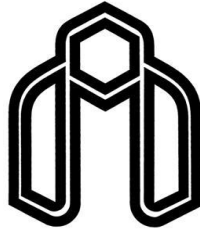


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

رشته مهندسی عمران گرایش مکانیک خاک و پی

پایان نامه کارشناس ارشد

ظرفیت باربری جانبی شمع در خاک ریزدانه

نگارنده: محمدرضا قلی‌زاده نامقی

استاد راهنما:

دکتر سید مهدی حسینی

خرداد ۱۳۹۵

سپاس و ستایش مر خدای را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درخشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید. و سلام و دورد بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است...

ماحصل آموخته هایم را تقدیم می کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است؛

به استوارترین تکیه گاهم، دستان مقدس پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان پرمهر مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره ای از دریای بیکران مهربانیتان را سپاس نتوانم بگویم.

امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

ره آوردی گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم گونه غبار خستگیان را بزداید.

بوسه بر دستان پرمهرتان...

خداوندا به ما توفیق تلاش در شکست، صبر در نومیدی، رفتن بی همراه، جهاد بی سلاح، کار بی پاداش،

فداکاری در سکوت، دین بی دنیا، عظمت بی نام، خدمت بی نان و ایمان بی ریا عنایت فرما. آمین...

## تشکر و قدردانی

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر سید مهدی حسینی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛

از استاتید ارجمند، جناب آقایان دکتر نادری و دکتر بذرافشان مقدم، که طی دوران تحصیل از حضورشان بهره جستیم؛

از استاد فرزانه؛ جناب آقای دکتر بلوری‌بزاز که در این عرصه نظراتشان راهنمای راهم بود؛

از پرسنل محترم آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان خراسان رضوی خصوصاً جناب آقایان مهندس معلم، مهندس ثقفی و مهندس کراچیان که در انجام آزمون‌های آزمایشگاهی مساعدت شایسته و لطف بی‌دریغ داشتند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب محمد رضا فلی زاده نامقی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش مکانیک خاک و پی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ظرفیت باربری جانبی شمع در خاک ریزدانه تحت راهنمایی دکتر سید مهدی حسینی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده 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 تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی 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 افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت شده است.
- 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 اخلاقی انسانی رعایت شده است.

### تاریخ:

### امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق و نشر

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

## چکیده:

تمامی سازه‌ها بایستی بر بستری بنا شوند که ضمن داشتن ظرفیت باربری کافی، نشست سازه در حد قابل قبولی رخ دهد. واضح است که خاک طبیعی توانایی تحمل بار سازه‌های سنگین امروزی را نداشته و بایستی از عضوی به نام پی استفاده نمود تا نشست‌های سازه تا حد مجاز کاهش یابد. پی‌های عمیق اعضای لاغری هستند که کاربرد عمده آن‌ها انتقال بار قائم است، با این حال تقریباً تمامی شمع‌ها تحت اثر بارهای افقی و لنگر نیز قرار می‌گیرند. گاه میزان بار جانبی ناچیز و قابل صرف نظر کردن است، اما در مواردی مانند اسکله‌ها و سازه‌های ساحلی، میزان نیروی افقی قابل توجه بوده و بایستی در طراحی شمع در نظر گرفته شود؛ بنابراین عدم شناخت رفتار شمع تحت اثر بار جانبی و طراحی ناصحیح آن‌ها خسارات مالی و جانی بسیاری را موجب خواهد شد. در این پژوهش رفتار شمع تحت اثر بار جانبی توسط مدل‌های کوچک مقیاس فلزی بررسی شده است که محورهای مهم آن بررسی تاثیر انرژی کوبش و همچنین تاثیر شرایط انتهایی شمع به لحاظ باز یا بسته بودن بر ظرفیت باربری جانبی شمع می‌باشد.

در این پژوهش از لوله‌های استیل زنگ نزن<sup>1</sup> به قطر ۲۵ و ضخامت ۱.۵ میلیمتر به عنوان مدل شمع استفاده شده است. مدل شمع در خاک با وزن مخصوص مشخص به صورت ته باز و ته بسته تحت انرژی‌های مختلف کوبیده شده و بارگذاری جانبی به صورت کنترل شده توسط جک در سطح خاک اعمال شده است. پس از رسم نمودارهای نیرو-جابجایی، میزان ظرفیت باربری نهایی برای هر حالت تعیین و با نتایج بدست آمده از روش‌های تئوری مقایسه شده است. نتایج حاکی از آن است که قابلیت کوبش شمع ته باز حداقل ۶۰٪ از شمع ته بسته بیشتر بوده و همچنین در رده‌ی انرژی‌های مختلف، ظرفیت باربری جانبی شمع ته‌باز از شمع ته‌بسته بیشتر می‌باشد. تاثیر انرژی کوبش بر ظرفیت باربری جانبی شمع تک در خاک ریزدانه تقریباً ناچیز می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** مدل شمع، لوله استیل زنگ نزن، بار جانبی، ظرفیت باربری جانبی

---

1 Stainless steel

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱. قلی زاده. م.ر، حسینی. م، "ارزیابی آزمایشگاهی ظرفیت باربری جانبی شمع کوبشی در خاک ریزدانه"، کنفرانس بین المللی پژوهش های نوین در علوم مهندسی، دانشگاه تهران، ۱۳ خرداد ماه سال ۱۳۹۵.

۲. قلی زاده. م.ر، حسینی. م، "بررسی رفتار جانبی و روش های برآورد ظرفیت باربری جانبی شمع تک"، دومین کنفرانس بین المللی یافته های نوین پژوهشی در مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۳۱ اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۵.

## فهرست

صفحه	عنوان
	فصل اول: مقدمه و کلیات
۲	۱ - ۱ مقدمه.....
۵	۱ - ۲ شاخصه های تحقیق.....
۵	۱ - ۲ - ۱ ضرورت تحقیق.....
۵	۱ - ۲ - ۲ هدف و محتوای تحقیق.....
۵	۱ - ۲ - ۳ محدودیت های تحقیق.....
	فصل دوم: مقاومت جانبی شمع‌ها
۸	۲ - ۱ مقدمه.....
۸	۲ - ۲ تعیین صلبیت و انعطاف پذیری شمعها.....
۱۰	۲ - ۳ روشهای محاسبه مقاومت جانبی خاک.....
۱۱	۲ - ۳ - ۱ مقاومت جانبی نهایی خاک های چسبنده.....
۱۲	۲ - ۳ - ۲ مقاومت جانبی نهایی خاک های درشت دانه:.....
۱۳	۲ - ۳ - ۳ روش تعادل استاتیکی:.....
۱۴	۲ - ۳ - ۴ روش Broms.....
۱۵	۲ - ۳ - ۴ - ۱ شمعهای بدون گیرداری در خاک چسبنده:.....
۱۷	۲ - ۳ - ۴ - ۲ شمعهای گیردار در خاک چسبنده:.....
۲۰	۲ - ۳ - ۴ - ۳ شمعهای بدون گیرداری در خاک دانه ای:.....
۲۱	۲ - ۳ - ۴ - ۴ شمعهای گیردار در خاک دانهای.....
۲۴	۲ - ۳ - ۵ روش Meyerhof.....
۲۷	۲ - ۳ - ۶ روش Petrasovits and Award.....
۲۸	۲ - ۳ - ۷ روش Prasad and Chari.....
۳۱	۲ - ۴ محاسبه تغییر مکان افقی شمع تحت اثر بار جانبی.....



۳۲	..... ۲-۴-۱ تحلیل عکس العمل بستر
۳۳	..... ۲-۴-۱-۱ راه حل الاستیک
۳۶	..... ۲-۴-۱-۲ اساس تحلیل غیر خطی و منحنی p-γ
۳۷	..... ۲-۴-۲ تحلیل ارتجاعی تک شمع
۳۸	..... ۲-۴-۳ روش Meyerhof
۳۸	..... ۲-۴-۴ روش پیشنهادی Patra و Pise [۱۵]
۳۹	..... ۲-۵ بررسی آزمایشگاهی Alim و Rahman در ماسه [۱۶]
۴۱	..... ۲-۶ بررسی رفتار ظرفیت باربری جانبی شمع در خاک غیر چسبنده [۱۷]
۴۳	..... ۲-۷ بررسی آزمایشگاهی در مجاورت شیروانی خاکی مسلح شده [۱۸]

### فصل سوم: آماده سازی تجهیزات و برنامه آزمایش‌ها

۴۸	..... ۳-۱ مقدمه
۴۸	..... ۳-۲ سیستم و مصالح آزمایش
۴۸	..... ۳-۲-۱ تهیه خاک و مخزن نمونه خاکی
۴۹	..... ۳-۲-۲ آماده سازی نمونه خاکی
۵۱	..... ۳-۲-۳ انجام عملیات کوبش مدل شمع
۵۴	..... ۳-۲-۴ سیستم بارگذاری و اندازه گیری تغییر مکان
۵۶	..... ۳-۲-۵ اجرای آزمایش
۵۷	..... ۳-۲-۶ آزمونهای شناسایی خاک

### فصل چهارم: ارائه نتایج و تحلیل آن‌ها

۶۰	..... ۴-۱ مقدمه
۶۰	..... ۴-۲ نتایج آزمونهای شناسایی خاک
۶۱	..... ۴-۳ بررسی قابلیت کوبش در شمعها
۶۱	..... ۴-۳-۱ شمع ته باز
۶۲	..... ۴-۳-۲ شمع ته بسته
۶۳	..... ۴-۴ بررسی قفل شدگی خاک در شمع ته باز

- ۴ - ۵ نتایج بارگذاری جانبی مدل شمع ..... ۶۴
- ۴ - ۶ بررسی عدم خم شدن میله اعمال بار ..... ۶۷
- ۴ - ۷ تأثیر انرژی کوبش بر ظرفیت باربری جانبی ..... ۶۸
- ۴ - ۸ تأثیر انتهای شمع بر ظرفیت باربری جانبی ..... ۷۰
- ۴ - ۹ بررسی الگوی ظرفیت باربری نهایی ..... ۷۱

#### فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها

- ۵ - ۱ مقدمه ..... ۷۴
- ۵ - ۲ نتیجه گیری ..... ۷۵
- ۵ - ۳ پیشنهادها ..... ۷۶
- منابع ..... ۷۹

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ کاربرد متنوع شمع در سازه‌ها..... ۳
- شکل ۲-۱ نمونه ای از تخریب شالوده عمیق در اثر نیروی زلزله..... ۴
- شکل ۳-۱ ایجاد شکاف بین بدنه شمع و خاک..... ۴
- شکل ۱-۲ رابطه ضریب تغییرات مدول بستر و چگالی نسبی ماسه [۳]..... ۱۰
- شکل ۲-۲ توزیع مقاومت جانبی شمع در خاک چسبنده [۴]..... ۱۱
- شکل ۳-۲ تأثیر ضریب شکل و چسبندگی بر مقاومت جانبی خاک‌های کاملاً چسبنده [۲]..... ۱۲
- شکل ۴-۲ ضرایب مقاومت جانبی  $K_c$  و  $K_q$  [۵]..... ۱۳
- شکل ۵-۲ فشار وارده از طرف خاک بر شمع صلب با سر آزاد و مقاومت جانبی نهایی آن [۲]..... ۱۴
- شکل ۶-۲ توزیع تنش فرضی برای خاک چسبنده [۶]..... ۱۵
- شکل ۷-۲ مکانیسم انهدام برای شمع‌های با سر آزاد واقع در خاک چسبنده [۶]..... ۱۶
- شکل ۸-۲ مقاومت جانبی نهایی خاک چسبنده [۲]..... ۱۷
- شکل ۹-۲ شمع‌های گیردار در خاک چسبنده [۲]..... ۱۹
- شکل ۱۰-۲ شمع‌های با سر آزاد در خاک دانه‌ای [۲]..... ۲۱
- شکل ۱۱-۲ شمع‌های با سر آزاد در خاک دانه‌ای [۲]..... ۲۳
- شکل ۱۲-۲ مقاومت جانبی نهایی شمع کوتاه در خاک دانه‌ای [۲]..... ۲۴
- شکل ۱۳-۲ ضریب شکل برای شمع تحت اثر بار جانبی در ماسه [۶]..... ۲۵
- شکل ۱۴-۲ ضریب شکل برای شمع تحت اثر بار جانبی در رس [۶]..... ۲۵
- شکل ۱۵-۲ ضریب فشار جانبی خاک برای ماسه [۷]..... ۲۷
- شکل ۱۶-۲ ضریب فشار جانبی خاک برای رس [۷]..... ۲۷
- شکل ۱۷-۲ توزیع فشار خاک در روش Petrasovits and Award [۸]..... ۲۸
- شکل ۱۸-۲ توزیع فشار خاک در روش Prasad and Chari [۹]..... ۲۹
- شکل ۱۹-۲ رفتار شمع تحت اثر بار جانبی (a) شمع صلب (b) شمع انعطاف پذیر [۱۲]..... ۳۳
- شکل ۲۰-۲ تغییرات ضرایب  $A_{mY}$ ،  $A_{mX}$  و  $B_{mY}$ ،  $B_{mX}$  با عمق بدون بعد  $Z/T$  [۱۲]..... ۳۵
- شکل ۲۱-۲ تغییرات ضرایب  $A_{mC}$ ،  $A_{mY}$  و  $B_{mC}$ ،  $B_{mY}$  با عمق بدون بعد  $Z/T$  [۱۲]..... ۳۵
- شکل ۲۲-۲ نحوه اعمال نیروها در گروه‌های شمع [۱۵]..... ۳۹

- شکل ۲-۲۳ دستگاه مدل آزمایشگاهی اعمال بار جانبی بر شمع [۱۶] ..... ۴۰
- شکل ۲-۲۴ تغییر شکل محوری شمع تک ناشی از بار جانبی برای  $L/d=30$  [۱۶] ..... ۴۰
- شکل ۲-۲۵ منحنی بار-تغییر مکان شمع تک [۱۶] ..... ۴۰
- شکل ۲-۲۶ بازده گروه شمع ( $۱*۲$  و  $۲*۲$ ) [۱۶] ..... ۴۱
- شکل ۲-۲۷ منحنی بار-تغییر مکان گروه شمع ( $۱*۲$ ) برای  $L/d=30$  [۱۶] ..... ۴۱
- شکل ۲-۲۸ ظرفیت باربری نهایی محوری [۱۷] ..... ۴۲
- شکل ۲-۲۹ جابجایی افقی سرشمع [۱۷] ..... ۴۲
- شکل ۲-۳۰ تغییرات لنگر نهایی [۱۷] ..... ۴۲
- شکل ۲-۳۱ بار محوری نهایی [۱۷] ..... ۴۲
- شکل ۲-۳۲ لنگر مقاوم نهایی [۱۷] ..... ۴۳
- شکل ۲-۳۳ بار جانبی نهایی [۱۷] ..... ۴۳
- شکل ۲-۳۴ نمای مدل آزمایشگاهی [۱۸] ..... ۴۳
- شکل ۲-۳۵ تغییرات LRIR نسبت به  $x/d$  [۱۸] ..... ۴۵
- شکل ۲-۳۶ تغییرات LRIR نسبت به  $u/d$  [۱۸] ..... ۴۵
- شکل ۲-۳۷ تغییرات LRIR نسبت به  $H/d$  [۱۸] ..... ۴۵
- شکل ۲-۳۸ تغییرات LRIR نسبت به  $W/d$  [۱۸] ..... ۴۵
- شکل ۲-۳۹ تغییرات LRIR نسبت به  $b/d$  [۱۸] ..... ۴۵
- شکل ۲-۴۰ تغییرات LRIR نسبت به  $N$  [۱۸] ..... ۴۵
- شکل ۲-۴۱ تغییرات LRIR نسبت به  $L/d$  [۱۸] ..... ۴۶
- شکل ۲-۴۲ تغییرات LRIR نسبت به دانسیته نسبی [۱۸] ..... ۴۶
- شکل ۳-۱ مخزن نمونه خاکی ..... ۴۹
- شکل ۳-۲ کوبه دست ساز جهت تراکم نمونه خاک ..... ۵۰
- شکل ۳-۳ خالی کردن خاک داخل مخزن توسط جرثقیل ..... ۵۰
- شکل ۳-۴ شیار زدن سطح هر لایه بعد از کوبش قبل از ریختن لایه بعدی ..... ۵۱
- شکل ۳-۵ مدل شمع به همراه دو نگه دارنده ..... ۵۲
- شکل ۳-۶ مدل شمع ته باز و ته بسته ..... ۵۳
- شکل ۳-۷ شاقول نبشی ..... ۵۳

- شکل ۳-۸ عملیات کوبش مدل شمع..... ۵۳
- شکل ۳-۹ عملیات بارگذاری مدل شمع..... ۵۴
- شکل ۳-۱۰ پلان شماتیک آزمایش..... ۵۵
- شکل ۳-۱۱ نمای شماتیک آزمایش..... ۵۵
- شکل ۳-۱۲ بارگذاری جانبی مدل شمع و گسیختگی خاک..... ۵۶
- شکل ۴-۱ نمودار دانه بندی..... ۶۰
- شکل ۴-۲ قابلیت کوبش مدل شمع ته باز..... ۶۲
- شکل ۴-۳ قابلیت کوبش مدل شمع ته بسته..... ۶۲
- شکل ۴-۴ قفل شدگی خاک داخل مدل شمع..... ۶۳
- شکل ۴-۵ شمع ته باز و ته بسته کوبیده شده با انرژی ۷.۶ ژول..... ۶۴
- شکل ۴-۶ شمع ته باز و ته بسته کوبیده شده با انرژی ۱۱.۶ ژول..... ۶۵
- شکل ۴-۷ شمع ته باز و ته بسته کوبیده شده با انرژی ۱۴.۰ ژول..... ۶۵
- شکل ۴-۸ شمع ته باز و ته بسته کوبیده شده با انرژی ۱۶.۰ ژول..... ۶۶
- شکل ۴-۹ شمع ته باز و ته بسته کوبیده شده با انرژی ۱۹.۰ ژول..... ۶۶
- شکل ۴-۱۰ مقایسه ظرفیت باربری بدست آمده از روش‌های تئوری با اعداد این پژوهش برای شمع ته باز..... ۷۲
- شکل ۴-۱۱ مقایسه ظرفیت باربری بدست آمده از روش‌های تئوری با اعداد این پژوهش برای شمع ته بسته..... ۷۲

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲ ارتباط  $C_u$  با  $K_h$  و  $k_1$  [۲] ..... ۹
- جدول ۲-۲ معیار صلیبیت شمع بر حسب  $R$  و  $T$  [۲] ..... ۱۰
- جدول ۳-۲ مقایسه ظرفیت باربری جانبی شمع در چندین روش [۹] ..... ۳۰
- جدول ۴-۲ ضرایب مورد نیاز جهت استفاده در فرمول‌های ۲-۴۸ تا ۲-۵۵ [۱۲] ..... ۳۵
- جدول ۱-۳ مشخصات مدل شمع ..... ۵۴
- جدول ۱-۴ تعداد ضربات کوبش لازم جهت رسیدن به عمق مورد نظر (۷۰۰ میلی‌متر) ..... ۶۳
- جدول ۲-۴ تأثیر انرژی کوبش بر ظرفیت باربری جانبی شمع ته باز ..... ۶۸
- جدول ۳-۴ تأثیر انرژی کوبش بر ظرفیت باربری جانبی شمع ته بسته ..... ۶۹
- جدول ۴-۴ تأثیر وضعیت انتهای شمع (ته باز یا ته بسته) بر ظرفیت باربری جانبی شمع ..... ۷۰
- جدول ۵-۴ مقایسه ظرفیت باربری بدست آمده از روش‌های تئوری با اعداد این پژوهش ..... ۷۱

# فصل اول

## مقدمه و کلیات

تمامی سازه‌ها باید بر روی بستری قرار گیرند که بتوانند بار وارده را تحمل کرده و نشست‌ها را تا حد مجاز کاهش دهند. در غیر این صورت در اثر گسیختگی خاک زیر پی و یا نشست های بیش از حد و غیرهمگون تخریب سازه حتمی است. واضح است که خاک طبیعی توانایی تحمل بار سازه‌های سنگین امروزی را ندارد. پی عضوی است که با افزایش سطح بارگذاری، تنش های وارد بر خاک را تا حد مجاز کاهش داده و بدین ترتیب از گسیختگی و نشست بیش از حد جلوگیری می‌کند.

پی‌ها براساس عمق به ۳ گروه کلی پی‌های سطحی، پی‌های نیمه عمیق، و پی‌های عمیق تقسیم می‌شوند. پی‌های سطحی برای خاک‌های با مقاومت نسبتاً بالا مناسب بوده و در خاک‌های ضعیف، بایستی بارهای وارده به اعماق متراکم زمین منتقل شود. در این موارد از پی‌های عمیق (شمع‌ها) استفاده می‌شود. بنا به تعریف شالوده‌هایی که نسبت عمق به عرض آن‌ها بزرگتر و یا مساوی ۶ باشد شالوده عمیق به حساب می‌آیند. از لحاظ ظاهری شمع‌ها اعضای ستونی لاغری می‌باشند که از جنس چوب، فلز و یا بتن ساخته شده و سطح مقطع آن‌ها می‌تواند اشکال مختلفی مانند دایره، مربع و چندضلعی منتظم داشته باشد. شمع‌ها با مقطع ثابت امروزه استفاده زیادی دارند، با این وجود شمع‌ها با مقطع متغیر نیز طراحی و اجرا می‌شوند. شمع‌ها را می‌توان به صورت کوبشی و یا درجاریز اجرا نمود.

عمده موارد کاربرد شمع‌ها به شرح زیر است:

انتقال بار وارده به لایه‌های متراکم زمین

مقابله با آب شستگی در سازه‌های دریایی

مقابله با نیروی زیر فشار آب

تامین پایداری سازه در برابر بار جانبی

جلوگیری از نشست غیرمتقارن سازه در خاک متورم شونده و فروریزی

تامین پایداری شیروانی خاکی در برابر لغزش و رانش زمین

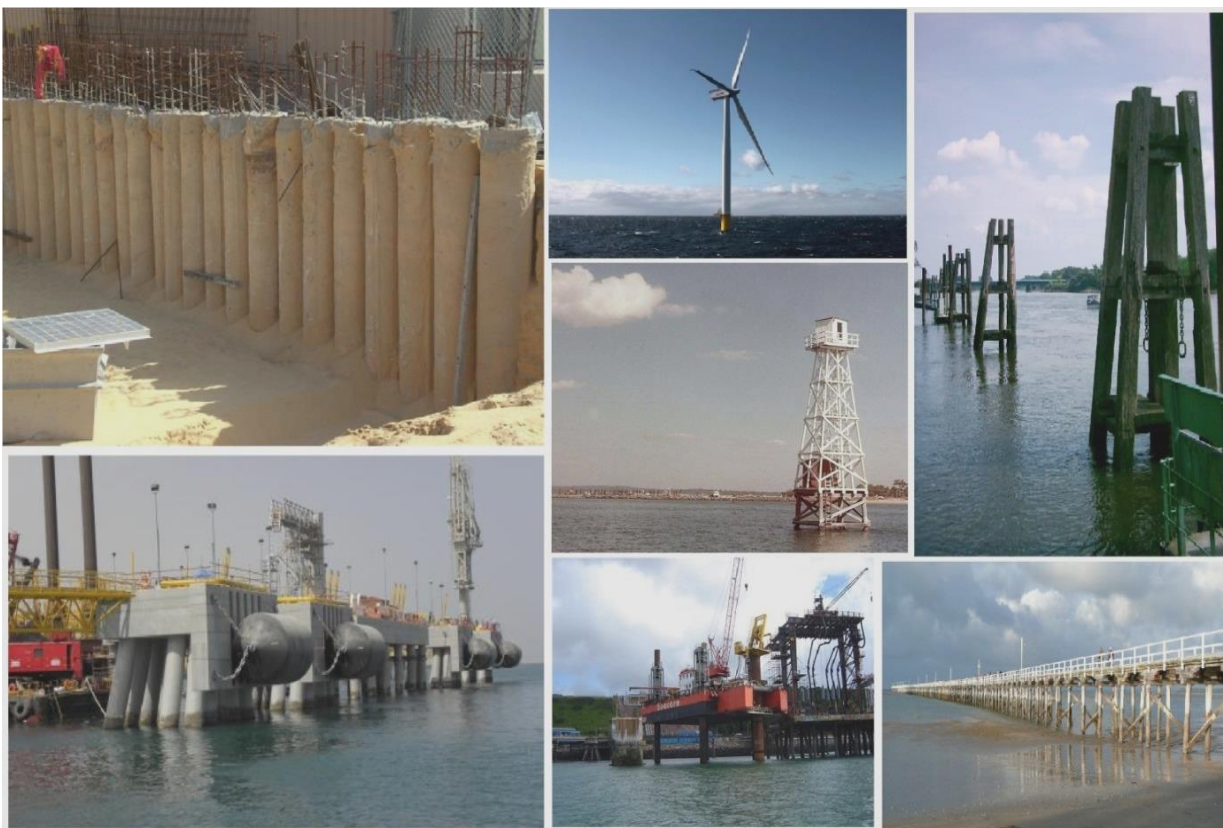
بار افقی به ۲ صورت کلی بر شمع اعمال می‌شود:

جایجا شدن خاک اطراف شمع در زمین‌های شیب دار، نیروی افقی گسترده‌ای را بر بدنه شمع وارد می‌کند که اصطلاحاً به آن نیروی مقاوم گفته می‌شود. در بسیاری از موارد بار افقی خارجی بر سر شمع وارد شده که به آن بار فعال گفته می‌شود. بر اثر حرکت قسمتی از شمع در جهت نیروی



اعمالی، خاک جلوی آن تحت فشار قرار گرفته و تنش های برشی و فشاری ایجاد شده تعادل را برقرار می سازند.

