دوطرفه شمع که شامل هر دو نوع بارگذاری فشاری و کششی به سر شمع است، دارای توانایی آسیب رساندن بیشتری از بارگذاری چرخه‌ای یک‌طرفه است. کاهش محلی ظرفیت باربری نتیجه کاهش تنش موثر شعاعی در خاک مجاور به جدار شمع است [Jardine et al., 2012].

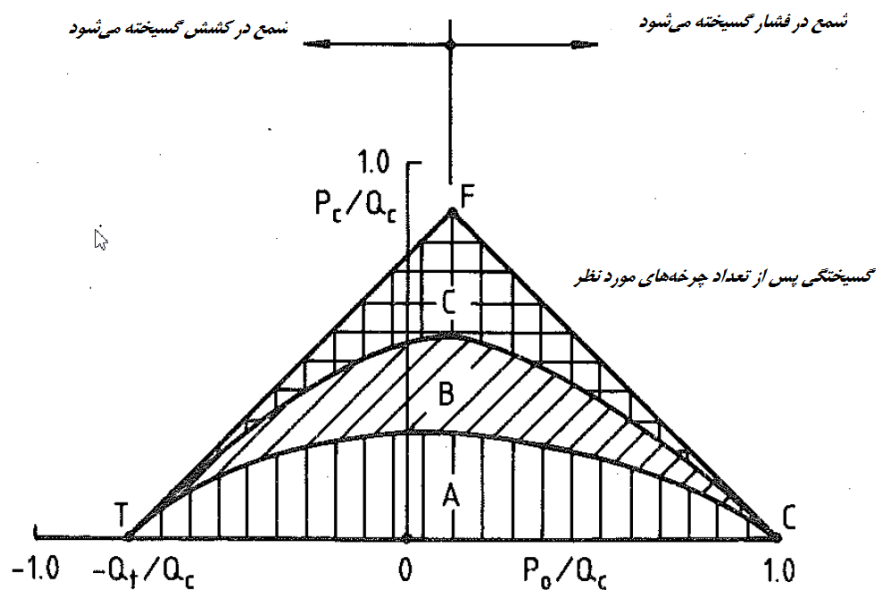
اگر تجزیه و تحلیل پاسخ چرخه‌ای در یک شمع که تحت ترکیب مختلف از بارگذاری متوسط و چرخه‌ای قرار گرفته است، انجام شود؛ امکان نمایش نتایج به شکل یک نمودار ثابت چرخه‌ای که یک نمودار نرمال شده از میانگین بار در مقابل بار چرخه‌ای است، وجود دارد. برای شمع تحت N چرخه بارگذاری از حداقل بار $P_{min} = P_o - P_c$ به حداکثر بار $P_{max} = P_o + P_c$ ، که در آن P_o میانگین بار و P_c

مقدار بار چرخه‌ای وارد بر شمع است، چنین نموداری در شکل (۲-۱۹) نشان داده شده است. سه منطقه اصلی را در این نمودار می‌توان شناسایی کرد؛

(۱) منطقه پایدار چرخه‌ای A که در آن بارگذاری چرخه‌ای هیچ تاثیری بر ظرفیت محوری شمع ندارد.

(۲) منطقه کم ثبات چرخه‌ای B، که در آن بارگذاری چرخه‌ای باعث کاهش بخشی از ظرفیت باربری محوری می‌شود، اما شمع در این تعداد مشخص N چرخه گسیخته نخواهد شد.

(۳) ناحیه ناپایدار چرخه‌ای C که در آن بارگذاری چرخه‌ای باعث میزان کاهشی از ظرفیت محوری شمع شده، که منجر به گسیختگی شمع در تعداد مشخص N چرخه بارگذاری می‌شود.



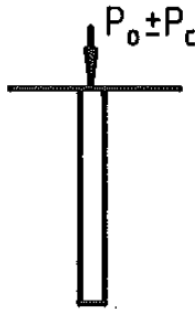
شکل ۲-۱۹- ویژگی‌های اصلی نمودار ثبات چرخه‌ای. منطقه A: پایدار چرخه‌ای است، بدون کاهش ظرفیت باربری پس از تعداد N سیکل. منطقه B: کم ثبات چرخه‌ای است، کاهش بخشی از ظرفیت باربری پس از چرخه N ام. منطقه C: ناپایدار چرخه‌ای است، گسیختگی در چرخه N ام یا کمتر [Poulos and Fellow, 1988].

$$P_0 = \text{متوسط بار}$$

$$P_c = \text{بار چرخه‌ای}$$

$$Q_c = \text{ظرفیت باربری فشاری استاتیکی}$$

$Q_T =$ ظرفیت باربری کششی استاتیکی



شکل ۲-۲۰- تصویر شماتیک شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای محوری

مرز فوقانی نمودار ثبات چرخه‌ای، یک جفت خط مستقیم است (FC و TF) که ترکیب میانگین بار و بار چرخه‌ای را در صورتی که کاهش ظرفیت باربری رخ ندهد، برای ایجاد گسیختگی ضروری نشان می‌دهد. این خطوط توسط رابطه‌های نرمال شده در زیر تعریف شده‌اند؛

گسیختگی در فشار (خط FC):

$$\frac{P_o}{Q_c} + \frac{P_c}{Q_c} = 1 \quad (21-2)$$

گسیختگی در کشش (خط TF):

$$\frac{P_o}{Q_c} - \frac{P_c}{Q_c} = -\frac{Q_T}{Q_c} \quad (22-2)$$

از آنجا که Q_c عموماً بیشتر از Q_T است، نقطه اوج F در سمت راست مبدا قرار دارد و در نتیجه پیک امکان‌پذیر دامنه بارگذاری چرخه‌ای هنگامی رخ می‌دهد که میانگین بار فشاری و برابر با $(Q_c - Q_T)/2$ باشد. ترکیب بار در سمت راست نقطه اوج F باعث گسیختگی شمع در فشار می‌شود، در حالی که ترکیب بار در سمت چپ نقطه F منجر به گسیختگی در کشش خواهد شد.

هنگامی که کاهش ظرفیت باربری رخ می‌دهد، حداکثر بار چرخه‌ای که بدون گسیختگی توان متحمل دارد، دوباره به طور کلی در یک بار متوسط $(Q_c - Q_T)/2$ رخ می‌دهد، بنابراین ممکن است به

عنوان سطح میانگین بار بهینه در نظر گرفته شود. در مورد شمع‌هایی با ظرفیت باربری نهایی زیاد (که Q_c به طور قابل توجهی بیشتر از Q_T است)، ممکن است بتوان با افزایش میانگین بار عملکرد چرخه‌ای شمع را بهبود بخشید. به طور مثال؛ تغییر حالت مود گسیختگی از کشش به فشار. در نقطه F ، احتمال شکست برابر در هر دو حالت فشار و کشش وجود دارد. برای شمع‌هایی که هیچ رفتار کرنشی نرم‌شونده سطحی را نشان نمی‌دهند، منطقه B نشان دهنده ترکیبی از بار متوسط و چرخه‌ای است که منجر به کاهش چرخه‌ای محدودی از مقاومت بدنه و نوک می‌شود. برای شمع‌هایی که در آن سطح امکان رفتار کرنشی نرم‌شونده را داراست، منطقه B ممکن است بیشتر به مناطقی تقسیم شود که در آن کاهش چرخه‌ای غالب است و در آن رفتار کرنشی نرم‌شونده نیز غالب می‌باشد.

یک نمودار ثبات چرخه‌ای مانند آنچه در شکل (۲-۱۹) نشان داده شده است، نشان دهنده رفتار شمع برای تعداد مشخصی از چرخه‌ها، N است. همانطور که N افزایش می‌یابد، به‌مراه افزایش در اندازه ناحیه ناپایدار چرخه‌ای C مرزهای منطقه با ثبات و کم ثبات چرخه‌ای، A و B تمایل به جابه‌جا شدن خواهد شد.

۲-۷- خلاصه و جمع‌بندی

بررسی‌های انجام شده در طول این فصل را می‌توان در ۵ مورد زیر خلاصه کرد:

۱- تحقیقات محدودی پیرامون بررسی رفتار شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای محوری در ماسه انجام شده است.

۲- در طول بارگذاری چرخه‌ای در شمع تغییرمکان‌های دائمی و بازگشت‌ناپذیر ایجاد می‌شود. تغییرمکان‌های دائمی با افزایش تعداد چرخه‌ها زیاد می‌شود. نرخ این تغییرمکان‌ها در صورتی که بارگذاری چرخه‌ای کوچک باشد، کاهش می‌یابد و در صورتی که مقدار این بار زیاد باشد، افزایشی است و منجر به گسیختگی شمع می‌شود. تحقیقات انجام شده توسط دیگر محققین

بازه امن مقدار بار چرخه‌ای را در حدود ۲۰ تا ۵۰ درصد ظرفیت استاتیکی شمع دانسته‌اند. اگر چه به نظر می‌رسد، تحقیقات بیشتری جهت تعیین بازه صحیح میزان بار چرخه‌ای امن قابل اعمال به شمع لازم است [Achmus et al., 2017].

۳- تنها تحقیقات محدودی پیرامون مکانیزم گسیختگی شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای در دسترس است. منابع در دسترس پیشنهاد می‌کنند که دلیل گسیختگی شمع در طول بارگذاری چرخه‌ای کاهش و کاهش مقاومت برشی بر روی سطح شمع است، که به دلیل برش دوطرفه در خاک و کاهش تنش شعاعی در سطح شمع بوجود می‌آید.

۴- روش‌های ارائه شده جهت تخمین رفتار بار-جابجایی مانند: Solaiman and Coyle [1976] و Polous چنانچه ذکر شد، دارای محدودیت‌هایی است و نیازمند آن است که این روش‌ها بهبود یافته و یا روش‌های جدیدی ارائه شود.

۵- راهنماهای طراحی شمع تحت بارگذاری چرخه‌ای که در طراحی فونداسیون توربین‌های بادی فراساحلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به نظر می‌رسد که به میزان کافی مورد بررسی قرار نگرفته است و براساس تعداد محدودی آزمایش در تعداد چرخه کم فرموله شده‌اند.

با توجه به موارد ذکر شده فوق، اثر بارگذاری چرخه‌ای بلندمدت در ماسه، مسأله‌ای چند وجهی است و با اینکه محققان زیادی در این زمینه فعالیت کرده‌اند، واضح است که هنوز هیچ روش کلی و پذیرفته شده‌ای وجود ندارد و تحقیقات وسیع‌تر و بیشتری نیاز است.

فصل سوم

طراحی آزمایش‌ها جهت مدل‌سازی شمع تحت اثر بار
محوری چرخه‌ای

۳-۱- مقدمه

همان‌طور که در فصل قبل بیان شد، بررسی‌های آزمایشگاهی و میدانی زیادی بر روی رفتار شمع تحت اثر بار محوری چرخه‌ای صورت گرفته است. با توجه به اهمیت و ضرورت این آزمایش‌ها جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف مانند؛ طول، عمق مدفون شمع و تعداد چرخه بر روی رفتار شمع، بررسی آزمایشگاهی رفتار شمع تحت اثر بار محوری چرخه‌ای به‌عنوان موضوع این تحقیق انتخاب شده است. یکی از مهم‌ترین مراحل پایان‌نامه، مرحله طراحی آزمایش است. در این فصل به چگونگی طراحی آزمایش‌ها، تجهیزات و مصالح مورد استفاده شامل خاک، مخزن خاک و شمع‌های مورد استفاده و همچنین نحوه اعمال نیرو و اندازه‌گیری‌های انجام شده پرداخته می‌شود.

۳-۲- دستگاه و مصالح آزمایش

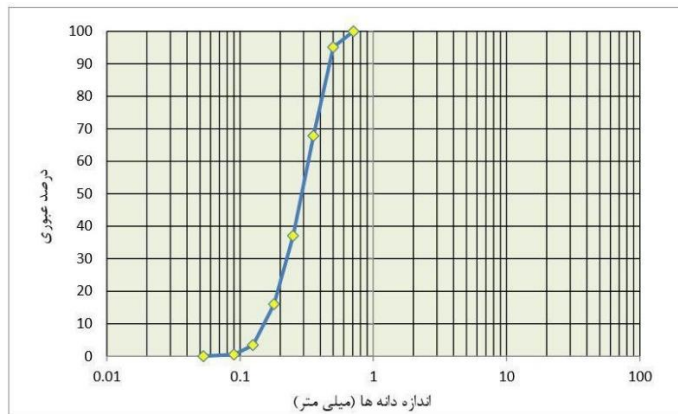
برای بررسی رفتار شمع تحت اثر بار محوری چرخه‌ای نیاز به دستگاهی است تا بتوان به شمع نیروی قائم چرخه‌ای اعمال نمود و جابجایی قائم شمع را بدست آورد. به این منظور دستگاه آزمایشی طراحی شده است. در این آزمایش از مصالح و وسایلی همچون ماسه، لوله، مخزن استوانه‌ای، تراز، پروفیل آهن، گیج ساعتی اندازه‌گیری، قرقره، کابل فولادی و وزنه استفاده شده است. در ادامه به تشریح مصالح و تجهیزات مورد استفاده در این آزمایش پرداخته می‌شود. به منظور دستیابی به مشخصات فنی خاک و لوله‌های مورد استفاده، آزمایش برش مستقیم و همچنین آزمایش کشش انجام شده است که نتایج آن‌ها در این بخش مشاهده می‌شود. در نهایت نمودارهای نیرو - جابجایی بدست آمده از این آزمایش‌ها نمایش داده شده است.

۳-۲-۱- خاک مورد استفاده

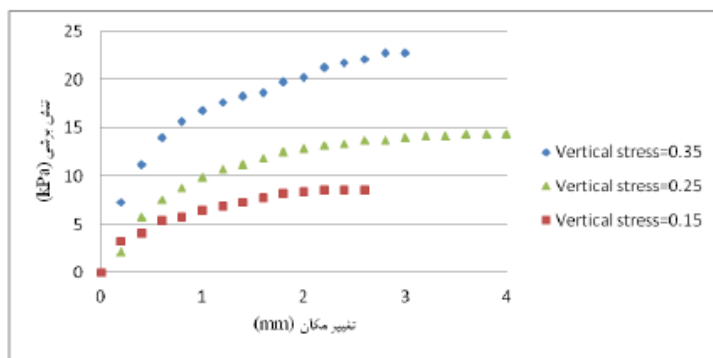
خاک مورد استفاده در این آزمایش ماسه فیروزکوه ۱۶۱ می‌باشد که با انجام آزمایش دانه‌بندی و برش مستقیم مشخصات فنی آن تعیین شده است. نمودار دانه‌بندی در شکل (۳-۱) نمایش داده شده است. همچنین برای دو دانسیته نسبی ۳۳ و ۸۴ درصد، آزمایش برش مستقیم توسط کشاورز و بلوری

(۱۳۹۰) انجام شده و مقدار زاویه اصطکاک داخلی مشخص شده است. نمودارهای مربوط به آزمایش برش مستقیم برای ماسه با دانسیته نسبی ۳۳ و ۸۴ درصد در اشکال (۲-۳) تا (۵-۳) نمایش داده شده است. زاویه اصطکاک بدست آمده از آزمایش برش مستقیم در جدول (۱-۳) درج شده است.

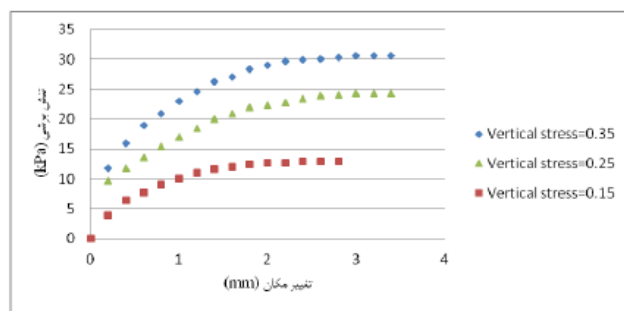
پژوهشگران دیگری نیز بر روی این ماسه آزمایش‌هایی انجام داده‌اند که می‌توان به آزمایش‌های سه محوری انجام شده توسط [۲۰۱۱] Movahedifar and Bolouri اشاره نمود. این ماسه با دانسیته نسبی - های متفاوت در دستگاه آزمایش سه محوری تحت فشارهای همه جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال قرار گرفته است. مقدار زاویه اصطکاک داخلی حداقل و حداکثر، با توجه به این که آزمایش در شرایط سست‌ترین و متراکم‌ترین حالت خاک، انجام شده است به ترتیب برابر با ۳۰ و ۳۸ درجه اعلام شده است. مقدار مدول یانگ سکانتی در فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال نیز بدست آمده است. برای دانسیته نسبی‌های ۳۸ و ۹۶ درصد زاویه‌های اصطکاک داخلی به ترتیب برابر با ۳۲ و ۳۷ درجه و مدول یانگ برابر با ۱۶۴۰۰ و ۴۰۰۰۰ کیلو پاسکال اعلام شده است. مقدار زاویه اصطکاک بدست آمده از آزمایش برش مستقیم بدلیل این که سطح گسیختگی در این آزمایش ضعیف‌ترین سطح نمی‌باشد نسبت به آزمایش سه‌محوری مقدار بیشتری از خود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است مقدار مدول یانگ خاک، حاصل از آزمایش برش مستقیم استفاده نشده است. با توجه به یکسان بودن نوع ماسه و نتایج تقریباً برابر با آزمایش سه محوری که توسط پژوهشگران نامبرده صورت گرفته است، در صورت نیاز به مقدار مدول یانگ خاک در روابط از مقدار مدول یانگ آزمون سه‌محوری بیان شده استفاده خواهد شد.



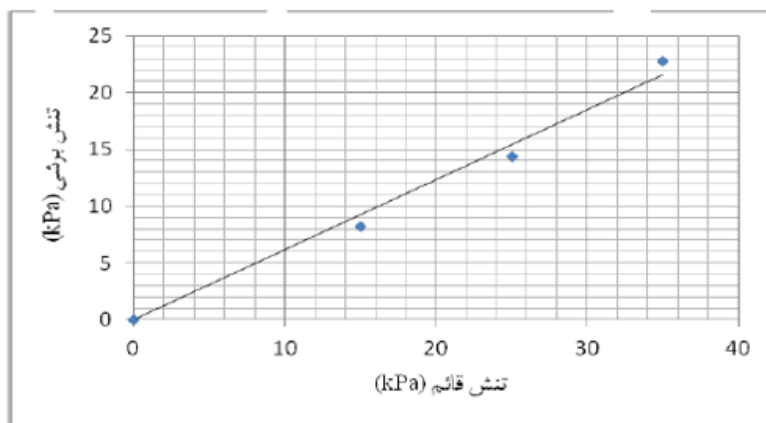
شکل ۱-۳ نمودار دانه‌بندی خاک مورد استفاده (کشاورز و بلوری، ۱۳۹۰).



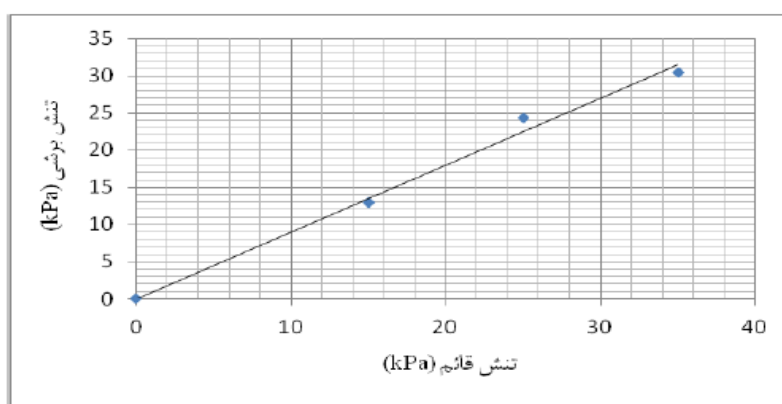
شکل ۲-۳ نمودار تنش برشی - تغییر مکان برای ماسه با دانسیته نسبی 33% (کشاورز و بلوری، ۱۳۹۰).



شکل ۳-۳ نمودار تنش برشی - تغییر مکان برای ماسه با دانسیته نسبی 84% (کشاورز و بلوری، ۱۳۹۰).



شکل ۳-۴ نمودار تنش برشی - تنش قائم برای ماسه با دانسیته نسبی ۳۳٪ (کشاورز و بلوری، ۱۳۹۰).



شکل ۳-۵ نمودار تنش برشی - تنش قائم برای ماسه با دانسیته نسبی ۸۴٪ (کشاورز و بلوری، ۱۳۹۰).

جدول ۳-۱ زاویه اصطکاک داخلی بدست آمده از آزمایش برش مستقیم (کشاورز و بلوری، ۱۳۹۰).

زاویه اصطکاک داخلی	دانسیته نسبی (درصد)
۳۳	۳۳
۴۱/۵	۸۴

۲-۲-۳- شمع‌های مورد استفاده

از ابعاد متفاوتی برای مدل نمودن شمع در آزمایشگاه استفاده شده است. هر چه شمع‌های مدلسازی شده در آزمایشگاه کوچک‌تر باشند دقت اندازه‌گیری باید افزایش یابد به گونه‌ای که بتوان نیروی محوری کوچک وارد به شمع و همچنین جابجایی‌های کوچک شمع را به دقت اندازه‌گیری نمود که 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. در نتیجه ابعاد مدل آزمایش را باید با در نظر گرفتن سختی نسبی خاک و شمع که بتوان رفتار شمع مدل نمود، تاثیر منطقه تنش که باید ۱۰ برابر قطر شمع در جهت اعمال نیرو برای شمع تحت اثر بارمحوری در حالت استاتیکی در نظر گرفته شود [Poulos and Davis, 1980] و نیز توجه به شرایط و امکانات آزمایشگاه انتخاب می‌گردد. قطر لوله‌های آهنی با توجه به تأثیر منطقه تنش انتخاب گردیده است. در آزمایش انجام شده از لوله‌های گالوانیزه سفید با طول‌های مدفون ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر به‌عنوان شمع استفاده شده است. لوله‌های گالوانیزه با دو قطر خارجی ۲۱/۷ و ۲۷ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته‌اند و جهت اتصال مناسب آنها با صفحه بارگذاری یک سر آنها رزوه شده که در شکل (۳-۶) نشان داده شده‌اند. برای به‌دست آوردن مدول یانگ لوله‌ها، نمونه‌ای از لوله‌های مورد استفاده تحت آزمایش کشش (شکل ۳-۷) در آزمایشگاه مواد قرار گرفته است.

نمودارهای بدست آمده از تست کشش در شکل (۳-۸) نشان داده شده است. در این شکل بدلیل تعداد بسیار زیاد نقاط اندازه‌گیری شده، نمودار به صورت خط پیوسته مشاهده می‌شود.

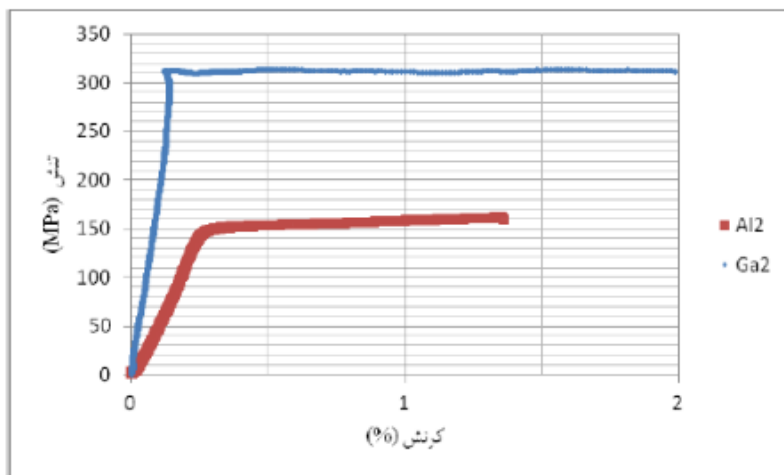


شکل ۳-۶ شمع‌های مورد استفاده در آزمایش



شکل ۳-۷ دستگاه کشش جهت تعیین مقاومت کششی نهایی شمعه‌های فولادی

در هنگام آزمایش کشش نمودار تنش و کرنش با دقت بسیار بالایی در کامپیوتر متصل به دستگاه کشش رسم شده است. برای اندازه‌گیری مدول یانگ قسمتی از نمودار که کاملاً خطی و حالت الاستیک داشته باشد انتخاب و تغییرات تنش بر تغییرات کرنش تقسیم شده است و در نهایت مقدار مدول یانگ حاصل شده است. همچنین مشخصات کامل لوله‌های مورد استفاده در جدول (۳-۲) درج شده است.



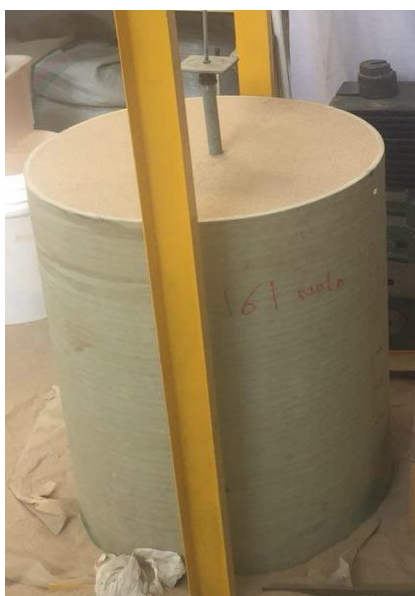
شکل ۳-۸ نمودار تنش-کرنش لوله آلومینیومی و لوله گالوانیزه (کشاورز و بلوری، ۱۳۹۰).

جدول ۲-۳ مشخصات لوله‌های مورد استفاده (کشاورز و بلوری، ۱۳۹۰).

کد	نوع	قطر خارجی (mm)	ضخامت دیواره (mm)	وزن واحد طول (N)	مدول یانگ (Gpa)	مقاومت کششی (Mpa)
Ga1	گالوانیزه	۲۱.۷	۲.۴	۱۰	۱۹۶	۳۱۱
Ga2	گالوانیزه	۲۷	۲.۴	۱۳.۱	۱۹۶	

۳-۲-۳- مخزن خاک

در آزمایشگاه قابی طراحی و ساخته شد که برای انجام آزمایش و اعمال نیروی محوری نیاز است که مخزن در زیر آن قرار بگیرد. با توجه به ابعاد قاب و همچنین فضای کافی برای نصب وسایل اندازه‌گیری جابجایی‌های قائم شمع و نیز در نظر گرفتن قطر لوله‌های فلزی تولیدی موجود در بازار، مخزنی به قطر خارجی ۷۰۰ میلی‌متر و ارتفاع یک متر بر پایه تاثیر منطقه تنش در نظر گرفته شده است. مخزن خاک در شکل (۳-۹) نشان داده شده‌اند



شکل ۳-۹ مخزن خاک مورد آزمایش

۳-۲-۴- گیج مکانیکی

برای اندازه‌گیری جابجایی قائم شمع نسبت به سطح خاک از یک گیج مکانیکی که در زیر صفحه

بارگذاری قرار داده شده است و در شکل (۳-۱۰) مشاهده می‌شود استفاده شده است. دقت این وسیله صدم میلیمتر و کورس قابل اندازه‌گیری آن ۳۰ میلیمتر می‌باشد. در نصب این گیج به منظور به حداقل رساندن خطاهای اندازه‌گیری باید دقت کرد میله متحرک آن کاملاً قائم و پایه نگهدارنده مغناطیسی آن محکم و ثابت قرار گرفته باشد (شکل (۳-۱۱)). در هر چرخه بارگذاری و باربرداری، مقدار جابجایی توسط گیج ثبت می‌شود.



