

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

مدلسازی گروه شمع حاوی شمع مایل تحت بارگذاری دینامیکی

نگارنده : شهاب شهریاری

استاد راهنما

دکتر رضا نادری

بهمن ۹۸

تقدیم به پدر و مادر عزیزم  
که به من درس بی نیازی آموختند

# تعهد نامه

اینجانب شهاب شهریاری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدلسازی گروه شمع حاوی شمع مایل تحت بارگذاری دینامیکی راهنمایی دکتر رضا نادری 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 شهاب شهریاری

## مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) 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

یکی از قدیمی ترین روش هایی که برای غلبه بر مشکلات پی سازی بر روی خاک های سست و همچنین انتقال بارهای سازه به خاک به نحوی که تنش های بیش از حد مجاز ایجاد نگردد استفاده از شمع ها یا پی های عمیق می باشد.

کاربرد روز افزون شمع ها در سازه هایی نظیر سکوه های نفتی، توربین های بادی دریایی و دکل های مخابراتی، افزایش اهمیت چگونگی رفتار شمع ها را در پی دارد.

در اغلب پروژه ها در صورت استفاده از شمع، باربری محوری نقش اصلی را ایفا می کند در صورتی که باربری جانبی آن تنها برای بار جانبی گذرا مانند زلزله بررسی می شود. اما در تعدادی از موارد نیز مانند سازه های ساحلی و فراساحلی، نیروی جانبی نقش اصلی را دارد و لذا از این جهت پاسخ شمع به بارگذاری جانبی از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

جهت کنترل بارهای جانبی استفاده از شمع های مایل به دلیل سختی و مقاومت جانبی نسبتاً بالای آنها در برابر بارهای جانبی مورد توجه ویژه ای قرار دارد. تحلیل رفتار شمع های مایل تحت اثر بارهای جانبی استاتیکی و چرخه ای یک مساله اندرکنش خاک - سازه است که از پیچیدگی خاصی برخوردار می باشد. به همین دلیل برای طراحی بهینه، نیاز به بررسی و عدم تعمیم رفتار شمع های قائم به شمع های مایل و نیز بررسی تفاوت مکانیزم گسیختگی خاک اطراف این دو نوع شمع ها احساس می گردد. در این راستا شناخت فاکتور و پارامتر های موجود در تحلیل و میزان تاثیر آنها، از اهمیت بسزایی برخوردار می باشد.

در این پژوهش ابتدا مطالعات و فعالیت های گذشته مرور و بررسی می شوند. سپس گروه شمع تحت بار جانبی دینامیکی به صورت عددی مدلسازی شده و تاثیر پارامترهای مختلف بر رفتار آن سنجیده می شود. ۴ گروه نمونه در این مدلسازی استفاده شده اند. ۱- تاثیر تغییر زاویه تمایل شمع ها تحت

بارگذاری دینامیکی ضربه ای ۲- تاثیر تغییر تراکم خاک تحت بارگذاری دینامیکی ضربه ای ۳- تاثیر تغییر قطر شمع تحت بارگذاری دینامیکی ضربه ای ۴- گروه شمع مایل تحت بار دینامیکی چرخه ای . در نهایت نتایج مدل سازی از نظر تغییر شکل شمع ، جابجایی خاک ، منحنی P-Y ، میزان نیروی برشی و لنگر خمشی در طول شمع ها مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: شمع ، گروه شمع ، شمع مایل ، بارگذاری جانبی ، بارگذاری دینامیکی ، اجزای

محدود

## فهرست مطالب

چکیده.....	۵
<b>فهرست شکل ها</b> .....	<b>ک</b>
<b>فهرست جدول</b> .....	<b>س</b>
<b>۱- مقدمه</b> .....	<b>۱</b>
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ بیان مسئله	۳
۳-۱ ضرورت انجام تحقیق	۴
۴-۱ هدف انجام تحقیق	۴
۵-۱ روش تحقیق	۵
۶-۱ فصل بندی پایان نامه	۵
<b>۲- معرفی مسئله و مروری بر مطالعات گذشته</b> .....	<b>۷</b>
۱-۲ مقدمه	۸
۲-۲ موارد استفاده از شمع ها	۸
۱-۲-۲-۱ دسته بندی شمع ها	۹
۱-۲-۲-۲ ۱-۱-۲-۲ شکل و ابعاد شمع ها	۱۰
۲-۱-۲-۲ ۲-۱-۲-۲ مصالح شمع ها	۱۰
۳-۱-۲-۲ ۳-۱-۲-۲ انواع بارهای وارده بر شمع	۱۳

۱۴	..... زاویه انحراف ۴-۱-۲-۲
۱۵	..... منفرد یا گروهی بودن شمع ها ۵-۱-۲-۲
۱۷	..... پیشینه تحقیق ۳-۲
۱۷	..... مطالعات تحلیلی ۱-۳-۲
۱۷	..... روش هانسن ۱-۱-۳-۲
۱۸	..... روش برامز ۲-۱-۳-۲
۱۹	..... روش منحنی های P-Y ۳-۱-۳-۲
۲۲	..... مطالعات آزمایشگاهی ۲-۳-۲
۲۵	..... مطالعات عددی ۳-۳-۲
۲۹	..... محاسبه بار ۴-۳-۲
۲۹	..... انرژی پهلویی ۱-۴-۳-۲
۳۰	..... سرعت پهلویی ۲-۴-۳-۲
۳۱	..... ضریب جرم $C_M$ ۳-۴-۳-۲
۳۳	..... ضریب خروج از مرکزیت ۴-۴-۳-۲
۳۴	..... ضریب شکل $C_C$ ۵-۴-۳-۲
۳۵	..... ضریب نرمی ۶-۴-۳-۲
۳۶	..... مقادیر فرض شده ۷-۴-۳-۲
۳۹	..... مدل سازی، نتایج مدل سازی و تفسیر آن ها -۳
۴۰	..... مقدمه ۱-۳



۴۰	مدلسازی	۲-۳
۴۰	مدل سازی جعبه آزمایش	۱-۲-۳
۴۴	مدل سازی شمع	۲-۲-۳
۴۶	مدل سازی نیرو	۳-۲-۳
۴۶	صحت سنجی	۳-۳
۴۸	بررسی نتایج مدل سازی گروه شمع	۴-۳
۴۸	تأثیر تغییر زاویه در گروه شمع	۱-۴-۳
۵۱	جابه جایی افقی شمع	۱-۱-۴-۳
۵۵	جابه جایی خاک	۲-۱-۴-۳
۵۷	منحنی های p-y	۳-۱-۴-۳
۶۰	خمش و برش در شمع	۴-۱-۴-۳
۶۷	تأثیر تغییر تراکم خاک در گروه شمع	۲-۴-۳
۶۹	جابه جایی افقی شمع ها	۱-۲-۴-۳
۷۲	جابه جایی خاک	۲-۲-۴-۳
۷۳	منحنی های p-y	۳-۲-۴-۳
۷۵	تأثیر تغییر قطر شمع در گروه شمع	۳-۴-۳
۷۵	جابه جایی افقی شمع	۱-۳-۴-۳
۷۸	جابه جایی خاک	۲-۳-۴-۳
۷۹	منحنی های p-y	۳-۳-۴-۳

۴-۴-۳	تأثیر تغییر نوع بارگذاری	۸۱
۴-۴-۳-۱	منحنی های p-y	۸۲
۴-	نتایج و پیشنهادات	۸۵
۴-۱	مقدمه	۸۶
۴-۲	نتایج کلی	۸۶
۴-۳	پیشنهادات	۸۷
	منابع	۸۸

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ استفاده از شمع مایل در معرض بار جانبی (Curtin et al., 2006) ..... ۹
- شکل ۲-۲ دسته‌بندی شمع‌ها از منظر شکل و ابعاد (الف) مقاطع طولی (ب) مقاطع عرضی (ج) ناحیه تحتانی شمع (Kezdi, 1975) ..... ۱۰
- شکل ۳-۲ مقاطع مختلف انواع شمع فلزی (الف) مقطع H شکل (ب) مقطع لوله‌ای جعبه مانند (Curtin et al., 2006) ..... ۱۱
- شکل ۴-۲ مکانیزم انتقال بار محوری در شمع‌ها (Basu, 2008) ..... ۱۴
- شکل ۵-۲ مکانیزم انتقال نیروهای جانبی و خمشی در شمع‌ها (Basu, 2008) ..... ۱۴
- شکل ۶-۲ دو نوع شمع مایل (Murthy, 2007) ..... ۱۵
- شکل ۷-۲ خطوط هم‌فشار در اطراف شمع (الف) شمع منفرد (ب) شمع‌های نزدیک به هم در گروه (ج) شمع‌های دور از هم در گروه (Murthy, 2007) ..... ۱۶
- شکل ۸-۲ ضرایب هانسن (Hansen, 1961) ..... ۱۸
- شکل ۹-۲ مکانیزم ایجاد مقاومت جانبی خاک (p) (McClelland and Focht, 1958) ..... ۱۹
- شکل ۱۰-۲ یک نمونه منحنی p-y (Pathak, 2011) ..... ۲۰
- شکل ۱۱-۲ تعریف ضریب اصلاحی  $P_m$  (Brown et al, 1988) ..... ۲۱
- شکل ۱۲-۲ تعریف ردیف‌های مختلف گروه شمع (Brown et al, 1988) ..... ۲۲
- شکل ۱۳-۲ پلان پهلوگیری ..... ۳۱
- شکل ۱۴-۲ تعریف پارامترهای ضریب  $C_M$  ..... ۳۲
- شکل ۱۵-۲ چرخش در حین پهلوگیری ..... ۳۴
- شکل ۱۶-۲ اثر ضریب شکل ..... ۳۵
- شکل ۱۷-۲ ضریب نرمی ..... ۳۵

- شکل ۱۸-۲ منحنی عملکرد ضربه‌گیر ..... ۳۷
- شکل ۱-۳ نمای سه بعدی از جعبه مدل و نحوه مش بندی برای گروه شمع قائم ..... ۴۱
- شکل ۲-۳ مش بندی جعبه نمونه در صفحه xy در تراز ۰/۰۰ برای زوایای مختلف شمع ..... ۴۱
- شکل ۳-۳ ابعاد مش بندی جعبه نمونه در ۱/۴ از صفحه xy در تراز ۰/۰۰ برای زوایای مختلف شمع ..... ۴۲
- شکل ۴-۳ ابعاد و نحوه مش بندی در صفحه XZ برای گروه شمع زاویه ۰ درجه ..... ۴۲
- شکل ۵-۳ ابعاد و نحوه مش بندی در صفحه XZ برای گروه شمع با زاویه ۷ درجه ..... ۴۳
- شکل ۶-۳ ابعاد و نحوه مش بندی در صفحه XZ برای گروه شمع با زاویه ۱۵ درجه ..... ۴۳
- شکل ۷-۳ المان هشت گرهی استفاده شده در مدلسازی ..... ۴۴
- شکل ۸-۳ نحوه آرایش شمع ها با زاویه قائم و ۷ درجه ..... ۴۵
- شکل ۹-۳ جهت اعمال نیرو به گروه شمع ..... ۴۶
- شکل ۱۰-۳ میزان جابجایی شمع برای مدل های متفاوت ..... ۴۷
- شکل ۱۱-۳ المان بندی جعبه مدل برای صحت سنجی ..... ۴۸
- شکل ۱۲-۳ نمودار نیروی افقی وارده به نمونه ها ..... ۵۱
- شکل ۱۳-۳ تغییر شکل افقی شمع ها برای مدل D0 ..... ۵۲
- شکل ۱۴-۳ تغییر شکل افقی شمع ها برای مدل D7 برای شمع با زاویه منفی ..... ۵۳
- شکل ۱۵-۳ تغییر شکل افقی شمع ها برای مدل D7 با زاویه مثبت ..... ۵۳
- شکل ۱۶-۳ تغییر شکل افقی شمع ها برای مدل D15 با زاویه منفی ..... ۵۴
- شکل ۱۷-۳ تغییر شکل افقی شمع ها برای مدل D15 با زاویه مثبت ..... ۵۴
- شکل ۱۸-۳ تغییر شکل افقی شمع ها باز زاویه منفی برای مدل هر سه مدل ..... ۵۵
- شکل ۱۹-۳ تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای خاک با شمع ۰ درجه ..... ۵۶
- شکل ۲۰-۳ تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای خاک با شمع ۷ درجه ..... ۵۶

- شکل ۳-۲۱ تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای خاک با شمع ۱۵ درجه ..... ۵۷
- شکل ۳-۲۲ منحنی  $p-y$  نمونه D0 ..... ۵۸
- شکل ۳-۲۳ منحنی  $p-y$  نمونه D7 ..... ۵۹
- شکل ۳-۲۴ منحنی  $p-y$  نمونه D15 ..... ۵۹
- شکل ۳-۲۵ منحنی  $p-y$  نمونه D15 ..... ۶۰
- شکل ۳-۲۶ نیروی برشی ایجاد شده در طول شمع سمت چپ برای مدل D0 ..... ۶۱
- شکل ۳-۲۷ نیروی برشی ایجاد شده در طول شمع سمت راست برای مدل D0 ..... ۶۱
- شکل ۳-۲۸ لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع سمت چپ برای مدل D0 ..... ۶۲
- شکل ۳-۲۹ لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع سمت راست برای مدل D0 ..... ۶۲
- شکل ۳-۳۰ نیروی برشی ایجاد شده در طول شمع سمت چپ برای مدل D7 ..... ۶۳
- شکل ۳-۳۱ نیروی برشی ایجاد شده در طول شمع سمت راست برای مدل D7 ..... ۶۳
- شکل ۳-۳۲ لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع سمت چپ برای مدل D7 ..... ۶۴
- شکل ۳-۳۳ لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع سمت راست برای مدل D7 ..... ۶۴
- شکل ۳-۳۴ نیروی برشی ایجاد شده در طول شمع سمت چپ برای مدل D15 ..... ۶۵
- شکل ۳-۳۵ نیروی برشی ایجاد شده در طول شمع سمت راست برای مدل D15 ..... ۶۵
- شکل ۳-۳۶ لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع سمت چپ برای مدل D15 ..... ۶۶
- شکل ۳-۳۷ لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع سمت راست برای مدل D15 ..... ۶۶
- شکل ۳-۳۸ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل Dr75 با زاویه منفی ..... ۷۰
- شکل ۳-۳۹ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل Dr75 با زاویه منفی ..... ۷۰
- شکل ۳-۴۰ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل Dr45 برای شمع با زاویه منفی ..... ۷۱
- شکل ۳-۴۱ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل Dr45 با زاویه مثبت ..... ۷۲
- شکل ۳-۴۲ تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای خاک با تراکم ۷۵٪ ..... ۷۲

- شکل ۳-۴۳ تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای خاک با تراکم ۴۵٪..... ۷۳
- شکل ۳-۴۴ منحنی p-y نمونه D75..... ۷۴
- شکل ۳-۴۵ منحنی p-y نمونه D45..... ۷۴
- شکل ۳-۴۶ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل R70 با زاویه منفی ..... ۷۶
- شکل ۳-۴۷ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل R70 با زاویه مثبت ..... ۷۶
- شکل ۳-۴۸ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل R50 برای شمع با زاویه منفی ..... ۷۷
- شکل ۳-۴۹ تغییر شکل افقی شمع‌ها باز زاویه مثبت برای مدل هر دو مدل ..... ۷۷
- شکل ۳-۵۰ تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای برای گروه R70 ..... ۷۸
- شکل ۳-۵۱ تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای برای گروه R50 ..... ۷۹
- شکل ۳-۵۲ منحنی p-y نمونه R70..... ۸۰
- شکل ۳-۵۳ منحنی p-y نمونه R50..... ۸۰
- شکل ۳-۵۴ نمودار نیروی افقی وارده به نمونه L500..... ۸۲
- شکل ۳-۵۵ منحنی p-y نمونه L500..... ۸۲

## فهرست جدول

- جدول ۱-۲ ضریب تشدید در شرایط غیرعادی ..... ۳۰
- جدول ۲-۲ سرعت پهلوگیری شناورها ..... ۳۱
- جدول ۳-۲ تعریف ضریب جرم  $C_M$  ..... ۳۲
- جدول ۴-۲ تعریف ضریب جرم  $C_B$  ..... ۳۳
- جدول ۵-۲ مقادیر  $C_C$  ..... ۳۴
- جدول ۶-۲ ضریب نرمی ..... ۳۶
- جدول ۷-۲ مقادیر مفروض جهت محاسبه نیروی پهلوگیری ..... ۳۶
- جدول ۱-۳ خصوصیات نمونه‌های بخش تغییرات زاویه ..... ۴۵
- جدول ۲-۳ خصوصیات نمونه‌های بخش تغییرات زاویه ..... ۴۹
- جدول ۳-۳ خصوصیات خاک بخش تغییرات زاویه ..... ۴۹
- جدول ۴-۳ خصوصیات نمونه‌های بخش تغییرات زاویه ..... ۶۸
- جدول ۵-۳ خصوصیات خاک بخش تغییرات تراکم خاک ..... ۶۸
- جدول ۶-۳ خصوصیات نمونه‌های بخش تغییرات قطر ..... ۷۵
- جدول ۷-۳ خصوصیات نمونه‌های بخش بارگذاری چرخه‌ای ..... ۸۱

# ۱- فصل اول

مقدمه



## ۱-۱ مقدمه

شمع‌ها جزو پی‌های عمیق هستند که در مواردی که لایه‌های خاک در سطح زمین توانایی تحمل نیروهای وارده را ندارند مورد استفاده قرار می‌گیرند. این عناصر ستونی لاغر در حالت‌های قائم و مایل مورد استفاده قرار می‌گیرند و وظیفه آنها انتقال نیرو به لایه‌های مقاوم‌تر خاک در اعماق زمین می‌باشد. استفاده از شمع‌ها به صورت تک و یا گروهی، به دلایل مختلف در سازه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند. یکی از مهمترین موارد موثر در طراحی شمع‌ها نوع بار وارده به آن می‌باشد. به طور کلی می‌توان شمع‌ها را از نظر نیروی وارده به آن به دو دسته تقسیم کرد:

۱. شمع یا گروه شمع تحت بار محوری

۲. شمع یا گروه شمع تحت بار جانبی

اگر نیروی وارد به شمع محوری باشد، به علت سختی زیاد شمع نسبت به خاک، شمع به صورت یک عضو صلب فرض می‌شود. در این حالت مسئله با نوشتن معادلات تعادل قابل حل می‌باشد. ولی اگر بار جانبی یا ممان در سرشمع اثر کند، در این حالت مقاومت جانبی از طریق ترکیب سیستم خاک و شمع تامین می‌شود. به عبارت دیگر در این وضعیت سختی خمشی شمع تعیین کننده خواهد بود. حال اگر شمع صلب باشد مقاومت برشی خاک تعیین کننده بار نهایی سیستم می‌شود در حالی که اگر شمع انعطاف پذیر باشد سختی خمشی شمع نیز در معادلات شرکت می‌کند.

بار جانبی وارد به شمع‌ها عموماً ناشی از مواردی از قبیل فشار خاک پشت دیوار حائل، نیروی باد وارد به سازه‌هایی مثل توربین بادی، ضربه ناشی از کشتی، ضربه موج، ضربه یخ و یا نیروهای ثقلی دارای خروج از مرکزیت می‌باشد. حال در پروژه‌های ساحلی و فراساحلی نیروی جانبی، نیروی اصلی تعیین کننده است. نیروی کشتی در سازه‌های پهلوگیری و نیروی باد وارد بر توربین‌های فراساحلی از جمله مهمترین موارد این نیروها هستند. لذا پاسخ شمع به بارگذاری جانبی و بارگذاری دینامیکی از اهمیت

ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. با این حال بررسی رفتار شمع تحت بار جانبی دینامیکی در موارد محدود بررسی شده است (Ginnakos et al, 2012).

آب و هوای مناطق فراساحلی و بررسی نوع بارگذاری از اهمیت قابل توجهی برخوردار است زیرا نوع بارگذاری باعث تغییرات قابل توجه در اندرکنش خاک و سازه می‌شود و باعث کاهش ظرفیت باربری شمع می‌شود (Basack and Dey, 2011).

رفتار شمع تحت بارگذاری جانبی از عوامل زیادی تاثیر می‌پذیرد که این عوامل عبارتند از (امیری،

۱۳۸۴):

- نحوه بارگذاری شامل استاتیکی، سیکلی و دینامیکی
- سرعت بارگذاری (کوتاه یا بلند مدت بودن)
- زبری بدنه شمع (ضریب اصطکاک بین خاک و شمع)
- هندسه مقطع شمع
- رفتار مصالح شمع و در نظر گرفتن رفتار غیر خطی آنها در نیروهای خیلی زیاد
- مشخصات خاک شامل: ضریب الاستیسیته، مقاومت برشی، غیر همگن بودن خاک، تراکم خاک، تخلخل و ...
- شرایط مرزی برای شمع از جمله گیرداری سرشمع
- در نظر گرفتن اثر همزمانی نیروی محوری و جانبی

## ۲-۱ بیان مسئله

تحلیل رفتار گروه شمع مایل تحت بار جانبی، یکی موضوعات اندرکنش خاک و سازه می‌باشد که

در آن تغییر مکان شمع وابسته به پاسخ خاک و پاسخ خاک تابعی از تغییر شکل شمع است. بنابراین تغییر شکل شمع باید توسط معادلات دیفرانسیل محاسبه گردد. در حال حاضر آسان‌ترین روشی که به تحلیل سریع‌تر و آسان‌تر نسبت به سایر روش‌ها می‌پردازد، استفاده از منحنی  $p-y$  می‌باشد. یک روش دیگر برای تحلیل مسئله استفاده از روش‌های عددی می‌باشد که معمولاً وقت‌گیر هستند. لذا ما در این پژوهش بر آنیم تا با مدلسازی عددی شمع به وسیله نرم افزار رایانه‌ای به بررسی پاسخ گروه شمع تحت بار دینامیکی بپردازیم و پارامترهای موثر در گروه رفتار شمع را معرفی نماییم.

### ۳-۱ ضرورت انجام تحقیق

با توجه به مطالب ذکر شده در بالا و اهمیت شناخت کامل از رفتار شمع تحت بار جانبی، باید درک مناسبی از تاثیر پارامترهای مختلف در رفتار شمع صورت گیرد تا به کمک آن بتوان طراحی هرچه دقیق‌تری صورت پذیرد. به همین دلیل با مدلسازی عددی، میدانی و یا آزمایشگاهی باید به پیش‌بینی مناسبی از عملکرد شمع پرداخت.

### ۴-۱ هدف انجام تحقیق

در این پژوهش با مدلسازی عددی گروه شمع مایل تحت بار دینامیکی سعی بر مطالعه تاثیرگذاری پارامترها و بررسی و تحلیل نتایج حاصل از آن داریم و سعی شده است تا در حد قابل قبول از پارامترهای تاثیرگذار در مدلسازی استفاده شود. این پژوهش با هدف بررسی رفتار گروه شمع با زوایای تمایل مختلف در مقابل بار دینامیکی ضربه و بار دینامیکی چرخه‌ای انجام شده است. سپس تفاوت رفتار شمع در حالت‌های مختلف بررسی و با هم مقایسه می‌شود و درباره علت رفتار رخ داده و دلایل تفاوت‌ها بحث خواهد شد. به طور کلی محورهای مورد بررسی پژوهش را می‌توان به موارد زیر تقسیم‌بندی کرد:

- بررسی تاثیر تغییر زاویه شمع‌ها در جابجایی جانبی خاک و گروه شمع

- بررسی تاثیر تغییر قطر شمع ها در جابجایی جانبی خاک و گروه شمع
- بررسی تاثیر تغییر تراکم خاک در جابجایی جانبی خاک و گروه شمع
- بررسی عملکرد گروه شمع مایل تحت بارگذاری چرخه ای

## ۵-۱ روش تحقیق

پس از مرور مطالعات گذشته و جمع آوری داده ها و اطلاعات مربوطه ، مدلسازی اندرکنش شمع و خاک در نرم افزار رایانه ای Opensees<sup>®</sup> (مختصر The open system for earthquake engineering simulation) ورژن ۲,۴,۵ انجام شده است. این نرم افزار به علت متن باز بودن، انجام آنالیز المان محدود به صورت ماکرو، سرعت تحلیل بالا و ارائه نتایج به صورت گسترده مورد استقبال قرار گرفته است. از سوی ویژگی هایی از جمله نداشتن محیط گرافیکی و رابط کاربر چه در مدلسازی و چه در ارائه نتایج را می توان از معایب آن دانست.

مدلسازی ابتدا تحت بارگذاری استاتیکی برای تک شمع قائم و سپس تک شمع مایل انجام شده و تاثیر بار دینامیکی به مدل اضافه گردیده است. در انتها نیز گروه شمع ها مدل شده و پارامترهایی از جمله تراکم خاک ، قطر شمع ، زاویه انحراف نسبت به محور قائم و همچنین تغییر در نوع بارگذاری مورد بررسی قرار گرفته اند. خروجی های برنامه با استفاده از نرم افزار های Matlab 7.12.0 (R2011a) و Tecplot 360 EX 2019 R1 نشان داده شده اند.

## ۶-۱ فصل بندی پایان نامه

فصل اول که از پیش روی گذشت به معرفی مقدمه و کلیاتی از این پژوهش، شامل معرفی شمع تحت بار جانبی ضرورت و هدف انجام پژوهش حاضر پرداخت.

فصل دوم به بررسی انواع شمع‌ها و حالت‌های بارگذاری می‌پردازد.

در فصل سوم به معرفی روش‌های تحلیل شمع تحت بار جانبی شامل روش‌های عددی و روش‌های تحلیلی می‌پردازد و کاستی‌های روش‌های بیان شده را بیان می‌نماید.

در فصل چهارم در ابتدا به معرفی روش تحقیق شامل خصوصیات مدلسازی خاک و شمع و خصوصیات نیروهای وارد شده به شمع پرداخته می‌شود. سپس به بررسی صحت نتایج از طریق مقایسه آنها با نتایج قابل اطمینان پرداخته و در نهایت به ارائه نتایج و تحلیل و بررسی بر روی آنها خواهیم پرداخت.

در نهایت در فصل پنجم، جمع‌بندی نتایج پژوهش و پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده، ارائه می‌شود.

## ۲- فصل دوم

معرفی مسئله و مروری بر

مطالعات گذشته

## ۱-۲ مقدمه

شالوده به آن بخش از سازه گفته می‌شود که بارهای وارده از سازه را به خاک زیرین انتقال می‌دهد. شمع‌ها اعضایی از جنس فولاد، بتن، بتن مسلح، و چوب می‌باشند که در صورت مناسب نبودن ظرفیت باربری زمین برای استفاده از شالوده‌های سطحی، از آنها برای ساخت شالوده‌های عمیق (شالوده های شمعی) استفاده می‌شود. مخارج احداث شالوده‌های عمیق خیلی بیشتر از شالوده‌های سطحی است. علیرغم مخارج بیشتر، در عمل موارد متعددی وجود دارد که جهت کنترل نشست و عوامل دیگر، از شالوده های عمیق لازم است.

## ۲-۲ موارد استفاده از شمع ها

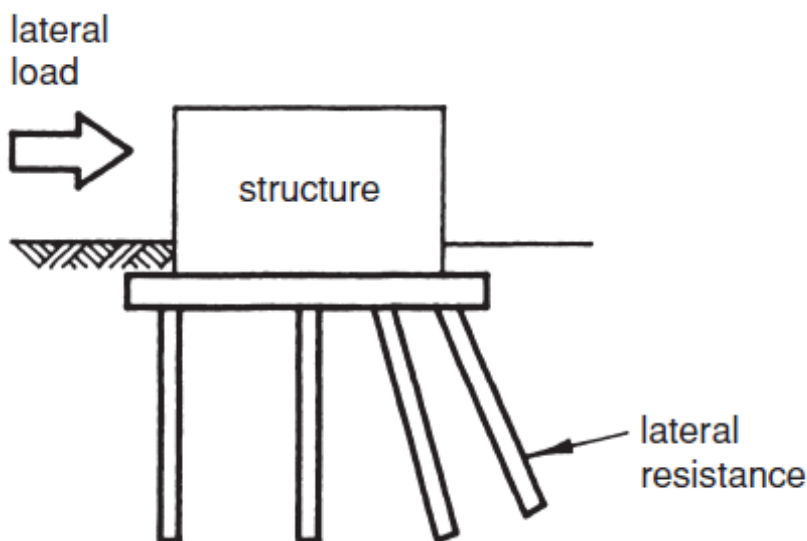
از شمع‌ها به دلایل زیادی استفاده می‌گردد که نمونه‌هایی از این دلایل در زیر آورده شده است:

۱. وقتی که لایه یا لایه‌های فوقانی خاک دارای قابلیت فشرده‌گی زیاد و یا خیلی ضعیف باشند، به‌طوری که نتوان از شالوده سطحی برای توزیع بار ساختمان استفاده کرد، شالوده‌های عمیق برای انتقال بار به لایه‌های تحتانی محکم‌تر و یا سنگ بستر مورد استفاده قرار می‌گیرند (Murthy, 2007).

۲. در خیلی از موارد، در منطقه موردنظر برای احداث ساختمان با خاک مسئله‌دار مانند خاک‌های قابل تورم، فروریزش یا روانگرا روبرو می‌شویم. این لایه‌ها ممکن است دارای ضخامت قابل توجهی باشند. خاک‌های قابل تورم در اثر افزایش یا کاهش میزان رطوبت، تورم و یا کاهش حجم پیدا می‌کنند. فشار تورم چنین خاک‌هایی ممکن است به طرز قابل توجهی زیاد باشد. اگر در چنین خاک‌هایی از شالوده های سطحی استفاده شود، ساختمان ممکن است با صدمات جدی روبرو شود. در این حالت شالوده‌های شمعی که از لایه قابل تورم عبور کرده و وارد لایه پایدار شده‌اند، می‌توانند مورد توجه قرار گیرند.