رفتار شمع تحت اثر بار جانبی به مراتب پیچیده تر از شمع تحت بارگذاری قائم بوده و وابسته به نوع شمع نیز می باشد. در این حالت ممکن است گسیختگی در اثر چرخش، خم شدگی و یا جابجایی شمع باشد و یا فاصله ای چندین متری میان پشت شمع و خاک به وجود آید. در شمع های کوتاه<sup>۲</sup> خم شدگی رخ نداده اما امکان چرخش و جابجایی وجود دارد که به این شمع ها صلب<sup>۳</sup> گفته می شود. در شمع های بلند<sup>۴</sup> و لاغر خم شدگی رخ داده و احتمال تخریب سازه ای شمع بالاست که به این گروه، شمع انعطاف پذیر<sup>۵</sup> گفته می شود.



شکل ۱-۱ کاربرد متنوع شمع در سازه ها

---

<sup>2</sup> Short pile

<sup>3</sup> Rigid pile

<sup>4</sup> Long pile

<sup>5</sup> Flexible pile



شکل ۲-۱ نمونه ای از تخریب شالوده عمیق در اثر نیروی زلزله



شکل ۳-۱ ایجاد شکاف بین بدنه شمع و خاک

## ۱-۲ شاخصه های تحقیق

### ۱-۲-۱ ضرورت تحقیق

همان طور که در موارد بالا ذکر شد، عمده کاربرد شمع ها انتقال بار قائم است، با این حال تقریباً تمامی شمع ها تحت اثر بارهای افقی و لنگر نیز قرار می گیرند. گاهی میزان بار جانبی ناچیز و قابل صرف نظر کردن است، اما در مواردی مانند سازه های نفتی و نیروگاهی، اسکله ها، سازه های دلفینی برای پهلو گرفتن کشتی<sup>۶</sup>، سازه های ساحلی، سازه های نگهبان متکی بر شمع ها<sup>۷</sup> و در نواحی زلزله خیز، میزان نیروی افقی قابل توجه بوده و بایستی در طراحی شمع در نظر گرفته شود؛ لذا شناخت رفتار شمع های تحت اثر بار جانبی و طراحی ناصحیح آنها خصوصاً در خاک های ریزدانه، همواره دغدغه مهندسين طراح بوده و عدم شناخت امر فوق، خسارات مالی و جانی بسیاری را موجب خواهد شد.

### ۱-۲-۲ هدف و محتوای تحقیق

در فصل دوم به بررسی پژوهش های انجام شده در مورد شمع های تحت اثر بار جانبی پرداخته خواهد شد و هدف شناخت رفتار اندرکنش خاک و شمع می باشد. ابتدا روش های کلاسیک و بنیادی بررسی شده و سپس نتایج تحقیقات معاصر شرح داده می شود. هدف از انجام این پژوهش بررسی ظرفیت باربری شمع های تحت اثر بار جانبی می باشد که با استفاده از مدل کوچک مقیاس شمع فلزی در خاک ریزدانه در آزمایشگاه انجام می شود. مدل شمع به صورت سر آزاد بوده و به دلیل اینکه رفتار شمع صلب می باشد، در تحلیل روش های تعیین ظرفیت باربری، رفتار شمع کوتاه بیشتر از شمع بلند مورد بررسی قرار گرفته است.

از محورهای مهم این طرح بررسی تاثیر انتهای شمع به لحاظ باز یا بسته بودن و همچنین تاثیر انرژی کوبش بر رفتار جانبی شمع تک می باشد. در فصل سوم جزئیات وسایل و نحوه اجرای آزمون شرح داده می شود. در فصل بعد نتایج حاصله از بارگذاری و آزمون های شناسایی خاک در غالب جداول و نمودار ارائه می گردد. در فصل پنجم نیز اعداد و نمودارهای بدست آمده تفسیر شده و پیشنهادهایی برای سایر پژوهشگران علاقه مند ارائه می گردد.

### ۱-۲-۳ محدودیت های تحقیق

محدودیت های مالی و زمانی مانع اجرای آزمون های بزرگ مقیاس می باشد، در حالیکه اجرای شمع کوچک مقیاس به روش کوبشی نیز روشی مناسب جهت مدل سازی اندرکنش میان شمع و

<sup>6</sup> Berthing dolphins

<sup>7</sup> Secant Pile System



خاک می باشد که نیازمند انجام مدل سازی با ابعاد مناسب و با حداقل خطا می باشد. در این پژوهش از لوله های فولادی زنگ نزن<sup>8</sup> و سیستم بارگذاری جک استفاده شده است که توصیه می شود در پژوهش های آتی موارد فوق در صورت امکان در نظر گرفته شود.

مقیاس گذاری در کارهای آزمایشگاهی مستلزم انجام آنالیز ابعادی و وجود دستگاه های خاص جهت مدل سازی و مقیاس گذاری می باشد. معروف ترین و معتبرترین آزمایش مدل سازی در علم ژئوتکنیک آزمایش سانتریفیوژ می باشد. این آزمایش بسیار پرهزینه بوده و در ایران تاکنون فقط دانشگاه تهران مجهز به این دستگاه می باشد. از آنجا که آزمایش ها بر روی مدل های آزمایشگاهی کوچک مقیاس در مخزن خاک و در گرانش (1g) نمی توانند به طور کامل شرایط واقعی و محلی را شبیه سازی کنند؛ زیرا اولاً شرایط شبیه سازی تنش ها میسر نبوده ثانیاً وجود یک مخزن با حجم محدود، تأثیرات مرزی را به همراه خواهد داشت. خاطر نشان می گردد ایرادها و مشکلات مربوط به انجام آزمایش برای مدل های با تنش همه جانبه پایین زمانی پدیدار می شود که محقق قصد دارد نتایج را بدون استفاده از مباحث تئوری به مقیاس واقعی تبدیل کند. با این حال، به علت گسترش مدل های اجزای تشکیل دهنده واقعی، امروزه اعتبار سنجی نتایج حاصل از آزمایش های تئوری و آزمون های آزمایشگاهی (از قبیل تحقیق حاضر) امکان پذیر شده است؛ به عبارتی می توان از نتایج حاصل از آزمون های آزمایشگاهی بر روی مدل شمع برای اعتبار سنجی تحقیق های عددی و تئوری استفاده کرد. [۱]

---

<sup>8</sup> Stainless steel

## فصل دوم

### مقاومت جانبی شمع ها

## ۲-۱ مقدمه

روش‌های گوناگون تخمین مقاومت نهایی جانبی شمع‌ها هر کدام برای شرایط خاصی مناسب بوده و در این فصل به بیان این روش‌ها و محدودیت‌ها و شرایط هر روش پرداخته خواهد شد. چندی از این روش‌ها موسوم به روش Meyerhof ، Broms ، Hansen می‌باشد. پژوهش‌های جدید نیز راهکار خوبی جهت شناخت این رفتار است که در انتهای این فصل به بیان خلاصه‌ای از چند مورد پرداخته شده است.

## ۲-۲ تعیین صلبیت و انعطاف پذیری شمع‌ها

تحت اثر بار جانبی شمع‌های کوتاه صلب<sup>۹</sup> رفتار کاملاً متفاوتی را در مقایسه با شمع‌های بلند انعطاف پذیر<sup>۱۰</sup> از خود نشان می‌دهند. بنابراین اولین مرحله در بررسی شمع‌های تحت اثر بار جانبی تشخیص شمع صلب از شمع انعطاف پذیر است. این مطلب با استفاده از مفهوم ضرایب سختی شمع و خاک R و T امکان پذیر می‌باشد که خود وابسته به میزان سختی شمع (EI) و تراکم پذیری خاک می‌باشد. بر این اساس دو رابطه زیر ضریب سختی شمع و خاک را تعریف می‌کند.

برای خاک‌های رسی سخت بیش تحکیم یافته:

$$R = \left( \frac{EI}{K_h} \right)^{0.25} \quad 1-2$$

$$K_h \approx \frac{0.305k_1}{1.5B} \approx \frac{k_1}{5B} \quad 2-2$$

که R ضریب سختی و خاک بر واحد طول، B بعد شمع و  $K_h$  مدول عکس العمل افقی بستر<sup>۱۱</sup> و

$k_1$  مدول بستر ترزاقی<sup>۱۲</sup> است که از آزمایش بارگذاری صفحه ۳۰۵ میلی متری بدست می‌آید. مقدار

<sup>9</sup> Short Rigid

<sup>10</sup> Long Flexible

<sup>11</sup> Horizontal Subgrade Reaction

$k_1$  را می توان با دانستن مقاومت برشی زهکشی نشده و استفاده از جدول ۱-۲ نیز تخمین زد. در خاک های رسی بیش تحکیم یافته مدول عکس العمل بستر در عمق ثابت است.

جدول ۱-۲ ارتباط  $C_u$  با  $K_h$  و  $k_1$  [۲]

استحکام خاک	سفت	خیلی سفت	سخت
مقاومت برشی زهکشی نشده $C_u(kN/m^2)$	۵۰ تا ۱۰۰	۱۰۰ تا ۲۰۰	بزرگتر از ۲۰۰
محدوده $k_1(MN/m^2)$	۱۵ تا ۳۰	۳۰ تا ۶۰	بزرگتر از ۶۰
مدول عکس العمل خاک $K_h(MN/m^3)$	۳ تا ۶	۶ تا ۱۲	بزرگتر از ۱۲

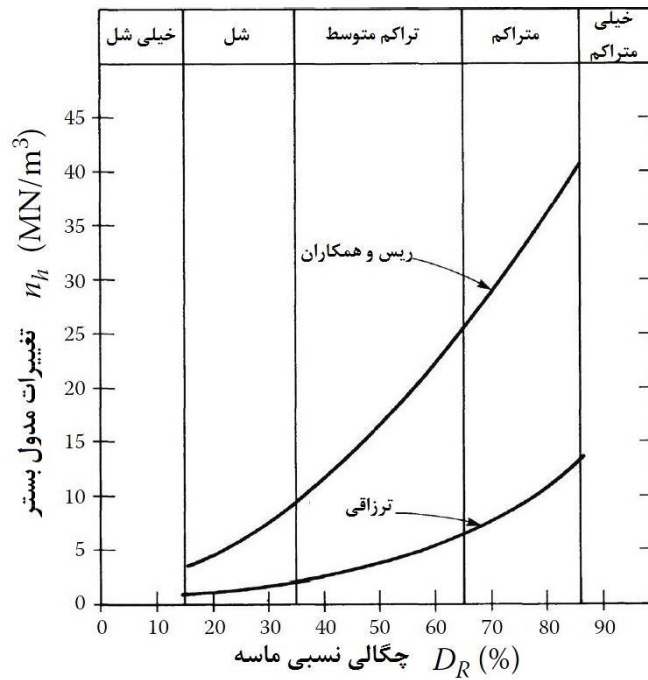
برای رس های عادی تحکیم یافته و خاک های دانه ای:

$$T = \left( \frac{EI}{n_h} \right)^{0.2} \quad ۳-۲$$

$$K_h = n_h \times X / B \quad ۴-۲$$

در این حالت مدول عکس العمل افقی خاک با افزایش عمق  $X$  افزایش یافته و  $n_h$  ضریب تغییرات مدول عکس العمل بستر می باشد که مقادیر آن توسط Reese و همکارانش از آزمایشات بارگذاری جانبی بر شمع های در ماسه غوطه ور در جزیره Mustang واقع در تگزاس بدست آمده است.

پس از تعیین  $R$  برای رس های پیش تحکیم یافته و یا  $T$  برای رس های عادی تحکیم یافته و خاک های دانه ای با توجه به جدول ۲-۲ می توان صلبیت و انعطاف پذیری شمع را تشخیص داد.



شکل ۱-۲ رابطه ضریب تغییرات مدول بستر و چگالی نسبی ماسه [۳]

جدول ۲-۲ معیار صلبیت شمع بر حسب R و T [۲]

مدول عکس العمل خاک		نوع شمع
ثابت	افزایش خطی با عمق	
$L \leq 2R$	$L \leq 2T$	صلب
$L \geq 3.5R$	$L \geq 4T$	انعطاف پذیر

## ۲-۳ روش‌های محاسبه مقاومت جانبی خاک

هنگامی که شمع تحت اثر بار جانبی قرار می‌گیرد تغییر شکل‌های ایجاد شده باعث اعمال تنش‌های برشی و فشاری به خاک اطراف شده و مساله اندرکنش خاک و سازه پیش می‌آید. بنابراین اولین قدم برای تعیین مقاومت جانبی نهایی شمع، تعیین مقاومت جانبی نهایی خاک است. برای

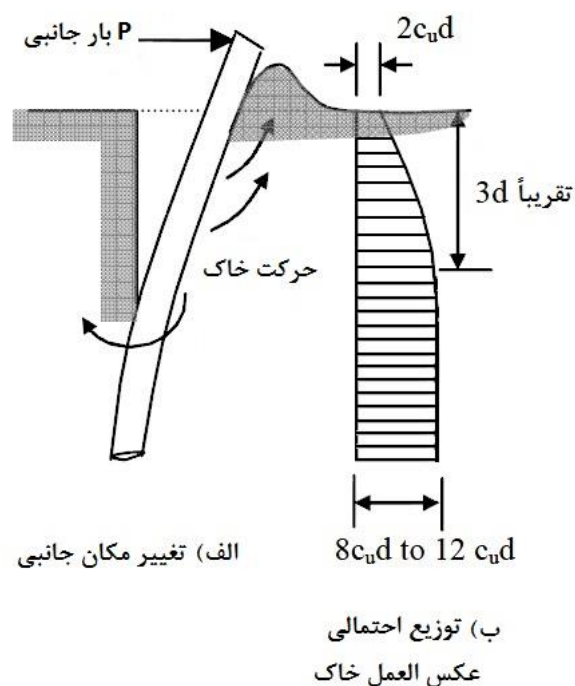


بدست آوردن مقاومت جانبی نهایی، خاک ها به ۲ دسته خاک های چسبنده و خاک های دانه ای تقسیم بندی می شوند.

### ۲-۳-۱ مقاومت جانبی نهایی خاک های چسبنده

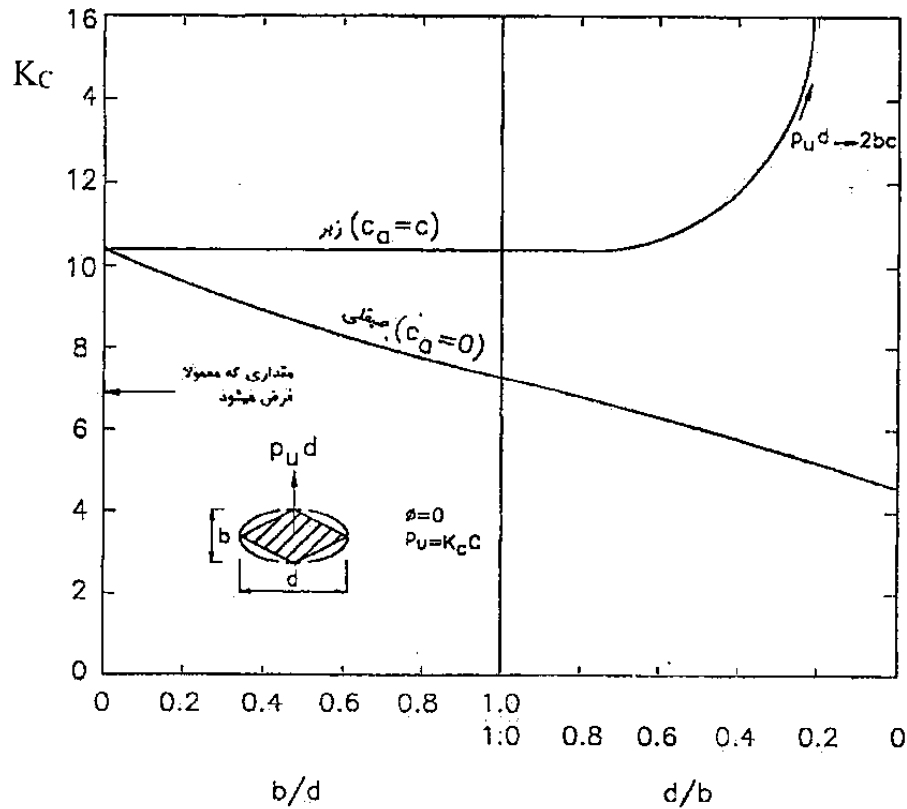
نحوه تغییرات مقاومت جانبی نهایی خاک های چسبنده در شکل ۲-۲ نمایش داده شده است.

از عمقی حدود ۳ برابر بعد شمع این مقدار ثابت شده و به  $P_u = K_c C$  می رسد.



شکل ۲-۲ توزیع مقاومت جانبی شمع در خاک چسبنده [۴]

$K_c$  ضریب مقاومت جانبی بوده و به ۲ پارامتر شکل مقطع شمع و نسبت چسبندگی شمع به چسبندگی خاک ( $C_p/C_s$ ) بستگی دارد. شکل ۲-۳ تاثیر ضریب شکل بر  $K_c$  را برای دو حالت  $C_p = 0$  و  $C_p = C_s$  برای مقاطع لوزی شکل نشان می دهد. گفتنی است می توان از این مقادیر برای مقطع دیگر نیز به طور محافظه کارانه استفاده کرد.



شکل ۲-۳ تأثیر ضریب شکل و چسبندگی بر مقاومت جانبی خاک‌های کاملاً چسبنده [۲]

### ۲-۳-۲ مقاومت جانبی نهایی خاک های درشت دانه:

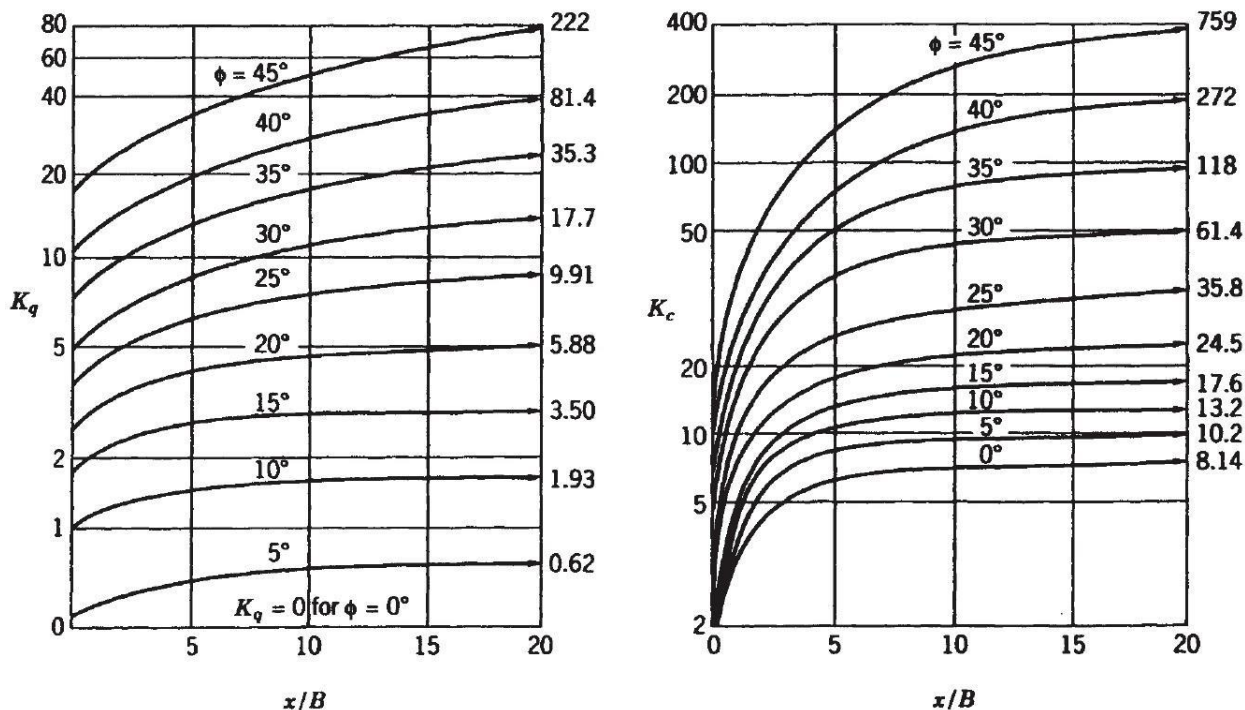
مقاومت جانبی نهایی که توسط Brinch Hansen ارائه شده است در عمق  $X$  به صورت معادله

۵-۲ است. همانطور که مشاهده می شود در این حالت مقدار  $P_u$  با عمق متغیر است.

$$P_u = qK_q + CK_c \quad ۵-۲$$

در این رابطه  $q$  تنش موثر قائم در عمق  $z$ ،  $C$  چسبندگی خاک است.  $K_q$  و  $K_c$  ضرایبی وابسته به  $\phi$

و  $X/B$  می باشند که می توان آنها را از شکل ۴-۲ بدست آورد.



شکل ۲-۴ ضرایب مقاومت جانبی Kq و Kc [۵]

### ۳-۳-۳ روش تعادل استاتیکی:

این روش برای شمع‌های صلب شناور با سر آزاد قابل استفاده است. همان طور که پیش تر ذکر شد، شمع‌های صلب در حالت نهایی حول نقطه‌ای دوران یافته که عمق آن  $Z_r$  در نظر گرفته می‌شود. شکل ۲-۵ حالت (الف) شکل کلی این شمع تحت اثر بار افقی  $H$  در ارتفاع  $e$  از سطح زمین نشان می‌دهد. معادلات تعادل استاتیکی در حالت کلی توزیع دلخواه  $P_u$  به صورت زیر است. در معادلات زیر  $P_u$  فشار جانبی از طرف خاک،  $Z_r$  عمق نقطه دوران شمع،  $L$  طول مدفون شمع،  $Z$  عمق از سطح زمین،  $e$  ارتفاع اعمال بار از سطح زمین،  $H_u$  بار جانبی نهایی و  $M_u$  لنگر خمشی نهایی وارد بر سر شمع می‌باشد.

$$H_u = \int_0^{Z_r} (P_u dz) - \int_{Z_r}^L (P_u dz) \quad ۶-۲$$

$$M_u = H_u e = - \int_0^{Z_r} (P_u dZ) dz + \int_{Z_r}^L (P_u dZ) dz \quad ۷-۲$$

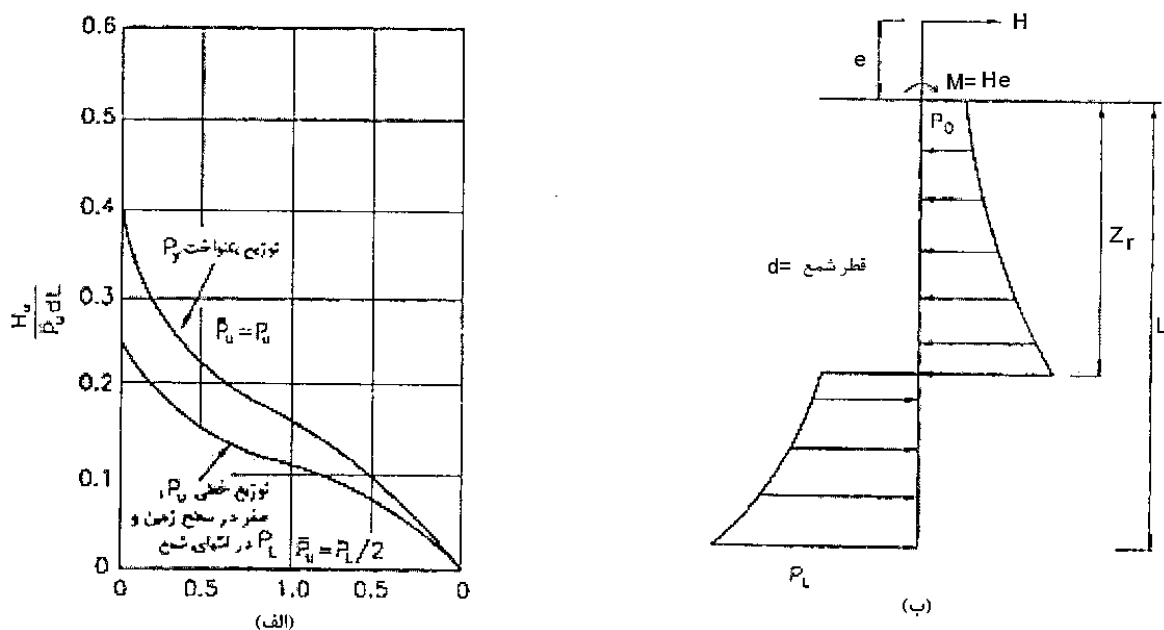
از روش‌های ریاضی به راحتی معادلات بالا حل شده و مقدار  $H_u$  بدست می‌آید. در حالت خاص که توزیع  $P_u$  در عمق ثابت باشد، معادلات بالا به راه حل‌های ساده زیر منجر می‌شود.

$$Z_r = 0.5 \left( \frac{H_u}{P_u d} + L \right) \quad ۸-۲$$

$$\frac{M_u}{P_u d L^2} = \frac{H_u e}{P_u d L^2} = \frac{1}{4} \left[ 1 - \left( \frac{2H_u}{P_u d L} \right) - \left( \frac{H_u}{P_u d L} \right)^2 \right] \quad ۹-۲$$

$$\frac{H_u}{P_u d L} = \sqrt{\left( 1 + \frac{2e}{L} \right)^2 + 1} - \left( 1 + \frac{2e}{L} \right) \quad ۱۰-۲$$

با استفاده از شکل ۵-۲ حالت (ب) می‌توان مقدار  $\frac{H_u}{P_u d L}$  را برحسب مقادیر  $e/L$  بدست آورد.