شکل ۳-۱۰ گیج نصب شده در زیر صفحه بارگذاری



شکل ۳-۱۱ پایه مغناطیسی و گیج نصب شده بر روی آن

۳-۲-۵- چگونگی اعمال نیروی قائم

برای اعمال نیروی قائم می‌توان از ابزار هیدرولیکی (Jack and Load cell) مشابه کار انجام شده توسط Prasad and Chari [1999] و یا از ابزار مکانیکی مشابه کار Bominathan and Ayothiraman [2007] استفاده نمود. به طور معمول برای شمع‌های مدل شده با مقیاس بزرگ که احتیاج به نیروی قابل توجهی دارد از دستگاه‌های هیدرولیکی استفاده می‌شود و برای شمع‌های مدل شده در مقیاس‌های کوچک از دستگاه‌های مکانیکی استفاده می‌کنند. البته لازم به ذکر است با به کار بردن ابزار الکتریکی و هیدرولیکی با دقت بالا می‌توان به شمع‌های مدل شده با اندازه‌های متفاوت نیروی کنترل شده اعمال نمود. در آزمایش انجام شده در آزمایشگاه برای اعمال نیروی قائم از ابزار مکانیکی استفاده شده است. برای این کار مطابق شکل (۳-۱۲) قاب خمشی صلبی ساخته شده و دو قرقره، یکی بالای مخزن و دیگری در سمت راست آن در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ثابت شده است. کابل فولادی از یک طرف به صفحه بارگذاری سر شمع و از طرف دیگر با عبور از روی قرقره به آویز وزنه متصل شده است. آویز وزنه و صفحه بارگذاری متصل به سر شمع کاملاً هم وزن و هم اندازه می‌باشند تا قبل از بارگذاری تعادل برقرار باشد و شمع تحت فشار یا کشش قرار نگیرد. با قرارگیری وزنه‌ها بر روی صفحه بارگذاری، نیروی فشاری به شمع اعمال می‌شود. سپس برای اعمال نیروی کششی، از روی صفحه بارگذاری باربرداری شده و وزنه‌ها روی آویز وزنه قرار داده می‌شود. سیستم انتقال نیرو در شکل (۳-۱۲) نمایش داده شده است.

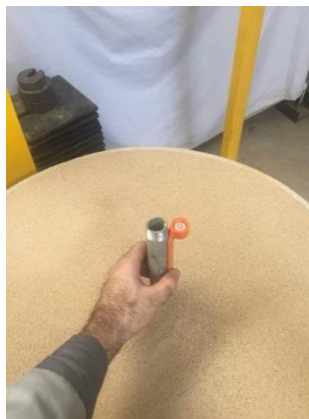


شکل ۳-۱۲ نحوه انتقال نیرو به شمع

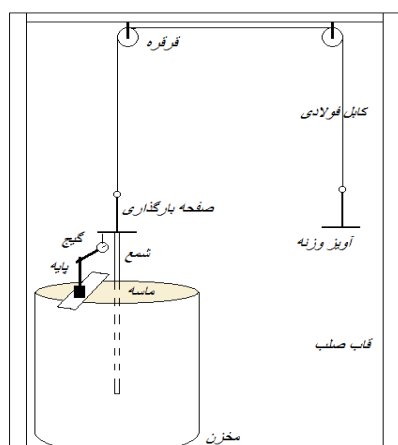
۳-۳- روش انجام آزمایش

در ابتدا قبل از قرار دادن شمع مقداری خاک داخل مخزن در لایه‌های ۱۰ سانتی‌متری ریخته می‌شود تا بتوان شمع را در وسط مخزن ثابت نگه داشت. سپس شمع در داخل مخزن قرار می‌گیرد. سپس به وسیله تراز مورد استفاده در نقشه‌برداری که در شکل (۳-۱۳) نمایش داده شده است، شمع تراز می‌شود. آزمایش در دو حالت خاک با دانسیته نسبی ۳۳ و ۸۴ درصد انجام شده است. برای حالتی که دانسیته نسبی ۳۳ درصد می‌باشد، خاکریزی داخل مخزن در لایه‌های ۱۰۰ میلی‌متری تا رسیدن به طول مدفون دلخواهی از شمع انجام می‌گیرد. اما در حالتی که دانسیته نسبی خاک ۸۴ درصد است، خاک در لایه‌های ۱۰۰ میلی‌متری ریخته شده و سپس کوبیده می‌شود. کوبیدن باید به نحوی انجام پذیرد که شمع از حالت تراز خارج نشود. شاقول بودن شمع باید همواره بررسی شود، زیرا در غیر این صورت به علت خروج از محوری بار قائم، در شمع گشتاور ایجاد و باعث بروز خطا در آزمایش می‌شود. بعد از اتمام خاکریزی و تسطیح سطح خاک مخزن، صفحه مخصوص بارگذاری توسط مهره‌ای که از قبل در زیر آن جهت اتصال به سر رزوه شده شمع تعبیه شده است، به سر شمع متصل می‌شود. یک سرکابل فولادی (سیم بکسل) به صفحه بارگذاری بسته می‌شود و سر دیگر آن بعد از عبور از روی قرقره‌ها به آویز وزنه جهت اعمال نیرو متصل می‌گردد. پایه آهن‌ربایی گیج ساعتی (اندیکاتور) روی

پروفیل ناودانی سنگین و بدون لغزشی ثابت شده، و گیج به آن متصل می‌شود، به طوری که نوک شفت گیج - به منظور اندازه‌گیری نشست شمع - در تماس با سطح زیرین صفحه بارگذاری قرار گیرد. وزنه‌های ثابت به عنوان سربار روی صفحه بارگذاری قرار داده می‌شود سپس گیج اندازه‌گیری صفر شده و یا مقدار اولیه آنها یادداشت می‌شود. با قرار دادن هر وزنه بر روی صفحه بارگذاری به شمع نیروی محوری اعمال می‌شود و شمع شروع به نشست می‌کند، در نتیجه شفت گیج متصل به زیر صفحه در جهت اعمال بار حرکت می‌کند و مقدار جابجایی شمع نمایش داده می‌شود، سپس به همان ترتیب بارگذاری، عمل باربرداری انجام شده و همین روند در جهت مقابل روی آویز وزنه‌ها نیز تکرار می‌شود، برای ۵۰ چرخه این عمل تکرار می‌شود. در هر چرخه مقدار جابجایی متناظر با هر بارگذاری و هر باربرداری ثبت می‌شود. تصویر دستگاه آزمایش و همچنین طرح شماتیک آن در شکل (۳-۱۴) نمایش داده شده است. هر یک از آزمایش‌های انجام شده با یک شماره مشخص شده است. این شماره برای لوله‌های گالوانیزه به صورت $Ga-L^*-D^*$ در نظر گرفته شده است. حرف L بیانگر (Length) طول مدفون شمع و عدد بعد از آن مقدار طول مدفون شمع به سانتی‌متر می‌باشد. حرف D بیانگر (Diameter) قطر خارجی شمع و عدد بعد از آن مقدار قطر شمع به میلی‌متر می‌باشد. به عنوان مثال شمع با نام Ga-L80-D27 نشان دهنده آن است که جنس این شمع گالوانیزه، با طول مدفون ۸۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۷ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۳-۱۳ تراز مورد استفاده جهت قرار دادن شمع در خاک به صورت قائم

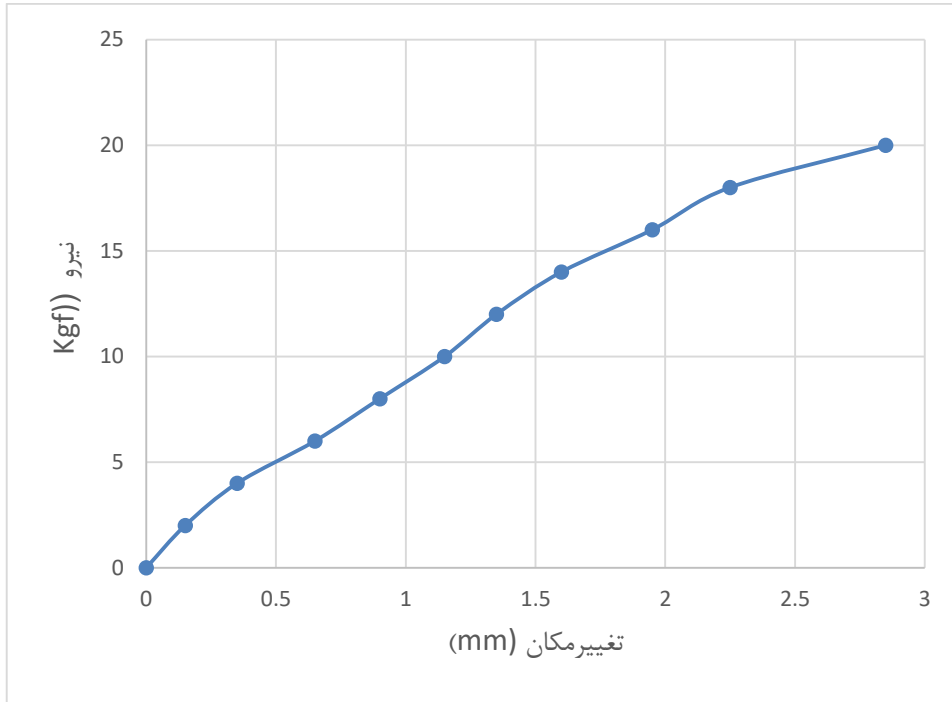


شکل ۳-۱۴ تصویر و طرح شماتیک دستگاه آزمایش

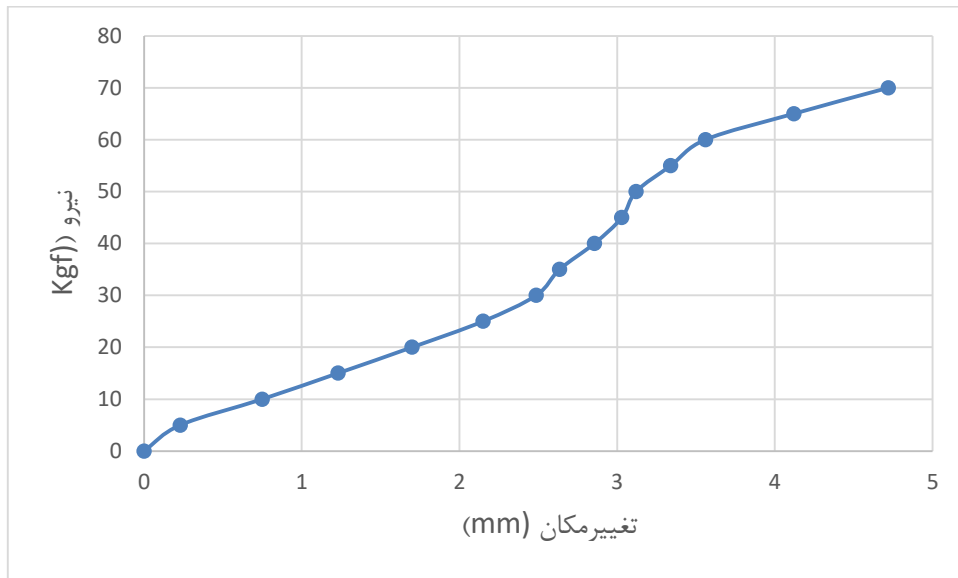
۳-۴- نمودارهای نیرو - تغییر مکان

مقدار نیروی محوری وارد شده به شمع‌ها بین ۶۰ تا ۷۵ درصد مقدار بار محوری استاتیکی نهایی برای هر یک از شمع‌هاست که تقریباً ۳۵ تا ۵۰ درصد از این مقدار بصورت سربار و مابقی بعنوان بار سیکنی به شمع اعمال شده است. به منظور تعیین ظرفیت باربری استاتیکی در آزمایشگاه دو نمونه از شمع‌ها به طول ۴۰۰ میلی‌متر، قطر ۲۲ میلی‌متر و در خاک با تراکم نسبی ۳۳ و ۸۴ درصد تحت بارگذاری محوری قرار گرفتند. بارگذاری را تا زمان گسیختگی شمع‌ها ادامه دادیم، برای شمع در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در بار ۱۸ کیلوگرم شمع تغییر مکان زیادی داده و گسیخته شد. برای شمع در خاک متراکم این اتفاق در میزان بار ۶۰ کیلوگرم رخ داد. نمودارهای حاصل از این دو آزمایش در شکل‌های (۳-۱۵) و (۳-۱۶) ارائه شده است. نمودار نیرو-جابجایی برای شمع‌های گالوانیزه به قطرهای ۲۲ و ۲۷ میلی‌متر و طول‌های مدفون ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متری و چرخه‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ ارائه شده است. در جدول (۳-۳) نوع شمع نمایش داده شده است. در موارد زیادی به دلایلی همچون تردید در نتایج بدست آمده، بالابردن دقت نتایج، وارد شدن ضربه ناگهانی به شمع، از تراز خارج شدن شمع و موارد دیگر آزمایش‌های تکرار صورت گرفته است. مشخصات آزمایش‌های انجام شده

در جدول زیر آمده است.



شکل ۳-۱۵ نمودار نیرو - جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۲ و طول مدفون ۴۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد تا مرحله گسیختگی



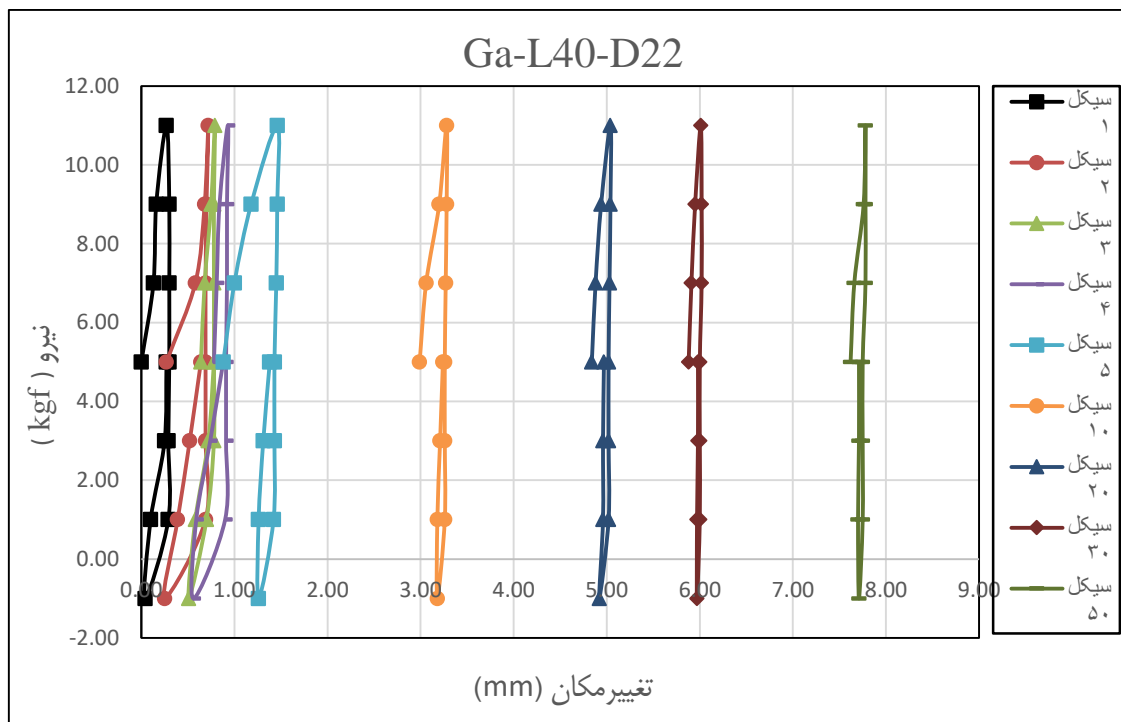
شکل ۳-۱۶ نمودار نیرو - جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۲ و طول مدفون ۴۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد تا مرحله گسیختگی

جدول ۳-۳ مشخصات آزمایش‌های انجام شده

نام آزمایش	دانسیتة نسبی خاک (درصد)	حداکثر بار اعمالی (N)	تعداد سیکل	طول مدفون لوله (cm)	جنس لوله	شماره آزمایش
Ga -L40-D22	۳۳	۱۱۰	۵۰	۴۰	گالوانیزه	۱
Ga -L60-D22	۳۳	۱۹۰	۵۰	۶۰	گالوانیزه	۲
Ga -L80-D22	۳۳	۲۴۰	۵۰	۸۰	گالوانیزه	۳
Ga -L40- D27	۳۳	۱۹۰	۵۰	۴۰	گالوانیزه	۴
Ga - L60-D27	۳۳	۲۵۰	۵۰	۶۰	گالوانیزه	۵
Ga -L80-D27	۳۳	۴۰۰	۵۰	۸۰	گالوانیزه	۶
Ga -L40-D22	۸۴	۴۰۰	۵۰	۴۰	گالوانیزه	۷
Ga - L60-D22	۸۴	۸۰۰	۵۰	۶۰	گالوانیزه	۸
Ga - L80-D22	۸۴	۹۰۰	۵۰	۸۰	گالوانیزه	۹
Ga - L40- D27	۸۴	۷۰۰	۵۰	۴۰	گالوانیزه	۱۰
Ga - L60-D27	۸۴	۱۰۰۰	۵۰	۶۰	گالوانیزه	۱۱
Ga -L80-D27	۸۴	۱۴۰۰	۵۰	۸۰	گالوانیزه	۱۲

در ابتدا نمودارهای نیرو-جابجایی مربوط به شمع‌ها در خاک سست با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در اشکال (۳-۱۷) تا (۳-۲۲) به نمایش در آمده است و در ادامه همین نمودارها برای شمع‌هایی که در خاک متراکم با دانسیته نسبی ۸۴ درصد قرارگرفته‌اند در شکل‌های (۳-۲۳) تا (۳-۲۸) نمایش داده می‌شوند.

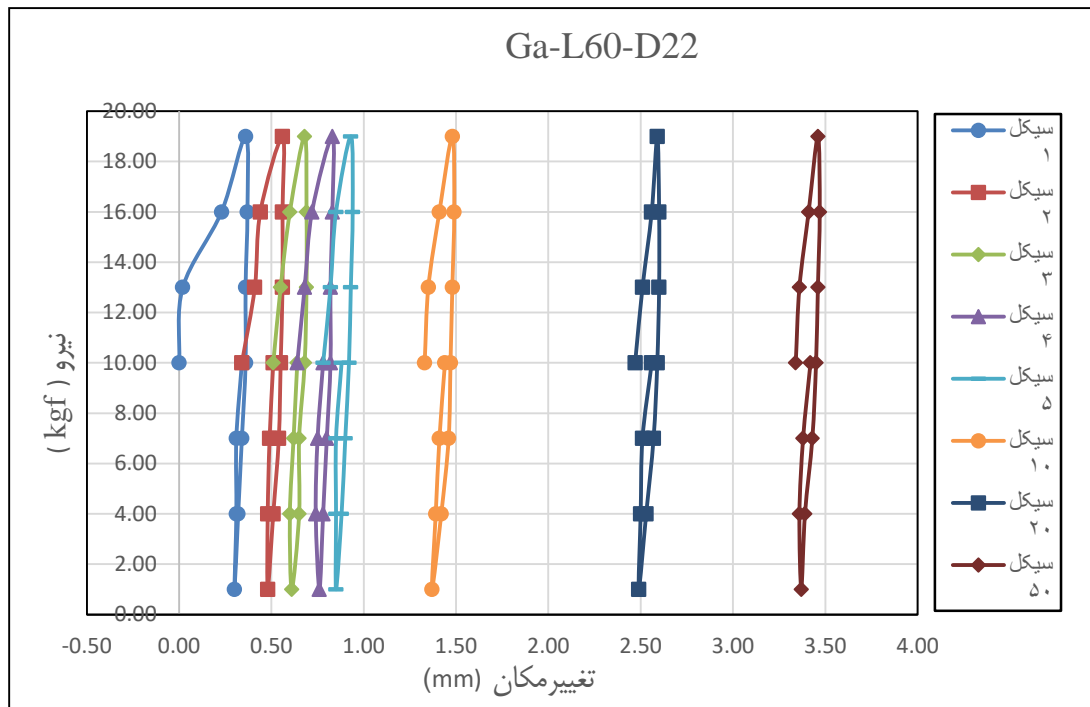
شمع گالوانیزه با طول کلی ۶۰۰ و طول مدفون ۴۰۰ میلی‌متر دارای قطر خارجی ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد مدفون شده است. سربار محوری ۵ کیلوگرمی بر روی شمع قرار داده و بار چرخه‌ای ۶ کیلوگرمی -در ۳ مرحله دو کیلوگرم- به شمع اعمال شده است. مقدار جابجایی قائم شمع در هر مرحله بارگذاری و باربرداری اندازه‌گیری شده است. نمودار نیرو-جابجایی این شمع در شکل (۳-۱۷) نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱۷ نمودار نیرو - جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۲ و طول مدفون ۴۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد

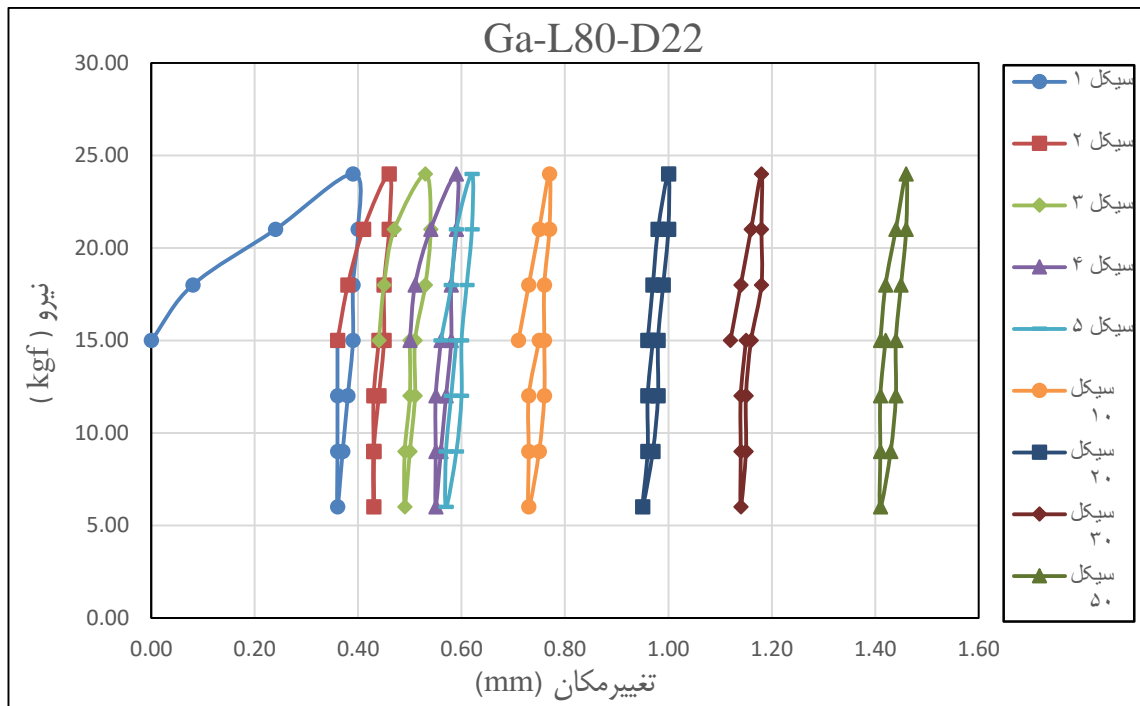
شمع گالوانیزه با طول کلی ۸۰۰ و طول مدفون ۶۰۰ میلی متر دارای قطر خارجی ۲۲ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد مدفون شده است. سربار محوری ۱۰ کیلوگرمی بر روی شمع قرار داده و بار چرخه‌ای ۹ کیلوگرمی - در ۳ مرحله سه کیلوگرم - به شمع اعمال شده است. مقدار جابجایی قائم

شمع در هر مرحله بارگذاری و باربرداری اندازه‌گیری شده است. نمودار نیرو-جابجایی این شمع در شکل (۳-۱۸) نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱۸ نمودار نیرو - جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۲ و طول مدفون ۶۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد

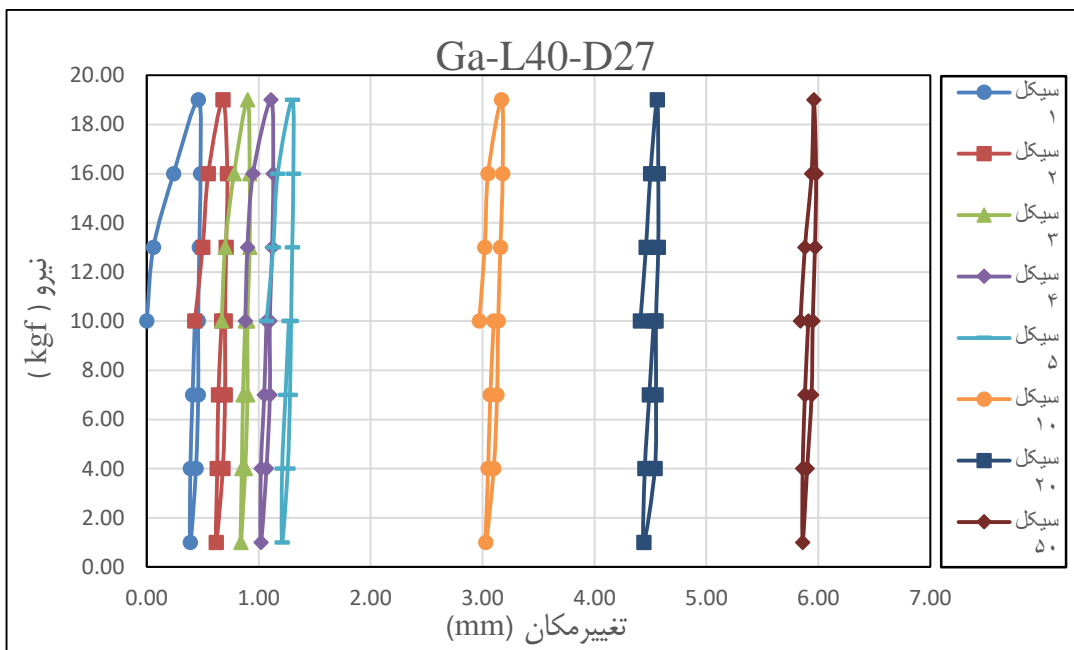
شمع گالوانیزه با طول کلی ۱۰۰۰ و طول مدفون ۸۰۰ میلی‌متر دارای قطر خارجی ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد مدفون شده است. سربار محوری ۱۵ کیلوگرمی بر روی شمع قرار داده و بار چرخه‌ای ۹ کیلوگرمی - در ۳ مرحله سه کیلوگرم - به شمع اعمال شده است. در انتها پس از ۵۰ چرخه، بارگذاری را تا رسیدن به گسیختگی خاک ادامه داده‌ایم. مقدار جابجایی قائم شمع در هر مرحله بارگذاری و باربرداری اندازه‌گیری شده است. نمودار نیرو-جابجایی این شمع در شکل (۳-۱۹) نمایش داده شده است.