خاک‌هایی نظیر ماسه بادی دارای طبیعت فروریزی هستند. وقتی که چنین خاک‌هایی تحت افزایش رطوبت قرار گیرند، اسکلت خاک می‌تواند دچار شکست گردد. یک کاهش ناگهانی در نسبت تخلخل خاک، باعث نشست زیاد سازه‌ای می‌شود که توسط شالوده سطحی حمل می‌شود. در چنین حالتی، شالوده شمعی که از لایه سست عبور کرده و وارد لایه پایدار زیر آن شده، می‌تواند به عنوان راه حل مسئله مورد توجه قرار گیرد. خاک‌های دانه‌ای اشباع در حین زلزله مستعد روانگرا شدن می‌باشند. استفاده از شالوده‌های شمعی یکی از راه‌های ایمن کردن سازه در این حالت‌ها می‌باشد.

۳. در مواردی که فونداسیون طبق شکل (۱-۲) در معرض بار جانبی قرار گرفته باشد، استفاده از شمعی‌های مایل اقتصادی‌تر است (Curtin et al., 2006).



شکل ۱-۲ استفاده از شمعی‌های مایل در معرض بار جانبی (Curtin et al., 2006)

## ۱-۲-۲ دسته بندی شمعیها

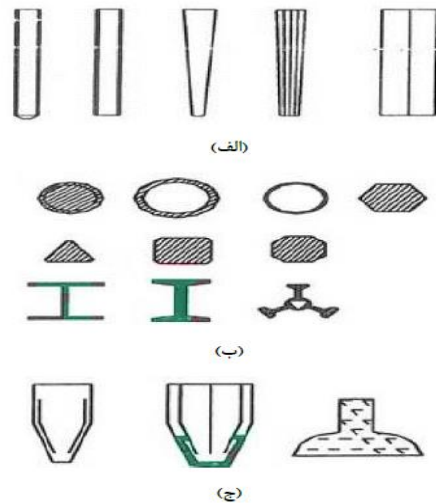
شمعی‌ها را می‌توان بر اساس شاخص‌های مختلفی دسته‌بندی کرد که مواردی از آن در زیر بیان

شده است.



## ۲-۲-۱-۱ شکل و ابعاد شمع ها

شمع‌ها در مقطع طولی می‌توانند به شکل‌های استوانه‌ای و مخروطی باشند. همچنین، نوع مخروطی شمع می‌تواند به دو صورت شمع مخروطی با باریک‌شوندگی تند و شمع مخروطی با باریک‌شوندگی ملایم تقسیم شود. مقطع عرضی شمع‌ها می‌تواند شامل دایره، مربع، ۶ ضلعی، ۸ ضلعی، ۱۶ ضلعی، H شکل و مثلثی باشند که می‌توانند به صورت تو خالی و تو پر به کار روند. ناحیه تحتانی شمع می‌تواند به صورت تیز و یا پهن باشد. همچنین، در بعضی موارد از طوقه‌های تیز و یا پهن در انتهای شمع به کار می‌رود و انتهای شمع می‌تواند باز یا بسته باشد (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲ دسته‌بندی شمع‌ها از منظر شکل و ابعاد (الف) مقاطع طولی (ب) مقاطع عرضی (ج) ناحیه تحتانی شمع

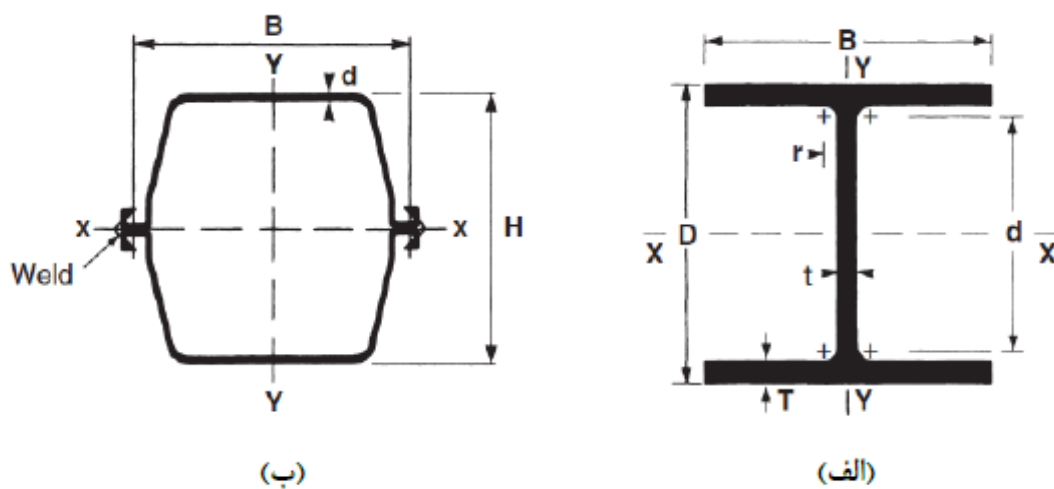
(Kezdi, 1975)

## ۲-۲-۱-۲ مصالح شمع ها

شمع‌ها بر حسب مصالحی که از آن ساخته می‌شوند، دارای انواع زیر هستند:

شمع‌های فولادی: انواع معمول شمع‌های فولادی، شمع‌های لوله‌ای و شمع‌های H و I شکل می‌باشند (شکل ۲-۳). هر چند که می‌توان از تیرآهن‌های با نیم‌رخ I شکل برای شمع کوبی استفاده کرد، لیکن تیرآهن با نیم‌رخ H به علت مساوی بودن ضخامت بال و جان ترجیح داده می‌شوند. شمع‌های لوله‌ای نیز در دو حالت انتهای بسته و انتهای باز به زمین کوبیده می‌شوند. در خیلی از

حالات، شمع‌های لوله‌ای بعد از کوبیده شدن پر می‌شوند. در صورتی که طول مورد نیاز برای شمع بزرگ‌تر از طول یک شاخه شود، شمع‌های فولادی را به وسیله جوش و یا پرچ به یکدیگر وصله می‌کنند. وقتی که انتظار لایه‌ای سخت نظیر شن متراکم، شیل و سنگ نرم می‌رود، در نوک شمع فولادی از کفشک استفاده می‌شود. در زمین‌ها باتلاقی، خاک‌های نباتی، مناطق ساحلی و سایر خاک‌های خورنده، املاح خاک و آب می‌توانند شمع‌های فولادی را تحت حملات شیمیایی قرار داده و خوردگی ایجاد نمایند.



شکل ۲-۳ مقاطع مختلف انواع شمع فلزی (الف) مقطع H شکل (ب) مقطع لوله‌ای جعبه مانند (Curtin et al., 2006)

- شمع‌های بتنی: در عمل، شمع‌های بتنی به دو صورت مورد استفاده قرار می‌گیرند: (الف) شمع‌های پیش‌ساخته: شمع‌های پیش‌ساخته را می‌توان با استفاده از میلگردهای معمولی ساخت. مقطع آن‌ها به صورت مربع یا هشت ضلعی است. میلگردها به منظور مقاوم نمودن شمع در مقابل خمش تولید شده و در هنگام حمل و نقل، بلند کردن و اعمال نیروی جانبی به شمع و همچنین افزایش مقاومت فشاری، مورد استفاده قرار می‌گیرند. شمع‌های پیش‌ساخته در طول مورد نظر ساخته شده و تحت شرایط مرطوب به عمل

می‌آیند تا به مقاومت موردنظر برسند. پس از آن به محل کوبیدن حمل می‌شوند. شمع‌های پیش‌ساخته را می‌توان با استفاده از کابل‌های پیش‌تنیدگی پر مقاومت، به صورت پیش‌تنیده درآورد. (ب) شمع‌های درجاریز: شمع‌های بتنی درجاریز بدین صورت اجرا می‌شوند که ابتدا چاهی در زمین به وسیله دست یا ماشین حفر می‌شود و سپس قفس آرماتورها درون چاه قرار داده شده و داخل آن با بتن پر می‌شود. امروزه شمع‌های درجا به روش‌ها و انواع مختلف اجرا می‌شوند و اکثر آن‌ها در انحصار شرکت خاصی که ابداع کننده اولیه آن‌ها می‌باشد، قرار دارند. شمع‌های درجاریز در دو گروه اصلی با غلاف و بدون غلاف جای می‌گیرند که هر دو گروه می‌توانند دارای نوک پهن شده (پداستال) باشند. شمع‌های درجاریز غلاف‌دار بدین صورت اجرا می‌شوند که ابتدا یک لوله فولادی به زمین کوبیده شده و پس از رسیدن به عمق مورد نظر، مصالح داخلی آن خالی شده و داخل لوله پر از بتن می‌شود. لوله را می‌توان با قرار دادن یک سنبه در داخل آن کوبید و پس از رسیدن به عمق مورد نظر، سنبه را خارج کرد. برای سر پهن کردن شمع (ایجاد پداستال)، پس ریختن مقداری بتن در نوک شمع، با رها کردن وزنه از ارتفاع، آن را می‌کوبند تا از طرفین پهن شود. برای اجرای شمع بدون غلاف، ابتدا غلاف در زمین کوبیده شده و سپس هم‌زمان با بتن‌ریزی در داخل غلاف، غلاف به تدریج به بیرون کشیده می‌شود.

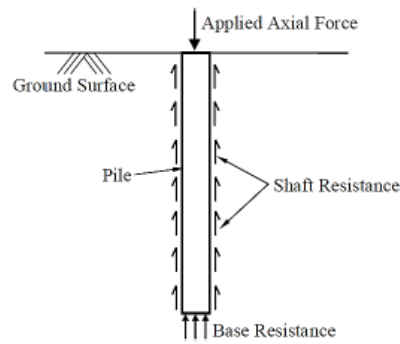
- شمع‌های چوبی: شمع‌های چوبی تنه‌های درخت‌های سالم، صاف و بلند می‌باشند که شاخ و برگ آن زرد شده و سطح آن پس از کندن پوست، به دقت تراشیده شده است. حداکثر طول اغلب شمع‌های چوبی بین ۱۱ تا ۲۱ متر می‌باشد. اگر شمع چوبی در خاک کاملاً اشباع کوبیده شود، عمر آن تقریباً بی‌نهایت خواهد بود. لیکن در آب و هوای دریایی، شمع‌های چوبی تحت حملات ارگانیک‌های مختلف قرار گرفته و ظرف چند ماه صدمات جدی در آنها ظاهر می‌شود. شمع چوبی در بالای سطح آب زیرزمینی، تحت

حملات حشرات قرار می‌گیرند. با انجام بعضی اصطلاحات، مثلاً محافظت آن‌ها توسط روغن کروزوت، می‌توان عمر آن‌ها را افزایش داد.

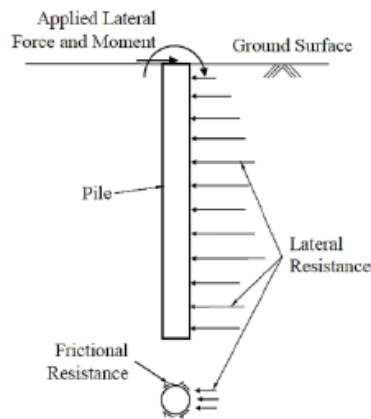
- شمع‌های مرکب (مختلط): در شمع‌های مرکب، قسمت‌های فوقانی و تحتانی شمع از دو مصالح مختلف ساخته می‌شوند. به عنوان مثال شمع‌های مرکب ممکن است از فولاد و بتن و یا چوب و بتن ساخته شوند. شمع‌های مختلط فولاد و بتن مرکب از قسمت تحتانی فولاد و قسمت فوقانی بتن درجا می‌باشند. این نوع شمع وقتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که طول شمع لازم برای تأمین ظرفیت باربری از ظرفیت شمع بتنی در جای ساده تجاوز کند. شمع‌های مختلط چوب و بتن دارای قسمت تحتانی چوبی می‌باشند که به طور دائم در سفره آب زیرزمینی قرار دارد و قسمت فوقانی آن‌ها از بتن است. در هر صورت ایجاد وصله در محل تلاقی دو مصالح مشکل بوده و به همین علت است که شمع‌های مختلط دارای کاربرد وسیعی نمی‌باشند.

## ۲-۱-۳ انواع بارهای وارده بر شمع

شمع‌ها معمولاً برای انتقال بارهای قائم (محوری) که عمدتاً ناشی از گرانش هستند (مثل وزن روسازه)، مورد استفاده قرار می‌گیرند. مواردی که از شمع به عنوان شالوده استفاده شده است شامل ساختمان‌های بلند، پل‌ها، اسکله‌ها، سدها، برج‌های مخابراتی و سازه‌های حایل زمین، می‌باشند. در تمامی این سازه‌ها، شمع‌ها فقط بار محوری را تحمل نمی‌کنند، بلکه اغلب در معرض نیروهای جانبی (افقی) و خمشی نیز هستند. در واقع، سازه‌هایی وجود دارد (از قبیل سکوه‌های نفتی، سازه‌های حایل زمین، اسکله‌ها و ...) که در آنها کاربرد اولیه شمع‌ها انتقال بارهای جانبی به زمین است (Basu, 2008). مکانیزم انتقال نیروهای استاتیکی قائم در شکل (۲-۴) و مکانیزم انتقال نیروهای افقی و خمشی در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.



شکل ۲-۴ مکانیزم انتقال بار محوری در شمع‌ها (Basu,2008)

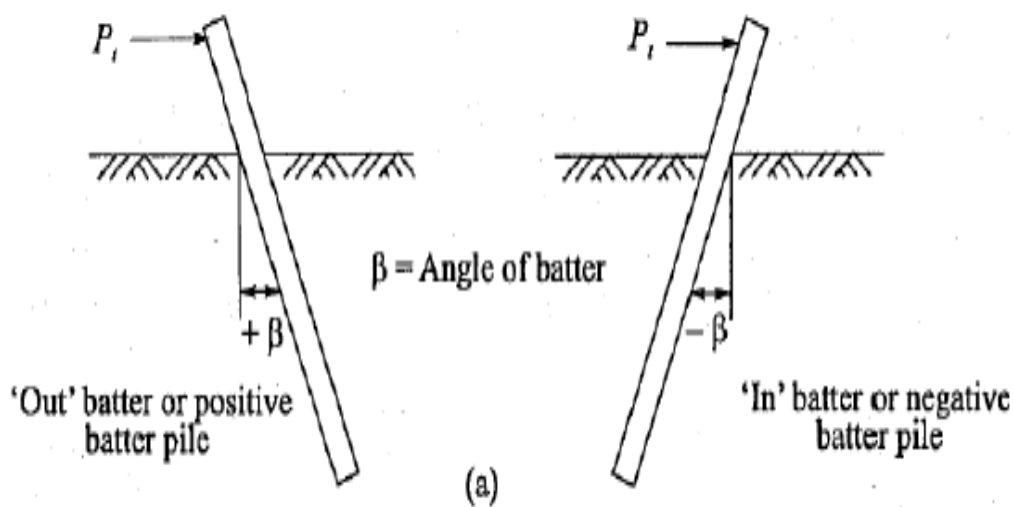


شکل ۲-۵ مکانیزم انتقال نیروهای جانبی و خمشی در شمع‌ها (Basu,2008)

## ۲-۱-۲-۲ زاویه انحراف

شمع‌ها بر اساس زاویه نصبشان به دو دسته شمع‌های قائم و مایل تقسیم می‌شوند (Murthy, 2007). شمع مایل یکی از موضوعات مورد بحث در حیطه مهندسی پی سازی است که نظرات متفاوتی در مورد آن وجود دارد. دانشمندان تحقیقات اندکی بر روی رفتار شمع‌های مایل انجام داده‌اند و نتایج ارائه شده در پارای موارد با هم در متناقض هستند. استفاده از شمع‌های مایل یکی از روش‌های کاهش تغییر مکان جانبی گروه‌های شمع تحت اثر بارهای جانبی است. تحت اثر بارهای قائم و جانبی، رفتار شمع‌های مایل و شمع‌های قائم متفاوت است. لذا تعمیم رفتار شمع‌های قائم به شمع‌های مایل و نیز تئوری یکسان بودن مکانیزم گسیختگی خاک اطراف این دو نوع شمع مبنای علمی ندارد و فقط به دلیل ناشناخته بودن رفتار شمع‌های مایل این تعمیم صورت می‌پذیرد. در نتیجه مقایسه شمع‌های مایل

و قائم تحت اثر بارهای محوری و جانبی از موضوعات مهمی است که می‌تواند به شناخت بیشتر رفتار شمع‌های مایل و طراحی بهینه در محیط‌های حرفه‌ای توسط مهندسان کمک کند. شمع‌های مایل بسته به نوع گسیختگی خاک اطرافشان به دو دسته شمع‌های مایل مثبت (لغزش گوه گسیختگی به سمت بالای شمع) و شمع‌هایی مایل منفی (لغزش گوه گسیختگی به سمت پایین شمع) تقسیم می‌شوند (Tschebotarioff, 2007). شکل (۶-۲) دو نوع شمع مایل را نشان می‌دهد. از شمع‌های مایل منفی به دلیل مقاومت بالا در مقابل بارهای جانبی استاتیکی و سیکلیک به طور گسترده استفاده می‌شود. بررسی رفتار شمع‌های مایل تحت اثر بارهای جانبی استاتیکی و سیکلیک یک مسأله اندرکنش خاک - سازه است که از پیچیدگی خاصی برخوردار است.

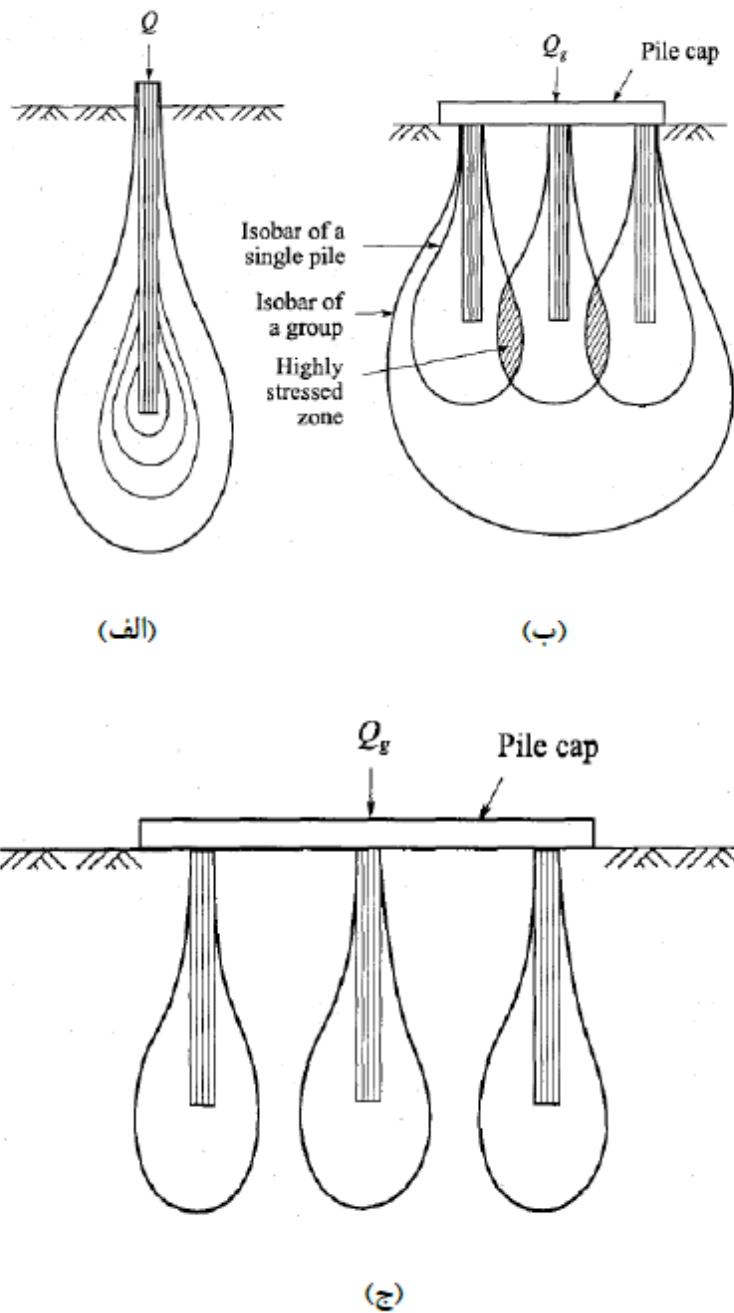


شکل ۶-۲ دو نوع شمع مایل (Murthy, 2007).

## ۵-۱-۲-۲ منفرد یا گروهی بودن شمع‌ها

شمع‌ها معمولاً به صورت گروهی استفاده می‌شوند ولی در بعضی موارد با توجه به نوع خاک، فاصله شمع‌ها از یکدیگر، صلبیت و ضخامت سر شمع، عملکرد آنها به صورت شمع منفرد می‌باشد (امیدعلی و همکاران، ۱۳۸۷). رفتار گروه شمع با رفتار شمع منفرد متفاوت است (شکل ۷-۲). شمع‌هایی که در

یک گروه به صورت نزدیک به هم واقع شده‌اند، ناحیه تنش بزرگی را می‌توانند ایجاد کنند. این ناحیه "هم‌پوشانی تنش‌ها" نامیده می‌شود. به هر حال، رفتار یک شمع منفرد، معمولاً به عنوان یک راهنما برای تعیین رفتار گروه در نظر گرفته می‌شود (Murthy, 2007).



شکل ۷-۲ خطوط هم‌فشار در اطراف شمع (الف) شمع منفرد (ب) شمع‌های نزدیک به هم در گروه (ج) شمع‌های دور

از هم در گروه (Murthy, 2007)

## ۳-۲ پیشینه تحقیق

مطالعات انجام شده بر روی رفتار شمع‌های قائم و مایل تحت بار جانبی را می‌توان در ۳ گروه کلی مطالعات تحلیلی، مطالعات آزمایشگاهی و مطالعات عددی، تقسیم‌بندی کرد.

### ۱-۳-۲ مطالعات تحلیلی

در زمینه مطالعات تحلیلی روش‌های مختلفی ارائه شده است؛ از میان این روش‌ها، روش برینچ-هانسن و روش برامز برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی با مقاومت جانبی و روش منحنی‌های  $p-y$  برای محاسبه تغییر شکل‌های قابل قبول در بارهای سرویسی، از معروف‌ترین روش‌ها هستند که تا امروز کاربرد زیادی داشته‌اند.

### ۱-۱-۳-۲ روش هانسن

این روش بر پایه فشار خاک و قابل کاربرد برای خاک‌های دارای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی و همچنین برای خاک‌های لای ای می‌باشد روش هانسن تنها برای شمع کوتاه قابل کاربرد است. در این روش با سعی و خطا علاوه بر ظرفیت باربری جانبی شمع، نقطه دوران نیز قابل محاسبه است. ظرفیت باربری جانبی شمع بر اساس رابطه (۱-۲) در این روش بدست می‌آید:

$$P_{ux} = \sigma_{vx} k q + ck_c \quad (1-2)$$

که در آن:

$P_{ux}$ : مقاومت جانبی نهایی خاک ( $\text{KN/m}^2$ )

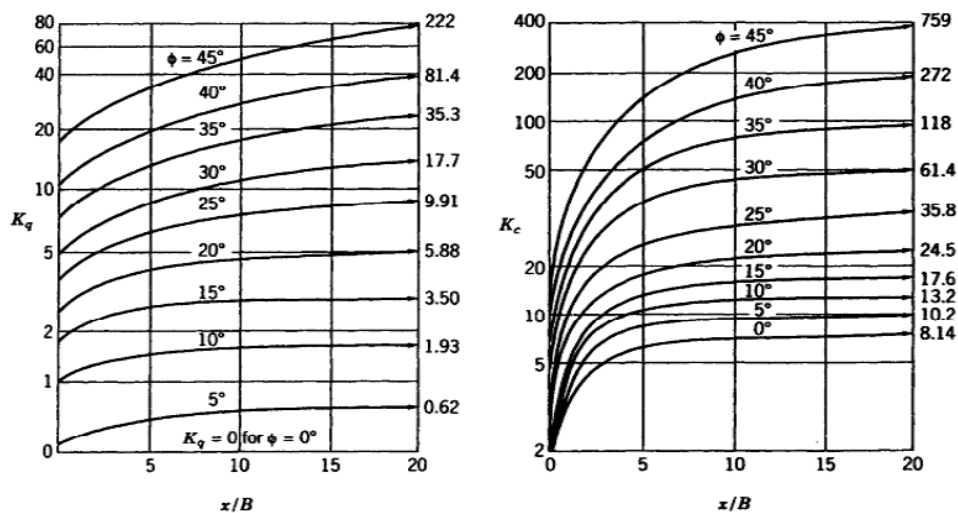
$\sigma_{vx}$ : فشار مؤثر قائم مصالح رویی ( $\text{KN/m}^2$ )

$c$ : چسبندگی ( $\text{KN/m}^2$ )



$k_q$ : ضریب برآیند فشار زمین ناشی از فشار مؤثر قائم مصالح رویی (بدون واحد) (شکل ۸-۲)

$k_c$ : ضریب برآیند فشار زمین ناشی از چسبندگی (بدون واحد) (شکل ۸-۲)



شکل ۸-۲ ضرایب هانسن (Hansen, 1961)

## ۲-۱-۳-۲ روش برامز

روش‌هایی که توسط (Broms, 1964) ایجاد شده است، به طور وسیعی در هلند به ویژه برای خاک‌های چسبنده، مورد استفاده قرار گرفته است. این روش نیز بر پایه تئوری فشار خاک استوار است ولی فرضیات ساده کننده‌ای برای مقاومت نهایی خاک در امتداد طول شمع در نظر گرفته شده است که دارای مزایای زیر می‌باشد:

- قابل اعمال بر روی شمع‌های بلند و کوتاه است.
- هر دوی خاک‌های چسبنده کامل و دانه‌ای بدون چسبندگی را در نظر می‌گیرد.
- هر دوی شمع‌ها با سر آزاد (مفصلی) و گیردار را مد نظر قرار می‌دهد.

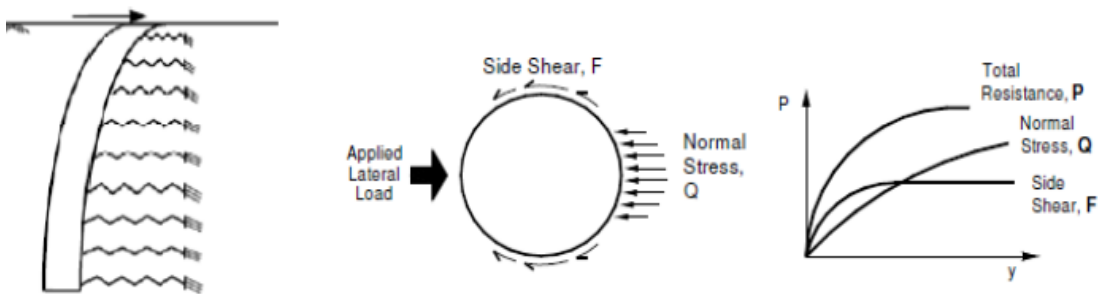
این روش دارای معایبی به شرح زیر است:

- قابل اعمال بر روی سیستم خاک لایه‌ای نیست.
- خاک‌های  $C - \phi$  را شامل نمی‌شود.

### ۲-۳-۱-۳ روش منحنی‌های P-Y

منحنی‌های  $p-y$  ارتباط بین مقاومت خاک ( $p$ ) و تغییر مکان خاک ( $y$ ) را نشان می‌دهند و طبق این منحنی‌ها، مقاومت خاک (نیروی واحد طول) از ثابت فنر و تغییر مکان خاک به دست می‌آید. چندین روش برای ایجاد منحنی‌های  $p-y$  از آزمایشات بارگذاری صحرایی یا آزمون‌های آزمایشگاهی وجود دارد.

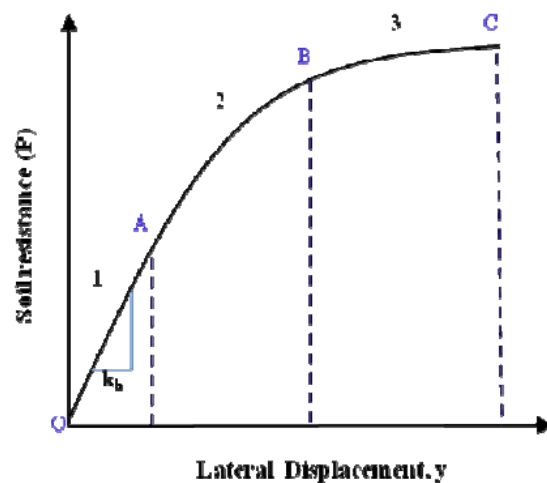
(Smith and Slyh, 1986) بیان کرده‌اند که هنگامی که بار جانبی به شمع اعمال شده باشد، مقاومت جانبی خاک ( $p$ ) به وجود آمده غالباً ناشی از دو مولفه می‌باشد: مقاومت اصطکاکی ( $F$ )، که توسط تنش‌های تماسی المان سطح مشترک تولید می‌شود، و مقاومت پیشانی ( $Q$ )، که از تنش‌های نرمال وارده بر سطح مقطع شمع تولید می‌شود (شکل ۲-۸).



شکل ۲-۹ مکانیزم ایجاد مقاومت جانبی خاک ( $p$ ) (McClelland and Focht, 1958)

منحنی  $p-y$  از ۳ قسمت تشکیل می‌شود: خط مستقیم، سهمی و مجدداً خط مستقیم. بخش مستقیم ابتدایی منحنی  $p-y$  رفتار الاستیک خاک را بیان می‌کند و شیب آن عبارت است از مقدار ثابت واکنش زیرزمینی افقی، قسمت میانی منحنی نیز به بخش غیر خطی منحنی تنش-کرنش در محل برمی‌گردد. مطالعات زیادی برای پیش‌بینی قسمت میانی منحنی  $p-y$  انجام گرفته است. به هر حال، روش تحلیلی که به طور وسیعی برای شکل استاندارد قسمت میانی پذیرفته شده باشد، وجود

ندارد. قسمت سوم منحنی یک خط مستقیم افقی است که رفتار پلاستیک خاک را نشان می‌دهد (Pathak, 2011). منحنی p-y یک نمونه شمع منفرد، در شکل (۹-۲) نشان داده شده است.

