

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

بررسی رفتار دلفین‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر چندشمعی تحت اثر بارهای جانبی

نگارنده: اشکان عابدیان

استاد راهنما

دکتر فرشید جندقی علائی

استاد مشاور

دکتر حمید بایسته

دی ۱۳۹۷

شماره: ۹۲۳۸۲  
تاریخ: ۱۳۹۷/۱۰/۲۳

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای اشکان عابدیان با شماره دانشجویی ۹۴۱۱۷۰۴ رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی تحت عنوان بررسی رفتار دلفین‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر چندشمعی تحت اثر بارهای جانبی که در تاریخ ۱۳۹۷/۱۰/۰۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

<input type="checkbox"/> مردود <input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: ...)			
<input type="checkbox"/> عملی <input checked="" type="checkbox"/> نظری			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر فرشید چندقی علائی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	-	-	-
۳- استاد مشاور	دکتر حمید بایسته	-	-
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گلی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر ساقی سعیدطهرانی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر سید مهدی توکلی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر ...  
دانشکده مهندسی عمران  
تاریخ: ۱۳۹۷/۱۰/۲۳

تصیر: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم بہ پدر و مادر م...۰۰۰



# تشکر و قدردانی

در ابتدا بر خود لازم می‌دانم از زحمات استاد ارجمند، جناب آقای دکتر فرشید جندقی علائی بابت تمام راهنمایی‌ها و مساعدت‌های ایشان نه تنها در طول این پژوهش، بلکه در کل دوران تحصیل اینجانب در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شاهرود، تشکر و قدردانی ویژه نمایم. علاقه و نگرشی که به این رشته و گرایش داشته و دارم را مدیون ایشان می‌دانم. بی‌شک بدون حمایت و اعتماد همیشگی ایشان انجام این پژوهش میسر نمی‌بود.

همچنین از زحمات جناب آقای دکتر حمید بایسته که به عنوان استاد مشاور نقش مهمی در پیش‌برد این پژوهش ایفا کردند، تشکر می‌نمایم.

در انتها نیز از زحمات خانواده عزیزم که همواره و در هر شرایطی پشتیبان همیشگی اینجانب بوده، قدردانی می‌نمایم و امیدوارم روزی توان جبران محبت‌های بی‌شائبه‌شان را داشته باشم.

# تعمیرنامه

اینجانب اشکان عابدیان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان-نامه بررسی رفتار دلفین‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر چندشمعی تحت اثر بارهای جانبی تحت راهنمایی دکتر فرشید جندقی علائی و مشاوره دکتر حمید بایسته متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو

تاریخ ۱۳۹۷/۱۰/۰۳

## 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 می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

دلفین‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر، سازه‌های متکی بر شمع یا شمع‌های قائمی هستند که برای جذب انرژی ناشی از پهلوگیری شناور از تغییرشکل خود سازه بهره می‌برند. این عملکرد بسته به سختی سیستم، از اندرکنش میان اجزای مختلف شامل: شمع، خاک و ضربه‌گیر (در صورت وجود) به وجود می‌آید. در حقیقت در این پژوهش اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. نخست با استفاده از منحنی‌های تجربی  $p-y$  برای خاک، رفتار جانبی سازه در حضور خاک مدلسازی شده و پس از صحت‌سنجی مدل، آنالیزی در محدوده رفتار خطی و غیرخطی سیستم (شامل شمع و خاک) برای بارهای جانبی وارد بر سازه به اجرا درمی‌آید.

در بررسی‌های به عمل آمده در یکی از شاخص‌ترین سازه‌های دریایی انعطاف‌پذیر دنیا مشاهده گردید که ظرفیت جذب انرژی مدل ارائه شده در محدوده خطی مصالح شمع، مطابقت خوبی با انرژی مورد نیاز برای پهلوگیری شناور طرح دارد. به عنوان نتیجه‌ای دیگر در همین محدوده، ورود عمق مشخصی از خاک به ناحیه پلاستیک می‌باشد. آنالیز نتایج حاصل از رفتار غیرخطی سیستم پهلوگیری نیز نشان‌دهنده رابطه معنادار میان خاک و سازه در قالب تشکیل مفاصل پلاستیک است. رفتار این مفاصل به دلیل محصورشدگی شمع درون خاک و تغییر موقعیت لنگر خمشی با ورود خاک به ناحیه پلاستیک به صورت توزیع شده در طول مشخصی از شمع اتفاق خواهد افتاد.

**کلمات کلیدی:** دلفین پهلوگیری انعطاف‌پذیر، شمع تحت اثر بار جانبی، سختی سیستم پهلوگیری، اندرکنش خاک و سازه، منحنی  $p-y$ ، مفصل پلاستیک.

# فهرست مطالب

س	فهرست جداول
ف	فهرست اشکال
۱	فصل ۱ مقدمه
۲	۱-۱ زمینه پژوهش.....
۵	۲-۱ تمرکز پژوهش.....
۸	۳-۱ اهداف پژوهش.....
۹	۴-۱ ضرورت انجام پژوهش.....
۹	۵-۱ ساختار پژوهش.....
۱۱	فصل ۲ دلفین‌های پهلویی: مروری بر اجزاء و رویکردهای طراحی
۱۲	۱-۲ مقدمه.....
۱۲	۲-۲ مروری بر سازه‌های پهلویی.....
۱۳	۳-۲ دلفین‌های پهلویی.....
۱۶	۴-۲ ضربه‌گیرها.....

۱۷	۵-۲ روند پهلوگیری شناور.....
۱۸	۶-۲ مقاومت و سختی سیستم پهلوگیری.....
۲۰	۷-۲ گسیختگی‌های محتمل.....
۲۲	۸-۲ مدل‌های محاسباتی.....
۲۲	۱-۸-۲ مدل‌های هیدرودینامیکی.....
۲۴	۲-۸-۲ مدل اندرکنش خاک-شمع.....
۲۹	۹-۲ رویکرد آنالیز گروه شمع.....
۳۰	۱-۹-۲ مروری بر تئوری‌های گروه شمع با فاصله مرکز به مرکز زیاد.....
۳۲	۲-۹-۲ رفتار گروه شمع با فاصله مرکز به مرکز کم.....
۳۵	فصل ۳ شمع منفرد و گروه شمع تحت اثر بار جانبی-روش $p-y$
۳۶	۱-۳ مقدمه.....
۳۶	۲-۳ معادله دیفرانسیل تیر-ستون بر روی بستر.....
۴۰	۳-۳ حل معادله دیفرانسیل با استفاده از معادلات تفاضل محدود.....
۴۳	۴-۳ راه‌حل‌های تحلیلی در زمینه منحنی‌های $p-y$ .....
۴۳	۱-۴-۳ سختی اولیه منحنی‌های $p-y$ .....

- ۴۵ .....۲-۴-۳ محاسبه مقادیر نهایی مقاومت  $P_{ult}$ .....
- ۴۷ .....۵-۳ منحنی‌های  $p-y$  برای رس‌ها.....
- ۴۸ .....۱-۵-۳ پاسخ رس نرم در حضور آب آزاد (Matlock, 1970).....
- ۴۹ .....۲-۵-۳ پاسخ رس سخت در حضور آب آزاد (Reese, et al, 1975).....
- ۵۳ .....۳-۵-۳ پاسخ رس سخت بدون حضور آب آزاد (Welch & Reese, 1972).....
- ۵۵ .....۶-۳ منحنی‌های  $p-y$  برای ماسه بالا و پایین تراز آب (Reese, et al, 1974).....
- ۵۹ .....۷-۳ منحنی  $p-y$  برای خاک‌های لایه‌ای.....
- ۶۰ .....۱-۷-۳ تصحیح اثر لایه‌ای خاک‌ها به روش جورجیادس (Georgiadis, 1983).....
- ۶۱ .....۸-۳ مکانیک گروه شمع در حالت دوبعدی.....
- ۶۲ .....۱-۸-۳ فرضیات.....
- ۶۲ .....۲-۸-۳ سیستم مختصات و علائم قراردادی.....
- ۶۳ .....۳-۸-۳ تبدیل مختصات‌ها.....
- ۶۶ .....۹-۳ اندرکنش شمع-خاک-شمع در گروه شمع.....
- ۶۷ .....۱-۹-۳ ضریب کاهش پهلوی به پهلوی.....
- ۶۸ .....۲-۹-۳ ضریب کاهش خطی به خطی.....

۷۰	..... شمعی‌های اریب. ۳-۹-۳
۷۳	فصل ۴ صحت‌سنجی مدل
۷۴	..... ۱-۴ مقدمه
۷۴	..... ۲-۴ آزمایش شمعی منفرد و گروه شمعی متناظر تحت اثر بار جانبی
۷۴	..... ۱-۲-۴ خصوصیات ژئوتکنیکی محل آزمایش
۷۸	..... ۲-۲-۴ مشخصات شمعی آزمایش
۷۹	..... ۳-۲-۴ موقعیت کرنش‌سنج‌ها در شمعی
۸۰	..... ۴-۲-۴ آزمایش شمعی منفرد تحت اثر بار جانبی
۸۱	..... ۵-۲-۴ آزمایش گروه شمعی تحت اثر بار جانبی
۸۳	..... ۶-۲-۴ مشخصات منحنی‌های $p-y$
۸۴	..... ۷-۲-۴ تعیین ضرایب کاهش مقاومت برای گروه شمعی
۸۶	..... ۳-۴ مدل‌سازی
۸۷	..... ۱-۳-۴ نحوه مدل‌سازی شمعی منفرد در LPile
۹۱	..... ۲-۳-۴ نحوه مدل‌سازی گروه شمعی در Group
۹۴	..... ۳-۳-۴ نحوه مدل‌سازی شمعی منفرد و گروه شمعی متناظر در SAP2000

۴-۴ نتایج ..... ۹۸

۴-۴-۱ منحنی بار-تغییر مکان در سر شمع (شمع منفرد) ..... ۹۸

۴-۴-۲ منحنی لنگر خمشی در طول شمع (شمع منفرد) ..... ۱۰۰

۴-۴-۳ منحنی بار-تغییر مکان در سر شمع (گروه شمع) ..... ۱۰۳

۴-۴-۴ لنگر خمشی در طول شمع (گروه شمع) ..... ۱۰۴

۱۰۷ فصل ۵ مدل دلفین پهلوگیری

۵-۱ مقدمه ..... ۱۰۸

۵-۲ مدل دلفین پهلوگیری ..... ۱۰۸

۵-۲-۱ مشخصات ژئوتکنیکی محل دلفین ..... ۱۱۰

۵-۲-۲ مشخصات شمع مورد استفاده ..... ۱۱۱

۵-۲-۳ آرایش گروه شمع ..... ۱۱۲

۵-۲-۴ مشخصات منحنی‌های  $p-y$  ..... ۱۱۳

۵-۲-۵ ضرایب کاهش مقاومت در گروه شمع ..... ۱۱۶

۵-۳ مدل سازی ..... ۱۱۷

۵-۳-۱ نحوه مدل سازی شمع منفرد فرضی در LPile ..... ۱۱۷



۱۲۰.....	۲-۳-۵ نحوه مدل سازی دلفین ۴ شمعی پهلوگیری در Group
۱۲۲.....	۳-۳-۵ نحوه مدل سازی شمع منفرد فرضی و دلفین ۴ شمعی در SAP2000
۱۲۴.....	۴-۵ تحلیل الاستیک دلفین پهلوگیری انعطاف پذیر ۴ شمعی
۱۲۶.....	۱-۴-۵ منحنی بار-تغییر مکان الاستیک در دلفین پهلوگیری ۴ شمعی
۱۲۹.....	۲-۴-۵ بحث در مورد ظرفیت جذب انرژی در دلفین ۴ شمعی
۱۳۰.....	۵-۵ مقدمه ای بر تحلیل پلاستیک دلفین پهلوگیری ۴ شمعی
۱۳۳.....	۱-۵-۵ منحنی تنش- کرنش مصالح شمع
۱۳۴.....	۲-۵-۵ منحنی لنگر خمشی-انحناء مقطع شمع (بار محوری صفر)
۱۳۴.....	۳-۵-۵ مشخصات مفصل پلاستیک تعریف شده در SAP2000
۱۳۵.....	۴-۵-۵ منحنی بار-تغییر مکان دلفین پهلوگیری ۴ شمعی
۱۴۰.....	۵-۵-۵ بحث کمی در مورد ظرفیت جذب انرژی در تحلیل پلاستیک دلفین
۱۴۱	<b>فصل ۶ نتیجه گیری و پیشنهادات</b>
۱۴۲.....	۱-۶ مقدمه
۱۴۲.....	۲-۶ نتیجه گیری
۱۴۷.....	۳-۶ پیشنهادات

۱۴۹ پیوست شماره ۱ - منحنی‌های  $p$ - $y$  در مدل صحت‌سنجی (برای شمع منفرد)

۱۵۵ پیوست شماره ۲ - منحنی‌های  $p$ - $y$  در مدل دلفین (برای شمع منفرد)

۱۶۵ مراجع

# فهرست جداول

جدول ۱-۳ مقادیر نماینده  $\varepsilon_{50}$  برای رس‌های عادی تحکیم‌یافته [Reese & Van Impe 2011] .... ۴۸

جدول ۲-۳ مقادیر نماینده  $k_{py}$  برای رس‌های پیش تحکیم‌یافته [Reese & Van Impe 2011] .... ۵۱

جدول ۳-۳ مقادیر نماینده  $\varepsilon_{50}$  برای رس‌های پیش تحکیم‌یافته [Reese & Van Impe 2011] .... ۵۲

جدول ۴-۳ مقادیر نماینده  $k_{py}$  برای ماسه مغروق [Reese & Van Impe 2011] ..... ۵۸

جدول ۵-۳ مقادیر نماینده  $k_{py}$  برای ماسه بالای تراز آب (بارگذاری استاتیکی و چرخه‌ای) [Reese &

Van Impe 2011] ..... ۵۸

جدول ۱-۴ مشخصات شمع مدل صحت‌سنجی [Rollins, et al. 2003] ..... ۷۸

جدول ۲-۴ منحنی‌های  $p-y$  و ضخامت لایه‌ها جهت استفاده در مدل‌سازی خاک [Rollins, et al.

2003] ..... ۸۵

جدول ۳-۴ تنظیمات مربوط به آنالیز شمع در LPile ..... ۸۸

جدول ۴-۴ شرایط مرزی سر شمع و بارگذاری در شمع منفرد مدل صحت‌سنجی ..... ۸۹

جدول ۵-۴ مشخصات گروه شمع در Group ..... ۹۲

جدول ۶-۴ تنظیمات مربوط به آنالیز شمع در Group ..... ۹۴

- جدول ۱-۵ مشخصات شمع مدل دلفین پهلوگیری [Marriott & Van Den Berg 1974] ..... ۱۱۲
- جدول ۲-۵ ضخامت لایه‌ها در مدل‌سازی خاک ..... ۱۱۵
- جدول ۳-۵ فرضیات مربوط به منحنی‌های  $p-y$  در مدل‌سازی خاک ..... ۱۱۵
- جدول ۴-۵ تنظیمات مربوط به آنالیز شمع منفرد فرضی در LPile ..... ۱۱۷
- جدول ۵-۵ شرایط مرزی سر شمع و بارگذاری در شمع منفرد فرضی مدل دلفین ..... ۱۱۸
- جدول ۶-۵ مشخصات گروه شمع دلفین پهلوگیری در Group ..... ۱۲۰
- جدول ۷-۵ تنظیمات مربوط به آنالیز شمع در Group ..... ۱۲۲
- جدول ۸-۵ مقادیر مورد نیاز انرژی پهلوگیری در شناور طرح ..... ۱۳۰
- جدول ۹-۵ بررسی کمی رفتار سیستم دلفین پهلوگیری در تغییر مکان‌های مختلف ..... ۱۴۰

# فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ نمایی از پهلوگیری شناور فله مایع [Tsinker 2004] ..... ۳
- شکل ۲-۱ نمایی از پهلوگیری شناور فله خشک [Tsinker 2004] ..... ۳
- شکل ۳-۱ شماتیک از دلفین‌های پهلوگیری صلب و انعطاف‌پذیر [Bruijn 2005] ..... ۵
- شکل ۴-۱ دلفین‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر همراه با ضربه‌گیر [BS 6349 – 4 2014] ..... ۶
- شکل ۱-۲ نمایی از یک اسکله دور از ساحل [Thoresen 2014] ..... ۱۴
- شکل ۲-۲ نمایی از یک اسکله دلفینی [OCDI 2002] ..... ۱۴
- شکل ۳-۲ نمونه‌هایی از دلفین‌های صلب [BS 6349-2 2010] ..... ۱۵
- شکل ۴-۲ نمونه‌هایی از دلفین انعطاف‌پذیر [BS 6349-2 2010] ..... ۱۶
- شکل ۵-۲ مدل پهلوگیری [Bruijn 2005] ..... ۱۸
- شکل ۶-۲ اجزای یک سیستم پهلوگیری [Bruijn 2005] ..... ۱۹
- شکل ۷-۲ سیستم سازه‌ای یک دلفین پهلوگیری با ضربه‌گیر و منحنی بار-تغییرمکان اجزای آن [EAU 2012] ..... ۲۰
- شکل ۸-۲ مکان وقوع ساز و کارهای گسیختگی [Bruijn 2005] ..... ۲۱

- شکل ۹-۲ رویکردهای طراحی یک سیستم پهلوگیری [Bruijn 2005] ..... ۲۲
- شکل ۱۰-۲ توزیع تنش‌های واحد بر شمع در حالت قبل و بعد از بارگذاری [Reese & Van Impe 2011] ..... ۲۴
- شکل ۱۱-۲ یک منحنی عمومی p-y [Reese & Van Impe 2011] ..... ۲۵
- شکل ۱۲-۲ یک مدل برای شمع منفرد تحت اثر بارهای جانبی با استفاده از منحنی‌های p-y [Reese & Van Impe 2011] ..... ۲۷
- شکل ۱۳-۲ اثر فاصله بین شمع‌ها در اندرکنش شمع-خاک-شمع [Reese & Van Impe 2011] ..... ۳۲
- شکل ۱۴-۲ اصلاح مقاومت خاک برای در نظر گرفتن اندرکنش شمع-خاک-شمع در گروه شمع [Reese & Van Impe 2011] ..... ۳۳
- شکل ۱-۳ یک المان کوچک از تیر-ستون ..... ۳۷
- شکل ۲-۳ نمونه‌ای از نتایج حاصل از یک جواب کامل [Reese & Van Impe 2011] ..... ۳۹
- شکل ۳-۳ نمایی از یک شمع تغییرشکل یافته [Reese & Van Impe 2011] ..... ۴۱
- شکل ۴-۳ یک منحنی عمومی p-y [Reese & Van Impe 2011] ..... ۴۳
- شکل ۵-۳ مدل خاک در سطح زمین برای محاسبه مقاومت نهایی خاک [Reese & Van Impe 2011] ..... ۴۶
- شکل ۶-۳ مود گسیختگی فرض شده خاک دور شمع [Reese & Van Impe 2011] ..... ۴۷

- شکل ۷-۳ نمودار مشخصه برای منحنی رس نرم در حضور آب آزاد (الف) برای بارگذاری استاتیکی  
 ۴۸ ..... [Reese & Van Impe 2011]
- شکل ۸-۳ نمودار مشخصه برای منحنی  $p-y$  برای بارگذاری استاتیکی رس سخت در حضور آب آزاد  
 ۵۰ ..... [Reese & Van Impe 2011]
- شکل ۹-۳ مقادیر  $A_c$  و  $A_s$  [Reese & Van Impe 2011] ..... ۵۱
- شکل ۱۰-۳ نمودار مشخصه برای منحنی  $p-y$  برای بارگذاری استاتیکی رس سخت بدون حضور آب  
 آزاد [Reese & Van Impe 2011] ..... ۵۳
- شکل ۱۱-۳ نمودار مشخصه برای منحنی  $p-y$  برای بارگذاری استاتیکی و چرخه‌ای ماسه [Reese &  
 Van Impe 2011] ..... ۵۵
- شکل ۱۲-۳ مقادیر ضرایب  $A_c$  و  $A_s$  [Reese & Van Impe 2011] ..... ۵۶
- شکل ۱۳-۳ مقادیر ضرایب  $B_c$  و  $B_s$  [Reese & Van Impe 2011] ..... ۵۷
- شکل ۱۴-۳ نمایی از عمق‌های معادل در پروفیل خاک چند لایه‌ای [Isenhower 2017] ..... ۶۱
- شکل ۱۵-۳ سیستم سازه‌ای پایه برای گروه شمع‌ها [Reese & Van Impe 2011] ..... ۶۲
- شکل ۱۶-۳ سیستم مختصات برای آنالیز گروه شمع با جهت مثبت تغییر مکان‌ها [Reese & Van  
 Impe 2011] ..... ۶۳
- شکل ۱۷-۳ تبدیل تغییر مکان‌ها [Reese & Van Impe 2011] ..... ۶۴

- شکل ۳-۱۸ ضریب کاهش مقاومت تحت اثر اندرکنش گروه شمع با فاصله نزدیک به هم [Reese, et al. 2016] ..... ۶۶
- شکل ۳-۱۹ ضریب کاهش برای شمع‌های موجود در یک ردیف با توجه به داده آزمایش‌ها [Reese, et al. 2016] ..... ۶۷
- شکل ۳-۲۰ ضریب کاهش برای شمع مقدم در یک خط [Reese, et al. 2016] ..... ۶۸
- شکل ۳-۲۱ ضریب کاهش برای شمع دنباله در یک خط [Reese, et al. 2016] ..... ۶۹
- شکل ۳-۲۲ سیستم مورد استفاده برای به دست آوردن ضریب کاهش در شمع‌های اریب [Reese, et al. 2016] ..... ۷۰
- شکل ۴-۱ موقعیت گمانه‌ها و تست‌های درجا نسبت به محل انجام آزمایش‌های بارگذاری [Rollins, et al. 2003] ..... ۷۶
- شکل ۴-۲ پروفیل خاک به همراه نتایج آزمایش‌های درجا و آزمایشگاهی [Rollins, et al. 2003] ..... ۷۷
- شکل ۴-۳ موقعیت کرنش‌سنج‌ها در طول شمع [Rollins, et al. 2003] ..... ۷۹
- شکل ۴-۴ مقطع و نمایی از شمع به همراه نبشی‌های فولادی [Rollins, et al. 2003] ..... ۸۰
- شکل ۴-۵ نمایی شماتیک از آزمایش بار جانبی بر روی شمع منفرد [Rollins, et al. 2003] ..... ۸۱
- شکل ۴-۶ نمایی از گروه شمع [Rollins, et al. 2003] ..... ۸۲
- شکل ۴-۷ نمایی از تنظیمات آزمایش بار جانبی بر روی گروه شمع [Rollins, et al. 2003] ..... ۸۳



- شکل ۸-۴ پروفیل ایده‌آل خاک به همراه مقادیر مربوط به مقاومت برشی زهکشی نشده برای طراحی [Rollins, et al. 2003] ..... ۸۴
- شکل ۹-۴ پروفیل شمع و خاک در LPile ..... ۹۰
- شکل ۱۰-۴ پروفیل خاک به همراه گروه شمع تعریف شده در Group ..... ۹۳
- شکل ۱۱-۴ نمایی شماتیک از نحوه مدل‌سازی منحنی  $p-y$  در SAP2000 به صورت منحنی  $f-y$  ..... ۹۵
- شکل ۱۲-۴ شرایط مرزی سرشمع در گروه شمع مدل صحت‌سنجی ..... ۹۶
- شکل ۱۳-۴ نمایی شماتیک از مدل شمع منفرد صحت‌سنجی در SAP2000 ..... ۹۷
- شکل ۱۴-۴ منحنی بار-تغییرمکان اندازه‌گیری شده در آزمایش و مدل LPile ..... ۹۹
- شکل ۱۵-۴ منحنی بار-تغییرمکان مدل LPile و مدل SAP2000 ..... ۹۹
- شکل ۱۶-۴ منحنی لنگر خمشی-عمق اندازه‌گیری شده در آزمایش و مدل LPile ..... ۱۰۱
- شکل ۱۷-۴ منحنی لنگر خمشی-عمق در مدل LPile و مدل SAP2000 ..... ۱۰۲
- شکل ۱۸-۴ منحنی بار-تغییرمکان اندازه‌گیری شده در آزمایش و مدل Group ..... ۱۰۳
- شکل ۱۹-۴ منحنی بار-تغییرمکان مدل Group و مدل SAP2000 ..... ۱۰۴
- شکل ۲۰-۴ لنگر خمشی اندازه‌گیری شده در آزمایش و محاسبه شده توسط Group و SAP2000 برای تغییرمکان ۱۲/۷۵ میلی‌متر ..... ۱۰۵

- شکل ۴-۲۱ لنگر خمشی اندازه‌گیری شده در آزمایش و محاسبه شده توسط Group و SAP2000  
 برای تغییرمکان ۲۹/۲۰ میلی‌متر ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱ نمایی از ترمینال نفتی [Marriott & Van Den Berg 1974] ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۲ نمایی از سازه پهلوگیری ۳ و ۴ شمعی [Marriott & Van Den Berg 1974] ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۳ گمانه‌ها در محل سازه و دلفین‌های پهلوگیری [Marriott & Van Den Berg 1974] ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۴ نمایی از دلفین ۴ شمعی و عرشه آن ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۵ پروفیل ایده‌آل خاک برای مدل‌سازی دلفین پهلوگیری [Marriott, et al, 1974] ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۶ آرایش شمع و فواصل آن جهت محاسبه ضرایب کاهش مقاومت ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۷ پروفیل شمع و خاک در LPile ..... ۱۱۹
- شکل ۵-۸ مدل گروه شمع دلفین پهلوگیری به همراه لایه‌های خاک در نرم‌افزار Group ..... ۱۲۱
- شکل ۵-۹ نمایی شماتیک از نحوه مدل‌سازی منحنی p-y در SAP2000 به صورت منحنی f-y ..... ۱۲۳
- شکل ۵-۱۰ شرایط مرزی سرشمع در دلفین ۴ شمعی پهلوگیری ..... ۱۲۳
- شکل ۵-۱۱ خلاصه اطلاعات مربوط به مدل‌سازی دلفین ۴ شمعی و شمع منفرد فرضی متناظر با آن  
 ..... ۱۲۴
- شکل ۵-۱۲ منحنی بار-تغییرمکان دلفین پهلوگیری و اجزای آن [EAU 2012] ..... ۱۲۶

- شکل ۵-۱۳ منحنی بار-تغییر مکان الاستیک در دلفین پهلوگیری ۴شمعی مدل Group و SAP2000  
 ۱۲۷ .....
- شکل ۵-۱۴ منحنی بار-تغییر مکان الاستیک دلفین ۴شمعی به همراه محدوده پلاستیک خاک در  
 شمع مقدم ..... ۱۲۸ .....
- شکل ۵-۱۵ منحنی بار-تغییر مکان الاستیک دلفین ۴شمعی به همراه محدوده پلاستیک خاک در  
 شمع دنباله ..... ۱۲۸ .....
- شکل ۵-۱۶ محدوده پلاستیک خاک در ردیف شمع مقدم و دنباله در دلفین ۴شمعی ..... ۱۲۹ .....
- شکل ۵-۱۷ مقادیر حدی دسته بندی مقاطع برای مقاطع دایره‌ای [SBRCURnet 2014] ..... ۱۳۱ .....
- شکل ۵-۱۸ منحنی تنش-کرنش فرض شده در نرم‌افزارها به همراه منحنی فولاد نرمه متناظر با آن  
 ..... ۱۳۳ .....
- شکل ۵-۱۹ منحنی لنگر خمشی-انحناء مدل محاسباتی به همراه مدل سخت‌شدگی کرنش ..... ۱۳۴ .....
- شکل ۵-۲۰ مشخصات مفصل پلاستیک با توجه به منحنی لنگر خمشی-انحناء ..... ۱۳۵ .....
- شکل ۵-۲۱ منحنی بار-تغییر مکان پلاستیک دلفین پهلوگیری انعطاف‌پذیر ۴شمعی ..... ۱۳۶ .....
- شکل ۵-۲۲ منحنی بار-تغییر مکان پلاستیک دلفین ۴شمعی به همراه محدوده پلاستیک خاک در  
 شمع مقدم ..... ۱۳۶ .....