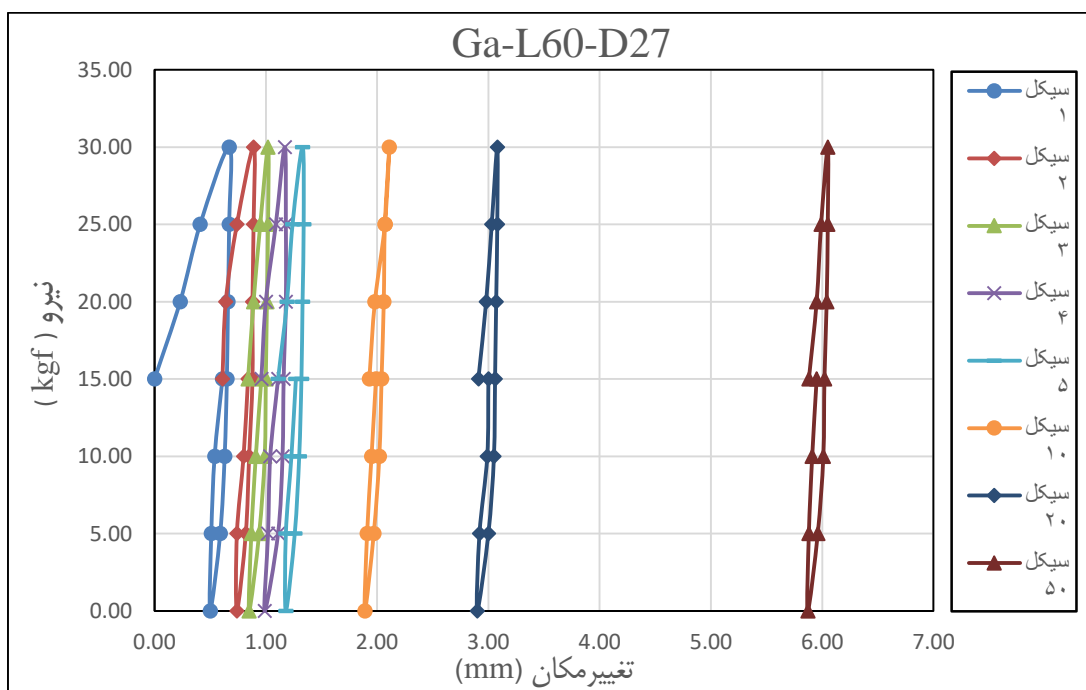
شکل ۳-۱۹ نمودار نیرو - جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۲ و طول ۸۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد

شمع گالوانیزه با طول کلی ۶۰۰ و طول مدفون ۴۰۰ میلی متر دارای قطر خارجی ۲۷ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد مدفون شده است. سربار محوری ۱۰ کیلوگرمی بر روی شمع قرار داده و بار چرخه‌ای ۹ کیلوگرمی - در ۳ مرحله سه کیلوگرم - به شمع اعمال شده است. مقدار جابجایی قائم شمع در هر مرحله بارگذاری و باربرداری اندازه‌گیری شده است. نمودار نیرو-جابجایی این شمع در شکل (۳-۲۰) نمایش داده شده است.

شمع گالوانیزه با طول کلی ۸۰۰ و طول مدفون ۶۰۰ میلی متر دارای قطر خارجی ۲۷ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد مدفون شده است. سربار محوری ۱۵ کیلوگرمی بر روی شمع قرار داده و بار چرخه‌ای ۱۵ کیلوگرمی (در ۳ مرحله پنج کیلوگرم) به شمع اعمال شده است. مقدار جابجایی قائم شمع در هر مرحله بارگذاری و باربرداری اندازه‌گیری شده است. نمودار نیرو-جابجایی این شمع در شکل (۳-۲۱) نمایش داده شده است.



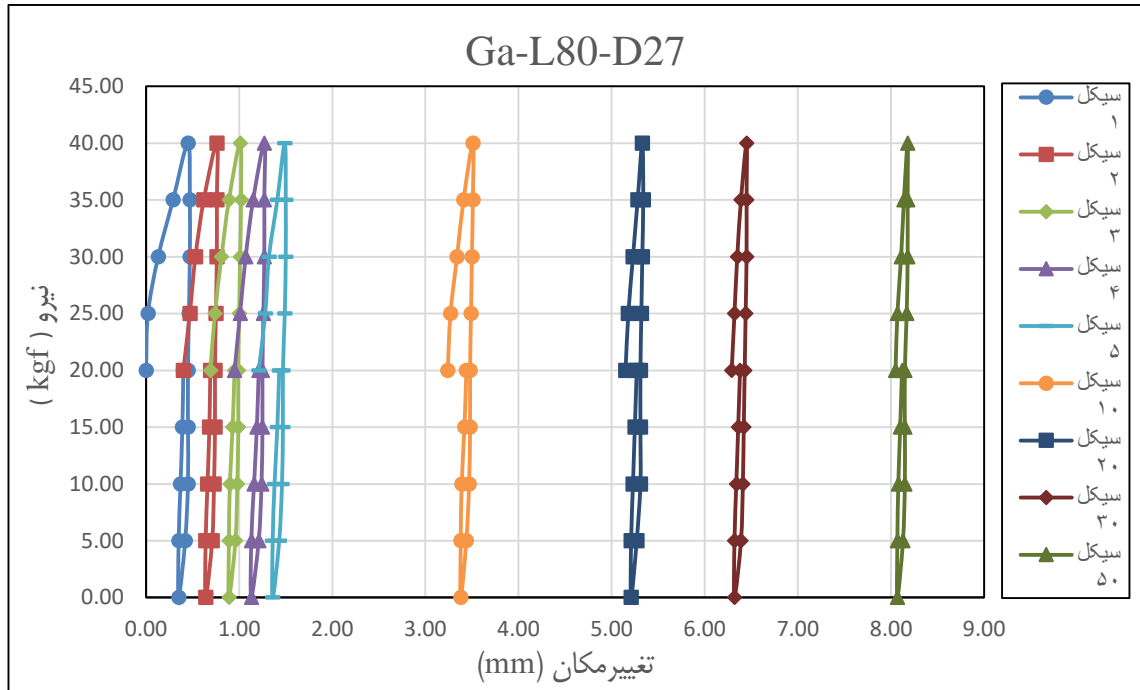
شکل ۳-۲۰ نمودار نیرو-جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۴۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد



شکل ۳-۲۱ نمودار نیرو-جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۶۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد

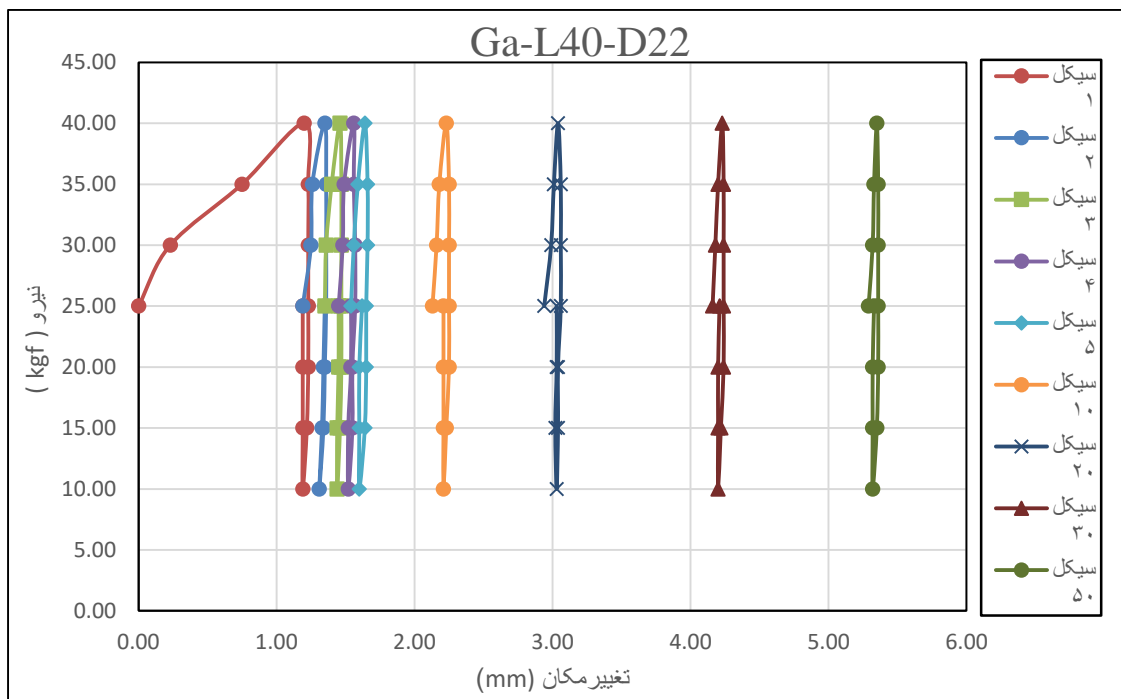
گالوانیزه با طول کلی ۱۰۰۰ و طول مدفون ۸۰۰ میلی متر دارای قطر خارجی ۲۷ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد مدفون شده است. سربار محوری ۲۵ کیلوگرمی بر روی شمع قرار داده و

بار چرخه‌ای ۱۵ کیلوگرمی - در ۳ مرحله پنج کیلوگرم - به شمع اعمال شده است. مقدار جابجایی قائم شمع در هر مرحله بارگذاری و باربرداری اندازه‌گیری شده است. نمودار نیرو-جابجایی این شمع در شکل (۲۲-۳) نمایش داده شده است.



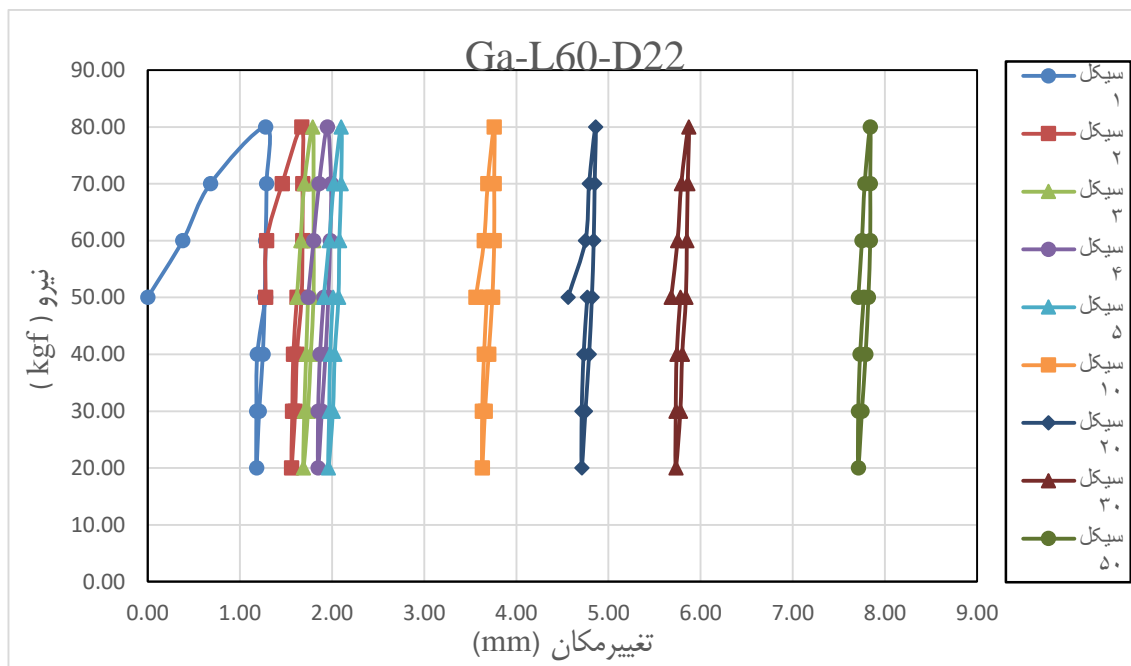
شکل ۲۲-۳ نمودار نیرو-جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد

اکنون مجدداً تمامی شمع‌های آزمایش شده در خاک سست با دانسیته نسبی ۳۳ درصد را این بار در خاک متراکم با دانسیته نسبی ۸۴ درصد مورد آزمون قرار داده‌ایم. شمع گالوانیزه با طول کلی ۶۰۰ و طول مدفون ۴۰۰ میلی‌متر دارای قطر خارجی ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد مدفون شده است. سربار محوری ۲۵ کیلوگرمی بر روی شمع قرار داده و بار چرخه‌ای ۱۵ کیلوگرمی - در ۳ مرحله پنج کیلوگرم - به شمع اعمال شده است. در انتها پس از ۵۰ چرخه، بارگذاری را تا رسیدن به گسیختگی خاک ادامه داده‌ایم. مقدار جابجایی قائم شمع در هر مرحله بارگذاری و باربرداری اندازه‌گیری شده است. نمودار نیرو-جابجایی این شمع در شکل (۲۳-۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳-۲۳ نمودار نیرو-جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۲ و طول ۴۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد

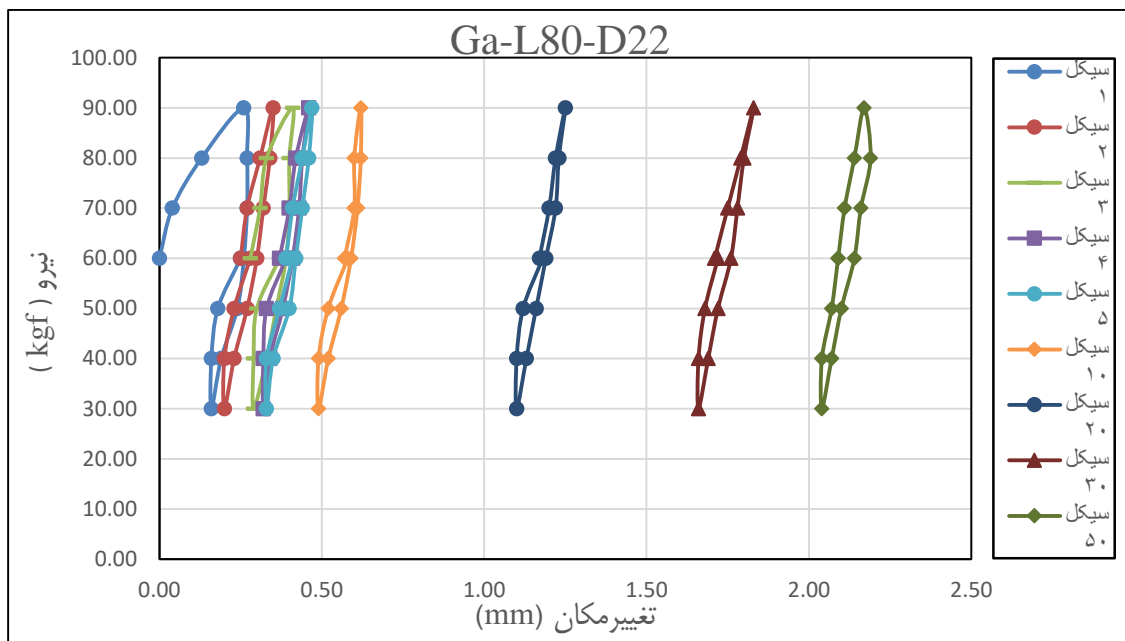
شمع گالوانیزه با طول کلی ۸۰۰ و طول مدفون ۶۰۰ میلی متر دارای قطر خارجی ۲۲ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد مدفون شده است. سربار محوری ۵۰ کیلوگرمی بر روی شمع قرار داده و بار چرخه‌ای ۳۰ کیلوگرمی (در ۳ مرحله ده کیلوگرم) به شمع اعمال شده است. در انتها پس از ۵۰ چرخه، بارگذاری را تا رسیدن به گسیختگی خاک ادامه داده‌ایم. مقدار جابجایی قائم شمع در هر مرحله بارگذاری و باربرداری اندازه‌گیری شده است. نمودار نیرو-جابجایی این شمع در شکل (۳-۲۴) نمایش داده شده است.



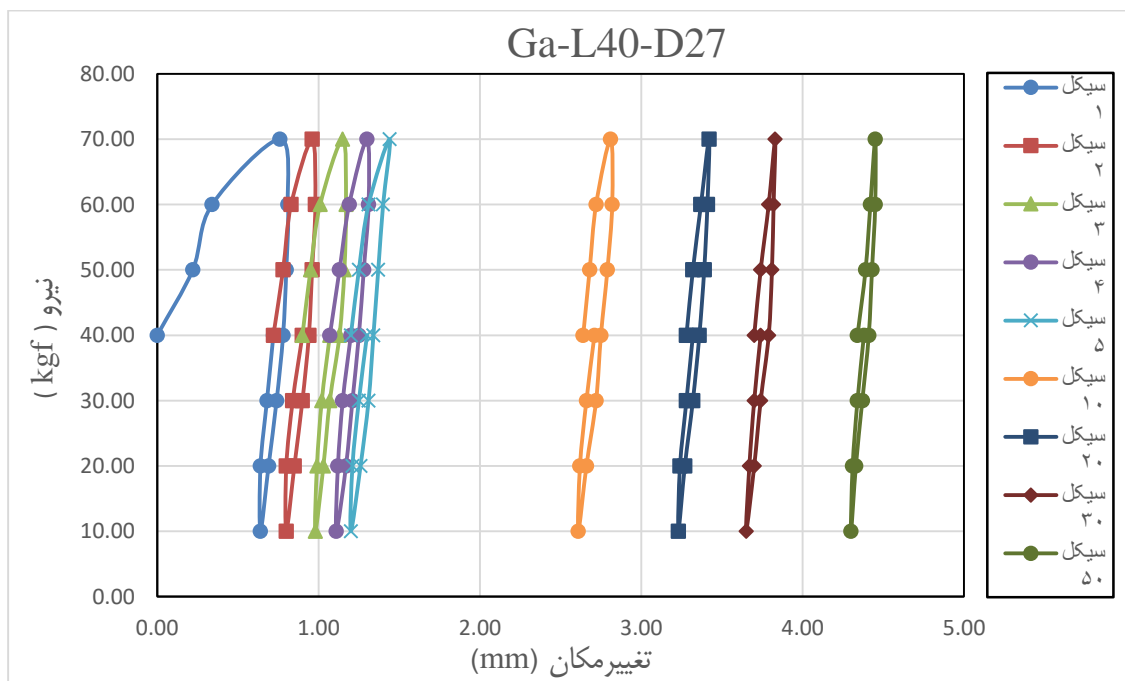
شکل ۳-۲۴ نمودار نیرو-جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۲ و طول ۶۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد

شمع گالوانیزه با طول کلی 1000 و طول مدفون 800 میلی متر دارای قطر خارجی ۲۲ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد مدفون شده است. سربار محوری ۶۰ کیلوگرمی بر روی شمع قرار داده و بار چرخه‌ای ۳۰ کیلوگرمی -در ۳ مرحله ده کیلوگرم- به شمع اعمال شده است. در انتها پس از ۵۰ چرخه، بارگذاری را تا رسیدن به گسیختگی خاک ادامه داده‌ایم. مقدار جابجایی قائم شمع در هر مرحله بارگذاری و باربرداری اندازه‌گیری شده است. نمودار نیرو-جابجایی این شمع در شکل (۳-۲۵) نمایش داده شده است.

شمع گالوانیزه با طول کلی ۶۰۰ و طول مدفون ۴۰۰ میلی متر دارای قطر خارجی ۲۷ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد مدفون شده است. سربار محوری ۴۰ کیلوگرمی بر روی شمع قرار داده و بار چرخه‌ای ۳۰ کیلوگرمی -در ۳ مرحله ده کیلوگرم- به شمع اعمال شده است. در انتها پس از ۵۰ چرخه، بارگذاری را تا رسیدن به گسیختگی خاک ادامه داده‌ایم. مقدار جابجایی قائم شمع در هر مرحله بارگذاری و باربرداری اندازه‌گیری شده است. نمودار نیرو-جابجایی این شمع در شکل (۳-۲۶) نمایش داده شده است.



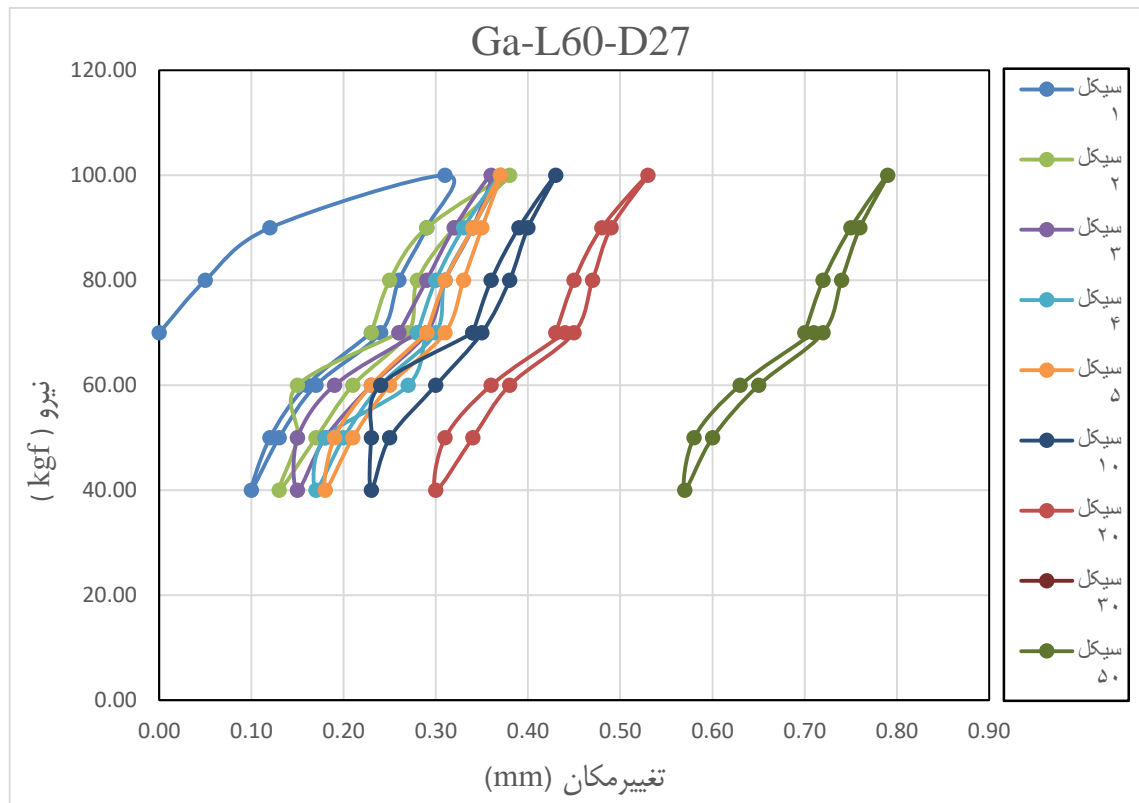
شکل ۳-۲۵ نمودار نیرو-جابجایی لوله گالوانیزه با قطر 22 و طول ۸۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد



شکل ۳-۲۶ نمودار نیرو-جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۴۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد

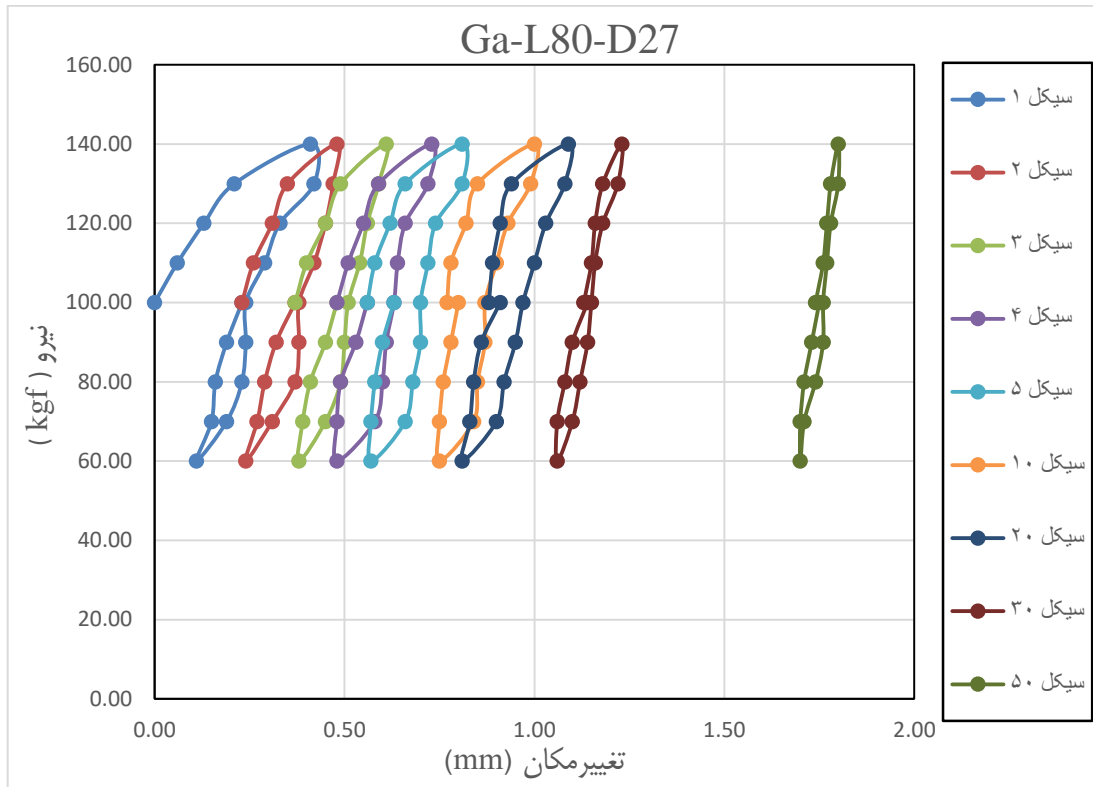
شمع گالوانیزه با طول کلی ۸۰۰ و طول مدفون ۶۰۰ میلی متر دارای قطر خارجی ۲۷ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد مدفون شده است. سربار محوری ۷۰ کیلوگرمی بر روی شمع قرار داده

و بار چرخه‌ای ۳۰ کیلوگرمی -در ۳ مرحله ده کیلوگرم- به شمع اعمال شده است. در انتها پس از ۵۰ چرخه، بارگذاری را تا رسیدن به گسیختگی خاک ادامه داده‌ایم. مقدار جابجایی قائم شمع در هر مرحله بارگذاری و باربرداری اندازه‌گیری شده است. نمودار نیرو-جابجایی این شمع در شکل (۳-۲۷) نمایش داده شده است.



شکل ۳-۲۷ نمودار نیرو-جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد

شمع گالوانیزه با طول کلی ۱۰۰۰ و طول مدفون ۸۰۰ میلی‌متر دارای قطر خارجی ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد مدفون شده است. سربار محوری ۱۰۰ کیلوگرمی بر روی شمع قرار داده و بار چرخه‌ای ۴۰ کیلوگرمی -در ۴ مرحله ده کیلوگرم- به شمع اعمال شده است. در انتها پس از ۵۰ چرخه، بارگذاری را تا رسیدن به گسیختگی خاک ادامه داده‌ایم. مقدار جابجایی قائم شمع در هر مرحله بارگذاری و باربرداری اندازه‌گیری شده است. نمودار نیرو-جابجایی این شمع در شکل (۳-۲۸) نمایش داده شده است.



شکل ۳-۲۸ نمودار نیرو-جابجایی لوله گالوانیزه با قطر ۲۷ و طول ۸۰۰ میلی متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد

فصل چہارم

تحلیل و تفسیر نتائج

۴-۱- مقدمه

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده که در فصل سوم ارائه گردید و نیز با در نظر گرفتن تئوری‌های بیان شده در فصل دوم، در این فصل به بررسی رفتار شمع‌ها تحت اثر بار چرخه‌ای قائم پرداخته و سپس پارامترهای موثر بر رفتار و پاسخ شمع-خاک تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی واقع می‌شود.

۴-۲- پیش‌بینی رفتار چرخه‌ای شمع‌ها

چنانچه در فصل دوم مرور شد، رفتار چرخه‌ای شمع تابعی از تجمع تغییرمکان‌های دائمی، کاهش اصطکاک جدار تحت بارگذاری چرخه‌ای و مکانیزم گسیختگی شمع تحت این نوع از بارگذاری است. با توجه به نکات بیان شده فوق به منظور شناخت دقیق رفتار شمع، صحت سنجی آزمون‌های انجام شده و همچنین در صورت نیاز تکمیل روابط ارائه شده در فصل دوم، به بررسی آزمایش‌های انجام شده می‌پردازیم.

برای پیش‌بینی رفتار شمع و بررسی تجمع تغییرمکان‌های دائمی، معیارهایی ارائه شده که در فصل دوم در شکل (۲-۱۰) و جدول (۲-۵) نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۲-۱۰) و جدول (۲-۵) این معیارها جهت پیش‌بینی رفتار و تغییرمکان شمع‌های مورد آزمایش در جدول (۴-۱) محاسبه و ارائه شده است.