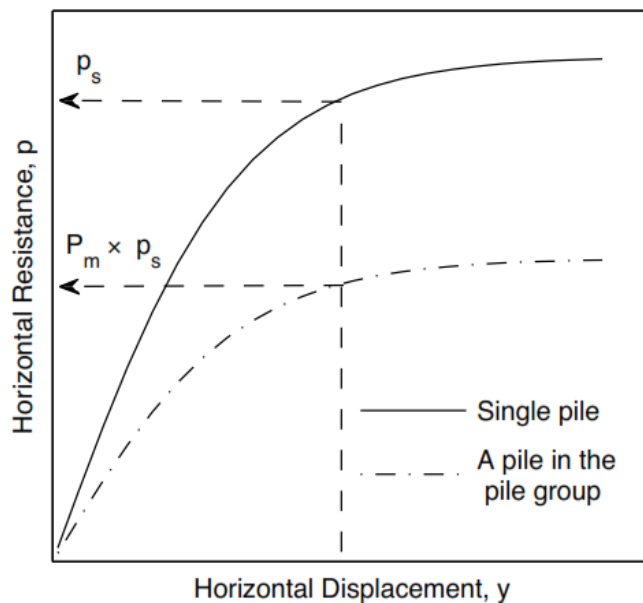


شکل ۹-۲ یک نمونه منحنی p-y (Pathak, 2011)

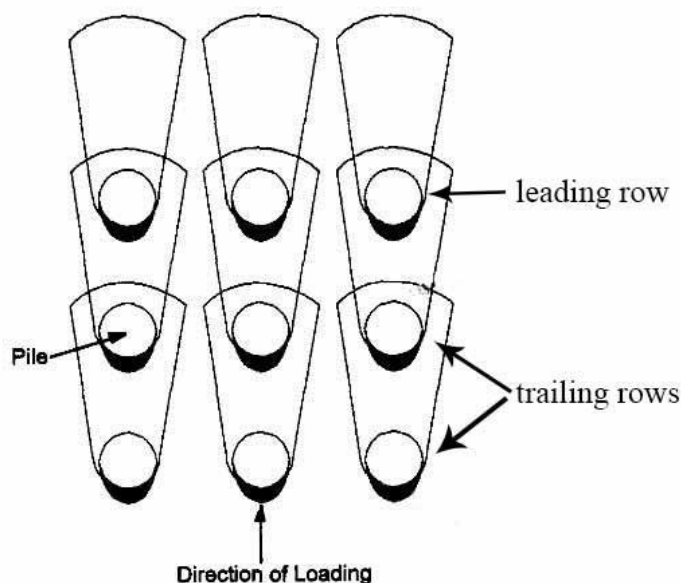
از آنجایی که منحنی p-y به خاک بستگی دارد، و این که خاکی که شمع در داخل آن قرار می‌گیرد از لایه‌های متفاوتی با مشخصات مختلف طبقه‌بندی و مقاومت برشی زهکشی نشده تشکیل شده است، این مشخصات مختلف خاک بر شکل منحنی p-y تاثیر می‌گذارند (Pathak, 2011). محققین مختلفی از جمله (Matlock, 1970) برای خاک رس نرم، (Reese and Welch, 1975) برای خاک ماسه و (O'Neill and Dunnavant, 1984) نیز برای خاک ماسه شکل‌های مختلفی از منحنی p-y را برای شرایط مختلف خاک ایجاد کرده‌اند. اثر انحراف شمع بر منحنی p-y توسط محققینی زیادی از جمله (Awoshika, 1971) و همچنین (Zhang et al., 1999) مورد بررسی قرار گرفته است. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که شکل منحنی p-y برای شمع‌های مایل و قائم شبیه هم بوده‌اند. اما انحراف شمع بر مقاومت نهایی خاک و مدول زیرزمینی اثرگذار بوده است.

به منظور بدست آوردن منحنی p-y گروه شمع، یکی از روش‌های متداول برای در نظر گرفتن اثر اندرکنش در گروه شمع، اصلاح منحنی‌های p-y شمع تکی با استفاده از ضریب اصلاحی  $P_m$  (شکل ۹-۲) برای هر ردیف از گروه شمع است که با توجه به کاهش ظرفیت باربری، این ضریب اصلاحی

کوچک‌تر یا مساوی یک خواهد بود و راستای ردیف‌ها عمود بر راستای بار جانبی وارده است. بیش‌ترین مقدار ضریب اصلاحی  $P_m$  برای ردیف دور از بار است که اصطلاحاً *leading row* و کم‌ترین مقدار ضریب اصلاحی  $P_m$  برای ردیف‌های نزدیک به بار است که *trailing rows* نامیده می‌شود (شکل ۱۱-۲). هر چه ردیف شمع مورد نظر به بار جانبی نزدیک‌تر باشد، ضریب اصلاحی  $P_m$  کوچک‌تر خواهد بود. این روش اولین بار توسط (Brown et al, 1988) پیشنهاد شده است. با توجه به ماهیت رفت و برگشتی بارهای لرزه‌ای، با تغییر جهت بار جانبی *leading row* و *trailing rows* جابجا می‌شوند. برای حل این مسئله می‌توان از یک ضریب اصلاحی  $P_m$  متوسط برای همه شمعی‌های موجود در گروه استفاده نمود که متوسط  $P_m$  ردیف‌های مختلف است. این روش توسط (Brown et al, 2001) پیشنهاد شده است.



شکل ۱۱-۲ تعریف ضریب اصلاحی  $P_m$  (Brown et al, 1988)



شکل ۲-۱۲ تعریف ردیف‌های مختلف گروه شمع (Brown et al, 1988).

(Rajashree, S. S., and Sitharam, 2001) مدلی بر اساس روش اجزاء محدود برای مطالعه رفتار غیرخطی شمع‌های مایل ارائه کردند. در این مدل برای مطالعه مقاومت شمع‌های مایل و تغییر مکان جانبی به وجود آمده تحت اثر بارهای جانبی استاتیکی و سیکلیک یک سری توابع  $p-y$  ارائه شد. آن‌ها در این تحقیق، خاک را به صورت محیط پیوسته مدل نکردند بلکه برای مدل کردن خاک از فنرهایی با سختی معادل استفاده نمودند و برای مدل نمودن مقاومت جداره از فنرهایی در راستای عمود بر راستای شمع استفاده گردید. آن‌ها از این تحقیق نتیجه گرفتند که مقاومت حداکثر جانبی در شمع مایل منفی در سطح زمین و مقاومت حداقل در شمع مایل مثبت در سطح زمین به وجود آمده است.

## ۲-۳-۲ مطالعات آزمایشگاهی

تحقیق بر روی شمع‌های مایل تحت بار جانبی با (Feagin, 1959) آغاز شد. او آزمایش‌هایی روی شمع‌های چوبی مایل انجام داد که تعدادی از محققین دیگر نیز از مدل آزمایشگاهی او پیروی کرده‌اند. (Tschebotarioff, 1953) با انجام چند آزمایش مدل، سطح لغزش را در پایین شمع‌های مایل

منفی گزارش کرد.

تحقیقات (Poulos, 1974) بر روی گروه شمع‌های تحت تأثیر بارگذاری جانبی و قائم نشان داد در گروه شمع‌های مایل که در مرکز از شمع قائم استفاده شده است، این شمع تأثیر بسیار ناچیزی در انحراف و پیچش کلی گروه شمع دارد. پولوس هم‌چنین نشان داد کمیت‌هایی که بیشتر از همه تحت تأثیر زاویه تمایل شمع قرار می‌گیرند، انحراف قائم در نتیجه اعمال بار افقی، انحراف افقی تحت اثر ممان‌ها و پیچش تحت اثر بار افقی هستند.

(Prakash and Subramanyam, 1965) نیز بر روی شمع‌های مایل، چند آزمایش مدل انجام دادند و نشان دادند که مقاومت شمع‌های مایل منفی تحت اثر بارهای جانبی بیشتر از مقاومت شمع‌های مایل مثبت می‌باشد.

(Poulos and Madhav, 1971) رفتار شمع‌های مایل تحت اثر بارهای استاتیکی جانبی را بررسی کردند و نشان دادند که تغییر مکان جانبی شمع‌های مایل به زاویه تمایل آن‌ها (زاویه مایل بودن آن‌ها) بستگی دارد.

(Meyerhof and Ranjan, 1973) ظرفیت باربری جانبی شمع‌های مایل مثبت و منفی را در خاک‌های دانه‌ای بررسی کردند و نشان دادند که مقاومت شمع‌های مایل منفی بیشتر از شمع‌های مایل مثبت می‌باشد. آن‌ها هم‌چنین مطالعات آزمایشگاهی بر روی گروه شمع‌های قائم و مایل انجام دادند و دریافتند که تغییر مکان جانبی گروه شمع شامل یک شمع قائم و مایل (چه مثبت و چه منفی) از تغییر مکان گروه شمع شامل دو شمع قائم کمتر است.

(Zhang et al., 1999) بر اساس یک آزمایش انجام شده بر روی شمع‌های مایل منفرد تحت بار جانبی در ماسه با تراکم‌های نسبی مختلف، به این نتیجه دست یافتند که اثر انحراف شمع بر مقاومت جانبی بیش‌تر از اثر تراکم ماسه است و مقاومت جانبی شمع با افزایش انحراف معکوس (یا شمع مایل

منفی) افزایش می‌یابد، در حالی که مقاومت جانبی شمع با افزایش انحراف جلویی (یا شمع مایل مثبت) کاهش می‌یابد.

(Zhang et al., 2011) با انتشار مقاله‌ای به بررسی ظرفیت باربری شمع مایل تحت بار قائم پرداختند. در این پژوهش ظرفیت باربری شمع‌ها تحت درجه مختلف تمایل و خاک‌های گوناگون مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که تحت بار قائم یکسان نشست قائم شمع‌ها با درجه تمایل کمتر از ۵ درصد کوچک‌تر است، اما نشست قائم شمع‌ها با درجه تمایل بالای ۵٪ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش درجه تمایل ظرفیت باربری تحت بار قائم کاهش یافته است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که معیار اصلی کنترل‌کننده ظرفیت باربری قائم در شمع‌های مایل درجه تمایل آن‌ها است.

(حسن زاده و حاجی علی‌لوی بناب، ۱۳۹۰) به بررسی اثر آرایش شمع‌های مایل و قائم در گروه شمع تحت بارگذاری جانبی پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود حالت‌هایی از گروه شمع‌ها و رفتار خاک اطراف آن را تحت بارگذاری جانبی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات (Particle Image Velocimetry) در آزمایشگاه مورد بررسی قرار دادند. رفتار متفاوت شمع‌ها در گروه، با توجه به فاصله استقرار، طول و زاویه آنها، جابجایی و نوع تغییر شکل خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این تحقیق ۵ حالت برای مدل‌سازی شمع‌ها، چهار مورد بصورت گروهی و یک مورد بصورت تک شمع به منظور مقایسه در نظر گرفته شد. گروه شمع‌ها در سه مورد با شمع مایل و یک حالت با شمع قائم مدل‌سازی و کلاهدک شمع‌ها در هر یک از حالات به اندازه ۱ سانتی‌متر بارگذاری شد. با تحلیل عکس‌های دیجیتال و بررسی نتایج حاصل از آن، جابجایی‌های خاک اطراف شمع توسط بردارهای جابجایی مشخص گردید. نتایج گویای آن بود که در گروه شمع‌ها، شمع مایل باعث تغییر شکل و نشست بیشتر در خاک و افزایش ظرفیت باربری گروه شمع‌ها شد.

## ۲-۳-۳ مطالعات عددی

روش اجزا محدود نیز علاوه بر روش‌های تحلیلی و روش‌های آزمایشگاهی یاد شده، برای بررسی شمع‌های تحت بار جانبی استفاده شده است.

برای بررسی رفتار غیرخطی شمع‌های مایل بر اثر بارهای جانبی وارد به آن شمع‌ها توسط (Rajashree and Sitharam, 2001)، یک مدل اجزا محدود ارائه کردند. در تحقیق آنها خاک به صورت فنر مدل شده است. برای مدل کردن مقاومت نوک، از یک فنر در راستای عمود بر راستای شمع استفاده گردیده است. در نتایج این تحقیق آمده است که ظرفیت باربری جانبی شمع‌های مایل منفی تحت بارهای جانبی استاتیکی و سیکنی، بیش‌تر از شمع‌های قائم و شمع‌های مایل مثبت است که دلیل این موضوع، ترمیم سریع‌تر فاصله ایجاد شده بین خاک و شمع در شمع‌های مایل منفی بوده است.

(Kitiydom and Mastumoto, 2002) روش ساده‌ای برای تحلیل گروه‌های شمع به همراه شمع مایل ارائه دادند. در پژوهش این محققان از نرم‌افزار هیبرید اصلاح شده استفاده شد. خاک در هر گروه شمع با یک فنر قائم و دو فنر افقی در دو جهت عمود بر هم مدل شده است. برای مدل کردن خاک زیر شالوده از یک فنر افقی و یک فنر قائم در هر گروه شالوده استفاده گردید. در این تحقیق یک گروه ۶ تایی شمع شامل دو شمع قائم و ۴ شمع مایل با زوایای مختلف مدل گردید و یک مطالعه پارامتریک روی این گروه انجام شد. با توجه به این تحقیق وجود شمع مایل باعث بازده بهتر گروه شمع تحت اثر بارهای جانبی شد.

(امیدعلی و همکاران، ۱۳۸۷) در پژوهشی به مقایسه رفتار شمع‌های قائم و شمع‌های مایل به روش عددی پرداختند. این تحقیق به روش عددی و با استفاده از نرم‌افزار FLAC 3D انجام گرفته است که بر اساس روش عددی تفاضل‌های محدود FD استوار است. خاک به صورت محیط پیوسته و با مدل رفتاری موهر-کولمب در نظر گرفته شد و شمع‌ها از جنس بتن و با مدل رفتاری الاستیک فرض شده



بودند. در ابتدا به منظور صحت‌سنجی نتایج، یک شمع قائم مدل گردید و نتایج به دست آمده از تحلیل آن با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین و روابط موجود مقایسه شد. سپس شمع‌های مایل و قائم مدل‌سازی شده و پس از بارگذاری این شمع‌ها، مقدار تغییر مکان محوری و جانبی شمع برای مقادیر مختلف بارهای محوری و جانبی محاسبه و نتایج انواع شمع‌ها با هم مقایسه شدند. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، مشخص شد که:

الف) نشست شمع‌های مایل تحت اثر بارهای محوری بیشتر از شمع‌های قائم است. به عبارت دیگر تحت اثر بارهای محوری، توزیع تنش به وجود آمده در خاک اطراف شمع‌های قائم و مایل متفاوت می‌باشد.

ب) شمع‌های مایل منفی تحت اثر بار جانبی کمترین تغییر مکان جانبی را دارند. شمع‌های مایل مثبت بیشترین تغییر مکان جانبی را دارند. تغییر مکان جانبی شمع قائم، مداری مابین دو مقدار قبل می‌باشد.

ج) گوه گسیختگی در شمع‌های مایل منفی به سمت پایین حرکت می‌کند در صورتی که گوه گسیختگی خاک در شمع‌های مایل مثبت به سمت بالا حرکت می‌کند و حرکت گوه گسیختگی در شمع‌های قائم به سمت طرفین محیط می‌باشد.

(شیخ بهایی و حلبیان، ۱۳۸۷) در پژوهشی رفتار دینامیکی گروه شمع‌های مایل از نوع اصطکاکی تحت اثر بارهای جانبی ناشی از زلزله را بررسی کردند. سه گروه شمع مایل با زاویه تمایل ۱۰، ۲۰ و ۲۵ درجه با استفاده از روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS مورد مطالعه قرار گرفت. اعمال شرایط مرزی به محیط با استفاده از مجموعه المان‌های میراگر برای لحاظ کردن مرز جاذب انرژی صورت گرفت. برای حل مسئله از روش تحلیل دینامیکی صریح با اعمال میرایی رایلی استفاده شد. در مطالعات پارامتریک اثر سه عامل زاویه تمایل گروه شمع، نسبت فاصله‌گذاری و نسبت لاغری شمع‌ها مورد توجه قرار گرفت. نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها نشان داد که: (۱) با افزایش زاویه تمایل گروه شمع

جابجایی‌های افقی گروه شمع‌ها کاهش یافت که دلیل این مطلب آن عنوان شد که با افزایش زاویه تمایل گروه شمع سختی جانبی مجموعه گروه شمع افزایش یافته و از مقدار تنش‌های برشی در شمع‌ها می‌کاهد؛ در نتیجه می‌توان انتظار داشت که تغییر مکان‌های گروه شمع نیز کاهش یابد. همچنین با افزایش زاویه تمایل در گروه شمع مقدار تنش‌های محوری در محل اتصال شمع به کلاهدک کاهش می‌یابد (۲) به دلیل آن که اثر اندرکنش متقابل شمع‌ها بر روی یکدیگر با افزایش فاصله بین شمع‌ها کاهش می‌یابد، مشاهده شد که جابجایی‌های افقی و شدت تنش‌ها در محل اتصال کلاهدک و شمع کاهش یافت. با افزایش فاصله بین شمع‌ها از میزان لنگرها کاسته شد و همچنین مقدار تنش‌های برشی در طول شمع با افزایش فاصله بین شمع‌ها رو به کاهش گذاشت. (۳) با کاهش نسبت لاغری مقدار تنش‌های محوری و همچنین لنگرهای خمشی در محل اتصال شمع و کلاهدک رو به کاهش گذاشت. رفتار مشابه در مورد نمودار لنگر خمشی حداکثر گروه شمع با نسبت لاغری کمتر ملاحظه شد و در نهایت ملاحظه شد که با کاهش نسبت لاغری شمع مقدار تنش‌های برشی در طول شمع کاهش یافت. (۴) زاویه تمایل گروه شمع اثر قابل ملاحظه‌ای بر مقدار تنش‌های محوری ایجاد شده در کلاهدک داشت به گونه‌ای که با افزایش زاویه تمایل گروه شمع مقدار تنش‌های محوری ایجاد شده در کلاهدک افزایش یافت.

(قاسم‌زاده و ترزبان، ۱۳۹۱) تغییرات ضریب اندرکنش گروه شمع مایل، شامل دو شمع مایل اصطکاکی، تحت بار استاتیکی محوری و جانبی را به طور جداگانه مورد بررسی قرار دادند. چهار گروه شمع با زاویه تمایل ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه با استفاده از روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS مورد مطالعه قرار گرفتند. در مطالعات پارامتریک اثر نسبت لاغری شمع‌ها، نسبت فاصله به قطر شمع، نسبت سختی شمع به خاک، تاثیر وجود لغزش بین شمع و خاک مورد توجه قرار گرفت. نتایج به دست‌آمده از تحلیل‌ها نشان داد که با افزایش زاویه میل شمع و فاصله بین شمع‌ها ضریب اندرکنش محوری کاهش یافت. با افزایش زاویه میل شمع تا حدود ۱۵ درجه، ضریب اندرکنش جانبی افزایش، اما با افزایش بیشتر زاویه تمایل، این ضریب کاهش یافت. با افزایش سختی نسبی شمع و خاک،

هر دو ضریب اندرکنش افزایش یافت. با افزایش نسبت لاغری، هر دو ضریب اندرکنش افزایش ناچیزی پیدا کردند که البته این افزایش از نسبت لاغری ۱۰ به ۲۰ مشهودتر بود، همچنین افزایش نسبت لاغری از ۲۰ به بعد تاثیر چندانی بر ضریب اندرکنش نداشت. در اثر وجود لغزش بین شمع و خاک نسبت به حالتی که شمع و خاک کاملاً چسبیده به هم در نظر گرفته شوند، ضرایب اندرکنش کاهش بین ۲۰ تا ۳۰ درصد داشتند.

(غلامی و باخویش، ۱۳۹۵) به بررسی اثر لایه‌بندی و زاویه تمایل بر ظرفیت باربری و نشست جانبی گروه شمع مایل با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-شمع پرداختند. در این مطالعه برخی از فاکتورهای اساسی طراحی گروه شمع‌های مایل (ظرفیت باربری و نشست افقی) تحت بارگذاری هارمونیک افزایشی جانبی، در چهار لایه‌بندی گوناگون خاک، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-شمع به وسیله روش اجزای محدود مورد ارزیابی قرار گرفت. ۱۶ مدل در ۴ شرایط خاک مختلف از جمله قرارگیری خاک سست بر روی متراکم و برعکس با چهار زاویه تمایل ۰، ۱۰، ۱۵ و ۳۰ درجه ساخته شدند. نتایج نشان دادند:

(۱) فارغ از نوع لایه‌بندی خاک همواره با افزایش زاویه تمایل گروه شمع نشست جانبی کاهش و ظرفیت باربری جانبی افزایش یافت.

(۲) زاویه تمایل گروه شمع‌ها چنان تأثیر چشم‌گیری بر ظرفیت باربری گروه شمع‌های مایل داشت که ظرفیت باربری جانبی گروه شمع مایل با زاویه تمایل ۳۰ درجه در خاک نرم از ظرفیت باربری همان گروه شمع به صورت قائم در خاک سخت در این تحقیق ۱۵ درصد بیشتر بود.

(۳) در تمامی گروه شمع‌های مایل در حالتی که اندرکنش شمع-خاک در نظر گرفته نشود جابه‌جایی کاهش و ظرفیت باربری افزایش یافت که این تغییرات با افزایش زاویه تمایل بیشتر نیز شد.

## ۴-۳-۲ محاسبه بار

در ادامه به نحوه محاسبه بار وارد شده به مدل می‌پردازیم.

### ۱-۴-۳-۲ انرژی پهلوگیری

انرژی جنبشی پهلوگیری شناور از رابطه (۲-۲) محاسبه می‌شود:

$$E_f = 0.5.M_D.V_B^2.C_M.C_E.C_C.C_S \quad (۲-۲)$$

که در آن:  $E_f$  انرژی جنبشی شناور در شرایط عادی که باید توسط فنر جذب شود،  $M_D$  جرم شناور،  $V_B$  مؤلفه سرعت پهلوگیری در راستای عمود بر امتداد اسکله،  $C_M$  ضریب جرم،  $C_E$  ضریب خروج از مرکزیت،  $C_C$  ضریب شکل اسکله و  $C_S$  ضریب نرمی می‌باشد. در شرایط غیرعادی میزان انرژی پهلوگیری افزایش می‌یابد. این شرایط می‌تواند در اثر خطای انسانی، شرایط آب‌وهوا، خرابی تجهیزات و یا ترکیبی از این عوامل باشد. میزان انرژی جذب‌شده در حالت غیرعادی طبق رابطه (۳-۲) برابر است:

$$E_A = F_s * E_f \quad (۳-۲)$$

که در آن:  $E_A$  انرژی پهلوگیری غیرعادی و  $F_s$  ضریب تشدید می‌باشد. مقدار این ضریب توسط

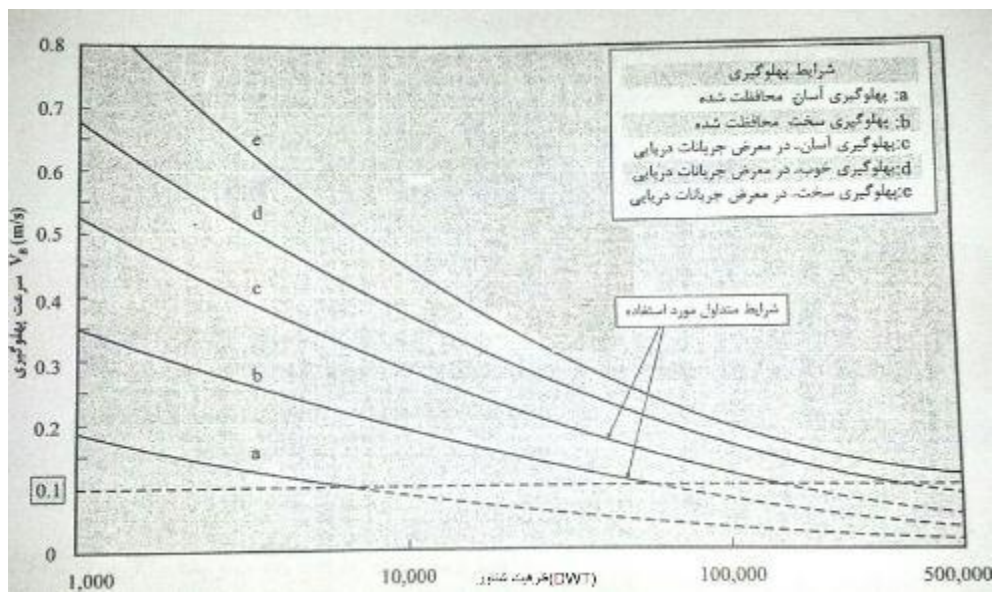
جدول (۱-۲) تعیین می‌شود.

جدول ۱-۲ ضریب تشدید در شرایط غیرعادی

ردیف	نوع شناور	ابعاد شناور	Fs
۱	تانکر، فله‌بر- عمومی	بزرگ‌ترین	۱/۲۵
		کوچک‌ترین	۱/۷۵
۲	کانتینری	بزرگ‌ترین	۱/۵
		کوچک‌ترین	۲
۳	کالاهای عمومی	-	۱/۷۵
۴	رو-رو، قایق	-	$\geq 2$
۵	یدک‌کش و ...	-	۲

### ۲-۳-۴-۲ سرعت پهلوگیری

مؤلفه سرعت پهلوگیری در راستای عمود بر راستای اسکله در طراحی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سرعت به عواملی مثل صعوبت یا آسانی پهلوگیری، ابعاد شناور و وجود یا عدم وجود جریان دریایی بستگی دارد. بر اساس ضوابط آیین‌نامه، ۵ حالت برای پهلوگیری تعریف شده است، که در شکل (۱۳-۲) و در جدول (۲-۲)، سرعت پیشنهادی در شرایط مختلف ارائه شده است.



شکل ۲-۱۳ پلان پهلوگیری

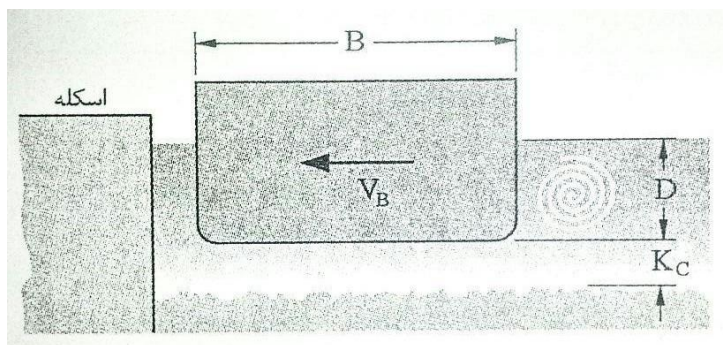
جدول ۲-۲۲ سرعت پهلوگیری شناورها

سرعت $V_B$ (m/s)					ظرفیت شناور
e	d	c	b	a	DWT
0.865	0.669	0.517	0.343	0.179	1,000
0.726	0.577	0.445	0.296	0.151	2,000
0.649	0.524	0.404	0.269	0.136	3,000
0.597	0.487	0.374	0.250	0.125	4,000
0.558	0.459	0.352	0.236	0.117	5,000
0.448	0.377	0.287	0.192	0.094	10,000
0.355	0.303	0.228	0.153	0.074	20,000
0.308	0.264	0.198	0.133	0.064	30,000
0.279	0.239	0.178	0.119	0.057	40,000
0.258	0.221	0.164	0.110	0.052	50,000
0.201	0.171	0.126	0.083	0.039	100,000
0.158	0.131	0.095	0.062	0.028	200,000
0.137	0.111	0.080	0.052	0.022	300,000
0.124	0.099	0.071	0.045	0.019	400,000
0.115	0.090	0.064	0.041	0.017	500,000

### ۲-۳-۴-۳ ضریب جرم $C_M$

در هنگام حرکت شناور به سمت اسکله بخشی از آب همراه شناور به سمت اسکله حرکت می‌کند، در صورت توقف شناور در مقابل اسکله، آب به حرکت خود ادامه می‌دهد و باعث اعمال فشار به اسکله می‌گردد. این اثر با استفاده از تعریف ضریب جرم اضافی تعریف می‌شود.

در جدول (۲-۳) مقادیر مربوط به  $C_M$  و در شکل (۲-۱۴) پارامترهای موردنیاز تعریف شده‌اند.



شکل ۱۴-۲ تعریف پارامترهای ضریب  $C_M$

جدول ۳-۲ تعریف ضریب جرم  $C_M$

واسکو کوستا (۱۹۶۴)	شیگرا اودا (۱۹۸۱)	پیانک (۲۰۰۲)
$C = 1 + \frac{2D}{B}$	$C = 1 + \frac{\pi D}{2 * C_B * B}$	$\frac{K_C}{D} \leq 0.1 \rightarrow C_M = 1.8$
		$0.1 \leq \frac{K_C}{D} \leq 0.5 \rightarrow C_M = 1.875 - 0.75 \left[ \frac{K_C}{D} \right]$
		$\frac{K_C}{D} \geq 0.5 \rightarrow C_M = 1.5$

در جدول (۳-۲)، از ضریب  $C_B$  استفاده شده است. این ضریب که ضریب قالبی گفته می‌شود

تابعی از شکل بدنه شناور می‌باشد و با استفاده از جدول (۴-۲) تعیین می‌شود.

جدول ۲-۴ تعریف ضریب جرم  $C_B$

ردیف	نوع شناور	ضریب قالبی
۱	کانتینری	۰/۶-۰/۸
۲	کالای عمومی و فله‌بر	۰/۷۲-۰/۸۵
۳	تانکرها	۰/۸۵
۴	قایق‌ها	۰/۵۵-۰/۶۵
۵	رو-رو	۰/۷-۰/۸

### ۲-۳-۴-۴ ضریب خروج از مرکزیت

ضریب خروج از مرکزیت در بردارنده اثر چرخش شناور در حین پهلوگیری می‌باشد که باعث کاهش در مقدار انرژی پهلوگیری می‌شود. برای تعیین مقدار دقیق این ضریب، محل دقیق تماس شناور با فنדר، زاویه و سرعت پهلوگیری مهم می‌باشند. در عمل مقدار  $C_E$  بین ۰/۳ تا ۱ توصیه می‌شود.

برای حالت‌های خاص پهلوگیری، مقدار  $C_E$  با توجه به شکل (۲-۱۵) به صورت زیر توصیه شده است.