- شکل ۵-۲۳ منحنی بار-تغییر مکان پلاستیک دلفین ۴شمعی به همراه محدوده پلاستیک خاک در  
شمع دنباله..... ۱۳۷
- شکل ۵-۲۴ آنالیز پاسخ مفاصل پلاستیک در منحنی بار تغییر مکان شمع ..... ۱۳۸
- شکل ۵-۲۵ محدوده پلاستیک خاک و شمع در تغییر مکان ۲ متر در دلفین ۴شمعی ..... ۱۳۹
- شکل ۵-۲۶ محدوده پلاستیک خاک و شمع در تغییر مکان ۳ متر در دلفین ۴شمعی ..... ۱۳۹
- شکل ۶-۱ منحنی بار-تغییر مکان الاستیک در دلفین پهلوگیری ۴شمعی ..... ۱۴۳
- شکل ۶-۲ محدوده پلاستیک خاک برای شمع‌های ردیف جلویی و عقبی در دلفین ۴شمعی در انتهای  
محدوده الاستیک مصالح شمع ..... ۱۴۴
- شکل ۶-۳ منحنی بار-تغییر مکان پلاستیک دلفین پهلوگیری انعطاف‌پذیر ۴شمعی ..... ۱۴۵
- شکل ۶-۴ محدوده پلاستیک مصالح شمع و خاک در تغییر مکان ۲ متری در دلفین ۴شمعی (3.5E<sub>el</sub>)  
..... ۱۴۶
- شکل ۶-۵ محدوده پلاستیک مصالح شمع و خاک در تغییر مکان ۲/۲۶ متری در دلفین ۴شمعی  
(4.2E<sub>el</sub>) ..... ۱۴۶
- شکل ۶-۶ محدوده پلاستیک مصالح شمع و خاک در تغییر مکان ۳ متری در دلفین ۴شمعی (6.4E<sub>el</sub>)  
..... ۱۴۷

# فصل ۱ مقدمه

## ۱-۱ زمینه پژوهش

تقاضای جهانی ادامه‌دار برای انرژی و مواد خام، نیاز به بنادر تخصصی مواد فله<sup>۱</sup> را برای سازگاری با آبخور<sup>۲</sup> شناورهای بزرگ ضروری می‌سازد. با این حال، روش مرسوم برای ساخت یک بندرگاه مصنوعی آب عمیق، شامل لایروبی حجم زیادی از مصالح بستر دریا و ساخت موج‌شکن‌ها، در اکثر موارد عملی هزینه‌های زیادی دربردارد. در زمینه جابه‌جایی‌های فله در ابعاد بزرگ، مطالعاتی که در سرتاسر جهان انجام شده، نشان می‌دهد که هزینه یک تن از ماده جابه‌جا شده با استفاده از شناورهای بزرگ‌تر به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. پارامتر مهم در زمینه عملکرد این پایانه‌ها<sup>۳</sup> استفاده از تکنولوژی ظرفیت بالای بارگیری و باراندازی است. [Tsinker 1997]

در بیشتر مواقع، در اسکله‌هایی که برای پهلوگیری به شناورهای حمل فله مایع<sup>۴</sup> و خشک<sup>۵</sup> در نظر گرفته می‌شود، مجموعه‌ای از سازه‌های جدا از هم، به نام دلفین‌های پهلوگیری<sup>۶</sup>، گزینه اقتصادی مناسب‌تری نسبت به اسکله‌های پیوسته و متصل به ساحل است. شکل ۱-۱ و شکل ۲-۱ نمونه‌ای از اسکله دلفینی مخصوص فله مایع و خشک را نشان می‌دهد. این اسکله‌ها به طور معمول از مجموعه‌ای از سازه‌های مجزا شامل؛ دلفین‌های پهلوگیری، دلفین‌های مهاربندی، سکوی بارگیری، پیاده‌روها و خرپای دسترسی تشکیل شده است. اسکله‌های مربوط به شناورهای فله خشک نیز مشابه فله مایع

---

<sup>۱</sup> Bulk Material

<sup>۲</sup> Draft

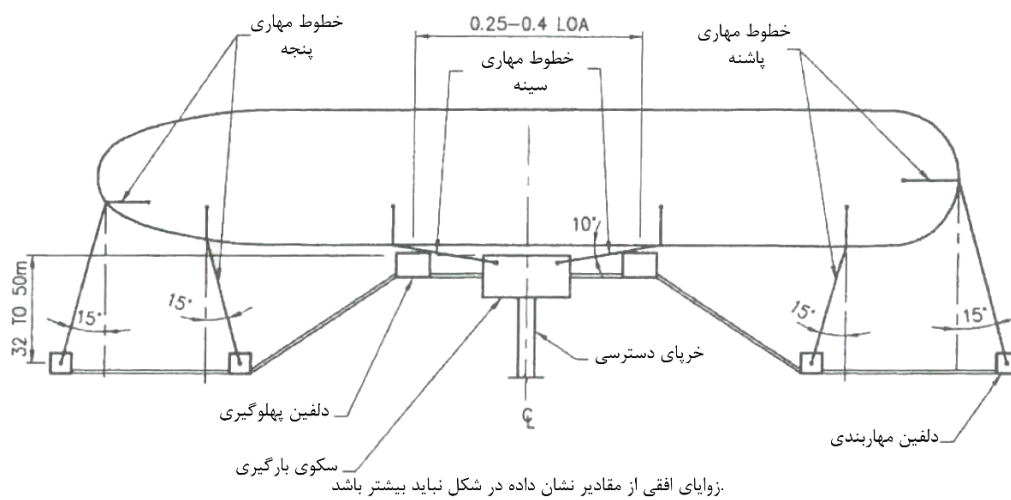
<sup>۳</sup> Terminal

<sup>۴</sup> Liquid Bulk

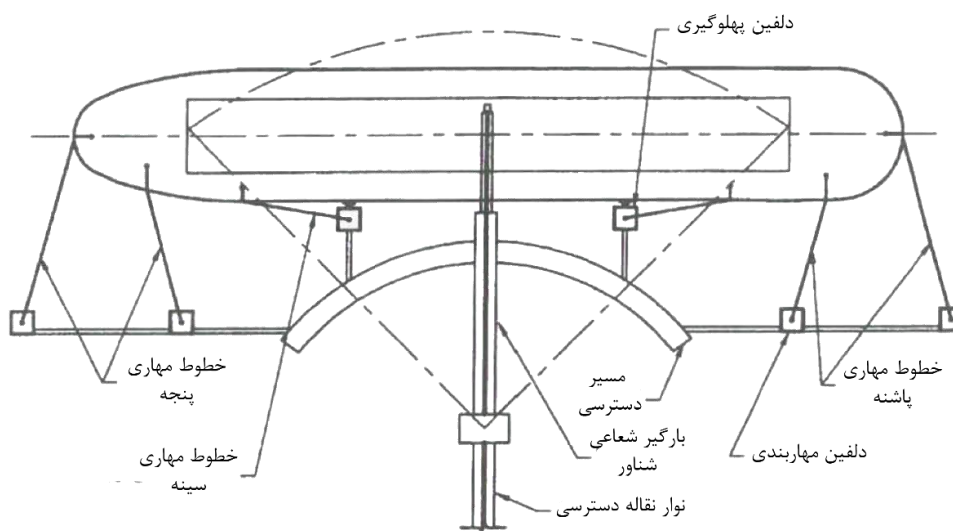
<sup>۵</sup> Dry Bulk

<sup>۶</sup> Breasting Dolphin

می‌باشند، با این تفاوت که راه دسترسی مناسب برای کالای فله خشک در محل سکوی بارگیری فراهم شده است. [Tsinker 2004]



شکل ۱-۱ نمایی از پهلوگیری شناور فله مایع [Tsinker 2004]



شکل ۲-۱ نمایی از پهلوگیری شناور فله خشک [Tsinker 2004]

دلفین‌های پهلوگیری، در اصل برای تحمل بارهای ناشی از ضربه شناور پهلوگیرنده طراحی می‌شوند. به طور معمول، دلفین‌های پهلوگیری باید بار ناشی از خطوط مهاری میانی (سینه)<sup>۷</sup> شناور را نیز تحمل کنند. دلفین‌های پهلوگیری برای جذب انرژی ناشی از پهلوگیری شناور به سیستم‌های ضربه گیر<sup>۸</sup> مجهز می‌شوند. ضربه‌گیرها، لایه‌ی میانی مورد نیاز بین شناور پهلوگیرنده و سازه پهلوگیری (اسکله) را به وجود می‌آورند، بنابراین عملکرد اصلی ضربه‌گیر تبدیل ضربه و انرژی ناشی از پهلوگیری شناور به عکس‌العمل‌های قابل تحمل توسط شناور و سازه پهلوگیر می‌باشد. [Tsinker 1997]

دلفین‌های پهلوگیری را از نظر سختی سیستم سازه‌ای به دو گروه تقسیم‌بندی می‌کنند:

- دلفین‌های صلب<sup>۹</sup>

- دلفین‌های انعطاف‌پذیر<sup>۱۰</sup>

همان‌طور که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است، دلفین‌های صلب بارهای وارده را بدون هیچ‌گونه تغییرشکل خاصی (تغییرشکل‌های کوچک) تحمل می‌کنند، در نتیجه وظیفه جذب انرژی در این دلفین‌ها به عهده‌ی سیستم ضربه‌گیر می‌باشد. اما در مقابل دلفین‌های انعطاف‌پذیر تغییرشکل‌های بزرگی را تحت اثر بارهای وارده تجربه می‌کنند، یا به عبارت دیگر جذب انرژی در این دلفین‌ها از عملکرد ترکیبی سیستم ضربه‌گیر و تغییرشکل سازه دلفین حاصل می‌شود.

---

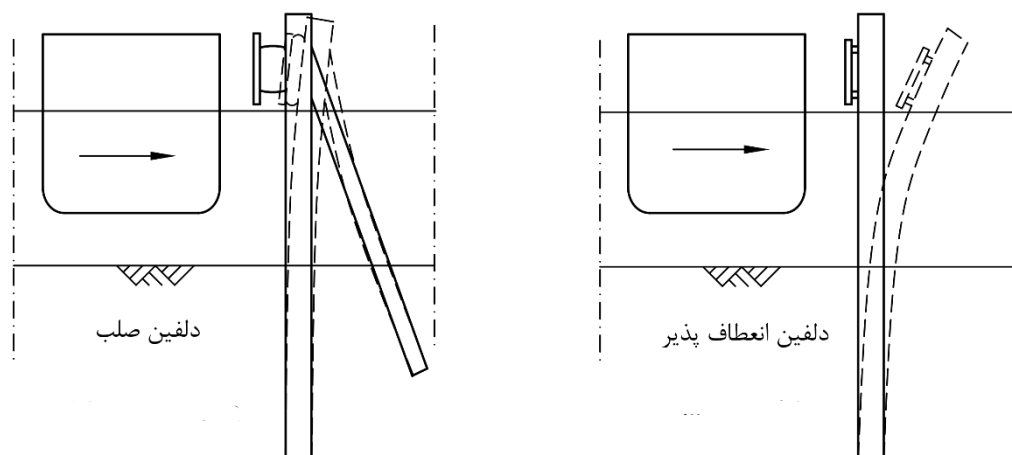
<sup>۷</sup> Spring Lines

<sup>۸</sup> Fendering System

<sup>۹</sup> Rigid Dolphin

<sup>۱۰</sup> Flexible Dolphin





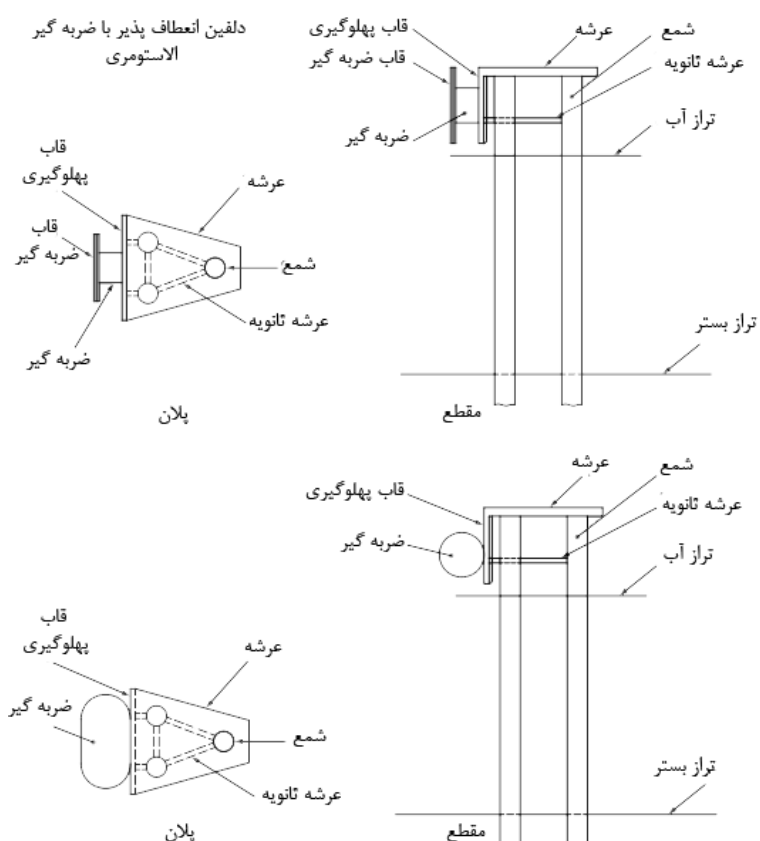
شکل ۳-۱- نمایی شماتیک از دلفین های پهلوگیری صلب و انعطاف پذیر [Bruijn 2005]

امروزه با توجه به افزایش تناژ شناورها و نیاز به کاهش دادن نیروی عکس العمل ناشی از پهلوگیری، برای جلوگیری از صدمه دیدن بدنه شناور، طراحی دلفین‌های انعطاف‌پذیر مورد توجه قرار گرفته است. علی‌رغم مطرح بودن طراحی دلفین‌ها انعطاف‌پذیر، پیشرفت‌های اخیر در تمامی رویکردهای حل مسئله شامل سیستم‌های ضربه‌گیر، فولادهای با تنش تسلیم بالا، بحث اندرکنش خاک و سازه، ابزارهای تحلیلی و بحث عملکرد سازه در برابر زلزله، موضوع انعطاف‌پذیری سازه‌های پهلوگیری درخور توجه می‌باشد.

## ۲-۱ تمرکز پژوهش

سختی و مقاومت در سیستم‌های پهلوگیری پارامتر مهمی در طراحی این سیستم‌ها به حساب می‌آید. شکل ۴-۱ نمونه‌ای از دلفین‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر همراه با ضربه‌گیر را نشان می‌دهد. اجزای یک دلفین پهلوگیری شامل شمع‌ها، ضربه‌گیر، آب و خاک می‌شود. سختی یک دلفین پهلوگیری از اندرکنش بین شمع (یا گروه شمع)، ضربه‌گیر و خاک بستر آن ناشی می‌شود. سختی بیشتر باعث ایجاد نیروهای بزرگ‌تر و تغییرشکل‌های کوچک‌تر و سختی کم‌تر باعث ایجاد نیروهای کوچک‌تر و

تغییر شکل‌های بزرگ‌تر خواهد شد. در نتیجه راه‌حل دقیق و روشنی برای این مسئله وجود ندارد، و این وظیفه‌ی مهندس محاسب است که بر اساس شرایط خاص موجود در مسئله گزینه بهینه را انتخاب کند.



شکل ۱-۴ دلفین‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر همراه با ضربه گیر [BS 6349 – 4 2014]

روشی که در این پژوهش بر آن تاکید شده، در زمینه علمی اندرکنش خاک و سازه می‌باشد. مهندس محاسب برای طراحی بهینه یک دلفین پهلوگیری، نه تنها نیاز به محاسبه باری دارد که در آن سازه پهلوگیری در اثر ضربه شناور گسیخته می‌شود، بلکه تغییر شکل برای بار محتمل در محدوده اندرکنش سازه و خاک نیز حائز اهمیت می‌باشد. روش ارائه شده بدون انجام آزمایش‌های با مقیاس واقعی<sup>۱۱</sup> بر

<sup>۱۱</sup> Full – Scale Test

روی شمع‌های منفرد و گروه شمع که با ابزارهای اندازه‌گیری تجهیز شده و رفتار شمع را ثبت می‌کنند، امکان‌پذیر نبوده است. به علاوه، کامپیوتر برای حل مدل‌های پیچیده‌ای که برای پیش‌بینی رفتار شمع‌ها توسعه داده شده، ضروری می‌باشد.

هنگامی که در دهه ۵۰ میلادی سکوه‌های دور از ساحل<sup>۱۲</sup> در تعداد بالا نصب شدند، مهندسان به سرعت تشخیص دادند که راه‌حل‌های صحیح در زمینه رفتار شمع نیاز به راهی برای ارتباط دادن رفتار خاک به تغییر شکل جانبی شمع دارد. تعدادی آزمایش بارگذاری استاتیکی و چرخه‌ای<sup>۱۳</sup> با شمع‌هایی با ابعاد واقعی، که به وسیله ابزارهای اندازه‌گیری تجهیز شده بودند، انجام شد. این آزمایش‌ها و آزمایش‌هایی که در سال‌های بعد از آن اجرا شد، باعث تولید منحنی‌های تجربی  $p-y$  شد. از علم مکانیک خاک و سازه برای توسعه روش‌هایی برای پیش‌بینی منحنی‌های  $p-y$  برای انواع مختلف خاک استفاده شد که همخوانی خوبی با رفتار واقعی شمع داشت. [Reese & Van Impe 2011]

راه‌حل‌های مربوط به معادلات دیفرانسیل مختلف در فرم‌های تفاضل محدود، با ظهور رایانه‌های دیجیتال برای محاسبات در دهه ۵۰ میلادی امکان‌پذیر شد. راه‌حل‌های رایانه‌ای امروزه با سهولت نسبی به دست می‌آید، که همین موضوع امکان تحلیل حساسیت بسیاری از پارامترهای مهم را فراهم می‌آورد. بهبود کدهای کامپیوتری به سرعت در حال وقوع است و داده‌های تجربی مربوط به پاسخ شمع‌های تک و گروه شمع به بار جانبی در ادبیات فنی به وضوح مشخص می‌باشد.

---

<sup>۱۲</sup> Offshore Platform

<sup>۱۳</sup> Cyclic

روش  $p-y$  می‌تواند برای مقابله با انواع مشکلات موجود در عمل استفاده شود. در حالی که کدهای رایانه‌ای در عمل به کمک مهندس محاسب خواهد آمد و مقادیر زیادی از نتایج جدولی و گرافیکی را تولید خواهد کرد، اهمیت قضاوت فنی مهندسی نقش مهمی در طراحی ایفا می‌کند.

## ۱-۳ اهداف پژوهش

هدف کلی از پژوهش پیش‌رو بررسی تاثیر انعطاف‌پذیری سازه در بحث طراحی دلفین‌های پهلوگیری تحت اثر بارهای جانبی ناشی از پهلوگیری شناور می‌باشد. اندرکنش خاک و سازه به عنوان مهم‌ترین زمینه در پژوهش بسط و گسترش داده شده است. در این راستا برای پیش‌برد مطالعه از دو ابزار مهم پژوهشی استفاده شده است: مرور منابع مطالعاتی و تئوری‌های مرتبط برای مدل‌سازی؛ جمع‌آوری و بررسی داده‌های آزمایش با مقیاس واقعی برای صحت‌سنجی مدل.

به طور مشخص، اهداف پژوهش با توجه به زمینه مطرح شده، عبارت است از:

- مرور سوابق مطالعاتی در زمینه دلفین‌های پهلوگیری، بحث پهلوگیری شناور و بررسی اثر سختی سازه‌ای به عنوان پارامتر طرح آن‌ها.
- بررسی تئوری‌های مرتبط با موضوع اندرکنش خاک و سازه در طرح دلفین‌های انعطاف‌پذیر.
- استفاده از مدلی برای پیش‌بینی رفتار دلفین‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر چندشمعی تحت اثر بارهای جانبی ناشی از پهلوگیری شناور و صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های یک آزمایش با مقیاس واقعی.
- ارائه پیشنهادات جهت بهبود فرآیند طرح دلفین‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر.

## ۴-۱ ضرورت انجام پژوهش

پژوهش پیش‌رو با مرور سوابق مطالعاتی مرتبط در زمینه پهلوگیری شناور و بررسی اثر سختی سازه‌های به عنوان پارامتر مهم در طرح این سازه‌ها، سعی در بهبود فرآیند طراحی دلفین‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر دارد. بحث اندرکنش خاک و سازه رویکرد جدید و در حال پیشرفتی در طرح سازه‌های دریایی می‌باشد. به همین جهت در این پژوهش سعی شده است با استفاده از این رویکرد و با تکیه بر آزمایش‌های با مقیاس واقعی، مدلی توسعه داده شود که علاوه بر پیش‌بینی رفتار سازه در نتیجه پهلوگیری شناور، رفتار غیرخطی سازه را نیز پیش‌بینی کند. پیش‌بینی رفتار غیرخطی سازه اگرچه در حیطه طرح سازه در برابر بارهای پهلوگیری قرار ندارد، اما به سبب اهمیت رفتار غیرخطی در بارهای ناشی از زلزله، این پژوهش می‌تواند به عنوان الگویی برای توسعه مدلی جامع برای ارزیابی رفتار خطی و غیرخطی سازه استفاده شود.

## ۵-۱ ساختار پژوهش

مطالب این پژوهش در شش فصل و دو پیوست ارائه شده است. در فصل اول، پس از بررسی زمینه‌ای مقدماتی و تمرکز اصلی موضوع، به بیان اهداف و ضرورت‌های انجام این پژوهش پرداخته خواهد شد. در فصل دوم با مروری بر انواع سازه‌های پهلوگیری، به شناسایی دلفین‌های پهلوگیری، اجزای مختلف آن، رویکردهای طراحی و مسائل مقدماتی وابسته به آن پرداخته خواهد شد. در فصل سوم مطالب و تئوری‌های موردنیاز جهت انجام پژوهش بر پایه روش منحنی‌های  $p-y$  ارائه و نکات مورد نیاز جهت مدل‌سازی خاک بررسی خواهد شد.

در فصل چهارم پس از معرفی مدل صحت‌سنجی که بر پایه‌ی یک آزمایش با مقیاس واقعی می‌باشد، نحوه مدل‌سازی بررسی و نتایج حاصل از مدل، با نتایج آزمایش مقایسه خواهد شد.

در فصل پنجم مدل انتخاب شده برای دلفین پهلوگیری انعطاف‌پذیر معرفی و پس از بیان مشخصات و فرضیات مطرح در مدل، نتایج بر اساس دو حالت رفتار الاستیک و پلاستیک مصالح شمع مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

در فصل ششم، به جمع‌بندی نتایج حاصل از دو مدل ارائه شده در فصل چهارم و پنجم پرداخته خواهد شد و در نهایت پیشنهاداتی جهت مشخص کردن مسیر پژوهش‌های آینده ارائه خواهد شد.

در پیوست شماره ۱ و ۲ منحنی‌های رفتار خاک مربوط به مدل صحت‌سنجی و دلفین پهلوگیری آورده شده است

فصل ۲ دلفین‌های پهلوگیری: مروری بر اجزاء و

رویکردهای طراحی

## ۱-۲ مقدمه

این فصل شامل بررسی سوابق مطالعاتی در خصوص پهلوگیری شناور، دلفین‌های پهلوگیری، بارهای وارد بر آن‌ها، مقاومت و سختی سازه‌های پهلوگیری و مدل‌های محاسباتی مربوط به رفتار سیستم پهلوگیری می‌باشد. در ابتدا با مروری بر انواع سازه‌های پهلوگیری، مشخصه‌های اصلی و زمینه کاربرد سازه‌های پهلوگیری تعیین و در نهایت رویکردهای طراحی یک سیستم پهلوگیری مرور خواهد شد.

## ۲-۲ مروری بر سازه‌های پهلوگیری

به طور کلی هدف از ساخت سازه پهلوگیری (اسکله)، ایجاد پیشانی قائم جهت پهلوگیری ایمن شناورها می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، دو روش کلی برای ساخت این سازه‌ها وجود دارد:

- اسکله‌های بسته (صلب): در این اسکله‌ها، از دیوار قائمی در پیشانی اسکله استفاده شده و پشت اسکله با مصالح خاکی پر می‌گردد. دیوار قائم وظیفه تحمل بارهای افقی ناشی از پشته‌ریزی اسکله و بارهای زنده روی عرشه اسکله و سایر بارها را دارد.

- اسکله‌های باز: در این اسکله‌ها، از انتهای بخش لایروبی شده و یا خاکریزی شده تا پیشانی اسکله به وسیله عرشه‌ای که بر روی پایه‌ها (شمع‌ها) یا دیوارهای ناپیوسته اجرا می‌شود،

پوشیده می‌گردد. [Thoresen 2014]

اسکله‌های باز، از لحاظ جانمایی به دو دسته اسکله‌های ساحلی و فراساحلی تقسیم می‌شوند. اسکله‌های ساحلی، معمولاً به صورت موازی با امتداد ساحل، در فرم‌های T و L ساخته می‌شوند. در اسکله‌های فراساحلی، ارتباط بین اسکله و ساحل با استفاده از پل دسترسی تامین می‌شود و ارتباط



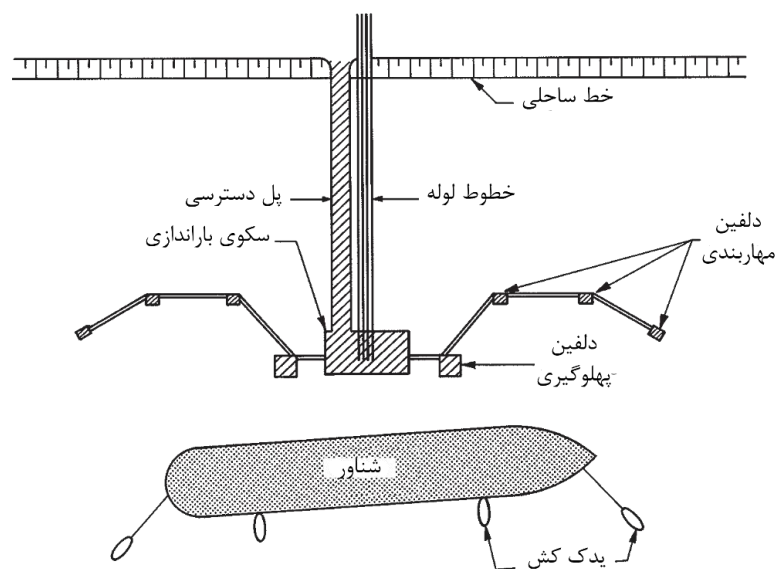
بین ساحل و اسکله به طور مستقیم می‌باشد. استفاده از اسکله‌های باز، در مقایسه با اسکله‌های بسته در صورت وجود شرایط زیر، مناسب‌تر می‌باشد:

- مقاومت بستر دریا برای تحمل وزن سازه‌های وزنی سنگین کافی نباشد.
- ظرفیت باربری لایه‌های موجود در زیر بستر دریا برای تحمل بارهای ناشی از شمع‌ها مناسب باشد.
- عمق آب زیاد باشد.
- نیاز به حداقل تغییرات در شرایط و وضعیت هیدرولیکی باشد.
- دسترسی به مصالح مناسب جهت پر کردن فضای پشت اسکله‌های دیواری مشکل باشد.

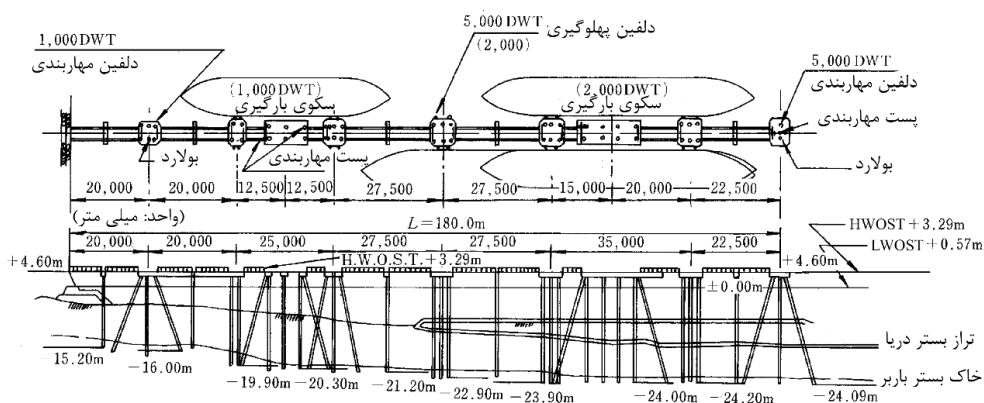
[طاحونی و بیات ۱۳۹۳]

## ۳-۲ دلفین‌های پهلوگیری

دلفین‌ها، سازه‌های مجزای متکی بر شمع یا سازه‌های وزنی هستند که بر حسب مورد، برای پهلوگیری، مهاربندی و یا کمک به مانور شناورها مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور معمول، دلفین‌های پهلوگیری در کنار اسکله‌های فراساحل، جهت کمک به پهلوگیری شناورها ساخته می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱-۲ و شکل ۲-۲ نشان داده شده است، نیروهای ناشی از پهلوگیری یا ضربه شناور توسط سازه‌های پهلوگیری جدا از هم یا دلفین‌های پهلوگیری جذب می‌شود. این فلسفه در جدا کردن دلفین‌های پهلوگیری از سکوی باراندازی باعث کاهش احتمال آسیب به سکو در عملیات پهلوگیری خواهد شد.