با توجه به تحقیقات [Chan and Hanna 1980] اصلی‌ترین پارامتر در تعیین میزان تجمع تغییرمکان‌های چرخه‌ای شمع نسبت بار چرخه‌ای اعمالی به ظرفیت باربری نهایی استاتیکی است، در نتیجه پارامترهای موثر در تعیین تجمع تغییرمکان‌های دائمی شمع‌ها: جنس شمع، تراکم خاک، مشخصات مکانیکی خاک، طول و قطر شمع و اثرات نرخ بارگذاری می‌باشد.

در جدول (۴-۱) γ ، تراکم خاک، Q_p ، ظرفیت باربری نوک شمع، Q_f ، ظرفیت باربری جدار شمع،

Q_t ، ظرفیت باربری کلی شمع که مجموع ظرفیت باربری نوک و جدار می‌باشد و Q_{cyclic} بار چرخه‌ای اعمالی است. همان‌طور که در جدول (۴-۱) مشاهده می‌شود و با توجه به معیارهای ارائه شده در فصل دوم توسط Chan and Hanna [1980] می‌توان مشاهده نمود که برای مقادیر نسبت بار اعمالی چرخه‌ای به ظرفیت باربری نهایی استاتیکی ۲۰ تا ۳۰ درصد رفتار مشخصی ارائه نشده است. در نتیجه در ادامه با بررسی نمودارهای مربوط به آزمایش‌های Ga-L40-D27، Ga-L80-D22 و Ga-L60-D22 رفتار این گونه شمع‌ها را نیز پیش‌بینی می‌کنیم.

جدول ۴-۱ پیش‌بینی تجمع تغییر مکان‌ها در شمع‌ها

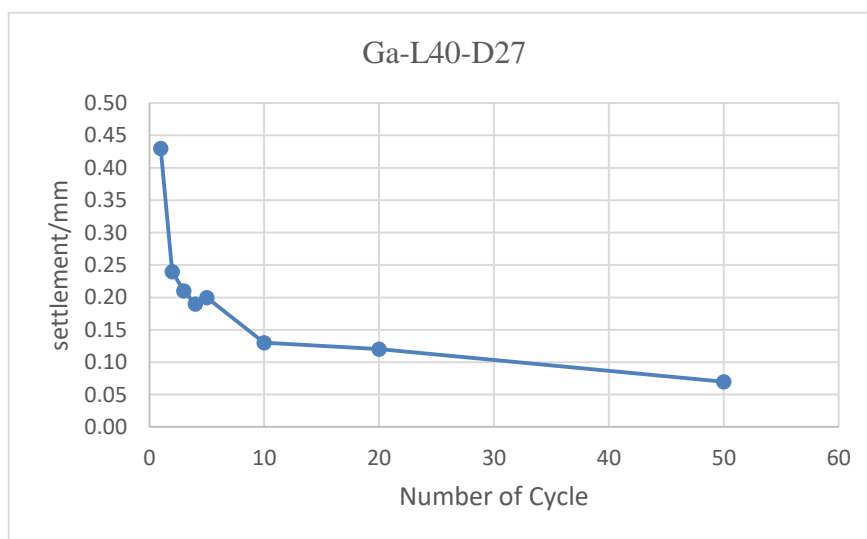
Label	D_r	Q_t	Q_{cyclic}	Q_{cyclic}/Q_t	پیش‌بینی رفتار شمع‌ها با توجه به معیارهای Chan & Hanna
	%	Kgf	Kgf		
Ga-L40-D27	33	27.81	9	0.32	شمع تغییر مکان‌های بزرگی می‌دهد و با تعداد کمی چرخه بارگذاری گسیخته می‌شود
Ga-L60-D27	33	42.41	15	0.35	شمع تغییر مکان‌های بزرگی می‌دهد و با تعداد کمی چرخه بارگذاری گسیخته می‌شود
Ga-L80-D27	33	57.13	20	0.35	شمع تغییر مکان‌های بزرگی می‌دهد و با تعداد کمی چرخه بارگذاری گسیخته می‌شود
Ga-L40-D27	84	102.31	30	0.29	رفتاری پیش‌بینی نشده است
Ga-L60-D27	84	157.89	30	0.19	شمع متحمل تغییر مکان‌های کمی می‌شود و با افزایش تعداد چرخه‌ها نرخ تغییرات جابجایی کاهش می‌یابد
Ga-L80-D27	84	201.81	40	0.19	شمع متحمل تغییر مکان‌های کمی می‌شود و با افزایش تعداد چرخه‌ها نرخ تغییرات جابجایی کاهش می‌یابد
Ga-L40-D22	33	18	6	0.33	شمع تغییر مکان‌های بزرگی می‌دهد و با تعداد کمی چرخه بارگذاری گسیخته می‌شود
Ga-L60-D22	33	27.4	9	0.32	شمع تغییر مکان‌های بزرگی می‌دهد و با تعداد کمی چرخه بارگذاری گسیخته می‌شود
Ga-L80-D22	33	36.81	9	0.24	رفتاری پیش‌بینی نشده است
Ga-L40-D22	84	60	15	0.25	رفتاری پیش‌بینی نشده است
Ga-L60-D22	84	114.09	30	0.26	رفتاری پیش‌بینی نشده است
Ga-L80-D22	84	132.35	30	0.22	رفتاری پیش‌بینی نشده است

۳-۴- پارامترهای موثر بر رفتار شمع‌ها در خاک نامتراکم

۱-۳-۴- اثر سطح بارگذاری بیش از ۳۰ درصد

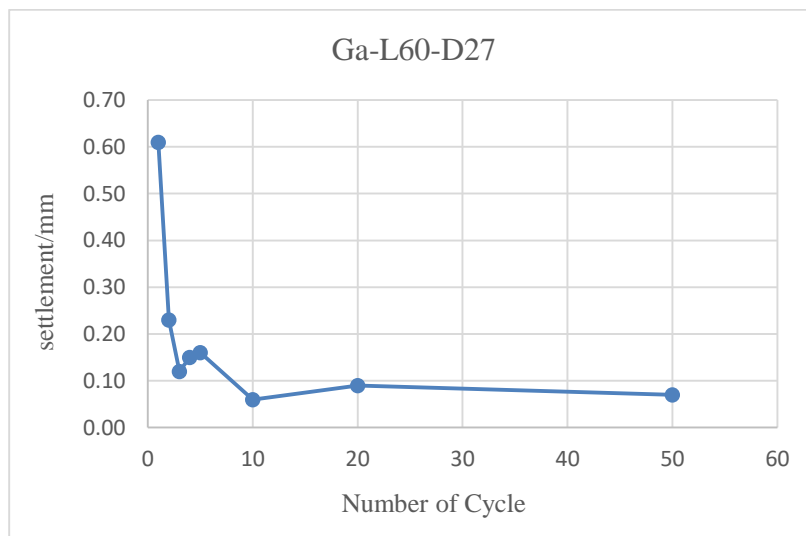
در اشکال (۱-۴) تا (۷-۴) به بررسی اثر نسبت بار چرخه‌ای به ظرفیت باربری نهایی استاتیکی هنگامی که مقدار آن ۳۰ تا ۷۰ درصد است، و اثر آن بر روی تجمع تغییرمکان‌ها می‌پردازیم.

در شکل (۱-۴) شمع Ga-L40-D27 در خاک نامتراکم نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در ابتدا بین چرخه یکم تا دهم پاسخ سریع خاک به تنش‌های چرخه‌ای مشاهده می‌شود و مشخصه آن افزایش تغییرمکان شمع است، در این مرحله شمع در حدود ۲/۵ میلی‌متر تغییرمکان داشته است. این تغییرمکان در ابتدا (بین چرخه یکم تا دهم) سریع است و سپس به تدریج کاهش می‌یابد. چنانچه مشاهده می‌شود که از چرخه دهم تا پنجاهم میزان افزایش تغییرمکان ۱ میلی‌متر است. با توجه به رفتار چرخه‌ای شمع، چرخه یکم تا دهم را فاز گذار و چرخه ده تا پنجاهم را فاز خزش چرخه‌ای که مشخص کننده رفتار بلند-مدت شمع است، تقسیم می‌کنیم. چنانچه در فصل دوم ذکر شد، سرعتی که این تغییرمکان‌ها در آن رخ می‌دهد، به سطح بارگذاری چرخه‌ای بستگی دارد. چنانچه در شکل (۱-۴) مشاهده می‌شود با توجه به کاهش و یکنواخت شدن شیب نمودار پس از چرخه دهم، پیش‌بینی گسیختگی شمع با تعداد کم چرخه‌ها مطابقت ندارد.



شکل ۱-۴- تغییرات تغییرمکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L40-D27 در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد

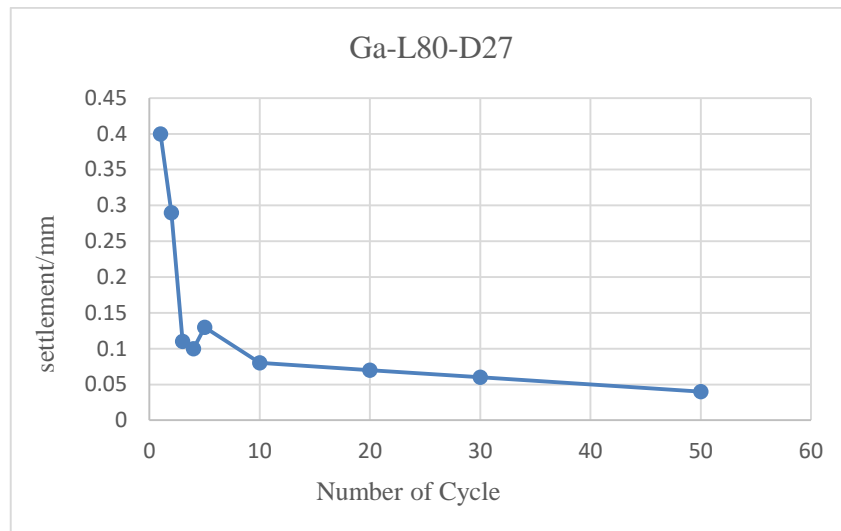
در شکل (۲-۴) به بررسی شمع Ga-L60-D27 در خاک نامتراکم می‌پردازیم. همانطور که در نمودار (۲-۴) مشاهده می‌شود، در ابتدا بین چرخه یکم تا دهم شیب نمودار بسیار زیاد است که نشان دهنده تغییرمکان زیاد شمع در بین این چرخه‌هاست و با ادامه بارگذاری تا سیکل ۵۰ام شیب نمودار کاسته می‌شود اما همچنان مانند شمع Ga-L40-D27 شیب نزولی دارد و به تغییرات خود ادامه می‌دهد.



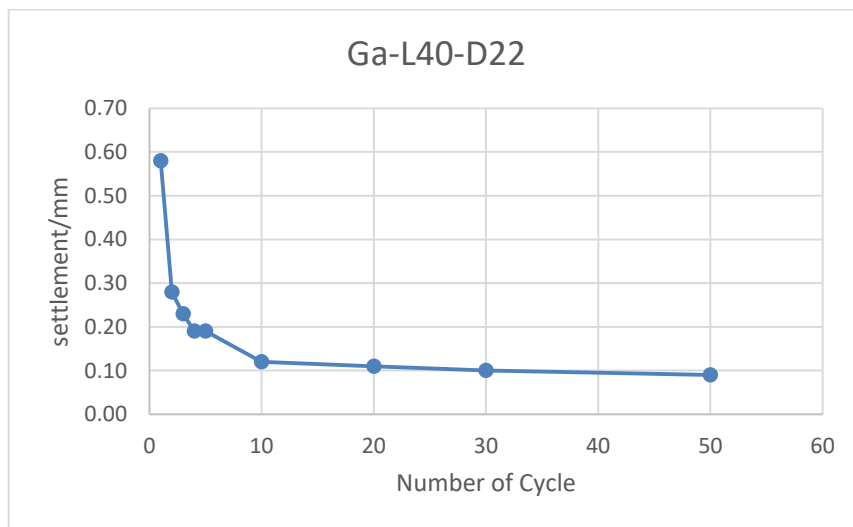
شکل ۲-۴- تغییرات تغییرمکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L60-D27 در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد

در شکل‌های (۳-۴)، (۴-۴) و (۵-۴) نمودارهای تغییرمکان شمع در مقابل تعداد چرخه به ترتیب برای شمع‌های Ga-L80-D27، Ga-L40-D22 و Ga-L60-D22 در خاک نامتراکم نمایش داده شده است. با توجه به تغییرات تغییرمکان شمع‌ها با افزایش چرخه‌ها می‌توان مشاهده نمود که در این شمع‌ها نیز تا چرخه دهم شیب نمودار بسیار تند است و از چرخه دهم تا پنجاهم از سرعت شیب نمودار کاسته می‌شود اما تغییرات ادامه دارد و متوقف نمی‌شود. با توجه به روابط ارائه شده در فصل دوم و نتایج آزمایش‌های انجام شده، تغییرمکان‌های بزرگ برای شمع در خاک‌های نامتراکم ایجاد می‌شود. با توجه به این نتایج، خاک نامتراکم تحت بارگذاری چرخه‌ای قائم ابتدا با ایجاد تغییرمکان‌های بزرگ (در ده سیکل ابتدایی) متراکم شده به تعادل رسیده و پس از آن تنها تغییرمکان‌های کوچکی ایجاد شده و در

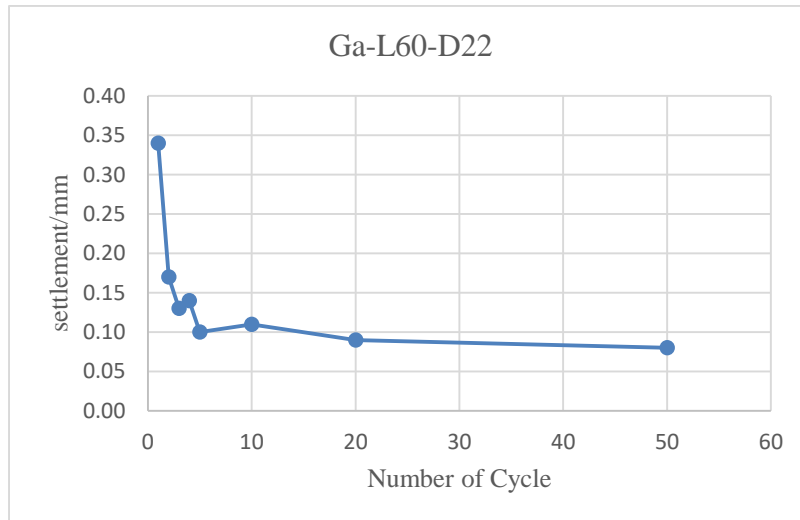
نتیجه از گسیختگی سیستم شمع-خاک جلوگیری می‌شود. در نتیجه پیش‌بینی رفتار شمع بر اساس سطح بارگذاری صحیح به نظر نمی‌رسد، زیرا شمع‌ها در سطح بارگذاری بیش از ۳۰ درصد رفتاری متفاوت از رفتار پیش‌بینی شده در جدول (۱-۴) دارند.



شکل ۳-۴- تغییرات تغییرمکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L80-D27 در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد



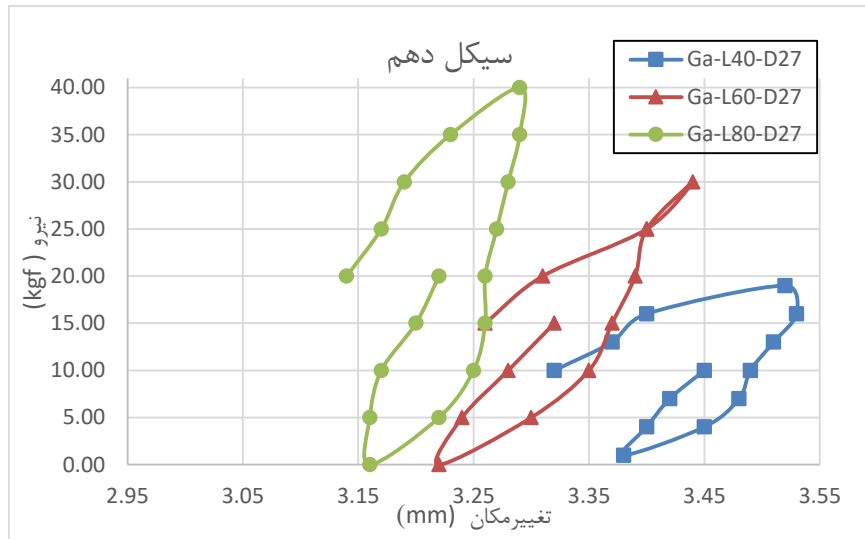
شکل ۴-۴- تغییرات تغییرمکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L40-D22 در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد



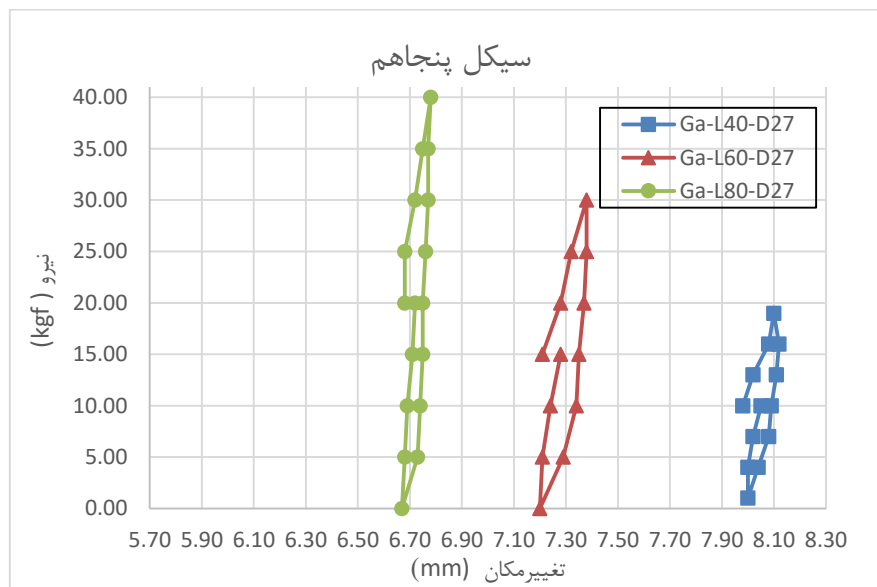
شکل ۴-۵- تغییرات تغییرمکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L60-D22 در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد

۴-۳-۲- اثر تغییرات طول شمع

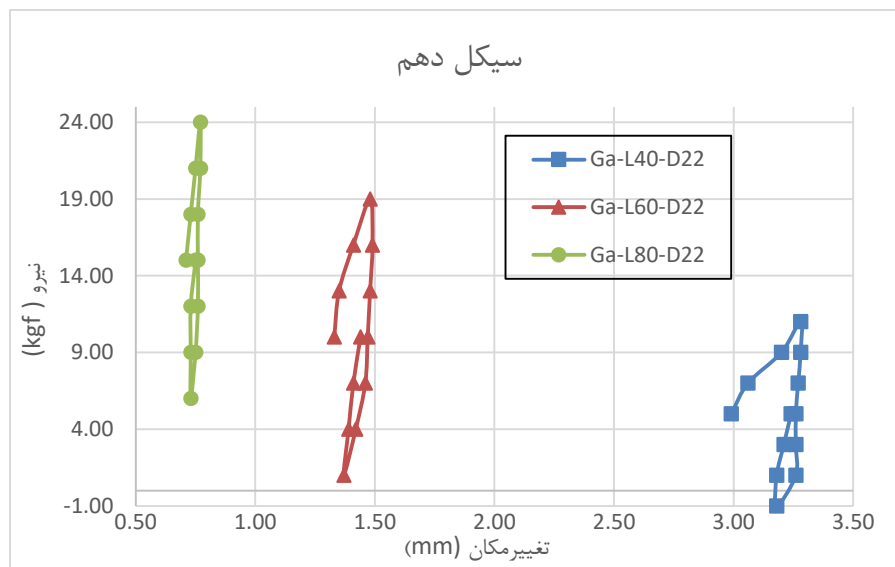
در این بخش به بررسی تغییرات طول شمع، بر رفتار آن تحت بارگذاری قائم چرخه‌ای در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد می‌پردازیم. در شکل‌های (۴-۶) و (۴-۷) به ترتیب سیکل‌های دهم و پنجاهم برای شمع‌های Ga-L40-D27، Ga-L60-D27 و Ga-L80-D27 و در شکل‌های (۴-۸) و (۴-۹) به ترتیب سیکل‌های دهم و پنجاهم برای شمع‌های Ga-L40-D22، Ga-L60-D22 و Ga-L80-D22 در خاک نامتراکم با هم مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در شمع‌هایی با قطر یکسان در خاک نامتراکم، در مقدار بار قائم چرخه‌ای اعمالی مشابه تغییرمکان متناظر آن با افزایش طول شمع کاهش می‌باید. در نتیجه مشاهده می‌شود که با افزایش طول شمع ظرفیت باربری چرخه‌ای شمع افزایش می‌یابد.



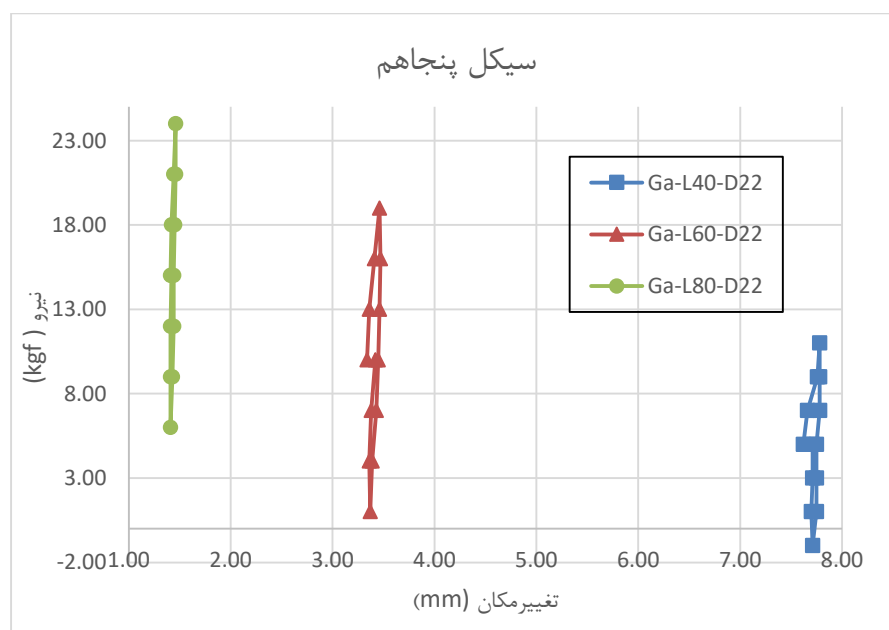
شکل ۴-۶- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد برای سیکل دهم



شکل ۴-۷- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد برای سیکل پنجاهم



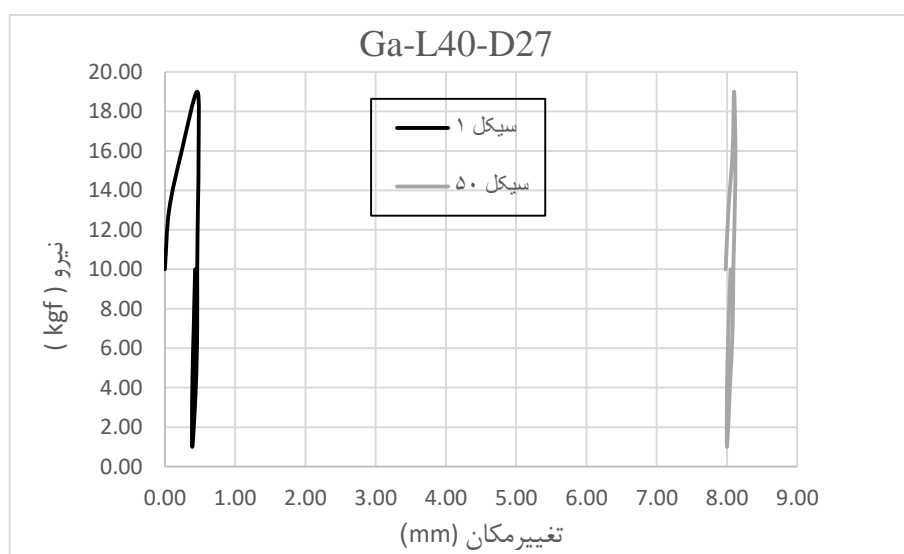
شکل ۴-۸- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد برای سیکل دهم



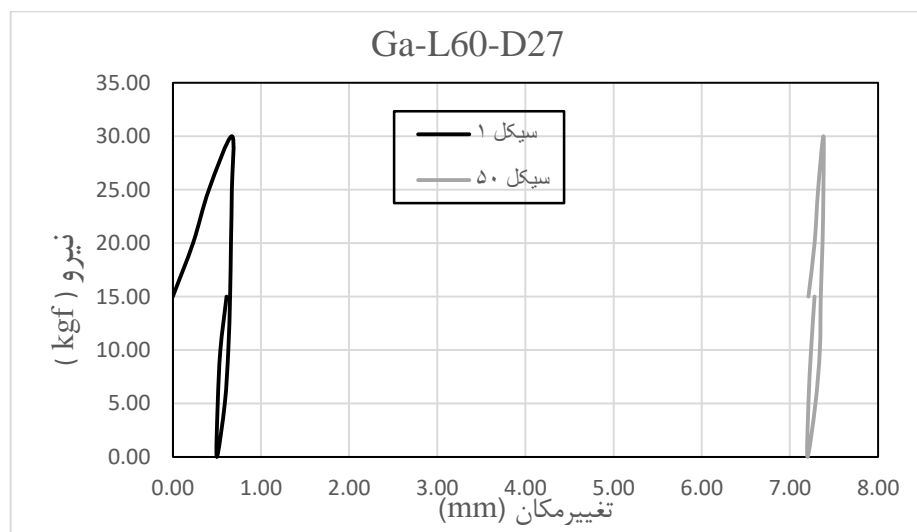
شکل ۴-۹- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد برای سیکل پنجاهم

جهت بررسی تغییرات سختی در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد، در اشکال (۴-۱۰)، (۴-۱۱) و (۴-۱۲) سیکل‌های یکم و پنجاهم به ترتیب برای شمع‌های Ga-L40-D27، Ga-L80-D27 و Ga-L60-D27، در شکل‌های (۴-۱۴)، (۴-۱۵) و (۴-۱۶) سیکل‌های یکم و پنجاهم

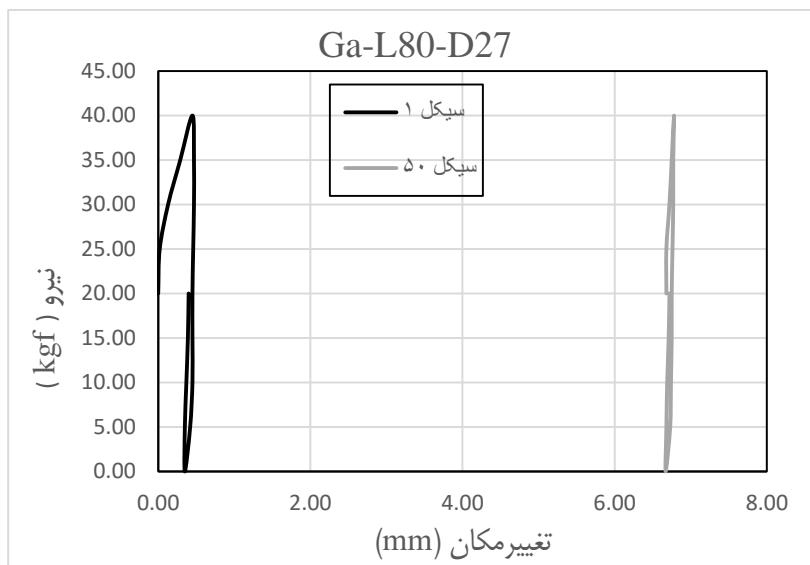
به ترتیب برای شمع‌های Ga-L40-D22، Ga-L60-D22 و Ga-L80-D22 نشان داده شده و در اشکال (۱۳-۴) و (۱۷-۴) نمودارهای سیکل-تغییر مکان برای تغییرات طول در شمع‌های به ترتیب ۲۷ و ۲۲ میلی‌متر در خاک نامتراکم ارائه شده است. شیب تقریبی منحنی برای هر سه شمع در هر دو قطر ۲۲ و ۲۷ میلی‌متر یکسان است، در نتیجه مدول برشی و سختی هر سه شمع برای هر دو قطر را می‌توان یکسان در نظر گرفت. همانطور که دیده می‌شود، تغییر طول شمع در بارگذاری قائم چرخه‌ای اثری بر سختی ندارد.