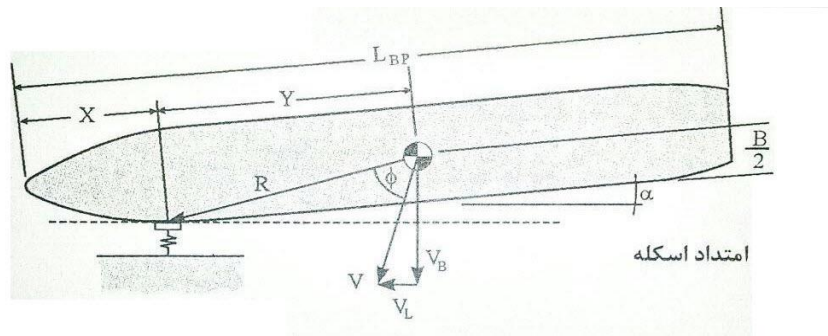
$C_E=0.4-0.6$  ( $X=L_{BP}/4$ )      پهلوگیری در نقطه ۰/۲۵ طول ✓

$C_E=0.6-0.8$  ( $X=L_{BP}/3$ )      پهلوگیری در نقطه ۰/۳۳ طول ✓

$C_E=1$  ( $X=L_{BP}/2$ )      پهلوگیری در نقطه وسط طول ✓



در صورتی که مقدار زاویه  $\theta$ ، کوچکتر از ۱۰ درجه باشد، مقدار  $C_E=1$  خواهد بود.



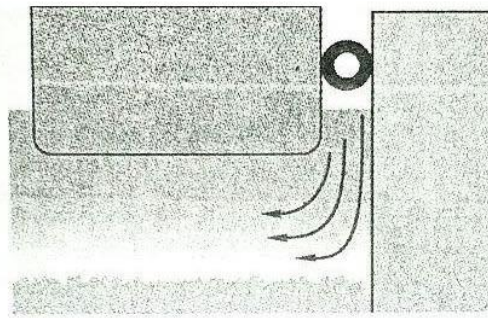
شکل ۲-۱۵ چرخش در حین پهلوگیری

### ۵-۴-۳-۲ ضریب شکل $C_C$

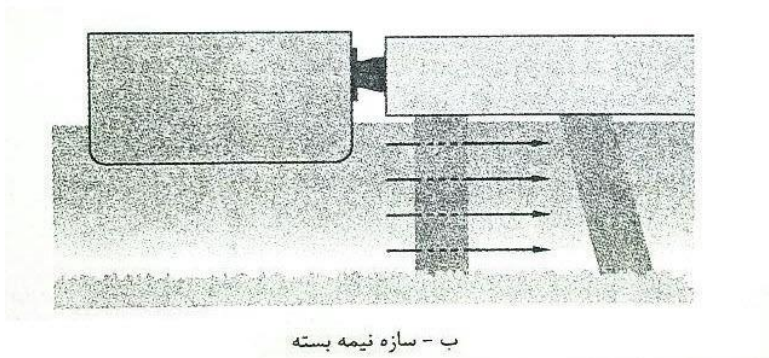
در اسکله‌های بسته، در هنگام پهلوگیری، آب بین اسکله و شناور باعث کاهش فشار وارده از شناور به اسکله می‌شود این اثر با ضریب  $C_C$  تعریف می‌گردد. در جدول (۵-۲) مقادیر  $C_C$  و شکل (۲-۱۶) اثر ضریب شکل معرفی شده‌اند.

جدول ۵-۲ مقادیر  $C_C$

$C_C=1$	-اسکله‌های باز -زاویه پهلوگیری بیش از ۵ درجه -سرعت پهلوگیری بسیار پایین -عمق آزاد در زیر شناور
$C_C=0/9$	-اسکله بسته -زاویه پهلوگیری کمتر از ۵ درجه



الف - سازه بسته

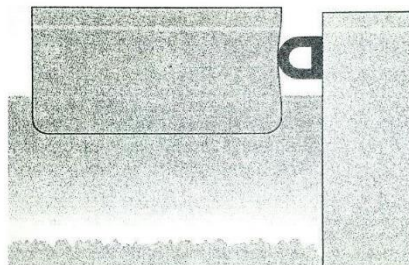


ب - سازه نیمه بسته

شکل ۱۶-۲ اثر ضریب شکل

### ۶-۴-۳-۲ ضریب نرمی

در صورتی که سختی فنر نسبت به بدنه شناور زیادتر باشد، بخشی از انرژی برخورد با تغییر شکل الاستیک بدنه مستهلک می‌شود. این اثر با استفاده از ضریب نرمی تعریف می‌شود. در شکل (۱۷-۲) اثر ضریب نرمی و در جدول (۶-۲) مقدار آن معرفی شده است.



شکل ۱۷-۲ ضریب نرمی

جدول ۶-۲ ضریب نرمی

$C_S=1$	فندر نرم
$C_S=0.9$	فندر سخت

## ۷-۴-۳-۲ مقادیر فرض شده

مقادیر جدول (۷-۲) با توجه به مثالی ذکر شده در (طاحونی و میرگلوی، ۱۳۸۸) انتخاب شده‌اند.

جدول ۷-۲ مقادیر مفروض جهت محاسبه نیروی پهلوگیری

Ef(kN.m)	V(m/s)	CS	CC	CE	CM	MD(kN)	ظرفیت شناور (kN)
۵۲	۰/۲۵	۱	۱	۰/۵	۲/۰۵۱	۱۵۸۵۰	۱۰۰۰۰

با توجه به انرژی به دست آمده از رابطه (۱-۳) و با انتخاب ضربه گیر مناسب، میزان نیروی وارده

به شمع و ضربه گیر بر طبق منحنی عملکرد ضربه گیر به دست می‌آید.

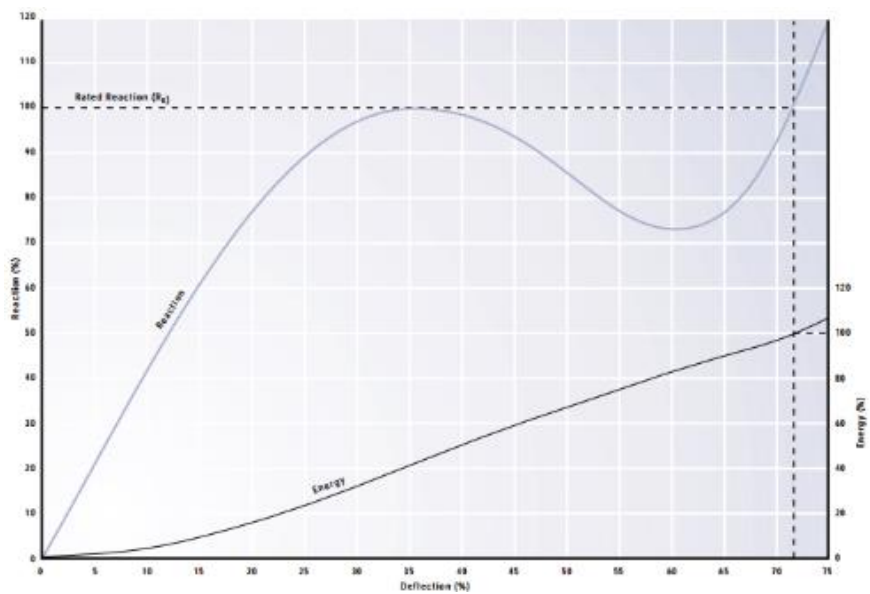
منحنی عملکرد ضربه گیر توسط شرکت سازنده ضربه گیر ارائه می‌شود. با انتخاب ضربه گیر

supercone منحنی عملکرد آن توسط شرکت FENTEK ارائه شده است. منحنی عملکرد ضربه گیر

supercone در شکل (۱۸-۲) ارائه شده است.

با توجه به میزان انرژی وارده و ضربه گیر انتخابی میزان نیروی وارده برابر با  $100\text{ kN}$  محاسبه

می‌شود.



شکل ۱۸-۲ منحنی عملکرد ضربه‌گیر

حال با تعیین نیروی اعمالی به شمع، این نیرو را به صورت سری زمانی به شمع وارد می‌کنیم. با در نظر گرفتن زمان اعمال بار، این نیرو را به صورت تابع زمانی که در شکل آورده شده است وارد می‌سازیم.



## **۳- فصل سوم**

### **مدل سازی، نتایج مدل سازی و**

### **تفسیر آنها**

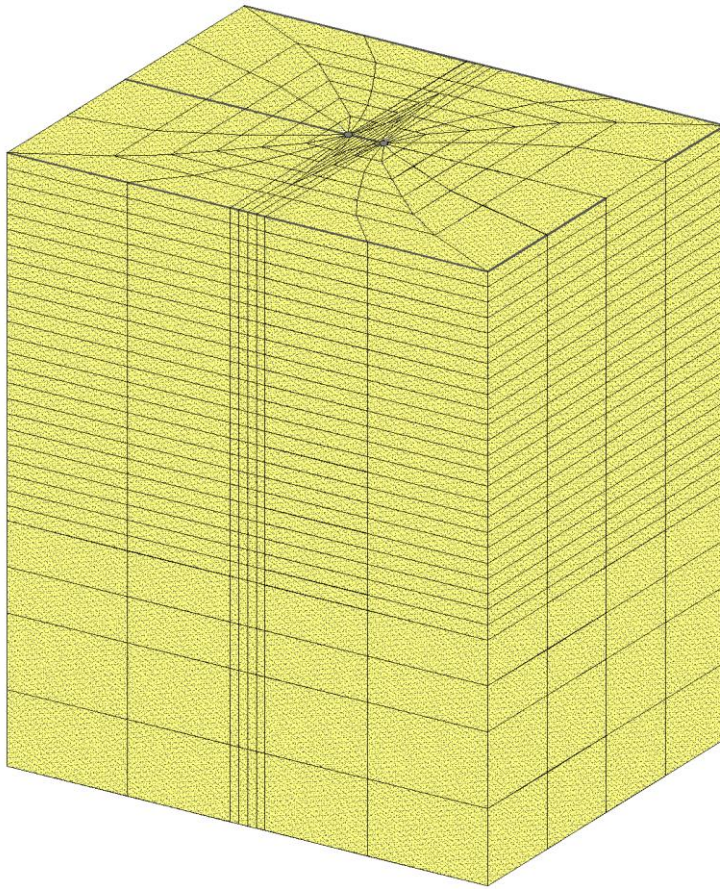
## ۱-۳ مقدمه

در فصل‌های گذشته به‌مرور و بررسی تحقیق‌های انجام‌شده توسط محققین و توضیحاتی در مورد شمع‌ها پرداخته شد. همان‌طور که در گذشته بیان شد ما در اینجا به بررسی رفتار گروه شمع مایل تحت بار جانبی دینامیکی می‌پردازیم. هدف از این امر بررسی رفتار گروه شمع مایل در شرایط مختلف از قبیل ، تفاوت در قطر شمع، تفاوت در تراکم خاک، اثر بارگذاری چرخشی و تغییر زاویه شمع است. در این بخش ابتدا به جزئیات مدلسازی و سپس به نتایج حاصل از مدل‌سازی گروه شمع در سه زاویه تحت بارگذاری دینامیکی می‌پردازیم و نتایج حاصل تأثیر زاویه، میزان و نوع بارگذاری در گروه شمع مایل را مورد بررسی قرار می‌دهیم، نتایج آورده شده شامل جزئیات مدل‌سازی هر گروه و نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل آن‌ها می‌باشد.

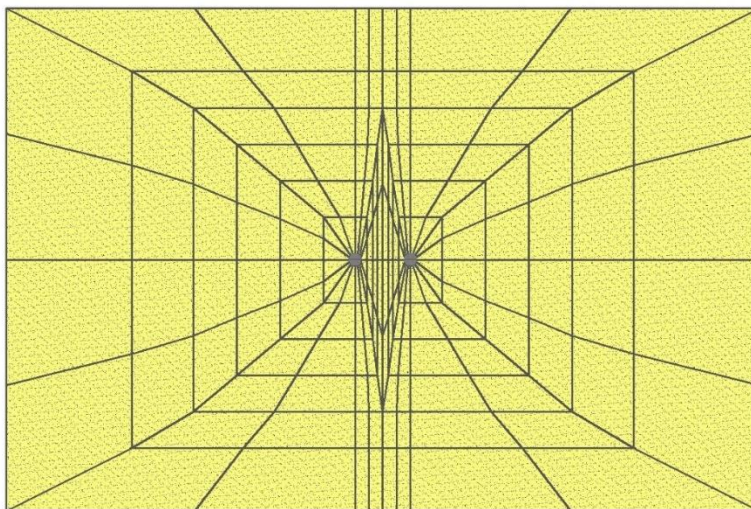
## ۲-۳ مدلسازی

### ۱-۲-۳ مدل‌سازی جعبه آزمایش

ابعاد جعبه برای بررسی گروه شمع دوتایی قائم و مایل با زاویه ۷ و ۱۵ درجه به‌صورت (m)  $30 \times 20 \times 40$  به ترتیب طول، عرض و عمق انتخاب شد. شکل (۱-۳) نمایی سه‌بعدی، شکل (۲-۳) و شکل (۳-۳) نمای دوبعدی جعبه خاک را در صفحه xy و  $1/4$  صفحه xy نشان می‌دهد. دلیل انتخاب این ابعاد کاهش زمان اجرای برنامه با توجه به محیط تحت تأثیر بارگذاری بوده است و کاهش هرچه تمام‌تر اثر جوانب و کف جعبه نمونه روی نتایج آزمایش می‌باشد. بنابراین با به حداقل رساندن این اثر، کف و جوانب جعبه نمونه را به‌صورت صلب در نظر می‌گیریم. صلبیت به این شکل اعمال می‌شود که کف در هر سه جهت و صفحه جوانب در راستای بردار نرمال آن صفحه و بردار Z گیردار می‌باشند.

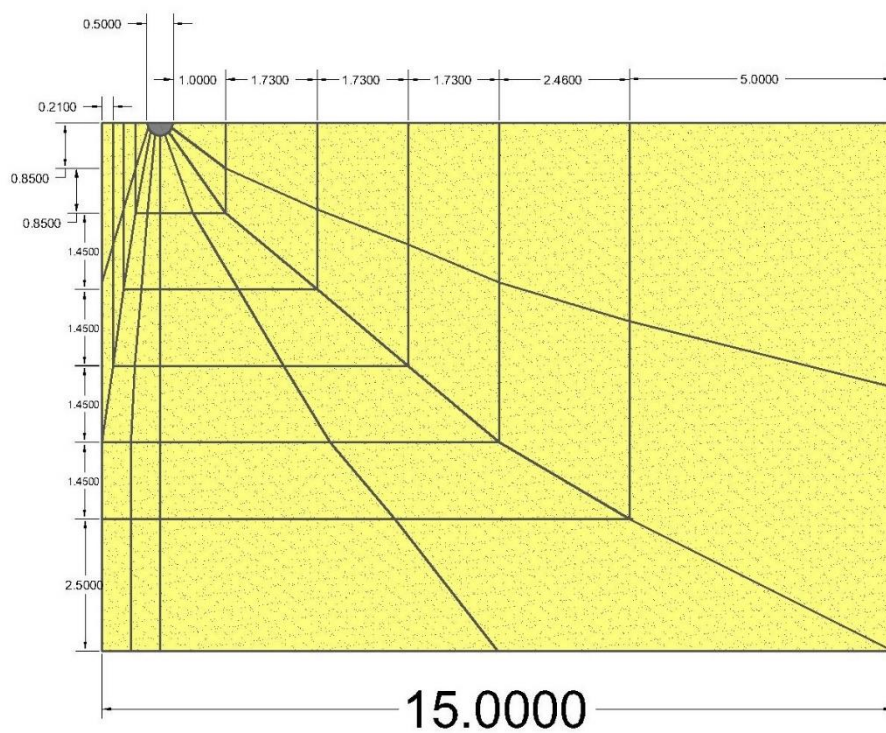


شکل ۱-۳ نمای سه بعدی از جعبه مدل و نحوه مش بندی برای گروه شمع قائم



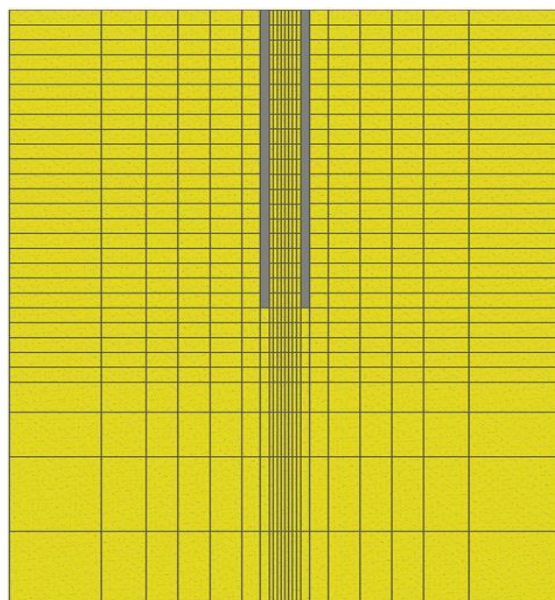
شکل ۲-۳ مش بندی جعبه نمونه در صفحه XY در تراز ۰/۰۰ برای زوایای مختلف شمع



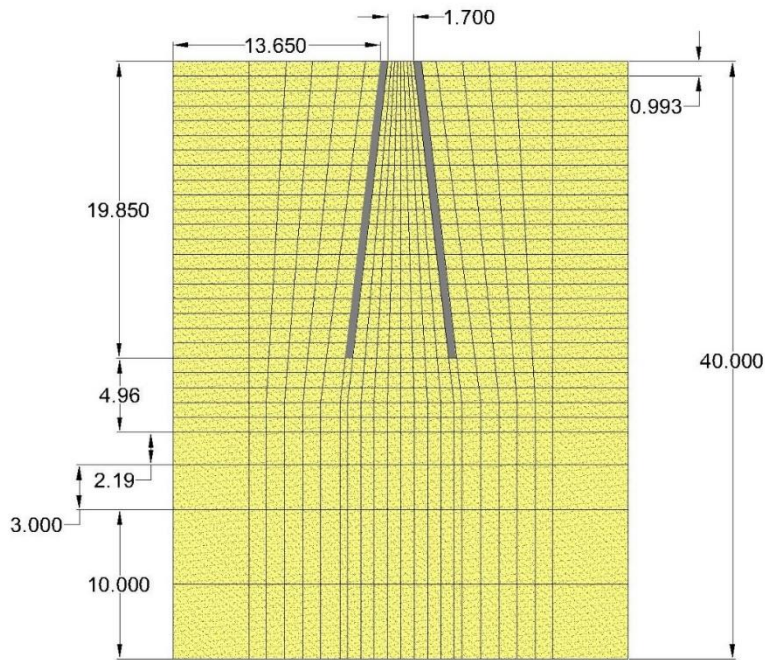


شکل ۳-۳ ابعاد مش بندی جعبه نمونه در ۱/۴ از صفحه XY در تراز ۰/۰۰ برای زوایای مختلف شمع شکل های (۳-۴) تا (۶-۳) به ترتیب ابعاد، نحوه مش بندی و نحوه قرارگیری شمع ها در خاک را

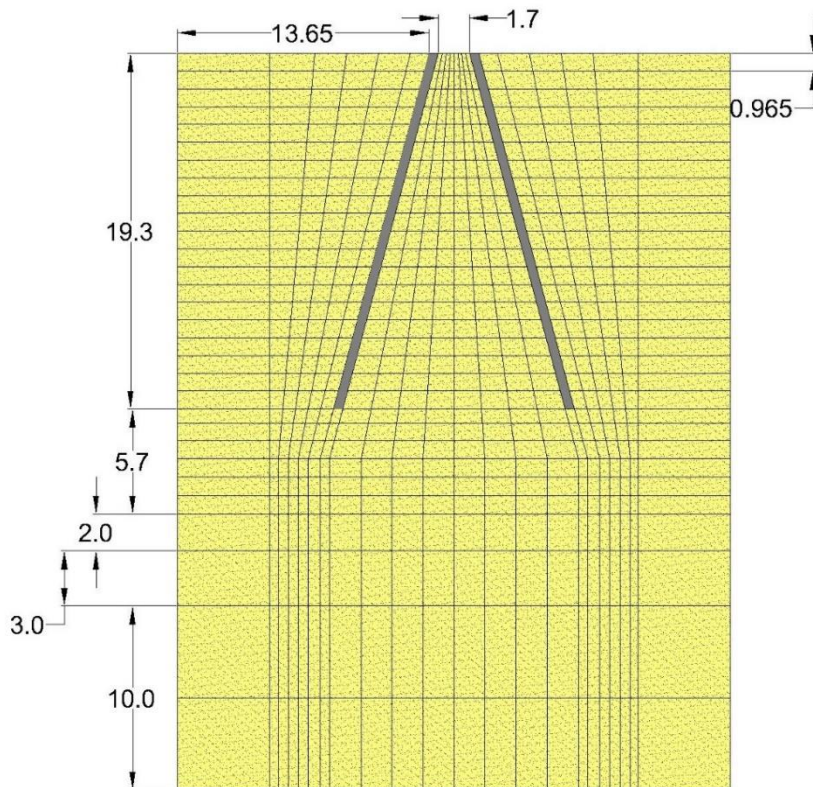
نشان می دهد.



شکل ۳-۴ ابعاد و نحوه مش بندی در صفحه XZ برای گروه شمع زاویه ۰ درجه



شکل ۳-۵ ابعاد و نحوه مش بندی در صفحه XZ برای گروه شمع با زاویه ۷ درجه

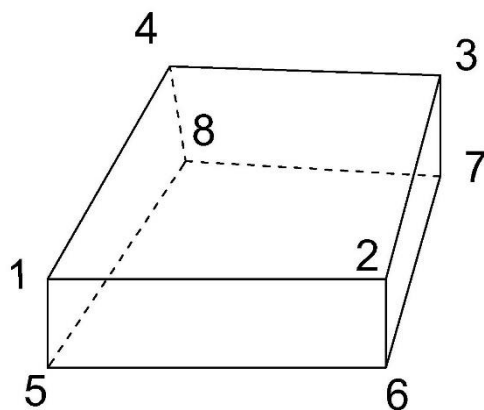


شکل ۳-۶ ابعاد و نحوه مش بندی در صفحه XZ برای گروه شمع با زاویه ۱۵ درجه

همانطور که در تصاویر نشان داده شده است ابعاد المان ها برای تمام زوایا در تراز ۰/۰۰ مشابه یکدیگر می باشند اما عمق المان ها با توجه به زاویه تمایل شمع ها تغییر می کنند. علت انتخاب ابعاد متفاوت به دست آوردن طول دقیق شمع ها به میزان ۲۰ متر بوده است. به عنوان مثال در گروه شمع با زاویه ۱۵ درجه آخرین عمقی که شمع در آن قرار دارد ۱۹/۳ متر می باشد اما طول شمع همان ۲۰ متر است.

خاک نمونه قادر به زهکشی هست و میزان نفوذپذیری با توجه به میزان تراکم تعیین می شود. برای خاک پارامترهای میرایی رایلی نیز تعریف می شود.

جهت المان بندی خاک از المان ۸ گرهی BrickUP استفاده شده است (شکل ۳-۷). استفاده از این المان جهت در نظر گرفتن خصوصیت اشباع و در نظر گرفتن فشار آب منفذی صورت می پذیرد. المان ها در نزدیکی شمع با ابعاد کوچک تر و با فاصله گرفتن از شمع این ابعاد افزایش می یابد که این ابعاد به دلیل افزایش دقت در نزدیکی شمع انتخاب شده اند.



شکل ۳-۷ المان هشت گرهی استفاده شده در مدل سازی

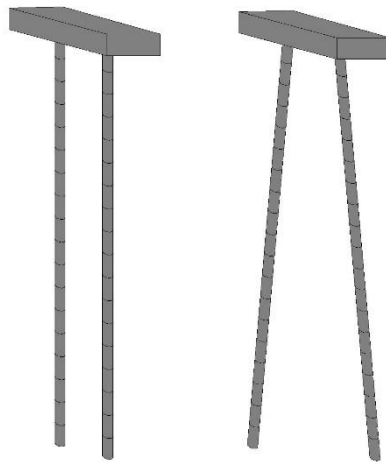
### ۲-۲-۳ مدل سازی شمع

برای مدل سازی شمع ها از ماده الاستیک elasticBeamColumn استفاده می شود این ماده با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند سطح مقطع، مدول الاستیک، مدول برشی، ممان اینرسی پیچشی و ممان

اینرسی ثانویه شمع را به صورت الاستیک مدل می‌کند. مشخصات شمع‌ها در جدول (۱-۳) آورده شده است. شمع‌ها توسط سرشمعی به ابعاد  $۱ \times ۲/۵ \times ۴/۷$  (به ترتیب طول، عرض و عمق) به یکدیگر متصل شده‌اند و فاصله مرکز به مرکز آنها  $۲/۲$  m می‌باشد.

جدول ۱-۳ خصوصیات نمونه‌های بخش تغییرات زاویه

جنس	طول (m)	قطر (m)	مدول یانگ (kN/m <sup>2</sup> )	ضریب پواسون	مدول برشی (kN/m <sup>2</sup> )
بتن	۲۰	۰/۵	$۳ \times ۱۰^۷$	۰/۲	$۱/۲۵ \times ۱۰^۷$



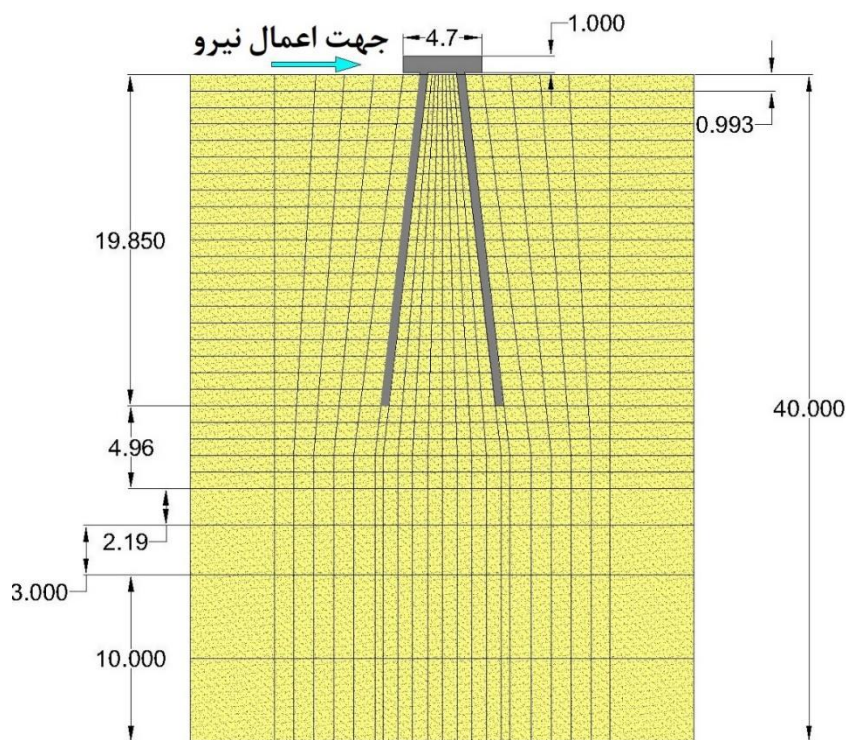
شکل ۳-۸ نحوه آرایش شمع‌ها با زاویه قائم و  $۷$  درجه

شمع‌ها در مرکز و جوانب به خاک بسته شده و جابه‌جایی آن‌ها در ۳ جهت یکسان می‌باشند. از سوی دیگر جرم شمع نیز به صورت mass در هر متر طول شمع به مرکز آن حجم وارد می‌شود.

### ۳-۲-۳ مدل سازی نیرو

در این پژوهش برای مدل سازی از نیروی دینامیکی استفاده می شود. نیروی دینامیکی وارده در حالت غیر متناوب مدل می شود. مدل سازی در حالت غیر متناوب به وسیله ضربه انجام می شود. مدت زمان اعمال نیرو در نیروی ضربه ای  $1/8s$  می باشد. جزئیات و نحوه محاسبه بار وارد شده در فصل ۲ مفصلا توضیح داده شده است.

در شکل (۳-۹) نحوه اعمال نیرو و المان بندی برای گروه شمع با زاویه ۷ درجه نشان داده شده است.



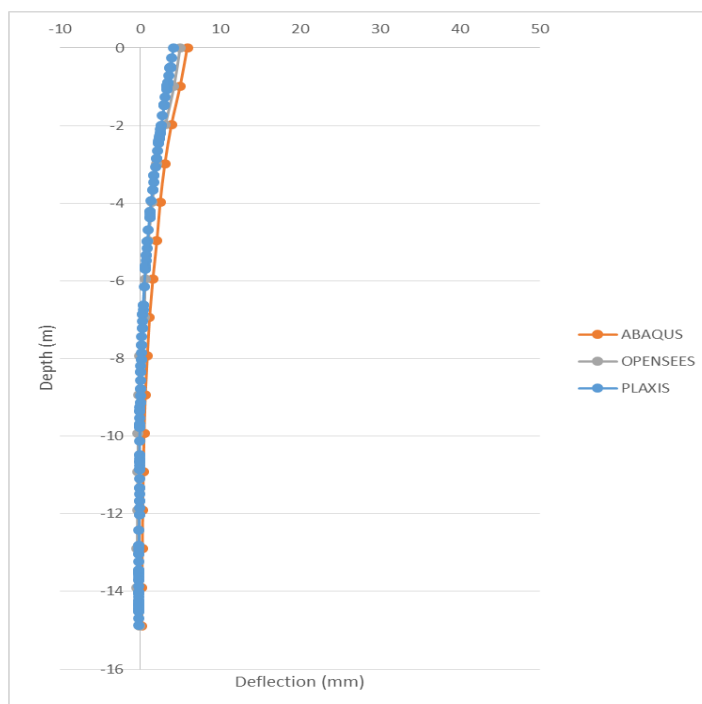
شکل ۳-۹ جهت اعمال نیرو به گروه شمع

### ۳-۳ صحت سنجی

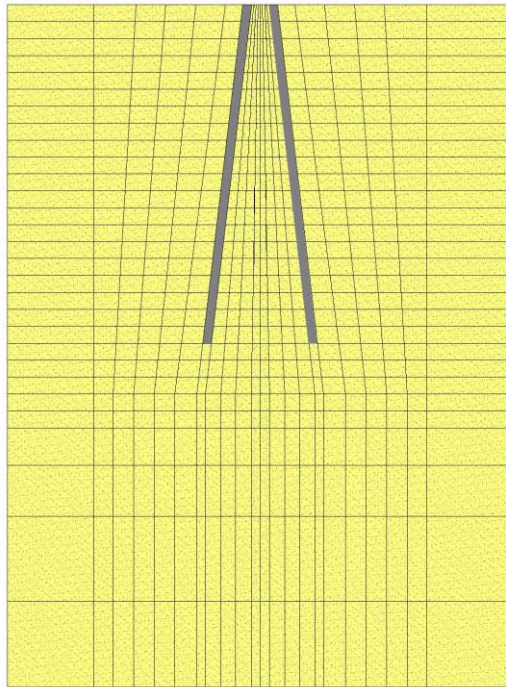
برای صحت سنجی مدل سازی، نتایج حاصل از بارگذاری استاتیکی بر روی گروه شمع مایل با

زاویه ۷ درجه در دو نرم افزار PLAXIS 3D و ABAQUS با نتایج مدل‌سازی در این پژوهش مقایسه و بررسی می‌شوند. جهت مدل سازی قطر شمع ها ۰/۳۵ متر ، طول شمع ها ۱۵ متر و فاصله مرکز به مرکز شمع ها ۱/۷ متر در نظر گرفته شد.