شکل ۱-۲ نمایی از یک اسکله دور از ساحل [Thoresen 2014]

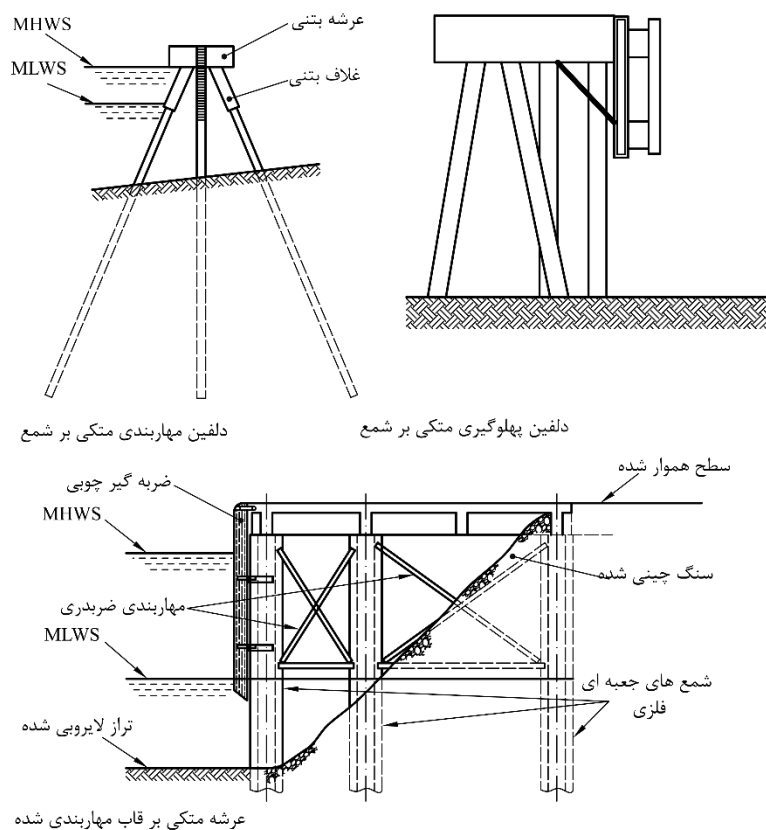


شکل ۲-۲ نمایی از یک اسکله دلفینی [OCDI 2002]

دلفین‌های پهلوگیری را از لحاظ سختی سیستم سازه‌ای به دو گروه تقسیم‌بندی می‌کنند:

- سازه‌های صلب: دلفین‌های پهلوگیری صلب می‌تواند یک سازه بسته و یا باز باشد. گروهی از شمع‌های مایل (با یا بدون شمع‌های قائم) و سرشمع بتنی، گروهی از شمع‌های مهارشده همراه با عرشه، گروهی از شمع‌های قائم با سرشمع بتنی و مهاربندی در سمت ساحل، صندوقه بتنی و ... نمونه‌هایی از دلفین‌های پهلوگیری صلب می‌باشد. دلفین‌های پهلوگیری

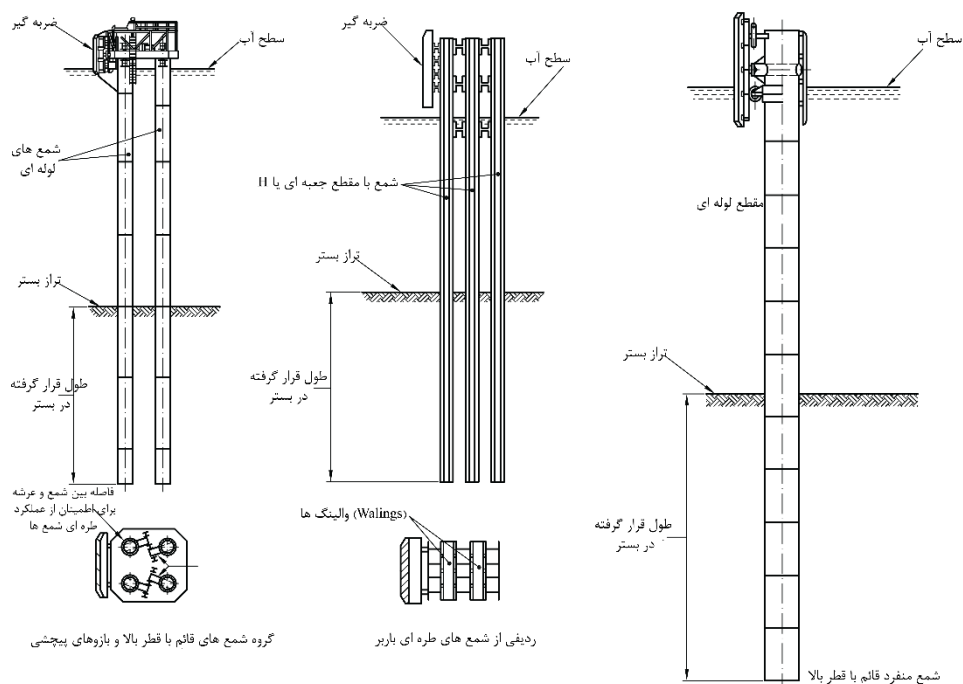
صلب بارهای وارده را بدون هیچ‌گونه تغییرشکل خاصی تحمل می‌کنند، در نتیجه وظیفه جذب انرژی در این دلفین‌ها به عهده‌ی سیستم ضربه‌گیر می‌باشد. شکل ۲-۳ نمونه‌هایی از انواع دلفین‌های صلب را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳ نمونه‌هایی از دلفین‌های صلب [BS 6349-2 2010]

سازه‌های انعطاف‌پذیر: دلفین‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر به طور معمول شامل گروهی از شمع‌های قائم می‌باشد که توسط یک سرشمع بتنی سخت یا قاب مهاربندی شده و عرشه نگهداری می‌شود. دلفین‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر ممکن است از ردیف‌های چندگانه از شمع‌های طره‌ای و یا یک یا چند شمع قائم با قطر زیاد نیز تشکیل شود. ظرفیت جذب انرژی دلفین‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر را می‌توان با اضافه کردن ضربه‌گیر به آن‌ها افزایش داد.

شکل ۲-۴ نمونه‌هایی از انواع دلفین‌های انعطاف‌پذیر را نشان می‌دهد. [BS 6349-2 2010]



شکل ۲-۴ نمونه هایی از دلفین انعطاف پذیر [BS 6349-2 2010]

## ۲-۴ ضربه گیرها

ضربه گیرها در سازه های دریایی، لایه میانی مورد نیاز بین شناور پهلوگیرنده و سازه اسکله را به وجود می آورند. بنابراین عملکرد اصلی ضربه گیر، تبدیل ضربه و انرژی ناشی از پهلوگیری شناور به عکس العمل های قابل تحمل توسط شناور و سازه اسکله می باشد. طراحی مناسب سیستم ضربه گیر باید به گونه ای باشد که شناور پهلوگیرنده به آرامی متوقف شده و پهلوگیری بدون ایجاد صدمه به شناور و اسکله همراه باشد. هنگامی که شناور در اسکله پهلو گرفته و توسط مهاربندها به طور کامل و ایمن مهار شده، سیستم ضربه گیر باید توانایی و ظرفیت کافی جهت حفاظت شناور و اسکله در برابر نیروها و حرکت های ناشی از وزش باد، امواج، جریان آب، تغییرات جزر و مدی و تخلیه و بارگیری کالا را داشته باشد. طراحی سیستم ضربه گیر باید به گونه ای باشد که بارهای ناشی از حوادث را بدون وارد آمدن خسارت به اسکله و شناور، تحمل نماید.

## ۵-۲ روند پهلوگیری شناور

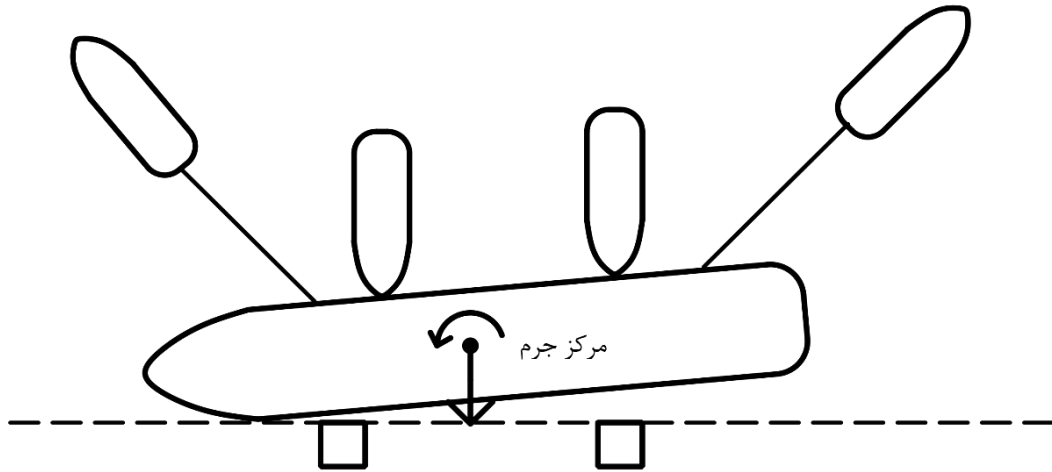
به طور معمول فرآیند پهلوگیری شناورهای بزرگ با توجه به شکل ۵-۲ به صورت زیر می‌باشد:

- شناور با کمک یدک‌کش‌ها<sup>۱</sup> به صورت موازی با سازه پهلوگیری قرار می‌گیرد.
- دو یدک‌کش تا پایان مراحل زیر شناور را رو به جلو و به سمت سازه پهلوگیری هدایت و دو یدک‌کش دیگر با کشیدن شناور، حرکت‌های آن را کنترل می‌کنند.
- شناور با سیستم ضربه‌گیر (شامل دلفین‌های پهلوگیری و یا ضربه‌گیر) برخورد می‌کند و انرژی جنبشی شناور به همراه تغییرشکل یا فشردگی ضربه‌گیر به انرژی پتانسیل تبدیل خواهد شد.
- سیستم ضربه‌گیر با برگشتن حالت اولیه (بدون فشردگی)، انرژی پتانسیل را به انرژی جنبشی شناور، به فرم حرکت انتقالی و چرخش، تبدیل خواهد کرد.
- شناور با چرخش در نقطه برخورد اولیه، دومین برخورد را با سیستم ضربه‌گیر در نقطه دوم خواهد داشت.
- در نقطه برخورد دوم، انرژی جنبشی شناور به انرژی پتانسیل سیستم ضربه‌گیر تبدیل خواهد شد.
- سیستم ضربه‌گیر با برگشتن به حالت اولیه، انرژی پتانسیل را به انرژی جنبشی شناور تبدیل می‌کند.
- شناور با چرخش در نقطه دوم، سومین برخورد را با سیستم ضربه‌گیر خواهد داشت.

---

<sup>۱</sup> Tugboat

- تکرار این حرکت تا زمانی که تمام انرژی جنبشی شناور اتلاف شده و شناور از حرکت باز ایستد. [Bruijn 2005]

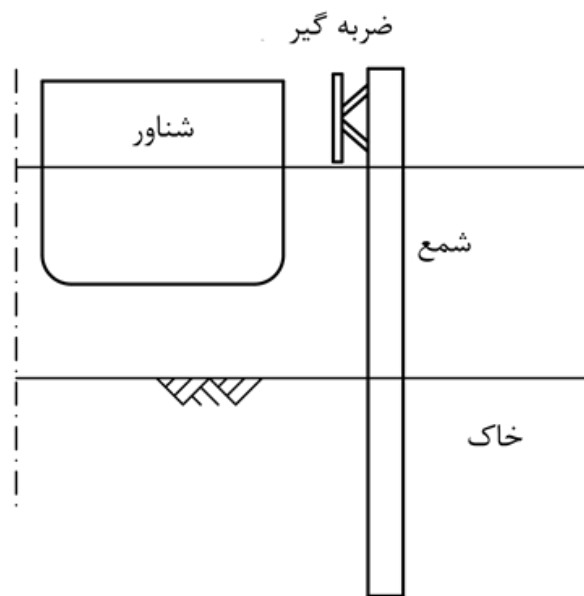


شکل ۲-۵ مدل پهلوگیری [Bruijn 2005]

## ۲-۶ مقاومت و سختی سیستم پهلوگیری

مقاومت و سختی یک سیستم پهلوگیری را می‌توان با استفاده از منحنی بار - تغییرمکان آن بیان کرد. منحنی بار-تغییرمکان تابعی از مقاومت و سختی اجزای مختلف سیستم پهلوگیری است. همان‌طور که در شکل ۲-۶ نشان داده شده است، این اجزا عبارت اند از:

- شمع.
- خاک.
- ضربه‌گیر.
- بدنه شناور.

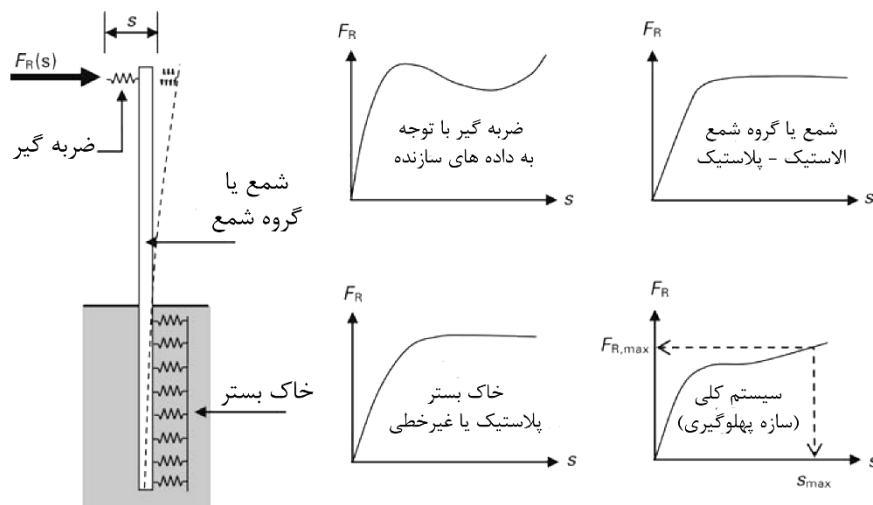


شکل ۲-۶ اجزای یک سیستم پهلوگیری [Bruijn 2005]

سازه پهلوگیری با وجود جذب انرژی جنبشی ناشی از پهلوگیری شناور، یک نیروی عکس‌العمل به بدنه شناور وارد می‌کند. بدنه شناور تحت اثر این بار نباید تغییرشکل پلاستیک از خود نشان بدهد. نیروی عکس‌العمل با استفاده از قاب‌های بزرگ پیشانی<sup>۲</sup> ضربه‌گیر در بدنه شناور توزیع می‌شود.

شکل ۲-۷ منحنی بار-تغییرمکان اجزای یک دلفین پهلوگیری انعطاف‌پذیر و کل سیستم را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مقدار نیروی عکس‌العمل ناشی از پهلوگیری شناور با استفاده از سختی سیستم تعیین می‌شود. سختی بیشتر، تغییرشکل‌های کوچک‌تر و نیروهای بزرگتر در مقابل سختی کمتر تغییرشکل‌های بیشتر و نیروهای کمتری را به همراه دارد. در نتیجه جواب روشنی برای این مسئله وجود ندارد و جواب‌های بهینه برای شرایط مختلف با توجه فشار مجاز بر بدنه شناور و حد مجاز تغییرشکل‌ها تعیین می‌کند. [EAU 2012]

<sup>۲</sup> Front Frame



شکل ۷-۲ سیستم سازه‌ای یک دلفین پهلوگیری با ضربه گیر و منحنی بار-تغییر مکان اجزای آن [EAU 2012]

## ۷-۲ گسیختگی‌های محتمل

هنگامی که بارهای وارد بر یک سیستم از مقاومت سیستم تجاوز کند، گسیختگی رخ می‌دهد. روشی که در آن سازه در اثر تجاوز بارها از ظرفیت نهایی گسیخته می‌شود، ساز و کار گسیختگی نامیده می‌شود. با توجه به شکل ۸-۲، سازوکارهای گسیختگی یک سیستم پهلوگیری عبارت اند از:

- تسلیم بدنه شناور در اثر فشار بیش از اندازه ناشی از عکس‌العمل ضربه‌گیر.
- گسیختگی ضربه‌گیر در اثر انرژی غیرعادی بالای ضربه یا تجاوز از مقاومت برشی ضربه‌گیر.
- تغییر شکل‌های بیش از اندازه دلفین که باعث برخورد شناور و دلفین در آب خواهد شد.
- تغییر شکل‌های بیش از اندازه دلفین که باعث برخورد دلفین با سکوی عملیاتی خواهد شد.
- گسیختگی شمع؛ شامل
  - تسلیم مصالح شمع



○ گسیختگی سطح مقطع در اثر بیضی گون شدن<sup>۲</sup>

○ گسیختگی در مواد جوش

- گسیختگی گوه مانند خاک در اثر طول ناکافی شمع در خاک که باعث کشیده شدن دلفین خواهد شد.

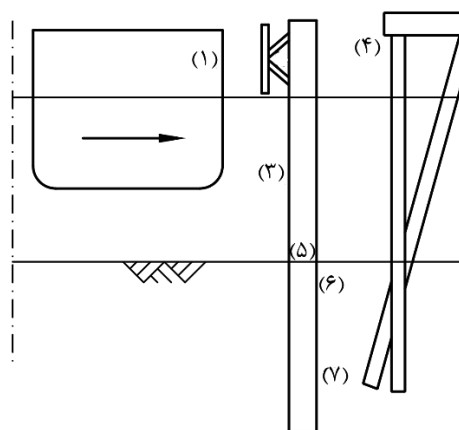
- گسیختگی خاک در اثر تجاوز از مقاومت حداکثر خاک که باعث چرخش سیال مانند خاک دور شمع خواهد شد.

- ساز و کارهای دیگر:

○ خسارت به سکوی عملیاتی در نتیجه زاویه برخورد بزرگ شناور که باعث می شود شناور در بین دو دلفین به سکو برخورد کند.

○ اثرات جزر و مدی که باعث می شود شناور با انتهای قاب پیشانی ضربه گیر یا زیر آن

(سازه دلفین) برخورد کند. [Bruijn 2005]



شکل ۲-۸ مکان وقوع ساز و کارهای گسیختگی [Bruijn 2005]

<sup>۲</sup> Ovalisation

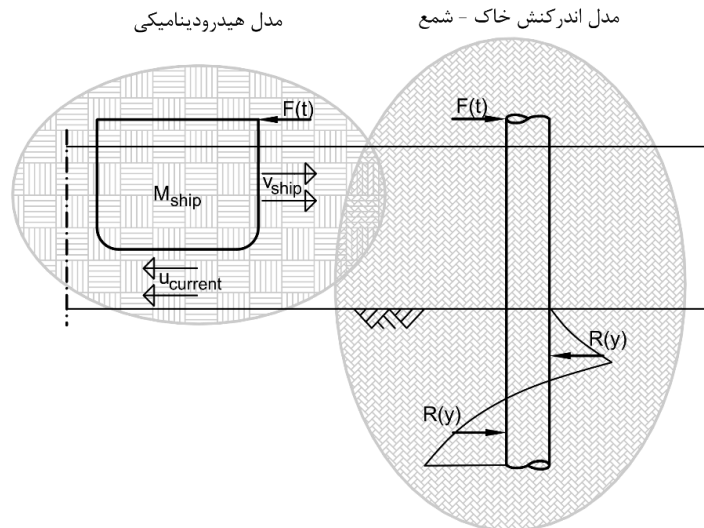
## ۸-۲ مدل‌های محاسباتی

در بررسی سوابق مطالعاتی در رابطه با سازه‌های پهلوگیری و موضوعات مرتبط، دو رویکرد اصلی به سیستم قابل تمایز است:

- مدل هیدرودینامیکی،

- مدل اندرکنش خاک-شمع.

این دو رویکرد اصلی به صورت شماتیک در شکل ۹-۲ نشان داده شده است.



شکل ۹-۲ رویکردهای طراحی یک سیستم پهلوگیری [Bruijn 2005]

## ۱-۸-۲ مدل‌های هیدرودینامیکی

هسته اصلی رویکرد هیدرودینامیکی اندرکنش بین شناور و سیال اطراف آن می‌باشد. به دلیل این‌که طراحی شناورها بیشتر بر اساس رفتار در حال حرکت شناور می‌باشد، تحقیقات گسترده‌ای برای شناورهای در حال حرکت در امواج، جریان‌ها و طوفان‌ها انجام شده است.

انرژی ناشی از پهلوگیری شناور برای انتخاب و طراحی سیستم پهلوگیری را می‌توان توسط یک یا چند مورد از رویکردهای زیر تعیین کرد:

- روش‌های متداول شامل:

- روش انرژی جنبشی: از ضرب کردن انرژی جنبشی شناور در حال حرکت در ضرایب مختلفی که برای شرایط خاص طراحی فرض شده، به دست می‌آید.
- روش نیرو-کاهش سرعت: محاسبه تاریخچه زمانی نیرو کاهش سرعت در برابر تغییر شکل الاستیک سیستم پهلوگیری برای محاسبه نیروی عکس‌العمل به طور مستقیم.

- روش‌های آماری: با استفاده از این واقعیت که توزیع فرکانس انرژی پهلوگیری که در سازه‌های پهلوگیری مختلفی انجام شده است، به طور تقریبی یک توزیع لگاریتمی نرمال را دنبال می‌کند. چنین تحلیلی به طور کلی فقط برای یک سازه پهلوگیری و یک نوع شناور معتبر می‌باشد.

- روش‌های تجربی: شامل استفاده از فرمول‌های ساده مبتنی بر تجربه گذشته و فرضیه‌های خاص مربوط به جابجایی شناور یا سایر مشخصات به طور مستقیم به انرژی پهلوگیری.

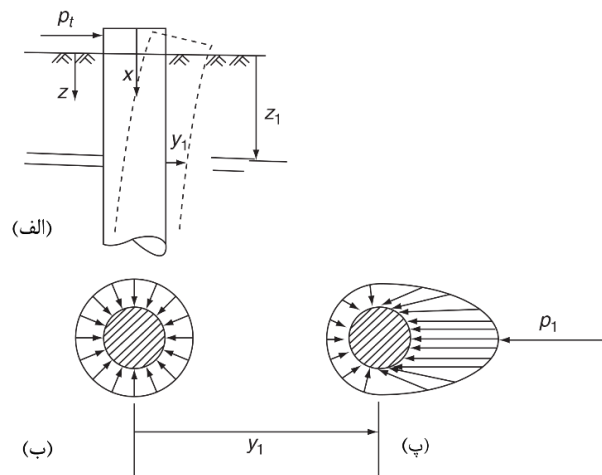
- مدل‌های ریاضی: تلاش برای مدل کردن کل فرایند و اجازه تجزیه و تحلیل طیف گسترده‌ای از داده‌های ورودی. این مدل‌ها باید از طریق اندازه‌گیری‌های واقعی تحت شرایط کنترل شده یا از طریق آزمایش‌های مدل فیزیکی کالیبره شوند. استفاده مستقیم از مدل‌های فیزیکی برای تعیین انرژی پهلوگیری در ادبیات فنی حاضر نمی‌تواند با اعتماد کامل اعمال شود.

[Gaythwaite 2016]

## ۲-۸-۲ مدل اندرکنش خاک-شمع

مهم‌ترین پارامتر خاک در یک شمع تحت اثر بار جانبی مدول عکس‌العمل<sup>۴</sup> می‌باشد، که به صورت مقاومت ناشی از خاک در یک نقطه در طول شمع ( $F/L$ ) تقسیم بر تغییرشکل شمع در آن نقطه ( $L$ ) تعریف می‌شود. مدول عکس‌العمل تابعی از عمق در زیر سطح زمین و تغییرشکل شمع می‌باشد. مدول عکس‌العمل به روش‌های مختلفی تعریف می‌شود؛ مفاهیمی که منجر به حل عمومی این معادله می‌شود، در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است. شکل یک شمع استوانه‌ای تحت اثر بار جانبی و یک لایه نازک از خاک با عمق  $z_1$  را نشان می‌دهد. توزیع یکنواخت تنش‌ها عمود بر جداره شمع تنها زمانی صحیح است که شمع بدون خمش در خاک وارد شود. اگر شمع به اندازه  $y_1$  تغییرشکل دهد، توزیع تنش‌ها مطابق شکل ۱۰-۲ (پ) خواهد شد. تنش‌ها در سمت پشت شمع کاهش و در سمت جلوی شمع افزایش پیدا خواهند کرد. همچنین برخی از تنش‌ها دارای مولفه‌های قائم و برشی

هستند. [Reese & Van Impe 2011]

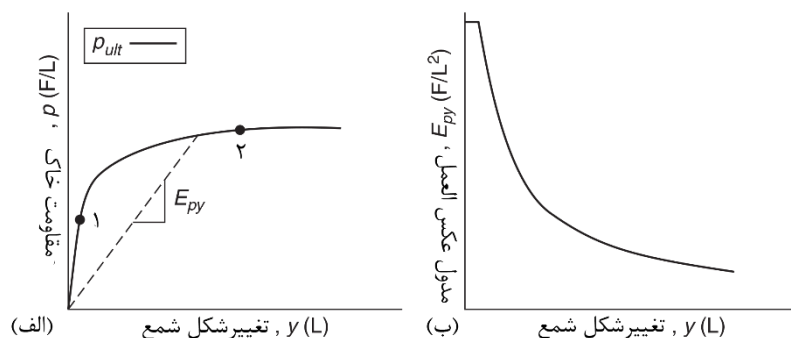


شکل ۱۰-۲ توزیع تنش‌های واحد بر شمع در حالت قبل و بعد از بارگذاری [Reese & Van Impe 2011]

<sup>۴</sup> Reaction Modulus

جمع تنش‌های واحد در یک مقطع کمیت  $p_1$  (نیرو در واحد طول) را نتیجه می‌دهد، که در خلاف جهت تغییرشکل عمل می‌کند. مدول عکس‌العمل را می‌توان از روی شیب مماس بر منحنی  $p-y$  به دست آورد.

یک منحنی عمومی  $p-y$  در شکل ۱۱-۲ نشان داده شده است. این منحنی یکی از مجموعه منحنی‌هایی است که مقاومت خاک را بر اساس تابعی از تغییرشکل شمع در عمق‌های مختلف نشان می‌دهد. در شکل پارامتر  $E_{py}$  برای تغییرشکل‌های کوچک ثابت است و با افزایش عمق کاهش می‌یابد. مدول عکس‌العمل یک شمع تحت اثر بارگذاری جانبی نامیده می‌شود. به دلیل اینکه مقادیر مربوط به مدول عکس‌العمل برای یک خاک مشخص نیز متفاوت است، نمی‌توان آن را جز خصوصیات منحصر به فرد هر خاک در نظر گرفت. برای یک مسئله مشخص عملی، مدول عکس‌العمل با ادامه روند سعی و خطا، به صورت نقطه به نقطه در طول شمع اصلاح می‌شود. روند سعی و خطا در محاسبات باعث سازگاری بین تغییرشکل‌های شمع و مقاومت خاک خواهد شد. [Reese & Van Impe 2011]



شکل ۱۱-۲ یک منحنی عمومی  $p-y$  [Reese & Van Impe 2011]

قسمتی از منحنی در شکل ۱۱-۲ (الف)، از نقطه ۱ تا ۲ نشان‌دهنده افزایش مقدار مقاومت خاک ناشی از افزایش تغییرشکل است. این رفتار در حقیقت بخش غیرخطی از منحنی تنش - کرنش درجا را نشان می‌دهد. پیشنهادات زیادی برای پیش‌بینی بخش ۱-۲ از منحنی  $p-y$  ارائه شده است، با این

حال هیچ روش تحلیلی مورد قبولی وجود ندارد. خط مستقیم از بخش افقی منحنی  $p-y$  نشان دهنده رفتار پلاستیک خاک درجا بدون کاهش در مقاومت خاک با افزایش تغییرشکل می‌باشد. [Reese & Van Impe 2011]

مدل‌های مختلفی برای طراحی شمع‌های تحت اثر بارگذاری جانبی وجود دارد، که بعضی از آن‌ها را می‌توان به عنوان مکمل برای روش‌های اصلی مطرح شده در ذیل استفاده شود. روش‌های اصلی برای مدل کردن شمع‌های منفرد تحت اثر بارگذاری جانبی عبارت است از:

- شمع و خاک الاستیک.
- شمع الاستیک و اجزای محدود برای خاک.
- شمع صلب و خاک پلاستیک.
- روش بارهای مشخصه.
- شمع غیرخطی و منحنی  $p-y$  برای خاک. [Reese & Van Impe 2011]

در این جا به جهت رعایت اختصار، در مورد مدل شمع غیرخطی و منحنی  $p-y$  بحث خواهد شد.