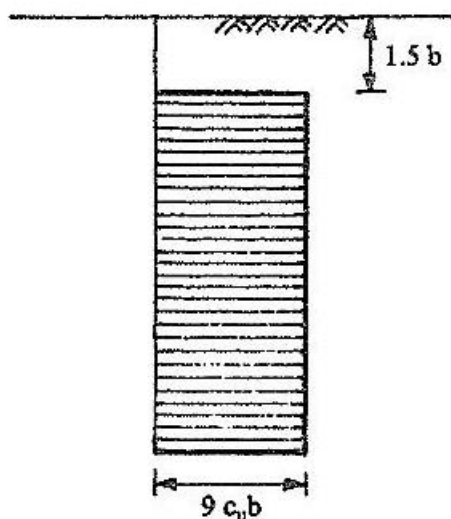


شکل ۵-۲ فشار وارده از طرف خاک بر شمع صلب با سر آزاد و مقاومت جانبی نهایی آن [۲]

### ۲-۳-۴ روش Broms

این روش در واقع تعمیم یافته روش استاتیکی است با این تفاوت که Broms توزیع مقاومت جانبی نهایی خاک را ساده تر فرض نموده است. برای خاک‌های کاملاً چسبنده همانطور که پیش تر

ذکر شد Pu از مقدار  $2C_u$  در سطح زمین تا هشت الی ۱۲ برابر مقدار Cu در عمق ۳ برابر بعد شمع افزایش یافته و پس از آن ثابت می شود. برامز توزیع تنش ساده تری را پیشنهاد نمود که مطابق شکل ۶-۲ مقاومت جانبی نهایی خاک تا عمق  $1.5d$  صفر و پس از آن  $9C_u$  باشد. برامز برای خاک های دانه ای فشار فعال خاک پشت شمع را صفر و فشار مقاوم خاک جلوی شمع را ۳ برابر فشار مقاوم رانکین در نظر گرفت. وی همچنین فرض نمود که شکل مقطع شمع تاثیری در توزیع تنش ها ندارد.



شکل ۶-۲ توزیع تنش فرضی برای خاک چسبنده [۶]

وی با در نظر گرفتن مکانیزم های انهدام متفاوت و شرایط گیرداری سر شمع، روش خود را برای بازه وسیعی از مسائل ظرفیت باربری جانبی شمع قابل استفاده نموده است. برای راحتی بیشتر این روش برای ۴ گروه زیر به طور جداگانه بررسی می شود. در تمام ۴ گروه زیر نقطه دارای لنگر حداکثر (برش صفر)  $f$  نامگذاری شده و مکان آن از معادلات تعادل بدست می آید.

### ۲-۳-۴-۱ شمع های بدون گیرداری<sup>۱۳</sup> در خاک چسبنده:

شکل ۶-۲-۷ مکانیسم انهدام این گروه را در ۲ حالت شمع کوتاه و بلند نشان می دهد. با استفاده از معادلات ۶-۱۱ تا ۶-۱۳ مقدار  $H_u$  بدست می آید. Cu مقاومت برشی زهکشی نشده خاک و مقادیر پارامتر  $g$  در اشکال مشخص شده است. از شکل ۶-۸ نیز به راحتی می توان  $H_u$  را بدست آورد.

<sup>13</sup> Unrestrained

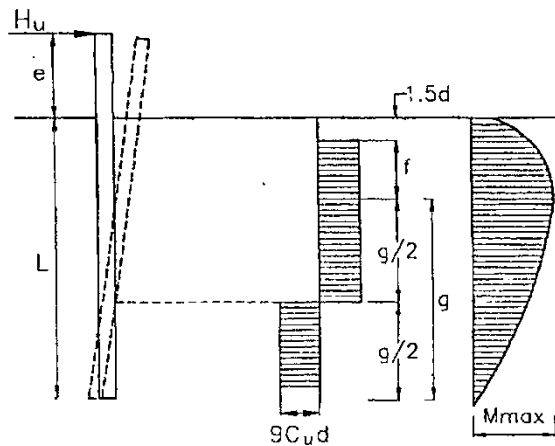
توجه شود که روابط ذکر شده برای شمع‌های کوتاه که لنگر نهایی آنها از لنگر حداکثر بیشتر است  
( $M_y > M_{max}$ ) نوشته شده و برای شمع‌های بلند در رابطه بایستی به جای  $M_{max}$  مقدار  $M_y$  را

قرار داد.

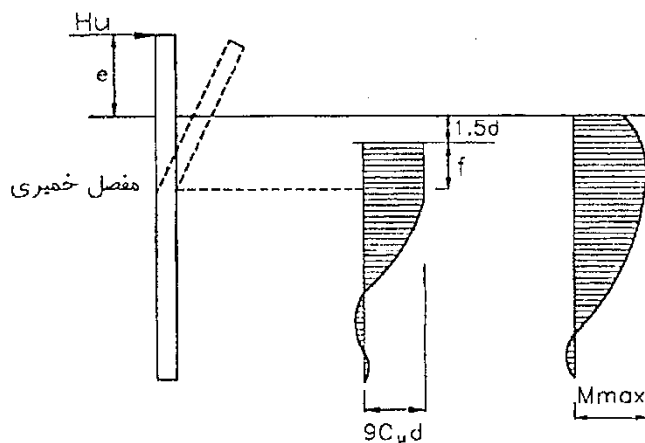
$$f = \frac{H_u}{9C_u d} \quad 11-2$$

$$M_{max} = H_u (e + 1.5d + 0.5f) \quad 12-2$$

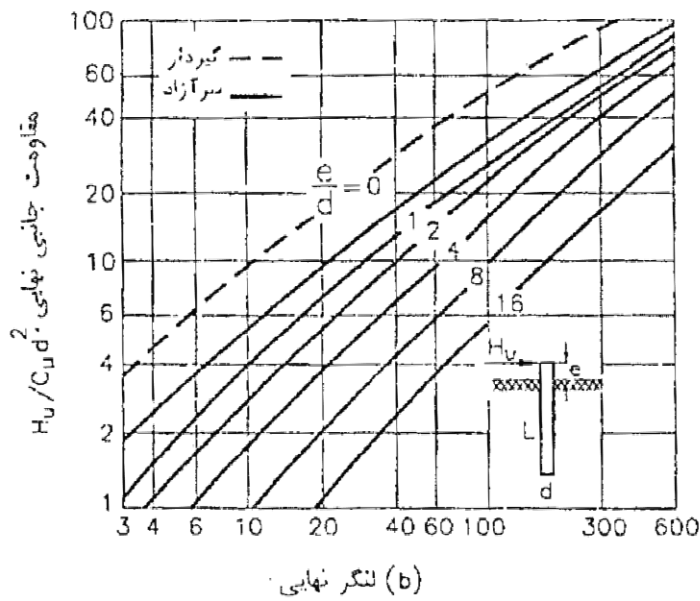
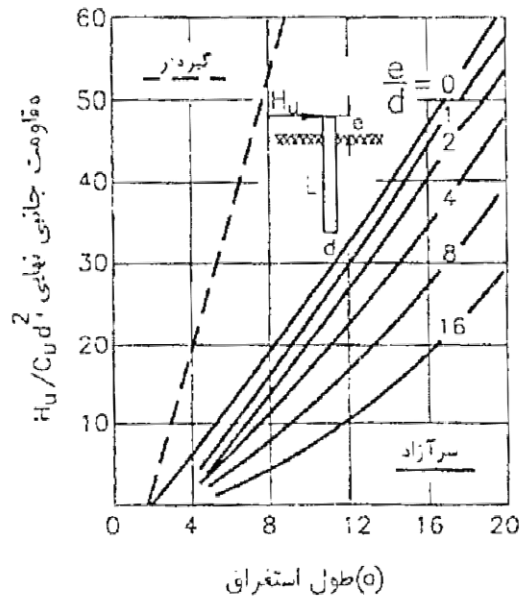
$$M_{max} = 2.25dg^2 C_u \quad 13-2$$



(f) گشتاور خمشی (e) عکس العمل خاک (d) تغییر مکان جانبی



شکل ۷-۲ مکانیسم انهدام برای شمع‌های با سر آزاد واقع در خاک چسبنده [۶]



شکل ۲-۸ مقاومت جانبی نهایی خاک چسبنده [۲]

۲-۳-۴ شمع‌های گیردار<sup>۱۴</sup> در خاک چسبنده:

مکانیزم‌های انهدام ممکن در شرایط گیرداری سر شمع در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. با

توجه به حالت a و استفاده از معادلات تعادل رابطه مربوط به شمع کوتاه به شرح زیر بدست می‌آید.

<sup>14</sup> Restrained

$$H_u = 9C_u d (L - 1.5d) \quad ۱۴-۲$$

$$M_{max} = H_u (0.5L + 0.75d) \quad ۱۵-۲$$

برای شمع های متوسط<sup>۱۵</sup> مکانیزم انهدام مطابق b بوده و همانطور که مشاهده می شود لنگر

My در زیر سر شمع بوجود می آید و روابط زیر فقط با شرط (My > Mmax) برقرار است.

$$M_y = 2.25C_u dg^2 - 9C_u df (1.5d + 0.5f) \quad ۱۶-۲$$

چنانچه شرایط My > Max برقرار نباشد حالت شکل c رخ داده و شمع طویل به حساب می

آید که مقدار Hu از رابطه زیر بدست می آید. راه حل بدون بعد برای هر ۳ حالت این گروه در شکل

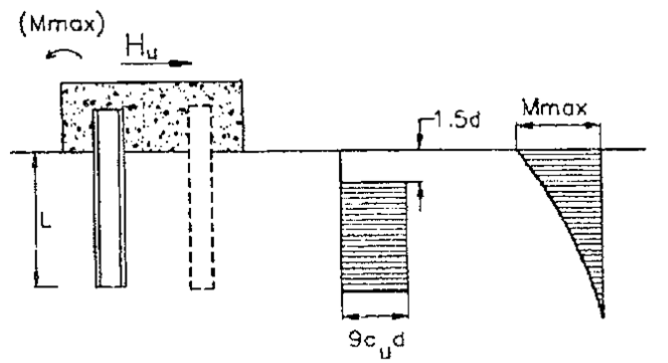
۸-۲ نشان داده شده است.

$$H_u = \frac{2M_y}{1.5d + 0.5f} \quad ۱۷-۲$$

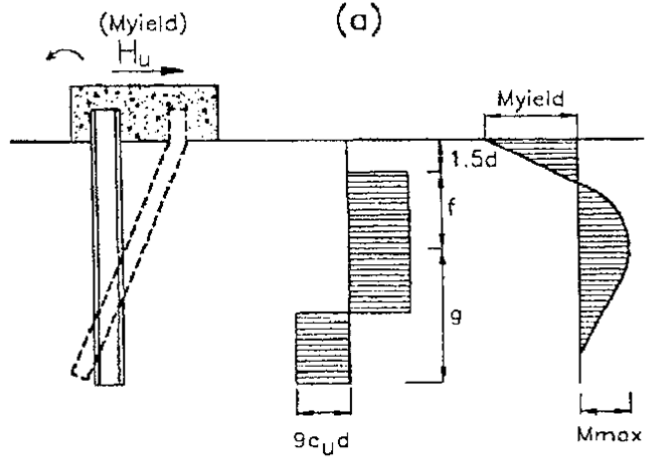
---

<sup>15</sup> Intermediate

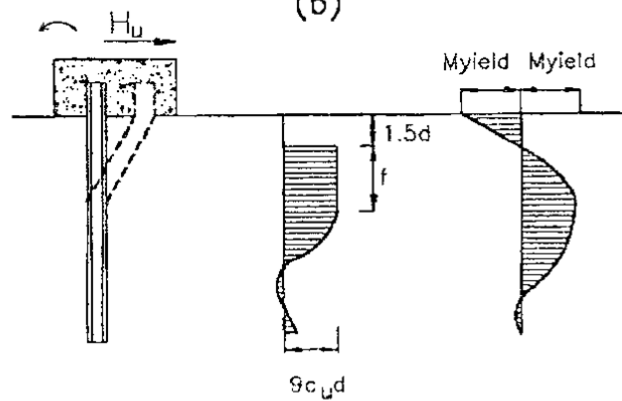




گشتاور خمشی      عکس العمل خاک      تغییر مکان جانبی  
(a)



گشتاور خمشی      عکس العمل خاک      تغییر مکان جانبی  
(b)



گشتاور خمشی      عکس العمل خاک      تغییر مکان جانبی  
(c)

شکل ۹-۲ شمع‌های گیردار در خاک چسبنده (a) شمع کوتاه (b) شمع متوسط (c) شمع بلند [۲]

## ۲-۳-۴-۳ شمع‌های بدون گیرداری در خاک دانه ای:

در این حالت نیز بسته به میزان لنگر نهایی، شمع ممکن است رفتار یک شمع بلند و یا شمع

کوتاه را از خود نشان دهد که هر دو مکانیزم انهدام این حالت در شکل زیر مشاهده می‌شود. اگر

حداکثر لنگر کمتر از لنگر نهایی مقطع شمع باشد، شمع کوتاه بوده و مکانیزم انهدام مطابق a بوده و

از معادلات تعادل مقدار  $H_u$  و  $f$  و  $M_{max}$  بدست می‌آید.

اگر از محاسبه روابط نتیجه شود که  $M_y > M_{max}$  آنگاه فرض شمع کوتاه منتفی بوده و

مکانیزم انهدام مطابق حالت b خواهد بود. در این حالت برای استفاده از معادله ۲-۲۱ بایستی مقدار

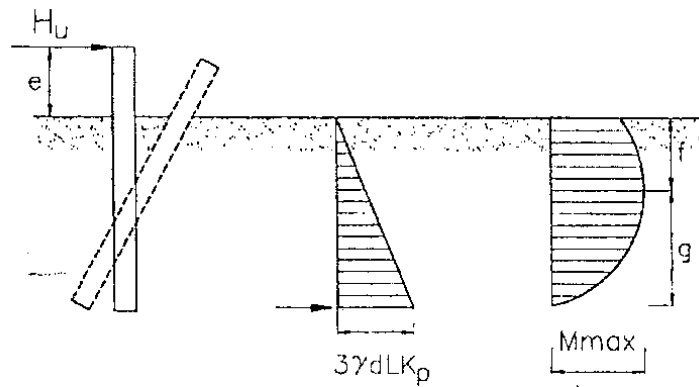
$M_{max} = M_y$  را در نظر گرفت.

$$H_u = \frac{0.5\gamma d L^3 K_p}{e + L} \quad 18-2$$

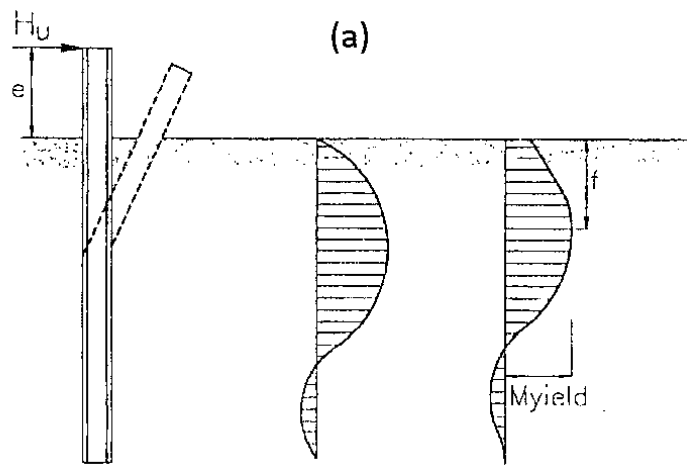
$$H_u = 1.5\gamma d K_p f^2 \quad 19-2$$

$$f = 0.82 \sqrt{\left(\frac{H_u}{d K_p \gamma}\right)} \quad 20-2$$

$$M_{max} = H_u \left(e + \frac{2}{3}f\right) \quad 21-2$$



تغییر مکان جانبی      عکس العمل خاک      گشتاور خمشی



تغییر مکان جانبی      عکس العمل خاک      گشتاور خمشی

شکل ۲-۱۰ شمع‌های با سر آزاد در خاک دانه‌ای (a) شمع کوتاه (b) شمع بلند [۲]

### ۲-۳-۴-۴ شمع‌های گیردار در خاک دانه‌ای

مکانیزم انهدام این حالت در شکل ۲-۱۱ نمایش داده شده است. برحسب مقدار لنگر مقاوم سر

شمع هر یک از ۳ رفتار شمع کوتاه، متوسط و بلند امکان پذیر خواهد بود. اگر لنگر مقاوم سر شمع

کمتر از  $M_y$  باشد مکانیزم انهدام شکل a می باشد که در این حالت:

$$H_u = 1.5\gamma L^2 d K_p \quad 22-2$$

$$M_{max} = \frac{2}{3} H_u L \quad 23-2$$

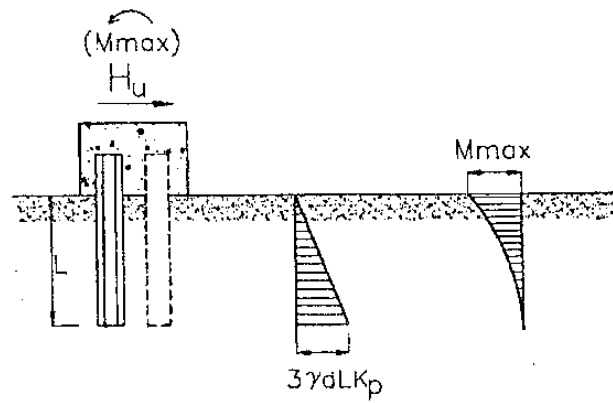
اگر لنگر ماکزیمم در یک نقطه از  $M_y$  بیشتر شود آنگاه مکانیزم  $b$  رخ داده و معادلات زیر برقرار است.  
 شرط دیگر این حالت آن است که لنگر در عمق  $f$  کمتر از  $M_y$  باشد.

$$F = \left( \frac{2}{3} \gamma d L^2 K_p \right) - H_u \quad ۲۴-۲$$

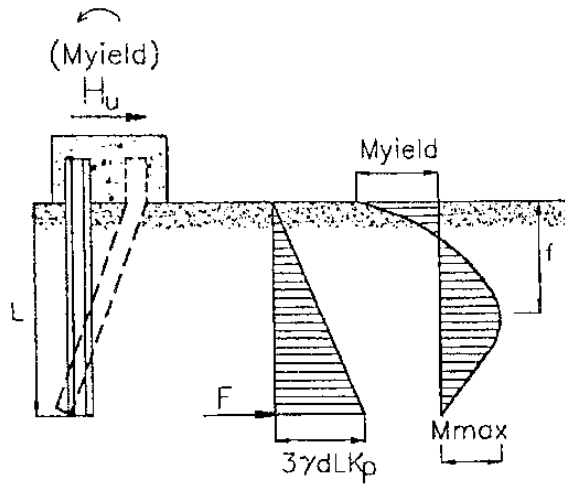
$$M = (0.5 \gamma d L^3 K_p) - H_u L \quad ۲۵-۲$$

در حالت  $c$  که نمایانگر رفتار شمع بلند است، لنگر مقاوم در  $۲$  نقطه به  $M_y$  رسیده است که معادله زیر صادق می‌باشد. برای هر  $۳$  حالت  $a, b, c$  راه حل‌های بدون بعد در شکل  $۲-۱۲$  نشان داده شده است.

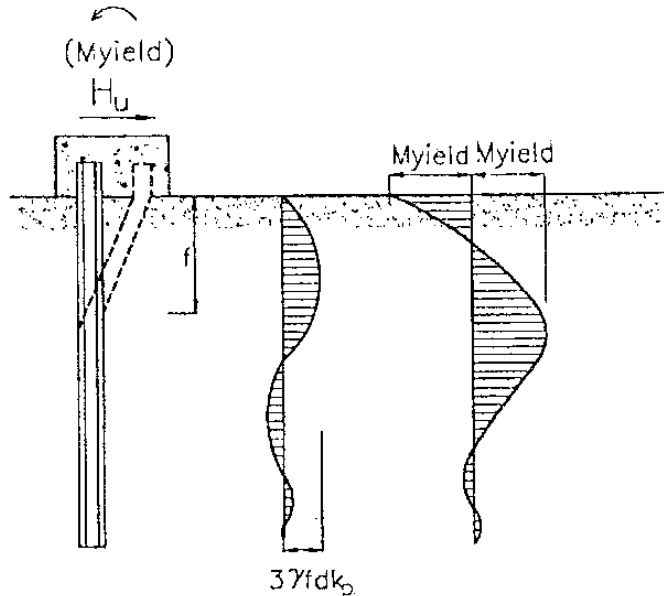
$$H_u = \left( e + \frac{2}{3} f \right) = 2M_y \quad ۲۶-۲$$



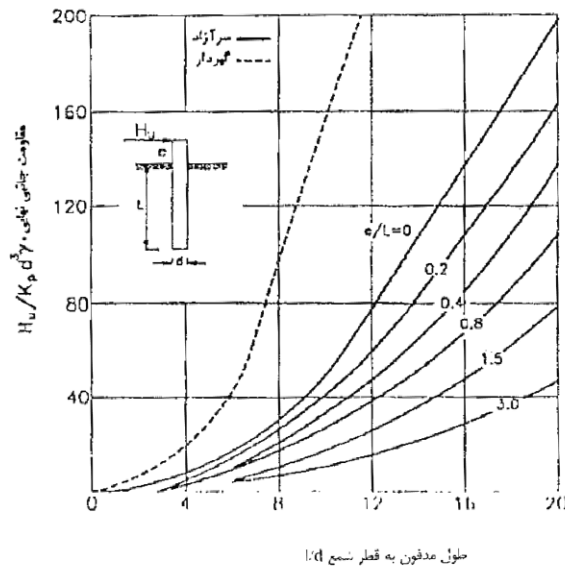
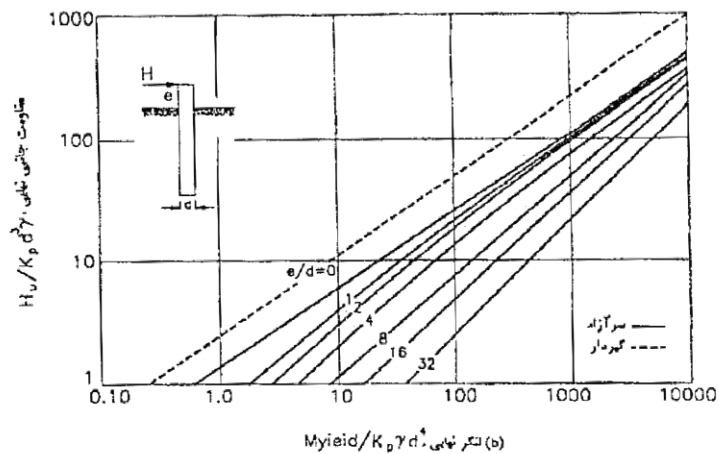
گشتاور خمشی عکس العمل خاک تغییر مکان جانبی



گشتاور خمشی عکس العمل خاک تغییر مکان جانبی



شکل ۱۱-۲ شمعی‌های با سر آزاد در خاک دانه‌ای: (a) شمعی کوتاه (b) شمعی بلند [۲]



شکل ۲-۱۲ مقاومت جانبی نهایی شمع کوتاه در خاک دانه‌ای [۲]

### ۲-۳-۵ روش Meyerhof

میرهوف روابط زیر را برای توزیع فشار شمع‌های کوتاه ارائه داد. اساس روابط میرهوف تحلیل دیوار حائل است که با اضافه نمودن یک ضریب شکل توزیع فشار را برای شمع کوتاه نیز تعمیم داد.