نتایج خروجی برای خاک سست با وارد کردن ۴۰۰ kN میزان جابجایی های شمع ها در شکل (۱۰-۳) برای هر سه مدل نشان داده شده است. پس از مدل‌سازی میزان جابجایی برای گروه شمع در نرم افزار ABAQUS ۵/۵۲ mm ، برای نرم افزار PLAXIS در حدود ۴/۲ mm و برای مدل انجام شده در این پژوهش ۵/۰۶ mm به دست آمد. این تفاوت در طول شمع ناچیز و قابل چشم‌پوشی می‌باشد. در شکل (۱۱-۳) نحوه مش‌بندی و ابعاد مدل در پلکسیس نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۳ میزان جابجایی شمع برای مدل های متفاوت



شکل ۱۱-۳ المان بندی جعبه مدل برای صحت سنجی

### ۴-۳ بررسی نتایج مدل سازی گروه شمع

در این بخش اطلاعات چهار گروه اصلی مدل سازی شده به تفکیک آورده شده است. این اطلاعات شامل جزئیات مدل سازی، نتایج، نمودارها و تحلیل های به دست آمده، می شود.

#### ۱-۴-۳ تأثیر تغییر زاویه در گروه شمع

این گروه با نماد D معرفی می گردند. اطلاعات مربوط به هر گروه در جدول (۲-۳) نشان داده شده است. جهت مدل سازی از سه زاویه ۰، ۷ و ۱۵ درجه نسبت به محور قائم استفاده شده است. شکل (۳-۳) نشان دهنده نحوه المان بندی برای هر سه مدل است.

جدول ۲-۳ خصوصیات نمونه‌های بخش تغییرات زاویه

اسم نمونه	میزان تراکم	قطر شمع (m)	میزان زاویه نسبت به محور قائم	نوع بارگذاری
<b>D0</b>	٪۰,۴۵	۰/۵	۰ درجه	دینامیکی-ضربه‌ای
<b>D7</b>	٪۰,۴۵	۰/۵	۷ درجه	دینامیکی-ضربه‌ای
<b>D15</b>	٪۰,۴۵	۰/۵	۱۵ درجه	دینامیکی-ضربه‌ای

خصوصیات خاک مدل شده بر اساس روابط مدل Yong-Wei Chen و همکاران تنظیم و محاسبه می‌شود. در ادامه خصوصیات خاک مدل شده در جدول (۳-۳) آورده شده است.

جدول ۳-۳ خصوصیات خاک بخش تغییرات زاویه

نماد	فرمول	Dr=0.45%
$\rho\left(\frac{ton}{m^3}\right)$	$2.11(D_r)^{0.1567}$	۱/۷۷۴
$G_{max}(kPa)$	$10500 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} P_r^{0.4}$	۷۷۰۲۱/۳۳۵
$B_{max}(kPa)$	$G_r \frac{2(1 + \vartheta)}{3(1 - 2\vartheta)}$	۱۶۶۸۷۹/۵۹
$\varphi(degree)$	$16.2D_r + 25$	۳۲/۲۹
$\varphi_{PT}(degree)$	$16.2D_r + 25$	۳۲/۲۹
$p_r(kPa)$	Constant	۸۰



۰/۱	Constant	$\gamma_{max}$
۰,۵	Constant	$N$
۰/۰۴۳	$0.0288D_r^{-1.4172}$	$c$
۰/۶۱۵	$1.147D_r - 0.2454$ $\geq 0$	$d_1$
۳/۵۰۸	$6.9686D_r - 1.7187 \geq 0$	$d_2$
۱۰	$10 \quad (D_r < 65\%)$ $-35.484D_r + 32.5 \quad (D_r \geq 65\%)$	$l_1$
۰/۰۰۹۴۷	$l_2 = -0.0154LnD_r - 0.0012$	$l_2$
۱	$1 \quad (D_r \leq 85\%)$ $0 \quad (D_r > 85\%)$	$l_3$
۰/۰۰۰۰۵۹۸	-	$K_h=K_v(m/s)$
۰/۷	-	$e$
۰/۳	-	$\vartheta$

در جدول (۲-۳)  $\rho$  چگالی خاک،  $p_r$  فشار همه‌جانبه مرجع،  $G_{max}$  ماکزیمم اضافه فشار آب

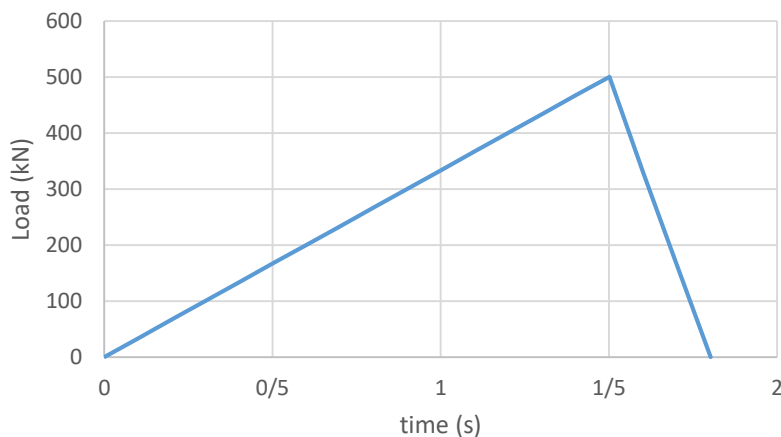
حفره‌ای نسبت به فشار  $p_r$ ،  $B_{max}$  ماکزیمم مدول بالک به نسبت مقدار  $\varphi, p_r$  زاویه شکست،  $\varphi_{PT}$

زاویه فاز انتقال یا مرز میان اتساع و انقباض،  $N$  ضریب وابسته به فشار،  $c$  پارامتر انقباض،  $d_1$  و  $d_2$

پارامترهای اتساع،  $l_1, l_2$  و  $l_3$  پارامترهای روانگرایی،  $k_h$  و  $k_v$  ضرایب قائم و افقی نفوذپذیری،  $e$  نسبت

تخلخل خاک و در نهایت  $\vartheta$  ضریب پواسون خاک است.

در اینجا نیز نیروی وارده به نمونه از طریق معرفی یک سری زمانی و اعمال آن سری به سر شمع صورت می‌پذیرد. شکل (۱۲-۳) بیان‌کننده سری زمانی اعمالی به این نمونه‌ها می‌باشد. در این سری زمانی، زمان رسیدن نیرو از مقدار صفر به مقدار بیشینه  $1/5$  s و زمان حذف نیرو  $0/3$  s می‌باشد.

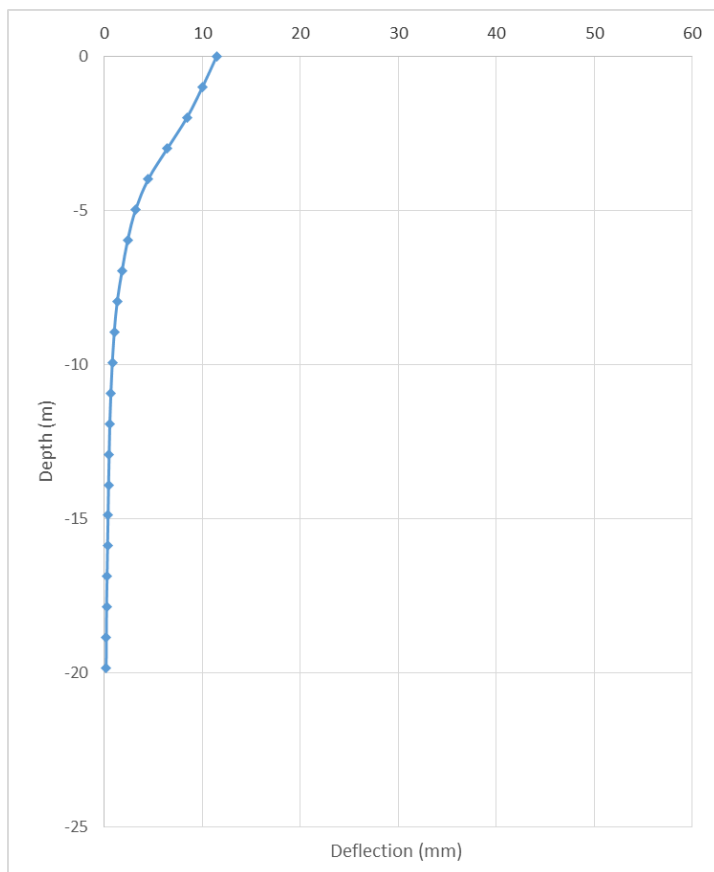


شکل ۱۲-۳ نمودار نیروی افقی وارده به نمونه‌ها

### ۳-۴-۱-۱ جابه‌جایی افقی شمع

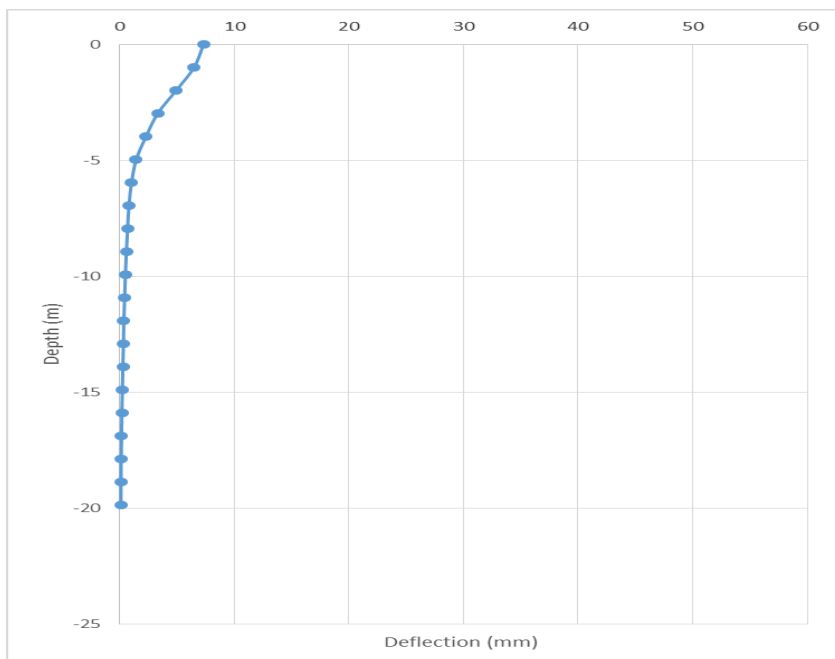
با اعمال نیرو به کلاهک شمع‌ها، نتایج زیر حاصل می‌شود.

تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل D0 در فضای دوبعدی xz در شکل (۱۳-۳) رسم شده است. در این نمودار مشاهده می‌شود که میزان جابجایی برای هردو شمع در تراز  $0/0$  برابر با  $11/44$  میلی‌متر می‌باشد. تغییر شکل شمع‌ها در عمق نیز مشابه یکدیگر است. این جابجایی‌ها پس از عمق  $13$  متر به کمتر از  $0/5$  میلی‌متر می‌رسد.

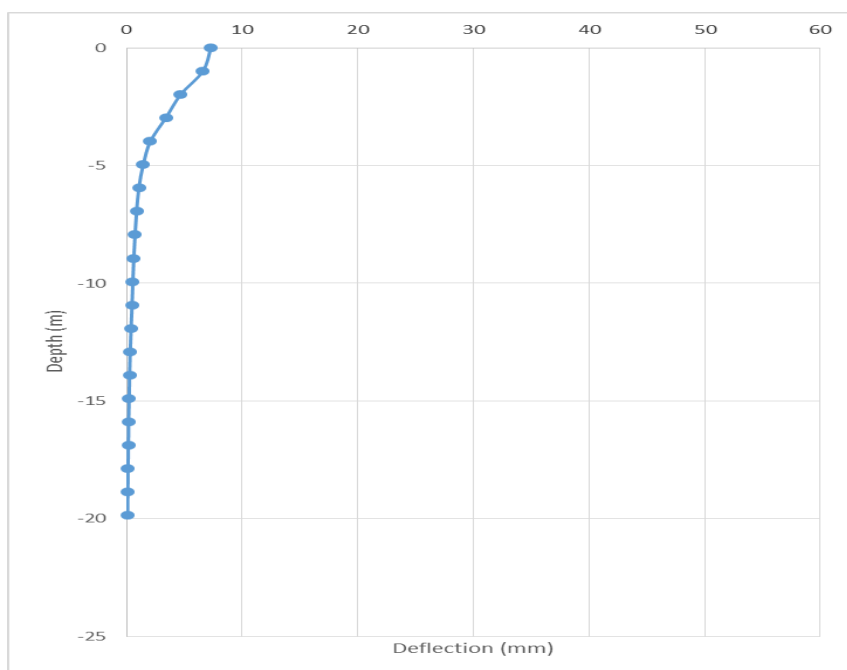


شکل ۳-۱۳ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل D0

تغییر شکل افقی شمع برای مدل D7 در فضای دوبعدی xz در شکل‌های (۳-۱۴) و (۳-۱۵) به ترتیب برای شمع سمت چپ (با زاویه منفی) و شمع سمت راست (با زاویه مثبت) رسم شده است. در این نمودارها مشاهده می‌شود که میزان جابجایی برای هردو شمع در تراز ۰/۰ برابر با ۷/۳ میلی‌متر است. تغییر شکل شمع‌ها در عمق نیز تقریباً مشابه یکدیگر است و بیشترین اختلاف جابجایی بین دو شمع در عمق به میزان ۰/۲ میلی‌متر می‌باشد. این جابجایی‌ها پس از عمق ده متر به کمتر از ۰/۵ میلی‌متر می‌رسد.



شکل ۳-۱۴ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل D7 برای شمع با زاویه منفی



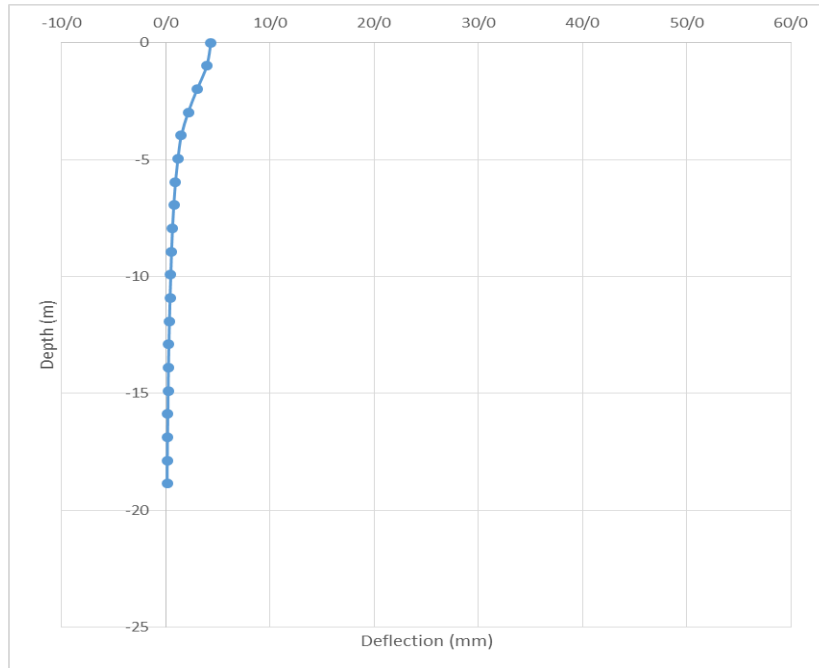
شکل ۳-۱۵ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل D7 با زاویه مثبت

تغییر شکل افقی شمع برای مدل D15 در فضای دوبعدی xz در شکل‌های (۳-۱۶) و (۳-۱۷)

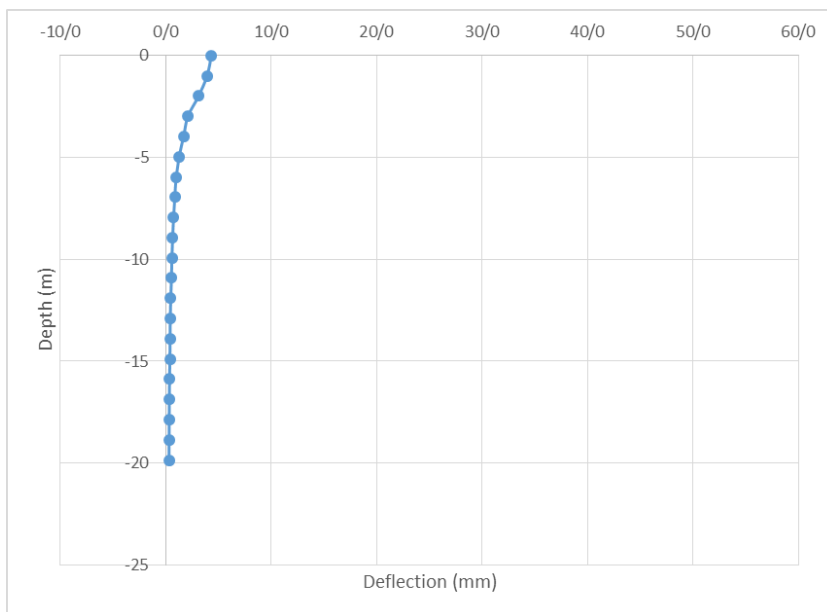
به ترتیب برای شمع سمت چپ (با زاویه منفی) و شمع سمت راست (با زاویه مثبت) رسم شده است.

همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود جابجایی هردو شمع در تراز ۰/۰ برابر با ۴/۳۳ میلی‌متر

می‌باشد. تغییر شکل شمع‌ها در عمق نیز تقریباً مشابه یکدیگر است ولی شمع سمت راست در عمق جابجایی بیشتری نسبت به شمع سمت چپ دارد. این اختلاف جابجایی بسیار کم و در حدود ۰/۲ میلی‌متر می‌باشد. در هر دو شمع جابجایی‌ها پس از عمق ۱۰ m به کمتر از ۰/۵ میلی‌متر می‌رسد.

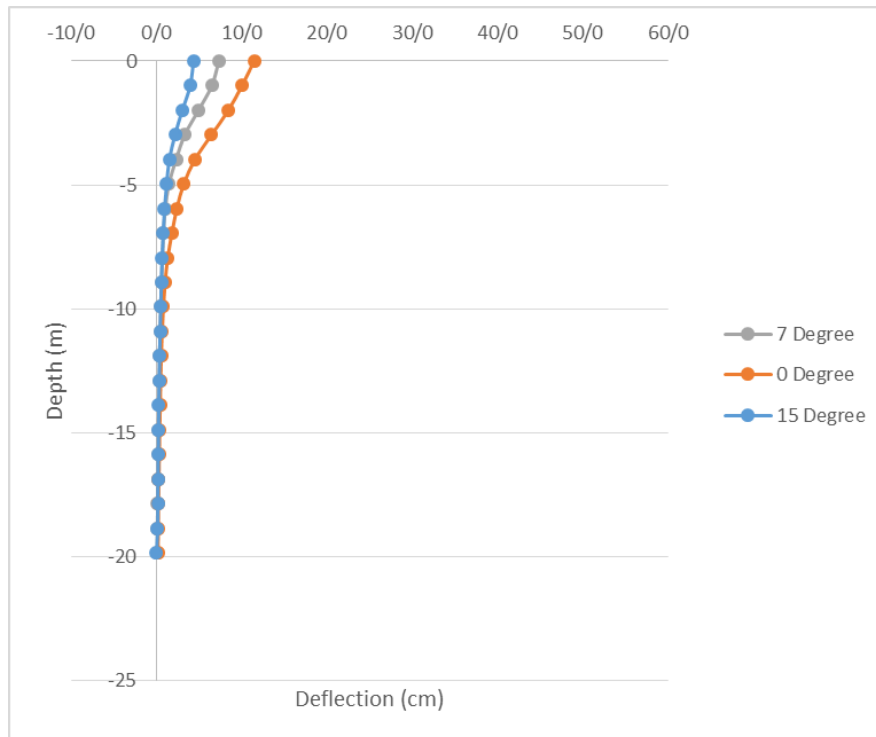


شکل ۳-۱۶ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل D15 با زاویه منفی



شکل ۳-۱۷ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل D15 با زاویه مثبت

جهت مقایسه بهتر میزان جابجایی در زوایای مختلف ، جابجایی شمع ها با زاویه منفی برای هر سه مدل در شکل (۳-۱۸) آورده شده است.



شکل ۳-۱۸ تغییر شکل افقی شمع‌ها باز زاویه منفی برای مدل هر سه مدل

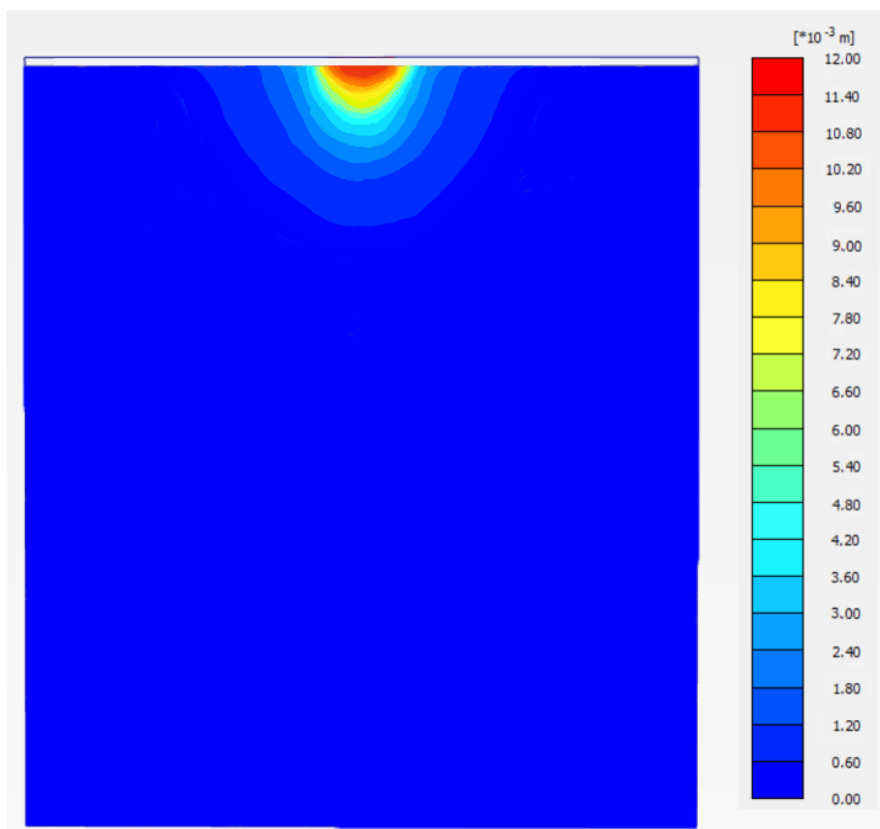
با مقایسه نمودارهای به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه ، میزان جابجایی شمع‌ها کاهش پیدا می‌کند به طوری که با افزایش زاویه نسبت به محور قائم از ۰ درجه به ۱۵ درجه ، جابجایی شمع‌ها در حدود ۱۶۴٪ کاهش پیدا می‌کند. همین‌طور با افزایش زاویه از ۰ درجه به ۷ درجه میزان بیشینه جابجایی در شمع‌ها حدوداً ۵۷٪ کاهش پیدا می‌کند.

### ۳-۴-۱-۲ جابه‌جایی خاک

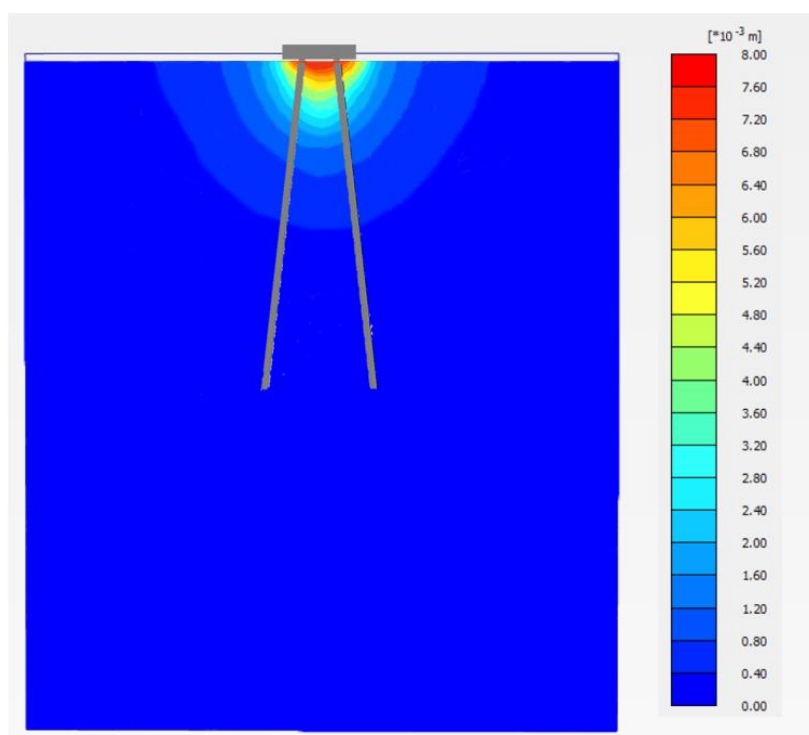
کانتورهای جابه‌جایی افقی بیان‌کننده جابه‌جایی افقی در لایه‌های مختلف خاک می‌باشد.

تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای خاک با زوایای مختلف شمع، در شکل‌های (۳-۱۹)

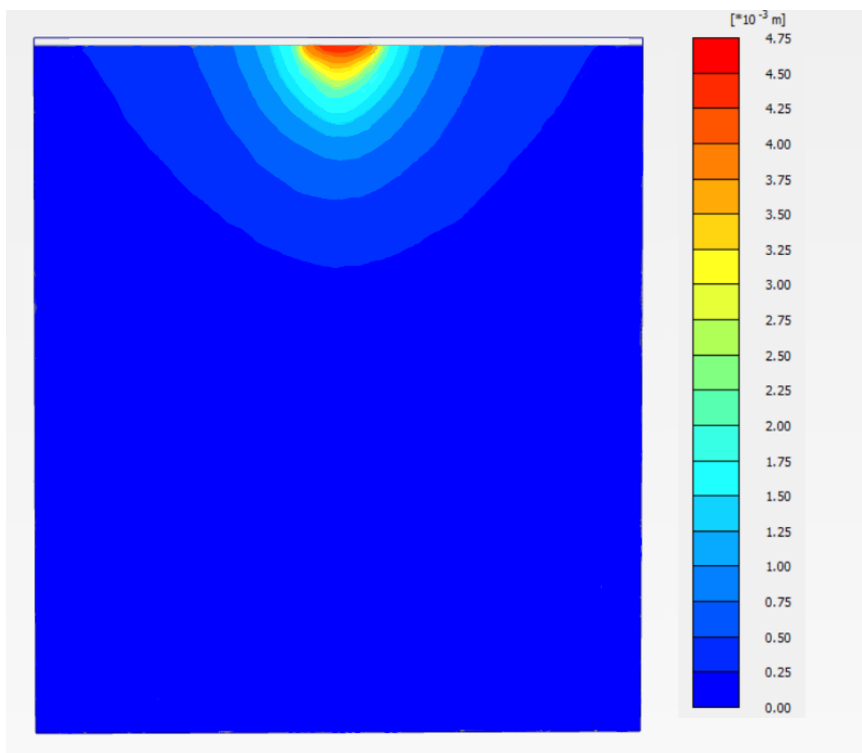
تا (۳-۲۱) آورده شده است.



شکل ۳-۱۹ تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای خاک با شمع ۰ درجه



شکل ۳-۲۰ تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای خاک با شمع ۷ درجه



شکل ۳-۲۱ تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای خاک با شمع ۱۵ درجه

در این تصاویر ناحیه قرمز نشان‌دهنده بیشترین جابجایی و ناحیه آبی نشان‌دهنده کمترین جابجایی است. همان‌طور که در تصاویر نشان داده شده است با افزایش زاویه تمایل شمع‌ها میزان جابجایی افقی خاک کمتر شده و ناحیه قرمز و نارنجی کوچک‌تر می‌شود.

از سوی دیگر ناحیه تغییر شکل یافته با افزایش زاویه تمایل شمع‌ها بیشتر می‌شود. به‌عنوان مثال ناحیه تغییر شکل یافته در راستای افقی برای گروه شمع با زاویه ۰ درجه حدوداً ۴/۲ متر است در حالی که این مقدار برای گروه شمع با زاویه تمایل ۷ حدوداً ۵/۵ متر و برای گروه شمع با زاویه تمایل ۱۵ درجه حدوداً ۸/۶ متر می‌باشد.