## ۱-۲-۸-۲ شمع غیرخطی و مدل $p-y$ برای خاک

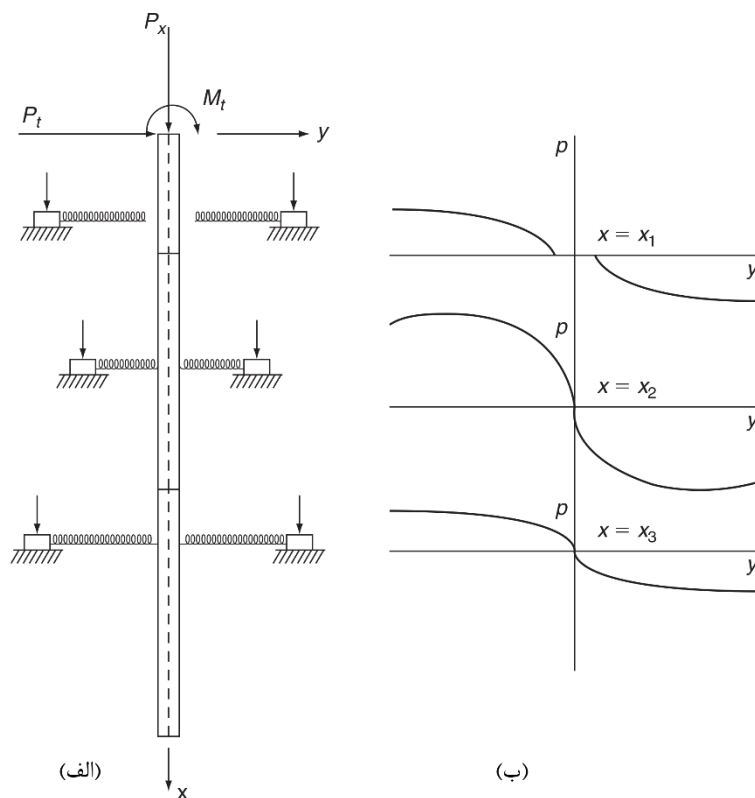
توجه به مدل نشان داده شده در شکل ۲-۱۲، در اواخر دهه ۴۰ و ۵۰ میلادی شکل گرفت، هنگامی که کمپانی‌های انرژی، سازه‌های دور از ساحل که باید در برابر بارهای افقی ناشی از موج مقاومت می‌کرد، را طراحی کردند. در همان زمان، سازه‌های دور از ساحل در ایالات متحده آمریکا برای اهداف نظامی ساخته شد. معادلات دیفرانسیل مربوطه در سال ۱۹۴۱ توسط تیموشنکو<sup>۵</sup> و محققان دیگر بیان

---

<sup>۵</sup> Timoshenko

شد. هتنی<sup>۶</sup> در سال ۱۹۴۶ روشی برای حل تیر بر روی بستر با رفتار خطی ارائه کرد. در سال ۱۹۴۸،

پالمر<sup>۷</sup> و تامپسون روشی عددی برای حل معادلات دیفرانسیل غیرخطی ارائه کردند.



شکل ۲-۱۲ یک مدل برای شمع منفرد تحت اثر بارهای جانبی با استفاده از منحنی های  $p-y$  [Reese & Van Impe 2011]

صنعت دور از ساحل در دهه ۵۰ میلادی کار خود را با انجام آزمایش‌های با مقیاس واقعی بر روی شمع‌های مجهز به تجهیزات اندازه‌گیری آغاز کرد. با گسترده‌گی استفاده از کامپیوترهای دیجیتال در همان زمان، توسعه این روش با استفاده از آزمایش‌های با مقیاس واقعی و کامپیوترهای دیجیتال امکان‌پذیر شد.

<sup>۶</sup> Hetenyi

<sup>۷</sup> Palmer

متلاک و همکارانش<sup>۸</sup> در سال ۱۹۵۶ یک روش بسیار دقیق برای اندازه‌گیری لنگر خمشی و تفسیر داده‌های آن ارائه دادند. یکپارچگی دو دسته داده‌های مربوط به لنگر خمشی مقادیر دقیق تغییرشکل را به همراه دارد، اما تکنیکی خاص برای مقادیر دقیق مقاومت خاک نیاز بود. نتیجه این تحقیقات اولین مجموعه از توصیه‌های جامع برای پیش‌بینی رفتار یک شمع تحت اثر بارگذاری جانبی بود.

همان‌طور که در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است، بارگذاری بر روی شمع در حالت کلی به صورت دوبعدی می‌باشد، بنابراین فرض بر عدم حضور پیچش یا لنگر خمشی خارج از صفحه است. خطوط افقی موجود در طول شمع برای نشان دادن تفاوت در مقطع شمع می‌باشد؛ به طور مثال یک مقطع فلزی لوله‌ای با ضخامت جداره متفاوت در طول شمع. با استفاده از یک روش تفاضل محدود، این امکان وجود دارد که سختی خمشی متفاوت را لحاظ کرد. همچنین این روش اجازه می‌دهد مقادیر سختی خمشی غیرخطی و تابع مقادیر لنگر خمشی محاسبه شده باشد. برای بسیاری از مسائل تغییر سختی خمشی ضروری نیست، به دلیل این‌که بارگذاری به نقطه‌ای که احتمال تشکیل مفصل پلاستیک وجود دارد، منتقل خواهد شد. بار محوری موجود در شکل به دلیل تاثیر بر لنگر خمشی در نظر گرفته شده است، و نه به دلیل محاسبه طول مورد نیاز برای تحمل بار محوری.

خاک اطراف شمع با مجموعه‌ای از مکانیسم‌ها که نشان دهنده رفتار غیرخطی مقاومت خاک (p) تابعی با تغییرشکل شمع (y)، جایگزین می‌شود. این مکانیسم‌ها و منحنی‌های نشان‌دهنده رفتار آن‌ها، در شکل با فاصله از هم قرار گرفته‌اند، اما در اصل با تغییر عمق به طور مداوم تغییر می‌کند. همان‌طور که دیده می‌شود، منحنی‌های p-y به طور کامل با تغییر فاصله (x) و تغییرشکل شمع (y) تغییر می‌کند.

---

<sup>۸</sup> Matlock et al.



روش  $p-y$  به صورت دوطرفه عمل می‌کند و یک وسیله عملی برای طراحی است. این روش بیش از حدود ۴۰ سال پیش مطرح شده است. دو توسعه در دهه ۵۰ میلادی استفاده از این روش را ممکن ساخت: کامپیوترهای دیجیتالی برای حل معادله دیفرانسیل غیرخطی از مرتبه ۴ برای تیر-ستون؛ و کرنش‌سنج‌های قرائت از راه دور برای به دست آوردن منحنی رفتار خاک از آزمایشات. این روش بیشتر از تحقیقات با حمایت مالی صنعت نفت، در هنگام مواجهه با طراحی سکوه‌های متکی بر شمع تحت اثر نیروی‌های بزرگ ناشی از امواج و باد، نشئت گرفته است. ضوابط و راهنمای طراحی چنین شمع‌هایی با روش  $p-y$  در آیین‌نامه‌هایی نظیر انسیتو نفت آمریکا<sup>۹</sup> و آیین‌نامه نروژ<sup>۱۰</sup> ارائه شده است.

استفاده از این روش به طراحی فونداسیون سازه‌های ساحلی نیز راه پیدا کرده است. این روش با موفقیت در طراحی شمع‌ها استفاده شده است. با این حال تحقیقات ادامه دارد و به خصوص توسعه‌هایی در زمینه تعیین مشخصات انواع خاک‌های ویژه قابل پیش‌بینی است. [Reese & Van Impe 2011]

## ۹-۲ رویکرد آنالیز گروه شمع

مدل‌سازی رفتار گروه شمع از اهمیت به‌سزایی برخوردار است، زیرا در عمل شمع‌ها به صورت گروهی استفاده می‌شوند. رفتار گروه شمع تحت اثر دو نوع اندرکنش می‌باشد:

- اندرکنش بین شمع‌های موجود در گروه شمع به دلیل فاصله مرکز به مرکز کم. (اندرکنش

شمع-خاک-شمع<sup>۱۱</sup>)

<sup>۹</sup> American Petroleum Institute

<sup>۱۰</sup> Det Norske Veritas

<sup>۱۱</sup> Pile – Soil – Pile Interaction

- اندرکنش بین شمع‌های موجود در گروه شمع و سرشمع<sup>۱۲</sup>، جهت توزیع بارگذاری از سرشمع به هر یک از شمع‌ها.

در اندرکنش نوع اول، نیروهای مربوطه توسط خاک انتقال پیدا می‌کنند، در حالی که در اندرکنش نوع دوم نیروها توسط روسازه<sup>۱۳</sup> (در اینجا سرشمع) منتقل می‌شود. اگر فاصله مرکز به مرکز بین شمع‌ها در گروه شمع به اندازه کافی زیاد باشد، اندرکنش شمع-خاک-شمع ناچیز خواهد بود و راه‌حلی برای پیدا کردن نیروی جانبی، محوری و یا لنگر خمشی هر یک از شمع‌ها در گروه مورد استفاده قرار می‌گیرد. [Reese & Van Impe 2011]

## ۲-۹-۱-۲ مروری بر تئوری های گروه شمع با فاصله مرکز به مرکز زیاد

در ابتدا توسعه روش‌های محاسباتی برای گروه شمع‌ها به دلیل کمبود اطلاعات در مورد رفتار شمع منفرد، محدود شده بود. به منظور رفع نیازهای عملی طراحی سازه با گروه شمع، روش‌های مختلف محاسباتی با پیش‌فرض‌های منطقی که امکان تجزیه و تحلیل را فراهم می‌کند، توسعه داده شده است. هرنیکف<sup>۱۴</sup> در سال ۱۹۵۰ میلادی اولین روش جامع و مدرن از نظر سازه‌ای را در فضای دوبعدی ارائه داد. او اثر سختی محوری، برشی و چرخشی شمع‌ها را بر روی سرشمع در نظر گرفت. یکی از فرضیات محدودکننده این مدل، یکسان بودن رابطه بار-تغییرشکل برای تمامی شمع‌ها بود. هرنیکف شمع تحت اثر بارگذاری محوری را با یک ستون الاستیک مستقل جایگزین کرد. شمع تحت بار جانبی به صورت یک تیر الاستیک بر روی یک بستر الاستیک با سختی ثابت در نظر گرفته شد. با وجود این

---

<sup>۱۲</sup> Pile Cap

<sup>۱۳</sup> Superstructure

<sup>۱۴</sup> Hrenikoff

فرضیات خام از رفتار شمع، این روش قابل توجه بوده، زیرا به صورت بالقوه راهکاری تحلیلی برای سیستم اندرکش خاک و شمع ارائه داده است. روش هرنیکف شامل در نظر گرفتن ضرایب تاثیر هر یک از شمع‌های منفرد در قالب ثابت فنریت آن‌ها و جمع این ضرایب برای به دست آوردن تغییرشکل سرشمع بود. تقریباً تمامی روش‌های بعد از هرنیکف، رویکرد او را دنبال می‌کنند.

اسپلاند<sup>۱۵</sup> (۱۹۵۶) روش ماتریسی را برای فضای دوبعدی و سه‌بعدی فرمول‌بندی کرد. روش او با محاسبه ماتریس سختی برای به دست آوردن ماتریس انعطاف‌پذیری، شروع می‌شد. اسپلاند در تلاشی برای ساده‌سازی ماتریس انعطاف‌پذیری نهایی، مرکز گروه شمع را که در آن ماتریس انعطاف‌پذیر قطری می‌شد، تعریف کرد. او بر اهمیت آرایش شمع‌ها برای طراحی یک گروه شمع اقتصادی تاکید و تصریح کرد که روش مرکز گروه شمع درک بهتری از عوامل هندسی موجود در مسئله ارائه می‌دهد.

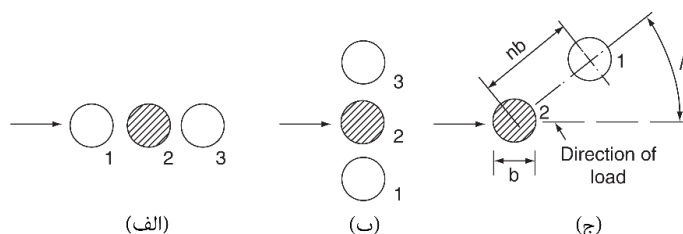
ریس و متلاک (۱۹۶۰ و ۱۹۶۶) روشی را برای تلفیق تحلیل گروه شمع‌ها با شمع‌های تحت اثر بار جانبی به روش تفاضل محدود ارائه دادند. پیش‌فرض روش ریس و متلاک استفاده از رایانه است. روش تفاضل محدود در شمع‌های تحت اثر بار جانبی می‌تواند شمع‌های با قطر مختلف و سختی را در یک پروفیل خاک غیرخطی در نظر بگیرد. در این روش می‌توان رفتار هر سیستم خاکی را به صورت تحلیلی یا عددی تعریف کرد. هر نوع شرایط مرزی در سرشمع قابل ارائه خواهد بود. فرمول‌بندی معادلات مربوط به این روش برای تغییرشکل سرشمع همانند روش هرنیکف بر پایه ضرایب تاثیر بود. اهمیت روش ریس و متلاک در این واقعیت نهفته است که علاوه بر در نظر گرفتن روابط غیرخطی میان بارها و تغییرشکل‌ها در سرشمع، می‌تواند رفتار سرشمع را با افزایش بار تا زمانی که سرشمع به علت جابجایی بیش از حد گسیخته شود، پیش‌بینی کند. [Reese, et al. 2016]

---

<sup>۱۵</sup> Asplund

## ۲-۹-۲ رفتار گروه شمع با فاصله مرکز به مرکز کم

تأثیر فاصله بین شمع‌ها می‌تواند با اشاره به شکل ۲-۱۳ نشان داده شود. فرض بر این است که تمام شمع‌های نشان داده شده در شکل به یک سرشمع و یا روسازه متصل شده‌اند و تغییرشکل جانبی تمامی شمع‌ها نزدیک به هم می‌باشد. شکل ۲-۱۳ (الف) سه شمع با فاصله نزدیک در یک خط را نشان می‌دهد. واضح است که مقاومت خاک در برابر شمع شماره ۲ به دلیل حضور شمع‌های شماره ۱ و ۳، از یک شمع منفرد ایزوله کمتر است. شمع شماره ۲ را می‌توان در سایه شمع شماره ۳ در نظر گرفت. اثر سایه‌اندازی<sup>۱۶</sup> در مقاومت خاک به وضوح به فاصله بین شمع‌ها بستگی دارد.



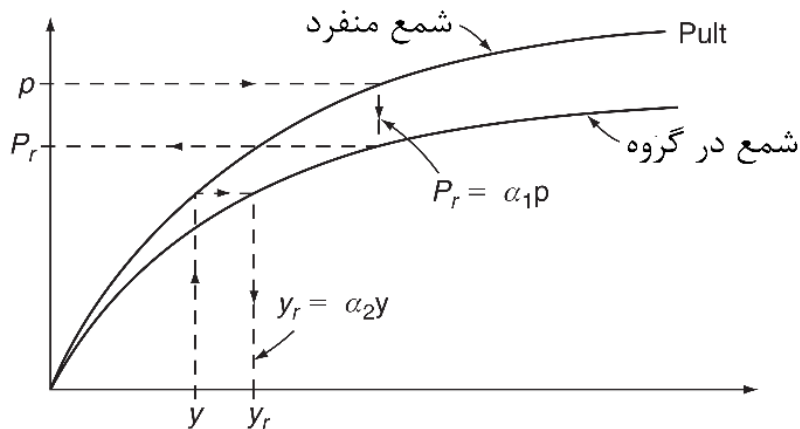
شکل ۲-۱۳ اثر فاصله بین شمع‌ها در اندرکنش شمع-خاک-شمع [Reese & Van Impe 2011]

به طور مشابه، در شکل ۲-۱۳ (ب) شمع شماره ۲ تحت تأثیر شمع‌های شماره ۱ و ۳ قرار دارد. اثر لبه‌ای<sup>۱۷</sup> در مقاومت خاک به فاصله شمع‌ها در گروه بستگی دارد.

برخی از محققان از تئوری الاستیسیته یا نسخه اصلاح شده آن برای توسعه ضرایب تأثیر وابسته به هندسه نشان داده شده در شکل ۲-۱۳ (ج) استفاده کرده‌اند. این ضرایب نشان می‌دهد که اثر شمع شماره ۱ بر شمع شماره ۲ را می‌توان به فاصله و زاویه بین شمع‌ها نسبت داد.

<sup>۱۶</sup> Shadow-effect

<sup>۱۷</sup> Edge-effect



شکل ۱۴-۲ اصلاح مقاومت خاک برای در نظر گرفتن اندرکنش شمع-خاک-شمع در گروه شمع [Reese & Van Impe 2011]

تحقیقات از آزمایش‌های با مقیاس واقعی، در توسعه عبارات کمی که بتواند اثر فاصله شمع‌ها را در اندرکنش شمع خاک نشان دهد، همچنان ادامه دارد. تا به حال هیچ نتیجه‌گیری قطعی به دست نیامده است، اما یک روش که به نظر می‌رسد مفید باشد، در شکل ۱۴-۲ نشان داده شده است. برای شمع‌هایی مانند شمع شماره ۲ در شکل ۱۳-۲، منحنی  $p-y$  گروه شمع با ضرب یک ضریب کاهش‌دهنده در مقاومت و یا یک ضریب افزایشی در تغییر شکل منحنی  $p-y$  یک شمع منفرد ایزوله به دست می‌آید. در نتیجه مقدار نیرویی که شمع شماره ۲ جذب می‌کند کمتر از یک شمع منفرد خواهد بود.

[Reese & Van Impe 2011]



# فصل ۳ شمع منفرد و گروه شمع تحت اثر بار

## جانبی-روش $p-y$

### ۱-۳ مقدمه

در این فصل به بررسی روش‌های مورد استفاده در مدل‌سازی پرداخته خواهد شد. ابتدا معادله دیفرانسیل تیر-ستون بر روی بستر و حل آن به روش تفاضل محدود ارائه خواهد شد. بعد از آن با بررسی دو پارامتر مهم از منحنی‌های  $p-y$ ، معادلات مرسوم برای انواع خاک بررسی خواهد شد. در انتها با مروری بر مکانیک گروه شمع و اثر اندرکنش شمع خاک شمع در گروه شمع با فاصله نزدیک به بررسی روش مورد استفاده در گروه شمع پرداخته خواهد شد.

### ۲-۳ معادله دیفرانسیل تیر-ستون بر روی بستر

در اغلب موارد بار محوری روی یک شمع بارگذاری شده به صورت جانبی، تاثیر نسبتاً کوچک و کمی در لنگرهای خمشی شمع دارد. با این حال مواردی وجود دارد که در آن باری که باعث کمانش شمع می‌شود، مورد نیاز است، بنابراین بار محوری در به دست آوردن معادله دیفرانسیل گنجانده شده است. معادله دیفرانسیل تیر-ستون بر روی یک بستر برای اولین بار توسط هتنی (۱۹۴۶) به دست آمده است.

فرض اولیه بر این است که یک نوار بر روی یک بستر الاستیک به صورت جانبی بارگذاری شده است و یک جفت نیروی فشاری  $P_x$  بر سطح مقطع انتهایی دو سر این نوار عمل می‌کند.

اگر یک المان بی‌نهایت کوچک از این نوار به طول  $dx$  مطابق شکل ۱-۳ در نظر گرفته شود، تعادل لنگرهای خمشی با صرف نظر کردن از اثرات مرتبه دوم، به معادله زیر منجر می‌شود:

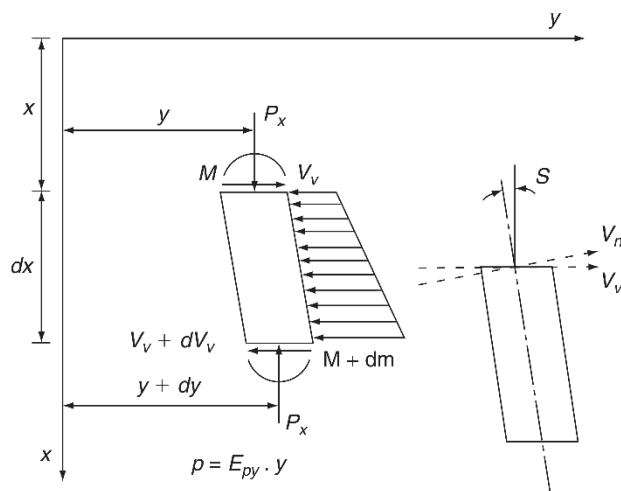
$$(M + dM) - M + P_x dy - V_v dx = 0 \quad ۱-۳$$



یا

$$\frac{dM}{dx} + P_x \frac{dy}{dx} - V_v = 0$$

۲-۳



شکل ۱-۳ یک المان کوچک از تیر-ستون

با مشتق گرفتن از معادله ۲-۳ نسبت به x معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{d^2 M}{dx^2} + P_x \frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{dV_v}{dx} = 0$$

۳-۳

با در نظر گرفتن تعاریف زیر به صورت:

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4}$$

۴-۳

$$\frac{dV_v}{dx} = p$$

۵-۳

$$p = E_{py} y$$

۶-۳

معادله ۳-۳ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} + P_x \frac{d^2 y}{dx^2} + E_{py} y = 0$$

۷-۳

جهت نیروی برشی  $V_v$  در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. نیروی برشی در صفحه عمود بر خط تغییرشکل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$V_n = V_v \cos S - P_x \sin S \quad ۸-۳$$

به دلیل اینکه  $S$  معمولاً کوچک می‌باشد:

$$\cos S = 1 \quad ۹-۳$$

$$\sin S = \tan S = \frac{dy}{dx} \quad ۱۰-۳$$

بنابراین معادله ۸-۳ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$V_n = V_v - P_x \frac{dy}{dx} \quad ۱۱-۳$$

$V_n$  به طور معمول در محاسبات استفاده می‌شود، اما  $V_v$  را می‌توان با استفاده از معادله ۱۱-۳ که در آن  $dy/dx$  برابر با چرخش ( $S$ ) می‌باشد، محاسبه نمود.

این امکان که یک نیروی توزیع شده ( $W$ ) در واحد طول شمع در قسمت بالای شمع اعمال شود، در حل بسیاری از مسائل عملی مفید خواهد بود. در نتیجه معادله دیفرانسیل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} + P_x \frac{d^2 y}{dx^2} - p + W = 0 \quad ۱۲-۳$$

که در آن؛  $P_x$ : نیروی محوری در شمع،  $y$ : تغییرشکل جانبی در شمع در نقطه  $x$  در طول شمع،  $p$ : عکس‌العمل خاک در طول شمع،  $E_p I_p$ : سختی خمشی و  $W$ : نیروی توزیع شده در طول شمع می‌باشد.

روابط دیگری که برای آنالیز شمع تحت اثر بار جانبی نیاز است به شرح زیر می‌باشد:

$$E_p I_p \frac{d^3 y}{dx^3} + P_x \frac{dy}{dx} = V \quad ۱۳-۳$$

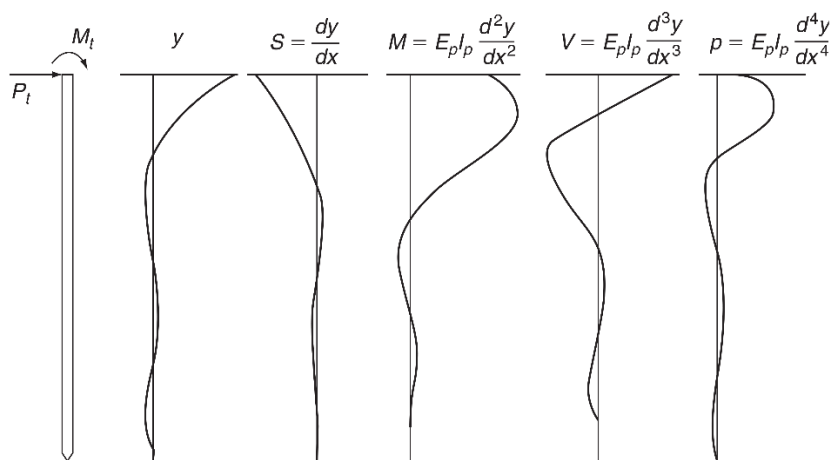
$$E_p I_p \frac{d^2 y}{dx^2} = M \quad ۱۴-۳$$

$$\frac{dy}{dx} = S \quad ۱۵-۳$$

که در آن؛  $V$ : برش در شمع،  $M$ : لنگر خمشی در شمع و  $S$ : شیب منحنی الاستیک که توسط محور شمع تعیین می‌شود، می‌باشد.

به استثنای بار محوری  $P_x$ ، جهت‌های قراردادی همانند آن‌هایی هستند که معمولاً در مکانیک تیرها استفاده می‌شوند، با چرخش  $۹۰^\circ$  درجه‌ای ساعت‌گرد محور شمع از محور تیر. بار محوری به طور معمول در معادلات مربوط به تیر ظاهر نمی‌شود.

یک جواب از معادله دیفرانسیل اشاره شده، مجموعه‌ای از منحنی‌ها را نتیجه می‌دهد، که یک نمونه آن در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. روابط ریاضی ارائه شده در شکل مذکور برای حالتی است که بار محوری اعمال نشده است.



شکل ۲-۳ نمونه‌ای از نتایج حاصل از یک جواب کامل [Reese & Van Impe 2011]

فرضیاتی که در هنگام ایجاد معادله دیفرانسیل انجام می‌شود، به شرح زیر می‌باشد:

- شمع مستقیم و دارای یک مقطع عرضی ثابت است.
- شمع دارای یک محور تقارن طولی است، بارها و عکس‌العمل‌ها در این صفحه قرار دارند.
- مصالح شمع همگن و ایزوتروپیک می‌باشد.
- حد متناسب مصالح شمع از حد مجاز تجاوز نکرده باشد.
- مدول الاستیسیته مصالح شمع در کشش و فشار یکسان باشد.
- انحرافات عرضی شمع کوچک باشد.
- شمع تحت اثر بارهای دینامیکی قرار نگرفته باشد.
- تغییرشکل‌های ناشی از برش شمع کوچک باشد.

فرضیه انتهایی را می‌توان با استفاده از اصلاحات بیشتر در معادله دیفرانسیل حل کرد، با این حال خطاهای مربوط به حذف این شرایط معمولاً کوچک می‌باشد. روش‌های عددی این قابلیت که مصالح شمع از نوع غیرخطی باشند را نیز حل خواهد کرد. [Isenhower, et al. 2017]

### ۳-۳ حل معادله دیفرانسیل با استفاده از معادلات تفاضل محدود

حل معادله ۳-۱۲ برای تحلیل‌هایی که در عمل مواجه با آن امکان‌پذیر است، ضروری می‌باشد. فرمول‌بندی معادلات دیفرانسیل در شرایط عددی و حل آن، باعث بهبود جواب‌ها خواهد شد. معادلات حاصل پایه و اساس یک برنامه کامپیوتری می‌باشد که در عمل نیاز به آن ضروری است:

- اثر بار محوری در تغییرشکل و لنگر خمشی در نظر گرفته می‌شود و مشکل کمانش شمع برطرف خواهد شد.

- سختی خمشی شمع می تواند در طول شمع تغییر کند.

- و مهم تر از همه، عکس العمل خاک می تواند با تغییر شکل و فاصله از محور شمع تغییر کند.

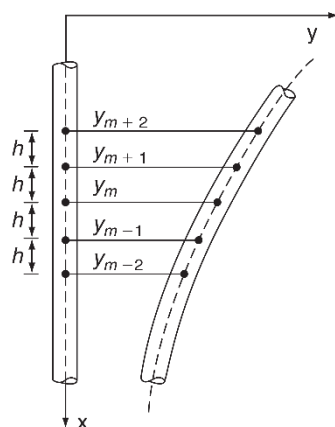
با توجه به شکل ۳-۳، اگر شمع به المان هایی به طول  $h$  تقسیم شود، معادله ۳-۱۲ به فرم تفاضل محدودی زیر منتج خواهد شد:

$$\begin{aligned}
 & y_{m-2}R_{m-1} + y_{m-1}(-2R_{m-1} - 2R_m + P_x h^2) + & ۱۶-۳ \\
 & y_m(R_{m-1} + 4R_m + R_{m-1} - 2P_x h^2 + E_{py} h^4) + \\
 & y_{m-1}(-2R_m - 2R_{m-1} + P_x h^2) + y_{m+2}R_{m-1} + W_m h^4 = 0
 \end{aligned}$$

که در آن

$$R_m = (E_p I_p)_m \quad ۱۷-۳$$

$R_m$ : سختی خمشی شمع در نقطه  $m$  می باشد.



شکل ۳-۳ نمایی از یک شمع تغییر شکل یافته [Reese & Van Impe 2011]

این فرض که مقادیر بار محوری در عمق ثابت است، در معادله ۳-۱۶ ضمنی است. البته این فرضیه به ندرت کاملاً صحیح می باشد. با این حال تجربه نشان داده است که حداکثر لنگر خمشی معمولاً در یک فاصله نسبتاً کوتاه از عمق مدفون شمع در نقطه ای که بار محوری تقریباً کمینه است، خواهد بود.