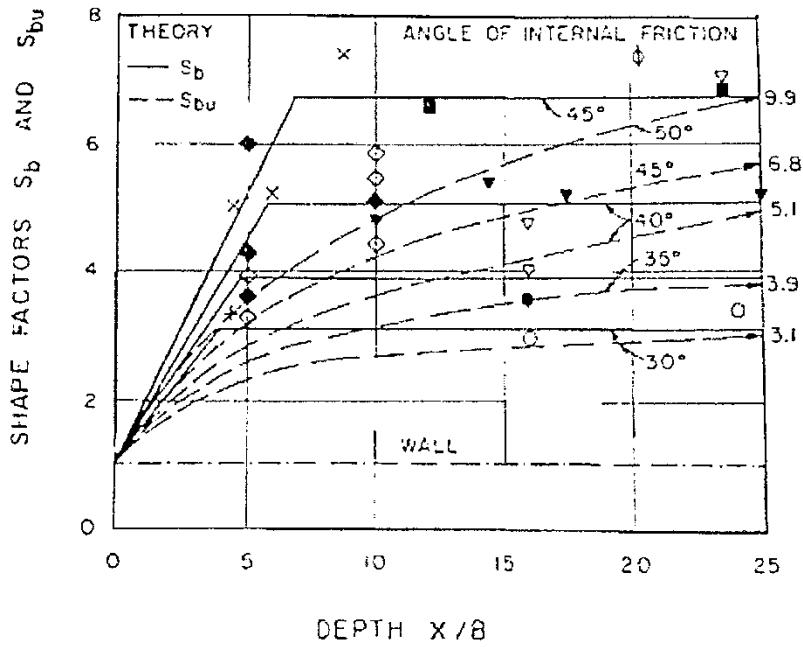
$$P_{xu} = \sigma_{vx} (K_p - K_a) S_{bu} + CK_c S_{cu} \quad ۲۷-۲$$

$S_{bu}$ : ضریب شکل برای خاک های دانه ای

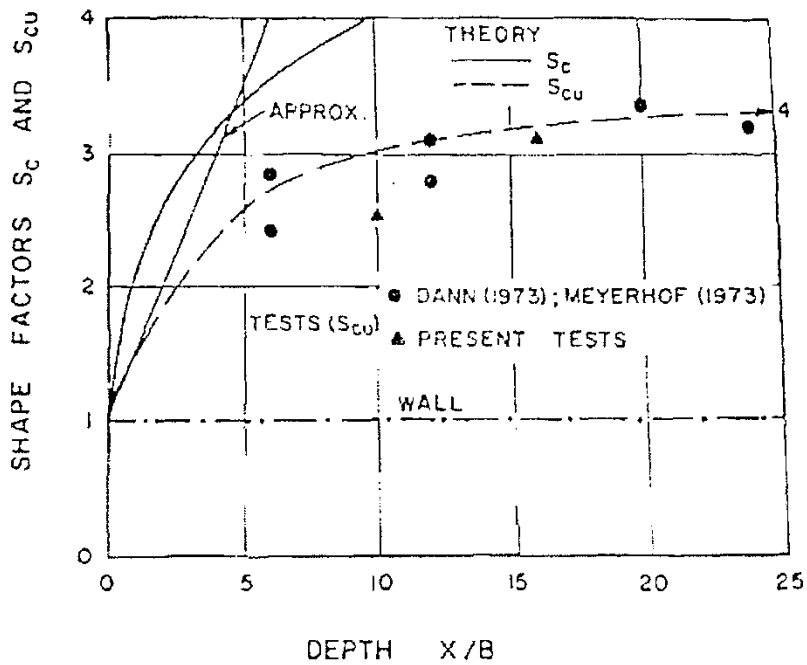
$S_{cu}$ : ضریب شکل برای خاک های چسبنده

$\sigma_{vx}$ : تنش قائم ناشی از فشار خاک در عمق X

مقادیر  $S_{bu}$  و  $S_{cu}$  را می توان به ترتیب از شکل ۱۳-۲ و شکل ۱۴-۲ بدست آورد.



شکل ۱۳-۲ ضریب شکل برای شمع تحت اثر بار جانبی در ماسه [۶]



شکل ۱۴-۲ ضریب شکل برای شمع تحت اثر بار جانبی در رس [۶]

با در نظر گرفتن عمق بحرانی معادل رابطه ۲-۲۹ فشار جانبی خاک در نواحی بالاتر از عمق بحرانی از رابطه ۲-۵ محاسبه شده و برای اعماق بیشتر از عمق بحرانی از روابط ۲-۳۰ تا ۲-۳۶ استفاده می‌شود.

$$Z_c = 5B \quad 29-2$$

$$K_q = K_0 N_q \quad 30-2$$

$$K_c = N_c \quad 31-2$$

که  $N_q$  و  $N_c$  پارامترهای ظرفیت باربری برای پی‌های نواری هستند. ظرفیت باربری جانبی شمع در این حالت از رابطه ۲-۳۲ و ۲-۳۳ بدست می‌آید.

$$Q_n = (0.12\gamma L K_{br} + 0.4c K_{cr}) BL < Q_{nl} \quad 32-2$$

$$Q_{nl} = 0.4P_1 BL \quad 33-2$$

و مقدار  $P_1$  از روابط زیر محاسبه می‌شود.

برای شمع‌های حفاری شده:

$$P_1 = 40N_q \tan \varphi (kPa) + cN_c \quad 34-2$$

برای شمع‌های کوبیدنی:

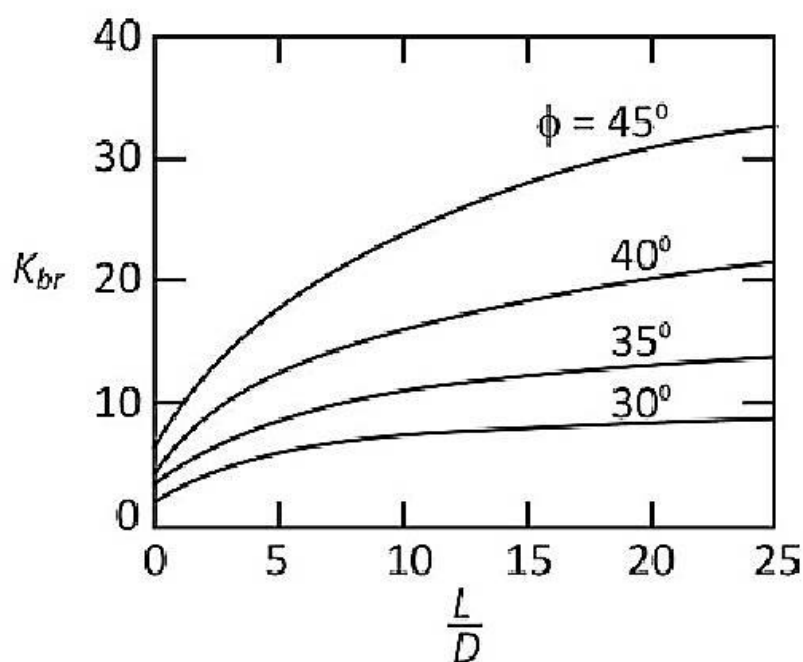
$$P_1 = 60N_q \tan \varphi (kPa) + cN_c \quad 35-2$$

برای خاک‌های رسی:

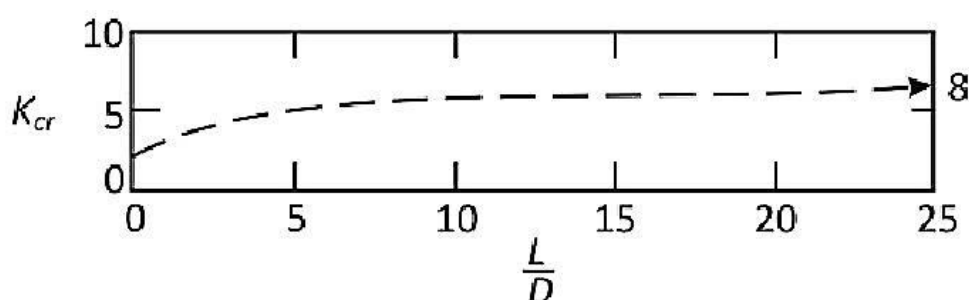
$$P_1 = cN_c \quad 36-2$$

$N_q$  همان ضریب ظرفیت باربری ترزاقی برای شالوده سطحی بوده و  $N_c$  نیز بر طبق نظر میرهوف و هانسن برای شمع‌های حفاری شده مقدار ۶ و برای شمع‌های کوبیدنی ۸ در نظر گرفته می‌شود. مقادیر  $K_{br}$  و  $K_{cr}$  از شکل ۲-۱۵ و شکل ۲-۱۶ بدست می‌آید.





شکل ۲-۱۵ ضریب فشار جانبی خاک برای ماسه [۷]



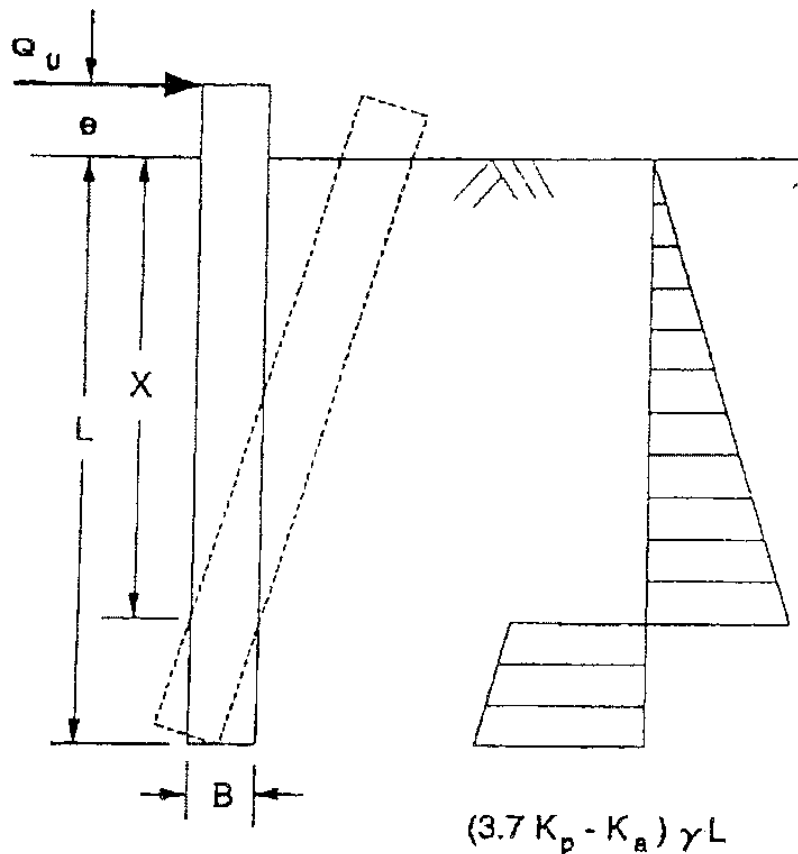
شکل ۲-۱۶ ضریب فشار جانبی خاک برای رس [۷]

### ۲-۳-۶ روش Petrasovits and Award

این دو پژوهشگر با در نظر گرفتن مقدار جدیدی برای  $K_q$  روش هانسن را تا حدودی اصلاح نمودند. این روش تنها برای رفتار شمع های کوتاه که در خاک غیر چسبنده قرار دارند به کار می رود. ضریب  $K_q$  برابر  $3.7K_p - K_a$  می باشد که  $K_p$  و  $K_a$  همان فشار مقاوم و محرک رانکین می باشند. در نتیجه توزیع تنش در این روش به صورت شکل ۲-۱۷ خواهد بود.

$$K_p = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad ۳۷-۲$$

$$K_a = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad ۳۸-۲$$



شکل ۱۷-۲ توزیع فشار خاک در روش Petrasovits and Award [۸]

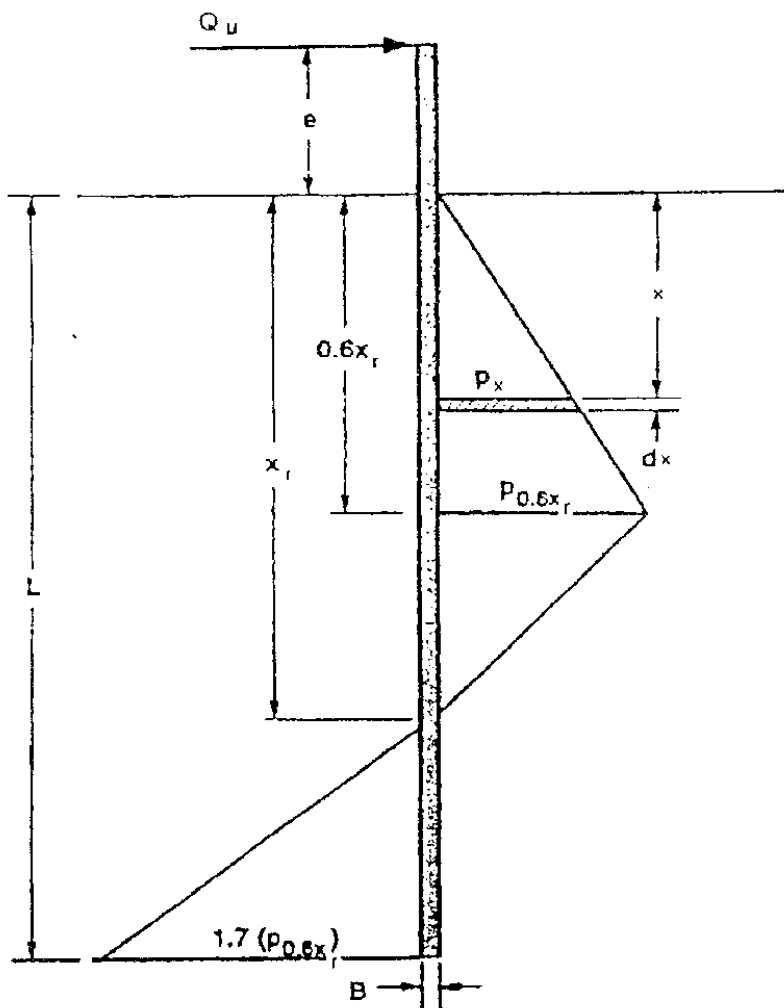
### ۲-۳-۷ روش Prasad and Chari

بررسی آزمایشگاهی پراساد و چری که در خاک ماسه‌ای گرد گوشه انجام شد، منجر به اصلاح نمودار توزیع فشار وارد بر شمع گشت به نحوی که اگر  $X_i$  عمق نقطه دوران برای شمع‌های کوتاه و در خاک غیر چسبنده باشد، فشار جانبی خاک تا عمق  $0.6X_r$  افزایش سپس تا نقطه دوران کاهش می‌یابد و در نوک شمع  $1.7$  برابر فشار در عمق  $0.6X_r$  خواهد بود. روابط زیر نیز برای دست آوردن عمق دوران و ظرفیت باربری جانبی شمع کوتاه در خاک غیر چسبنده به کار می‌رود.

$$P_{0.6X_r} = 10^{(1.3 \tan \phi + 0.3)} 0.6X_r \quad ۳۹-۲$$

$$X_r = \left[ -(0.567L + 2.7e) + (5.307L^2 + 7.29e^2 + 10.541eL)^2 \right] / 2.1996 \quad ۴۰-۲$$

$$Q_u = 0.24 \left[ 10^{(1.3 \tan \phi + 0.3)} \right] X_r B (2.7X - 1.7L) \quad ۴۱-۲$$



شکل ۱۸-۲ توزیع فشار خاک در روش Prasad and Chari [۹]

جدول ۳-۲ مقایسه ظرفیت باربری جانبی شمع در چندین روش [۹]

مرجع	شرایط آزمایش	ظرفیت باربری (N)					
		Observed capacity	Hansen	Broms	Petrasovits &Award	Meyerhof et.al	Prasad &Chari
Adams & Randhakrish (1973)	L=444.5 mm B=101.6 mm e=317.5 mm $\gamma=15.7 \text{ kN/m}^3$ $\phi=31^\circ$	152	165	90	238	120	151
Adams & Randhakrish (1973)	L=444.5 mm B=101.6 mm e=317.5 mm $\gamma=17.6 \text{ kN/m}^3$ $\phi=45^\circ$	540	632	601	510	350	558
Adams & Randhakrish (1973)	L=444.5 mm B=76.2 mm e=317.5 mm $\gamma=15.7 \text{ kN/m}^3$ $\phi=45^\circ$	410	521	450	380	310	410
Adams & Randhakrish (1973)	L=444.5 mm B=50.8 mm e=317.5 mm $\gamma=17.6 \text{ kN/m}^3$ $\phi=45^\circ$	340	407	300	250	230	280
Meyerhof et.al (1981)	L=200 mm B=12.5 mm e=0 mm $\gamma=15.2 \text{ kN/m}^3$ $\phi=50^\circ$	40	75	30	28	43	44

Meyerhof et.al (1981)	L=200 mm B=12.5 mm e=0 mm $\gamma=14.0 \text{ kN/m}^3$ $\phi=35^\circ$	11	14	13	12	10	10
Chari & Meyerhof (1983)	L=991 mm B=75 mm e=75 mm $\gamma=15.0 \text{ kN/m}^3$ $\phi=46^\circ$	2050	5800	3100	3000	3630	3590
Joo (1985)	L=730 mm B=73 mm e=170 mm $\gamma=14.6 \text{ kN/m}^3$ $\phi=40^\circ$	760	1250	1050	1000	880	855
Joo (1985)	L=900 mm B=102 mm e=280 mm $\gamma=14.6 \text{ kN/m}^3$ $\phi=40^\circ$	1400	2360	2100	1850	1610	1660

## ۲-۴ محاسبه تغییر مکان افقی شمع تحت اثر بار جانبی

حداکثر تغییر مکان های مجاز شمع های تحت اثر بار جانبی، در بسیاری از موارد معیار اصلی طراحی می باشد. ۲ مدل کلی برای محاسبه تغییر مکان ها، مدل عکس العمل بستر و روش ارتجاعی است. تفاوت اصلی این دو در فرض نحوه اندرکنش خاک و شمع است. در هر کدام از مدل ها تحلیل های بسیاری انجام شده که به بیان چند مورد از آنها پرداخته می شود.

## ۲-۴-۱ تحلیل عکس العمل بستر

نام دیگر این روش تیر بر روی فوندانسیون<sup>۱۶</sup> است و اولین بار توسط Winkler در سال ۱۸۶۷ پیشنهاد شد که برای شبیه سازی خاک اطراف از تعدادی فنر ارتجاعی خطی استفاده نمود. گرچه تبدیل ماهیت پیوسته خاک به تعدادی فنر از معایب این مدل است؛ اما با توجه به سادگی آن مدل عکس العمل بستر بسیار کاربردی شده است.

وینکلر رابطه حاکم بر فنرها را به صورت زیر تعریف نمود که در آن  $\rho$  تغییر مکان جانبی نقاط،  $P$  فشار جانبی از طرف خاک و  $K_h$  مدول عکس العمل افقی بستر است.

$$P = K_h \rho \quad ۴۲-۲$$

بعد ها رابطه وینکلر به صورت زیر بازنویسی شد که  $W$  فشار خاک،  $K$  سختی فنرهای معادل است. [۱۰] و [۱۱]

$$W = K \rho \quad ۴۳-۲$$

با فرض شمع به عنوان یک پی نواری باریک و صرف نظر کردن از نیروی محوری می توان رابطه نظریه خمش تیر را به آن اعمال نمود. با جایگذاری رابطه وینکلر در معادله ۴۴-۲ رابطه ۴۵-۲ بدست می آید. حل معادله ۴۵-۲ به تعیین تغییر مکان افقی نقاط شمع منجر می شود. در زیر با روش تفاضل محدود می توان برای هر توزیع  $K_h$  معادله را بست داده و حل نمود. در روابط آتی  $E_p$  مدول الاستیسیته شمع،  $I_p$  ممان اینرسی مقطع شمع و  $\rho_i$  جابجایی جانبی نقطه  $i$  ام می باشد. با کاربرد معادله ۴۶-۲ برای نقاط در نظر گرفته شده بر روی شمع و احتساب ۴ شرط مرزی سر و انتهای شمع، حل دستگاه معادلات مربوطه ممکن شده و تغییر مکان نقاط شکل بدست می آید.

$$E_p I_p \frac{d^4 \rho}{dz^4} = -pd \quad ۴۴-۲$$

$$E_p I_p \frac{d^4 \rho}{dz^4} K_h d \rho = 0 \quad ۴۵-۲$$

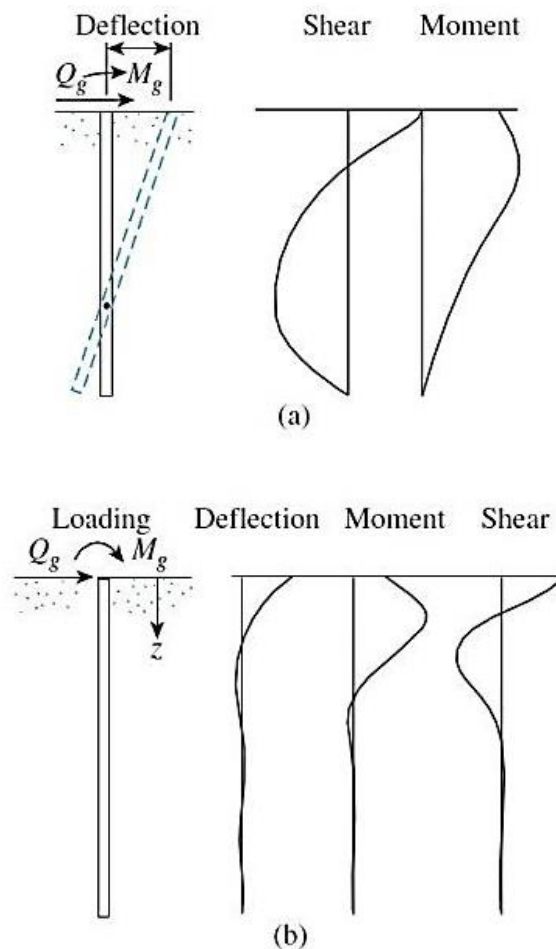
<sup>16</sup> Beam on foundation

$$\rho_{i-2} - 4\rho_{i-1} + a_i \rho_i - 4\rho_{i+1} + \rho_{i+2} = 0 \quad ۴۶-۲$$

$$a_i = 6 + \frac{k_i L^4 d}{E_p I_p n^4} \quad ۴۷-۲$$

#### ۲-۴-۱-۱ راه حل الاستیک

Matlock و Reese برای تغییر مکان‌های کوچک شمع بلند واقع در خاک دانه‌ای روابطی ارائه دادند که از برهم نهی اثرات لنگر خمشی سر شمع و نیروی جاذبه نتیجه می‌شود. Davisson و Gill نیز راه حل مشابهی را برای شمع‌های بلند واقع در خاک چسبنده ارائه دادند. این روش برای خاک‌های رسی عادی تحکیم یافته و خاک‌های دانه‌ای استفاده می‌شود. شکل ۲-۱۹ نمودار کلی تغییر مکان‌ها و نیروهای داخلی شمع برای هر دو حالت صلب و انعطاف پذیر نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۹ رفتار شمع تحت اثر بار جانبی (a) شمع صلب (b) شمع انعطاف پذیر [۱۲]

ضرایب معادلات زیر از جدول ۴-۲ بدست می‌آید.  $Z$  طول بدون بعد شمع و برابر  $Z/T$  می باشد

که  $T$  همان ضریب سختی شمع و خاک بوده و از رابطه ۲-۳ محاسبه می‌گردد.