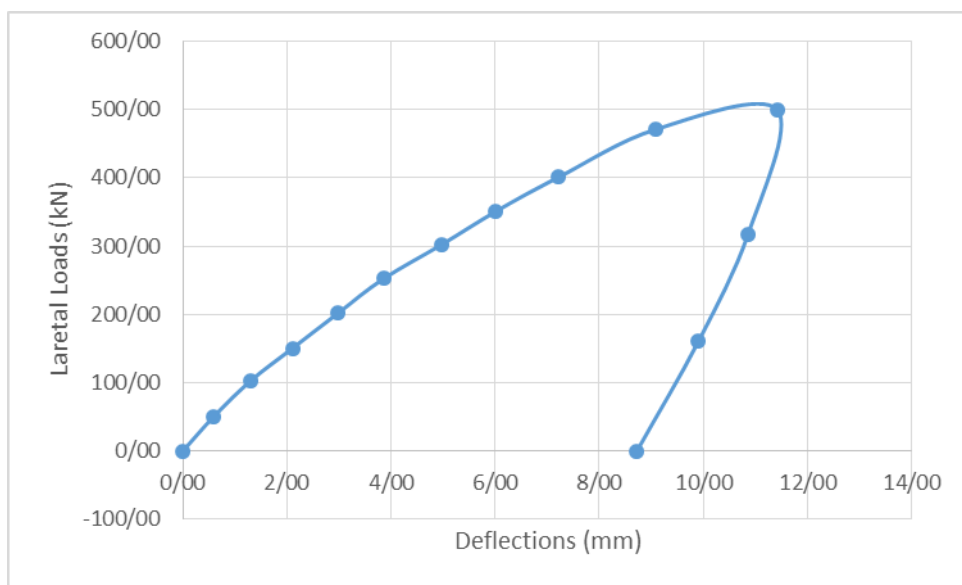
### ۳-۱-۴-۳ منحنی های p-y

منحنی های p-y نشان دهنده میزان جابجایی در سرشمع ها می‌باشند. بر اساس این منحنی

می‌توان میزان تغییر شکل ماندگار را مورد بررسی قرار داد.

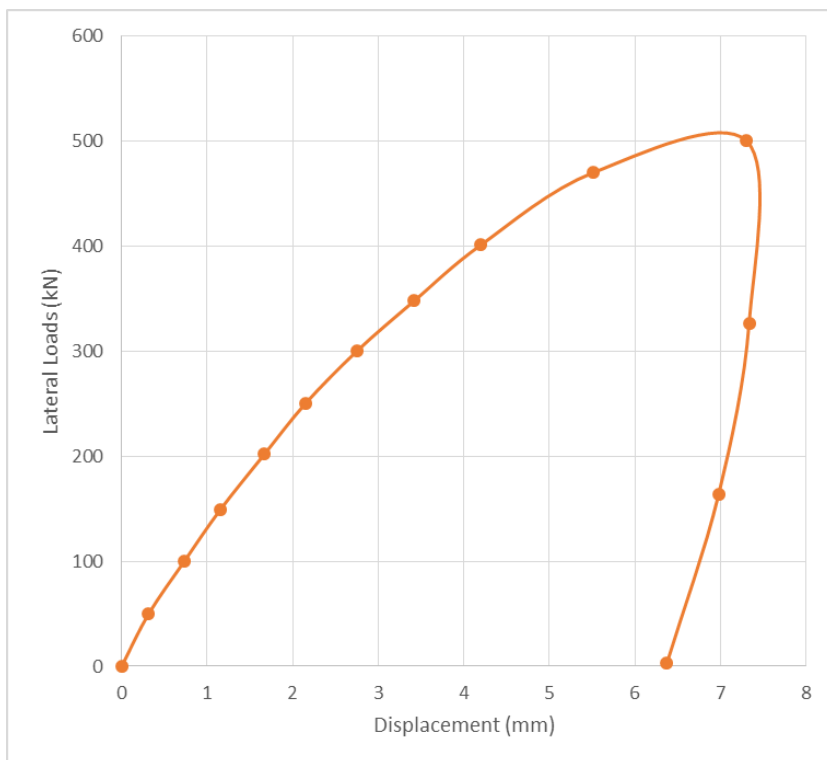


شکل (۳-۲۲) بیان کننده منحنی p-y در نمونه D0 می باشد. همان طور که از منحنی مشخص می شود این منحنی در ۱,۵S ابتدایی با افزایش نیرو افزایش می یابد و در ۰,۳S بعدی با حذف نیرو کاهش می یابد. در حالت بیشینه نیرو ، میزان تغییر مکان در تراز +۰/۰m به ۱۱/۴۴ میلی متر می رسد و با حذف نیرو به میزان ۸/۷۱ mm برمی گردد. بنابراین مشاهده می شود که با باربرداری کامل باز هم تغییر شکل ماندگاری در نمونه مشاهده خواهد شد. این تغییر شکل ماندگار را می توان به دلیل الاستیک بودن ماده شمع به خاک مربوط دانست.



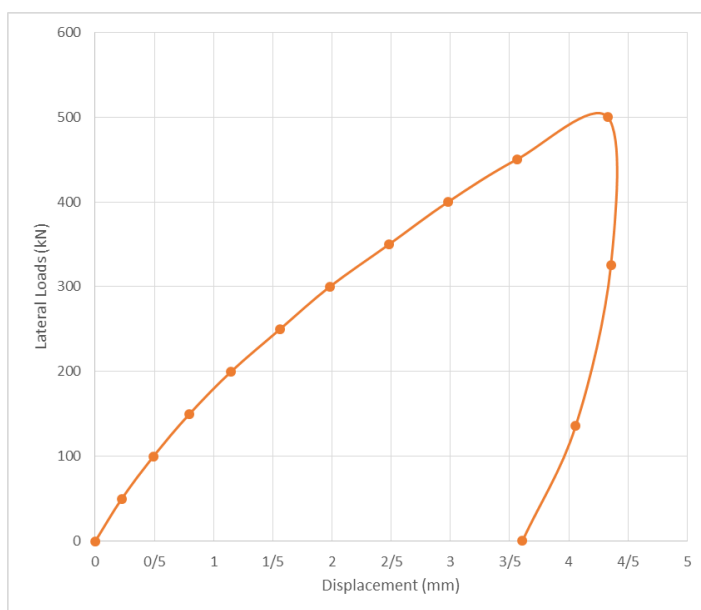
شکل ۳-۲۲ منحنی p-y نمونه D0

شکل (۳-۲۳) بیان کننده منحنی p-y در نمونه D7 می باشد. میزان تغییر مکان در تراز +۰/۰m نیز در حالت بیشینه نیرو به ۷/۳ میلی متر می رسد و با حذف نیرو به میزان ۶/۳ mm برمی گردد.



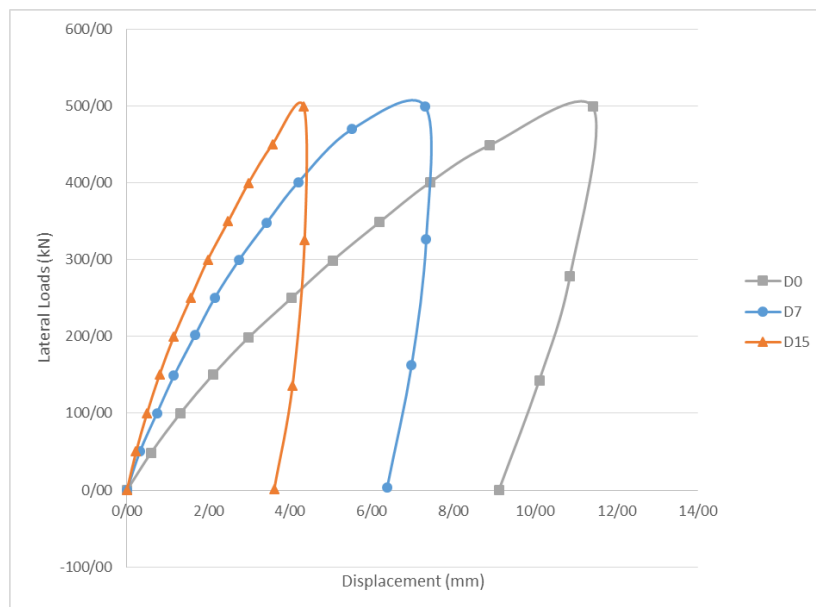
شکل ۳-۲۳ منحنی p-y نمونه D7

شکل (۳-۲۴) بیان کننده منحنی p-y در نمونه D15 می باشد. میزان تغییر مکان در تراز  $+0/0m$  نیز در حالت بیشینه نیرو به  $4/33$  میلی متر می رسد و با حذف نیرو به میزان  $3/6$  میلی متر برمی گردد.



شکل ۳-۲۴ منحنی p-y نمونه D15

شکل (۳-۲۵) جهت مقایسه بهتر منحنی های p-y هر سه گروه می باشد.

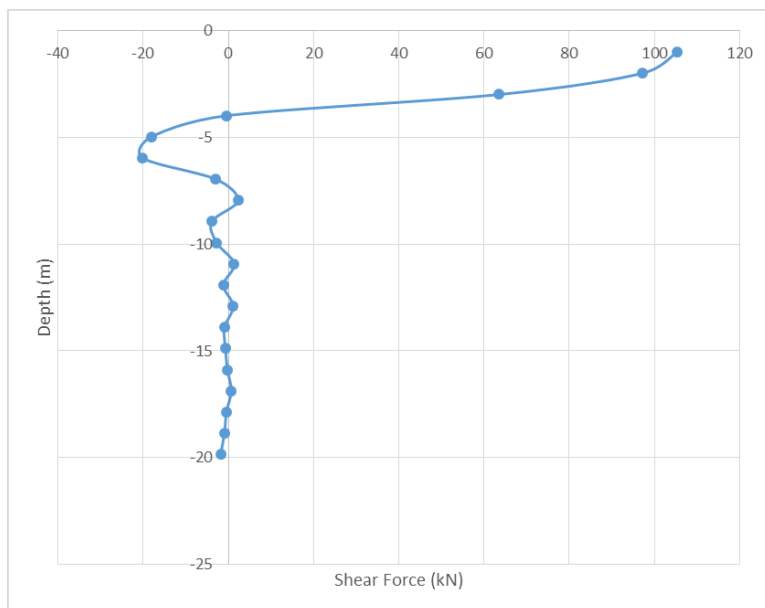


شکل ۳-۲۵ منحنی p-y نمونه D15

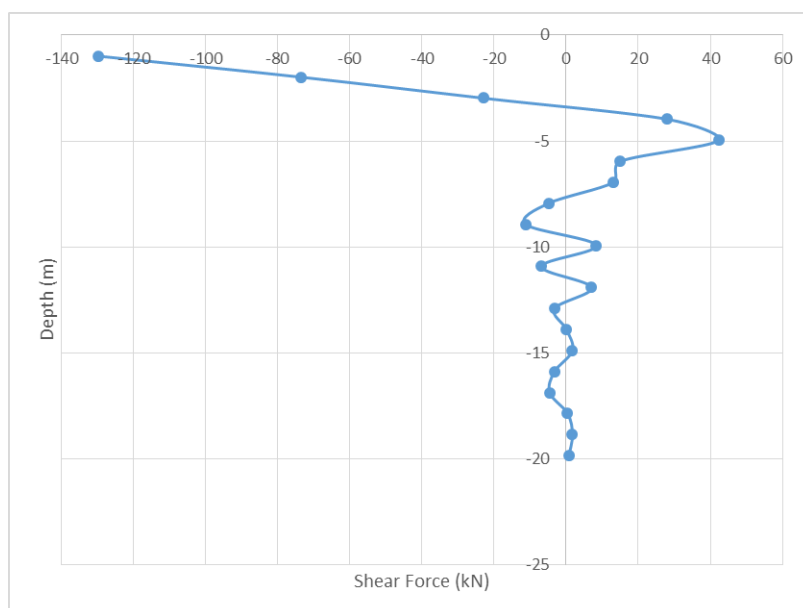
همانطور که از نمودار مشخص می شود با افزایش زاویه تمایل شمع ها تغییر مکان رفته رفته کمتر می شود و با باربرداری تغییر مکان کاهش می یابد. از سوی دیگر با باربرداری کامل باز هم مقداری تغییر شکل در شمع و خاک باقی می ماند که این تغییر شکل باقی مانده حاصل از تغییر شکل پلاستیک خاک می باشد. همچنین میزان کاهش تغییر مکان با افزایش زاویه شمع ها کاهش پیدا می کند. این تغییر شکل ماندگار در بارگذاری چرخه ای نقش مهمی دارد و الزاما باید در طراحی ها در نظر گرفته شود.

### ۴-۱-۴-۳ خمش و برش در شمع

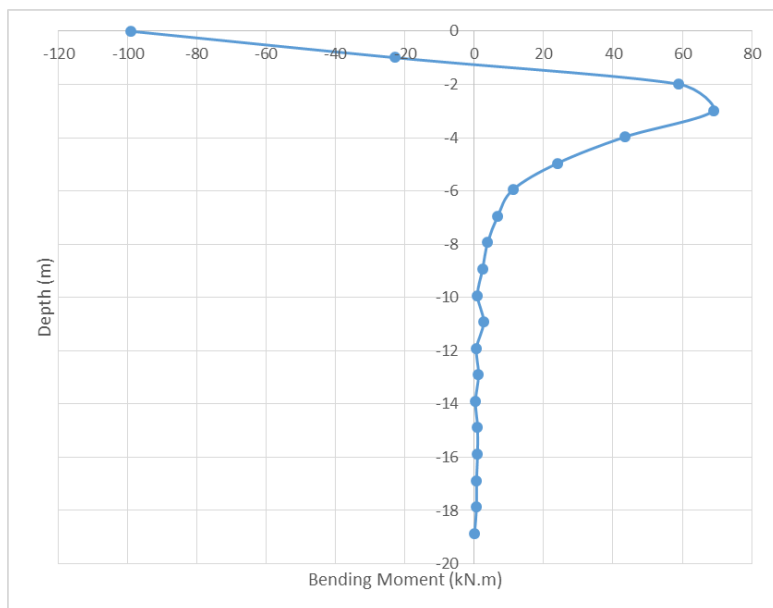
در گروه شمع های قائم یکی از مباحث مورد بررسی نیروی برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در شمع می باشد. نمودارهای مربوط به میزان لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در طول شمع ها برای مدل D0 در شکل های (۳-۲۶) تا (۳-۳۳) آورده شده اند.



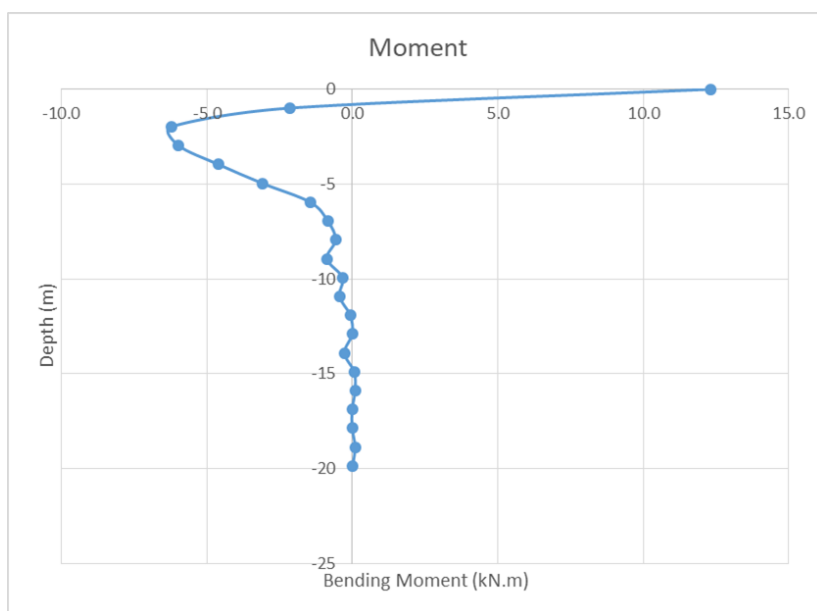
شکل ۲۶-۳ نیروی برشی ایجاد شده در طول شمع سمت چپ برای مدل D0



شکل ۲۷-۳ نیروی برشی ایجاد شده در طول شمع سمت راست برای مدل D0



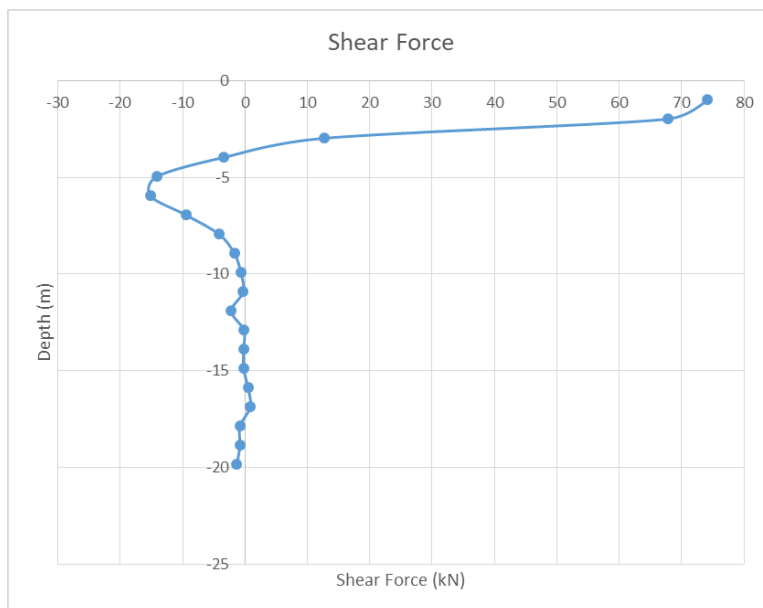
شکل ۲۸-۳ لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع سمت چپ برای مدل D0



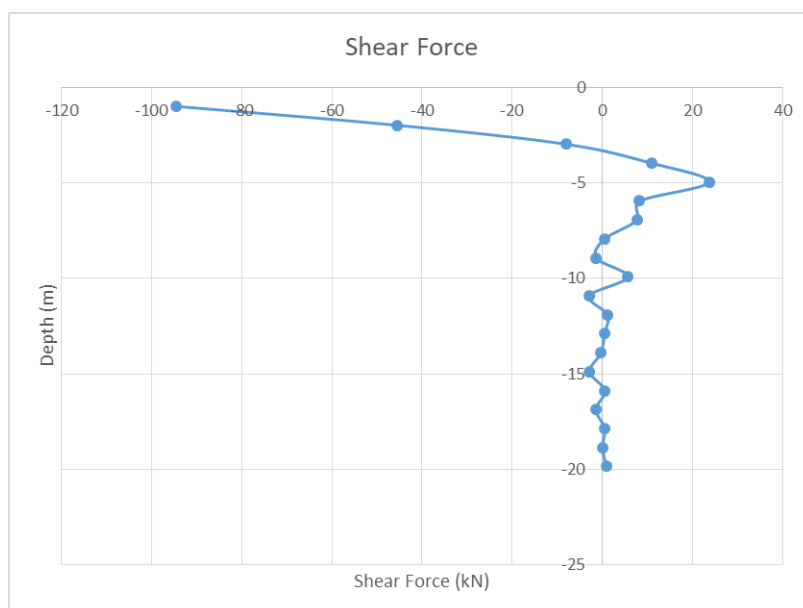
شکل ۲۹-۳ لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع سمت راست برای مدل D0

نمودارهای مربوط به میزان لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در طول شمع ها برای مدل

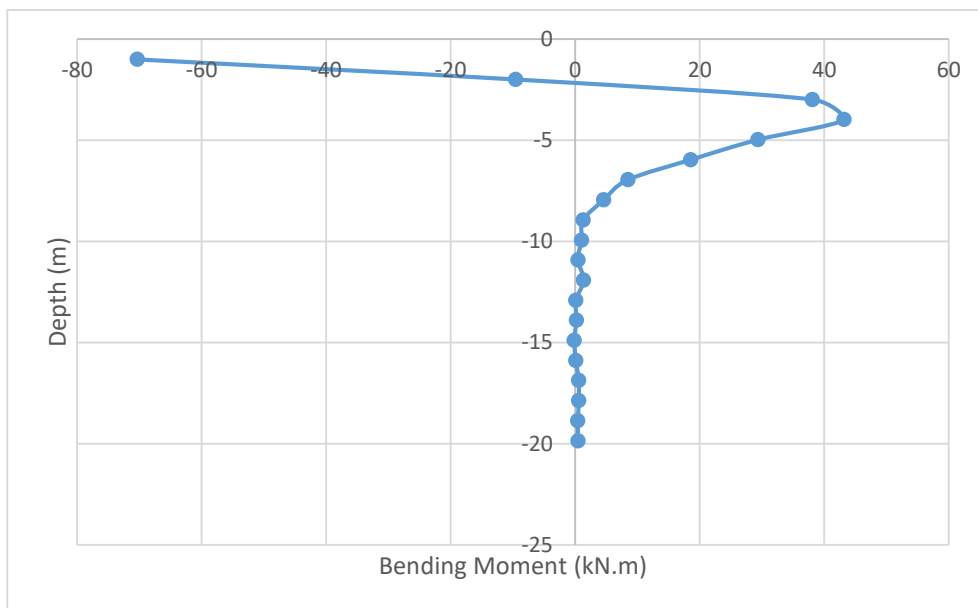
D7 در شکل های (۲۲-۴) تا (۲۵-۴) آورده شده اند.



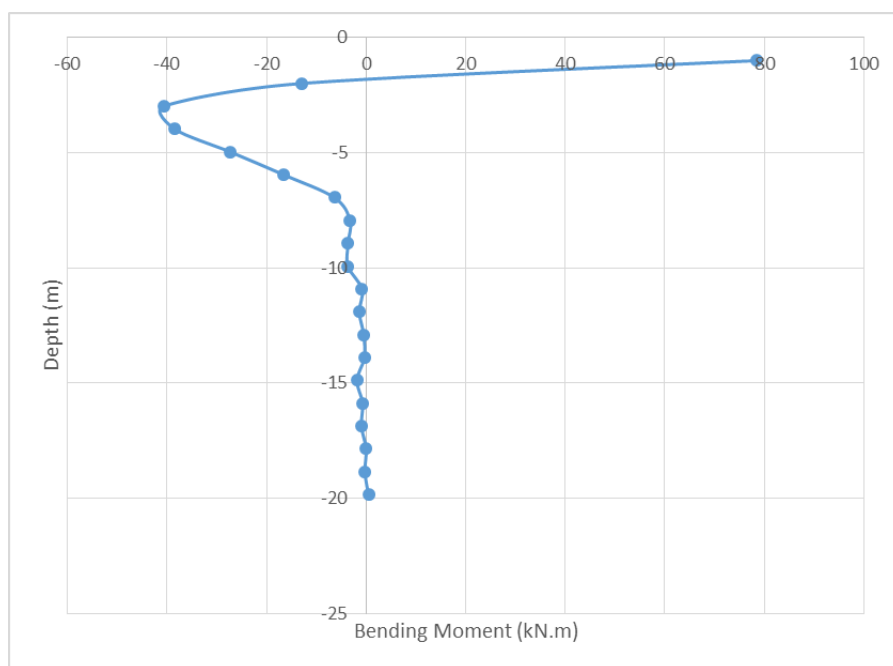
شکل ۳-۳۰ نیروی برشی ایجاد شده در طول شمع سمت چپ برای مدل D7



شکل ۳-۳۱ نیروی برشی ایجاد شده در طول شمع سمت راست برای مدل D7



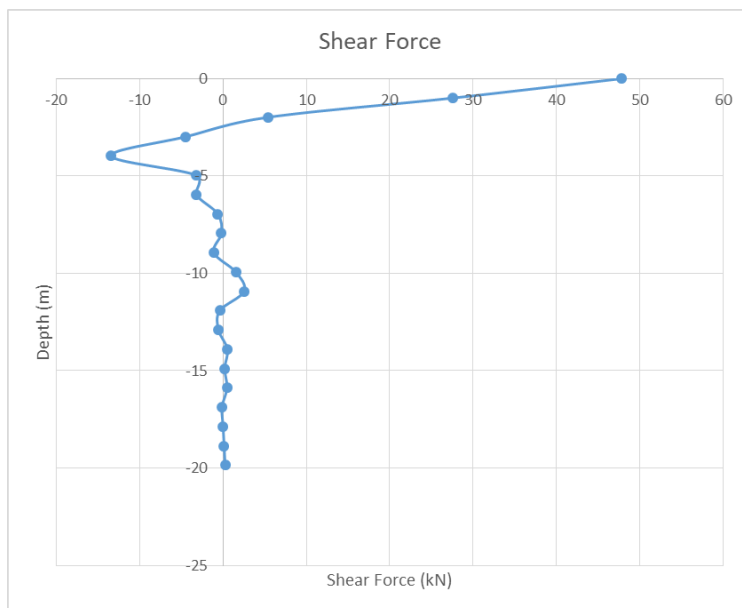
شکل ۳-۳۲ لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع سمت چپ برای مدل D7



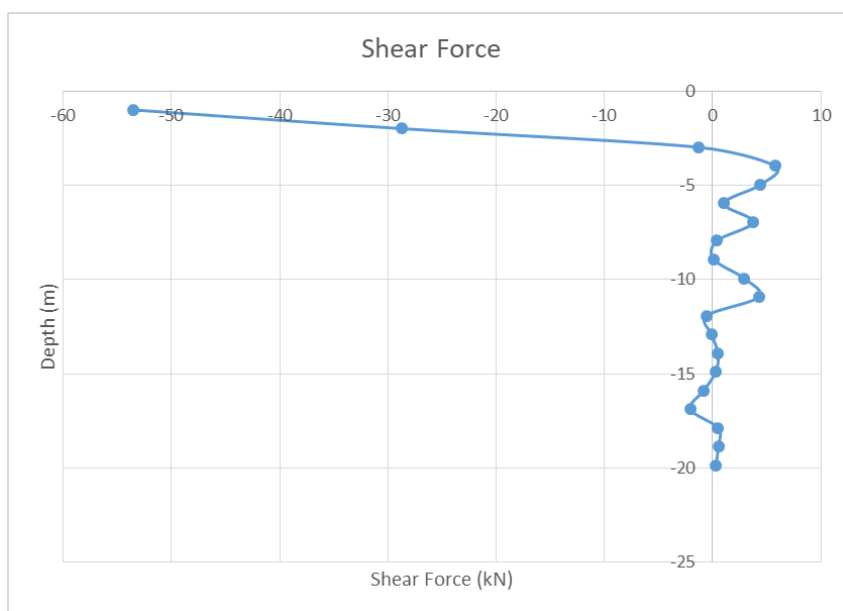
شکل ۳-۳۳ لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع سمت راست برای مدل D7

نمودارهای مربوط به میزان لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در طول شمع ها برای مدل

D15 در شکل های (۳-۳۴) تا (۳-۳۷) آورده شده اند.

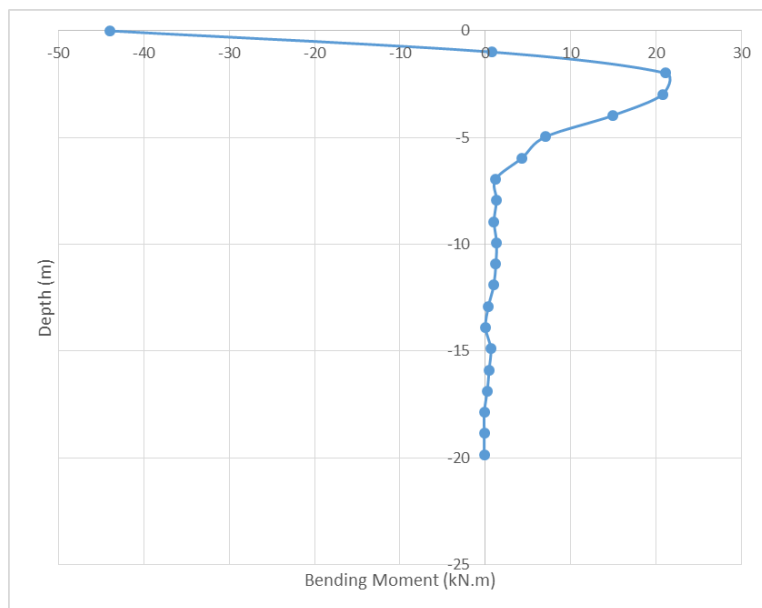


شکل ۳-۳۴ نیروی برشی ایجاد شده در طول شمع سمت چپ برای مدل D15

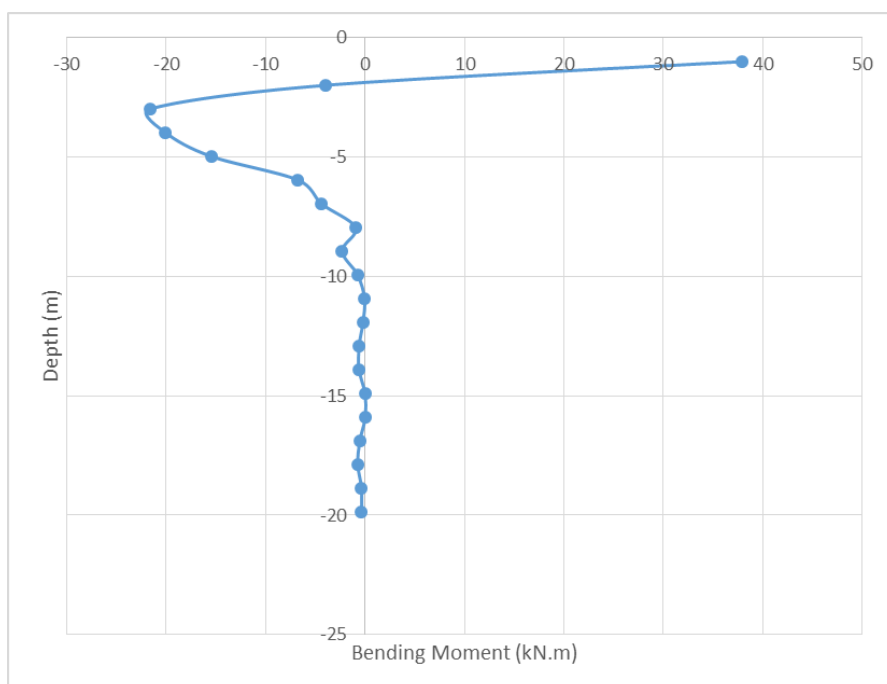


شکل ۳-۳۵ نیروی برشی ایجاد شده در طول شمع سمت راست برای مدل D15





شکل ۳-۳۶ لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع سمت چپ برای مدل D15



شکل ۳-۳۷ لنگر خمشی ایجاد شده در طول شمع سمت راست برای مدل D15

با توجه به نمودارهای ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه تمایل شمع‌ها نسبت به محور قائم، میزان لنگر خمشی و نیروی برشی در طول شمع‌ها کاهش پیدا می‌کند. همچنین میزان لنگر خمشی و نیروی برشی در شمع با زاویه منفی کمتر از شمع با زاویه مثبت است. به عنوان مثال در

گروه D0 بیشینه نیروی برشی در شمع با زاویه منفی حدودا ۱۰۵ kN و در گروه D15 این مقدار برای شمع با زاویه منفی به حدودا ۴۸ kN کاهش پیدا می کند.