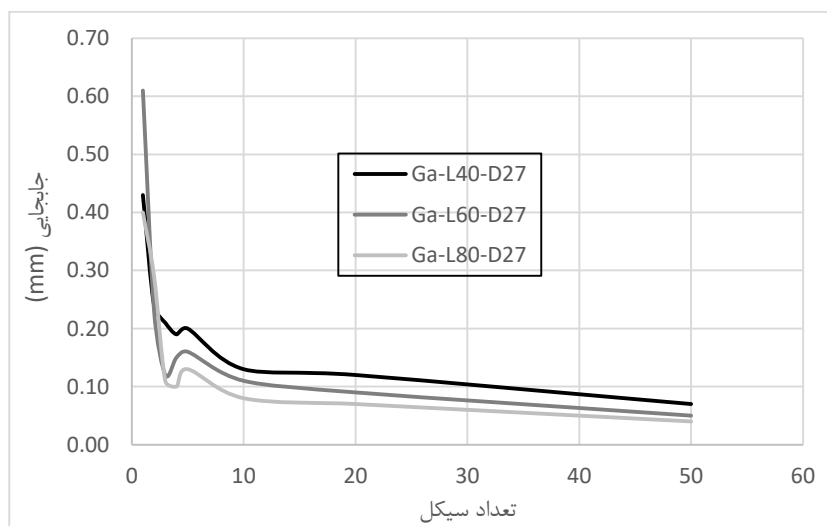
شکل ۴-۱۰- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L40-D27 در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم و پنجاهم



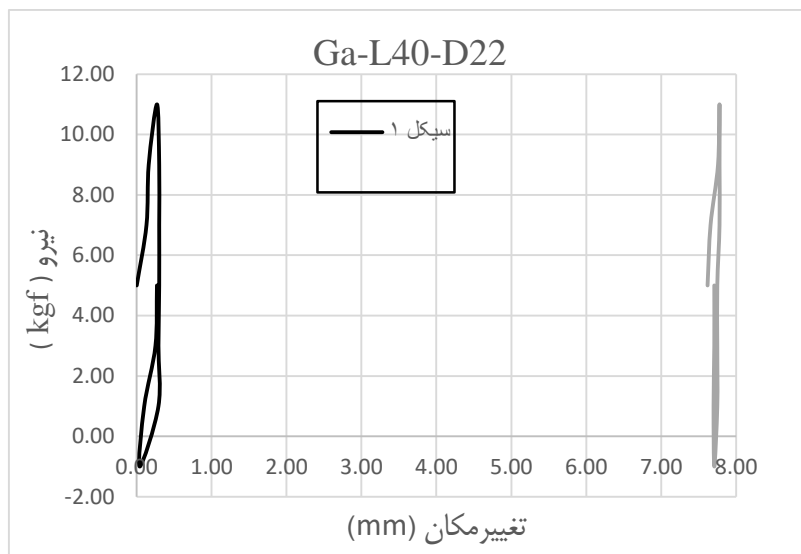
شکل ۴-۱۱- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L60-D27 در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم و پنجاهم



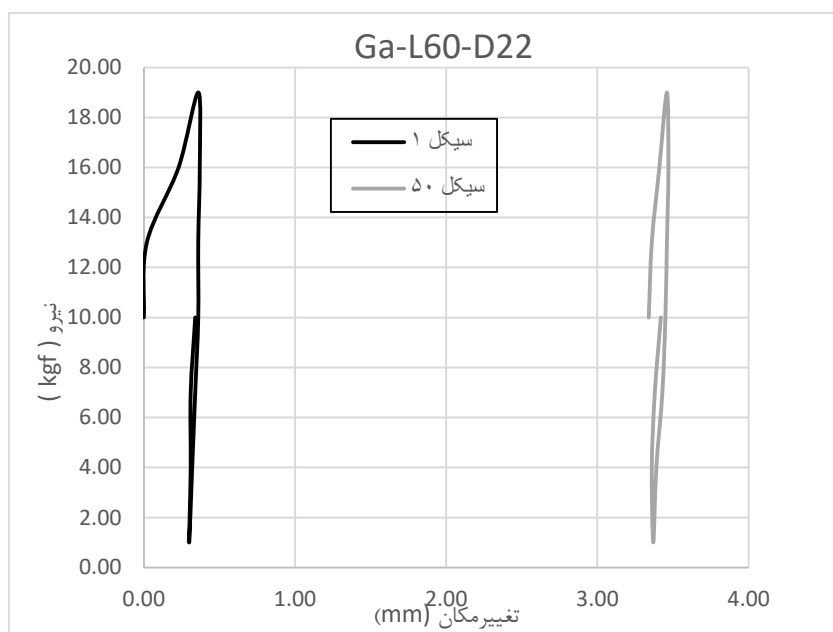
شکل ۴-۱۲- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L80-D27 در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم و پنجاهم



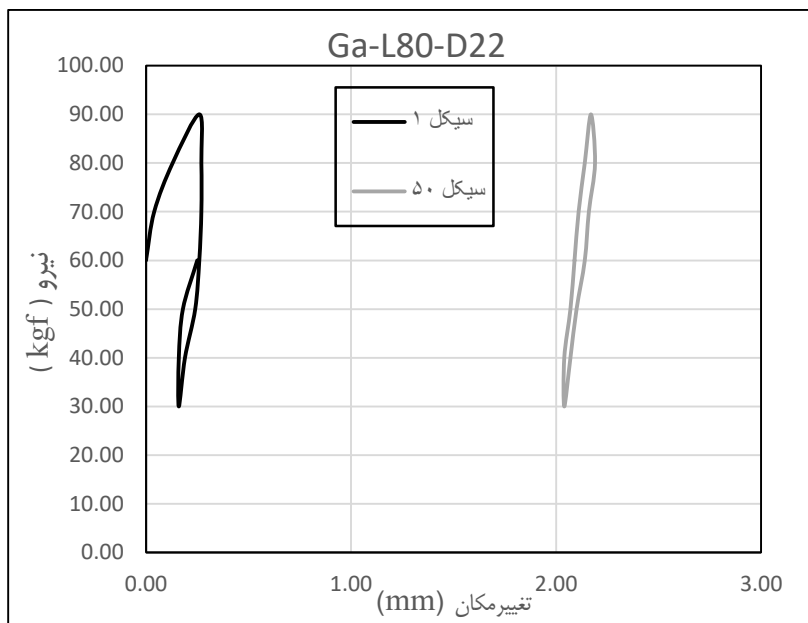
شکل ۴-۱۳- نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد



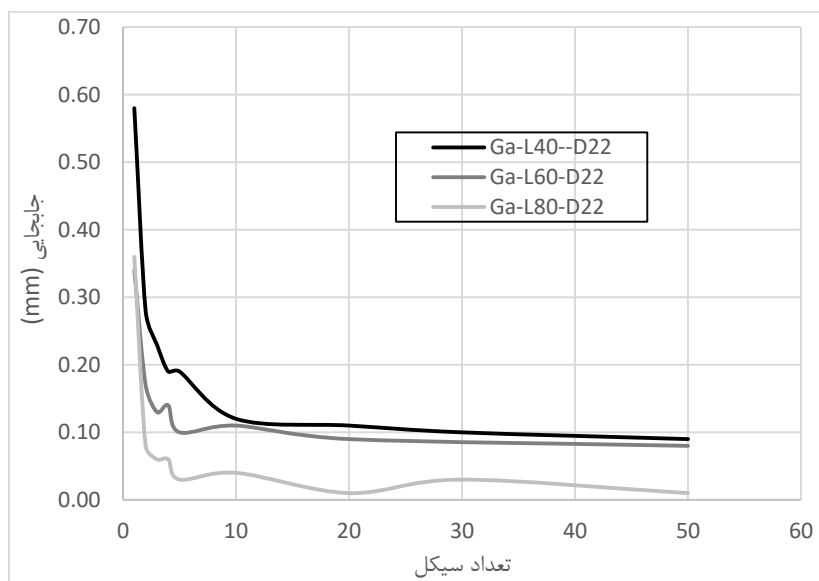
شکل ۴-۱۴- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L40-D22 در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم و پنجاهم



شکل ۴-۱۵- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L60-D22 در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم و پنجاهم



شکل ۴-۱۶- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L80-D22 در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم و پنجاهم

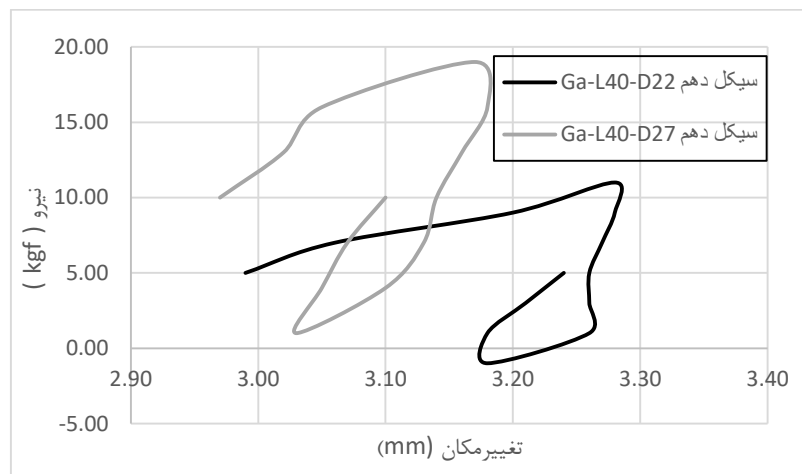


شکل ۴-۱۷- نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد

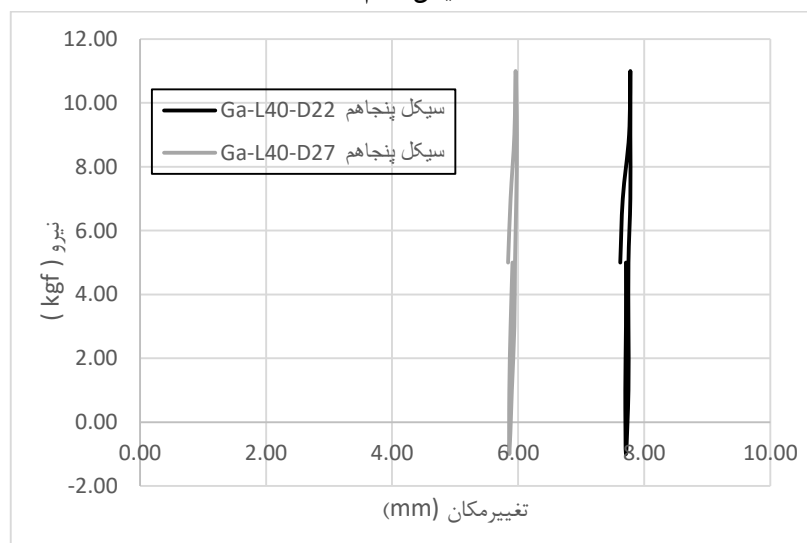
در اشکال (۴-۱۳) و (۴-۱۷) نمودارهای سیکل-تغییر مکان برای تغییرات طول در شمع‌های به ترتیب ۲۷ و ۲۲ میلی‌متر در خاک نامتراکم ارائه شده است. با توجه به اشکال (۴-۱۳) و (۴-۱۷) می‌توان دریافت که با افزایش طول شمع در خاک نامتراکم تغییر مکان کلی شمع در هر سیکل کاهش می‌یابد.

۴-۳-۲- اثر تغییرات قطر شمع

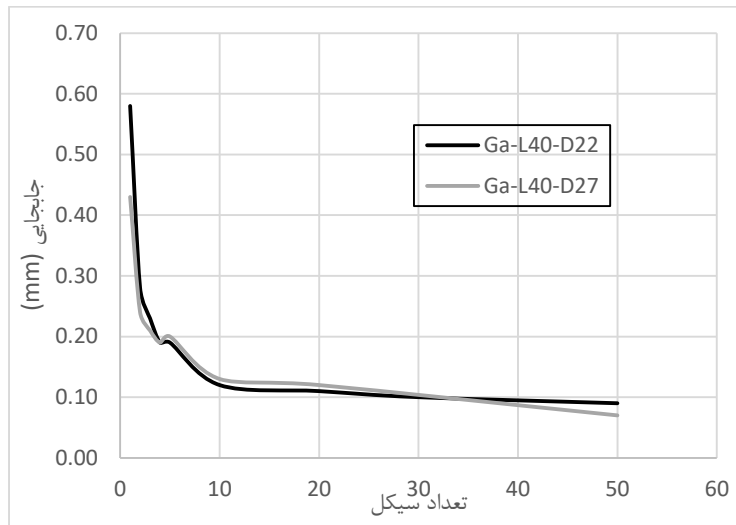
در اشکال (۴-۱۸) و (۴-۱۹) تغییرات قطر شمع برای شمع گالوانیزه به دو قطر ۲۷ و ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در طول ثابت ۴۰۰ میلی‌متر برای به ترتیب چرخه‌های دهم و پنجاهم نمایش داده شده است. در هر دو چرخه دهم و پنجاهم، شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر در بار چرخه‌ای اعمالی مشابه تغییرمکان کمتری نسبت به شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر داشته است. منحنی نیرو-تغییرمکان دو شمع در سیکل پنجاهم کاملاً از هم جدا شده‌اند. با توجه به نتایج آزمایش، با افزایش قطر شمع در طول ثابت در خاک نامتراکم، ظرفیت باربری چرخه‌ای شمع افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۱۸- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل دهم

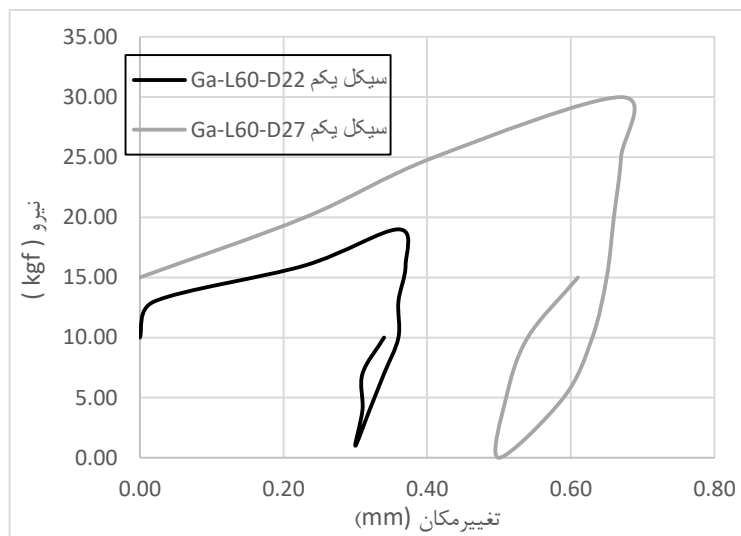


شکل ۴-۱۹- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل پنجاهم

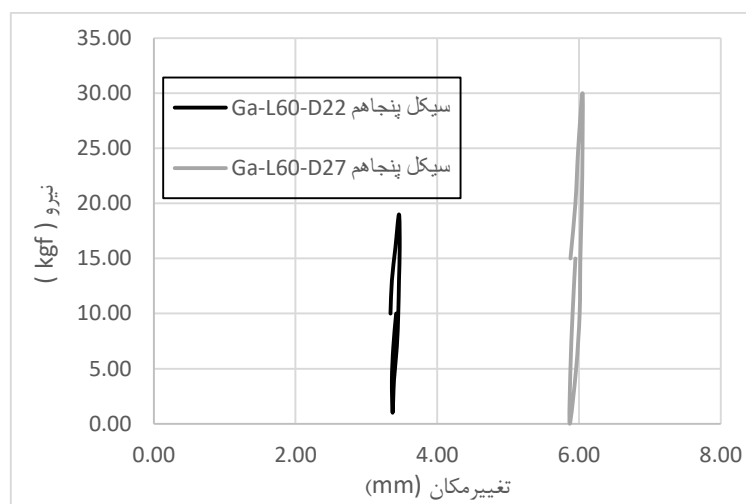


شکل ۴-۲۰ نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۴۰۰ میلی‌متر و قطرهای ۲۲ و ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد

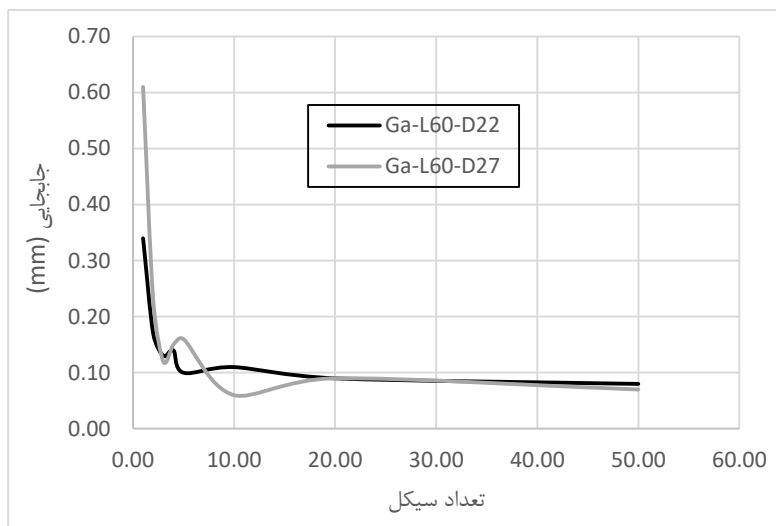
در شکل‌های (۴-۲۱) و (۴-۲۲) تغییرات قطر شمع برای شمع گالوانیزه به دو قطر ۲۷ و ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در طول ثابت ۶۰۰ میلی‌متر برای به ترتیب در چرخه‌های یکم و پنجاهم نمایش داده شده است. در هر دو چرخه یکم و پنجاهم، شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر در بار چرخه‌ای اعمالی مشابه تغییر مکان کمتری نسبت به شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر داشته است. در اینجا نیز منحنی نیرو-تغییر مکان دو شمع در سیکل پنجاهم کاملاً از هم جدا شده‌اند. با توجه به نتایج آزمایش، با افزایش قطر شمع در طول ثابت در خاک نامتراکم، ظرفیت باربری چرخه‌ای شمع به طول ۶۰۰ میلی‌متر نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۲۱- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم



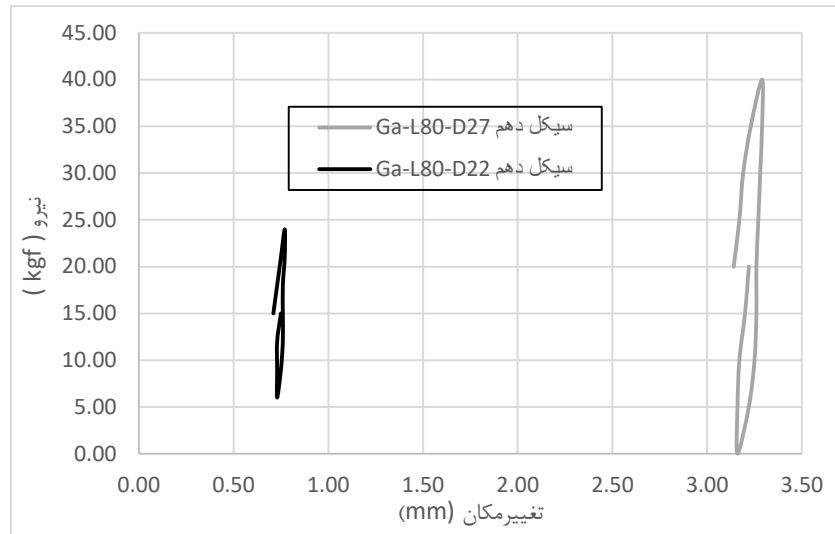
شکل ۴-۲۲- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل پنجاهم



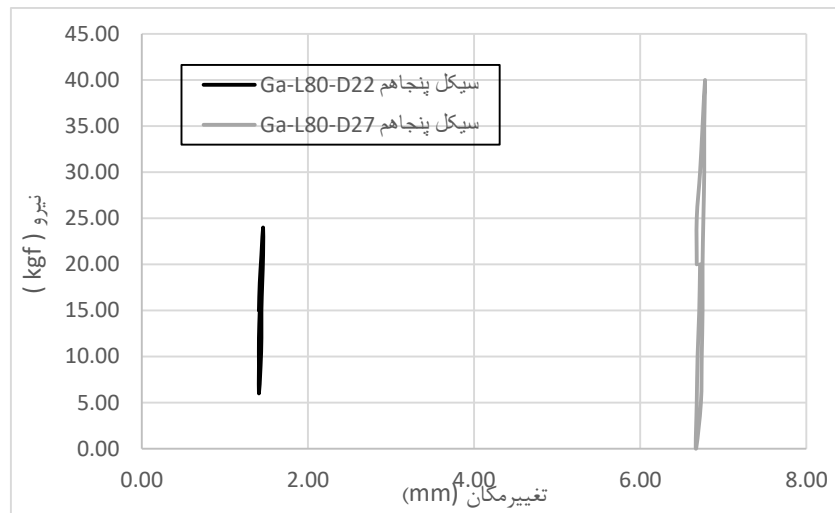
شکل ۴-۲۳ نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۶۰۰ میلی‌متر و قطرهای ۲۲ و ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد

در اشکال (۴-۲۴) و (۴-۲۵) تغییرات قطر شمع برای شمع گالوانیزه به دو قطر ۲۷ و ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در طول ثابت ۸۰۰ میلی‌متر برای به ترتیب چرخه‌های دهم و پنجاهم نمایش داده شده است. در هر دو چرخه دهم و پنجاهم، شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر بار چرخه‌ای اعمالی بسیار بیشتری نسبت به شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر را می‌تواند تحمل کند. در اینجا نیز منحنی نیرو-تغییر مکان دو شمع در سیکل پنجاهم کاملاً از هم جدا شده‌اند. با توجه به نتایج آزمایش، با افزایش قطر شمع در طول ثابت در خاک نامتراکم، ظرفیت باربری چرخه‌ای شمع افزایش می‌یابد.

جهت بررسی تغییرات سختی با تغییر قطر در شمع گالوانیزه به طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک نامتراکم، با توجه به اشکال (۴-۲۴) و (۴-۲۵) می‌توان دریافت که سختی سیستم شمع-خاک، تغییر زیادی نمی‌کند و شیب نمودار نیرو-تغییر مکان در چرخه پنجاهم برای هر دو شمع تقریباً یکسان است. در نتیجه مدول برشی و سختی دو شمع یکسان می‌باشد.



شکل ۴-۲۴- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل دهم



شکل ۴-۲۵- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل پنجاهم

۴-۴- پارامترهای موثر بر رفتار شمع در خاک متراکم

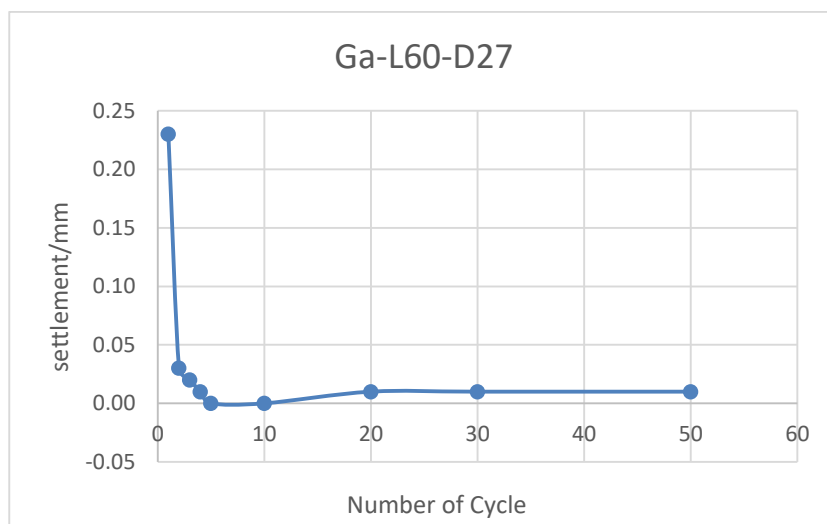
۴-۴-۱- اثر سطح بارگذاری کمتر از ۲۰ درصد

در اشکال (۴-۲۶) تا (۴-۲۹) به بررسی اثر نسبت بار چرخه‌ای به ظرفیت باربری نهایی استاتیکی

هنگامی که مقدار آن ۱۵ تا ۲۰ درصد است، و اثر آن بر روی تجمع تغییر مکان‌ها می‌پردازیم.

در شکل (۴-۲۶) به بررسی شمع Ga-L60-D27 در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد می‌پردازیم.

همانطور که در نمودار (۴-۲۶) مشاهده می‌شود، بلافاصله بین چرخه اول و دوم، شمع تغییرمکان زیادی داده و پس از چرخه دوم تغییرمکان‌ها کم شده و با افزایش تعداد چرخه‌ها نرخ تغییرات جابجایی کاهش می‌یابد. به طوری که در بین سیکل دوم تا ۵۰ام شیب نمودار (جابه‌جایی‌ها در هر سیکل) تقریباً ثابت است.