مقادیر نیروی محوری به استثنای بار کمانش شمع، تاثیر کمی در بزرگی تغییرشکلها و لنگرهای خمشی دارد و منجر به این نتیجه می‌شود که فرض ثابت بودن بار محوری در کل معتبر می‌باشد.

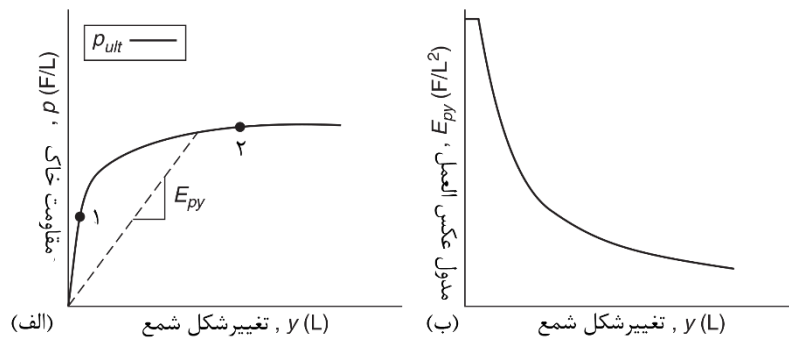
اگر شمع به تعداد  $n$  المان با فاصله یکسان تقسیم شود، تعداد  $n + 1$  معادله نظیر آن چه در معادله ۳-۱۶ آمده، قابل ارائه خواهد بود. اگر دو معادله که شرایط مرزی را در انتهای شمع و دو معادله برای شرایط مرزی سر شمع نوشته شود، تعداد  $n + 5$  معادله برای حل همزمان تعداد  $n + 5$  پارامتر نامعلوم وجود خواهد داشت. مجموعه‌ای از معادلات جبری در روش مرسوم با استفاده از ماتریس‌ها قابل حل خواهد بود.

دو شرط مرزی در انتهای شمع بر مبنای برش و لنگر خمشی می‌باشد. اگر وجود بار محوری خارج از مرکز که باعث ایجاد لنگر خمشی در انتهای شمع می‌شود، صرف نظر شود، لنگر خمشی در انتهای شمع برابر با صفر خواهد بود. اعتقاد بر این است که فرضیه صفر بودن لنگر خمشی در تمامی موارد هیچ خطایی ایجاد نمی‌کند، مگر برای شمع‌های صلب کوتاه که ظرفیت باربری آنها بر عهده‌ی انتهای شمع می‌باشد. موردی که در آن لنگر خمشی در انتهای شمع وجود دارد غیر معمول می‌باشد و در اینجا ارائه نخواهد شد. دومین شرط مرزی در انتهای شمع مربوط به برش می‌باشد. فرض بر این است که مقاومت خاک به علت تنش‌های برشی در انتهای شمع‌های کوتاه به دلیل تغییرشکل رخ می‌دهد. به علاوه تصور می‌شود که اطلاعاتی می‌تواند توسعه داده شود که برش در انتهای شمع را به عنوان تابعی از تغییرشکل انتهای شمع بیان کند.

معادلات برای شرایط مرزی ابتدای شمع در چهار مجموعه قابل تعریف می‌باشد که در اینجا از ذکر آنها خودداری شده است و در مرجع مورد نظر قابل مطالعه می‌باشد. [Reese & Van Impe 2011]

### ۴-۳ راه‌حل‌های تحلیلی در زمینه منحنی‌های $p-y$

همان‌طور که در شکل ۴-۳ (الف) نشان داده شده است، یک منحنی  $p-y$  عمومی برای یک عمق مشخص از خاک، توسط یک خط مستقیم از مبدا به نقطه ۱ و یک مقاومت نهایی  $p_{ult}$  فراتر از نقطه ۲ مشخص می‌شود. راه‌حل‌های تحلیلی بر اساس مشخصات خاک در این بخش برای این دو جنبه مهم از منحنی‌های  $p-y$  ارائه شده است. همان‌طور که بعداً نیز نشان داده می‌شود، توصیه‌ها برای فرمول‌بندی منحنی‌های  $p-y$  بر اساس نتایج آزمایش‌های با مقیاس واقعی است، اما راه‌حل‌های تحلیلی برای تفسیر این آزمایش‌ها مفید هستند.



شکل ۴-۳ یک منحنی عمومی  $p-y$  [Reese & Van Impe 2011]

### ۱-۴-۳ سختی اولیه منحنی‌های $p-y$

همان‌طور که در شکل ۴-۳ (ب) دیده می‌شود، بخش‌هایی از کل منحنی  $p-y$  که توسط بخش اولیه منحنی  $p-y$  اشغال شده، کوچک است و در بیشتر تحلیل‌ها تاثیر کمی دارد. آن قسمت از تغییرشکل شمع که در آن بخش اولیه منحنی  $p-y$  موثر می‌باشد، در فاصله قابل ملاحظه‌ای از بستر رخ می‌دهد و نیروهای افقی حاصل از آن در خاک اثر کمی در پاسخ شمع دارند. در بیشتر طراحی‌ها تنش‌ها کنترل‌کننده هستند.

محاسبه تغییرشکل‌ها تحت بارهای سرویس، اهمیت بخش اولیه منحنی  $p-y$  را مهم‌تر جلوه خواهد داد. با این حال، حتی در چنین مواردی بعید است که بخش اولیه منحنی‌های  $p-y$  نقش مهمی ایفا کند. از سوی دیگر، مواردی وجود دارد که بخش اولیه منحنی  $p-y$  در آن نیاز به توجه دقیق می‌باشد. دو مورد را می‌توان شناسایی کرد: یکی پیش‌بینی رفتار تحت اثر بارهای ارتعاشی و دیگری طراحی شمع در خاک‌های ترد. سنگ‌ها مصالح تردی می‌باشند و هنگامی که تغییرشکل‌ها به نقطه ۱ می‌رسد، باعث از دست دادن مقاومت ناگهانی خواهد شد. بنابراین رفتار منحنی  $p-y$  متفاوت با شکل ۳-۴ خواهد شد.

به عنوان یک وسیله برای ایجاد مقادیر مربوط به بخش اولیه منحنی  $p-y$ ، می‌توان از برخی مفاهیم ابتدایی مکانیک خاک‌ها استفاده کرد. معادله ۳-۱۸ که از تئوری الاستیسیته برگرفته شده، می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای بیان شیب اولیه منحنی  $p-y$  مورد استفاده قرار گیرد:

$$\rho = qbl_p \frac{1 - \nu^2}{E_s} \quad ۱۸-۳$$

که در آن؛  $\rho$ : نشست میانگین بستر با عرض  $b$ ،  $q$ : فشار بستر،  $I_p$ : ضریب تاثیر،  $\nu$ : ضریب پوآسون و  $E_s$ : مدول الاستیسیته می‌باشد.

معادله ۳-۱۸ برای بارگذاری عمودی است، اما اگر مقاومت خاک،  $p$  برابر با  $qb$  و تغییرشکل شمع با  $\rho$  در نظر گرفته شود، با ثابت در نظر گرفتن  $I_p$  و  $\nu$  بر اساس پیشنهاد اسکمپتون<sup>۱</sup>، معادله ۳-۱۸ را می‌توان با صورت زیر بازنویسی کرد:

<sup>۱</sup> Skempton



$$\frac{qb}{\rho} = \frac{p}{y} = E_{py} = \frac{E_s}{I_p(1-\nu^2)} = \xi E_s \quad ۱۹-۳$$

که در آن  $\xi$  یک ثابت است. با وجود اینکه معادله ۱۹-۳ پیشنهاد می‌دهد که  $E_{py}$  رابطه قابل تعریفی با  $E_s$  دارد، این وابستگی دقت بیشتری برای مقادیر اولیه مربوط به منحنی  $p-y$  خواهد داشت. در نتیجه:

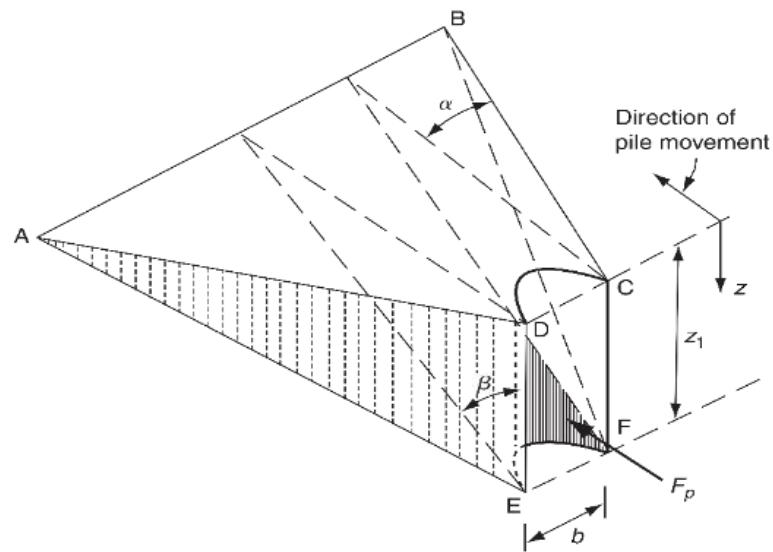
$$E_{py \max} = \xi_i E_{s \max} \quad ۲۰-۳$$

که در آن  $E_{py \max}$  و  $E_{s \max}$  شیب اولیه منحنی  $p-y$  و منحنی تنش-کرنش می‌باشد، و  $\xi_i$  مقداری ثابت برای نشان دادن مقادیر اولیه می‌باشد. [Reese & Van Impe 2011]

### ۲-۴-۳ محاسبه مقادیر نهایی مقاومت $p_{ult}$

پیش‌بینی مقادیر نهایی مقاومت خاک به عنوان تابعی از نوع خاک و عمق زیر سطح زمین از اهمیت اساسی برخوردار است. روش‌های تحلیلی همان‌طور که در این بخش اشاره خواهد شد، برای مقایسه با مقادیری که توسط آزمایش‌ها تعیین می‌شوند، مهم هستند. دو روش ساده برای حل این مشکل با استفاده از تعادل نیروها وجود دارد.

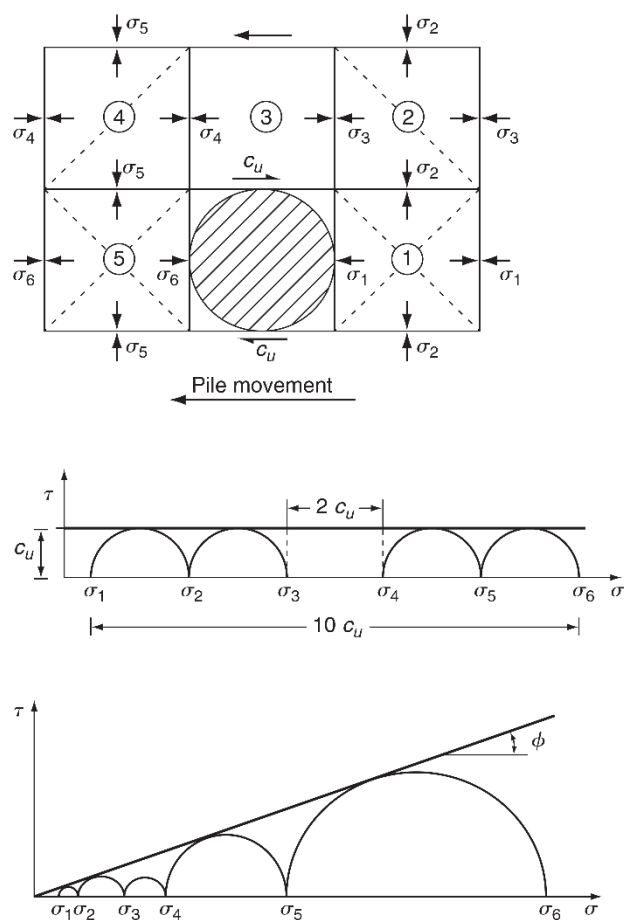
اولین مدل در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. نیروی  $F_p$  با جمع مولفه‌های افقی مقاومت در سطح لغزش، با توجه به وزن گوه خاک محاسبه می‌شود. جمع مقادیر  $F_p$  با توجه به عمق از سطح زمین می‌تواند بیانگر مقاومت نهایی در امتداد شمع باشد. سادگی مدل واضح است، با این وجود، حل‌های حاصل باعث ایجاد معادله‌ای خواهد شد، زیرا قطر شمع، عمق از سطح زمین و مشخصات خاک وارد معادله می‌شود.



شکل ۳-۵ مدل خاک در سطح زمین برای محاسبه مقاومت نهایی خاک [Reese & Van Impe 2011]

مدل دوم در شکل ۳-۶، یک شمع استوانه‌ای و پنج بلوک خاک را نشان می‌دهد. فرض بر این است که حرکت شمع باعث گسیختگی بلوک ۵ توسط برش می‌شود. حرکت خاک باعث گسیختگی بلوک ۴ توسط برش، بلوک ۳ توسط لغزش و بلوک ۱ و ۲ توسط برش خواهد شد. مقاومت نهایی  $p_{ult}$  را می‌توان با مشاهده تفاوت تنش  $\sigma_1$  و  $\sigma_6$  پیدا کرد. این مدل ساده است ولی مجدداً فرم معادلاتی را برای محاسبه مقاومت نهایی به خود می‌گیرد. نمودارهای مور-کلومب برای توسعه معادلات گسیختگی خاک در جوار شمع‌ها در خاک‌های چسبنده و غیر چسبنده استفاده می‌شود. [Reese & Van Impe

2011]



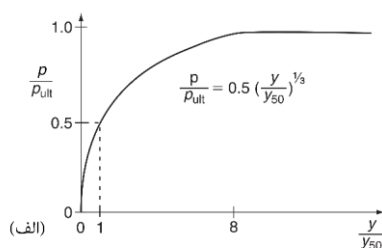
شکل ۳-۶ مود گسیختگی فرض شده خاک دور شمع [Reese & Van Impe 2011]

### ۳-۵ منحنی‌های $p-y$ برای رس‌ها

برای به دست آوردن منحنی  $p-y$  برای رس‌ها سه مجموعه توصیه وجود دارد. همه این توصیه‌ها بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌های با مقیاس واقعی با شمع‌های تجهیز شده با ابزارهای اندازه‌گیری می‌باشد.

### ۳-۵-۱ پاسخ رس نرم در حضور آب آزاد (Matlock, 1970)

آزمایش‌هایی که معیار توسعه روش گام به گام زیر شده، در مکان‌هایی با رس شناور و با مقدار کمی پیش‌تحکیم یافتگی انجام شده است. لایه رس به فاصله چندین برابر قطر شمع در زیر سطح زمین گسترش یافته بوده است.



شکل ۳-۷ نمودار مشخصه برای منحنی رس نرم در حضور آب آزاد (الف) برای بارگذاری استاتیکی [Reese & Van Impe 2011]

با توجه به شکل ۳-۷ (الف) روش گام به گام برای بارگذاری استاتیکی به شرح زیر می‌باشد:

۱. بهترین برآورد احتمالی تغییرات مقاومت برشی زهکشی نشده  $c_u$  و وزن مخصوص شناور را به دست آورید. همچنین مقدار  $\varepsilon_{50}$ ، کرنش مربوط به نصف بیشترین اختلاف تنش اصلی، را به دست آورید. اگر هیچ منحنی تنش-کرنشی برای خاک در دسترس نیست، از مقادیر معمول جدول ۳-۱ استفاده کنید.

جدول ۳-۱ مقادیر نماینده  $\varepsilon_{50}$  برای رس‌های عادی تحکیم یافته [Reese & Van Impe 2011]

قوام رس	$\varepsilon_{50}$
نرم (Soft)	۰/۰۲
متوسط (Medium)	۰/۰۱
سخت (Stiff)	۰/۰۰۵

۲. مقاومت نهایی خاک در طول شمع را با استفاده از مقادیر کمتر از دو معادله زیر به دست می‌آید:

$$p_{ult} = \left[ 3 + \frac{\gamma' z}{c_u} + \frac{J}{b} z \right] c_u b \quad 21-3$$

$$p_{ult} = 9c_u b \quad 22-3$$

که در آن؛  $\gamma'$ : وزن مخصوص میانگین موثر از سطح زمین تا سطح منحنی  $p-y$ ،  $z$ : عمق از سطح

زمین تا سطح منحنی  $p-y$ ،  $c_u$ : مقاومت برشی در عمق موردنظر و  $b$ : عرض شمع می‌باشد.

۳. تغییرشکل  $y_{50}$ ، در نیمی از مقاومت نهایی خاک را با استفاده از معادله زیر به دست آورید:

$$y_{50} = 2.5\varepsilon_{50}b \quad 23-3$$

۴. نقاطی که منحنی  $p-y$  را توصیف می‌کند از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{p}{p_{ult}} = 0.5 \left( \frac{y}{y_{50}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad 24-3$$

مقادیر مقاومت خاک  $p$  در تغییرشکل‌های بزرگتر از هشت برابر تغییرشکل  $50\%$  ( $8y_{50}$ )، ثابت باقی می‌ماند.

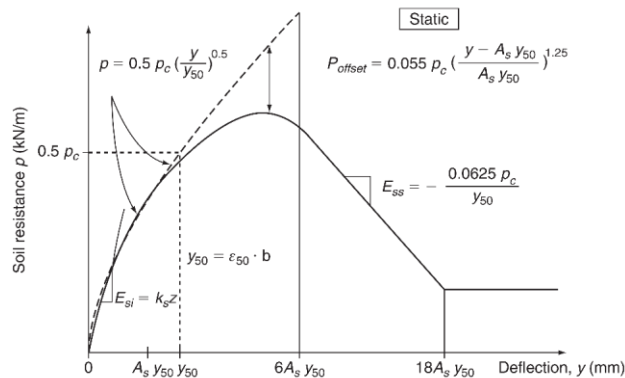
### ۲-۵-۳ پاسخ رس سخت در حضور آب آزاد (Reese, et al, 1975)

روش گام به گامی که در ادامه آورده شده، با توجه به شکل ۳-۸ برای بارگذاری استاتیکی می‌باشد.

آزمایش در سایت‌هایی که معیار توسعه روابط این بخش بوده، کاهش مقاومت زیادی خصوصاً در

بارگذاری چرخه‌ای را نشان می‌دهند. در نتیجه پیشنهادات برای بارهای چرخه‌ای ممکن است برای

بسیاری از رس‌ها نتایج محافظه‌کارانه‌ای به همراه داشته باشد.



شکل ۳-۸ نمودار مشخصه برای منحنی p-y برای بارگذاری استاتیکی رس سخت در حضور آب آزاد [Reese & Van Impe 2011]

۱. مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده  $c_u$ ، وزن مخصوص غوطه‌ور  $\gamma'$ ، قطر شمع  $b$  و عمق مورد نظر برای منحنی p-y را به دست آورید.
۲. مقاومت برشی زهکشی نشده میانگین  $c_a$  برای کل عمق تا  $z$  و مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده  $c_u$  در عمق  $z$  را به دست آورید.
۳. مقدار مقاومت نهایی خاک در طول شمع را به استفاده از مقادیر کوچکتر دو معادله زیر به دست آورید:

$$p_{ct} = 2c_a b + \gamma' b z + 2.83c_a z \quad ۲۵-۳$$

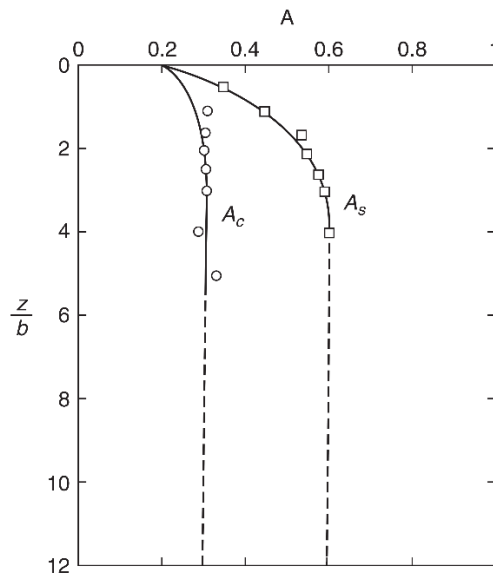
$$p_{cd} = 11c_u b \quad ۲۶-۳$$

۴. مقدار مناسب برای پارامتر  $A_s$  (استاتیکی) را با توجه شکل ۳-۹ برای یک عمق مشخص بدون بعد به دست آورید.

۵. قسمت خطی اولیه منحنی p-y را با استفاده از رابطه زیر به دست آورید:

$$p = (k_s z) y \quad ۲۷-۳$$

مقدار مناسب  $k_s$  را از جدول ۳-۲ انتخاب کنید.



شکل ۳-۹ مقادیر  $A_c$  و  $A_s$  [Reese & Van Impe 2011]

جدول ۳-۲ مقادیر نماینده  $k_{py}$  برای رس‌های پیش تحکیم یافته [Reese & Van Impe 2011]

میانگین مقاومت برشی زهکشی نشده (kPa)			
	۵۰ - ۱۰۰	۱۰۰ - ۲۰۰	۳۰۰ - ۴۰۰
$k_{pys}$ (static) MN/m <sup>3</sup>	۱۳۵	۲۷۰	۵۴۰
$k_{pyc}$ (cyclic) MN/m <sup>3</sup>	۵۵	۱۱۰	۵۴۰

\* مقدار میانگین مقاومت برشی باید از مقاومت برشی خاک تا عمق پنج برابر قطر شمع محاسبه شود. این مقدار باید به عنوان نیمی از بیشترین اختلاف تنش کلی اصلی در آزمایش سه محوری زهکشی نشده تحکیم‌نیافته تعریف شود.

۶. معادله زیر را محاسبه کنید:

$$\gamma_{50} = \varepsilon_{50} b$$

۲۸-۳

مقادیر مناسب  $\varepsilon_{50}$  را از نتایج تست‌های آزمایشگاهی و یا در غیاب آزمون‌های آزمایشگاهی از

جدول ۳-۳ استفاده شود.

جدول ۳-۳ مقادیر نماینده  $\varepsilon_{50}$  برای رس‌های پیش تحکیم یافته [Reese & Van Impe 2011]

میانگین مقاومت برشی زهکشی نشده (kPa)			
	۵۰ - ۱۰۰	۱۰۰ - ۲۰۰	۳۰۰ - ۴۰۰
$\varepsilon_{50}$	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۴

۷. اولین قسمت سهمی‌وار منحنی  $p-y$  را با استفاده مقدار  $p_c$  از معادلات ۳-۲۵ و ۳-۲۶ و معادله زیر به دست آورید:

$$p = 0.5p_c \left( \frac{y}{y_{50}} \right)^{0.5} \quad ۲۹-۳$$

معادله ۲۹-۳ قسمتی از منحنی  $p-y$  از نقطه تقاطع با معادله ۳-۲۷ تا نقطه‌ای که در آن تغییرشکل برابر با  $A_s y_{50}$  است را تعریف می‌کند.

۸. دومین قسمت سهمی‌وار منحنی  $p-y$  را با استفاده از معادله زیر به دست آورید:

$$p = 0.5p_c \left( \frac{y}{y_{50}} \right)^{0.5} - 0.055p_c \left( \frac{y - A_s y_{50}}{A_s y_{50}} \right)^{1.25} \quad ۳۰-۳$$

معادله ۳۰-۳ قسمتی از منحنی  $p-y$  از نقطه‌ای که در آن تغییرشکل برابر با  $A_s y_{50}$  تا نقطه‌ای برابر با  $6A_s y_{50}$  است را تعریف می‌کند.

۹. قسمت خطی بعدی از منحنی  $p-y$  را با استفاده از معادله زیر به دست آورید:

$$p = 0.5p_c (6A_s)^{0.5} - 0.411p_c - \frac{0.0625}{y_{50}} p_c (y - 6A_s y_{50}) \quad ۳۱-۳$$

معادله ۳۱-۳ قسمتی از منحنی  $p-y$  از نقطه‌ای با تغییرشکل برابر با  $6A_s y_{50}$  تا نقطه‌ای با تغییرشکل  $18A_s y_{50}$  است را تعریف می‌کند.



۱۰. قسمت خطی نهایی از منحنی p-y را با استفاده از معادلات زیر به دست آورید:

$$p = 0.5p_c(6A_s)^{0.5} - 0.411p_c - 0.75p_cA_s \quad ۳۲-۳$$

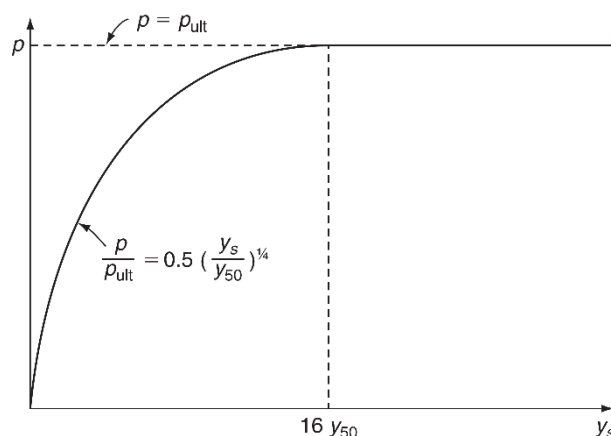
$$p = p_c(1.225\sqrt{A_s} - 0.75A_s - 0.411) \quad ۳۳-۳$$

معادله ۳۲-۳ قسمتی از منحنی p-y از نقطه‌ای با تغییرشکل برابر با  $18A_s y_{50}$  و بالاتر از آن را تعریف می‌کند.

روش گام به گام مشخص شده برای حالتی است که معادلات ۲۷-۳ و ۲۹-۳ تقاطع داشته باشند. با این وجود ممکن است معادله ۲۷-۳ هیچ‌گونه تقاطعی با دیگر معادلات نداشته باشد. معادله ۲۷-۳ تا زمانی که با دیگر معادلات تقاطع نداشته باشد، خود مشخص‌کننده منحنی p-y خواهد بود و یا در صورت عدم تقاطع معادله به صورت کامل منحنی p-y را تعریف می‌کند.

### ۳-۵-۳ پاسخ رس سخت بدون حضور آب آزاد (Welch & Reese, 1972)

روش گام به گام ارائه شده در شکل ۱۰-۳ برای بارگذاری استاتیکی به صورت زیر می‌باشد:



شکل ۱۰-۳ نمودار مشخصه برای منحنی p-y برای بارگذاری استاتیکی رس سخت بدون حضور آب آزاد [Reese & Van Impe 2011]

۱. مقادیر مقاومت برشی زهکشی نشده، وزن مخصوص خاک و قطر شمع را به دست آورید. همچنین مقادیر مربوط به  $\varepsilon_{50}$  را از منحنی تنش-کرنش به دست آورید. اگر منحنی تنش-کرنش در دسترس نبود، مقدار  $0/010$  یا  $0/005$  را با توجه به جدول ۳-۳ انتخاب کنید. مقادیر بزرگتر محافظه کارانه تر می باشد.

۲. مقاومت نهایی خاک در واحد طول شمع را با استفاده از مقادیر کوچکتر از دو معادله ۳-۲۱ و ۳-۲۲ به دست آورید. (در هنگام استفاده از معادله ۳-۲۱ مقاومت برشی را میانگین مقاومت برشی از سطح زمین تا نقطه موردنظر و مقدار  $J$  را برابر با  $0/5$  در نظر بگیرید. وزن مخصوص خاک باید سطح آب زیرزمینی را در نظر بگیرد.)

۳. تغییرشکل در نیمی از مقاومت نهایی خاک،  $y_{50}$ ، را از معادله ۳-۲۳ به دست آورید.

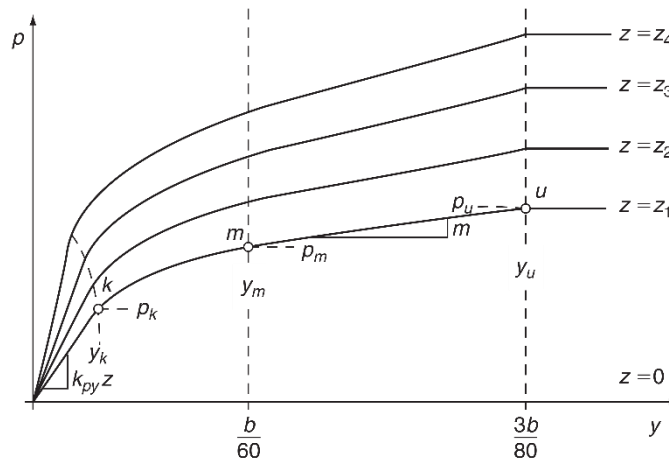
۴. یک عمق انتخاب کرده و منحنی  $p-y$  آن را توسعه دهید. نقاطی که منحنی  $p-y$  را توصیف می کند از معادله زیر به دست آورید:

$$\frac{p}{p_{ult}} = 0.5 \left( \frac{y}{y_{50}} \right)^{0.25} \quad 34-3$$

۵. مقاومت خاک را برای مقادیر تغییرشکل بزرگتر از  $16y_{50}$  برابر با مقاومت نهایی خاک در نظر بگیرید.