از سوی دیگر میزان بیشینه لنگر خمشی گروه D0 در شمع با زاویه منفی حدودا ۱۰۰ kN و در گروه D15 میزان بیشینه لنگر خمشی برای شمع با زاویه منفی به حدودا ۴۴ kN کاهش پیدا می کند. می توان این مقایسه را برای شمع های هر گروه به صورت جداگانه نیز بررسی کرد. به این صورت که در گروه D7 میزان بیشینه نیروی برشی برای شمع با زاویه منفی حدودا ۷۴ kN و برای شمع با زاویه مثبت حدودا ۹۴ kN می باشد. این نتایج نشان دهنده این هستند که شمع ها با زاویه تمایل مثبت نسبت به شمع ها با زاویه منفی تحت نیروی برشی و لنگر خمشی بیشتری قرار دارند.

همچنین عمق موثر نیروی برشی و لنگر خمشی نیز با افزایش زاویه تمایل کمتر می شود. لنگر خمشی در عمق شمع ها با زاویه منفی در دو گروه D7 و D15 به ترتیب پس از ۷ و ۹ متر تقریبا برابر با صفر می شود.

### ۲-۴-۳ تأثیر تغییر تراکم خاک در گروه شمع

این گروه که با نماد  $D_r$  معرفی می گردد و شامل شمع با بارگذاری ۵۰۰ kN می باشند که در طی ۲ تراکم مختلف تحلیل می شوند. خصوصیات این گروه در جدول (۳-۴) آورده شده است و خصوصیات خاکهای مدل شده در این گروه به صورت جدول (۳-۵) می باشد.

در این نمونه ها سعی بر تغییر تراکم و بررسی اثر آن بر نتایج می باشیم لذا جز تراکم سایر پارامترها در نمونه ها ثابت می باشند.

جدول ۳-۴ خصوصیات نمونه‌های بخش تغییرات زاویه

اسم نمونه	میزان تراکم	قطر شمع (m)	میزان زاویه شمع‌ها	نوع بارگذاری
<b>Dr45</b>	٪۰,۴۵	۰/۵	۷ درجه	دینامیکی-ضربه‌ای
<b>Dr75</b>	٪۰,۷۵	۰/۵	۷ درجه	دینامیکی-ضربه‌ای

جدول ۳-۵ خصوصیات خاک بخش تغییرات تراکم خاک

Dr=75%	Dr=45%	فرمول	نماد
2.017	1.774	$2.11(D_r)^{0.1567}$	$\rho\left(\frac{ton}{m^3}\right)$
102594.392	77021.335	$10500 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} P_r^{0.4}$	$G_{max}(kPa)$
222287.85	166879.69	$G_r \frac{2(1 + \vartheta)}{3(1 - 2\vartheta)}$	$B_{max}(kPa)$
37.15	32.29	$16.2D_r + 25$	$\varphi(degree)$
37.15	32.29	$16.2D_r + 25$	$\varphi_{PT}(degree)$
80	80	Constant	$p_r(kPa)$
0.1	0.1	Constant	$\gamma_{max}$
0.5	0.5	Constant	$N$
0.043	0.043	$0.0288D_r^{-1.4172}$	$c$
0.615	0.615	$1.147D_r - 0.2454$ $\geq 0$	$d_l$

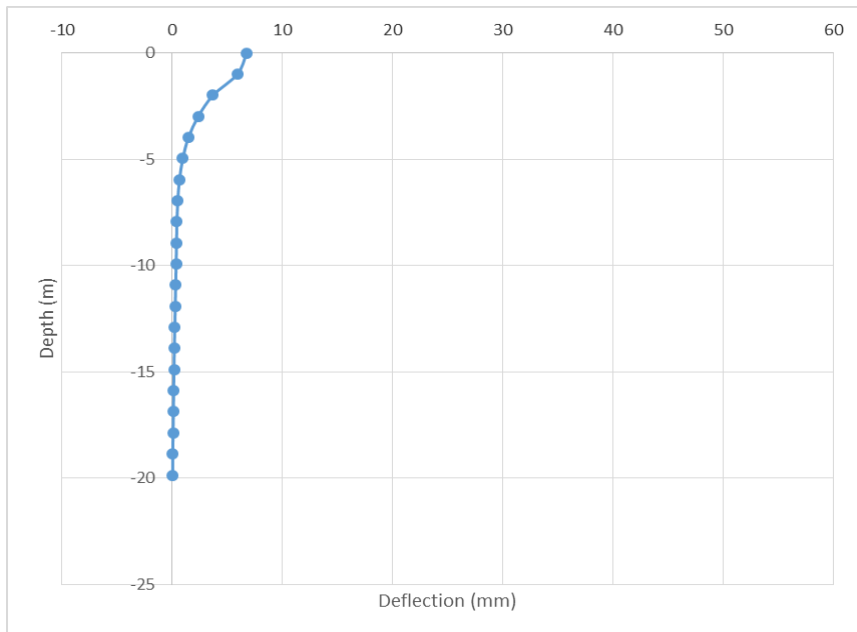
3.508	3.508	$6.9686D_r - 1.7187 \geq 0$	$d_2$
5.887	10	$10 \quad (D_r < 65\%)$ $-35.484D_r + 32.5 \quad (D_r \geq 65\%)$	$l_1$
0.00323	0.00974	$l_2 = -0.0154LnD_r - 0.0012$	$l_2$
1	1	$1 \quad (D_r \leq 85\%)$ $0 \quad (D_r > 85\%)$	$l_3$
0.00003646	0.0000598	-	$K_h=K_v(m/s)$ )
0.55	0.7	-	$e$
0.3	0.3	-	$\vartheta$

در جدول (۳-۵) که  $\rho$  چگالی خاک،  $p_r$  فشار همه جانبه مرجع،  $G_{max}$  ماکزیمم اضافه فشار آب حفره ای نسبت به فشار  $p_r$ ،  $B_{max}$  ماکزیمم مدول بالک به نسبت مقدار  $\varphi, p_r$  زاویه شکست،  $\varphi_{PT}$  زاویه فاز انتقال یا مرز میان اتساع و انقباض،  $N$  ضریب وابسته به فشار،  $c$  پارامتر انقباض،  $d_1$  و  $d_2$  پارامترهای اتساع،  $l_1, l_2$  و  $l_3$  پارامترهای روانگرایی،  $k_h$  و  $k_v$  ضرائب قائم و افقی نفوذپذیری،  $e$  نسبت تخلخل خاک و در نهایت  $\vartheta$  ضریب پواسون خاک است.

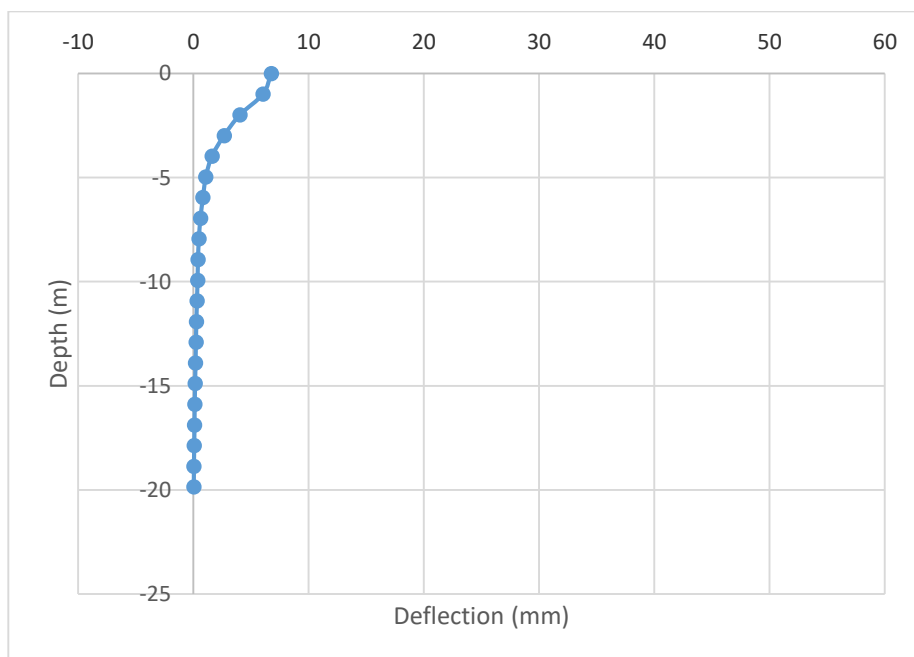
### ۳-۴-۲-۱ جابه جایی افقی شمع ها

نتایج زیر با اعمال نیرو به کلاهک شمع ها حاصل می شود. تغییر شکل افقی شمع ها برای مدل D75 در فضای دو بعدی  $xz$  در شکل های (۳-۳۸) و (۳-۳۹) به ترتیب برای شمع سمت چپ (با زاویه منفی) و شمع سمت راست (با زاویه مثبت) رسم شده است. همانطور که در این نمودارها مشاهده

می شود جابجایی هردو شمع در تراز  $0/0\text{ m}$  برابر با  $6/76\text{ mm}$  می باشد. تغییر شکل شمع ها در عمق نیز تقریبا مشابه یکدیگر است و بیشترین اختلاف جابجایی بین دو شمع در عمق به میزان  $\text{mm}$   $0/25$  می باشد. این جابجایی ها پس از عمق  $7\text{ m}$  به کمتر از  $0/5\text{ mm}$  می رسد.

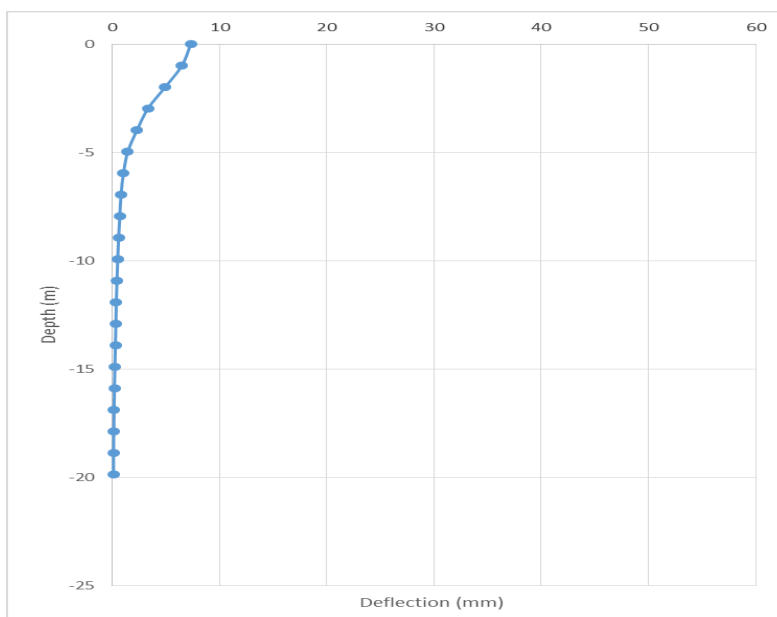


شکل ۳-۳۸ تغییر شکل افقی شمع ها برای مدل Dr75 با زاویه منفی

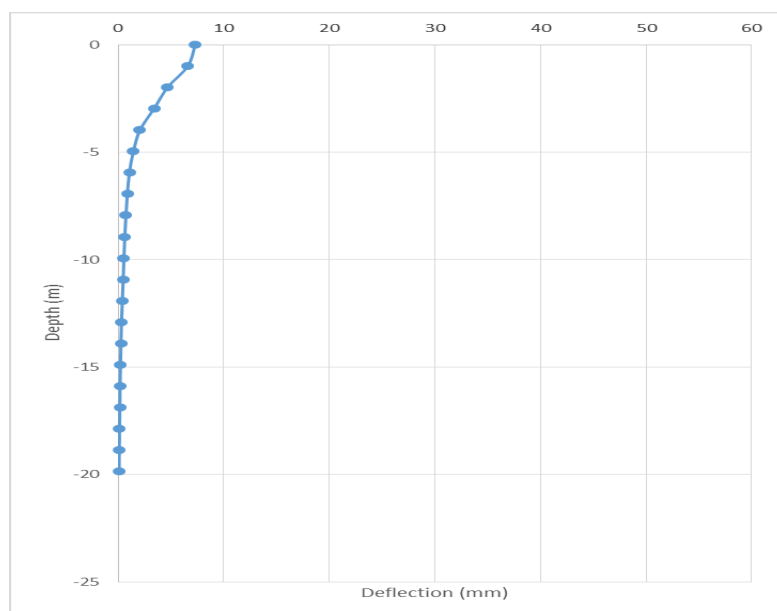


شکل ۳-۳۹ تغییر شکل افقی شمع ها برای مدل Dr75 با زاویه منفی

تغییر شکل افقی شمع برای مدل Dr45 در فضای دو بعدی xz در شکل های (۳-۴۰) و (۳-۴۱) به ترتیب برای شمع سمت چپ (با زاویه منفی) و شمع سمت راست (با زاویه مثبت) رسم شده است. میزان جابجایی برای هردو شمع در تراز ۰/۰ برابر با  $7/3$  mm می باشد. تغییر شکل شمع ها در عمق نیز تقریبا مشابه یکدیگر و بیشترین اختلاف جابجایی بین دو شمع در عمق به میزان  $0/2$  mm می باشد. این جابجایی ها پس از عمق  $10$  m به کمتر از  $0/5$  mm می رسد.



شکل ۳-۴۰ تغییر شکل افقی شمع ها برای مدل Dr45 برای شمع با زاویه منفی



شکل ۳-۴۱ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل Dr45 با زاویه مثبت

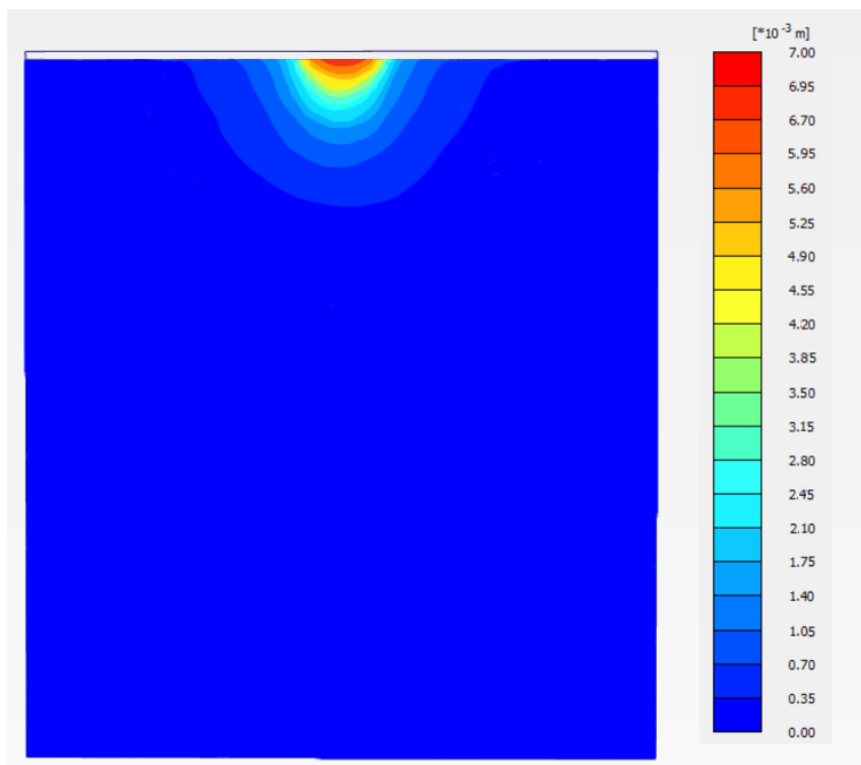
با مقایسه نمودارهای بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تراکم، میزان جابجایی شمع‌ها کاهش پیدا می‌کند. میزان این کاهش نسبت به تغییر زاویه کمتر بوده و با تغییر تراکم خاک از ۰,۴۵٪ به ۰,۷۵٪ جابجایی سرشمع‌ها از ۷/۳ mm به ۶/۷۶ mm کاهش پیدا می‌کند یعنی تنها به میزان ۰/۵۶ mm جابجایی کمتر می‌شود.

### ۲-۲-۴-۳ جابه‌جایی خاک

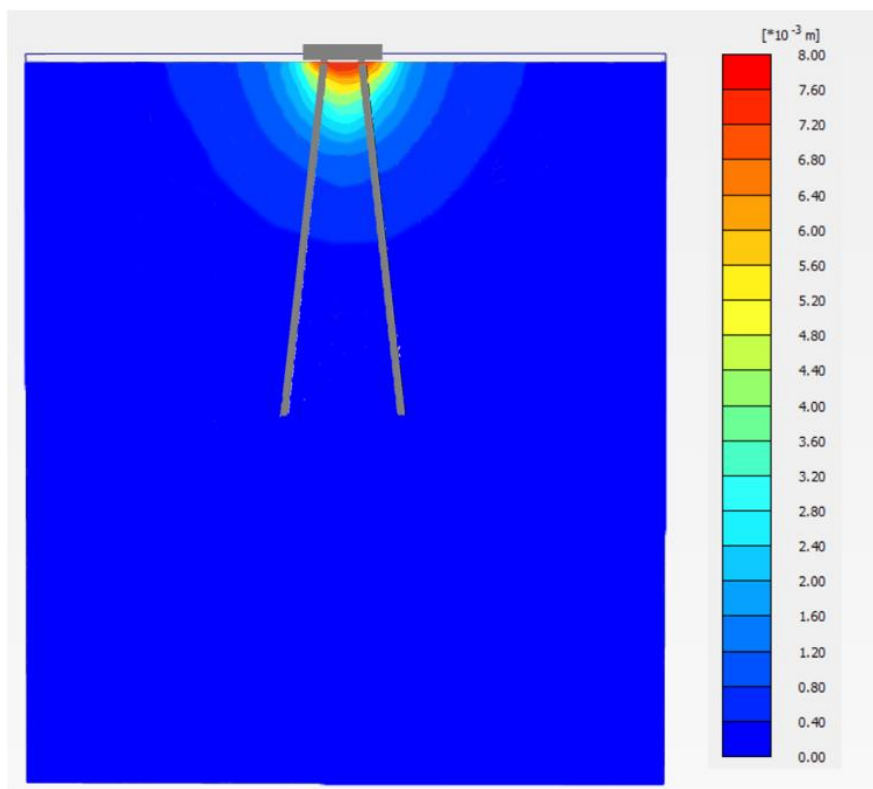
کانتورهای جابه‌جایی افقی بیان‌کننده جابه‌جایی افقی در لایه‌های مختلف خاک می‌باشد.

تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای خاک با دو تراکم مختلف، در شکل‌های (۳-۴۲) و

(۳-۴۳) آورده شده است.



شکل ۳-۴۲ تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای خاک با تراکم ۰,۷۵٪



شکل ۳-۴۳ تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای خاک با تراکم ۴۵٪

همانطور که در تصاویر نشان داده شده است با افزایش تراکم خاک میزان جابجایی افقی خاک کمتر شده و ناحیه قرمز و نارنجی کوچکتر می‌شود. ناحیه تغییر شکل یافته نیز با افزایش تراکم خاک کاهش پیدا می‌کند اما این تغییرات قابل توجه نیست.

به عنوان مثال ناحیه تغییر شکل یافته در راستای افقی برای مدل D75 حدوداً  $4/9$  m است در حالی که این مقدار برای مدل D45 حدوداً  $5/5$  m می‌باشد.

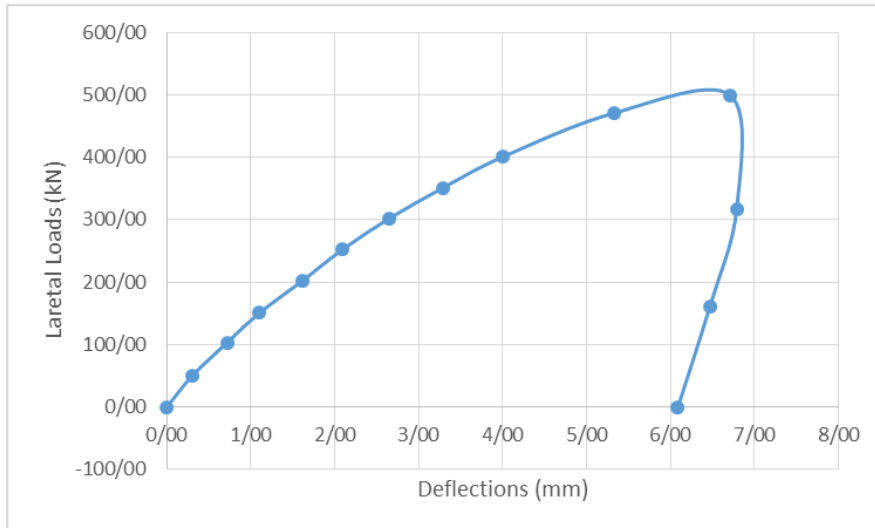
ناحیه تغییر شکل داده دارای فاصله مناسب از جداره می‌باشد و گیردار بودن جوانب در نتایج خلی ایجاد نمی‌کند.

### ۳-۲-۴-۳ منحنی های p-y

شکل (۳-۴۴) بیان کننده منحنی p-y در نمونه D75 می‌باشد. در حالت بیشینه نیرو ، میزان

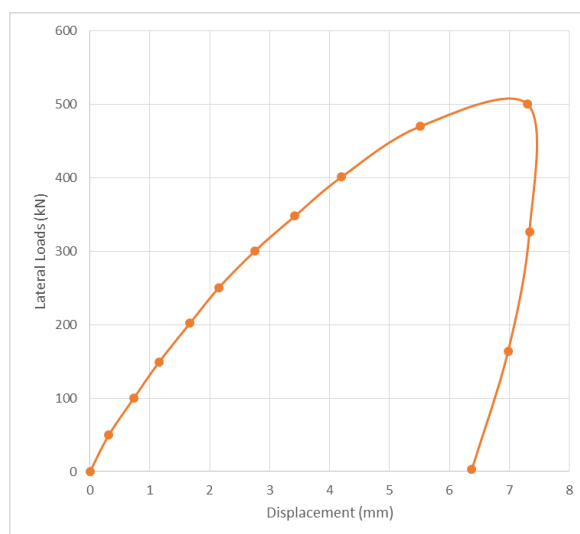


تغییر مکان در تراز  $+0/0$  m به  $6/76$  mm می‌رسد و با حذف نیرو به میزان  $6/08$  mm برمی‌گردد. بنابراین مشاهده می‌شود که با باربرداری کامل باز هم تغییر شکل ماندگاری در نمونه مشاهده خواهد شد. این تغییر شکل ماندگار را می‌توان به دلیل الاستیک بودن ماده شمع به خاک مربوط دانست.



شکل ۳-۴۴ منحنی p-y نمونه D75

شکل (۳-۴۵) بیان کننده منحنی p-y در نمونه D45 می‌باشد. میزان تغییر مکان در تراز  $+0/0$  m نیز در حالت بیشینه نیرو به  $7/3$  mm می‌رسد و با حذف نیرو به میزان  $6/3$  mm برمی‌گردد.



شکل ۳-۴۵ منحنی p-y نمونه D45

همانطور که از نمودار مشخص می‌شود با افزایش تراکم خاک تغییر مکان کمتر می‌شود و با باربرداری تغییر مکان کاهش می‌یابد اما این تغییر مکان زیاد نیست. از سوی دیگر با باربرداری کامل باز هم مقداری تغییر شکل در شمع و خاک باقی می‌ماند. همچنین تغییر مکان بازگشتی پس از برداشتن بارگذاری در خاک متراکم کمتر می‌باشد.

### ۳-۴-۳ تأثیر تغییر قطر شمع در گروه شمع

این گروه که با نماد R معرفی می‌گردد و شامل گروه شمع با دو قطر ۰/۵ m و ۰/۷ m می‌شود. خصوصیات این گروه در جدول (۳-۶) آورده شده است. در این نمونه‌ها سعی بر تغییر تراکم و بررسی اثر آن بر نتایج می‌باشیم لذا جز تراکم سایر پارامترها در نمونه‌ها ثابت می‌باشند.

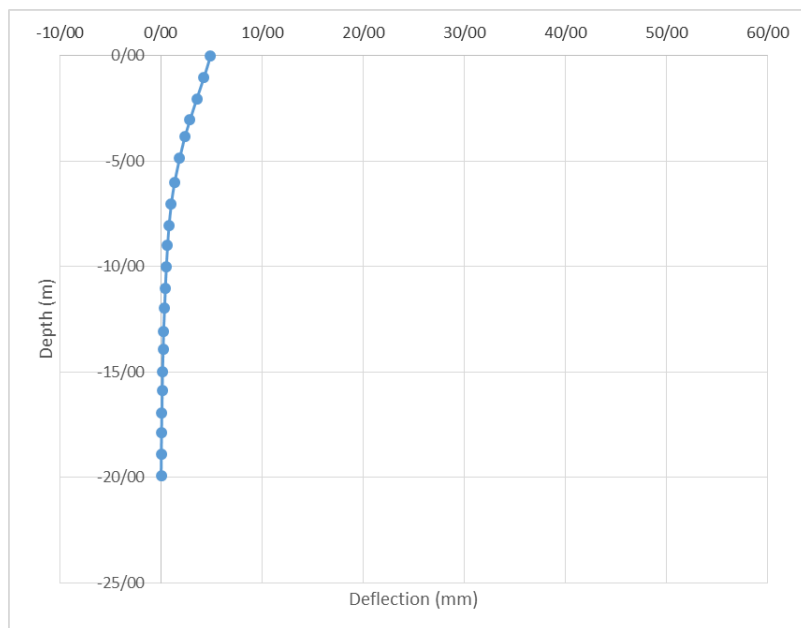
جدول ۳-۶ خصوصیات نمونه‌های بخش تغییرات قطر

اسم نمونه	میزان تراکم	قطر شمع (m)	میزان نیرو (kN)	نوع بارگذاری
<b>R50</b>	٪۰,۴۵	۰/۵	۵۰۰	دینامیکی-ضربه‌ای
<b>R70</b>	٪۰,۴۵	۰/۷	۵۰۰	دینامیکی-ضربه‌ای

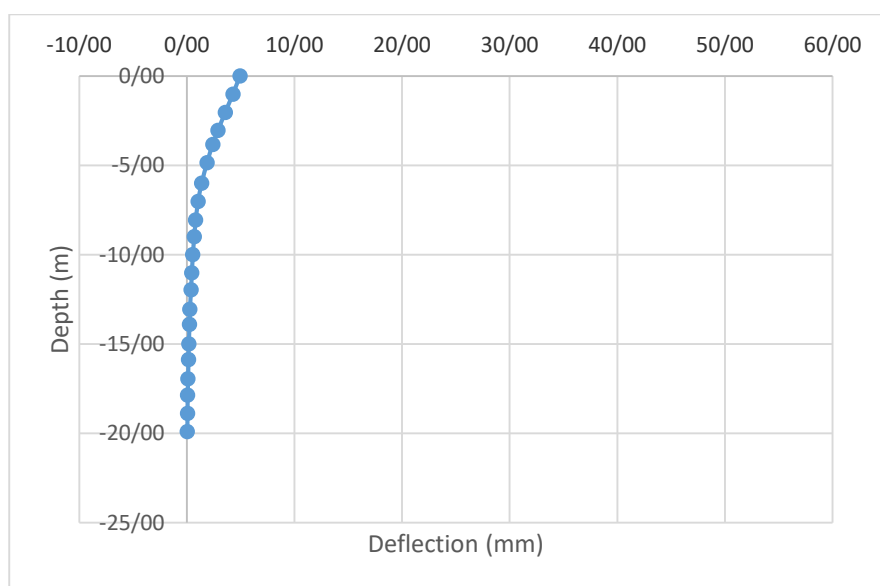
### ۱-۳-۴-۳ جابه‌جایی افقی شمع

نتایج زیر با اعمال نیرو به کلاهک شمع‌ها حاصل می‌شود.

تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل R70 در فضای دو بعدی xz در شکل‌های (۳-۴۶) تا (۳-۴۷) به ترتیب برای شمع سمت چپ (با زاویه منفی) و شمع سمت راست (با زاویه مثبت) رسم شده است. همانطور که در این نمودارها مشاهده می‌شود جابجایی هردو شمع در تراز ۰/۰ m برابر با mm ۴/۹۴ می‌باشد.