راه حل Matlock و Reese برای خاک‌های دانه‌ای:

$$x_{(z)} = A_y \frac{Q_g T^3}{EI} + B_y \frac{M_g T^2}{EI} \quad ۴۸-۲$$

$$\theta_{(z)} = A_s \frac{Q_g T^2}{EI} + B_s \frac{M_g T}{EI} \quad ۴۹-۲$$

$$M_{(z)} = A_m Q_g T + B_m M_g \quad ۵۰-۲$$

$$V_{(z)} = A_v Q_g + B_v \frac{M_g}{T} \quad ۵۱-۲$$

$$P_{(z)} = A_p \frac{Q_p}{T} + B_p \frac{M_g}{T^2} \quad ۵۲-۲$$

راه حل Gill و Ravisson برای خاک‌های چسبنده:

$$x_{(z)} = A_{yc} \frac{Q_g R^3}{EI} + B_{yc} \frac{M_g R^2}{EI} \quad ۵۳-۲$$

$$M_{(z)} = A_{mc} Q_g R + B_{mc} M_g \quad ۵۴-۲$$

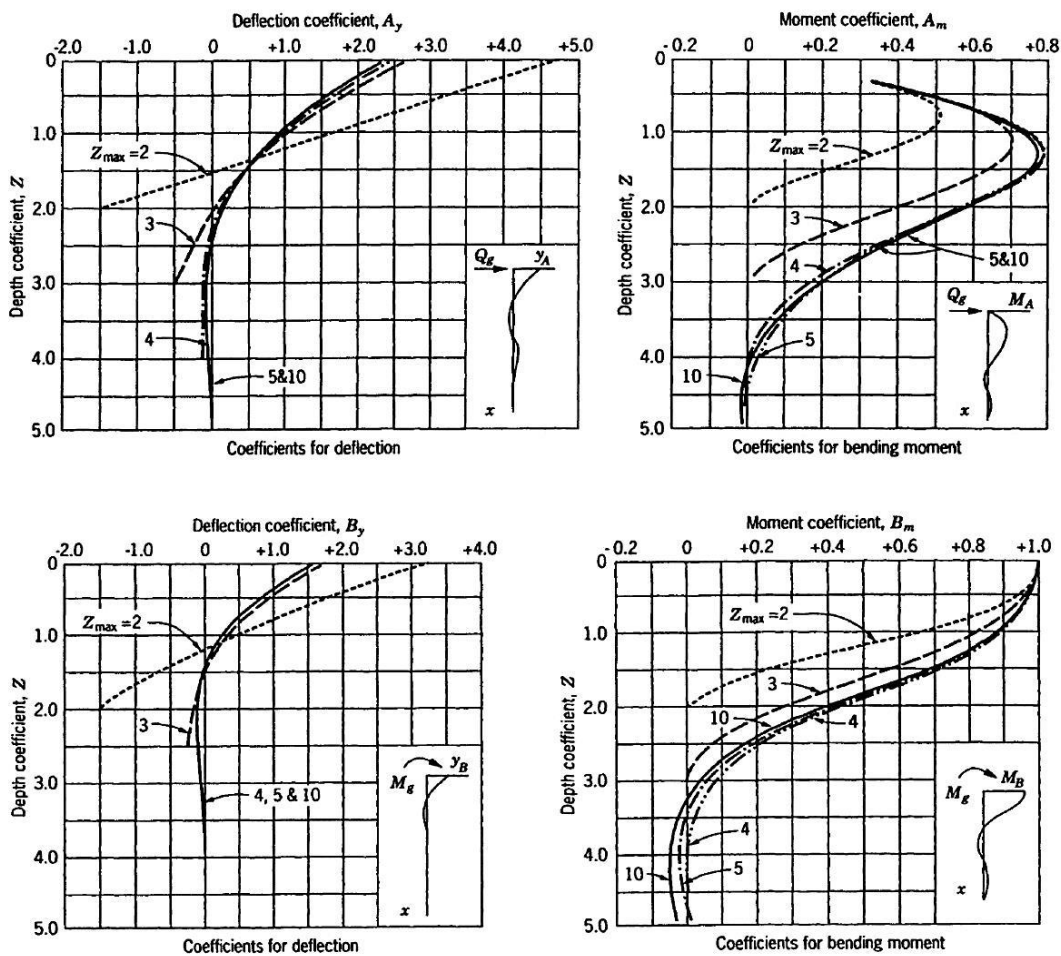
$$R = \left( \frac{EI}{k} \right)^{1/4} \quad ۵۵-۲$$



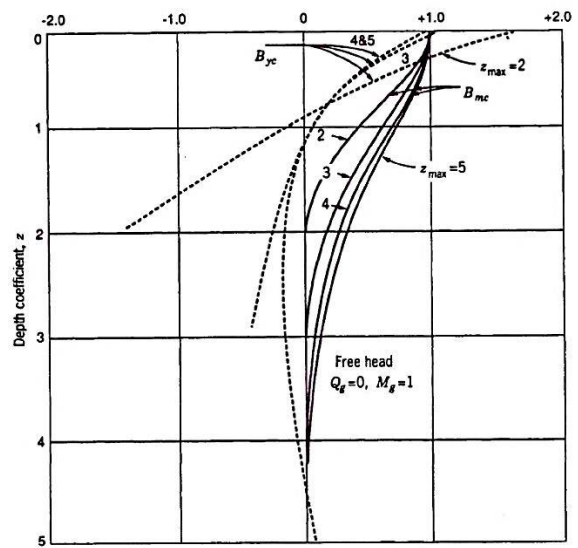
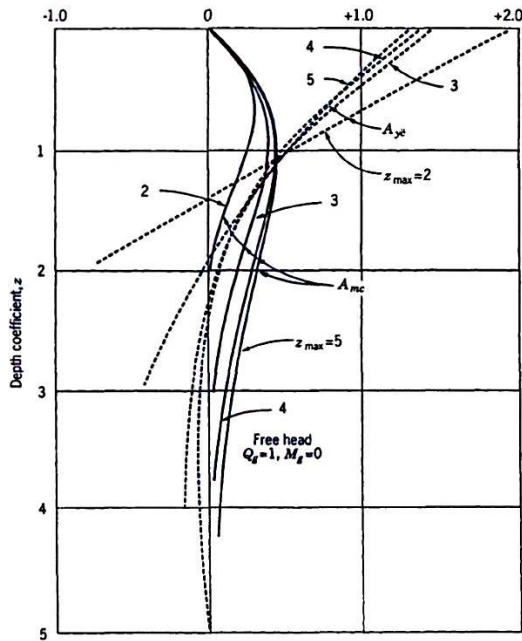
جدول ۴-۲ ضرایب مورد نیاز جهت استفاده در فرمول‌های ۲-۴۸ تا ۲-۵۵ [۱۲]

ضرایب برای شمع‌های بلند $k = n_s Z$										
Z	$A_y$	$A_s$	$A_m$	$A_v$	$A_p$	$B_y$	$B_s$	$B_m$	$B_v$	$B_p$
0.0	2.435	-1.623	0.000	1.000	0.000	1.623	-1.750	1.000	0.000	0.000
0.1	2.273	-1.618	0.100	0.989	-0.227	1.453	-1.650	1.000	-0.007	-0.145
0.2	2.112	-1.603	0.198	0.956	-0.422	1.293	-1.550	0.999	-0.028	-0.259
0.3	1.952	-1.578	0.291	0.906	-0.586	1.143	-1.450	0.994	-0.058	-0.343
0.4	1.796	-1.545	0.379	0.840	-0.718	1.003	-1.351	0.987	-0.095	-0.401
0.5	1.644	-1.503	0.459	0.764	-0.822	0.873	-1.253	0.976	-0.137	-0.436
0.6	1.496	-1.454	0.532	0.677	-0.897	0.752	-1.156	0.960	-0.181	-0.451
0.7	1.353	-1.397	0.595	0.585	-0.947	0.642	-1.061	0.939	-0.226	-0.449
0.8	1.216	-1.335	0.649	0.489	-0.973	0.540	-0.968	0.914	-0.270	-0.432
0.9	1.086	-1.268	0.693	0.392	-0.977	0.448	-0.878	0.885	-0.312	-0.403
1.0	0.962	-1.197	0.727	0.295	-0.962	0.364	-0.792	0.852	-0.350	-0.364
1.2	0.738	-1.047	0.767	0.109	-0.885	0.223	-0.629	0.775	-0.414	-0.268
1.4	0.544	-0.893	0.772	-0.056	-0.761	0.112	-0.482	0.688	-0.456	-0.157
1.6	0.381	-0.741	0.746	-0.193	-0.609	0.029	-0.354	0.594	-0.477	-0.047
1.8	0.247	-0.596	0.696	-0.298	-0.445	-0.030	-0.245	0.498	-0.476	0.054
2.0	0.142	-0.464	0.628	-0.371	-0.283	-0.070	-0.155	0.404	-0.456	0.140
3.0	-0.075	-0.040	0.225	-0.349	0.226	-0.089	0.057	0.059	-0.213	0.268
4.0	-0.050	0.052	0.000	-0.106	0.201	-0.028	0.049	-0.042	0.017	0.112
5.0	-0.009	0.025	-0.033	0.013	0.046	0.000	0.011	-0.026	0.029	-0.002

شکل‌های ۲-۲۰ و ۲-۲۱ راه حل بدون بعد برای ضرایب فوق می‌باشد.



شکل ۲-۲۰ تغییرات ضرایب  $A_y$ ،  $A_m$ ،  $B_y$  و  $B_m$  با عمق بدون بعد  $Z/T$  [۱۲]



شکل ۲-۱ تغییرات ضرایب  $A_{yc}$ ،  $A_{mc}$  و  $B_{yc}$ ،  $B_{mc}$  با عمق بدون بعد  $Z/T$  [۱۲]

## ۲-۱-۴-۲ اساس تحلیل غیر خطی و منحنی p-y

فرض اصلی در روش‌های قبل، رفتار ارتجاعی خاک است. در حالیکه رابطه واقعی بین فشار و

تغییر مکان شمع غیر خطی می‌باشد. برای ساده سازی مساله بسیاری از محققان خاک را تا تغییر

شکل‌های کوچک، محیطی الاستیک خطی فرض نموده و برای جابجایی‌های بیشتر، خاک را خمیری

کامل فرض کرده‌اند. بنابراین روش‌های دیگری با در نظر گرفتن این رابطه غیر خطی تحت عنوان

مدل وینکلر الاستو پلاستیک مطرح شده است. Kubo در سال ۱۹۶۵ رابطه غیر خطی ۲-۵۶ را

پیشنهاد نمود که ضرایب  $k$ ،  $n$ ،  $m$  از آزمایش بدست می‌آیند.

$$P = Kz^m \rho^n$$

۶۲-۲

گسترده ترین راهکار برای محاسبه پاسخ شمع‌های تحت بار جانبی با در نظر گرفتن ماهیت

رفتار غیر خطی خاک، روش p-y است. در این روش p نشان گر میزان فشار خاک در واحد طول

شمع، y نشان دهنده جابجایی شمع و منحنی‌های p-y به عنوان ورودی است. در این روش شمع به

بخش‌های کوچک تقسیم شده و برای هر بخش یک منحنی به عنوان ورودی اختصاص داده می‌شود.

بسته به میزان جابجایی هر ناحیه مقاومت آن ناحیه به صورت تکرار از منحنی مربوطه محاسبه می-شود. از آنجایی که جابجایی و فشار به هم وابسته بوده و هیچ یک از آنها در ابتدا معین نیستند، این تکرار لازم است. روش  $p-y$  را می توان برای گروه شمع نیز استفاده نمود، تنها بایستی بجای استفاده از منحنی های استاندارد  $p-y$  مقدار  $p$  را با ضریب  $f$  کاهش داد. ضریب  $f$  به اعداد شمع های گروه و موقعیت هر یک نسبت به سایر شمع ها در گروه بستگی دارد. مقادیر و معادلات مختلفی توسط نویسندگان متعدد برای ضریب  $f$  ارائه شده است.

## ۲-۴-۲ تحلیل ارتجاعی تک شمع

در این تحلیل ماهیت خاک به صورت پیوسته ارتجاعی مدل می شود. Polous در سال ۱۹۷۱ تحلیلی برای شمع های شناور ارائه داد و پس از آن در سال ۱۹۷۲ تحلیل دیگری برای شمع های فرورفته نیز پیشنهاد کرد. [۱۳]

فرض های اساسی این روش به شرح زیر است:

در رفتار کاملاً ارتجاعی خاک، تغییر مکان شمع و خاک یکسان می باشد.  
خاک مجاور شمع کاملاً به شمع چسبیده است.

تنش وارده از طرف خاک بر المان  $i$  ام شمع به صورت  $P_i/2$  فشاری در یک طرف و  $P_i/2$  کششی در طرف دیگر شمع می باشد.

در تعیین تغییر مکان ها از معادلات دیفرانسیل برای خمش تیر نازک استفاده می شود.

همان طور که در موارد بالا مشاهده می شود دو فرض رفتار کاملاً ارتجاعی و عدم جدایی خاک و شمع سازگاری چندانی با واقعیت ندارد. به گونه ای که فشار زیاد در نواحی سر شمع باعث تمایل خاک به جاری شدن می شود و از طرفی به علت مقاومت کششی ناچیز خاک جدایی شمع و خاک حتمی است. بعد ها راهکار هایی را برای در نظر گرفتن جاری شدن احتمالی خاک ارائه شد. Dogllas و Davisson نیز در سال ۱۹۶۴ روند حل تکراری را برای شناسایی نواحی کششی خاک و اصلاح میزان تغییر مکان ها ارائه دادند.

## ۲-۴-۳ روش Meyerhof

میرهوف در سال ۱۹۹۵ راه حلی را برای شمع های تحت اثر بار جانبی صلب و انعطاف پذیر ارائه

داد. بنا بر تعریف وی شمع را در صورتی میتوان انعطاف پذیر در نظر گرفت که [۱۴]:

$$K_r = \frac{E_p I_p}{E_s L^4} < 0.01 \quad ۵۷-۲$$

که در این رابطه  $K_r$  سختی نسبی شمع و  $E_s$  متوسط مدول الاستیسیته افقی خاک است.

برای شمع های صلب در ماسه:

$$Q_{u(g)} = 0.12 \gamma D L^2 K_b \leq 0.4 p d L \quad ۵۸-۲$$

$$M_{max} = 0.35 Q_{u(g)} L \leq M_y \quad ۵۹-۲$$

$$p = 40 N_q \tan \varphi (kPa) \quad ۶۰-۲$$

$$p = 60 N_q \tan \varphi (kPa) \quad ۶۱-۲$$

که  $K_b$  ضریب برآیند فشار خاک،  $N_q$  ضریب ظرفیت باربری خاک،  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی خاک و

$p$  فشار محدودکننده خاک می باشد که از روابط مذکور بدست می آید. برای شمع های بلند (انعطاف

پذیر) ظرفیت باربری جانبی از رابطه ۵۸-۲ بدست می آید با این تفاوت که به جای  $L$  بایستی از  $L_e$

که طول معادل می باشد استفاده کرد.

$$\frac{L_e}{L} = 1.65 K_r^{0.12} \leq 1 \quad ۶۲-۲$$

$$M = 0.3 K_r^{0.12} Q_g L \leq 0.3 Q_g L \quad ۶۳-۲$$

## ۲-۴-۴ روش پیشنهادی Patra و Pise [۱۵]

Patra و Pise در سال ۲۰۰۱ با مفروضات زیر فرمول میرهوف را به صورت معادلات ۶۴-۲ تا

۶۶-۲ بازنویسی کردند.

- فشار فعال خاک بر پشت شمع و مقاومت قائم نوک شمع ناچیز است.
- فشار محرک خاک در گسیختگی برای شمع ۳ برابر فشار محرک دیوار حائل در نظر گرفته می-شود.

برای شمع منفرد صلب با سر آزاد:

$$Q_{ur} = 3 \times 0.12 \gamma d L_e^2 K_b \quad ۶۴-۲$$

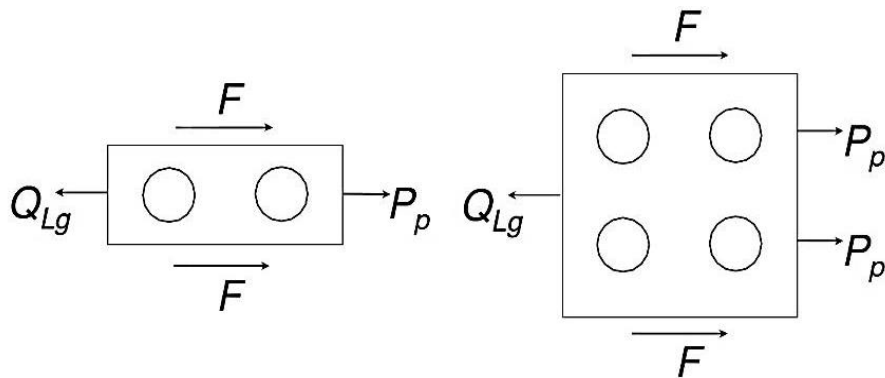
برای گروه شمع ۲\*۱:

$$Q_{Lg} = 2F + P_p = \gamma L^2 [K_s S + 0.36 d K_b] \quad ۶۵-۲$$

و برای گروه شمع ۲\*۲:

$$Q_{Lg} = \gamma L^2 [K_s S + (2 \times 0.36 d K_b)] = \gamma L^2 [K_s S + 0.72 d K_b] \quad ۶۶-۲$$

که در این رابطه  $F$  مقاومت اصطکاکی جدار شمع و  $P_p$  فشار پسپو خاک برای شمع جلو می باشد که نحوه اعمال در شکل ۲-۲۲ نشان داده شده است.



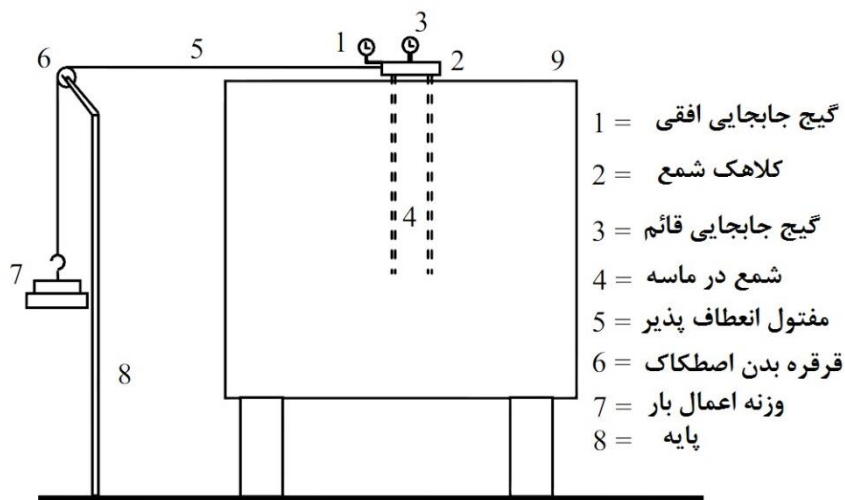
شکل ۲-۲۲ نحوه اعمال نیروها در گروه‌های شمع [۱۵]

## ۲-۵ بررسی آزمایشگاهی Alim و Rahman در ماسه [۱۶]

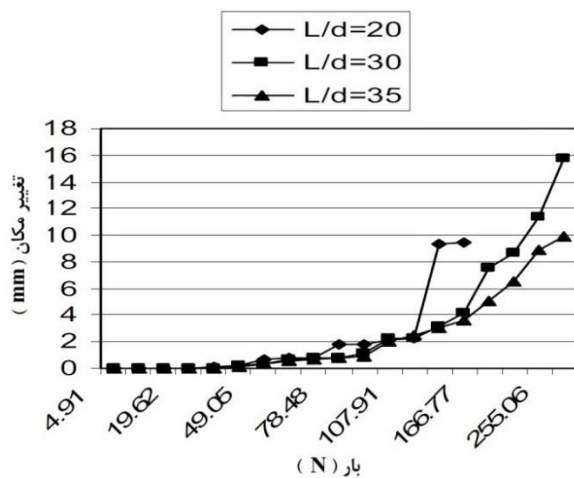
در این بررسی مدل آزمایشگاهی شمع منفرد با طول و قطر متفاوت و گروه شمع های ۱\*۲ و ۲\*۲ ساخته شده که بنا به معیار سختی نسبی میرهوف تمامی شمع ها انعطاف پذیرند. در این مدل

ها نسبت طول مدفون به قطر ( $L/d$ ) برابر ۲۰، ۳۰ و ۳۵ و فاصله آزاد شمع ها در گروه ۳، ۴.۵ و ۶ برابر قطر در نظر گرفته شده و از ماسه منطقه ی شمال- جنوب بنگلادش استفاده شده است.

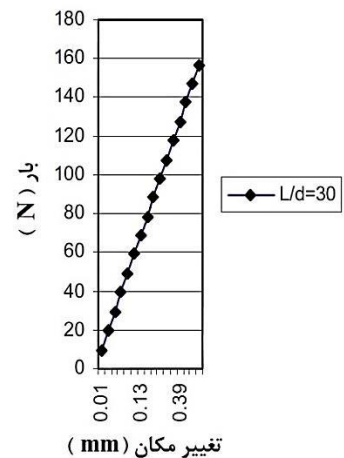
لوله آلومینیومی به قطر خارجی ۱۹ میلیمتر و ضخامت دیواره ۰.۸۱ میلیمتر با نسبت طول به قطرهای مذکور بعنوان شمع قرار داده شده است. برای افزایش زبری شمع، از چسباندن ماسه به دیواره آن استفاده شده است. صفحه فولادی به ضخامت ۰.۶۴ سانتیمتر به عنوان کلاهک شمع توسط پیچ به آن نصب شده است.



شکل ۲-۲۳ دستگاه مدل آزمایشگاهی اعمال بار جانبی بر شمع [۱۶]

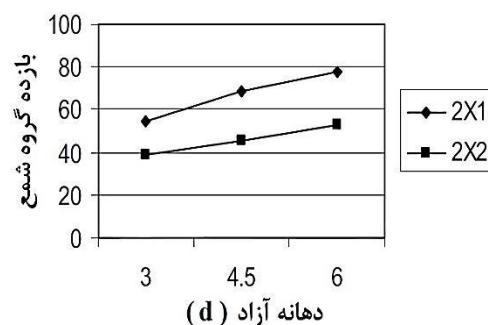
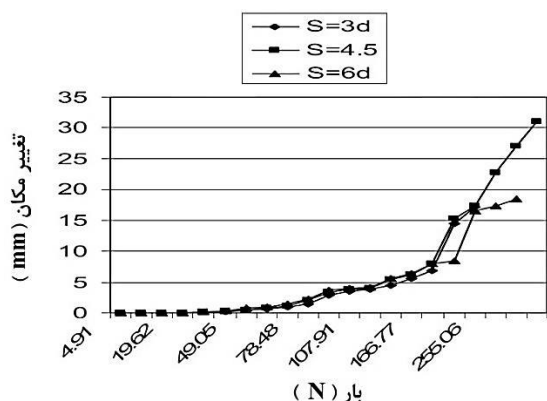


شکل ۲-۲۵ منحنی بار-تغییر مکان شمع تک [۱۶]



شکل ۲-۲۴ تغییر شکل محوری شمع تک

ناشی از بار جانبی برای  $L/d=30$  [۱۶]



شکل ۲-۲۷ منحنی بار-تغییر مکان گروه

شکل ۲-۲۶ بازده گروه شمع (۱\*۲ و ۲\*۲) [۱۶]

شمع (۱\*۲) برای  $L/d=30$  [۱۶]

نتایج این بررسی به طور خلاصه به شرح زیر است:

- ظرفیت باربری جانبی گروه شمع وابسته به نسبت طول به قطر، هندسه گروه شمع و چگالی ماسه است.
- نمودارهای بار جانبی - تغییر مکان غیر خطی بوده و گسیختگی جانبی در  $L/d=20$  در جابجایی سر شمع ۴ تا ۸ میلیمتر (۰.۲ و ۰.۸ قطر شمع) و برای  $L/d=30$  در ۶ تا ۱۰ میلیمتر (۰.۳ و ۰.۵ قطر شمع) اتفاق می افتد.
- مقاومت جانبی هر شمع در گروه با افزایش دهانه آزاد، افزایش می یابد. بازده گروه شمع نیز با افزایش دهانه افزایش می یابد.
- روش پیشنهادی Patra و Pise برای خاک منطقه شمالی جنوبی بنگلادش قابل اطمینان تر است.

## ۲-۶ بررسی رفتار ظرفیت باربری جانبی شمع در خاک غیر چسبنده [۱۷]

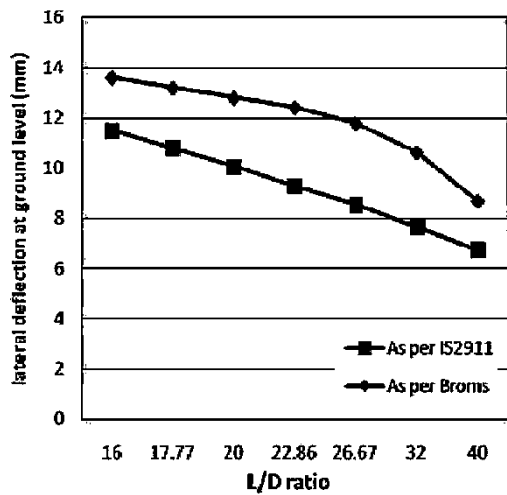
در این پژوهش رفتار شمع های تحت اثر بار جانبی با نسبت های  $L/d$  متفاوت و شرایط

گیرداری سر شمع بررسی و نتایج حاصل از آئین نامه کشور هند (IS2911) با نتایج روش Broms

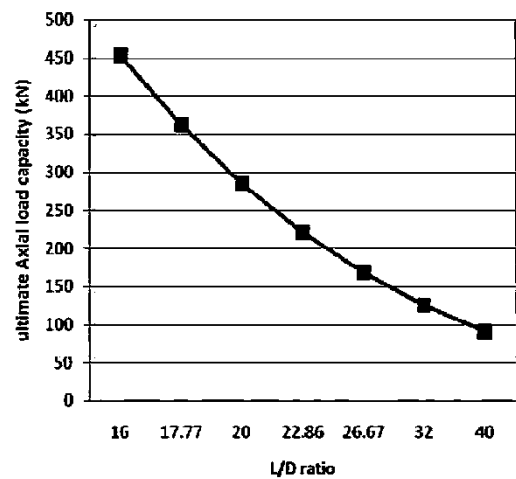
مقایسه شده است. جهت بررسی تاثیر قطر شمع به طول ۸ متر و قطرهای متفاوت ۰.۲، ۰.۳، ۰.۳۵،

۰.۴ و ۰.۵ متر در نظر گرفته شده که نشان دهنده افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع با افزایش قطر بوده است. علت این افزایش، افزوده شدن سطح مقطع و سختی شمع می باشد. ظرفیت باربری جانبی از روش IS2911 کمتر از روش Broms تخمین زده شده است.

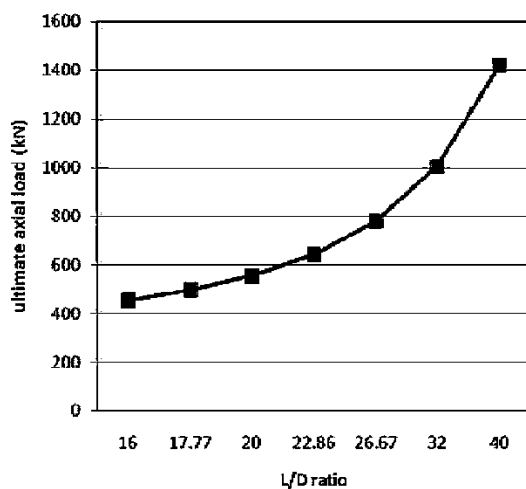
جهت بررسی تاثیر طول شمع، شمعی به قطر ۰.۵ متر و طول مختلف ۸، ۸.۹، ۱۰، ۱۱/۴، ۱۳.۳، ۱۶ و ۲۰ متر در نظر گرفته شده که تاثیر چندانی را در ظرفیت باربری جانبی نشان نمی دهد. در این حالت نیز روش IS2911 ظرفیت باربری کمتری را تخمین می زند.