### ۳-۶ منحنی‌های p-y برای ماسه بالا و پایین تراز آب (Reese, et al, 1974)

روش گام به گام برای بارگذاری استاتیکی با توجه به شکل ۳-۱۱ به صورت زیر می‌باشد:



شکل ۳-۱۱ نمودار مشخصه برای منحنی p-y برای بارگذاری استاتیکی و چرخه‌ای ماسه [Reese & Van Impe 2011]

۱. مقادیر زاویه اصطکاک، وزن مخصوص خاک و قطر شمع را به دست آورید. (برای ماسه پایین تراز آب از وزن مخصوص شناور و برای ماسه بالای تراز آب از وزن مخصوص کل استفاده کنید.)

۲. محاسبات مقدماتی زیر را انجام دهید:

$$\alpha = \frac{\varphi}{2}; \beta = 45 + \frac{\varphi}{2}; K_0 = 0.4; K_a = [\tan(45 - \frac{\varphi}{2})]^2 \quad ۳-۳۵$$

۳. مقاومت نهایی خاک در واحد طول شمع را با استفاده از کوچکترین مقدار از معادلات زیر به دست آورید:

$$p_{st} = \gamma z \left[ \frac{K_0 z \tan \varphi \sin \beta}{\tan(\beta - \varphi) \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \varphi)} (b + z \tan \beta \tan \alpha) \right. \\ \left. + K_0 z \tan \beta (\tan \varphi \sin \beta - \tan \alpha) - K_a b \right] \quad ۳۶-۳$$

$$p_{sd} = K_a b \gamma z ((\tan \beta)^8 - 1) + K_0 b \gamma z \tan \varphi (\tan \beta)^4 \quad ۳۷-۳$$

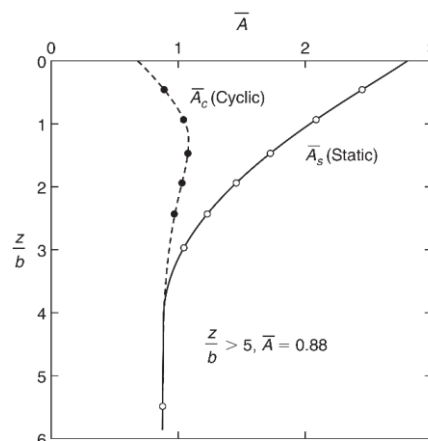
۴. در محاسبات مربوط به گام قبل، عمقی  $z_t$  را پیدا کنید که در آن معادلات ۳۶-۳ و ۳۷-۳ تقاطع پیدا می‌کنند. بالای این عمق از معادله ۳۶-۳ و پایین آن از معادله ۳۷-۳ استفاده کنید.

۵. عمقی که منحنی  $p-y$  برای آن نیاز است را انتخاب کنید.

۶. تغییرشکل نهایی  $y_u$  برابر با  $3b/80$  را به دست آورید. مقاومت نهایی خاک را از معادله زیر به دست آورید:

$$p_{ult} = \bar{A}_s p_s \text{ or } p_{ult} = \bar{A}_c p_s \quad ۳۸-۳$$

مقادیر مناسب  $A_s$  را با توجه به شکل ۱۲-۳ برای عمق مشخص بدون بعد و برای حالت استاتیکی انتخاب کنید. مقدار مناسب  $p_s$  را با توجه به معادلات ۳۶-۳ و ۳۷-۳ در گام ۴ محاسبه کنید.

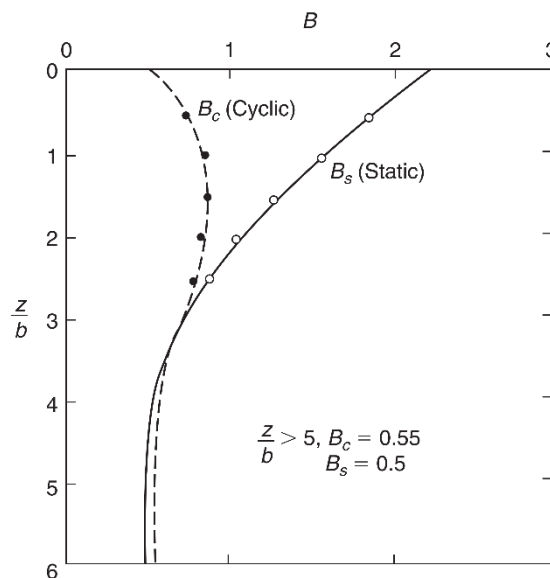


شکل ۱۲-۳ مقادیر ضرایب  $A_c$  و  $A_s$  [Reese & Van Impe 2011]

۷. تغییرشکل نهایی  $y_m$  برابر با  $b/60$  را به دست آورید. مقاومت خاک  $p_m$  را از معادله زیر به دست آورید:

$$p_m = B_s p_s \text{ or } p_m = B_c p_s \quad ۳۹-۳$$

مقادیر مناسب  $B_s$  را با توجه به شکل ۳-۱۳ برای عمق مشخص بدون بعد و برای حالت استاتیکی انتخاب کنید. مقدار مناسب  $p_s$  را با توجه به معادلات ۳-۳۶ و ۳-۳۷ در گام ۴ محاسبه کنید. در این مرحله دو قسمت خطی از منحنی  $p-y$  بعد از نقطه با تغییرشکل برابر با  $b/60$  می‌تواند ساخته شود.



شکل ۳-۱۳ مقادیر ضرایب  $B_c$  و  $B_s$  [Reese & Van Impe 2011]

۸. قسمت خطی اولیه از منحنی  $p-y$  را به صورت زیر به دست آورید:

$$p = (k_{py}z)y \quad ۴۰-۳$$

مقادیر مناسب  $k_{py}$  را با استفاده از جدول ۳-۴ یا جدول ۳-۵ به دست آورید.

جدول ۳-۴ مقادیر نماینده  $k_{py}$  برای ماسه مغروق [Reese & Van Impe 2011]

تراکم نسبی	سست (Loose)	متوسط (Medium)	متراکم (Dense)
$k_{py} \text{ MN/m}^3$	۵/۴	۱۶/۳	۳۴

جدول ۳-۵ مقادیر نماینده  $k_{py}$  برای ماسه بالای تراز آب (بارگذاری استاتیکی و چرخه‌ای) [Reese & Van Impe 2011]

تراکم نسبی	سست (Loose)	متوسط (Medium)	متراکم (Dense)
$k_{py} \text{ MN/m}^3$	۶/۸	۲۴/۴	۶۱

۹. قسمت سهمی‌وار منحنی  $p-y$  را به صورت زیر به دست آورید:

$$p = \bar{C}y^{1/n} \quad ۴۱-۳$$

سهمی را به صورت زیر بین نقاط  $k$  و  $m$  قرار دهید:

– ۱،۹. شیب خط حاصل از دو نقطه  $k$  و  $m$  را استفاده از معادله زیر به دست آورده؛

$$p = \frac{p_u - p_m}{y_u - y_m} \quad ۴۲-۳$$

– ۲،۹. توان قسمت سهمی منحنی را با استفاده از معادله زیر به دست آورده؛

$$n = \frac{p_m}{m y_m} \quad ۴۳-۳$$

– ۳،۹. ضریب  $C$  را مطابق معادله زیر به دست آورده؛

$$\bar{C} = \frac{p_m}{y_m^{1/n}} \quad ۴۴-۳$$

۴,۹ - نقطه  $y_k$  را به صورت زیر تعیین کنید:

$$y_k = \left( \frac{\bar{C}}{k_{py}x} \right)^{n/n+1} \quad ۴۵-۳$$

۵,۹ - با استفاده از معادله ۳-۴۱ تعداد مناسبی از نقاط را بر روی سهمی تعیین کنید.

روش گام به گام مشخص شده با توجه به شکل ۳-۱۱ برای حالتی است که یک تقاطع بین قسمت خطی با قسمت سهمی وار منحنی  $p-y$  در نقطه  $k$  وجود داشته باشد. با این حال در برخی موارد هیچ تقاطعی با قسمت سهمی وار وجود ندارد. معادله ۳-۴۰ تا زمانی که یک تقاطع با قسمت سهمی وار یا با شاخه دیگر پیدا شود، مشخص کننده منحنی  $p-y$  خواهد بود. اگر هیچ گونه تقاطعی بین معادله ۳-۴۰ با قسمت های دیگر منحنی وجود نداشته باشد، منحنی  $p-y$  به صورت یکجا مطابق معادله ۳-۴۰ خواهد بود. [Reese & Van Impe 2011]

### ۷-۳ منحنی $p-y$ برای خاک های لایه ای

موارد متعددی وجود دارد که خاک در نزدیکی سطح زمین همگن نیست و لایه ای است. اگر لایه ها در ناحیه ای قرار داشته باشند که در آن خاک به صورت گوه ای حرکت می کند، برخی اصلاحات باید در محاسبه مقاومت نهایی خاک  $p_u$  و در نتیجه منحنی های  $p-y$  در نظر گرفته شود.

مبحث خاک های لایه ای به وسیله آلن<sup>۲</sup> (۱۹۸۵) مورد مطالعه قرار گرفته است. با این حال فرمول های آلن نیاز به استفاده از چند کد کامپیوتری دارد.

<sup>۲</sup> Allen

قبل از آن، روشی که برای اصلاح خاک لایه‌ای مورد استفاده قرار می‌گرفت، توسط جورجیادیس<sup>۳</sup> (۱۹۸۳) توسعه پیدا کرده بود. این روش با وجود اینکه تمام ترکیب‌های احتمالی در بحث را در نظر نمی‌گیرد، مورد استفاده قرار گرفته است. [Isenhower, et al. 2017]

### ۳-۷-۱ تصحیح اثر لایه‌ای خاک‌ها به روش جورجیادیس (Georgiadis, 1983)

روش تصحیح اثر لایه‌بندی خاک به روش جورجیادیس بر اساس تعیین عمق معادل برای تمامی لایه‌ها زیر لایه بالایی است. برای انجام این کار، انتگرال مقاومت نهایی بر اساس عمق لایه بالایی با استفاده از روش خاک همگن محاسبه می‌شود. عمق معادل  $h_2$  تا بالای لایه اول از مساوی قرار دادن انتگرال مقاومت نهایی در عمق لایه فوقانی،  $F_0$ ، با انتگرال مقاومت نهایی لایه تحتانی،  $F_1$ ، با این فرض اینکه مشخصات خاک لایه فوقانی همانند مشخصات لایه زیرین خود باشد، به دست می‌آید. بنابراین دو انتگرال ذکر شده با هم برابر هستند و مقدار مجهول،  $h_2$ ، حد بالای انتگرال برای لایه دوم است:

$$F_0 = \int_0^{h_1} p_{u1} dz \quad ۴۶-۳$$

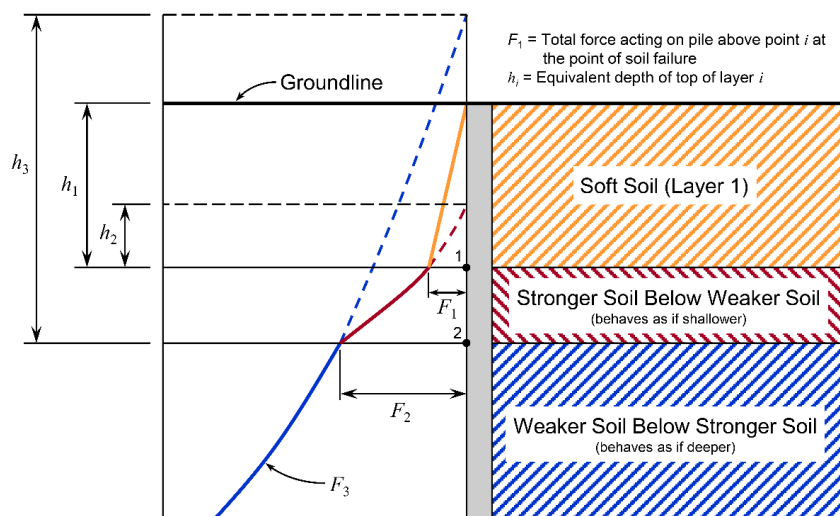
$$F_1 = \int_0^{h_2} p_{u2} dz \quad ۴۷-۳$$

عمق معادل  $h_2$  از سطح لایه فوقانی به همراه مشخصات خاک لایه دوم برای محاسبه منحنی  $p-y$  و انتگرال مقاومت نهایی  $p_u$  در عمق لایه دوم استفاده می‌شود.

---

<sup>۳</sup> Georgiadis





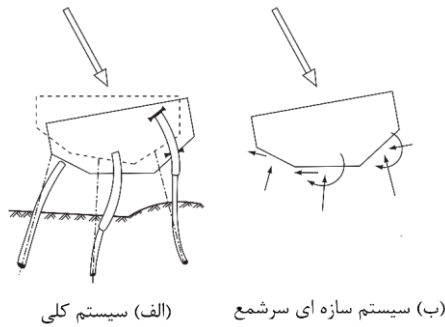
شکل ۳-۱۴ نمایی از عمق‌های معادل در پروفیل خاک چند لایه‌ای [Isenhower 2017]

از مفاهیم ارائه شده می‌توان برای به دست آوردن ضخامت معادل چندین لایه مختلف بر روی لایه‌ای که عمق آن مورد نظر می‌باشد، استفاده کرد. عمق معادل ممکن است از عمق واقعی لایه خاک بزرگتر یا کوچکتر باشد و به مقاومت نسبی لایه‌ها در پروفیل خاک بستگی دارد. شکل ۳-۱۴ این مورد را نشان می‌دهد. [Isenhower 2017]

### ۳-۸ مکانیک گروه شمع در حالت دوبعدی

شکل ۳-۱۵ (الف) سیستم کلی برای یک گروه شمع دوبعدی را نشان می‌دهد. سه شمع با فاصله و شیب دلخواه، به یک سرشمع با شکل دلخواه متصل شده است. مشخصات مقطع عرضی شمع مانند قطر، سطح مقطع و ممان اینرسی آن نه تنها از شمعی به شمع دیگر، بلکه در طول محور شمع نیز می‌تواند متفاوت باشد. مصالح شمع می‌تواند در هر یک از شمعه‌ها متفاوت باشد، با این حال فرض بر این است که در هر شمع از یک نوع مصالح استفاده شده است. سیستم سازه‌ای سرشمع در شکل ۳-۱۵ (ب) نشان داده شده است. نیروی محوری، جانبی و لنگر خمشی در هر شمع می‌بایست

سرشمع را در حالت تعادل نگه دارد. همچنین نیروهای موجود در سر شمع‌ها باید با حرکت هر یک از شمع‌ها سازگار باشد.



شکل ۳-۱۵ سیستم سازه‌ای پایه برای گروه شمع‌ها [Reese & Van Impe 2011]

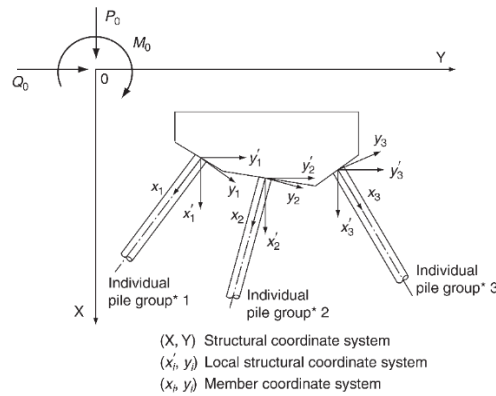
### ۳-۸-۱ فرضیات

- فضای دوبعدی برای شمع‌ها با آرایش متقارن.
- عدم شکل‌پذیری سرشمع.
- فاصله زیاد بین شمع‌ها.
- مستقل بودن رفتار شمع‌ها تحت اثر بار جانبی و محوری

### ۳-۸-۲ سیستم مختصات و علائم قراردادی

شکل ۳-۱۶ سیستم مختصات و علائم قراردادی را نشان می‌دهد. روسازه و سرشمع به وسیله سیستم مختصات اصلی معرفی می‌شود که در آن  $X$  و  $Y$  به ترتیب محور عمودی و افقی می‌باشد. نیروهای برآیند سیستم در مبدا سیستم مختصات اصلی عمل می‌کنند. جهت مثبت نیروی برآیند توسط فلش-ها نشان داده شده است. هر یک از شمع‌های منفرد در گروه شمع توسط یک سیستم مختصات محلی  $x'_i$  و  $y'_i$  تعریف می‌شود که مبدا آن ابتدای شمع‌ها و محورهای آن موازی با محورهای سیستم

مختصات اصلی است. علاوه بر آن، یک سیستم مختصات برای هر عضو تعریف شده است، که محور  $X_i$  آن منطبق بر محور شمع و محور  $Y_i$  آن عمود بر محور  $X_i$  می‌باشد.



شکل ۳-۱۶ سیستم مختصات برای آنالیز گروه شمع با جهت مثبت تغییرمکان ها [Reese & Van Impe 2011]

### ۳-۸-۳ تبدیل مختصات ها

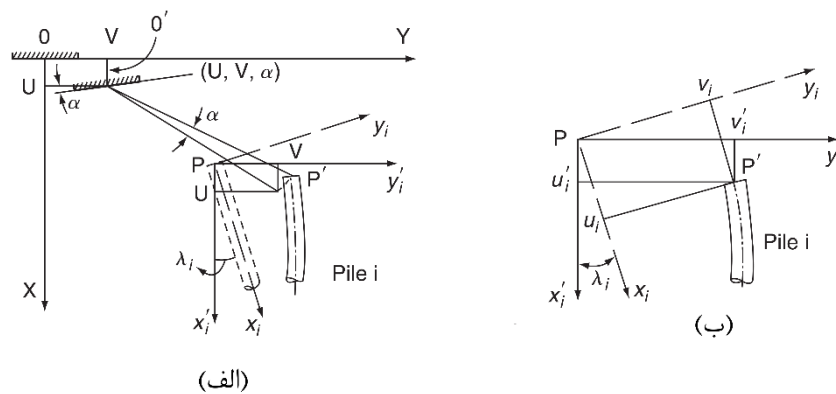
شکل ۳-۱۷ (الف) تغییرمکان ابتدای شمع‌ها را در مختصات اصلی، محلی و عضو نشان می‌دهد. به دلیل تغییرمکان سرشمع از نقطه 0 به نقطه 0' با چرخش  $\alpha$ ، شمع  $\Delta m$  از نقطه P به P' حرکت خواهد کرد. مولفه‌های تغییرمکان سرشمع با توجه به سیستم مختصات اصلی به صورت  $(U, V, \alpha)$  توصیف می‌شود. تغییرمکان ابتدای شمع‌ها در مختصات محلی به صورت  $(u'_b, v'_b, \alpha)$  و در مختصات عضو به صورت  $(u_b, v_b, \alpha)$  تعریف می‌شود.

تبدیل مختصات بین سیستم مختصات اصلی و محلی با توجه به هندسه مسئله به صورت زیر به دست می‌آید:

$$u'_i = U - Y_i \alpha \quad 48-3$$

$$v'_i = V + X_i \alpha \quad 49-3$$

که در آن  $(X_i, Y_i)$  موقعیت ابتدای شمع  $\Delta m$  با توجه به سیستم مختصات اصلی می‌باشد.



شکل ۳-۱۷ تبدیل تغییرمکان‌ها [Reese & Van Impe 2011]

با توجه به شکل ۳-۱۷ (ب)، تبدیل تغییرمکان ابتدای شمع‌ها از سیستم مختصات محلی به سیستم مختصات عضو به صورت زیر به دست می‌آید:

$$u_i = u'_i \cos \lambda_i + v'_i \sin \lambda_i \quad ۵۰-۳$$

$$v_i = v'_i \cos \lambda_i - u'_i \sin \lambda_i \quad ۵۱-۳$$

با جایگزین کردن معادلات ۳-۴۸ و ۳-۴۹ در معادلات ۳-۵۰ و ۳-۵۱ تبدیل مختصات بین تغییرمکان سرشمع در سیستم مختصات اصلی و تغییرمکان ابتدای شمع نام در سیستم مختصات عضو به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$u_i = U \cos \lambda_i + V \sin \lambda_i + \alpha (X_i \sin \lambda_i - Y_i \cos \lambda_i) \quad ۵۲-۳$$

$$v_i = -U \sin \lambda_i + V \cos \lambda_i + \alpha (X_i \cos \lambda_i + Y_i \sin \lambda_i) \quad ۵۳-۳$$

به عبارت دیگر:

$$u_i = T_{D,i} U \quad ۵۴-۳$$

که در آن؛  $u_i$ : بردار تغییرمکان در ابتدای شمع،  $T_{D,i}$ : ماتریس تبدیل تغییرمکان شمع و  $U$ : بردار تغییرمکان سرشمع می‌باشد.

به روش مشابه، برای نیروها داریم:

$$P'_i = T_{F,i} P_i \quad 55-3$$

که در آن؛  $P'_i$ : بردار عکس‌العمل شمع  $i$ ام در سیستم مختصات اصلی،  $T_{F,i}$ : ماتریس تبدیل نیروهای شمع و  $P_i$ : بردار عکس‌العمل شمع  $i$ ام در سیستم مختصات عضو می‌باشد.

ماتریس تبدیل نیرو از ترانهاده ماتریس تبدیل تغییرمکان به دست می‌آید. در نتیجه:

$$T_{F,i} = T_{D,i}^T \quad 56-3$$

با در دست داشتن مشخصات نیروها و تغییرمکان‌ها در هر شمع، معادلات تعادل در سیستم مختصات اصلی می‌تواند حل شود. این معادلات عبارت اند از:

$$P_0 = \sum_{i=1}^n J_i P'_i = 0 \quad 57-3$$

$$Q_0 + \sum_{i=1}^n J_i P'_i = 0 \quad 58-3$$

$$M_0 + \sum_{i=1}^n J_i M'_i + \sum_{i=1}^n J_i Y_i P'_i + \sum_{i=1}^n J_i X_i Q'_i = 0 \quad 59-3$$

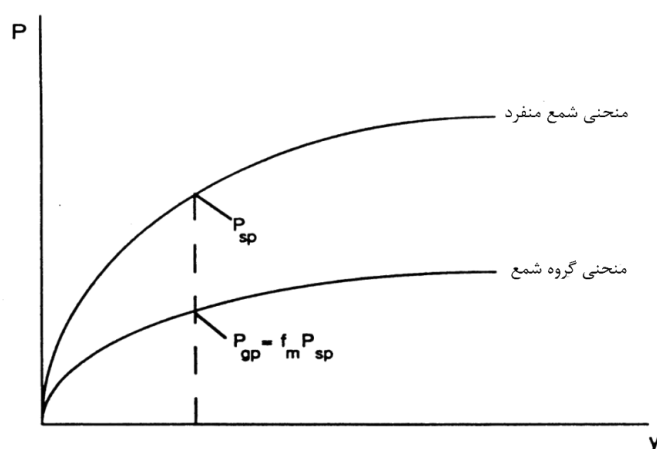
که در آن؛  $i$ : مقدار مربوط به شمع  $i$ ام و  $i$ : تعداد شمع‌ها در گروه شمع می‌باشد.

این معادلات تعادل با روش‌های مختلفی حل خواهد شد. پارامتر سختی (نیرو-تغییرمکان) برای شمع-

ها غیرخطی می‌باشد؛ بنابراین معادلات باید با تکرار حل شود. [Reese & Van Impe 2011]

### ۳-۹ اندرکنش شمع-خاک-شمع در گروه شمع

مرور ادبیات فنی در زمینه شمع‌های منفرد و گروه شمع تحت اثر بارهای جانبی نشان می‌دهد که شمع‌ها رفتار غیرخطی مشخصی را تجربه می‌کنند. به نظر می‌رسد بهترین روش تحلیل گروه شمع استفاده از منحنی‌های  $p-y$  می‌باشد که مقادیر مقاومت خاک  $p$  در آن‌ها برای در نظر گرفتن اندرکنش شمع-خاک-شمع (یا اثر گروه شمع)، کاهش یافته است. برآون، ریس و اونیل (۱۹۸۷) دریافتند که رفتار هر یک از شمع‌های موجود در گروه شمع، با استفاده از خانواده‌ای از منحنی‌های  $p-y$  که بر اساس آزمایش بارگذاری جانبی بر روی شمع منفرد با مقیاس واقعی در محل انجام شده و با توجه به شکل ۳-۱۸ ضرایب مقاومت تمامی منحنی‌های  $p-y$  آن توسط یک ضریب  $f_m$  کاهش پیدا کرده، بهتر مدل خواهند شد.



شکل ۳-۱۸ ضریب کاهش مقاومت تحت اثر اندرکنش گروه شمع با فاصله نزدیک به هم [Reese, et al. 2016]

نتایج حاصل از آزمایش‌ها، منبع اصلی برای اطلاعاتی است که بر اساس آن مهندس محاسب روش طراحی برای در نظر گرفتن اثرات اندرکنش شمع-خاک-شمع برای گروه شمع با فاصله کم را توسعه

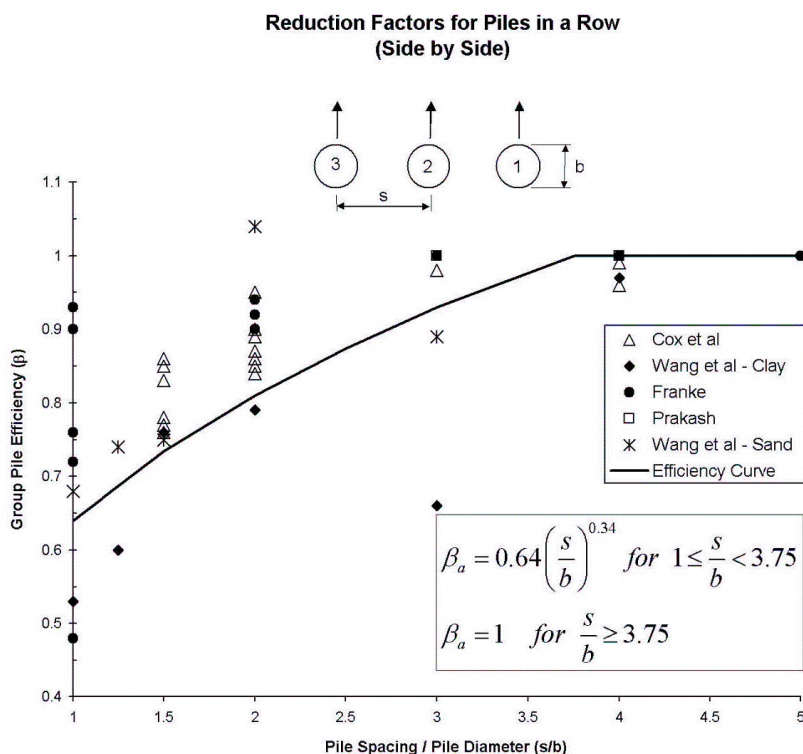
دهد. [Reese, et al. 2016]

ضرایب کاهش برای مقادیر مقاومت  $p$  بر اساس جانمایی شمع‌ها در گروه به شرح زیر می‌باشد:

### ۳-۹-۱ ضریب کاهش پهلوی به پهلوی

این ضریب برای مقادیر  $p$  به صورت نسبت ظرفیت باربری میانگین شمع‌های موجود در یک گروه به ظرفیت باربری شمع منفرد می‌باشد. ضرایب کاهش مقاومت برای فاصله بین شمع‌ها به صورت  $s/b$  در شکل ۳-۱۹ تهیه شده است، که در آن  $s$  فاصله مرکز به مرکز شمع و  $b$  قطر شمع می‌باشد. با توجه به این شکل، اثر گروه شمع در فاصله کم در فاصله‌های مرکز به مرکز بزرگتر از سه برابر قطر شمع تاثیرات کمتری خواهد داشت. با وجود اینکه پراکندگی داده‌ها در شکل کاملاً مشخص است، اما در حال حاضر منحنی حاضر بهترین تخمین را برای فاصله شمع‌ها بدون توجه نوع خاک ارائه می‌دهد.