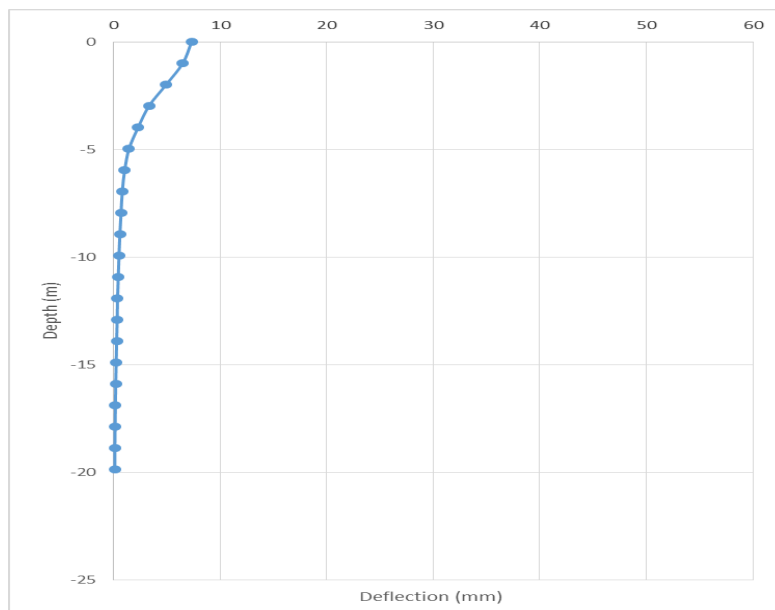


شکل ۳-۴۶ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل R70 با زاویه منفی

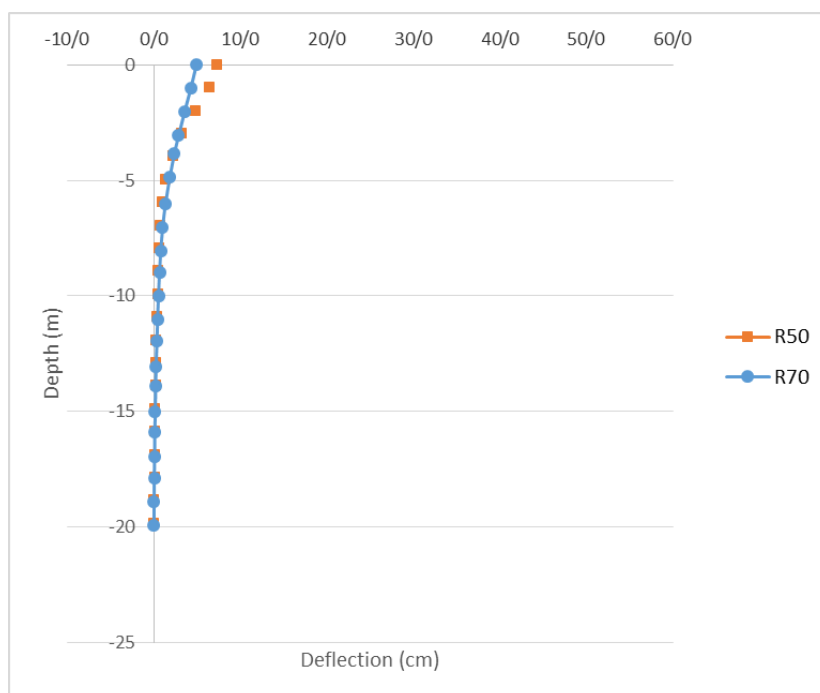


شکل ۳-۴۷ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل R70 با زاویه مثبت

تغییر شکل افقی شمع برای مدل R50 در فضای دو بعدی xz در شکل (۴-۴۸) و برای شمع سمت چپ (با زاویه منفی) و در شکل (۴-۴۹) شمع سمت راست (با زاویه مثبت) برای هر دو مدل جهت مقایسه بهتر رسم شده است. در این نمودارها مشاهده می‌شود که میزان جابجایی برای هر دو شمع در تراز ۰/۰ برابر با  $7/3 \text{ mm}$  می‌باشد.



شکل ۳-۴۸ تغییر شکل افقی شمع‌ها برای مدل R50 برای شمع با زاویه منفی



شکل ۳-۴۹ تغییر شکل افقی شمع‌ها با زاویه مثبت برای مدل هر دو مدل

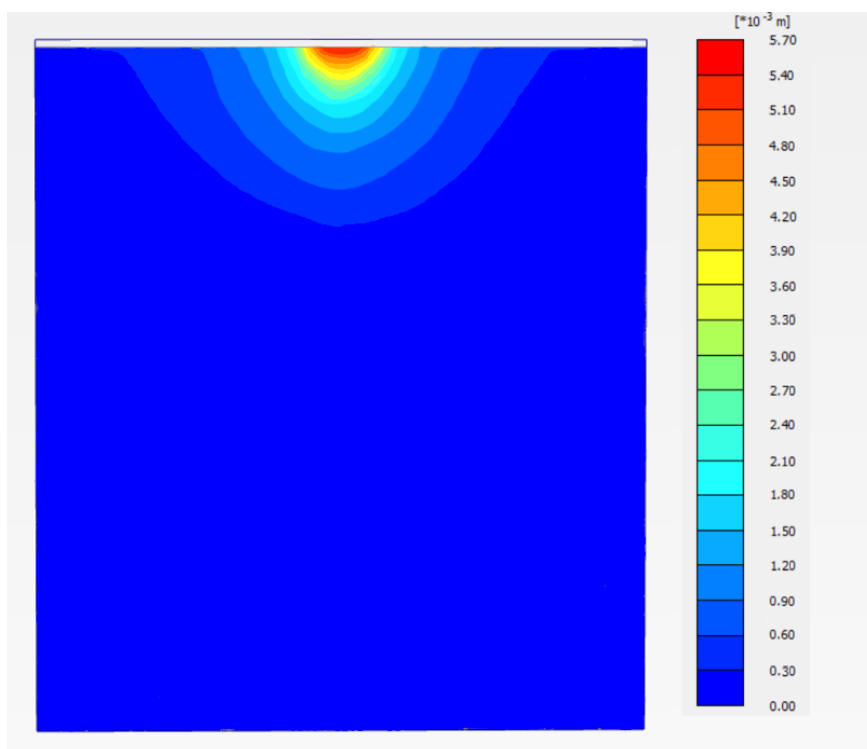
با مقایسه نمودار های بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که با قطر شمع ، میزان جابجایی شمع

ها کاهش پیدا می‌کند . با تغییر قطر شمع از ۰/۵ متر به ۰/۷ متر جابجایی سرشمع ها از ۷/۳ mm به

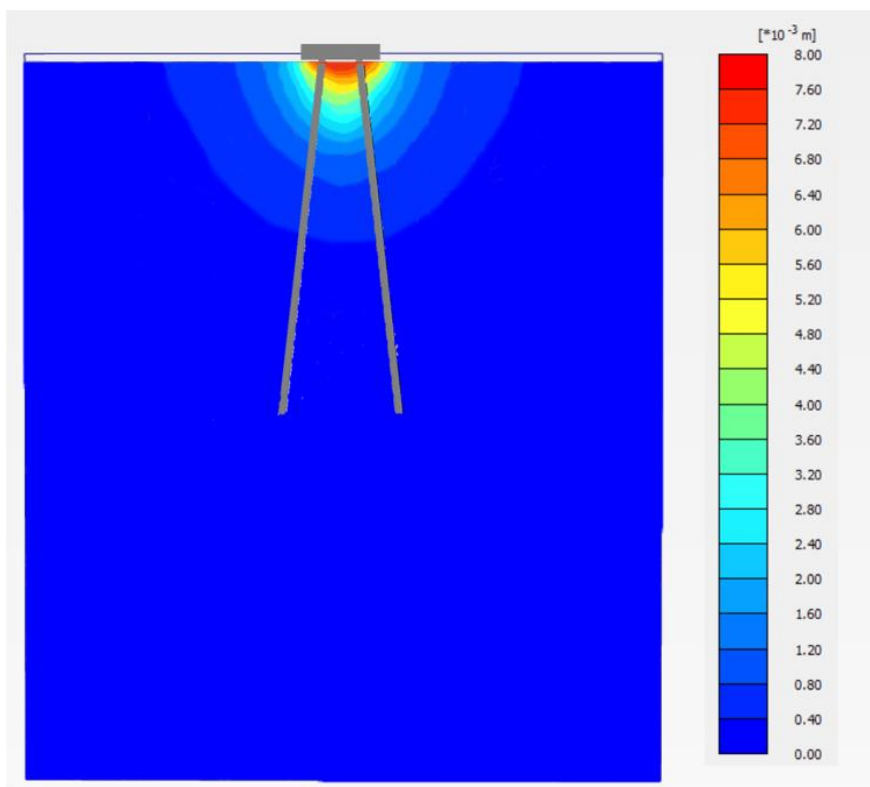
۴/۹۴ mm کاهش پیدا می‌کند.

### ۲-۳-۴-۳ جابه‌جایی خاک

تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای خاک برای دو قطر متفاوت شمع‌ها در شکل‌های (۵۰-۳) و (۵۱-۳) آورده شده است. جهت بررسی بهتر و تحلیل راحت‌تر تصاویر با کمی بزرگنمایی قرار داده شده‌اند.



شکل ۵۰-۳ تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای برای گروه R70

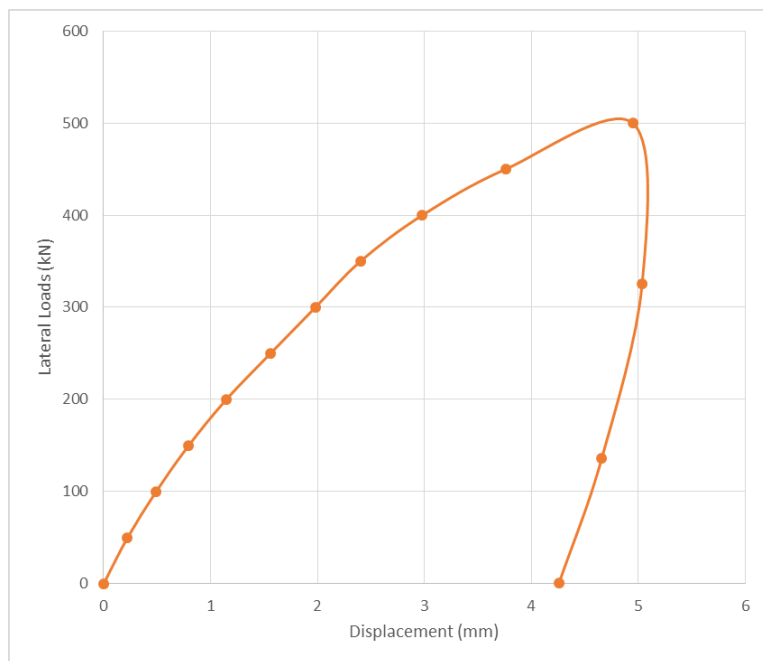


شکل ۳-۵۱ تغییر شکل افقی خاک در صفحه  $y=0$  برای گروه R50

همانطور که در تصاویر نشان داده شده است با افزایش قطر شمع میزان جابجایی افقی خاک کمتر شده و ناحیه قرمز و نارنجی کوچکتر می‌شود. ناحیه تغییر شکل یافته نیز با افزایش قطر شمع کاهش پیدا می‌کند.

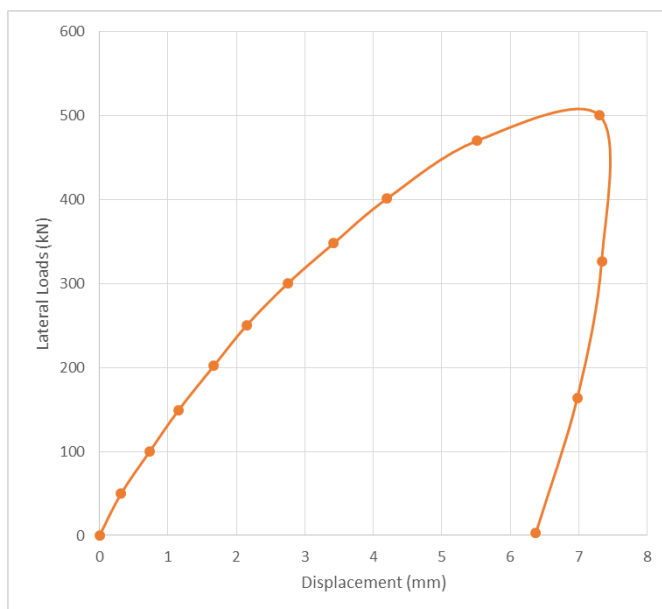
### ۳-۳-۴-۳ منحنی های $p-y$

شکل (۳-۵۲) بیان کننده منحنی  $p-y$  در نمونه R70 می‌باشد. در حالت بیشینه نیرو ، میزان تغییر مکان در تراز  $+0/0m$  به  $4/94mm$  می‌رسد و با حذف نیرو به میزان  $4/25 mm$  برمی‌گردد. بنابراین مشاهده می‌شود که با باربرداری کامل باز هم تغییر شکل ماندگاری در نمونه مشاهده خواهد شد. این تغییر شکل ماندگار را می‌توان به دلیل الاستیک بودن ماده شمع به خاک مربوط دانست.



شکل ۵۲-۳ منحنی p-y نمونه R70

شکل (۵۳-۳) بیان کننده منحنی p-y در نمونه R50 می باشد. میزان تغییر مکان در تراز  $+0/0\text{m}$  نیز در حالت بیشینه نیرو به  $7/3\text{mm}$  می رسد و با حذف نیرو به میزان  $6/3\text{mm}$  برمی گردد.



شکل ۵۳-۳ منحنی p-y نمونه R50

همانطور که از نمودار مشخص می شود با افزایش قطر شمع تغییر مکان کمتر می شود و با

باربرداری تغییر مکان کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با باربرداری کامل باز هم مقداری تغییر شکل در شمع و خاک باقی می‌ماند. همچنین تغییر مکان بازگشتی پس از برداشتن بارگذاری در گروه شمع با قطر بیشتر، کمتر می‌باشد.

### ۴-۴-۳ تأثیر تغییر نوع بارگذاری

همانطور که قبلاً هم اشاره شد تغییر شکل ماندگار در بارگذاری چرخه‌ای نقش مهمی دارد و باید در طراحی‌ها در نظر گرفته شود. از این رو به بررسی رفتار گروه شمع مایل تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌پردازیم. این مدل شامل گروه شمع با بارگذاری  $500 \text{ kN}$  و قطر  $0.5 \text{ m}$  می‌باشد که بارگذاری از نوع چرخه‌ای است. خصوصیات این نمونه در جدول (۳-۷) آورده شده است.

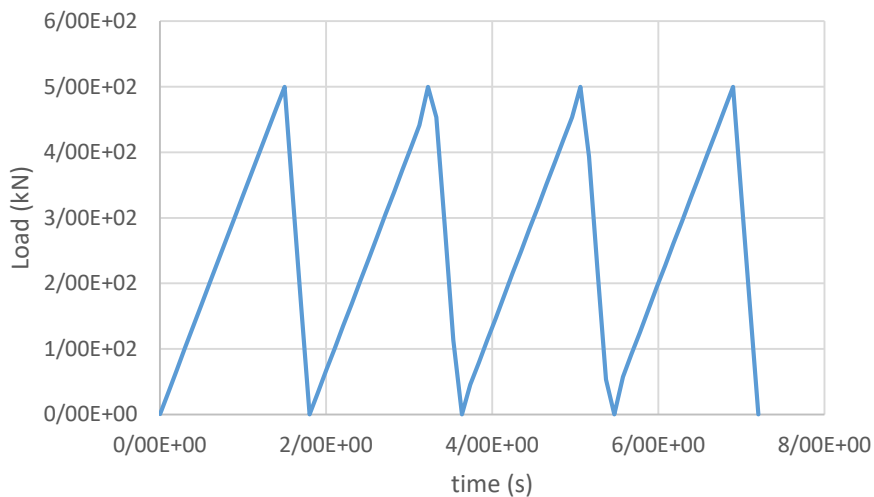
جدول ۳-۷ خصوصیات نمونه‌های بخش بارگذاری چرخه‌ای

اسم نمونه	میزان تراکم	قطر شمع (m)	تعداد چرخه	نوع بارگذاری
L500	۰,۴۵٪	۰/۵	۴	دینامیکی-چرخه‌ای

در این مدل بارگذاری از نوع دینامیکی با دوره تناوب است. نیروی وارده به نمونه از طریق معرفی یک سری زمانی و اعمال آن سری به سر شمع صورت می‌پذیرد.

شکل (۳-۵۴) بیان کننده سری زمانی اعمالی به نمونه L500 می‌باشد. در این سری زمانی، زمان رسیدن نیرو از مقدار صفر به مقدار بیشینه  $1/5 \text{ s}$  و زمان حذف نیرو  $0/3 \text{ s}$  می‌باشد و دوره تناوب بارگذاری  $1/8 \text{ s}$  می‌باشد. بارگذاری در ۴ چرخه انجام می‌شود که در نتیجه کل زمان بارگذاری  $7/2 \text{ s}$  می‌باشد. هدف از این تعداد چرخه بررسی میزان تغییرات تغییر شکل ماندگار در خاک است.



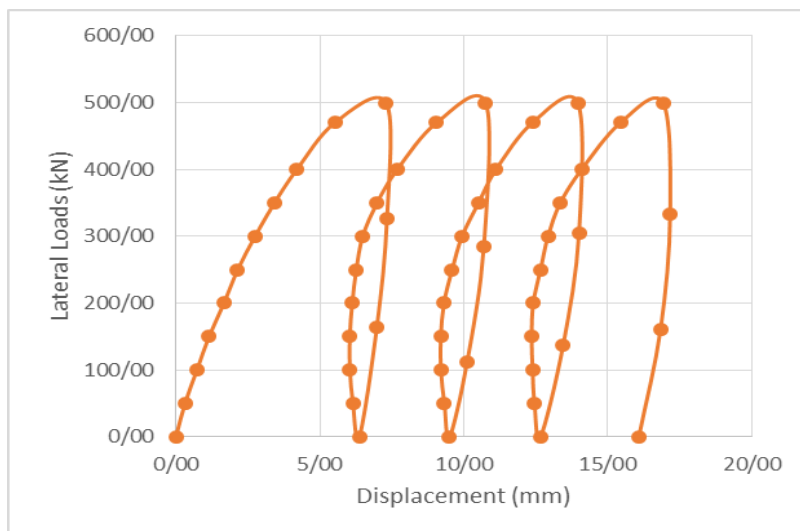


شکل ۳-۵۴ نمودار نیروی افقی وارده به نمونه L500

### ۱-۴-۴-۳ منحنی های p-y

در این بخش منحنی p-y را برای ترازهای (m) +۱۰ و ۰/۰ رسم می‌کنیم. شکل (۳-۵۵) بیان کننده منحنی p-y در نمونه L500 می‌باشد.

میزان تغییر مکان در تراز +۰,۰m در حالت بیشینه نیرو به ترتیب از چرخه ۱ تا ۴ برابر با ۷/۳۱، ۱۰/۷۶، ۱۳/۹۶ و ۱۶/۹۳ میلی‌متر می‌باشد و با حذف نیرو به ترتیب به مقادیر ۶/۳۸، ۹/۵۱، ۱۲/۶۷ و ۱۶/۰۹ میلی‌متر برمی‌گردد.



شکل ۳-۵۵ منحنی p-y نمونه L500

برطبق منحنی‌های رسم شده میزان تغییر شکل ماندگار در هر چرخه میزان قابل توجهی بوده و لذا اهمیت بارگذاری چرخه‌ای را نشان می‌دهد. میزان تغییر شکل ماندگار در تراز ۰/۰ در چرخه‌های ۲، ۳ و ۴ در حدود ۰/۰۰۳۲ و در چرخه اول برابر با ۰/۰۰۷۳ می‌باشد لذا تغییر شکل ماندگار در چرخه‌های ۲، ۳ و ۴ کاهش چشم‌گیری نسبت به چرخه ابتدایی دارند. از سوی دیگر کاهش قابل ملاحظه‌ای در چرخه‌های ۲، ۳ و ۴ دیده نمی‌شود. لذا در محلهایی که تحت بارگذاری پی در پی قرار می‌گیرند لحاظ نمودن اثر چرخه بارگذاری بسیار مهم می‌باشد.



## ۴- فصل چهارم

### نتایج و پیشنهادات

## ۱-۴ مقدمه

در این بخش با توجه به مباحث فصل‌های گذشته، به جمع بندی نتایج کلی پرداخته می‌شود. در پایان نیز پیشنهادات برای مطالعات آتی معرفی می‌گردند.

## ۲-۴ نتایج کلی

- جهت کاهش جابجایی خاک و شمع می‌توان از گروه شمع بجای تک شمع استفاده کرد. در صورت بالا بودن تنش برشی و جابجایی در شمع های قائم می‌توان از گروه شمع با شمع مایل جهت کاهش تنش برشی و جابجایی ها استفاده نمود.
- با توجه به مطالعات به عمل آمده این نتیجه حاصل گردید که با افزایش زاویه تمایل شمع ها نسبت به محور قائم میزان جابجایی افقی در شمع ها و سر شمع کاهش پیدا می‌کند به گونه ای که با تغییر زاویه تمایل از ۰ درجه به ۱۵ درجه این تغییرات ۱۶۴٪ کاهش پیدا می‌کند.
- با بررسی نمودار ها نتیجه می‌شود که میزان کاهش جابجایی پس از باربرداری با افزایش زاویه تمایل شمع ها ، کاهش پیدا می‌کند.
- با توجه به نتایج ، میزان جابجایی خاک با افزایش زاویه شمع ها کاهش پیدا می‌کند اما بخش های بیشتری از خاک تحت تاثیر قرار گرفته و جابجا می‌شود.
- بر اساس مطالعات انجام شده با افزایش میزان تراکم خاک میزان جابجایی شمع و خاک کاهش پیدا می‌کند اما این کاهش نسبت به عوامل دیگر کمتر می‌باشد.
- با توجه به نمودار های جابجایی خاک ، میزان کاهش جابجایی پس از باربرداری با افزایش میزان تراکم خاک ، کاهش پیدا می‌کند.
- در نتیجه مطالعات انجام شده مشخص گردید که با افزایش قطر در گروه شمع میزان جابجایی در سرشمع کاهش پیدا می‌کند ولی در مقابل عمق موثر تغییرات به میزان کمی افزایش پیدا می‌کند.
- با توجه به نتایج به دست آمده میزان جابجایی خاک با افزایش قطر شمع ها در گروه شمع کاهش پیدا

می‌کند اما به علت بالا رفتن صلبیت شمع بخش‌های بیشتری از خاک تحت تاثیر قرار می‌گیرد.

- با بررسی نمودارهای  $p-y$  اهمیت بررسی گروه شمع مایل تحت بارگذاری چرخه‌ای مشخص شد. به علت بالا رفتن سختی جانبی گروه شمع میزان کاهش جابجایی پس از برداشتن بار کمتر شده و جابجایی ماندگار تاثیر کمتری دارد. همچنین بیشترین میزان جابجایی در چرخه اول بارگذاری اتفاق می‌افتد اما نمی‌توان از تاثیر چرخه‌های بعدی بارگذاری در میزان جابجایی افقی گروه شمع چشم‌پوشی کرد.

## ۳-۴ پیشنهادها

- گروه شمع حاوی شمع‌های مایل و قائم به صورت همزمان و با زاویه تمایل در راستاهای مختلف بررسی شود.
- گروه شمع مایل تحت بارگذاری لرزه‌ای مورد مطالعه قرار گیرد.
- گروه شمع مایل در خاک‌های چند لایه بررسی گردد.
- رفتار ریز شمع‌ها با زاویه تمایل متفاوت مطالعه شود.
- تاثیر جنس و شکل شمع‌ها بر روی میزان جابجایی، نوع جابجایی و ظرفیت باربری گروه شمع مایل مدل و مورد تحقیق قرار گیرد.

## منابع

1. Awoshika, K., (1971), "Analysis of Foundation with Widely Spaced Piles", PhD thesis, University of Texas, Austin, Texas.
2. Basu, D., Salgado, R., Prezzi, M., (2008), "Analysis of Laterally Loaded Piles in Multilayered Soil Deposits", Joint Transportation Research Program, Final Report, FHWA/IN/JTRP-2007/23.
3. Broms, B., (1964), "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils", Journal of The Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 90 (3), pp. 123-156.
4. Brown, D. A., Morrison, C., and Reese, L. C., (1988). "Lateral load behavior of a pile group in sand." J. Geotech. Eng., 113(11), 1326-1343.
5. Brown, D.A., O'Neill, M.W., McVay, M., El Naggar, M.H. and Chakraborty, S. (2001). "Static and dynamic lateral loading of pile groups". National Cooperative Highway Research. Program Report, National Academy Press, Washington, D.C.
6. Curtin, G.W., Shaw, G., Parkinson, I.G., Golding, M.J., Seward, J.N., (2006), "Structural Foundation, Designer's Manual", Second Edition, Blackwell Publishing, Oxford, U.K.
7. Feagin, L.B., (1959), "Lateral Pile Loading Test", Transactions, ASCE, Vol. 102, pp. 236-254.
8. Hansen, B., (1961), "The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces", The Danish, Geotechnical Institute, Bulletin.

9. Kezdi, A., (1975), "Pile Foundations, In Foundation Engineering Handbook", Edited By N.F. Winterkorn and H.Y. Fang, Van Nostrand Reinhold, New York, USA.
10. Kitiydom, P., and Mastumoto, T., (2002), "A Simplified Analysis Method for Piled Raft and Foundation with Batter Piles", J. Geotech.Eng. Bangkok, Thailand, Vol.22, No 1, pp.47-60.
11. Matlock, H., (1970), "Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay", 2nd Offshore Technology Conference, Houston Texas.
12. McClelland, B., Focht, J.A., (1958), "Soil Modulus for Laterally Loaded Piles", Trans. ASCE., Vol. 123, pp.1049-1063.
13. Meyerhof, G.G., and Ranjan, G., (1973), "The bearing capacity of rigid piles under inclined loads in sand II: batter piles", Can. Geotech. J., 10, 71-85.
14. Murthy, N.S.V., (2007), "Advanced Foundation Engineering", Elevation Edition, Satish Kumar Jain for CBS Publishers and Distributors, New Delhi, India.
15. O'neill, M.W., Dunnavant, T.W., (1984), "A study of Effect of Scale, Velocity, and Cyclic Degradability on Laterally Loaded Single Piles in Overconsolidated Clay", Report No. UHCE 84-7, Dept. of Civil Engineering, University of Houston, Texas.
16. Parsiya, B.S, Dave, S.P., (2012), "Analytical Study of the Laterally Loaded Pile Group", International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, Vol. 1, Issue 3, pp. 284-286.
17. Pathak, B., (2011), Analysis of Static Lateral Load Test of Battered Pile Group at I-10 Twin Span Bridge, A Thesis For The Degree of Master of Science in Civil Engineering in The Department of Civil and Environment Engineering, Rourkela, India.
18. Poulos, H.G., and Madhav, M.R., (1971), "Analysis of movement of battered piles". Rep. No. R173, University of Sydney, 1-18.



19. Poulos, H. G., (1974), "Analysis Of Pile Groups Subjected To Vertical And Horizontal Loads", Australian Geotechnical Journal.
20. Prakash, S., and Subramanyam, G., (1965), "Behavior of battered piles under lateral loads". J. Indian Nat. Soc of Soil Mech. And Found. Eng., New Delhi, 4, 177-196.
21. Rajashree, S.S., Sitharam, G.T., (2001), "Nonlinear Finite-Element Modeling of Batter piles Under Lateral Load", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127 (7), pp. 604-612.
22. Reese, L.C., Welch, R.C., (1975), "Lateral Loadings of Deep Foundations in Stiff Clay", Journal of Geotechnical Engineering, Div, ASCE, Vol. 101, No. 7, pp. 633-649.
23. Sawant, V.A., Shukla, S.K., (2012), "Finite Element Analysis for Laterally Loaded Piles in Sloping Ground", Coupled Systems Mechanics, Vol. 1, No. 1, pp. 59-78.
24. Smith, T., Slyh, R., (1986), "Side Friction Mobilization Rates for Laterally Loaded Piles from the Pressuremeter", The Pressuremeter and Its Marine Applications: Second Intl. Symposium, ASTM STP 950, pp. 478-491.
25. Tschebotarioff, G.P., (1953), "The Resistance to Lateral Loading of Single Piles and Pile Group", ASTM, Spec. Publ. West Conshohocken, No. 154, pp. 38-48.
26. Winkler, E., (1867), "Die Lehre Von Der Elasticitat and Festigkeit", Prague, Dominicus.
27. Zhang, L., McVay, M.C., Han, J.H., Lai, P.W., (1999), "Centrifuge Modeling of Laterally Loaded Single Battered Piles in Sand", Candian Geotechnical Journal, Vol. 36(6), pp. 561-575.
28. Zhang, Y, Shao, S, Zhao, M, Liu, L., (2011), "Research on Bearing Capacity of Inclined Pile under Vertical Load", International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology.

۲۹. امیدعلی، ح.، محمدی، س. و فاخر، ع.، (۱۳۸۷)، " بررسی رفتار شمع‌های مایل منفرد

به روش عددی"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، ایران.

۳۰. حسن زاده، م. و حاجی علیلوی بناب، م.، (۱۳۹۰)، " بررسی اثر آرایش شمع‌های مایل و

قائم در گروه شمع تحت بارگذاری جانبی"، اولین کنفرانس بین المللی ساخت و ساز

شهری در مجاورت گسل‌های فعال، تبریز، ایران.

۳۱. شیخ بهایی، ع. و حلبیان، ا.، (۱۳۸۷)، " مطالعه رفتار دینامیکی گروه شمع مایل تحت

بارهای جانبی ناشی از زلزله با استفاده از روش اجزاء محدود"، چهارمین کنگره ملی

مهندسی عمران، تهران، ایران.

۳۲. غلامی، آ. و باخویش، ح.، (۱۳۹۵)، " اثر لایه‌بندی و زاویه تمایل بر ظرفیت باربری و

نشست جانبی گروه شمع مایل با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-شمع"، اولین کنفرانس

علمی پژوهشی عمران، معماری و محیط زیست پایدار، تهران، ایران.

۳۳. قاسم زاده، ح. و ترزبان، م.، (۱۳۹۱)، " شبیه‌سازی عددی گروه شمع‌های مایل و تعیین

اندرکنش بین شمع‌ها"، دهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی،

تهران، ایران.

## Abstract

Piles or deep foundations are one of the old methods to overcome the problems of foundations on loose soils and also transfer structural loads to soil without passing allowable Stress.

Because of increasing use of piles in structures like oil rigs, offshore wind turbines and telecommunication masts, it is important to know more about behavior of piles.

In most projects that use piles, axial loads have the important role while lateral loads are studied only for transient lateral loads such as earthquake. But in some cases like offshore structures, lateral load has the main role so piles response to loading is important.

Because of high lateral stiffness against lateral load, inclined piles are used to control lateral loads. Analyzing the behavior of inclined piles under static lateral loads and cyclic lateral loads has a certain complexity. Because of that for optimal design, it's needed to study inclined piles without generalizing behavior of vertical piles to inclined piles. So it's important to identify the factors and parameters in the analysis and their impacts.

In this study Past studies and activities are reviewed first. Then group of piles is numerically modeled under dynamic load and the influence of different parameters on its behavior is measured.

4 groups are used in this modeling. 1. Influence of angle of inclined piles under dynamic impact loading 2. Influence of angle of soils compaction under dynamic impact loading 3. Influence of Diameter of the piles under dynamic impact loading 4. Group of piles under cyclic loading. And finally modeling results are studied in terms of pile deformation, soil deformations and P-Y curves.

Key words: pile, group of piles, inclined piles, lateral load, dynamic load, finite element



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Civil Engineering**

**M.Sc. Thesis Geotechnical Engineering**

**Modeling of group pile with included piles**

**By : Shahab Shahriari**

**Supervisor:**

**Dr. R. Naderi**

**February - 2020**