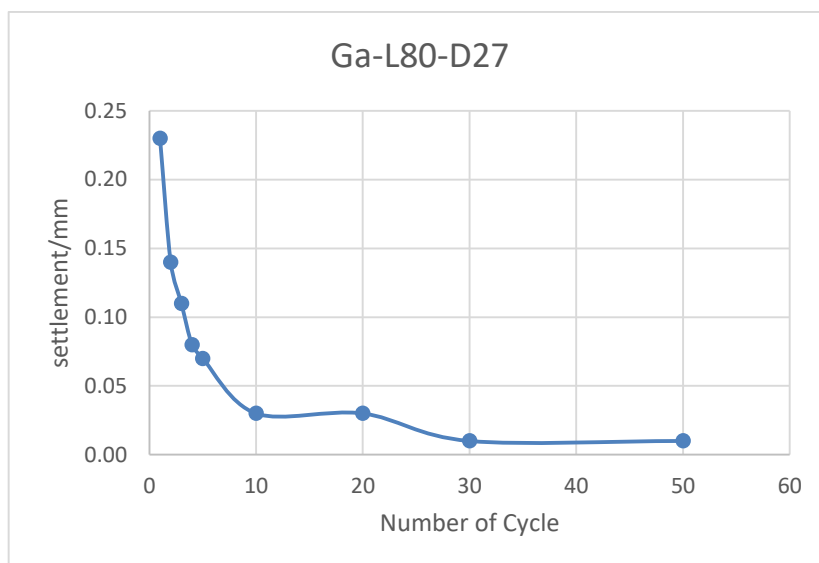


شکل ۴-۲۶- تغییرات تغییرمکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L60-D27 در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد

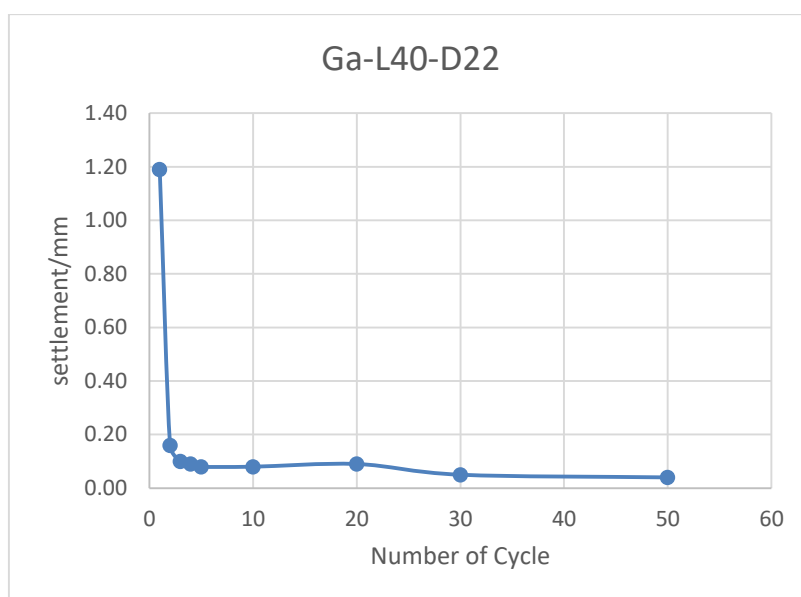
در شکل‌های (۴-۲۷) و (۴-۲۸) نمودارهای تغییرمکان شمع در مقابل تعداد چرخه به ترتیب برای شمع‌های Ga-L40-D22 و Ga-L80-D27 در خاک متراکم نمایش داده شده است. با توجه به تغییرات تغییرمکان شمع‌ها با افزایش تعداد چرخه‌ها می‌توان مشاهده نمود که در این نمودارها نیز تا چرخه دوم شیب نمودار بسیار تند است و از چرخه دوم تا پنجاهم شیب نمودار یکنواخت می‌شود و تغییرمکان‌ها بسیار کم است. پیش‌بینی رفتار خاک با توجه به سطح کرنش که در فصل دوم ارائه شده است، در این جا نیز صحیح می‌باشد.

با توجه به روابط ارائه شده در فصل دوم و نتایج آزمایش‌های انجام شده، رفتار پیش‌بینی شده در

جدول (۴-۱) صحیح می‌باشد.



شکل ۴-۲۷- تغییرات تغییرمکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L80-D27 در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد

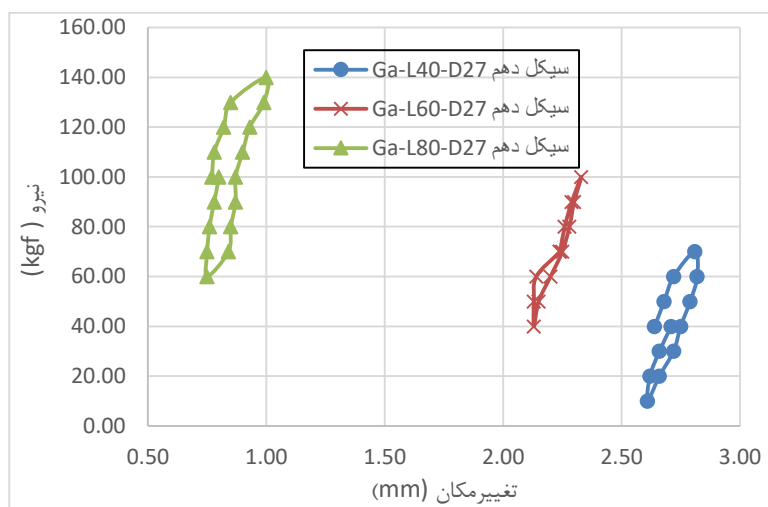


شکل ۴-۲۸- تغییرات تغییرمکان شمع با افزایش چرخه‌ها برای شمع Ga-L40-D22 در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد

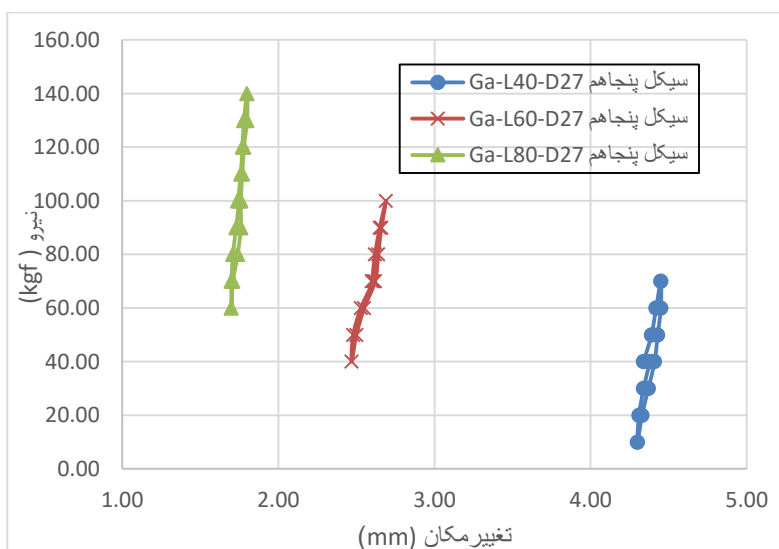
۴-۴-۲- اثر تغییرات طول شمع

در این بخش به بررسی تغییرات طول شمع، بر رفتار آن تحت بارگذاری قائم چرخه‌ای می‌پردازیم. در شکل‌های (۴-۲۹) و (۴-۳۰) به ترتیب سیکل‌های دهم و پنجاهم برای شمع‌های Ga-L40-D27، Ga-L80-D27 و Ga-L60-D27 در شکل‌های (۴-۳۱) و (۴-۳۲) به ترتیب سیکل‌های دهم و پنجاهم

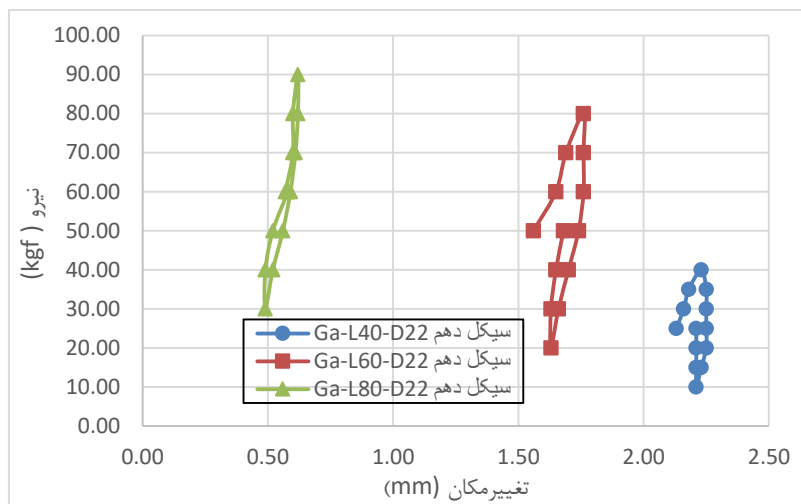
در شمع‌های Ga-L40-D22، Ga-L60-D22 و Ga-L80-D22 در خاک متراکم با هم مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش طول شمع در خاک، با وجود آنکه بار قائم چرخه‌ای بیشتری اعمال شده است، تغییر مکان کاهش یافته است. در نتیجه مشاهده می‌شود که با افزایش طول شمع ظرفیت باربری چرخه‌ای شمع افزایش می‌یابد.



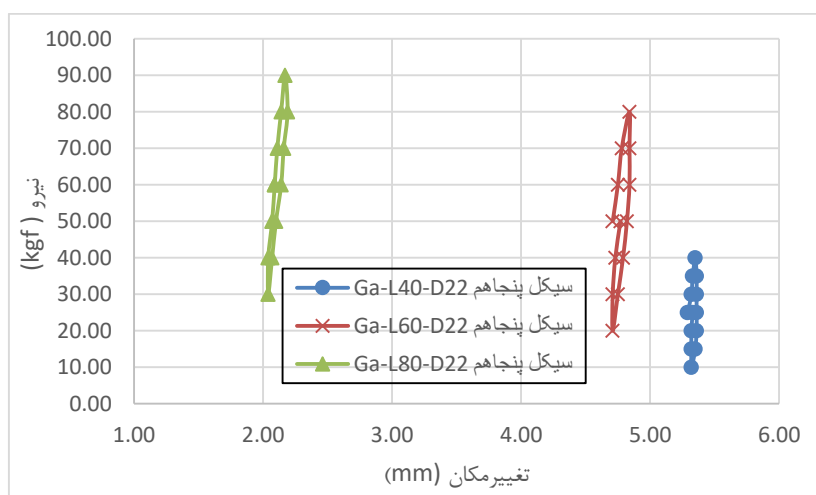
شکل ۴-۲۹- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد برای سیکل دهم



شکل ۴-۳۰- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد برای سیکل پنجاهم

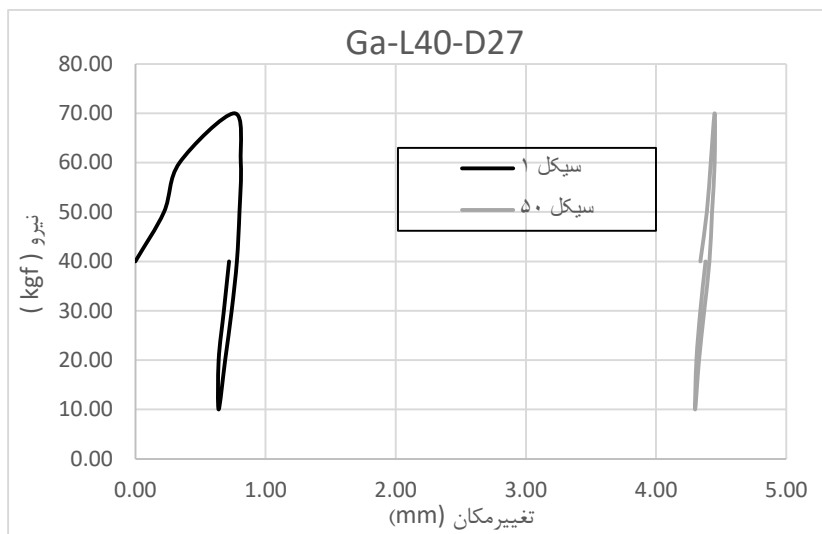


شکل ۴-۳۱- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد برای سیکل دهم

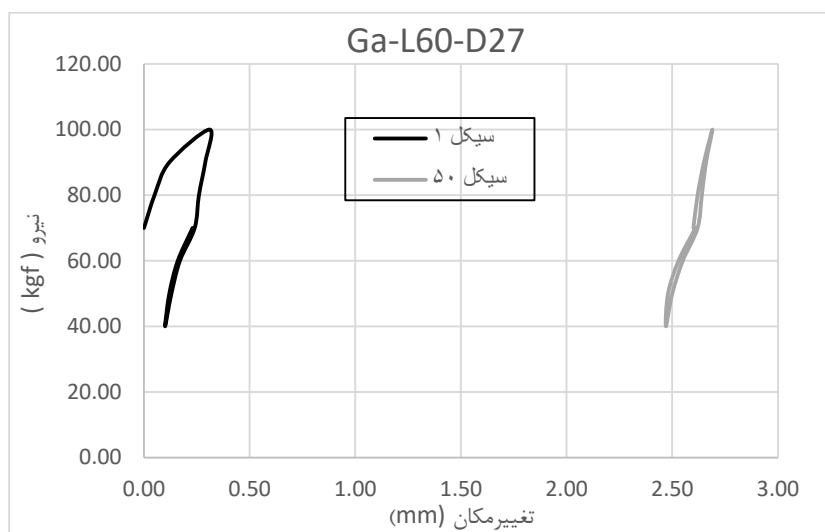


شکل ۴-۳۲- نمودار تغییرات طول در شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد برای سیکل پنجاهم

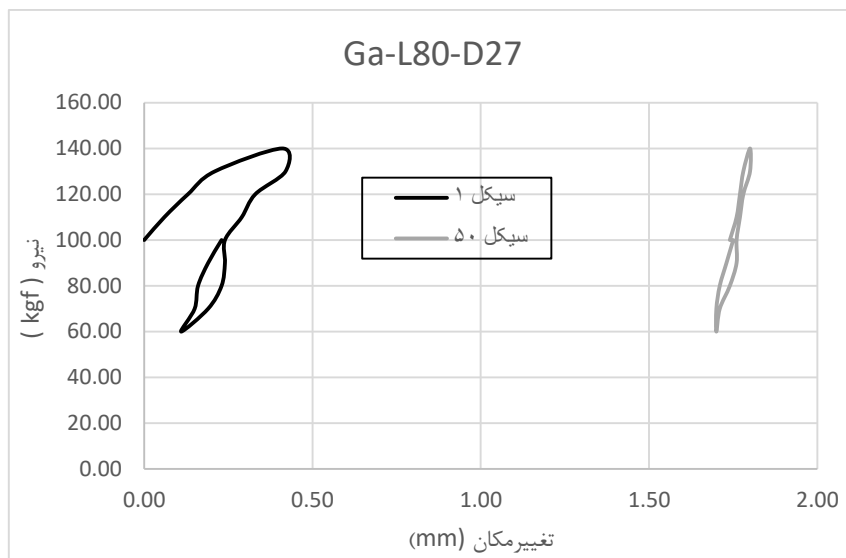
جهت بررسی تغییرات سختی در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد، در اشکال (۴-۳۳)، (۴-۳۴) و (۴-۳۵) سیکل‌های یکم و پنجاهم به ترتیب برای شمع‌های Ga-L40-D27، Ga-L80-D27 و Ga-L60-D27 در شکل‌های (۴-۳۷)، (۴-۳۸) و (۴-۳۹) سیکل‌های یکم و پنجاهم به ترتیب برای شمع‌های Ga-L40-D22، Ga-L60-D22 و Ga-L80-D22 نشان داده شده است.



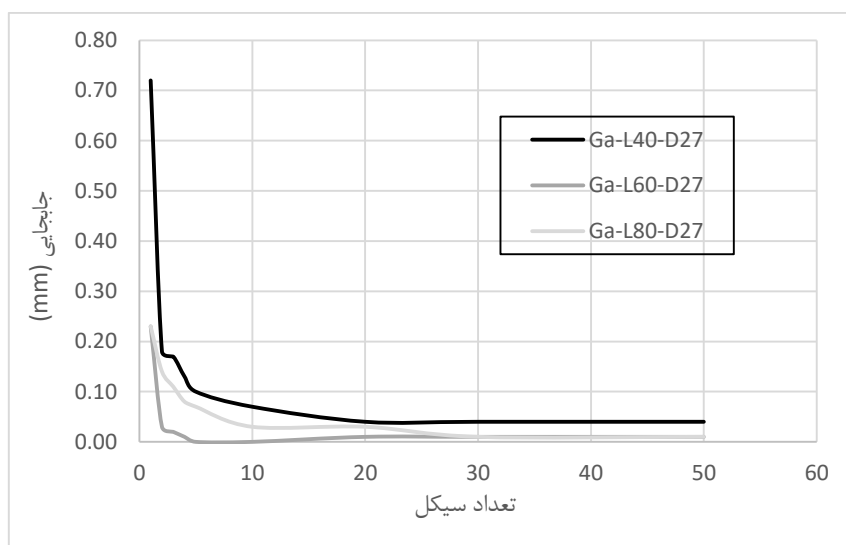
شکل ۴-۳۳- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L40-D27 در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم و پنجاهم



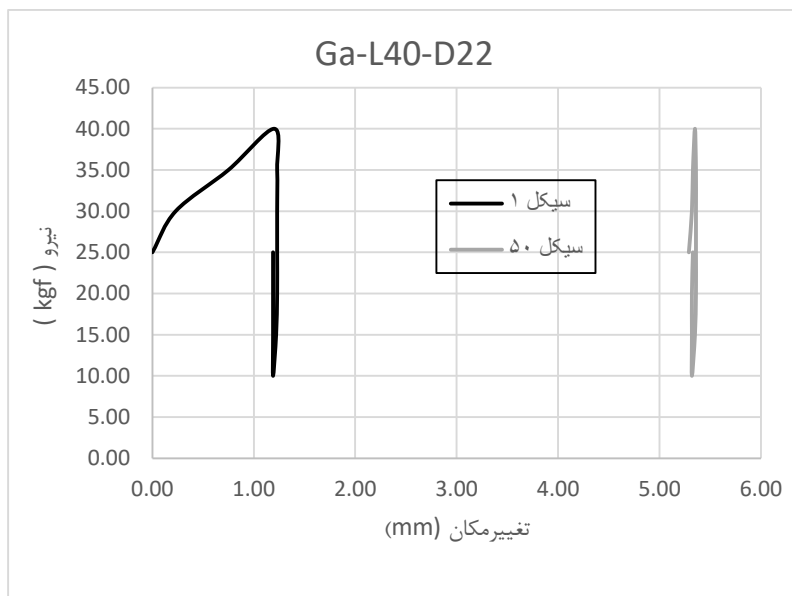
شکل ۴-۳۴- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L60-D27 در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم و پنجاهم



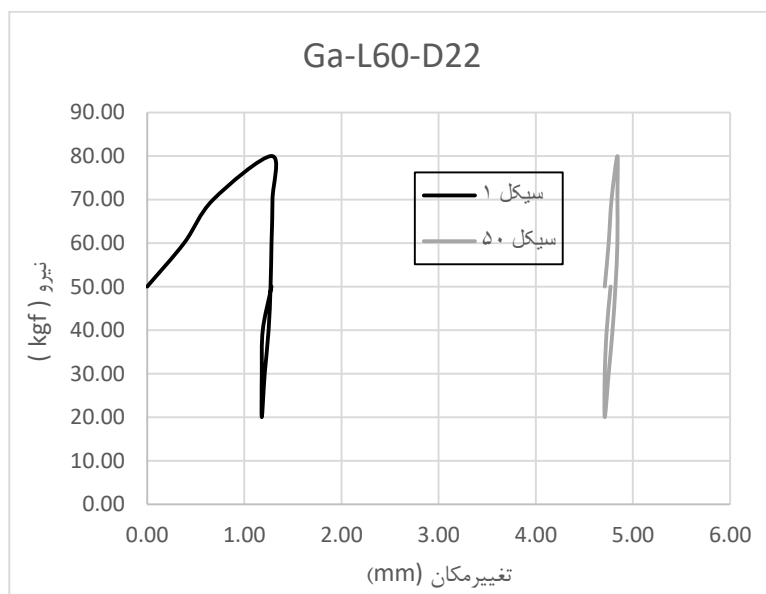
شکل ۴-۳۵- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L80-D27 در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم و پنجاهم



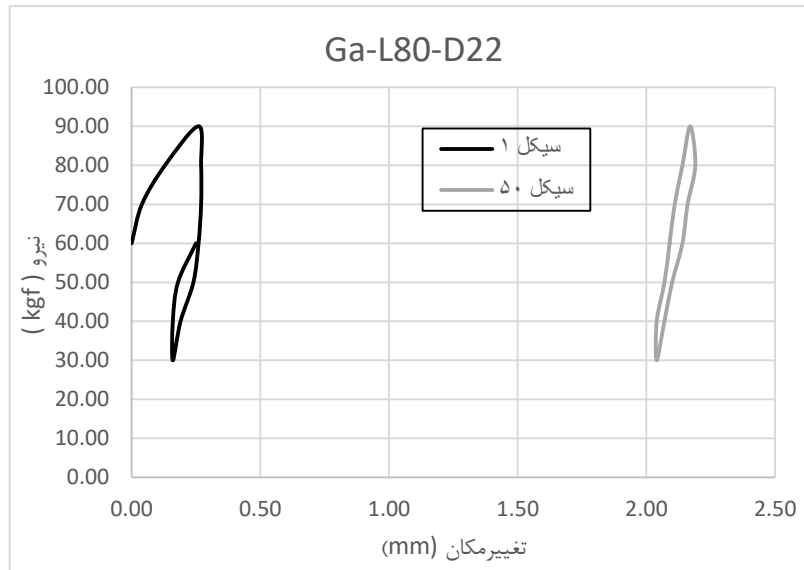
شکل ۴-۳۶- نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد



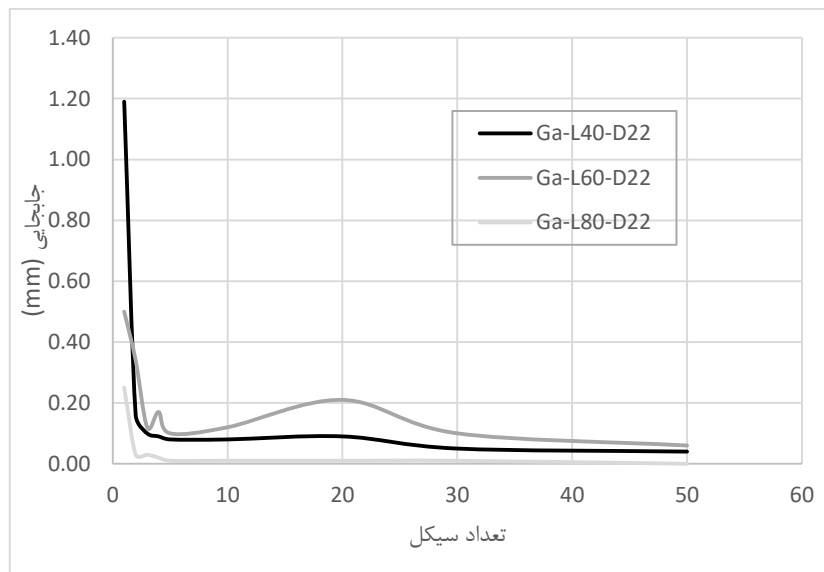
شکل ۴-۳۷- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L40-D22 در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم و پنجاهم



شکل ۴-۳۸- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L60-D22 در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم و پنجاهم



شکل ۴-۳۹- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع Ga-L80-D22 در خاک با دانسیته نسبی ۳۳ درصد در سیکل یکم و پنجاهم



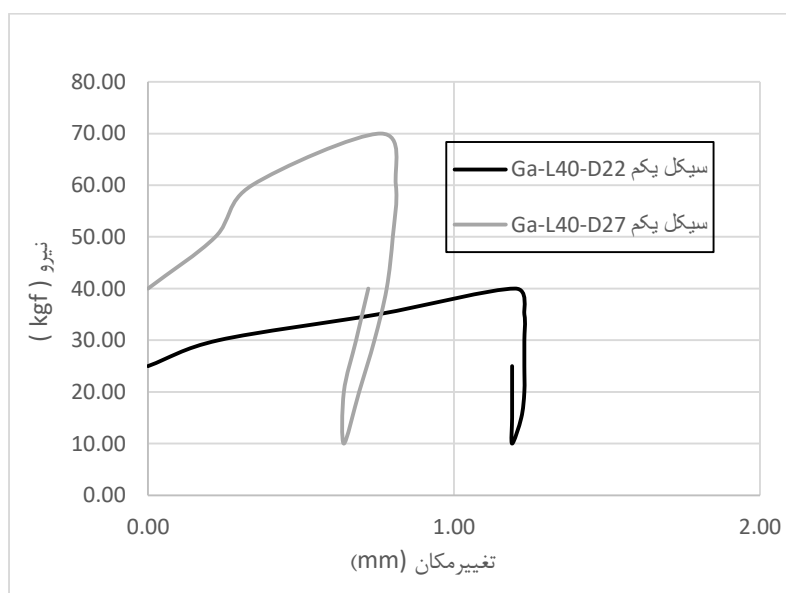
شکل ۴-۴۰- نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد

در اشکال (۴-۳۶) و (۴-۴۰) نمودارهای سیکل-تغییر مکان برای تغییرات طول در شمع‌های به ترتیب ۲۷ و ۲۲ میلی‌متر در خاک متراکم ارائه شده است. با توجه به اشکال ذکر شده، می‌توان دریافت که با افزایش طول شمع در خاک متراکم تغییر مکان کلی شمع‌ها در انتهای سیکل پنجاهم بسیار به هم

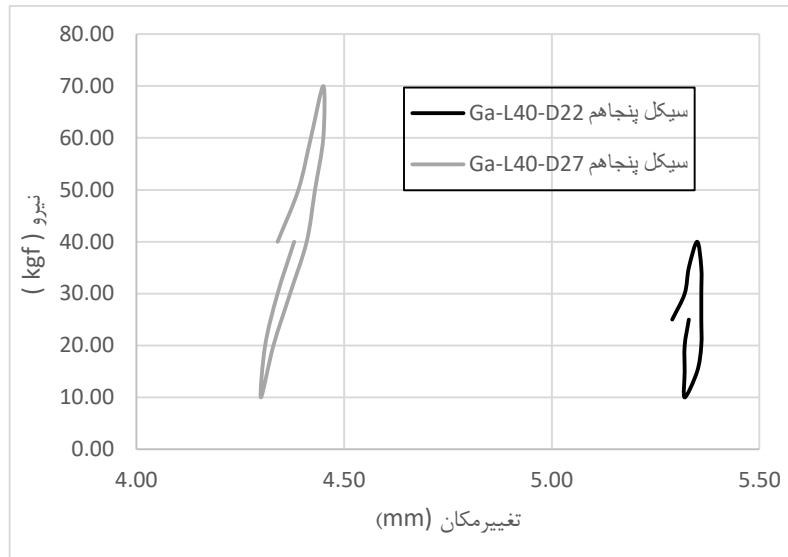
نزدیک شده است. همچنین واضح است که با افزایش طول شمع تغییر مکان کلی شمع بسیار کاهش می‌یابد، به طوری که تغییر مکان شمع Ga-L80-D22 از سیکل سوم به بعد در حدود صفر است.

۴-۳-۴- اثر تغییرات قطر شمع

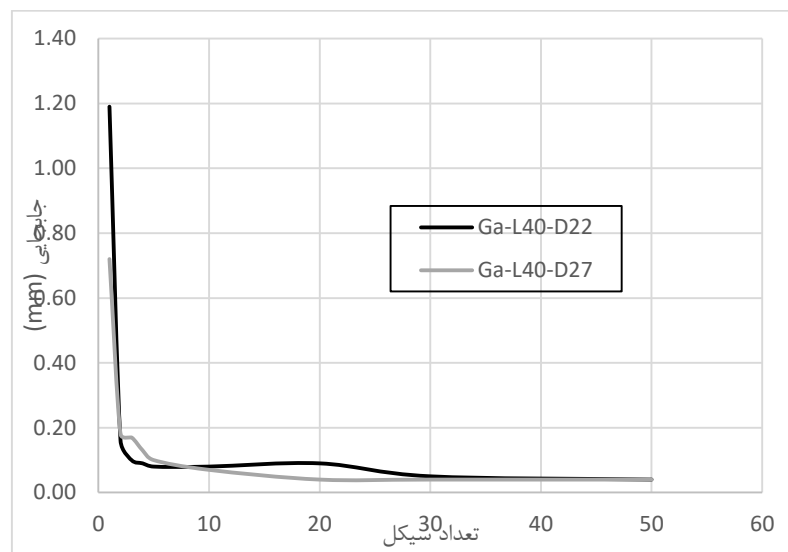
در اشکال (۴-۴۱) و (۴-۴۲) تغییرات قطر شمع برای شمع گالوانیزه به دو قطر ۲۷ و ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در طول ثابت ۴۰۰ میلی‌متر برای به ترتیب چرخه‌های دهم و پنجاهم نمایش داده شده است. در هر دو چرخه دهم و پنجاهم، شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر در بار چرخه‌ای اعمالی مشابه تغییر مکان کمتری نسبت به شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر داشته است. در اینجا نمودار نیرو-تغییر مکان دو شمع، شکل (۴-۴۳) کاملاً متفاوت از نمودار مشابه خود در خاک نامتراکم رفتار کرده و به هم نزدیک شده‌اند. با توجه به نتایج آزمایش، با افزایش قطر شمع در طول ثابت در خاک متراکم، ظرفیت باربری چرخه‌ای شمع افزایش می‌یابد و یا به بیان دیگر شمع تغییر مکان‌های کوچکتری می‌دهد.