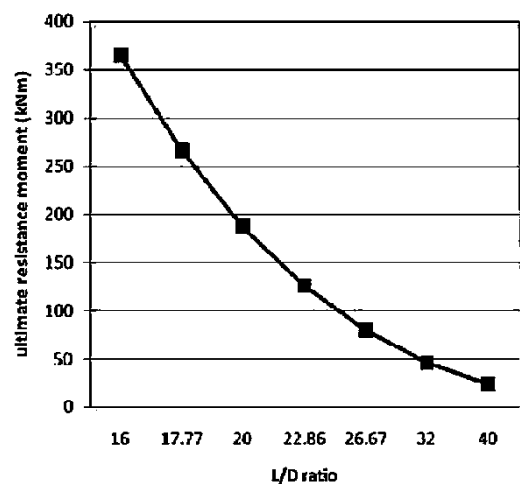
شکل ۲۸-۲ جابجایی افقی سرشمع [۱۷]



شکل ۲۹-۲ ظرفیت باربری نهایی محوری [۱۷]

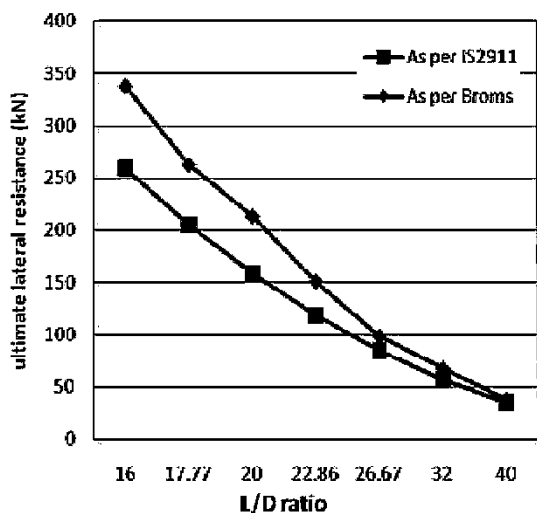


شکل ۳۰-۲ بار محوری نهایی [۱۷]

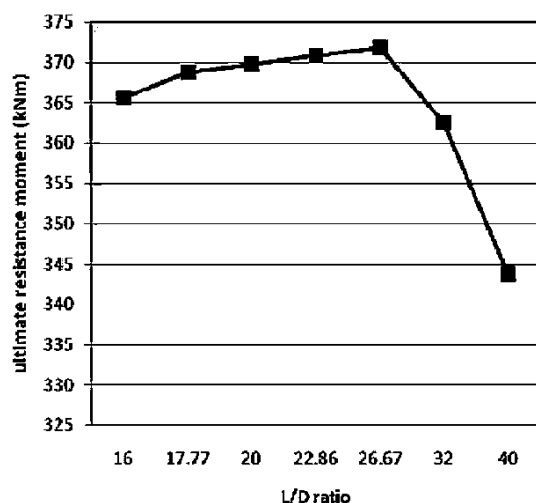


شکل ۳۱-۲ تغییرات لنگر نهایی [۱۷]





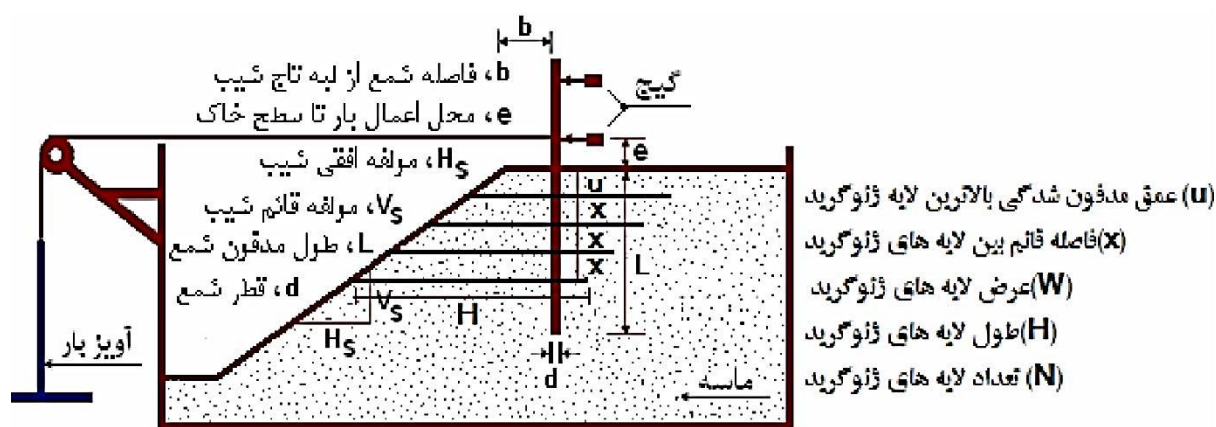
شکل ۲-۳۳ بار جانبی نهایی [۱۷]



شکل ۲-۳۲ لنگر مقاوم نهایی [۱۷]

## ۲-۷ بررسی آزمایشگاهی در مجاورت شیروانی خاکی مسلح شده [۱۸]

در این پژوهش با مطالعه مدل های کوچک مقیاس آزمایشگاهی رفتار شمع تحت اثر بار جانبی در مجاورت شیروانی تسلیح شده با ژئوگرید بررسی می شود. به طور کلی شمع ها در مجاورت بریدگی ها و شیروانی ها رفتار متفاوتی را از خود نشان می دهند. لوله های فولادی به قطر خارجی ۲۳.۶ و قطر داخلی ۱۶.۱ میلیمتر به عنوان شمع دایره ای و قوطی های مربعی به بعد داخلی ۱۷ و بعد خارجی ۲۰ میلیمتر به عنوان شمع مربعی قرار داده شده اند.



شکل ۲-۳۴ نمای مدل آزمایشگاهی [۱۸]

ماسه ی استفاده شده براساس سیستم طبقه بندی متحد، بد دانه بندی شده (SP) بوده و ژئوگریدهای دو محوره مدل Fortrac با مقاومت کششی  $35 \text{ kN/m}$  و اندازه چشمه‌های  $20 \times 20$  میلیمتر استفاده شده است.

آزمون‌ها در ۳ حالت کلی شیب تسلیم نشده، شیب تسلیم شده با آرایش مختلف لایه‌های ژئوگرید و شیب با آرایش بهینه لایه‌های ژئوگرید انجام می‌پذیرد. دو حالت اول برای بررسی تاثیر طول مدفون، اصطکاک جداره، شکل مقطع و تراکم شیب انجام شده است.

میزان بهبود باربری جانبی شمع در اثر تسلیم خاک با پارامتر بدون بعد نسبت باربری جانبی بهبود یافته (LRIR) سنجیده می‌شود. این کمیت نسبت باربری جانبی یک شمع در مجاورت شیب تسلیم شده به باربری جانبی همان شمع در شیب تسلیم نشده در یک تغییر مکان افقی خاص می‌باشد.

گفتنی است در این پژوهش ظرفیت باربری جانبی شمع از منحنی های بارجانبی - نسبت جابجایی و برای نسبت جابجایی ۲۰ درصد ( $y/d=0.2$ ) تعیین شده است.

پس از انجام آزمون‌های مذکور، جداول و نمودارهای زیر رسم و به شرح زیر تفسیر شده است.

آرایش قرارگیری لایه‌های ژئوگرید تاثیر بسزایی در میزان بهبود باربری جانبی شمع‌های مجاور شیب دارد.

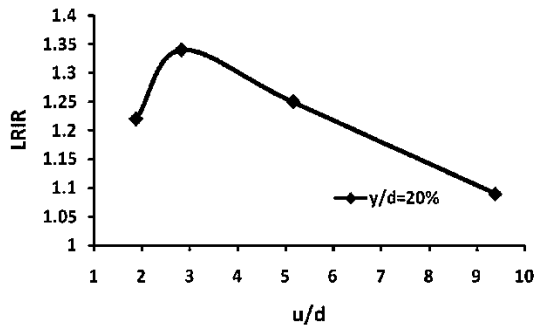
با بررسی نمودارها جهت بهینه سازی تاثیر لایه های ژئوگرید عمق مدفون شدگی  $u/d=2/82$  و فواصل قائم لایه های ژئوگرید  $u/d=1.64$  پیشنهاد می‌شود.

طول و عرض لایه های ژئوگرید بایستی کافی بوده و بهترین پیشنهاد برای آن  $H/d=31$  و  $W/d=24.6$  می‌باشد.

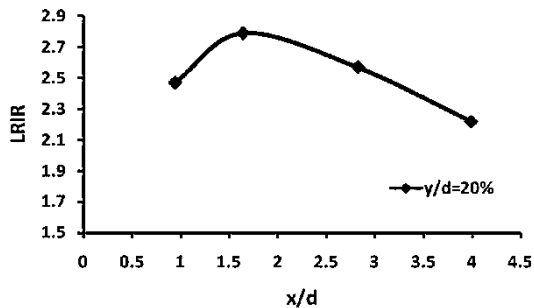
افزایش طول مدفون و فاصله شمع از لبه تاج شیب، کاهش زاویه و افزایش تراکم شیب در هر دو حالت تسلیم شده و تسلیم نشده باعث افزایش ظرفیت باربری جانبی می‌شود.

اگر فاصله شمع از لبه تاج بیش از ۷ برابر قطر شمع شود، وجود شیب تاثیری بر ظرفیت باربری شمع ندارد.

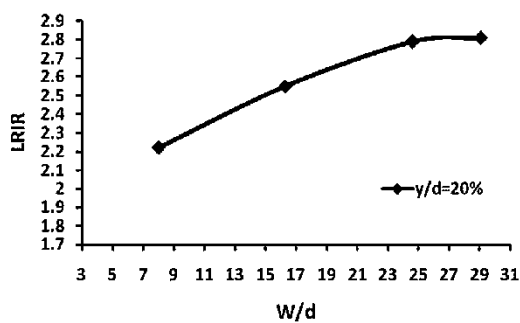
هر چه تراکم شیب ماسه‌ای بیشتر باشد، میزان بهبود باربری جانبی در اثر تسلیح با لایه های ژئوگرید بیشتر می‌شود.



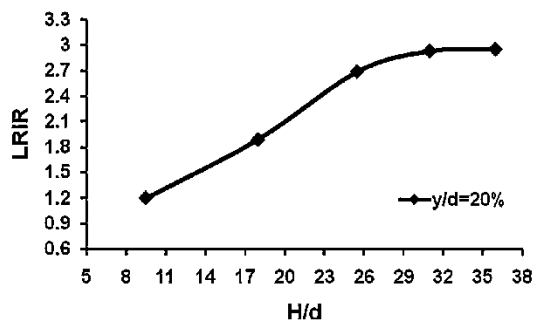
شکل ۲-۳۶ تغییرات LRIR نسبت به  $u/d$  [۱۸]



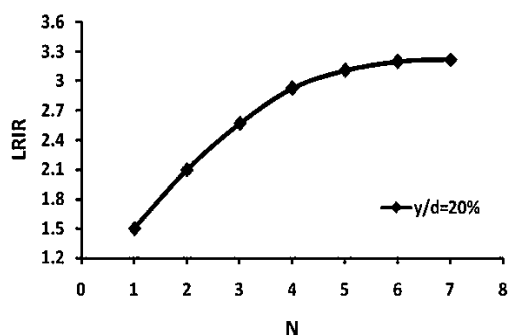
شکل ۲-۳۵ تغییرات LRIR نسبت به  $x/d$  [۱۸]



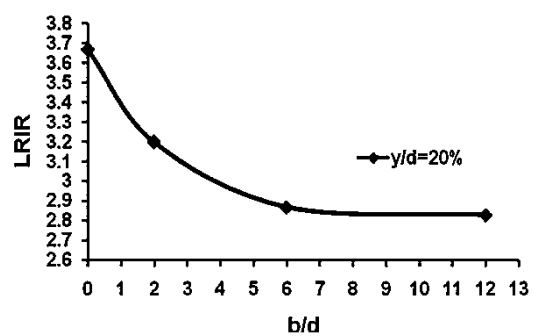
شکل ۲-۳۸ تغییرات LRIR نسبت به  $W/d$  [۱۸]



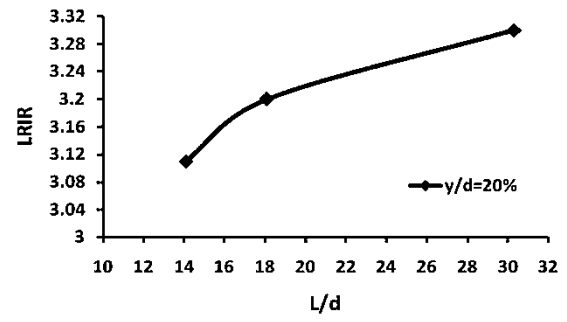
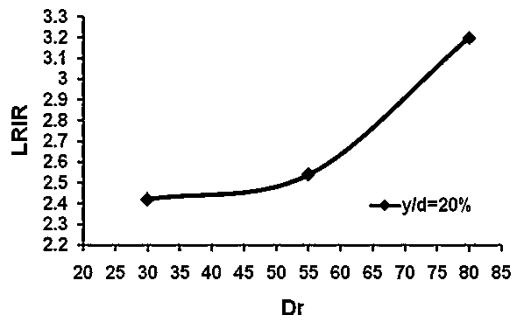
شکل ۲-۳۷ تغییرات LRIR نسبت به  $H/d$  [۱۸]



شکل ۲-۴۰ تغییرات LRIR نسبت به  $N$  [۱۸]



شکل ۲-۳۹ تغییرات LRIR نسبت به  $b/d$  [۱۸]



شکل ۲-۴۲ تغییرات LRIR نسبت به دانسیته نسبی [۱۸]

شکل ۲-۴۱ تغییرات LRIR نسبت به  $L/d$  [۱۸]

## فصل سوم

### آماده سازی تجهیزات و برنامه

### آزمایش‌ها

### ۳-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا به بیان تجهیزات و امکانات مورد نیاز برای انجام طرح آزمون‌های آزمایشگاهی جهت مدل سازی رفتار شمع تحت بار جانبی پرداخته می‌شود و سپس نکاتی پیرامون مسائل اجرایی و مدل سازی بیان خواهد شد.

### ۳-۲ سیستم و مصالح آزمایش

همانطور که پیش از این در فصل‌های گذشته ذکر شد، هدف این پژوهش بررسی رفتار شمع کوبشی در خاک ریزدانه می‌باشد. بدین منظور از چکش‌های پروکتور خاک (وزنه‌ها و غلاف‌های کوچک و بزرگ) جهت کوبیدن شمع با انرژی مورد نظر استفاده گردید، همچنین سیستم اعمال بار جانبی بصورت جک و نیروسنج طراحی و ساخته شد. لوله‌ی فولادی زنگ نزن بعنوان نماینده رفتار شمع تحت اثر بار جانبی در نظر گرفته شده است. پس از اجرای صحیح شمع، مرحله بارگذاری استاتیکی انجام و نتایج جهت بررسی و تفسیر یادداشت می‌شود. مراحل مختلف آزمایش همراه با جزئیات در ادامه شرح داده خواهد شد.

### ۳-۲-۱ تهیه خاک و مخزن نمونه خاکی

خاک مورد نظر از روستای مهدی آباد واقع در ۶۰ کیلومتری شمال شرق مشهد انتخاب گردید. (خاک مذکور مربوط به پروژه خط انتقال برق شهید هاشمی نژاد بود که در آزمایشگاه مکانیک خاک خراسان رضوی، نوع آن ریزدانه ارزیابی شده و دارای مقدار کمی چسبندگی بود). جهت انتخاب مخزن با ابعاد مناسب نیز به دلیل وجود اثرات مرزی<sup>۱۷</sup> بین خاک و شمع، هرچه ابعاد مخزن بزرگ‌تر انتخاب گردد خطای ناشی از اثرات مرزی کاهش یافته و جواب‌ها نیز دقیق‌تر می‌باشند بطوریکه حداقل نسبت قطر مخزن به قطر شمع نباید از ۲۰ کمتر باشد. [۱۹]

<sup>17</sup> Boundary Effects

به همین علت قطر مخزن ۶۰۰ میلی‌متر و قطر شمع ۲۵ میلی‌متر انتخاب گردید. ارتفاع مخزن نیز، با توجه به اینکه طول مدفون شمع ۷۰۰ میلی‌متر می‌باشد، ۹۰۰ میلی‌متر انتخاب شد. از آنجا که راستای بار، افقی می‌باشد در راستای قائم نسبتی بین ابعاد مخزن و شمع مشخص نشده است و در اکثر پژوهش‌ها، تراز کف مخزن، ۱۰۰ الی ۲۰۰ میلی‌متر پایین تر از تراز ته شمع به عنوان عمق نهایی خاک انتخاب شده است.



شکل ۱-۳ مخزن نمونه خاکی

### ۳-۲-۲ آماده سازی نمونه خاکی

جهت تهیه نمونه خاک با دانسیته ثابت در عمق، از روش نمونه سازی خشک استفاده شد. ابتدا خاک درون قالب پروکتور به صورت خشک کوبیده شده تا حداکثر دانسیته خشک به مقدار ۱.۵۱ تن بر مترمکعب بدست آمد. همین مقدار به عنوان دانسیته خاک مورد نظر انتخاب گردید. بعد از آن حجم مخزن اندازه گیری شد. مقدار ۰.۲۳۵۶ مترمکعب بدست آمد. با معلوم بودن وزن مخصوص و حجم، مقدار وزن خاک خشک که باید در مخزن گنجانده شود بدست آمد.

$$W_s = \gamma \times V = 1.51 \times 0.2356 = 0.3558 \text{ ton} = 355.8 \text{ kg}$$

برای اینکه لایه‌های خاک به صورت یکنواخت کوبیده شده و دانسیته نمونه خاک در عمق ثابت باشد، توده خاک به سه لایه تقسیم و سپس هر لایه در سه بخش داخل مخزن ریخته و کوبیده شد برای کوبیدن خاک از یک کوبه دست ساز به وزن ۶ کیلوگرم استفاده شد.

عملیات کوبش برای هر لایه تا رسیدن به سطح خاک به ارتفاع مورد نظر در مخزن که نشانه گذاری شده بود ادامه داشت. قبل از اجرای لایه بعدی سطح لایه قبل شیار زده می‌شود تا قفل و بست دو لایه صورت گیرد. سپس لایه‌های بعدی اجرا می‌شد تا در انتها سطح خاک در تراز مورد نظر برای نمونه خاک (۹۰ سانتیمتر) قرار گیرد. جهت خالی کردن مخزن خاک بعد از اتمام هر تست ابتدا مخزن توسط چند کارگر روی لاستیک‌های گذاشته شده روی زمین خوابانده می‌شد و سپس با استفاده از جرثقیل تیفور متصل شده به سقف، و سیم بکسل تعبیه شده در کف مخزن، بلند شده و واژگون می‌گشت تا خاک داخل آن بیرون بریزد.



شکل ۳-۳ خالی کردن خاک داخل مخزن توسط جرثقیل



شکل ۳-۲ کوبه دست ساز جهت تراکم نمونه خاک





شکل ۳-۴ شیار زدن سطح هر لایه بعد از کوبش قبل از ریختن لایه بعدی

### ۳-۲-۳ انجام عملیات کوبش مدل شمع

همانطور که در قبل هم اشاره شد، یکی از پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش، تأثیر انرژی کوبش می‌باشد. لذا برای کوبیدن شمع با انرژی‌های مختلف، از چکش‌های کوچک و بزرگ تراکم دستی خاک استفاده گردید. هر چکش آزمایش پروکتور دارای مشخصات ثابت شامل وزن چکش، ارتفاع سقوط می‌باشد. برای دستیابی به بعضی از انرژی‌های مورد نظر که در طراحی فابریک چکش-های مذکور نبود، به ناچار مقداری از ارتفاع غلاف یا میله چکش بریده شد.

جهت شاقول نگه داشتن شمع هنگام عملیات کوبش از دو نگه دارنده یکی در بالا و دیگری در پایین که بر روی قاب آزمایش نصب می‌شدند مطابق شکل ۳-۵ استفاده گردید. پس از نصب نگه دارنده‌ها، شمع داخل فریم قرار می‌گرفت و سپس با حصول اطمینان از شاقول بودن شمع توسط شاقول نبشی (شکل ۳-۷) عملیات کوبش شروع می‌شد. برای کوبیدن شمع از چکش‌های بزرگ یا کوچک پروکتور استفاده شد. بسته به انرژی مورد نظر، جهت اطمینان از اینکه عملیات کوبش به صورت کاملاً قائم انجام شود و در طی انجام عملیات ضربه اعمالی دچار انحراف نگردد، مطابق شکل ۳-۸ از یک کلاهک فولادی بر روی شمع استفاده شد که غلاف چکش در آن قرار می‌گرفت. یک خط

کش فلزی بر روی فریم آزمایش نصب شده بود که با استفاده از آن مقدار فرو رفت شمع داخل خاک به ازای هر ضربه از روی آن قرائت می‌گردید. معمولاً پس از اعمال ۱۵ ضربه اول، به دلیل اینکه مقدار نفوذ شمع به ازای هر ضربه بسیار کم بود، قرائت بعد از سه ضربه صورت می‌گرفت و سپس بعد از ۵ ضربه. در نهایت افزایش سیکل ضربات برای هر قرائت به اندازه‌ای بود که شمع حداقل ۱۵ میلی‌متر نفوذ کند.

شایان ذکر است برای شمع‌های ته باز، حین عملیات کوبش، مقدار نفوذ خاک داخل شمع نیز توسط یک متر فلزی باریک و انعطاف پذیر که به داخل لوله شمع به آرامی فرو برده می‌شد قرائت می‌گردید تا بتوان میزان نفوذ خاک داخل شمع بعبارتی قفل شدگی خاک<sup>۱۸</sup> را ارزیابی کرد.



شکل ۳-۵ مدل شمع به‌مراه دو نگه‌دارنده

<sup>18</sup> Soil plug



شکل ۳-۷ شاقول نبشی



شکل ۳-۶ مدل شمع ته باز و ته بسته



شکل ۳-۸ عملیات کوبش مدل شمع ۱- مدل شمع ۲- کلاهک فولادی ۳- چکش کوبش ۴- خطکش اندازه‌گیری مقدار نفوذ شمع در حین عملیات کوبش ۵- خطکش اندازه‌گیری مقدار نفوذ خاک برای شمع ته باز

نامگذاری شمع‌های ته باز به صورت OEPXX.X و ته بسته به صورت CEPXX.X بوده که XX.X معرف مقدار انرژی (ژول) می‌باشد.

مشخصات مدل شمع مطابق جدول ۱-۳ می باشد.

جدول ۱-۳ مشخصات مدل شمع

وزن (kg/m)	طول مدفون (mm)	قطر خارجی (mm)	ضخامت دیواره (mm)	مدول یانگ (GPa)
۰.۸۸۰	۷۰۰	۲۵	۱.۵	۱۹۹

### ۳-۲-۴ سیستم بارگذاری و اندازه گیری تغییر مکان

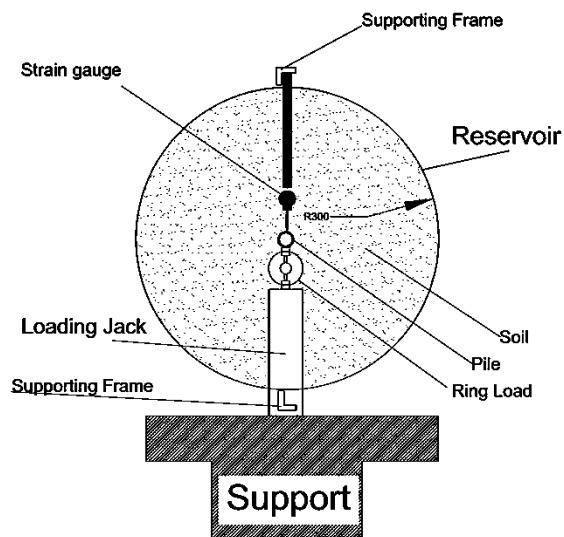
بارگذاری در این تست‌ها به صورت استاتیکی (کنترل شده) می باشد. بار جانبی توسط یک جک فنری با ظرفیت ۲ تن که بر روی فریم آزمایش نصب می شود، اعمال گردید. شکل ۳-۹. سپس جهت قرائت بار از رینگ بار<sup>۱۹</sup> با ظرفیت ۳ کیلونیوتن که یک سر آن به جک متصل می شد و بر روی سر دیگر آن سمبه‌ای قرار داشت که داخل گاه ایجاد شده روی مدل شمع قرار می گرفت. قرائت تغییر مکان جانبی نیز توسط یک کرنش سنج دیجیتالی با دقت ۰.۰۱ میلیمتر صورت می گرفت که در طرف دیگر شمع و در مقابل رینگ بار، بر روی فریم نصب می شد.