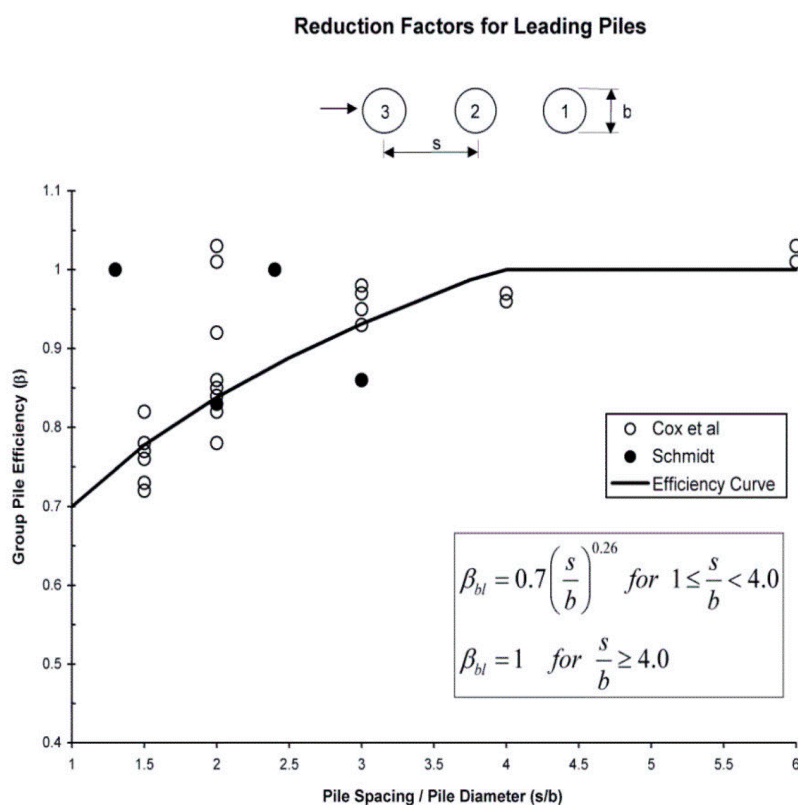
[Reese, et al. 2016]



شکل ۳-۱۹ ضریب کاهش برای شمع‌های موجود در یک ردیف با توجه به داده آزمایش‌ها [Reese, et al. 2016]

### ۳-۹-۲ ضریب کاهش خط به خط

اندرکنش‌های شمع‌های موجود در یک خط در جهت بارگذاری پیچیده‌تر از اندرکنش شمع‌های موجود در یک ردیف است. آزمایش‌های زیادی این نکته که اندرکنش به موقعیت نسبی شمع‌ها بستگی دارد را نتیجه داده‌اند. با وجود اینکه این آزمایش‌ها در انواع مختلفی از خاک‌ها انجام شده است، اثر نوع خاک در ضرایب کاهش مقاومت در حال حاضر قابل ارزیابی نیست. در نتیجه ضرایب کاهش بر اساس موقعیت نسبی شمع در گروه، برای شمع‌های موجود در ردیف مقدم<sup>۴</sup> و یا دنباله<sup>۵</sup> در جهت بارگذاری موجود می‌باشد.



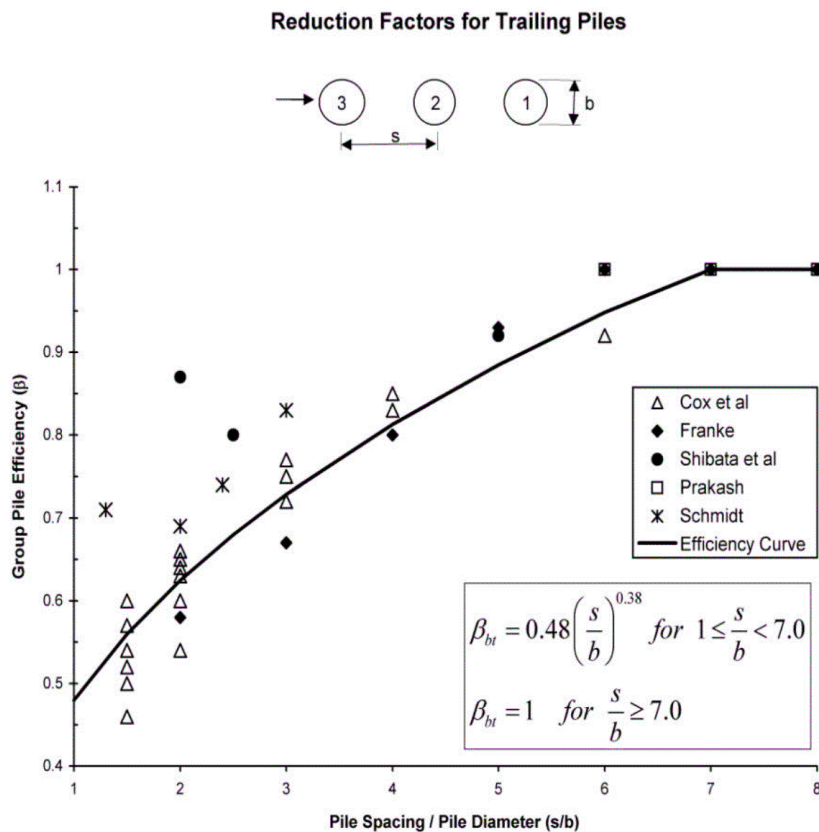
شکل ۳-۲۰ ضریب کاهش برای شمع مقدم در یک خط [Reese, et al. 2016]

<sup>۴</sup> Leading Row

<sup>۵</sup> Trailing Row



ضرایب کاهش برای شمع ابتدایی (مقدم) در یک خط با توجه منحنی شکل ۳-۲۰ تعیین می‌شود. با توجه به گروه شمع نشان داده شده در شکل، شمع ۱ نسبت به شمع ۲ و شمع ۲ نسبت به شمع ۳ مقدم است. به طور کلی شمع‌های در موقعیت مقدم کمتر تحت تاثیر شمع دنباله در همان خط می‌باشد. ضرایب کاهش برای شمع انتهایی (دنباله) در یک خط با توجه به شکل ۳-۲۱ تعیین می‌شود. با توجه به گروه شمع نشان داده شده در شکل، شمع ۲ نسبت به شمع ۱ و شمع ۳ نسبت به شمع ۲ دنباله می‌باشد. [Reese, et al. 2016]



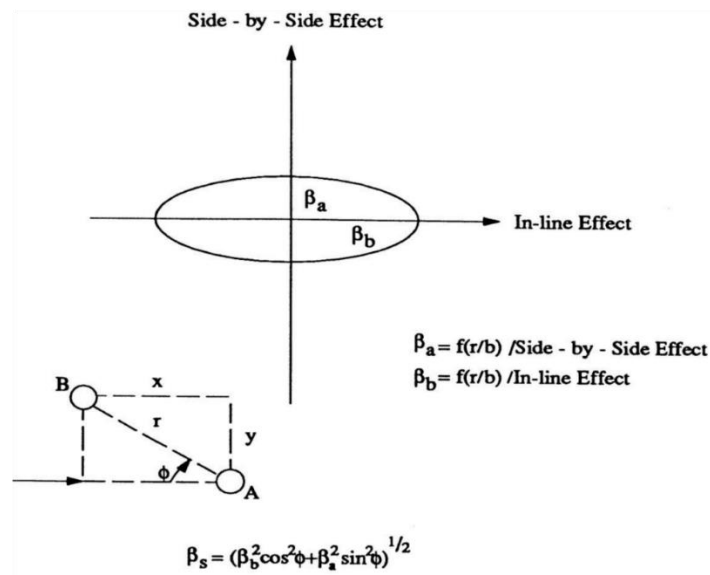
شکل ۳-۲۱ ضرایب کاهش برای شمع دنباله در یک خط [Reese, et al. 2016]

### ۳-۹-۳ شمع‌های اریب<sup>۶</sup>

اثر شمع‌های اریب به صورت مستقیم توسط آزمایش مشخص نشده است. با این حال، یک توصیف ریاضی ساده برای یک بیضی در مختصات قطبی برای شمع‌های اریب پیشنهاد شده است. این توصیف در شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است. شمع A و B نسبت به جهت بارگذاری اریب می‌باشد و فاصله پهلوی به پهلوی و خط به خط در آن به ترتیب x و y است. ضریب کاهش پهلوی به پهلوی  $\beta_a$  با توجه به شکل ۳-۱۹ برای فاصله r/b و ضریب کاهش خط به خط  $\beta_b$  با توجه به شکل ۳-۲۱ و یا شکل ۳-۲۰ برای فاصله r/b محاسبه می‌شود. ضریب کاهش کلی برای شمع اریب برای هر یک از شمع‌ها نسبت به دیگری با استفاده از رابطه زیر توصیف می‌شود:

$$\beta_s = (\beta_b^2 (\cos \varphi)^2 + \beta_a^2 (\sin \varphi)^2)^{1/2} \quad ۶۰-۳$$

که در آن  $\varphi$  زاویه بین جهت بارگذاری و خطی است که شمع‌های A و B را بهم متصل می‌کند.



شکل ۳-۲۲ سیستم مورد استفاده برای به دست آوردن ضریب کاهش در شمع‌های اریب [Reese, et al. 2016]

<sup>۶</sup> Skewed

در نتیجه برای هر شمع  $i$  موجود در گروه شمع، ضریب کاهش مقاومت  $f_m$  به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_{mi} = \beta_{1i}\beta_{2i}\beta_{3i} \dots \beta_{ji} \quad m \neq i \quad ۶۱-۳$$

که در آن  $\beta_{ji}$  ضریب کاهش مقاومت در اثر شمع  $j$  بر روی شمع  $i$  می‌باشد.

ضریب کاهش مقاومت شمع‌های موجود در یک گروه با فاصله مرکز به مرکز کم را می‌توان برای هر شمع در گروه محاسبه کرد. سپس از روش تحلیلی توصیف شده برای گروه شمع با فاصله مرکز به مرکز زیاد برای حل رفتار گروه شمع با استفاده از ضرایب کاهش مقاومت بر منحنی‌های  $p-y$  به دست آمده از شمع منفرد، استفاده می‌شود. [Reese, et al. 2016]



# فصل ۲ صحت سنجی مدل

## ۱-۴ مقدمه

در این فصل به بررسی مدل‌های انتخاب شده برای صحت‌سنجی پرداخته خواهد شد. مدل انتخاب شده برای صحت‌سنجی بر اساس یک آزمایش با مقیاس واقعی انجام شده است.

## ۲-۴ آزمایش شمع منفرد و گروه شمع متناظر تحت اثر بار جانبی

مرجع این آزمایش، [Rollins, et al. 2003]، گزارشی است که شامل تعدادی آزمایش بار جانبی بر روی شمع‌های منفرد و گروه شمع می‌باشد. در ادامه به شرح آزمایش انتخاب شده پرداخته خواهد شد.

## ۱-۲-۴ خصوصیات ژئوتکنیکی محل آزمایش

در گزارش، بررسی‌های ژئوتکنیکی جامعی از محل انجام آزمایش برای تعیین مشخصات خاک انجام شده است. این بررسی‌ها علاوه بر آزمایش‌های درجا، شامل نمونه‌گیری‌های متداول (دست‌خورده و دست‌نخورده) جهت انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بوده است:

– آزمون‌های درجا: <sup>۱</sup>SPT، <sup>۲</sup>CPT، <sup>۳</sup>PMT، <sup>۴</sup>VST، <sup>۵</sup>BST و Shear Wave Velocity Testing.

---

<sup>۱</sup> Standard Penetration Testing

<sup>۲</sup> Cone Penetrometer Testing

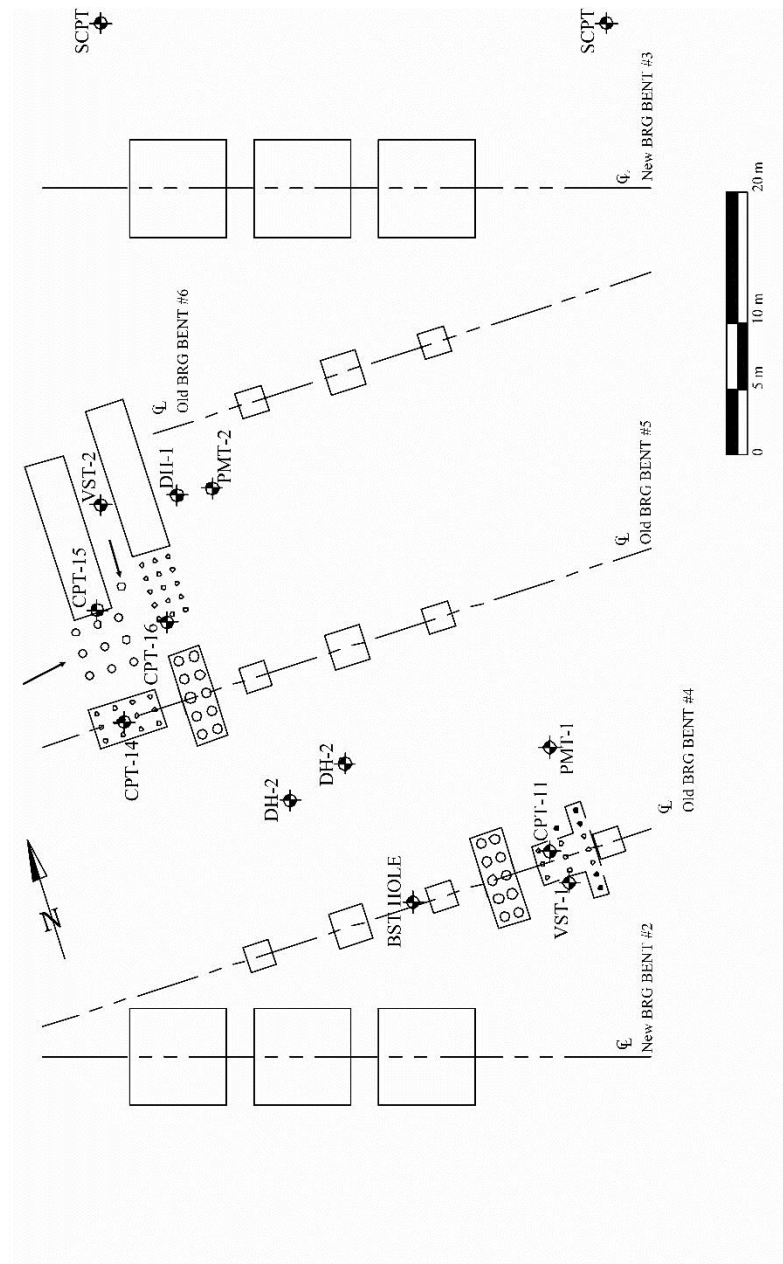
<sup>۳</sup> Pressuremeter Testing

<sup>۴</sup> Vane Shear Testing

<sup>۵</sup> Borehole Shear Testing

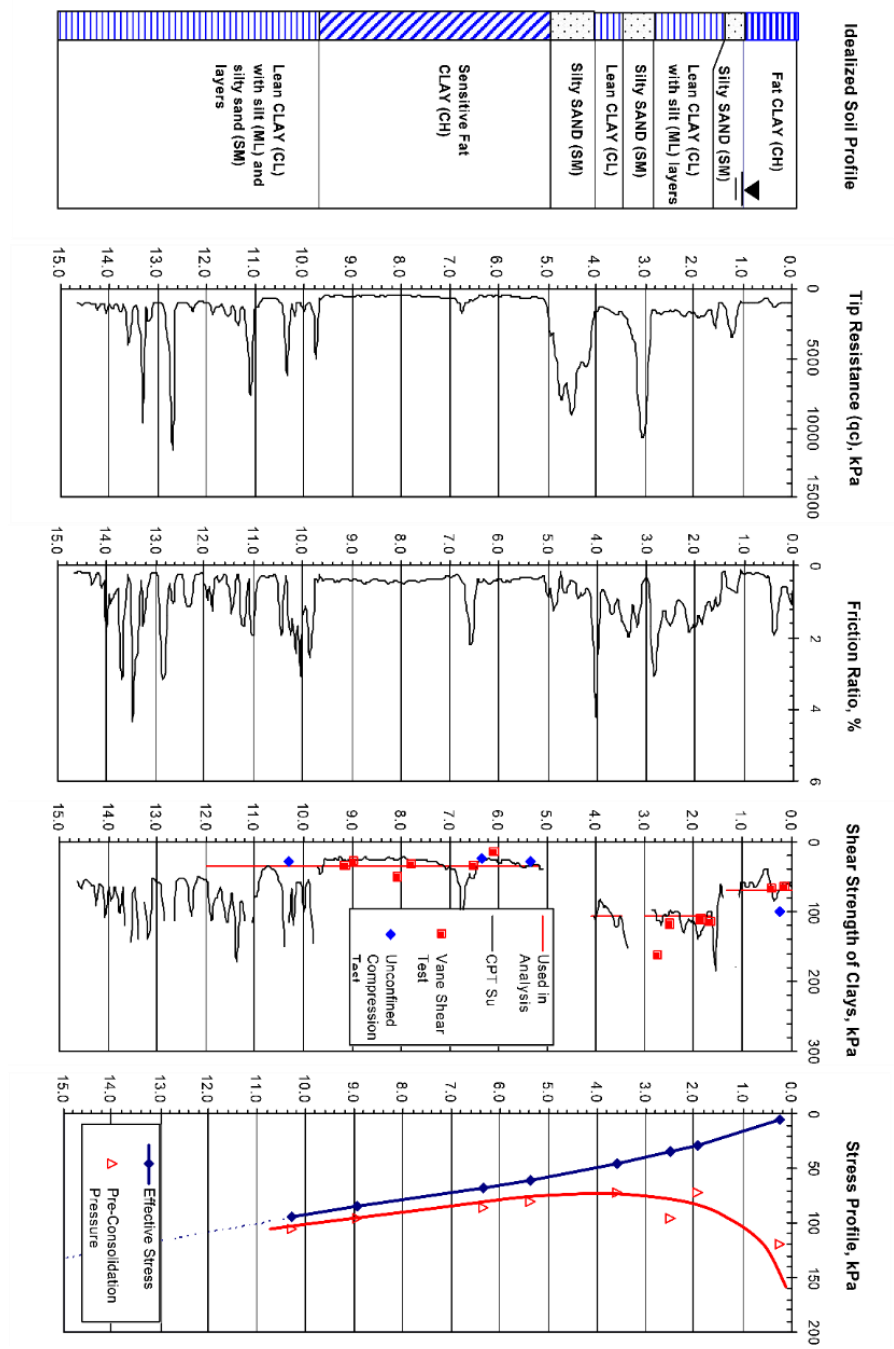
- آزمون‌های آزمایشگاهی: توزیع دانه‌بندی خاک، حدود اتربرگ، طبقه‌بندی خاک، مقاومت برشی و مشخصات تحکیمی.

شکل ۱-۴ موقعیت گمانه‌ها و تست‌های درجا را نسبت به محل انجام آزمایش‌های بارگذاری نشان می‌دهد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده پروفیل خاک به همراه مشخصات لایه‌ها در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۱-۴ موقعیت گمانه‌ها و تست‌های درجا نسبت به محل انجام آزمایش‌های بارگذاری [Rollins, et al. 2003]





شکل ۴-۲ پروفیل خاک به همراه نتایج آزمایش‌های درجا و آزمایشگاهی [Rollins, et al. 2003]

## ۲-۲-۴ مشخصات شمع آزمایش

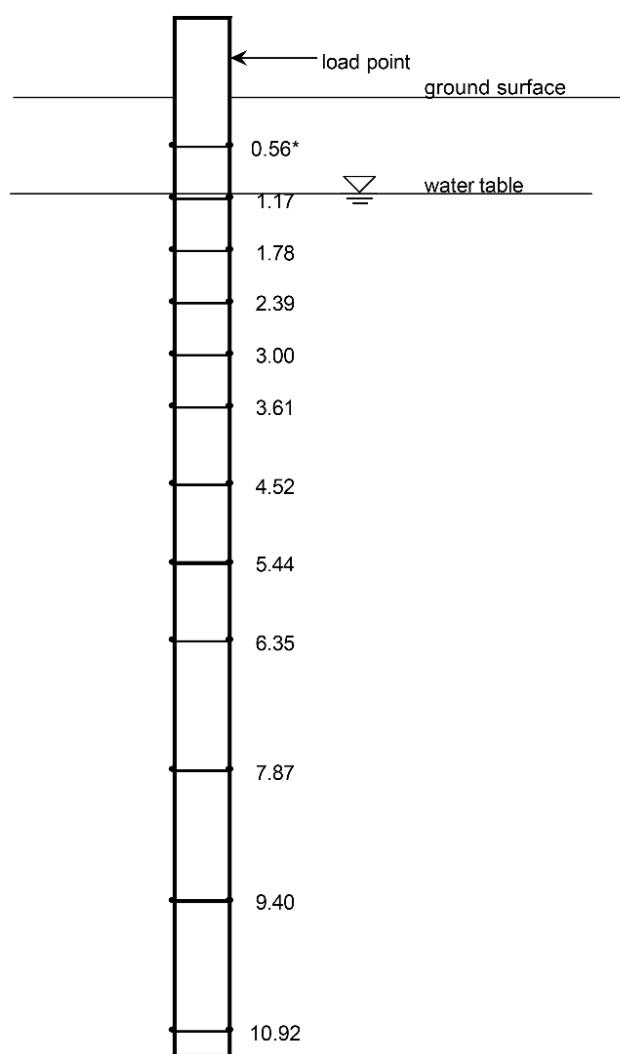
مشخصات شمع مورد استفاده در آزمایش شمع منفرد و گروه شمع متناظر با آن به شرح جدول ۱-۴ می‌باشد.

جدول ۱-۴ مشخصات شمع مدل صحت‌سنجی [Rollins, et al. 2003]

مشخصات	
مصالح شمع	ASTM A252, Grade 3, Spiral Weld Steel Pipe Pile
قطر خارجی	610 mm
ضخامت جداره	12.7 mm
مدول الاستیسیته	200 GPa
ممان اینرسی	$1.06 \times 10^9 \text{ mm}^4$ , $1.15 \times 10^9 \text{ mm}^4$
تنش تسلیم میانگین	397,600 kN/m <sup>2</sup>
عمق نفوذ شمع	11.20 m
طول کلی شمع	12.20 m
شرایط انتهایی شمع	Open - Ended
نوع اجرای شمع	Driven

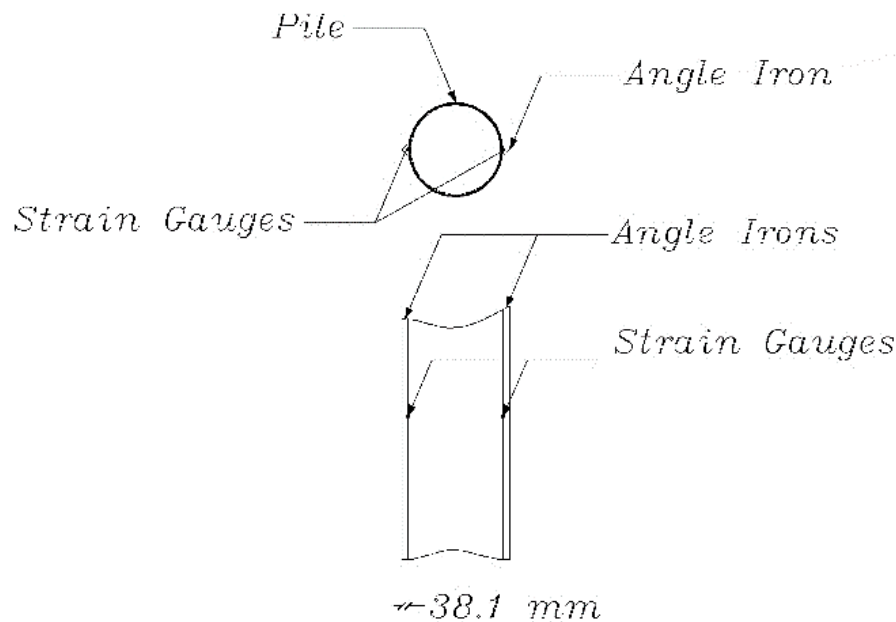
### ۳-۲-۴ موقعیت کرنش‌سنج‌ها در شمع

شمع منفرد و گروه شمع متناظر با آن توسط کرنش‌سنج‌های الکتریکی مجهز شده‌اند. تعداد ۲۴ عدد از این کرنش‌سنج‌ها بر روی سطح خارجی شمع قرار گرفته‌اند. این کرنش‌سنج‌ها در فواصل نشان داده شده در شکل ۳-۴ در طرفین شمع نصب شده‌اند.



شکل ۳-۴ موقعیت کرنش‌سنج‌ها در طول شمع [Rollins, et al. 2003]

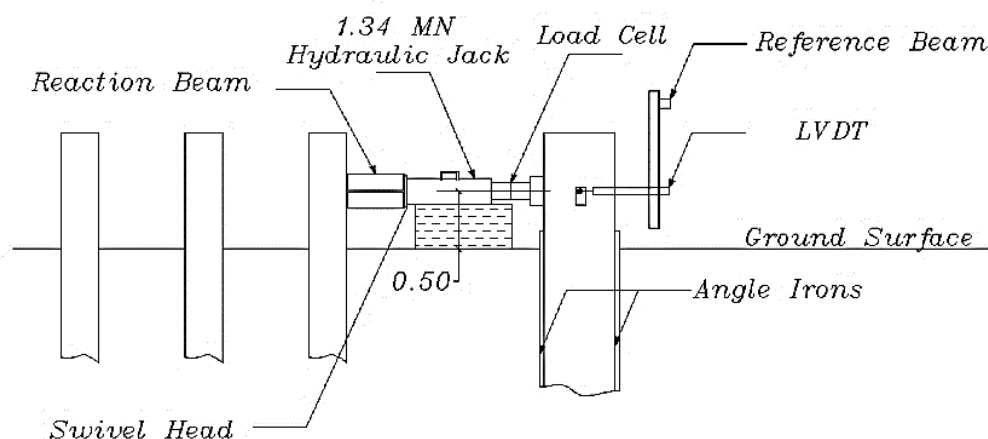
جهت محافظت از کرنش‌سنج‌ها در هنگام شمع‌کوبی، نبشی‌های فولادی با ضخامت ۵/۰۸ میلی‌متر و طول بازوی ۳۸/۱ میلی‌متر بر روی کرنش‌سنج‌ها جوش داده شده است. طول جوش‌ها حدوداً ۷۶ میلی‌متر تخمین زده شده است. شکل ۴-۴ نمایی از این نبشی‌ها در مقطع شمع را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴ مقطع و نمایی از شمع به همراه نبشی‌های فولادی [Rollins, et al. 2003]

#### ۴-۲-۴ آزمایش شمع منفرد تحت اثر بار جانبی

شکل ۴-۵ نمایی شماتیک از طرح آزمایش بر روی شمع منفرد را نشان می‌دهد. آزمایش بار جانبی حدود ۹ ماه پس از شمع‌کوبی انجام شده است. این فاصله زمانی اجازه حذف اضافه فشار آب حفره‌ای را به خاک می‌دهد. به دلیل باز بودن انتهای شمع، خاک درون شمع در تراز سطح زمین قرار گرفته است. بار جانبی در ارتفاع ۰/۴۹۵ متری از سطح زمین توسط یک جک هیدرولیکی ۱۵۰ تنی به شمع وارد شده است.



شکل ۴-۵ نمایی شماتیک از آزمایش بار جانبی بر روی شمع منفرد [Rollins, et al. 2003]

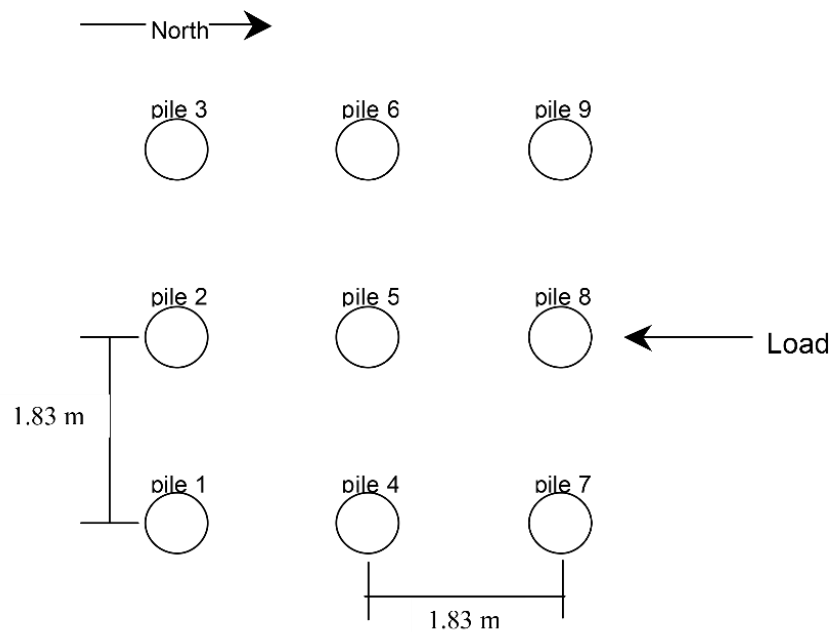
شمع منفرد با استفاده از رویکرد کنترل تغییرمکان<sup>۶</sup> در شش بازه برای ایجاد تغییرمکان هدف ۷/۶۲ میلی‌متر تا ۵۰/۸ میلی‌متر (۷/۶۲، ۱۴/۵۰، ۱۹/۲۰، ۲۴/۵۰، ۳۷/۵۰ و ۵۰/۸ میلی‌متر) بارگذاری شده است. در هر بازه، بار شمع ۱۵ بار تکرار شده است. بارگذاری شمع در یک جهت با استفاده از جک هیدرولیکی انجام شده، به صورتی که بعد رسیدن به تغییرمکان هدف، بار حذف شده و به شمع اجازه داده شده تا به موقعیت قبل از بارگذاری برگردد. مطابق روش سنتی در انجام آزمایش‌های استاتیکی، در چرخه اول بارگذاری، بار ۳ دقیقه نگه داشته شده و در این مدت قرائت‌ها به صورت دستی انجام شده و ابزارها بررسی شده است. در بقیه چرخه‌های بارگذاری، بار حدود ۱۰ ثانیه نگه داشته شده تا قرائت‌ها ثابت شوند.