شکل ۴-۴۱- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم



شکل ۴-۴۲- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل پنجاهم

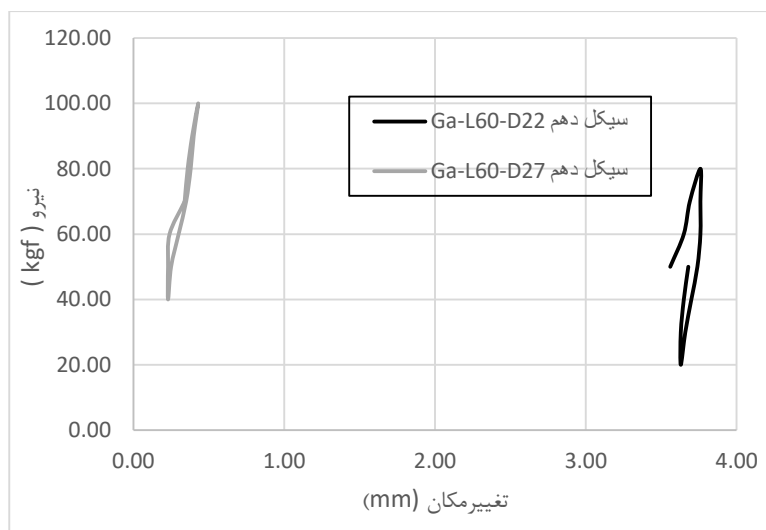


شکل ۴-۴۳- نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۴۰۰ میلی‌متر و قطرهای ۲۲ و ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد

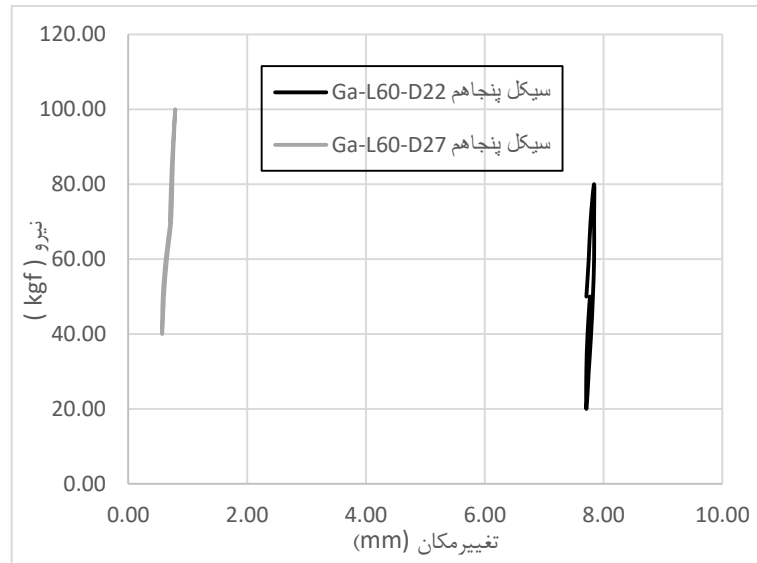
جهت بررسی تغییرات سختی با تغییر قطر در شمع گالوانیزه به طول ۴۰۰ میلی‌متر در خاک متراکم، با توجه به اشکال (۴-۴۱) و (۴-۴۲) می‌توان دریافت که سختی سیستم شمع-خاک، با افزایش قطر، افزایش یافته، زیرا شیب نمودار نیرو-تغییر مکان در چرخه پنجاهم برای شمع Ga-L40-D27 بیشتر است. در نتیجه مدول برشی و سختی شمع، با افزایش قطر زیاد می‌شود.

در شکل‌های (۴-۴۴) و (۴-۴۵) تغییرات قطر شمع برای شمع گالوانیزه به دو قطر ۲۷ و ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در طول ثابت ۶۰۰ میلی‌متر برای به ترتیب در چرخه‌های دهم و پنجاهم نمایش داده شده است. در هر دو چرخه دهم و پنجاهم، شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر در بار چرخه‌ای اعمالی مشابه تغییر مکان کمتری نسبت به شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر داشته است. با توجه به نتایج آزمایش و نمودار (۴-۴۶) با افزایش قطر شمع در طول ثابت در خاک با متراکم، ظرفیت باربری چرخه‌ای شمع افزایش می‌یابد.

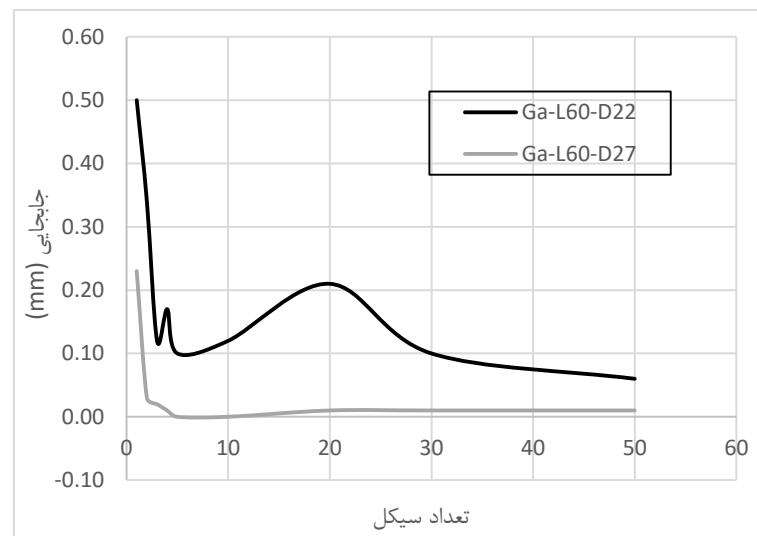
جهت بررسی تغییرات سختی با تغییر قطر در شمع گالوانیزه به طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با متراکم، با توجه به اشکال (۴-۴۴) و (۴-۴۵) می‌توان دریافت که سختی سیستم شمع-خاک، با افزایش قطر زیاد شده، در نتیجه مدول برشی و سختی افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۴۴- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم



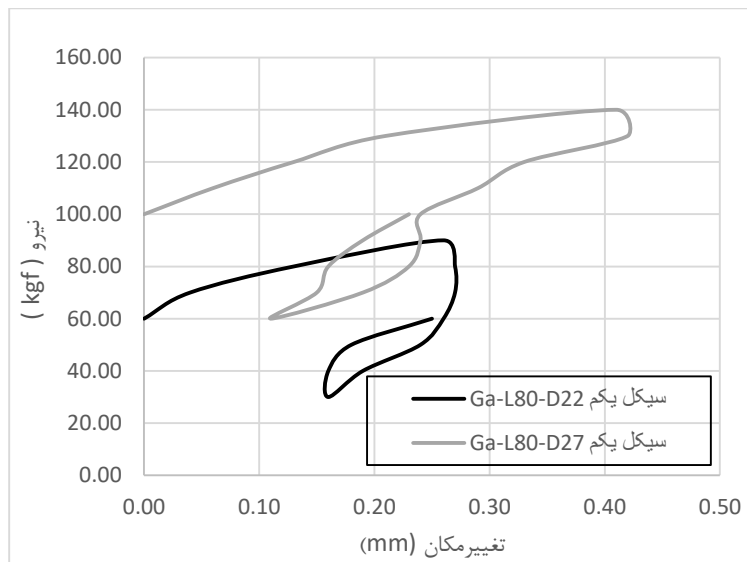
شکل ۴-۴۵- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۶۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل پنجاهم



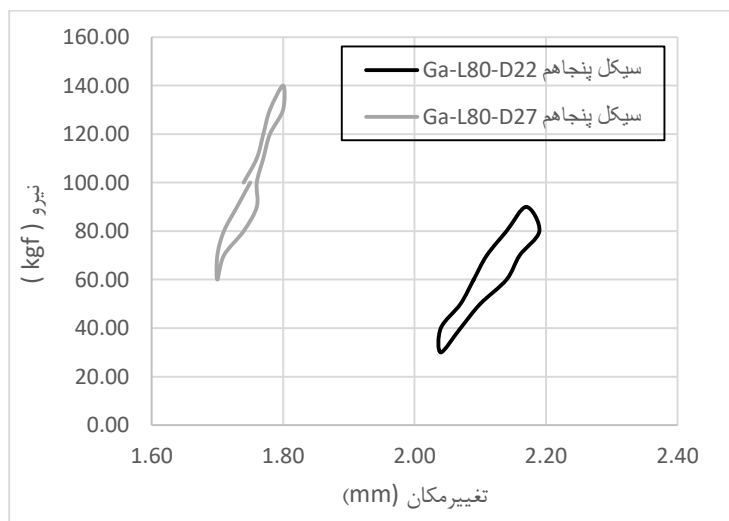
شکل ۴-۴۶- نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۶۰۰ میلی‌متر و قطرهای ۲۲ و ۲۷ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد

در اشکال (۴۷-۴) و (۴۸-۴) تغییرات قطر شمع برای شمع گالوانیزه به دو قطر ۲۷ و ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در طول ثابت ۸۰۰ میلی‌متر برای به ترتیب چرخه‌های دهم و پنجاهم نمایش داده شده است. در هر دو چرخه یکم و پنجاهم، شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر در بار چرخه‌ای اعمالی مشابه تغییر مکان کمتری نسبت به شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر داشته است. با توجه به

نتایج آزمایش، با افزایش قطر شمع در طول ثابت در خاک با متراکم، ظرفیت باربری چرخه‌ای شمع افزایش می‌یابد.

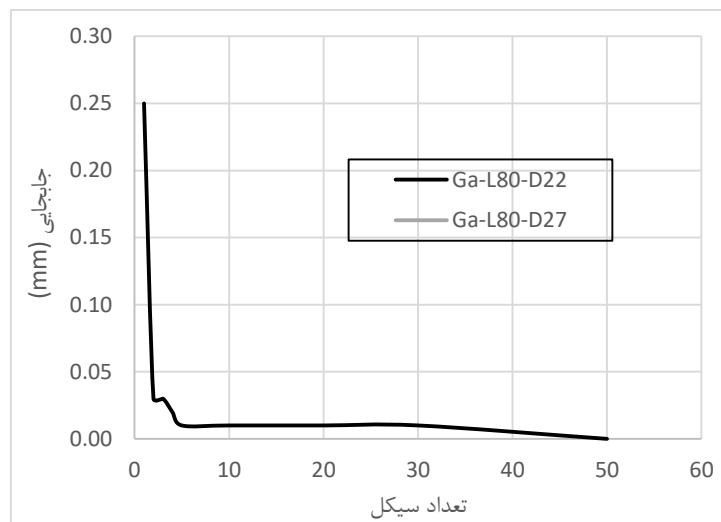


شکل ۴-۴۷- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل یکم



شکل ۴-۴۸- نمودار نیرو-جابجایی برای شمع گالوانیزه به طول ۸۰۰ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد در سیکل پنجاهم

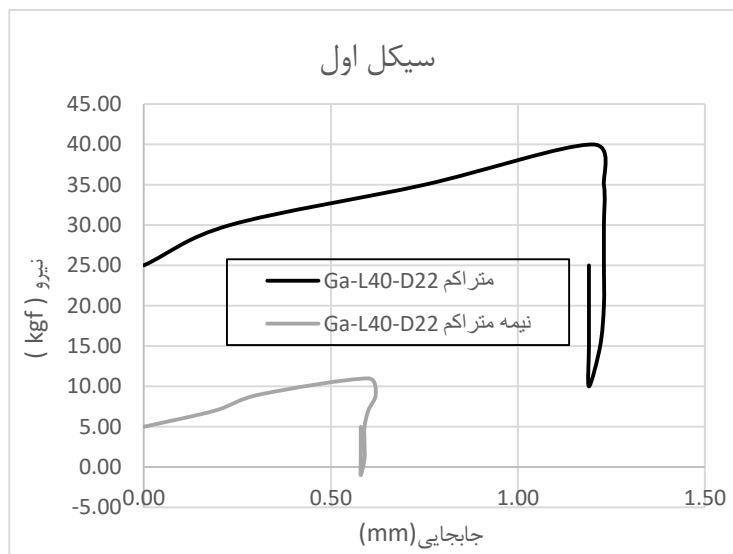
در شکل (۴-۴۹) تغییرمکان کلی شمع‌های گالوانیزه به طول ۸۰۰ میلی‌متر و دو قطر ۲۷ و ۲۲ میلی‌متر با توجه به تعداد چرخه‌ها نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تغییرمکان‌های هر دو شمع در سیکل‌های پایانی به هم نزدیک می‌شوند و بسیار کوچک هستند.



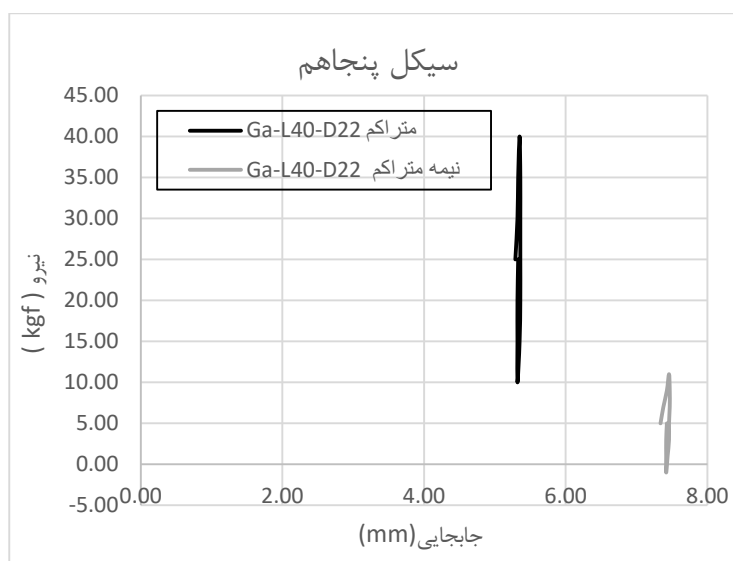
شکل ۴-۴۹- نمودار سیکل-تغییرمکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۸۰۰ میلی‌متر و قطرهای ۲۷ و ۲۲ میلی‌متر در خاک با دانسیته نسبی ۸۴ درصد

۴-۴- اثر پارامتر تراکم بر رفتار خاک

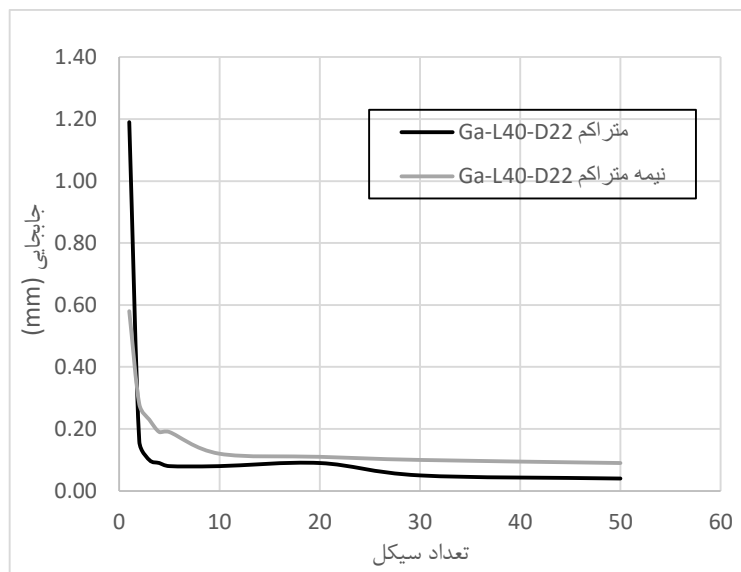
در شکل‌های (۴-۵۰) و (۴-۵۱) تغییرات دانسیته نسبی خاک برای شمع با طول و قطر ثابت به ترتیب ۴۰۰ و ۲۲ میلی‌متر برای چرخه‌های یک و پنجاهم نمایش داده شده است. با توجه به سیکل پنجاهم مشاهده می‌شود که، شمع در خاک نامتراکم نسبت به شمع در خاک متراکم، تغییرمکان بیشتری دارد. اما تغییرات شیب در هر دو نمودار تقریباً یکسان است و دو شمع نسبت سختی و برشی یکسان دارند.



شکل ۴-۵۰- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل یکم برای شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر و طول ۴۰۰ میلی‌متری

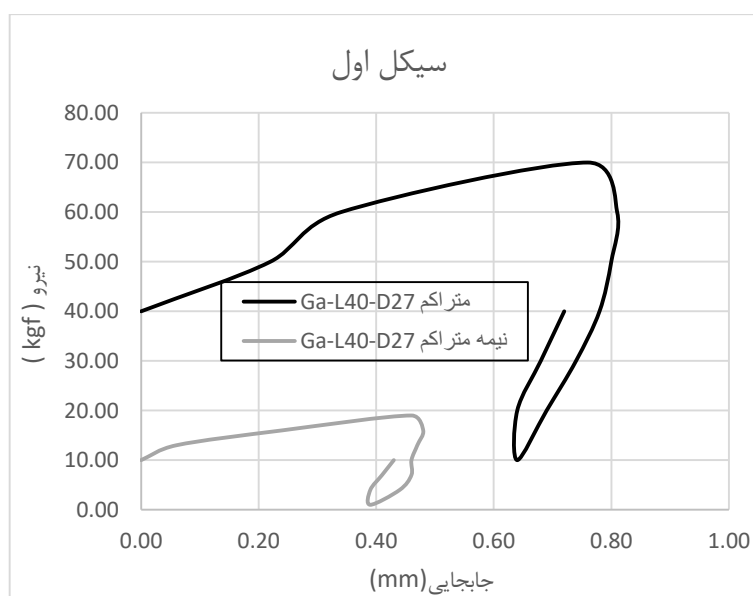


شکل ۴-۵۱- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل پنجاهم برای شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر و طول ۴۰۰ میلی‌متری

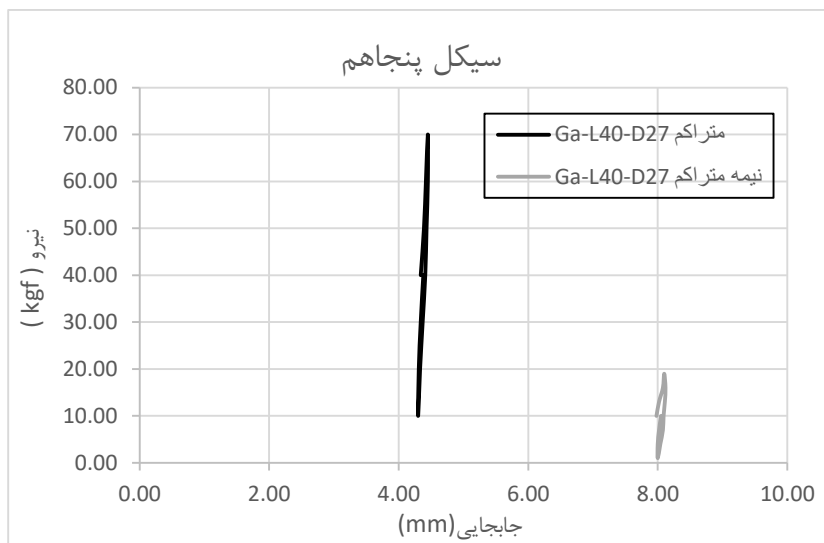


شکل ۴-۵۲- نمودار سیکل-تغییر مکان شمع‌های گالوانیزه به طول ۴۰۰ میلی‌متر و قطرهای ۲۲ میلی‌متر در خاک با تراکم متغیر

در اشکال (۴-۵۳) و (۴-۵۵) تغییرات دانسیته نسبی خاک برای شمع با طول و قطر ثابت به ترتیب ۴۰۰ و ۲۷ میلی‌متر برای چرخه‌های یک و پنجاهم نمایش داده شده است. شمع در خاک متر اکم تحت بار چرخه‌ای بسیار بیشتری قرار گرفته است اما با توجه به چرخه پنجاهم تغییر مکان کمتری دارد.

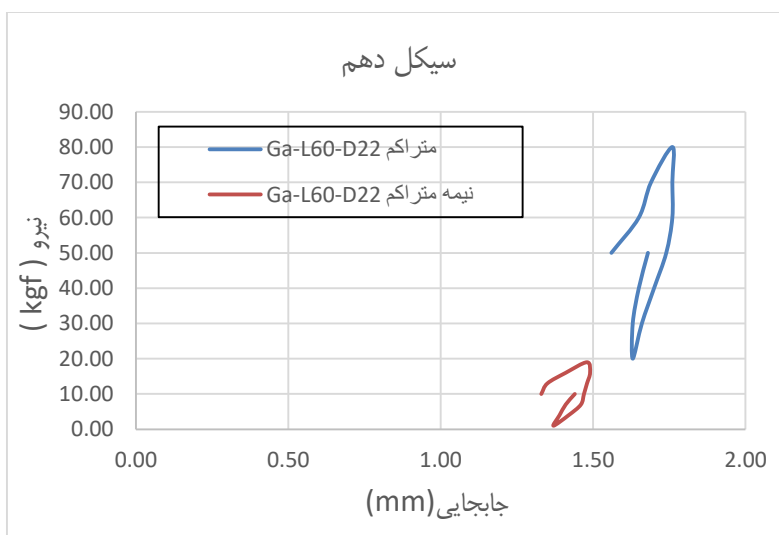


شکل ۴-۵۳- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل یکم برای شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر و طول ۴۰۰ میلی‌متری

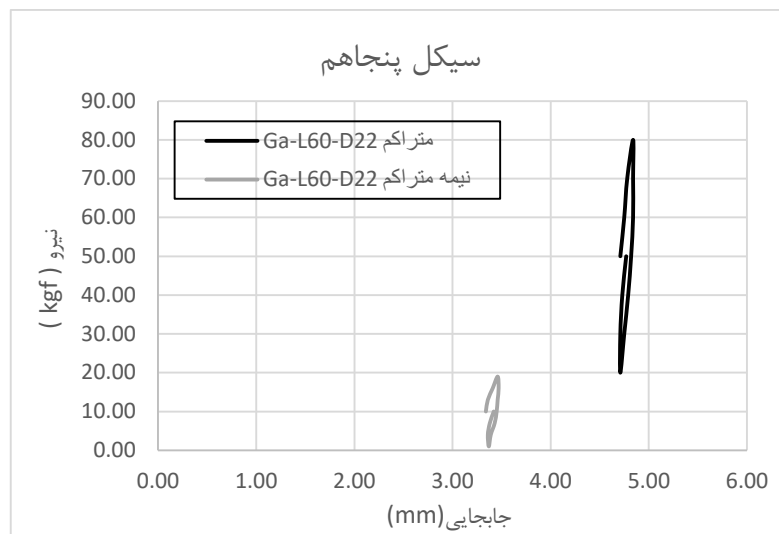


شکل ۴-۵۴- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل پنجاهم برای شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر و طول ۴۰۰ میلی‌متری

در اشکال (۴-۵۵) و (۴-۵۶) تغییرات دانسیته نسبی خاک برای شمع با طول و قطر ثابت به ترتیب ۶۰۰ و ۲۲ میلی‌متر برای چرخه‌های یک و پنجاهم نمایش داده شده است. شمع در خاک متراکم تحت بار چرخه‌ای بسیار بیشتری قرار گرفته و در نتیجه تغییرمکان بیشتری دارد.

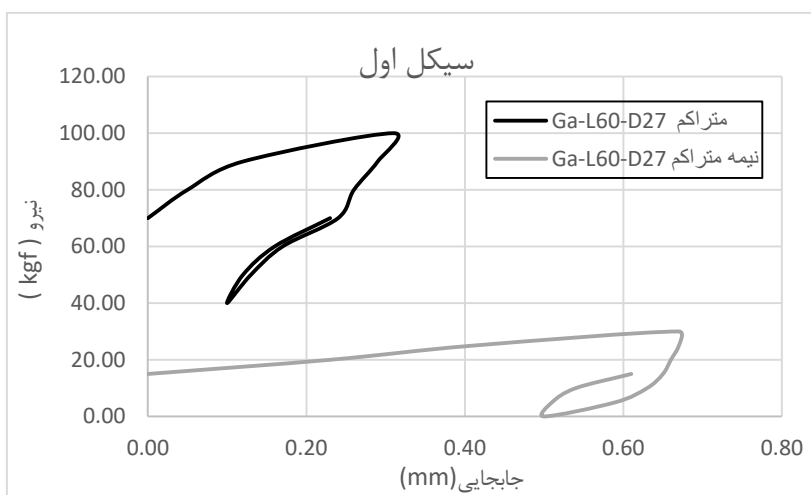


شکل ۴-۵۵- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل اول برای شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر و طول ۶۰۰ میلی‌متری

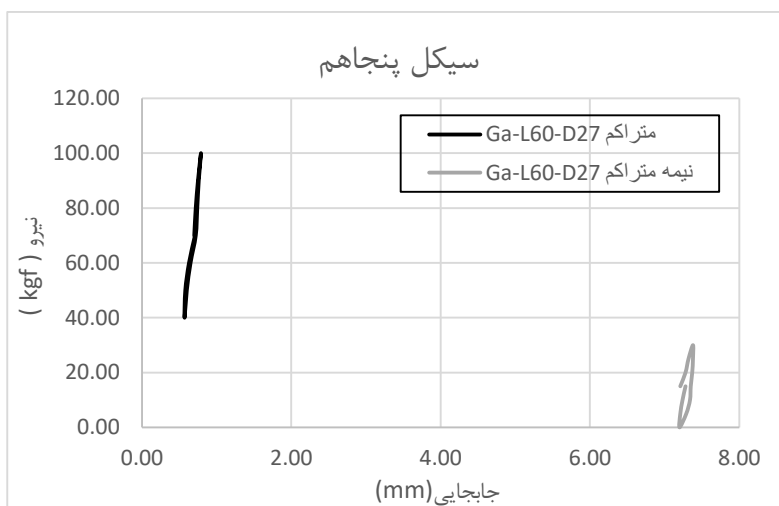


شکل ۴-۵۶- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل پنجاهم برای شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر و طول ۶۰۰ میلی‌متری

در اشکال (۴-۵۷) و (۴-۵۸) تغییرات دانسیته نسبی خاک برای شمع با طول و قطر ثابت به ترتیب ۶۰۰ و ۲۷ میلی‌متر برای چرخه‌های یک و پنجاهم نمایش داده شده است. شمع در خاک متراکم تحت بار چرخه‌ای بسیار بیشتری قرار گرفته است اما با توجه به چرخه پنجاهم تغییر مکان کمتری دارد و در نتیجه ظرفیت باربری چرخه‌ای بیشتری دارد.