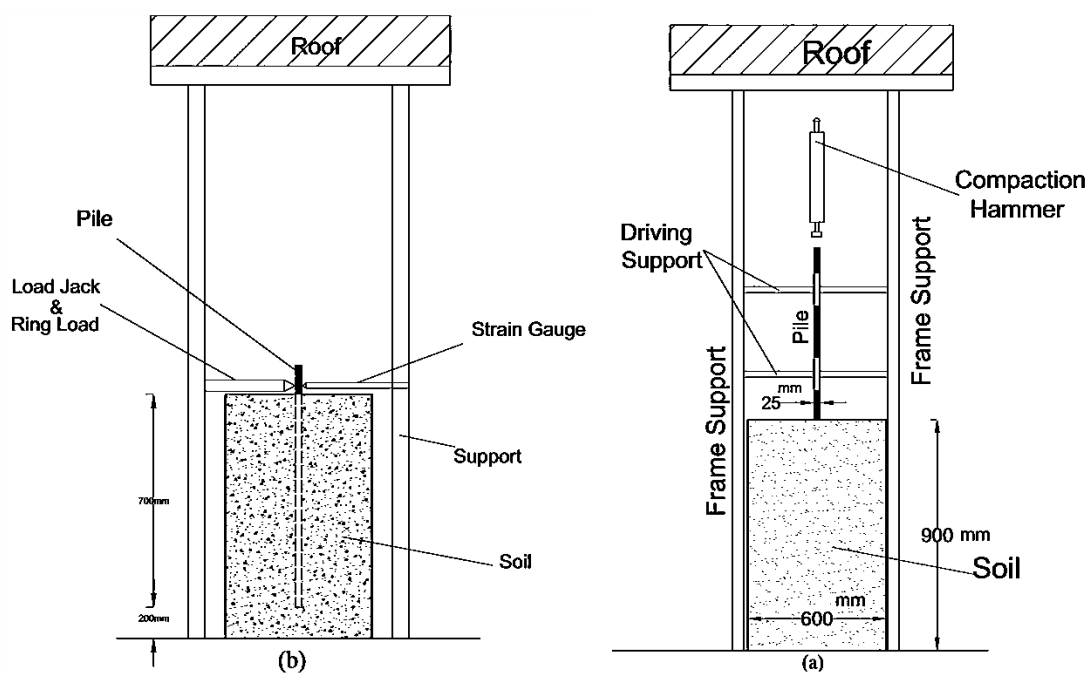
شکل ۳-۹ عملیات بارگذاری مدل شمع

<sup>19</sup> Load ring

پلان و نمای شماتیک آزمایش به ترتیب در شکل‌های ۱۰-۳ و ۱۱-۳ آمده است.



شکل ۱۰-۳ پلان شماتیک آزمایش



شکل ۱۱-۳ نمای شماتیک آزمایش (a) سیستم کوبش (b) سیستم بارگذاری

### ۳-۲-۵ اجرای آزمایش

پس از اتمام عملیات کوبش، میله‌های نگه دارنده باز می‌شدند. کرنش سنج در یک سمت و جک و رینگ بار در سمت دیگر بسته می‌شدند. با آغاز آزمایش در گام اول بار از صفر به ۴۲ نیوتن می‌رسید و جابجایی شمع برای بار مربوطه بعد از ۳۰ ثانیه مکث قرائت می‌شد. ( در تست اول که آزمایشی بود، مشخص گردید به ازای هر بار اعمالی یا به ازای هر افزایش بار، برای آنکه جابجایی شمع تقریباً متوقف گردد و شمع ثابت گردد حدود ۳۰ ثانیه زمان لازم می‌باشد.) بعد از ثبت اولین جابجایی، با به مقدار اولیه یعنی ۴۲ نیوتن زیاد می‌شد تا در مرحله دوم به ۸۴ نیوتن برسد. (نرخ افزایش بار در همه آزمایش‌ها ثابت و برابر ۴۲ نیوتن می‌باشد.) این عمل برای همه آزمایش‌ها تا بار حدود ۱۰۰۰ نیوتن ادامه داشت و در نهایت آزمایش متوقف می‌گردید.



شکل ۳-۱۲ بارگذاری جانبی مدل شمع و گسیختگی خاک

### ۳-۲-۶ آزمون‌های شناسایی خاک

جهت شناسایی مشخصات خاک و تعیین نام آن، آزمون‌های دانه بندی (هیدرومتری)، حدود آتربرگ، برش مستقیم، اندازه گیری دانه‌های خاک و وزن مخصوص خشک انجام شده است که نتایج حاصل از آن در نمودارها و جداول آتی گزارش شده است. شایان ذکر است جهت برآورد پارامترهای مقاومتی خاک ابتدا قرار بود آزمایش سه محوری اجرا گردد که به دلیل وجود چسبندگی کم در خاک، نمونه در داخل قالب آزمایش سه محوری ساخته نمی‌شد و ریزش داشت؛ در نتیجه به ناچار از آزمایش برش مستقیم استفاده شد.





## فصل چهارم

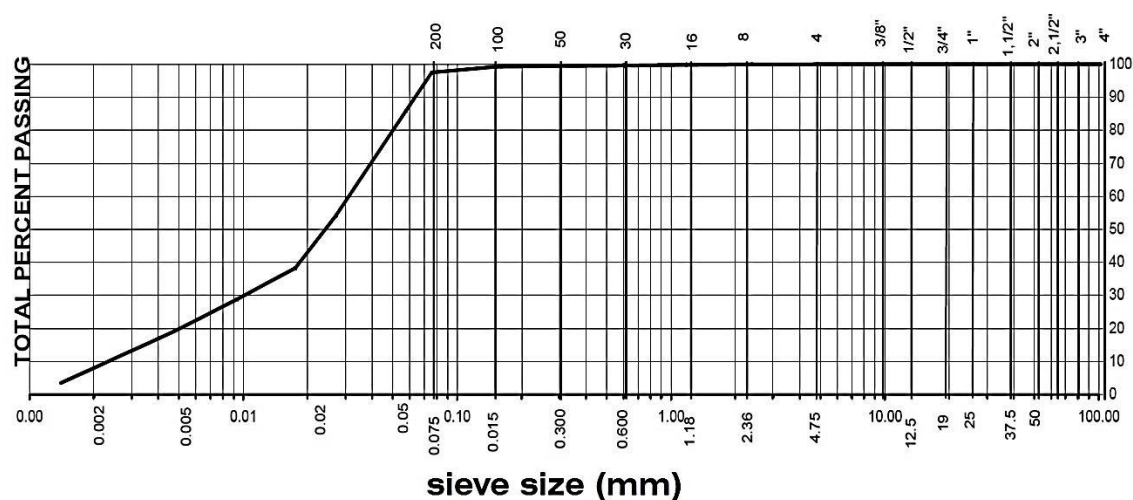
### ارائه نتایج و تحلیل آنها

## ۴-۱ مقدمه

در فصل سوم انجام آزمایشات و موارد مهم پیرامون دقت و خطاهای آن شرح داده شد. در این فصل نتایج بدست آمده از بارگذاری شمع‌ها، آزمون‌های مربوط به خاک ذکر شده و همچنین گراف‌های مربوطه ارائه خواهد شد. در نهایت از روی نمودارهای بدست آمده تأثیر انرژی و انتهای شمع به لحاظ باز یا بسته بودن بررسی می‌شود.

## ۴-۲ نتایج آزمون‌های شناسایی خاک

با انجام آزمون دانه بندی به روش خشک و همچنین تست هیدرومتری نمودار دانه بندی خاک مطابق شکل ۴-۱ بدست آمده است. با توجه به نمودار دانه بندی، بخش زیادی از دانه‌های خاک در محدوده ریزدانه می‌باشد.



شکل ۴-۱ نمودار دانه بندی

حدود اتربرگ با انجام آزمایش کاساگراند به صورت زیر بدست آمد.

$$LL = 30$$

$$PL = 20$$

$$PI_s = LL - PL = 10$$

از طرفی مقدار مربوط به گام خمیری (PI) با توجه به معادله خط A که مرز بین رس و سیلت در نمودار خمیری کاساگراند می‌باشد برابر است با:

$$PI_{LineA} = 0.73(LL - 20) = 7.3$$

در نتیجه گام خمیری خاک مورد نظر بیشتر از گام خمیری بدست آمده از معادله بالا بوده که معرف خاک رسی (C) می‌باشد.

$$PI_{LineA} < PI_s \rightarrow Clay$$

از طرفی به دلیل اینکه مقدار حد روانی کمتر از ۵۰ می‌باشد، با توجه به نمودار خمیری کاساگراند خاک مورد نظر با خاصیت خمیری پایین معرفی می‌گردد.

در نهایت بر اساس روش نامگذاری متحد، نام خاک CL بوده و نماینده خاک ریزدانه رسی با خاصیت

خمیری پایین می‌باشد. چگالی ویژه دانه‌های خاک برابر ۲.۷ بدست آمده است. با انجام تست برش

مستقیم با جعبه ۶\*۶، زاویه اصطکاک داخلی برابر ۳۵ درجه و میزان چسبندگی  $6.86 \text{ kN/m}^2$

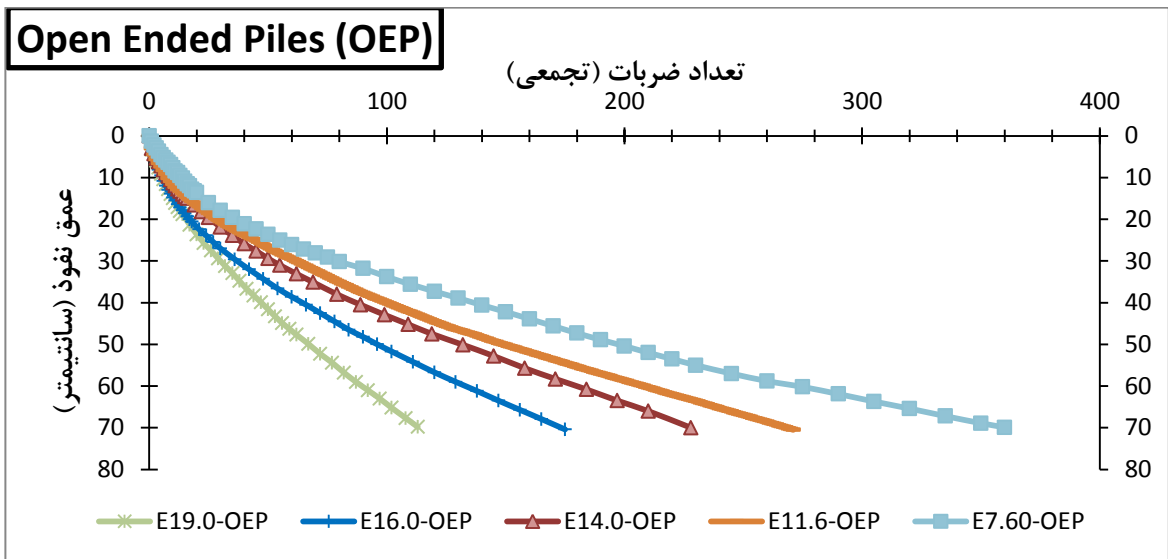
بدست آمد. وزن مخصوص نمونه خاک نیز در حالت خشک و برابر  $15.1 \text{ kN/m}^3$  در نظر گرفته شد.

## ۴-۳ بررسی قابلیت کوبش در شمع‌ها

### ۴-۳-۱ شمع ته باز

مدل شمع ته باز در ۵ رده انرژی اجرا شد و در حین کوبش مقادیر نفوذ شمع در خاک توسط

خط‌کش تعبیه شده روی فریم آزمایش ثبت گردید.

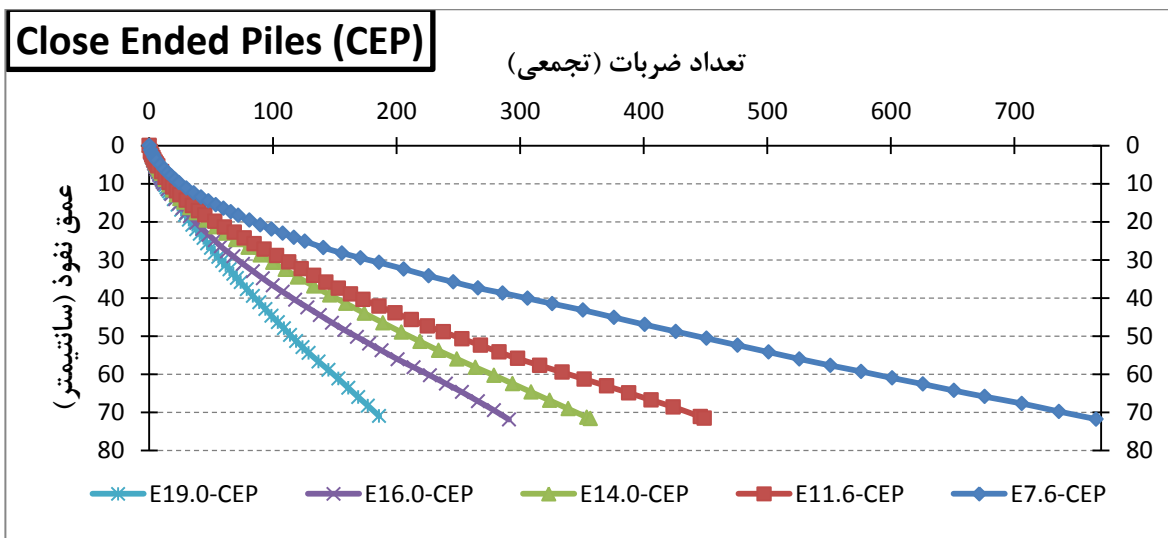


شکل ۲-۴ قابلیت کوبش مدل شمع ته باز

### ۲-۳-۴ شمع ته بسته

مدل شمع ته باز نیز در ۵ رده انرژی اجرا شد و در حین کوبش مقادیر نفوذ شمع در خاک

توسط خط کش تعبیه شده روی فریم آزمایش، ثبت گردید.



شکل ۳-۴ قابلیت کوبش مدل شمع ته بسته

در جدول ۱-۴ مقادیر تعداد کوبش برای رسیدن به عمق مورد نظر یعنی ۷۰ سانتیمتر بر اساس انرژی

کوبش برای شمع ته باز و ته بسته آورده شده است.

جدول ۴-۱ تعداد ضربات کوبش لازم جهت رسیدن به عمق مورد نظر (۷۰۰ میلیمتر)

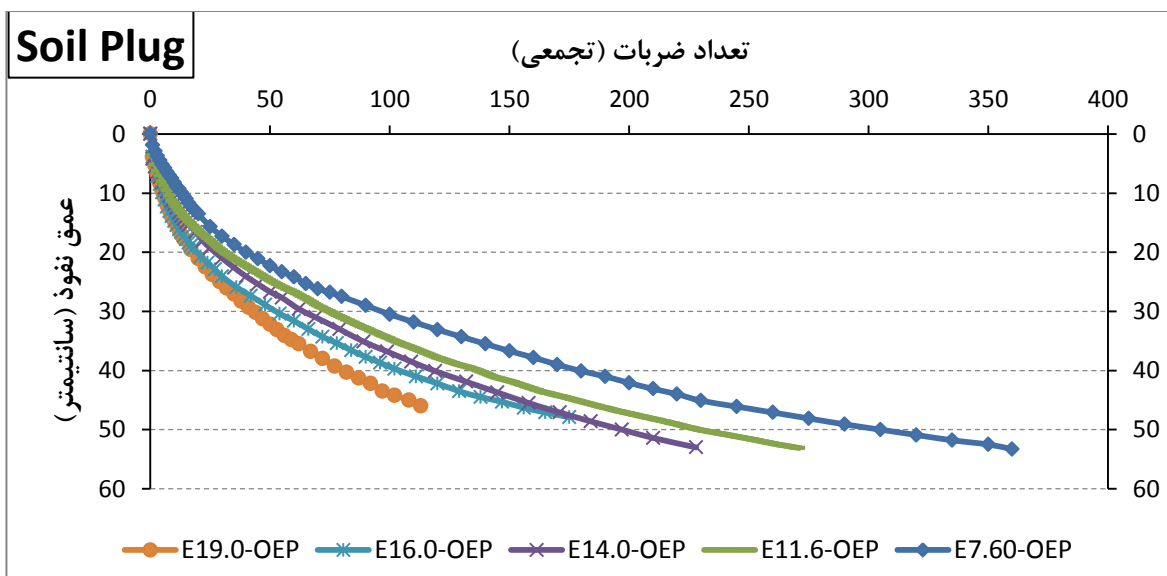
درصد افزایش تعداد ضربات شمع ته بسته نسبت به شمع ته باز	تعداد ضربات لازم برای رسیدن به عمق مورد نظر		انرژی (ژول)
	شمع ته بسته CEP	شمع ته باز OEP	
۱۱۲.۸	۷۶۶	۳۶۰	۷.۶
۶۵.۷	۴۴۹	۲۷۱	۱۱.۶
۵۶.۶	۳۵۷	۲۲۸	۱۴.۰
۶۶.۳	۲۹۱	۱۷۵	۱۶.۰
۶۴.۶	۱۸۶	۱۱۳	۱۹.۰

#### ۴-۴ بررسی قفل شدگی خاک در شمع ته باز

بررسی قفل شدگی خاک داخل مدل شمع فقط برای شمع‌های ته باز انجام می‌گیرد. برای این

کار یک خط کش فلزی باریک و انعطاف‌پذیر پس از هر کوبش با آرامی داخل مدل شمع فرو برده و

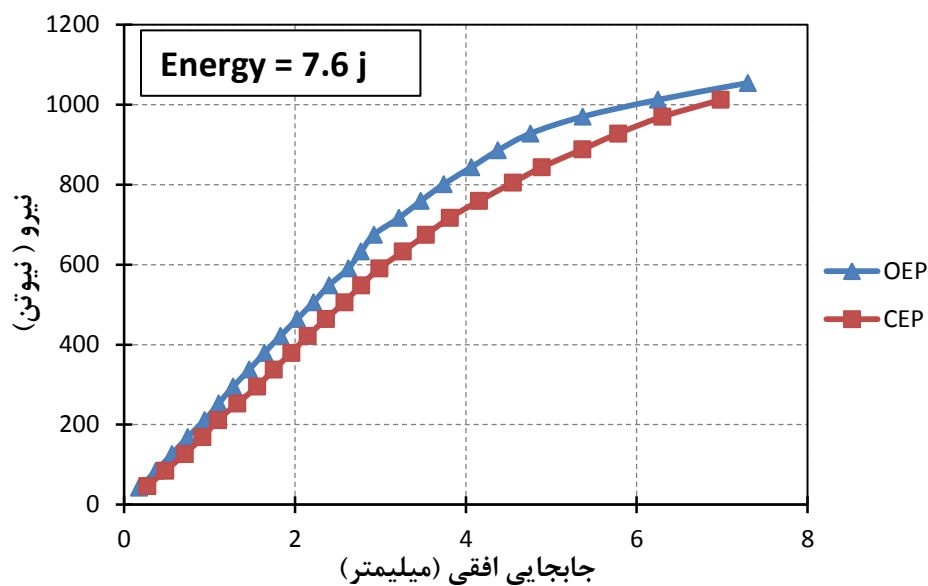
میزان نفوذ خاک داخل شمع اندازه گیری شد.



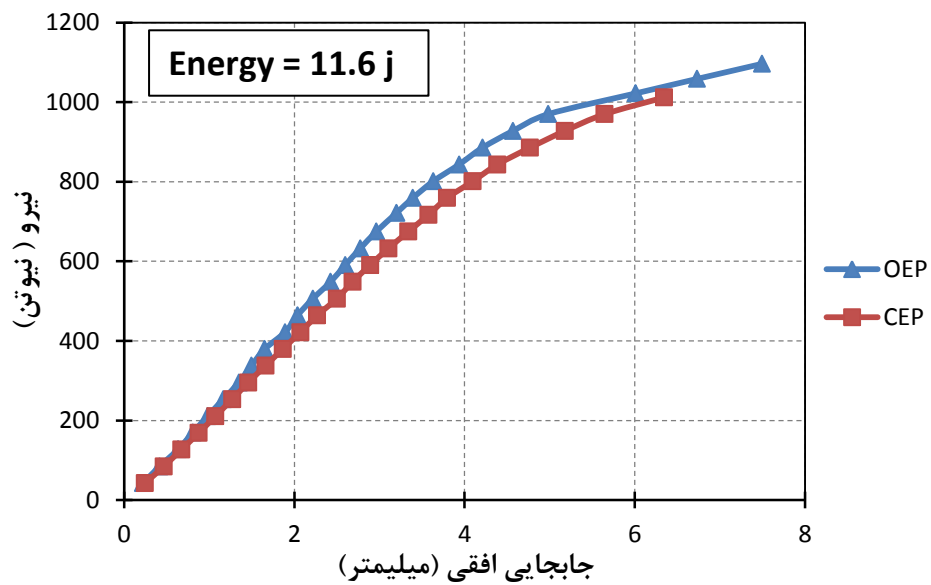
شکل ۴-۴ قفل شدگی خاک داخل مدل شمع

## ۴-۵ نتایج بارگذاری جانبی مدل شمع

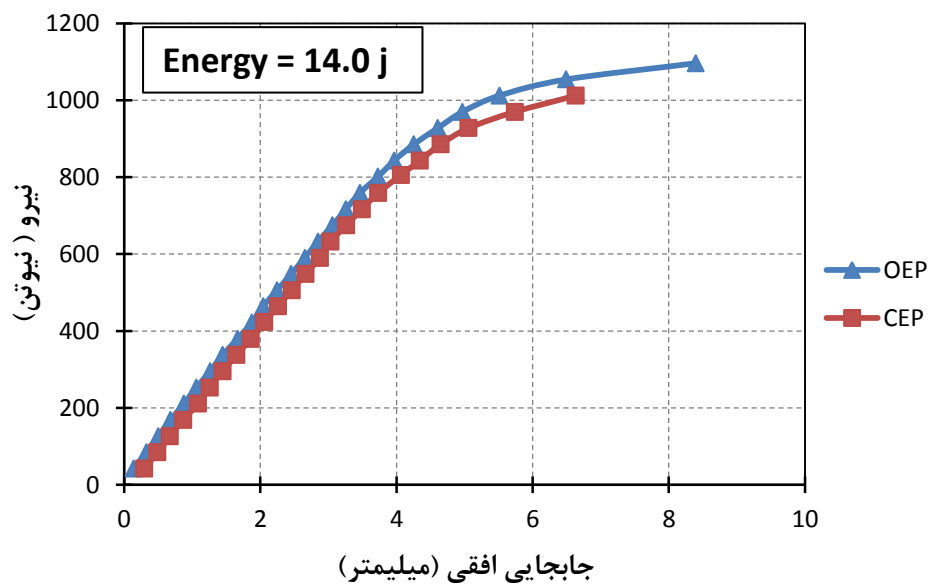
تغییر مکان شمع در ارتفاع ۳۰ میلیمتر از سطح خاک اندازه گیری شده است که با توجه به امکانات اندازه گیری تغییر مکان، نزدیک ترین فاصله به سطح خاک می باشد. در ادامه گراف های مربوطه ارائه می گردد و سپس در قسمت های ۴-۷ و ۴-۸ مقادیر عددی حاصل از گراف ها بصورت جدول ارائه شده است.



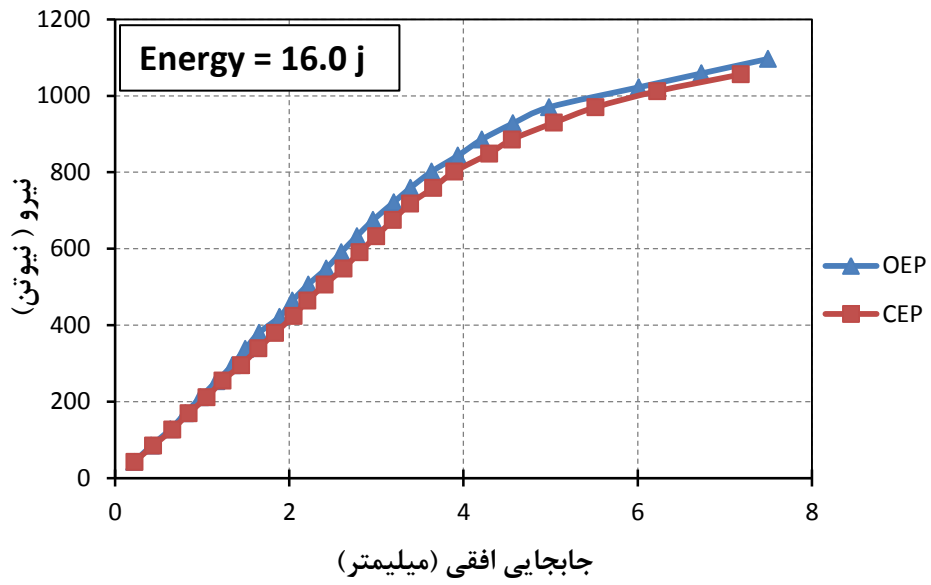
شکل ۴-۵ شمع ته باز و ته بسته کوبیده شده با انرژی ۷.۶ ژول



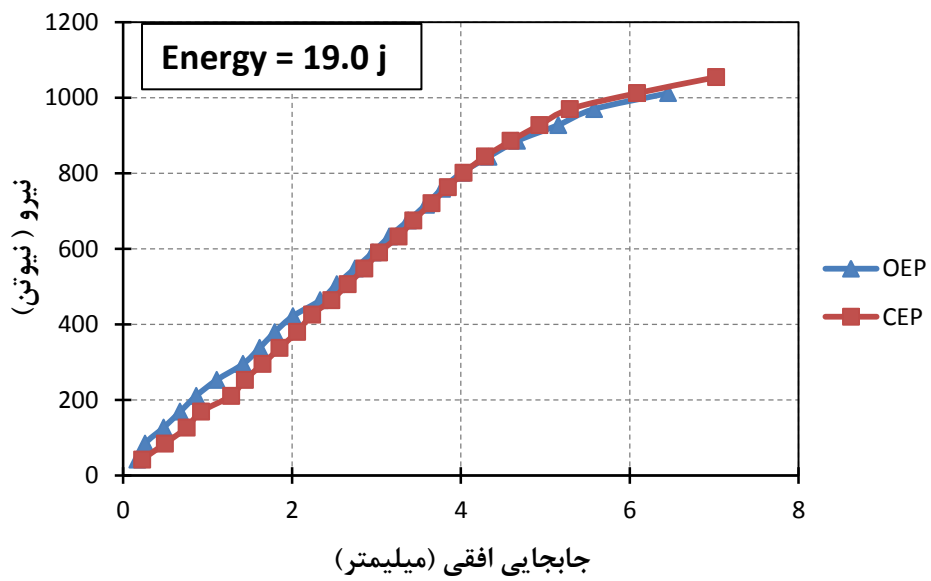
شکل ۴-۶ شمع ته باز و ته بسته کوبیده شده با انرژی ۱۱.۶ ژول



شکل ۴-۷ شمع ته باز و ته بسته کوبیده شده با انرژی ۱۴.۰ ژول



شکل ۴-۸ شمع ته باز و ته بسته کوبیده شده با انرژی ۱۶.۰ ژول



شکل ۴-۹ شمع ته باز و ته بسته کوبیده شده با انرژی ۱۹.۰ ژول



#### ۴ - ۶ بررسی عدم خم شدن میله اعمال بار

از آنجا که محل اعمال بار جانبی به فاصله ۳۰ میلیمتر از سطح خاک بود، احتمال ایجاد خم شدگی در اثر بار جانبی در مدل شمع وجود داشت که در صورت بروز آن، اعداد گزارش شده را نمی-توان به رفتار شمع نسبت داد. لذا بعد از هر آزمون، مدل شمع از لحاظ خمیدگی ناشی از بار جانبی به طور کامل بررسی می‌شد. شایان ذکر است مقدار ۳۰ میلیمتر مذکور در بالای سطح خاک باعث ایجاد یک لنگر ناچیز می‌گردد که با توجه به طول مدفون شمع (۷۰۰ میلیمتر) قابل اغماض می‌باشد.

## ۴-۷ تأثیر انرژی کوبش بر ظرفیت باربری جانبی

جدول ۴-۲ تأثیر انرژی کوبش بر ظرفیت باربری جانبی شمع ته باز

درصد کاهش / افزایش جابجایی	جابجایی ثبت شده (mm)	بار جانبی اعمالی (kN)	شمع
	۰.۸۹۰	۰.۲	E7.6-OEP E11.6-OEP E14.0-OEP E16.0-OEP E19.0-OEP
-۴.۰۴	۰.۸۵۴		
-۶.۹۷	۰.۸۲۸		
۵.۰۶	۰.۹۳۵		
-۸.۲۰	۰.۸۱۷		
	۲.۲۰۲	۰.۵	
۳.۵۰	۲.۲۷۹		
۰.۶۸	۲.۲۱۷		
-۰.۵۰	۲.۱۹۱		
۱۳.۷۱	۲.۵۰۴		
	۵.۹۹۷	۱	
-۱۱.۱۹	۵.۳۲۶		
-۱۰.۶۹	۵.۳۵۶		
-۷.۰۴	۵.۵۷۵		
۳.۴۹	۶.۲۰۶		

جدول ۳-۴ تأثیر انرژی کوبش بر ظرفیت باربری جانبی شمع ته بسته

شمع	بار جانبی اعمالی (kN)	جابجایی ثبت شده (mm)	درصد کاهش / افزایش جابجایی
	۰.۲	۱.۰۵۲	
		۱.۰۲۲	-۲.۸۵
		۱.۰۲۷	-۲.۳۸
		۰.۹۹۵	-۵.۴۲
		۱.۱۸۷	۱۲.۸۳
E7.6-CEP E11.6- CEP E14.0- CEP E16.0- CEP E19.0- CEP	۰.۵	۲.۵۴۷	
		۲.۴۶۶	-۳.۱۸
		۲.۴۳۳	-۴.۴۸
		۲.۳۷۸	-۶.۶۴
		۲.۶۳۳	۳.۳۸
	۱	۶.۷۸۸	
		۶.۱۴۵	-۹.۴۷
		۶.۳۷۸	-۶.۰۴
		۶.۰۲۱	-۱۱.۳۰
		۵.۸۶۰	-۱۳.۶۷

## ۴ - ۸ تأثیر انتهای شمع بر ظرفیت باربری جانبی

جدول ۴-۴ تأثیر وضعیت انتهای شمع (ته باز یا ته بسته) بر ظرفیت باربری جانبی شمع

درصد کاهش / افزایش جابجایی (نسبت به شمع ته بسته)	جابجایی ثبت شده (mm)		بار جانبی اعمالی (kN)	انرژی (ژول)
	شمع ته بسته (CEP)	شمع ته باز (OEP)		
۱۸.۲۰	۱.۰۵۲	۰.۸۹	۰.۲	۷.۶
۱۵.۶۷	۲.۵۴۷	۲.۲۰۲	۰.۵	
۱۳.۱۹	۶.۷۸۸	۵.۹۹۷	۱	
۱۹.۶۷	۱.۰۲۲	۰.۸۵۴	۰.۲	۱۱.۶
۸.۲۱	۲.۴۶۶	۲.۲۷۹	۰.۵	
۱۵.۳۸	۶.۱۴۵	۵.۳۲۶	۱	
۲۴.۰۳	۱.۰۲۷	۰.۸۲۸	۰.۲	۱۴.۰
۹.۷۴	۲.۴۳۳	۲.۲۱۷	۰.۵	
۱۹.۰۸	۶.۳۷۸	۵.۳۵۶	۱	
۶.۴۲	۰.۹۹۵	۰.۹۳۵	۰.۲	۱۶.۰
۸.۵۳	۲.۳۷۸	۲.۱۹۱	۰.۵	
۸.۰۰	۶.۰۲۱	۵.۵۷۵	۱	
۴۵.۲۹	۱.۱۸۷	۰.۸۱۷	۰.۲	۱۹.۰
۵.۱۵	۲.۶۳۳	۲.۵۰۴	۰.۵	
-۵.۵۸	۵.۸۶۰	۶.۲۰۶	۱	

## ۴ - ۹ بررسی الگوی ظرفیت باربری نهایی

جهت برآورد ظرفیت باربری نهایی شمع تحت بار جانبی فرض‌های مختلفی توسط محققان در

نظر گرفته شده است. این فرض‌ها عموماً بر پایه تغییر مکان جانبی سرشمع یا چرخش شمع می‌باشد. [۲۰] در پژوهش‌های مذکور عموماً بار متناظر با تغییر مکان سر شمع معادل با ۲۰٪ قطر شمع به

عنوان ظرفیت باربری جانبی شمع پیشنهاد شده است. [۶] و [۲۱]

ظرفیت باربری جانبی بدست آمده از تئوری‌های مورد بحث در فصل دوم برای مدل شمع در

جدول ۴-۵ آورده شده است. در این پژوهش مقدار جابجایی ۲۰ درصد بعد شمع، به عنوان نقطه

معرف ظرفیت باربری جانبی نهایی مدل شمع در نظر گرفته شده و با کمک نرم افزار GetData

Graphic Digitizer مقادیر مربوطه از نمودارهای شکل ۴-۵ تا شکل ۴-۹ استخراج شده‌اند.

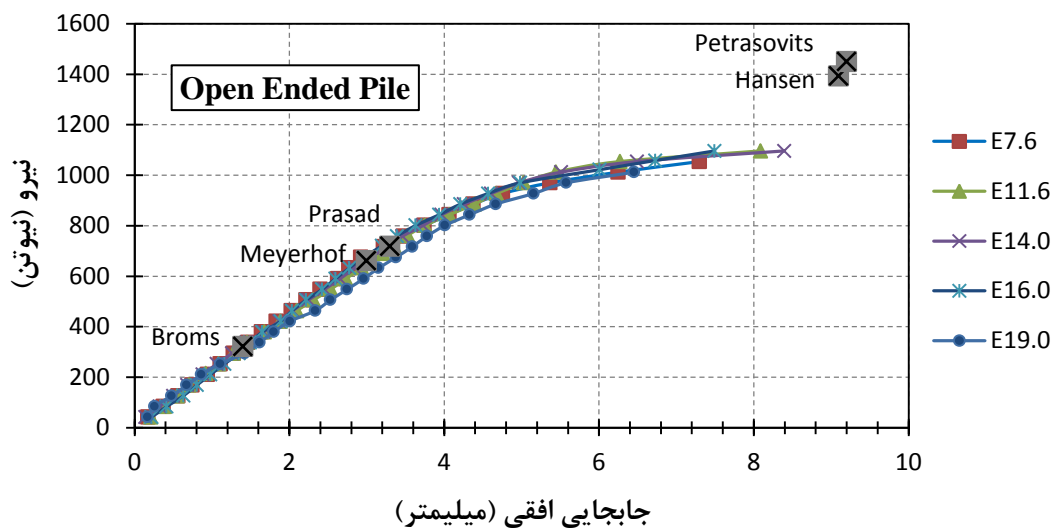
جدول ۴-۵ مقایسه ظرفیت باربری بدست آمده از روش‌های تئوری با اعداد این پژوهش

ظرفیت باربری N					
$\phi = 35^\circ, \gamma = 1.51 \text{ KN/m}^3, e = 60\text{mm}, D = 25\text{mm}, L = 700\text{mm}$					
Theoretical Method	Brinch Hansen [2]	Broms [6,21]	Petrasovits [8]	Meyerhof [7,14]	Prasad & Chari [9]
	۱۳۹۳	۳۲۰.۷	۱۴۵۰	۶۶۰.۶	۷۱۷.۹
Test No.	E7.6-OEP	E7.6-CEP	E11.6-OEP	E11.6-CEP	E14.0-OEP
(20%Diameter)	۹۴۸.۳	۸۵۳.۵	۹۷۰.۲	۹۰۸.۲	۹۷۳.۹
Test No.	E14.0-CEP	E16.0-OEP	E16.0-CEP	E19.0-OEP	E19.0-CEP
(20%Diameter)	۹۲۲.۸	۹۷۰.۲	۹۲۶.۴	۹۱۶.۸	۹۳۸.۱

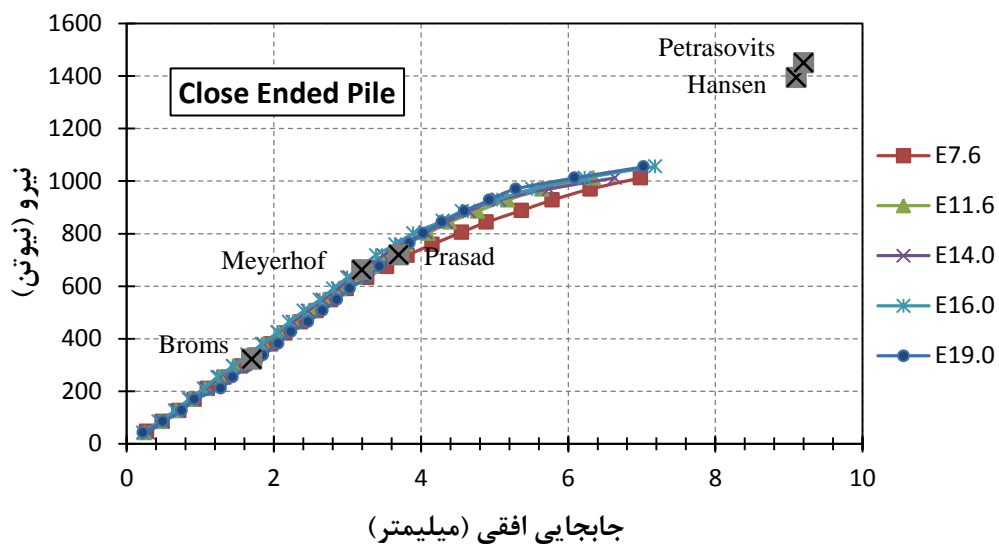
برای مقایسه و درک بهتر نتایج آزمایش، اعداد بدست آمده از تئوری‌های مذکور بر روی

نمودارهای بار تغییر مکان نشان داده شده است. شکل‌های ۴-۱۰ و ۴-۱۱. شایان ذکر می‌باشد که این

تئوری‌ها مقدار تغییر مکان متناظر با ظرفیت باربری جانبی را پیش بینی نمی‌کنند. [۲۲]



شکل ۴-۱۰ مقایسه ظرفیت باربری بدست آمده از روش‌های تئوری با اعداد این پژوهش برای شمع ته باز



شکل ۴-۱۱ مقایسه ظرفیت باربری بدست آمده از روش‌های تئوری با اعداد این پژوهش برای شمع ته بسته

## فصل پنجم

### نتیجه گیری و پیشنهادها

آزمایش‌ها بر روی مدل‌های آزمایشگاهی کوچک مقیاس در مخزن خاک و در گرانش (1g) نمی‌توانند به طور کامل شرایط واقعی و محلی را شبیه‌سازی کنند؛ زیرا اولاً شرایط شبیه‌سازی تنش-ها میسر نبوده ثانیاً وجود یک مخزن با حجم محدود، تأثیرات مرزی را به همراه خواهد داشت. خاطر نشان می‌گردد ایرادها و مشکلات مربوط به انجام آزمایش برای مدل‌های با تنش همه‌جانبه پایین زمانی پدیدار می‌شود که محقق قصد دارد نتایج را بدون استفاده از مباحث تئوری به مقیاس واقعی تبدیل کند. با این حال، به علت گسترش مدل‌های با اجزای تشکیل دهنده واقعی، امروزه اعتبار سنجی نتایج حاصل از آزمایش‌های تئوری و آزمون‌های آزمایشگاهی (از قبیل تحقیق حاضر) امکان پذیر شده است؛ به عبارتی می‌توان از نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی مدل شمع برای اعتبار سنجی تحقیق‌های عددی و تئوری استفاده کرد. [۱]

در این پژوهش بررسی رفتار شمع تک تحت اثر بار جانبی مد نظر بوده و آزمایشی طراحی گردیده که در آن مدل شمع فلزی در نمونه خاک یکبار به صورت ته بسته و یکبار به صورت ته باز با انرژی‌های مختلف کوبیده و سپس بارگذاری گردید. شرایط خاک در حالت خشک بوده است. آزمون-های طبقه بندی حاکی از آن است که خاک مورد استفاده سیلت رس دار با خاصیت خمیری پایین و چسبندگی کم و با وزن مخصوص  $15.1 \text{ kN/m}^3$  بوده است. شایان ذکر است اکثر منابع علمی قدیمی و جدید و روش‌های تئوری که به موضوع ظرفیت باربری جانبی شمع پرداخته‌اند، از خاک صرفاً دانه‌ای (بدون چسبندگی) و یا خاک صرفاً چسبنده به عنوان نمونه حاکی استفاده کرده‌اند؛ در نتیجه روابط حاصله نیز برای خاک‌های صرفاً چسبنده یا صرفاً دانه‌ای بدست آمده‌اند. لذا وجود مقدار کمی چسبندگی در خاک مورد استفاده در این پژوهش، ممکن است سبب ایجاد اندکی خطا در نتایج حاصله شده باشد.

نتایج قابل دریافت از این پژوهش به شرح زیر است:

- بررسی تأثیر باز یا بسته بودن انتهای شمع بر قابلیت کوبش شمع



- بررسی قفل شدگی خاک در داخل شمع ته باز
  - بررسی تأثیر انرژی کوبش بر ظرفیت باربری جانبی شمع
  - بررسی تأثیر باز یا بسته بودن انتهای شمع بر ظرفیت باربری جانبی شمع
- در این فصل با بررسی نمودارهای بدست آمده نتایجی پیرامون رفتار مدل شمع گزارش می‌شود و پیشنهادهائی جهت ادامه این پژوهش برای سایر پژوهشگران ارائه خواهد شد.

## ۵-۲ نتیجه‌گیری

- در رده انرژی‌های پایین قابلیت کوبش شمع ته باز حدود ۱۰۰٪ و در رده انرژی‌های بالا حدود ۶۰٪ بیشتر از شمع ته بسته می‌باشد بعبارتی هرچه انرژی کوبش بیشتر می‌شود، افزایش قابلیت کوبش، کاهش می‌یابد. (شکل‌های ۲-۴ و ۳-۴، جدول ۱-۴)
  - برای یک انرژی کوبش ثابت، ظرفیت باربری جانبی شمع ته باز همواره از شمع ته بسته بیشتر می‌باشد. (شکل‌های ۵-۴ تا ۹-۴، جدول ۴-۴)
- با توجه به اینکه تراکم نسبی برای خاک مورد استفاده در این تحقیق بالا بود (۸۳٪) شمع ته بسته با تعداد ضربات بیشتری به عمق مورد نظر رسید؛ در نتیجه در مقایسه با شمع ته باز، خاک اطراف شمع ته بسته از حالت متراکم خارج شده و کاهش تراکم خاک باعث کاهش ظرفیت باربری جانبی مدل شمع ته بسته گردید.
- هرچه انرژی کوبش بیشتر باشد، میزان نفوذ خاک داخل شمع کمتر شده و قفل شدگی خاک داخل شمع دیرتر اتفاق می‌افتد. (شکل ۴-۴)
  - برای هر دو مدل شمع ته باز و ته بسته تأثیر انرژی کوبش بر ظرفیت باربری جانبی بسیار کم می‌باشد؛ اما می‌توان گفت در نیروهای کم تأثیر فوق‌الگوی مشخصی نداشته، درحالی‌که در نیروهای زیاد ( ناحیه نزدیک به گسیختگی) با افزایش انرژی کوبش، ظرفیت باربری جانبی اندکی افزایش می‌یابد. (جدول ۲-۴ و ۳-۴)

- بیشترین ظرفیت باربری جانبی مدل شمع در میان تئوری‌های مورد بحث، از روش Hansen و Petrasovits بدست می‌آید که با توجه به جابجایی افقی زیاد شمع، نامطلوب است. (جدول ۴-۵)
- به نظر می‌رسد روش پراساد برای تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع‌های کوتاه مناسب‌ترین روش می‌باشد. این روش علاوه بر اینکه ضریب اطمینان بالاتری به لحاظ جابجایی افقی کمتر نسبت به بقیه روش‌ها دارا است، روش محاسباتی ساده‌تری دارد. (شکل‌های ۴-۱۰ و ۴-۱۱)
- مجموعاً استفاده از شمع ته باز نسبت به شمع ته بسته توصیه می‌گردد؛ چرا که هم قابلیت کوبش بالایی دارد و هم ظرفیت باربری جانبی بیشتری را دارا می‌باشد.
- در شرایطی که نشست نواحی اطراف شمع مهم می‌باشد، توصیه می‌گردد از شمع ته باز استفاده گردد به شرطی که ملاحظات قفل شدگی خاک کنترل گردد.
- در شرایطی که کنترل یا رفع قفل شدگی در محل به راحتی امکان پذیر نیست، توصیه می‌گردد شمع با انرژی زیاد کوبیده شود تا قفل شدگی به تعویق بیفتد.

### ۵ - ۳ پیشنهادها

- موارد زیر برخی از پیشنهادها کاربردی برای سایر پژوهشگران علاقه‌مند می‌باشد که در این تحقیق به دلیل محدودیت‌های مالی و ابزاری میسر نشده است و انجام آن‌ها به تکمیل مبحث ظرفیت باربری جانبی ارائه شده در این پژوهش کمک خواهد کرد.
- انجام تست بر روی شمع‌های بزرگ مقیاس و تطبیق و تفسیر نتایج آن با نتایج این پژوهش
  - انجام مدل سازی عددی و مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج این پژوهش
  - انجام همین طرح توسط آزمایش سانتریفیوژ و مقایسه نتایج
  - انجام این آزمایش بر روی شمع‌های با نسبت طول به قطر مختلف

- انجام این آزمایش در خاک کاملاً چسبنده و در حالت اشباع
- انجام این آزمایش در حضور سرباره‌های مختلف بر روی شمع و بررسی اثر نیروی قائم بر ظرفیت باربری جانبی شمع تک (ترکیب نیروی قائم و نیروی افقی)
- اثر کوبش شمع‌های مجاور هم بر ظرفیت باربری جانبی یکدیگر



# منابع

[1] Lee, J., Prezzi, M., and Salgado, R. "Experimental Investigation of the Combined Load Response of Model Piles Driven in Sand," *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 34, No. 6, 2011, pp. 1-15.

[۲] علمی. ف. (۱۳۷۷) "بررسی ظرفیت باربری جانبی شمع"، مرکز تحقیقات آموزش راه و ترابری

[3] Tomlinson, M. and J. Woodward, *Pile Design and Construction Practice*, 4<sup>th</sup> Edition. Taylor & Francis, 1993.

[4] Padmavathi, V., Saibaba Reddy, E. and Madhav, M.R. (2007). "Analysis of Laterally Loaded Rigid Piles in Sands based on Kinematics and Non-linear Sub-grade Response", *Indian Geotechnical Journal*, Vol. 37(3): 190-209.

[5] Prakash, S. and H. D. Sharma, *Pile Foundations in Engineering Practice*. Wiley, 1990.

[6] Broms, B. (1964), "The lateral resistance of piles in cohesive soils", *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, Vol. 90, No. SM3, pp. 123-156, 1964b.

[7] Meyerhof, G. G., and Ranjan, G., (1972), "The bearing capacity of rigid piles under inclined loads in sands", *Can. Geotech.J.*, Vol. 9, pp. 430-446.

[8] Petrasovits, G. and Award, A., (1972), "Ultimate lateral resistance of a rigid pile in cohesionless soil", *Proc., 5<sup>th</sup> European Conf. on SMFE, Madrid*, Vol. 3, pp. 407-712.

[9] Prasad, V.S.N., and Chari, T.R., (1999), "Lateral capacity of model rigid piles in cohesionless soils", *Japanese Geotechnical Society*, Vol. 39, No. 2, pp. 21-29

[10] M.T. Davisson, H.L. Gill (1963), "Laterally loaded piles in a layered soil system", *J. Soil Mech. Mech. Div., ASCE* 89 (SM3) 63-94.

[11] Reese, L. C., & Matlock, H. (1956), "Non-dimensional solutions for laterally-loaded piles with soil modulus assumed proportional to depth", Dallas, Tex, Association of Drilled Shaft Contractors.

[12] B. M. Das, *Principles of Foundation Engineering: CL-Engineering*, 2010.

[13] Poulos, H. G., (1971), "Behavior of laterally loaded piles: I-single piles", *Journal of the soil mechanics and foundations division*, vol. 97, pp. 711-731.

[14] Meyerhof, G. G., (1995), "Behavior of pile foundations under special loading conditions", *Can. Geotech.J.*, Vol. 32, pp. 204-222.

[15] Patra, N. R. and Pise, P. J., (2001) "Ultimate lateral resistance of pile groups sand", *Geotechnical and geo-environmental engineering Journal*, Vol. 127, pp. 481-487.

[16] Rahman, M. M., Alim, M. A., and Chowdhury, M. A. S. (2003), "Investigation of lateral load resistance of laterally loaded pile in sandy soil". *4th International Conference on Bored and Auger Piles, BAPIV*, Ghent, Belgium, pp. 209-215.

[17] Murugan M, Natarajan C, Muthukkumaran K., (2011), "Behavior of laterally loaded piles in cohesionless soils", *International journal of earth science and engineering*, Vol. 4, No. 6, pp. 104-106.

[۱۸] زمردیان، م.، صادقی، ح.، (۱۳۸۹) "رفتار شمع تحت اثر بار جانبی در مجاورت شیروانی خاکی مسلح شده با عناصر تسلیح ژئوسنتتیک"، پنجمین کنگره ملی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

- [19] Baziar, M.H .and Ziaie-Moayed, R., 2006,"Evaluation of Cone Penetration Resistance in Loose Silty Sand Using Calibration Chamber", *International Journal of Civil Engineering*, No.2, Vol.4
- [20] Hu, Z., McVay, M., Bloomquist, D., Herrera, R. and Lai, P. (2006). "Influence of torque on lateral capacity of drilled shafts in sands", *Journal of Geotechnica and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 4, pp. 456-464.
- [21] Broms, B. (1964), "The lateral resistance of piles in cohesive soils", J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 90, No. SM2, pp. 27-63, 1964a.
- [22] Bolouri.B,J. Keshavarz, J., 2015, "Evaluation of short piles bearing capacity subjected to lateral loading in sandy soil", *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol.2, pp. 152-156.





## **Abstract**

All structures must be constructed on a reliable surface and have reasonable settlements. Obviously the ground is not firm enough to endure massive loads and the solution is to use foundations in order to reduce soil settlements. Although the main purpose of using pile foundations is to endure vertical loads, but almost every pile is subjected to lateral loads and bending moments too. In some cases lateral load is negligible, but in structures such as offshore platforms the lateral load is dominant. So any failing in design will cause serious damages. In this research we present the results of model pile load tests performed to assess the influence of driving energy and the pile tip on the lateral response of piles driven in a fine grained dense soil. Using a drop hammer, a circular model pile was driven into large-scale soil samples prepared in a cylindrical steel tank with constant density using dry compaction method. Lateral load tests were performed on the model pile. The results showed that drivability of open-ended pile is at least 60% more than closed-ended pile, Although the influence of driving energy for a single pile is negligible, the lateral capacity of open-ended pile is more than closed-ended pile.

**Keywords:** model pile, stainless steel pipe, lateral load, lateral bearing capacity





Faculty of Civil Engineering

MSc Thesis in Geotechnical Engineering

## **Lateral bearing capacity of piles in fine-grained soils**

By: Mohammad Reza Qolizadeh.N

Supervisor:

Dr. Seyed Mahdi Hosseini

June 2016