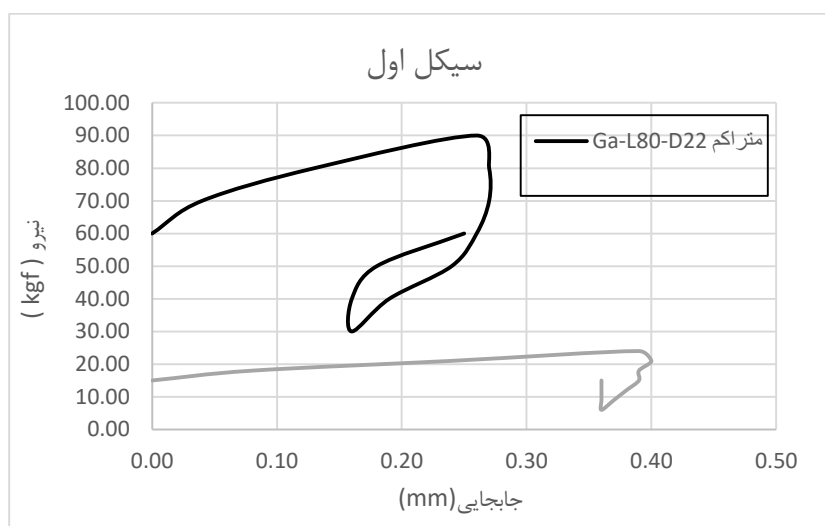


شکل ۴-۵۷- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل اول برای شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر و طول ۶۰۰ میلی‌متری

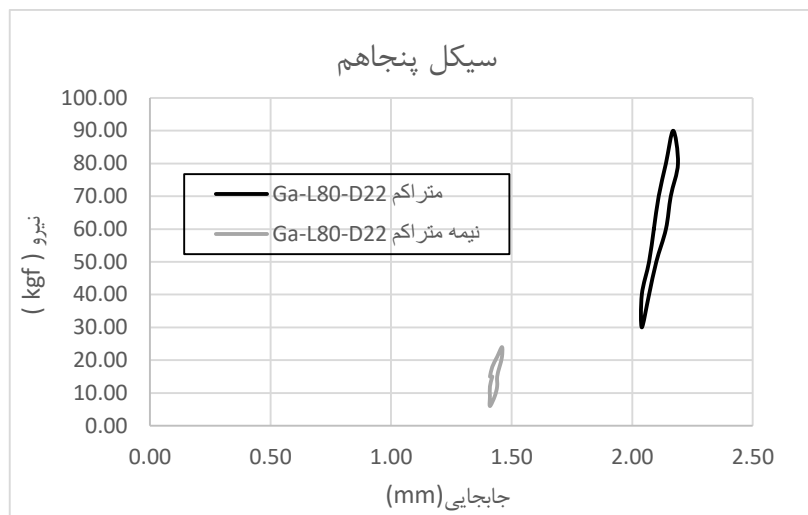


شکل ۴-۵۸- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل پنجاهم برای شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر و طول ۶۰۰ میلی‌متری

در اشکال (۴-۵۹) و (۴-۶۰) تغییرات دانسیته نسبی خاک برای شمع با طول و قطر ثابت به ترتیب ۸۰۰ و ۲۲ میلی‌متر برای چرخه‌های یک و پنجاهم نمایش داده شده است. شمع در خاک متراکم تحت بار چرخه‌ای بسیار بیشتری قرار گرفته و در نتیجه تغییرمکان بیشتری دارد.

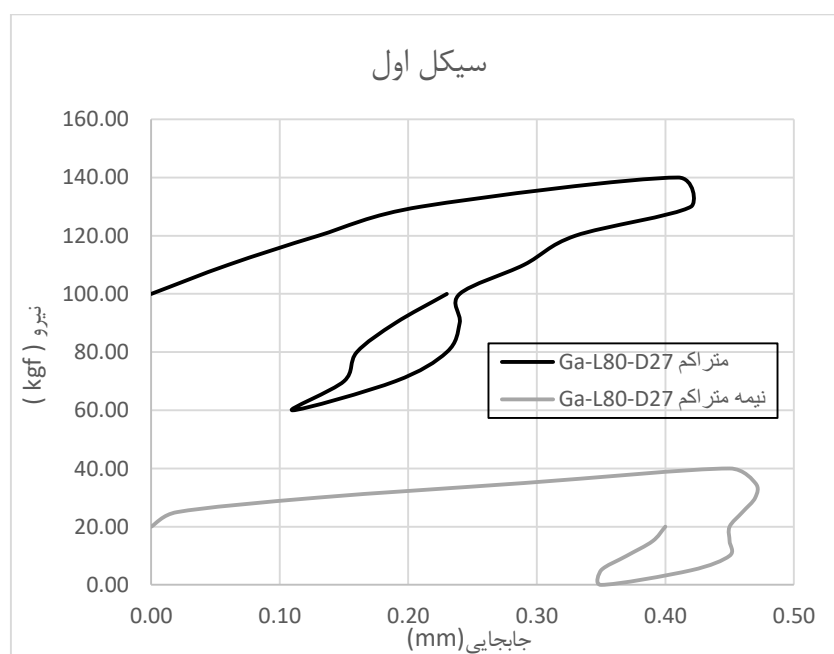


شکل ۴-۵۹- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل اول برای شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر و طول ۸۰۰ میلی‌متری

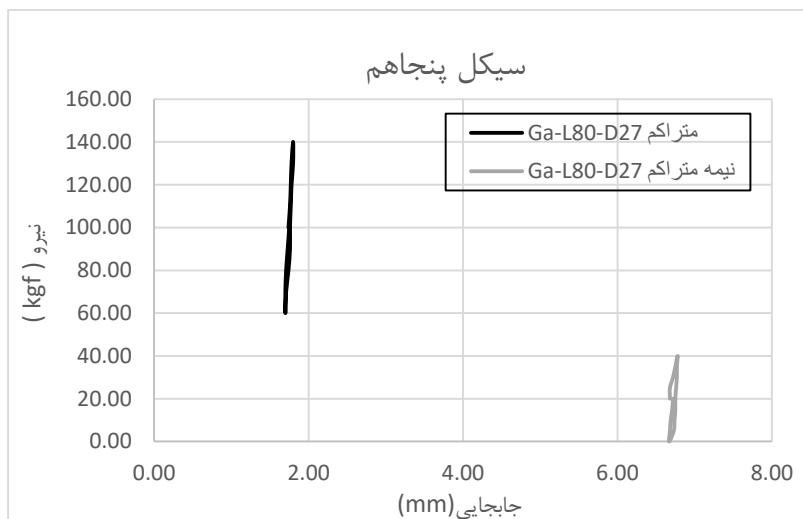


شکل ۴-۶۰- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل پنجاهم برای شمع به قطر ۲۲ میلی‌متر و طول ۸۰۰ میلی‌متری

در اشکال (۴-۶۱) و (۴-۶۲) تغییرات دانسیته نسبی خاک برای شمع با طول و قطر ثابت به ترتیب ۸۰۰ و ۲۷ میلی‌متر برای چرخه‌های یک و پنجاهم نمایش داده شده است. شمع در خاک متراکم تحت بار چرخه‌ای تغییرمکان کمتری نسبت به شمع در خاک نامتراکم دارد.



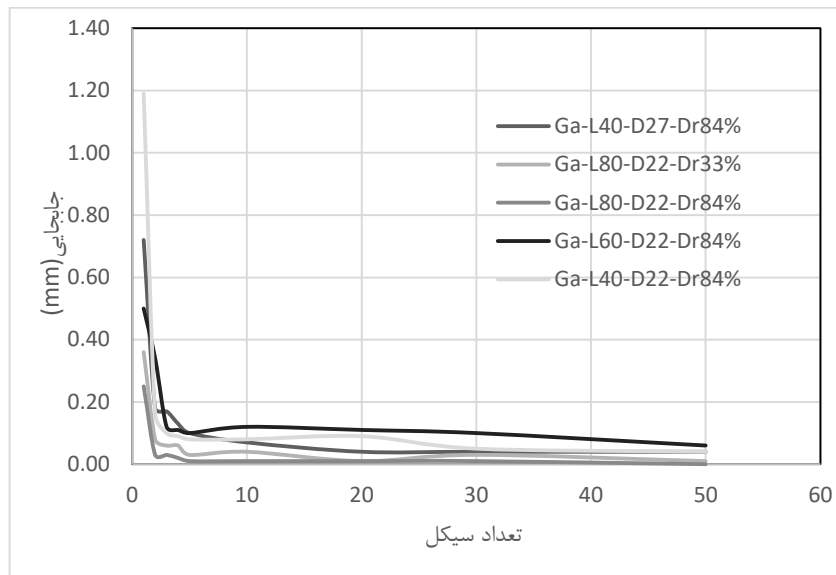
شکل ۴-۶۱- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل اول برای شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر و طول ۸۰۰ میلی‌متری



شکل ۴-۶۲- نمودار تغییرات تراکم خاک در سیکل پنجاهم برای شمع به قطر ۲۷ میلی‌متر و طول ۸۰۰ میلی‌متری

۴-۴- اثر سطح بارگذاری بین ۲۰ تا ۳۰ درصد

با توجه به این نکته که Chan and Hanna هیچ‌گونه پیش‌بینی برای رفتار شمع در سطح بارگذاری بین ۲۰ تا ۳۰ درصد ارائه ننموده‌اند، لذا بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایشات که در شکل (۴-۶۳) مشاهده می‌شود، می‌توان پیش‌بینی نمود که شمع‌های مذکور تحت این سطح از بارگذاری، در پنج چرخه ابتدایی تغییرمکان بزرگی نشان می‌دهد و پس از چرخه پنجم تغییرمکان‌ها کم شده و با افزایش تعداد چرخه‌ها نرخ تغییرات جابجایی کاهش می‌یابد. به طوری که در بین سیکل پنجم تا ۵۰ ام شیب نمودار (جابه‌جایی‌ها در هر سیکل) تقریباً ثابت است.



شکل ۴-۶۳- نمودار سیکل-تغییر مکان در شمع‌های با سطح بارگذاری بین ۲۰ تا ۳۰ درصد

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

برای بررسی رفتار شمع‌ها تحت اثر بار قائم چرخه‌ای در خاک ماسه‌ای دستگاه آزمایش طراحی شده است. با استفاده از دستگاه آزمایش که در فصل سوم به طور کامل تشریح شده است، شمع‌ها تحت اثر بار قائم چرخه‌ای قرار گرفته‌اند. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها در فصل چهارم مورد بررسی قرار گرفته و همچنین با تئوری‌های بیان شده در این زمینه مقایسه شده است. در این فصل نتایج حاصله از آزمایشات و تئوری‌های بیان شده ارائه می‌گردد و در ادامه به بیان پیشنهادهای پرداخته می‌شود.

۵-۲- نتیجه‌گیری

با توجه به تئوری‌های بیان شده و آزمایش‌های صورت گرفته می‌توان نتایج زیر را بیان نمود.

- برای پیش‌بینی رفتار شمع با توجه به سطح بارگذاری، روابط بیان شده هنگامی که سطح بارگذاری بین ۳۰ تا ۷۰ درصد است، نمی‌توانند رفتار شمع را دقیقاً پیش‌بینی نمایند. اما هنگامی که سطح بارگذاری کمتر از ۲۰ درصد و بیش از ۱۵ درصد است، تئوری‌های بیان شده مطابقت بیشتری با رفتار شمع دارند.
- برای بارگذاری بیش از ۳۰ درصد؛ خاک نامتراکم تحت بارگذاری چرخه‌ای قائم ابتدا با ایجاد تغییرمکان‌های بزرگ (در ده سیکل ابتدایی) متراکم شده به تعادل رسیده و پس از آن تنها تغییرمکان‌های کوچکی ایجاد شده و در نتیجه از گسیختگی سیستم شمع-خاک جلوگیری می‌شود.
- تغییر در تراکم خاک تاثیر بسزایی بر رفتار شمع دارد. در شمع به طول ۴۰۰ میلی‌متر با افزایش تراکم خاک تغییرمکان شمع کاسته شده، اما میزان نسبت سختی سیستم شمع-خاک تغییری نمی‌کند.

- شمع‌هایی با طول ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۷ میلی‌متر در خاک متراکم، تغییرمکان-هایی کمتر از شمع با طول مشابه و قطر مشابه در خاک نامتراکم دارد.
- شمع‌هایی با طول ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۲ میلی‌متر در خاک متراکم، تغییرمکان-هایی کمتر از شمع با طول مشابه و قطر مشابه در خاک نامتراکم دارد.
- در رابطه ارائه شده توسط [Chan and Hanna 1980] هیچ رفتار چرخه‌ای برای شمع در سطح بارگذاری بین ۲۰ تا ۳۰ درصد ارائه نشده است.
- در معیارهای رفتاری ارائه شده توسط [Sagasetta et al., 1991] که رفتار چرخه‌ای شمع را بر اساس سطح کرنش پیش‌بینی کرده‌اند، رفتار شمع در تمام سطوح پیش‌بینی شده است.
- با افزایش طول شمع در خاک نامتراکم، ظرفیت باربری شمع افزایش یافته و تغییرمکان کلی شمع در هر سیکل کاهش می‌یابد. تغییر طول شمع در بارگذاری قائم چرخه‌ای اثری بر سختی ندارد.
- با افزایش قطر شمع در طول ثابت در خاک نامتراکم، ظرفیت باربری چرخه‌ای شمع افزایش می‌یابد. با تغییر قطر شمع در بارگذاری قائم چرخه‌ای سختی و در نتیجه مدول برشی تغییری نمی‌کند.
- در خاک متراکم با اعمال بارگذاری بلافاصله بین چرخه اول و دوم، شمع تغییرمکان زیادی داده و پس از چرخه دوم تغییرمکان‌ها کم شده و با افزایش تعداد چرخه‌ها نرخ تغییرات جابجایی کاهش می‌یابد. به طوری که در بین سیکل دوم تا ۵۰ ام جابجایی‌ها در هر سیکل تقریباً ثابت است..
- ظرفیت باربری و میزان سختی سیستم شمع-خاک در خاک متراکم با افزایش طول شمع زیاد می‌شود.

- با افزایش طول شمع در خاک متراکم تغییرمکان کلی شمع‌ها در انتهای سیکل پنجاهم بسیار به هم نزدیک شده است. همچنین واضح است که با افزایش طول شمع تغییرمکان کلی شمع بسار کاهش می‌یابد، به طوری که تغییرمکان شمع‌ها در سیکل‌های انتهایی بارگذاری در حدود صفر است.
- با توجه به نتایج آزمایش، با افزایش قطر شمع در طول ثابت در خاک متراکم، ظرفیت باربری چرخه‌ای شمع افزایش می‌یابد و یا به بیان دیگر شمع تغییرمکان‌های کوچکتری می‌دهد. مدول برشی و سختی شمع، با افزایش قطر زیاد می‌شود.

۵-۳- پیشنهادها

- با توجه به این مطلب که آزمایش‌ها در خاک ماسه‌ای بر روی شمع بدون پی انجام شده است، بارگذاری به صورت دستی انجام گرفته و نیز با در نظر گرفتن سطح بارگذاری به عنوان یکی از پارامترهای مهم در این آزمایش‌ها موارد زیر پیشنهاد می‌گردد.
- آزمایش‌ها در نرم‌افزار مدلسازی شود و با استفاده از نتایج این تحقیق مدل نرم‌افزاری کالیبره شود. سپس به بررسی حالت‌هایی که مدل کردن آن در آزمایشگاه ممکن نیست و یا بسیار مشکل است، پرداخته شود.
 - با استفاده از نتایج این تحقیق و همچنین آزمایشات تکمیلی و نیز استفاده از نرم‌افزار می‌توان رفتار سیستم شمع-خاک را که به واقعیت نزدیک‌تر باشد ارائه نمود.
 - سیستم بارگذاری مکانیکی طراحی شود تا بتوان تعداد چرخه‌های بارگذاری و همچنین دقت بارگذاری را افزایش داد.
 - آزمایش‌ها بر روی شمع دارای پی انجام شود. که در این صورت علاوه بر بررسی رفتار شمع دارای پی می‌توان به بررسی ابعاد پی نیز پرداخته شود.

- آزمایش‌ها به طور مشابه در خاک‌های رسی نیز انجام شود که البته نیاز به تغییراتی در دستگاه آزمایش می‌باشد.

مراجع:

1. Chan, S. F. and Hana, T. H. , *Repeated loading on simple piles in sand*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1980, Vol. 106, No. GT2, P. 171-188.
2. Boulon, M. , Desrues, J. , Foray, P. and Forgue, M. , *Numerical model for foundation under cyclic loading application to piles*. Proc. Int. Symp. On soils under cyclic and transient loading. Swansea, 1980, Vol. 1, P. 681-694.
3. Poulos, H. G. , *Cyclic and axial response of single pile* . Journal Geotechnical Engineering, 1981.a, ASCE, Vol. 107, No. GT1.
4. Poulos, H. G. , *Some aspect of skin friction of piles in clay under cyclic loading* . Geotechnical Engineering, 1981.b, Vol. 12, P. 1-17.
5. Poulos, H. G. , *Cyclic axial response-alternative analysis*. Proc. Conf. On Geotechnical practice in Offshore Engineering, 1983, Univ. of Texas, P. 403-421.
6. Poulos, H. G. , *Cyclic degradation of pile performance in calcareous soils*. Analysis and design of pile Foundation, 1984, ASCE, P. 99-118.
7. Poulos, H. G. , *Cyclic stability diagram for axially loaded piles*. Journal Geotechnical Engineering, 1988, ASCE, Vol. 114, No. 8, P. 887-895
8. Poulos, H. G. , *Pile behaviour-theory and application*. Geotechnique 39, 1989.a, No. 3, P. 365-415
9. Poulos, H. G. , *Cyclic axial loading analysis of piles in sand*. Journal Geotechnical Engineering, 1989.b, ASCE, Vol. 115, No. GT6, P. 836-852
10. Jardine, R.J., Standing, J.R., 2000. *Pile Load Testing Performed for HSE Cyclic Loading Study at Dunkirk*, France. Offshore Technology Report OTO 2000 007, Health and Safety Executive, London, two volumes, P. 60-200.
11. Tsuha, C. H. C. , Foray, P. Y. , Jardine, R. J. , Yang, Z. X. , Silva, M. and Rimoy, S. , *Behaviour of displacement piles in sand under cyclic axial loading*. Journal of Soils and Foundations, 2012, Vol. 52, No. 3, P. 393-410.
12. Zhang, B. , Huang, B. , Mei, C. , Fu, X. , Luo, G. and Yang, Z. , *Dynamic Behaviours of a Single Soft Rock-Socketed Shaft Subjected to Axial Cyclic Loading*. Journal of Advances in Materials Science and Engineering, 2016, P. 1-10.
13. Copsey, J. P. , Hulme, T. W. , Kraft, B. and Sripathy, P. , *Singapore Mass Rapid Transit System: design*. Proc. Instn Civ. Engrs, Part 1,1989, P. 667-707.
14. Zheng, Y. , Heng, S. and Zhao, M. , *Numerical simulation on behavior of pile foundations under cyclic axial loads*. Central South University Press and Springer-Verlag GmbH Germany, 2017, P. 2906–2913
15. Rimoy, S. , Jardine, R. and Standing, J. , *Displacement response to axial cyclic loading of driven piles in sand*. Proc. 18th Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Institution of Civil Engineers, Paris, 2013.

16. Cook, R. W. , *The settlement of friction pile foundation* . Conference on tall buildings, Kuala Lumpur, P.7-19.
17. Gallagher, K. A. , *Tensile loading of piles in a glacial Till* . PhD thesis, University of Sheffield, U.K.
18. Khouaouci, M. , Bouafia, A. , Canou, J. , Dupla, J. and Bekki, H. , *Single pile behavior under axial cyclic loading in sand- Physical Modelling in Calibration Chamber*. 15th ASEC Conference, Jordan, 2018.
19. Meyerhof, G. G. *Bearing capacity and settlement of pile foundation*. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1991, Vol. 102, No. GT3, P. 197-228.
20. Jardine, R. J. , Zhu, B. , Foray, P. and Dalton, C. P. , *Exprimental arrangments for investigation of soil stresses developed around a displacement pile*. Journal of Soils and Foundations, 2008, Vol. 49, No. 5, P. 661-673.
- a. بر اجاء ام. داس.، اصول مهندسی ژئوتکنیک مهندسی پی. جلد دوم، ترجمه شاپور طاحونی، ۱۳۹۰.
21. Vasic, A. S. , *A study of bearing capacity of deep foundations*. Final report, Project B-189, 1977, Gorgia Institute of Technology, Atlanta, Ga.
22. Coyle, H. M. and Castello, R.R. , *New design correlations for piles in sand*. Journal Geotechnical Engineering division, 1981, ASCE, Vol. 107, No. GT7 , P. 965-986.
23. Kraft, L. M. , *Performance of axially loaded pipe pile in sand*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1991, Vol. 117, No.2, P. 272-296.
24. Lehane, B. M. , Jardine, R. J. , Bond, A. J. and Frank, R. , *Mechanism of shaft friction in sand from instrumented pile tests*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993, Vol. 119, No.1, P. 19-35.
25. Bond, A. J. , Jardine, R. J. and Dalton, J. C. P. , *Design and performance of the imperial college instrumented pile*. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 1991, Vol. 4, No. 4, P. 413-424.
26. Boulon, M. and Foray, P. , *Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along offshore piles in sand*. Proc. 3rd Int. Conf. on numerical methods in offshore piling, 1986, P. 127-148.
27. Seidel, M. and Coronel, M. , *A new approach for assessing offshore piles subjected to cyclic axial loading*. Journal of geotechnik, 2011, No.34, P. 276-284.
28. Solaiman, I. H. and Coyle, H. M. , *Uplift resistance of piles in sand*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1976, Vol. 102, No.GT5, P. 559-562.
29. Randolph, M. F. and Wroth, C. P. , *Analysis of deformation of axially loaded piles*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1978, Vol. 104, No. GT12, P. 1465-1488.
30. Jardine, R. J. and Pots, D. M. , *Hutton tension leg platform foundations: prediction of file behavior*. 1988, Geotechnique 38, No. 2, P. 231-252.
31. Jardine, R. J. and Pots, D. M. , *Magnus foundations: soil prpoerties and prediction of field behaviour*. Proc. Conf. Recent large-scale fully instrumented pile test in clay, Institution of Civil Engineers, 1992, P. 69-83.

32. O'Reilly, M. P. and Brown, S. F. , *Observations on the resilient shear stiffness of granular materials* . Geotechnique, 1992, Vol. 42, No. 4, P. 631-633.
33. Lentz, R. W. and Baladi, G. Y. , *Simplified procedure to characterise permanent strain in sand subjected cyclic loading*. Proct, Imp, Symp, 1980, On soils under cyclic and transient loading, Swansea, U. K.
34. Marr, A. W. and Christian, T. J. , *Permanent displacement due to cyclic wave loading*. The Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1981, Vol. 107. No. GT8.
35. Dyaljee, V. A. and Raymand, G. P. , *Repetitive load deformation of cohesionless soils*. The Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1982, Vol. 108. No. GT10, P. 1215-1229.
36. Luong, M. P. , *Stress-strain aspect of cohesionless soil under cyclic and transient loading*. Int. Symp. On soils under cyclic and transient loading. Swansea, 1980, Vol. 1, P. 315-324.
37. Sagaseta, C. , Cuellar, V. and Pastor, M. , *Cyclic loading*. 10th European Conference on soil mechanics and foundation engineering, 1991, Italy, P. 981-999.
38. Ishihara, K. , *Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis*. Numerical modelling in Geomechanics, 1982, P. 237-259.
39. Youd, T. L. , *Compaction of sand with repeated shear straining*. Journal of soil mechanics and foundation Engineering, 1972, ASCE, Vol. 98, No. SM7, P. 707-725.
40. Airey, D. W. , Al-Douri, R. H. and Poulos, H. G. , *Estimation of pile friction degradation from shearbox test*, 1992, Geotechnical Testing Journal, Vol. 15, No.4 , P. 388-392.
41. Ansell, P. and Brown, S. F. , *Cyclic simple shear apparatus for dry granular material*. Geotechnical Testing journal, 1978, Vol. 2, P. 82-92.
42. Chan, F. W. K. , *Permanent deformation resistance of granular layers in pavement*. PhD thesis, 1990, University of Nottingham. UK.
43. Houda, M. , Jenck, O. and Emeriault, F. , *Rigid pile improvement under vertical cyclic loading: 1g laboratory small scale modelling*. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2018.
44. Grosch, J. J. and Reese, L. C. , *Field test on small-scale pile segments in a soft clay deposit under repeated axial loading*. 12th Offshore Technology Conference, 1980, paper No. OTC 3869.
45. McAnoy, R. P. L. , Cashman, A. C. and Purvis, D. , *Cyclic tensile testing of a pile in glacial till*. 2nd Int. Conf. on numerical methods in offshore piling, 1982, P. 257-291.
46. Karlsrud and Haugen [1983]
47. Karlsrud, K. and Haugen, H. , *Cyclic loading of piles and pile anchors-field model tests*. Final report, Summary and Evaluation of test result, 1983, Norwegian Geotechnical Institute report 40018-11.
48. Angemeer, J. , Carlson, E. and Klick, J. H. , *Techniques and results of offshore pile load testing in calcareous soils*. 5th Offshore Technology Conference, 1973, paper No. OTC 1894.

49. Chan, S. F. , *The behaviour of piles subjected to static and repeated loads* . PhD thesis, University of Sheffield . U. K.
50. Puech, A. A. , *Basic data for the design of tension pile in silty soils*. BOSS-82, 1982, Vol. 1, P. 141-157.
51. Abood, A. S. ,*Load capacity of piled foundation under non-cyclic and cyclic uplift loading*. PhD thesis, 1989, University of Wales.
52. Achmus, M. , Schaefer, D. and Abdel-Rahman, K. , *Capacity Degradation Method for Driven Steel Piles under Cyclic Axial Loading*. Proc. 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2017, U.S.A, P. 362-368.
53. Achmus, M. , Lemke, K. and Abdel-Rahman, K. , *Numerical Approach for the Derivation of Interaction Diagrams for Piles under Cyclic Axial Loading*. Proc. 25th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2015, U.S.A, P. 755-760.
54. EAP 2012. Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ (EA-Pfähle). Verlag Ernst & Sohn, 2. Auflage (in German).
55. Kirsch, F. , Richter, T. and Mittag, J. (2011). *Zur Verwendung von Interaktionsdiagrammen beim Nachweis axial-zyklisch belasteter Pfähle*, Bautechnik 88, Heft 5, 2011 (in German).
56. Jardine, R. J. and Standing, J. R. , *Field axial cyclic loading experiments on piles driven in sand*. Journal of Soils and Foundations, 2012, Vol. 52, No. 4, P. 723-736.
57. Randolph, M. F. , *Design consideration for offshore piles*. . Proc. Conf. On Geotechnical practice in Offshore Engineering, 1985, Univ. of Texas, sponsored by ASCE.
58. Matlock and Foo [1979]
59. Matlock, H. and Foo, S. H. C. , *Axial analysis of piles using hysteretic and degradation soil model*, 1979, . Proc. of Int. Conf. on numerical methods in offshore piling, 1986, P. 127-134.
60. Kraft, L. M., Jr. , Ray, R. P. and Kagawa, T. , *Theoretical t-z curves*. Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, 1981, Vol. 107. No. GT11, P. 1543-1561.
61. Movahedifar, M., and Bolouri-Bazaz, J., *An innovative apparatus to measure cyclic behavior of backfill granular material behind bridge abutment*. The 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Hong Kong.

Abstract

Today, monopiles are the most typical foundation for offshore wind turbines. During their life-time large diameter, stiff piles are subjected to millions of small cyclic loads due to environmental forces. The long-term cyclic loading can change the granular structure of the soil surrounding the pile. This may change the resistance of the soil-pile system and lead to system failure. To estimate the displacement of the pile under axial cyclic loading, there is no universal standard method which is accepted. Therefore, to unify the study of long-term cycle loading on pile, the concept of degradation and cyclic stability diagram are adopted. In order to study the effect of physical parameters of pile, soil mechanical characteristic, stress and strain levels on soil-pile system behavior, the theories that is proposed by researchers who studied on this subject, have been used. To investigate the effect of the parameters such as length, stress level, pile diameter and soil relative density on soil-pile system behavior subjected to cyclic axial load, an efficient loading system has been installed and a series of small-scale test on galvanized piles has been performed. The soil, in which piles were embedded, was fine sand.

Keywords: monopile, cyclic axial load, pile displacement, fine sand, degradation of soil-pile system.



Shahrood University of Tecknology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

Evaluation of pile subjected to the cyclic axial loads in sand

By: Mehrad Tahvili

Supervisors:

Dr. Amir Bazrafshan Moghadam

Dr. Jafar Bolouri Bazaz

September 2018