#### ۴-۲-۵ آزمایش گروه شمع تحت اثر بار جانبی

۹ عدد شمع که از نظر مشخصات مشابه شمع مورد استفاده در آزمایش بارگذاری شمع منفرد بوده‌اند، در این آزمایش استفاده شده‌اند. آرایش گروه شمع ۹ عددی مطابق شکل ۴-۶ به صورت سه ردیف

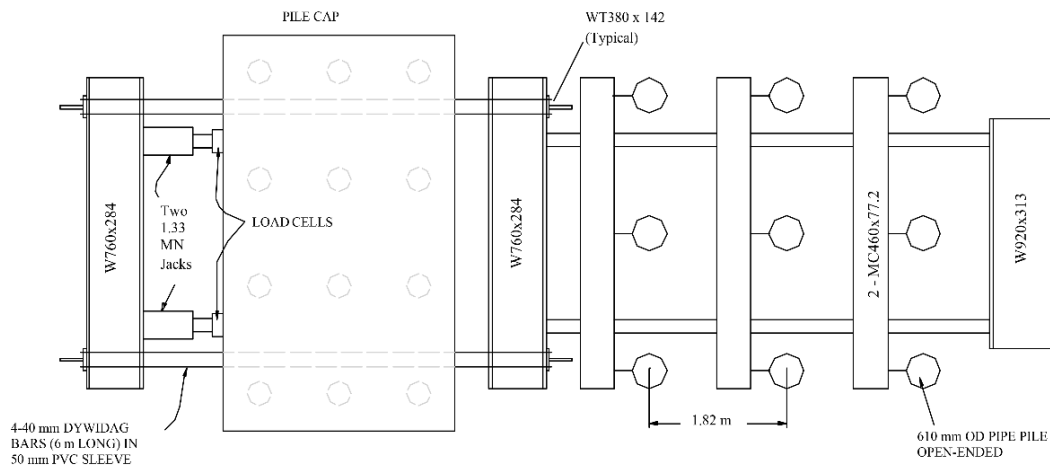
<sup>۶</sup> Displacement Control Approach

۳ عددی بوده است. فاصله مرکز به مرکز این شمع‌ها در بین ردیف‌ها و در بین شمع‌های موجود در یک ردیف برابر با  $1/83$  متر (سه برابر قطر شمع) بوده است. با توجه به شکل ۴-۶ شمع‌ها در گروه توسط یک شماره شناخته شده‌اند. ترتیب کوبش شمع‌ها به صورت مقابل بوده است: شماره ۲، شماره ۵، شماره ۸، شماره ۱، شماره ۶، شماره ۹، شماره ۴ و شماره ۷. کرنش‌سنج‌ها مطابق آن‌چه در بخش ۴-۲-۳ آمده است، برای شمع‌های میانی در هر ردیف تعبیه شده بودند.



شکل ۴-۶ نمایی از گروه شمع [Rollins, et al. 2003]

مطابق شکل ۴-۷ بار توسط دو عدد جک هیدرولیکی  $150$  تنی به شمع‌ها وارد شده است. یک سرشمع مربوط به یک آزمایش دیگر در همین محل، به عنوان تکیه‌گاه جک‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. یک قاب فولادی توسط اتصال ممان آزاد یا مفصلی (به وسیله Tie Rod) به شمع‌ها متصل شده است. این قاب فولادی در مقابل سختی شمع‌ها و خاک صلب در نظر گرفته شده است، در نتیجه شمع‌های موجود در گروه یک تغییرمکان ثابت را تجربه می‌کنند.

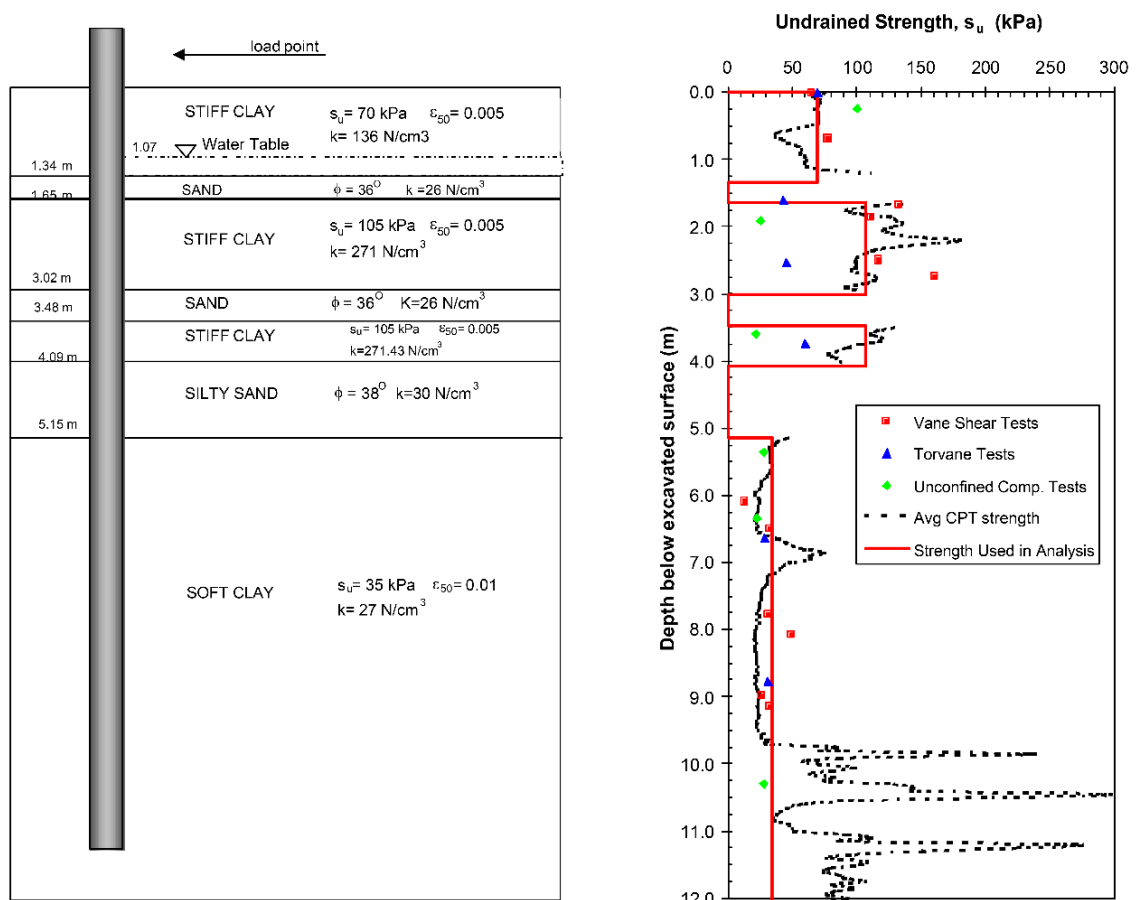


شکل ۴-۷ نمایی از تنظیمات آزمایش بار جانبی بر روی گروه شمع [Rollins, et al. 2003]

بارگذاری در گروه شمع نیز با استفاده از رویکرد کنترل تغییرمکان بوده است. در هر سطح تغییرمکان، بارگذاری ۱۵ بار تکرار شده است. بارگذاری گروه شمع نیز در یک جهت با استفاده از جک هیدرولیکی انجام شده، به صورتی که بعد از رسیدن به تغییرمکان هدف، بار حذف شده و به گروه شمع اجازه داده شده تا به موقعیت قبل از بارگذاری برگردد. تغییرمکان‌های هدف ۶/۳۵، ۱۲/۷۰ و ۲۱/۵۹ میلی‌متر به صورت چرخه‌ای اعمال شده‌اند. در نهایت یک چرخه بارگذاری برای ایجاد تغییرمکان هدف ۲۸/۷۰ میلی‌متر انجام شده است. چرخه‌های اضافی دیگر به دلیل صدمه به جک و ابزارهای سنجش نیرو امکان‌پذیر نبوده است.

#### ۴-۲-۶ مشخصات منحنی‌های $p-y$

با توجه به نتایج آزمایش‌های درجا و آزمایشگاهی، پروفیل ایده‌آل خاک مطابق شکل ۴-۸ ساخته شده است. پروفیل ایده‌آل خاک در اصل بر اساس قرائت‌های CPT توسعه داده شده است. در تعیین مقادیر مربوط به مقاومت برشی زهکشی نشده طراحی، بیشترین توجه به نتایج آزمایش VST بوده است. وزن مخصوص میانگین پروفیل خاک برابر با ۱۴/۹۳ کیلونیوتن بر مترمکعب در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۸ پروفیل ایده آل خاک به همراه مقادیر مربوط به مقاومت برشی زهکشی نشده برای طراحی [Rollins, et al. 2003]

شکل مشخصه مربوط به منحنی‌های  $p$ - $y$  برای هر لایه به همراه ضخامت لایه‌ها در جدول ۴-۲ نشان داده شده است. این داده‌ها از تفسیر نتایج مربوط به پروفیل خاک به دست آمده است و از آن به عنوان داده‌های ورودی برای مدل‌سازی خاک استفاده شده است.

#### ۴-۲-۷ تعیین ضرایب کاهش مقاومت برای گروه شمع

به دلیل فاصله مرکز به مرکز کوچک بین شمع‌ها، برابر با ۱/۸۳ متر (سه برابر قطر شمع) اثر اندرکنش شمع-خاک-شمع در گروه شمع مورد نظر قابل توجه خواهد بود. با توجه به اینکه نتایج آزمایش واقعی



برای شمع منفرد و گروه شمع موجود می‌باشد، روشی که در آن ضرایب کاهش مقاومت تعیین شده است، متفاوت با روش ارائه شده در فصل ۳ می‌باشد.

با توجه به آنالیز انجام شده در گزارش، ضرایب مقاومتی که رفتار گروه شمع را در نرم‌افزار در مقایسه با آزمایش انجام شده بهتر توصیف می‌کنند، به ترتیب ۰/۸۲، ۰/۶۱ و ۰/۴۵ برای ردیف جلویی (مقدم)، میانی و عقبی (دنباله) می‌باشد.

جدول ۲-۴ منحنی های p-y و ضخامت لایه ها جهت استفاده در مدل سازی خاک [Rollins, et al. 2003]

لایه	نوع خاک - منحنی p-y	تراز بالای لایه (متر)	تراز پایین لایه (متر)
۱	رس سخت بدون حضور آب آزاد (Reese and Welch, 1975)	۰/۴۶	۱/۸۰
۲	ماسه (Reese, et al, 1974)	۱/۸۰	۲/۰۸
۳	رس سخت بدون حضور آب آزاد (Reese and Welch, 1975)	۲/۰۸	۳/۴۵
۴	ماسه (Reese, et al, 1974)	۳/۴۵	۳/۹۳
۵	رس سخت بدون حضور آب آزاد (Reese and Welch, 1975)	۳/۹۳	۴/۵۴
۶	ماسه (Reese, et al, 1974)	۴/۵۴	۵/۶۱
۷	رس نرم (Matlock, 1970)	۵/۶۱	۱۲/۷۰

## ۳-۴ مدل سازی

حل عددی شمع‌های منفرد و گروه شمع متناظر با آن در هر دو مدل صحت‌سنجی و دلفین پهلوگیری توسط سه نرم‌افزار انجام شده است:

۱. LPile 2018

۲. Group 2016

۳. SAP2000 v20.0.0 (2017)

نرم‌افزار LPile که توسط شرکت Ensoft توسعه داده شده است، نسخه تجاری برنامه COM624 می‌باشد. COM624 که توسط دانشگاه تگزاس در آستین<sup>۷</sup> توسعه داده شده، به صورت وسیعی در عرصه‌های علمی و مشاوره برای آنالیز رفتار شمع‌ها تحت اثر بار جانبی استفاده شده است. آنالیز در این برنامه بر اساس معادله دیفرانسیلی است که رفتار تیر-ستون را در بستر غیرخطی توصیف می‌کند. تغییرشکل، لنگرهای خمشی و برش در شمع توسط روش تفاضل محدود محاسبه می‌شوند. در این نرم‌افزار، خاک و یا سنگ با استفاده از منحنی‌های  $p-y$  بر اساس توصیه‌های منتشر شده برای انواع خاک و سنگ، مدل می‌شود.

نرم‌افزار Group نیز که توسط شرکت Ensoft ارائه شده، در واقع نسخه توسعه داده شده نرم‌افزار LPile می‌باشد. با این حال چند تفاوت با LPile دارد: اولاً Group توانایی در نظر گرفتن ضرایب کاهش مقاومت را دارد، ثانیاً این نرم‌افزار پارامترهای دیگری نظیر چرخش گروه شمع را با استفاده از مقاومت اصطکاکی و انتهای شمع در نظر می‌گیرد. این نرم‌افزار به صورت داخلی رفتار خاک را در فرم

---

<sup>۷</sup> Austin

منحنی‌های  $t-z$  برای بار محوری، پیچش-چرخش برای بارهای پیچشی و  $p-y$  را برای بار جانبی تولید می‌کند. در جواب‌های حاصل از این نرم‌افزار، علاوه بر اقناع شدن شرایط تعادل، سازگاری بین حرکت شمع‌ها و پاسخ خاک و همچنین حرکت‌های سرشمع (کلاهدک) و ابتدای شمع‌ها کنترل می‌شود. با توجه به رفتار غیرخطی خاک، جواب‌ها نیاز به تکرار دارند.

در نقطه مقابل دو نرم‌افزار L-Pile و Group نرم‌افزار SAP2000 که توسط شرکت Computers and Structures توسعه داده شده است، یک نرم‌افزار چندمنظوره اجزای محدود می‌باشد که با وجود اینکه به صورت مستقیم امکان مدل‌سازی خاک را به کاربر نمی‌دهد، با استفاده از المان‌ها با رفتارهای مختلف، امکان مدل‌سازی‌های چندجانبه و سری را در مسائل مختلف فراهم می‌کند. در مدل‌سازی رفتار خاک به روش منحنی‌های  $p-y$  در نرم‌افزار SAP2000، ایده تیر-ستون بر روی یک بستر غیرخطی به صورت دستی با تعریف منحنی‌های  $p-y$  در فواصل مختلف قابل اجرا می‌باشد.

### ۱-۳-۴ نحوه مدل‌سازی شمع منفرد در L-Pile

مدل‌سازی شمع در L-Pile شامل مراحل مختلفی می‌باشد که در ادامه شرح داده شده است:

- تنظیمات محاسباتی: تنظیمات محاسباتی برای سه حالت متداول، حدی و غیرخطی وابسته به EI امکان‌پذیر می‌باشد. مدل موردنظر بر اساس حالت متداول طراحی (بدون در نظر گرفتن ضرایب بار و مقاومت) در نظر گرفته شده است. در حالت متداول طراحی امکان انجام آنالیز Pushover به کاربر داده می‌شود.

- تنظیمات مربوط به خاک‌های لایه‌ای: در این بخش این امکان وجود دارد که با استفاده از تئوری مطرح شده در فصل ۳، اثرات لایه‌ای خاک‌ها به روش جورجیادس در نظر گرفته شود. با توجه به لایه‌ای بودن خاک مدل موردنظر این گزینه فعال شده است.
- نوع بارگذاری و تعداد چرخه‌های بار: دو نوع بار استاتیکی و چرخه‌ای در این نرم‌افزار قابل تعریف می‌باشد که به دلیل استاتیکی در نظر گرفتن نیروی شناور در این پژوهش، از نوع استاتیکی استفاده شده است.
- تنظیمات مربوط به آنالیز: در این قسمت تعداد المان‌های شمع، حداکثر تعداد تکرارها، خطای همگرایی در تغییرشکل و حداکثر تغییرشکل مجاز در سر شمع تعیین می‌شود. برای مدل موردنظر مقادیر اشاره شده در جدول ۳-۴ نشان داده شده است.

جدول ۳-۴ تنظیمات مربوط به آنالیز شمع در LPile

<b>Analysis Control Options</b>	
Number of Pile Increments	110
Maximum Number of Iterations	1000
Convergence Tolerance on Deflections (m)	2.54E-07
Limit on Excessive Deflection of Pile Head (m)	2.54

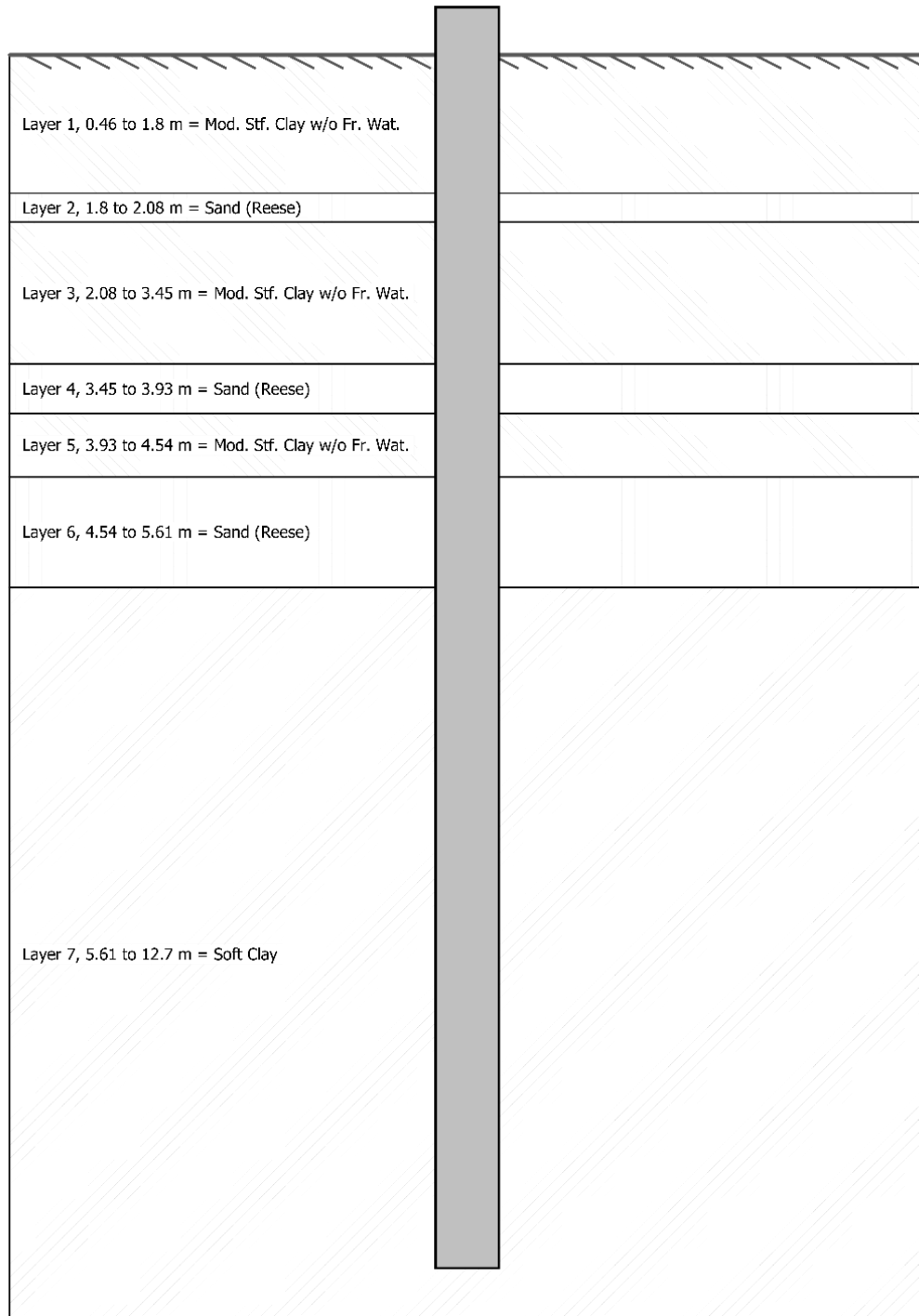
- تنظیمات مربوط به مشخصات شمع: این تنظیمات مشابه آن چه در بخش ۴-۲-۲ ارائه شده، انجام شده است. شمع از نوع مقطع لوله‌ای با قطر ۶۱۰ میلی‌متر، ضخامت جدار ۱۲/۷۰ میلی‌متر انتخاب شده است.
- تنظیمات مربوط به مشخصات خاک: این تنظیمات مشابه آن چه در بخش ۴-۲-۶ ارائه شده، انجام شده است. شکل ۴-۹ پروفیل خاک و شمع رسم شده در LPile را نشان می‌دهد.

- تنظیمات مربوط به شرایط تکیه‌گاهی سر شمع و بارها: با توجه به آزمایش ارائه شده، شرایط مرزی سر شمع از نوع لنگر خمشی و برش در سر شمع انتخاب شده است. شرایط مختلف مرزی در LPile وابسته بارها می‌باشد، بدین صورت که در مدل موردنظر برای در نظر گرفتن شرایط لنگر آزاد، لنگر در سر شمع صفر در نظر گرفته شده است. جدول ۴-۴ این شرایط را نشان می‌دهد.

- تنظیمات مربوط به آنالیز Pushover: همان‌طور که پیشتر گفته شد، در حالت طراحی متداول امکان انجام این آنالیز وجود دارد. آنالیز پوش در LPile بر اساس شرایط مرزی سر شمع، حداقل و حداکثر تغییر مکان، تعداد گام‌های بارگذاری و مقدار نیروی محوری تعیین می‌شود. این تنظیمات در مدل صحت‌سنجی استفاده نشده است و در مدل دلفین (فصل آینده) توضیح داده خواهد شد.

جدول ۴-۴ شرایط مرزی سر شمع و بارگذاری در شمع منفرد مدل صحت‌سنجی

Pile-Head Loading Condition		
Case	Shear (kN)	Moment (kN-m)
1	133	0
2	190	0
3	240	0
4	275	0
5	300	0
6	350	0
7	414	0



LPile 2018.10.03, © 2018 by Ensoft, Inc.

شکل ۹-۴ پروفیل شمع و خاک در LPile

## ۲-۳-۴ نحوه مدل‌سازی گروه شمع در Group

مدل‌سازی گروه شمع در Group شامل مراحل مختلفی می‌باشد که در ادامه شرح داده شده است:

- تنظیمات مربوط مقطع عرضی شمع: تنظیمات این بخش مربوط به مشخصات مقطع شمع و نوع مقطع از نظر رفتار خطی یا غیرخطی می‌باشد. مقطع شمع مورد استفاده در مدل‌سازی مشابه مقطع در LPile و از نوع رفتار خطی (الاستیک) انتخاب شده است.
- تنظیمات مربوط به مشخصات شمع: تنظیمات این قسمت مرتبط با طول شمع، تعداد المان‌های در نظر گرفته شده برای هر شمع و نوع شمع از نظر کوبشی<sup>۸</sup> و یا حفاری شده<sup>۹</sup> می‌باشد. در آنالیز حاضر شمع از نوع کوبشی با طول ۱۲/۱۹ متر و با تعداد ۱۰۰ المان تعریف شده است.

تنظیمات مربوط به مشخصات گروه شمع: در این قسمت مشخصات گروه شمع، از قبیل شرایط مرزی سر شمع‌ها، تعداد ردیف‌ها، نوع مقطع عرضی و طولی شمع، فاصله بین شمع‌ها و ضرایب کاهش مقاومت جهت در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و شمع قابل تعریف می‌باشد. با توجه به بخش ۲-۴-۵ و ۷-۲-۴ تنظیمات مطابق جدول ۴-۵ اعمال شده است:

---

<sup>۸</sup> Driven

<sup>۹</sup> Bored

جدول ۴-۵ مشخصات گروه شمع در Group

Sub-Group	Pile Head Condition	Number of Piles	Rotational Spring (kN-m/rad)	Pile to Pile Spacing (m)	P-Multiplier	Y-Multiplier
1	Pinned	3	0	1.83	0.82	1.00
2	Pinned	3	0	1.83	0.61	1.00
3	Pinned	3	0	1.83	0.45	1.00

– تنظیمات مربوط به مختصات سر شمع‌ها: تنظیمات مربوط به مختصات سر شمع‌ها شامل فاصله بین شمع‌ها، زاویه مایل شمع و ارتفاع شمع از سطح زمین در این قسمت قابل انجام می‌باشد. با توجه به آزمایش ارائه شده مرتبط با گروه شمع، زاویه مایل شمع‌ها برابر با صفر، فاصله سر شمع از سطح زمین برابر با ۰/۴۶ متر و فاصله میان شمع‌ها ۱/۸۳ متر تنظیم شده است.

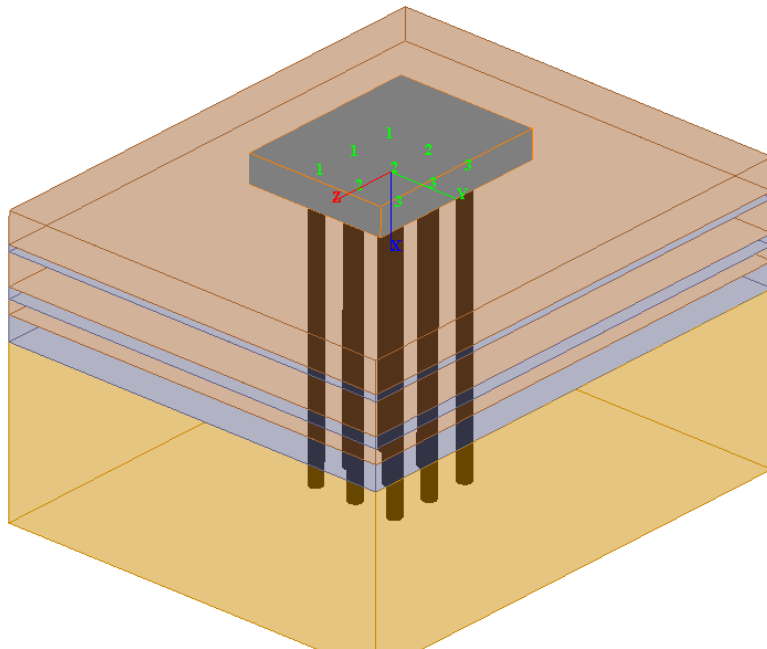
– تنظیمات مربوط به بارگذاری: تنظیمات این بخش شامل نوع بارگذاری (مرده، زنده، زلزله و ...)، رویکرد بارگذاری (کنترل تغییرمکان/نیرو)، طبیعت بار (استاتیکی/چرخه‌ای)، نوع خروجی‌ها می‌باشد. انواع مختلفی از بارگذاری در این نرم‌افزار قابل اعمال می‌باشد. با توجه به آزمایش گروه شمع موردنظر، بارگذاری استاتیکی از نوع کنترل تغییرمکان در جهت اعمال بار برای تغییرمکان‌های هدف برابر با ۶/۳۵، ۱۲/۷۰، ۲۱/۵۹ و ۲۸/۷۰ میلی‌متر انتخاب شده است.

– تنظیمات مربوط به سرشمع (کلاهک): در تنظیمات این قسمت امکان تعریف ابعاد سرشمع شامل طول، عرض و ضخامت وجود دارد. اگر نوع سرشمع به صورت مدفون در خاک انتخاب شود، می‌بایست برای محاسبه مقاومت ناشی از خاک در مجاور سرشمع، ابعاد سرشمع وارد



شود. اگر سرشمع به صورت غیرمدفون انتخاب شود و ابعادی برای آن وارد نشود، مشخصات سرشمع برای حالت سه‌بعدی تخمین زده می‌شود. در آنالیز حاضر ابعاد سرشمع وارد نشده است. بنابراین فرض به عدم وجود سرشمع می‌باشد.

– تنظیمات مربوط به لایه‌های خاک: تنظیمات مربوط به لایه‌های خاک عیناً مطابق با ورودی-های نرم‌افزار LPile مطابق آنچه در گزارش مربوط به آزمایش‌ها آمده، وارد شده است. شکل ۱۰-۴ گروه شمع و لایه‌های خاک در نرم‌افزار Group را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-۴ پروفیل خاک به همراه گروه شمع تعریف شده در Group

– تنظیمات مربوط به آنالیز گروه شمع: تنظیمات مربوط به آنالیز گروه شمع شامل فضای آنالیز و تنظیمات مربوط به تعداد خطا و تکرارها می‌باشد. آنالیز در آزمایش گروه شمع به دلیل یکسان بودن مشخصات شمع‌ها در هر ردیف از نوع ۲ بعدی انتخاب شده است. تنظیمات مربوط به خطا و تکرار مطابق حالت پیش‌فرض به صورت نشان داده شده در جدول ۴-۶ انتخاب شده است.

جدول ۴-۶ تنظیمات مربوط به آنالیز شمع در Group

Control Options for Load Cases	
Maximum Iteration on Pile Group	100
Maximum Iteration on Individual Pile	100
Tolerance on Equilibrium of Pile Group (DU/U)	0.0001
Tolerance of Pile Deflection (m)	0.0001
Initial Step Increment	1
Minimum Step Increment	1

### ۳-۳-۴ نحوه مدل سازی شمع منفرد و گروه شمع متناظر در SAP2000

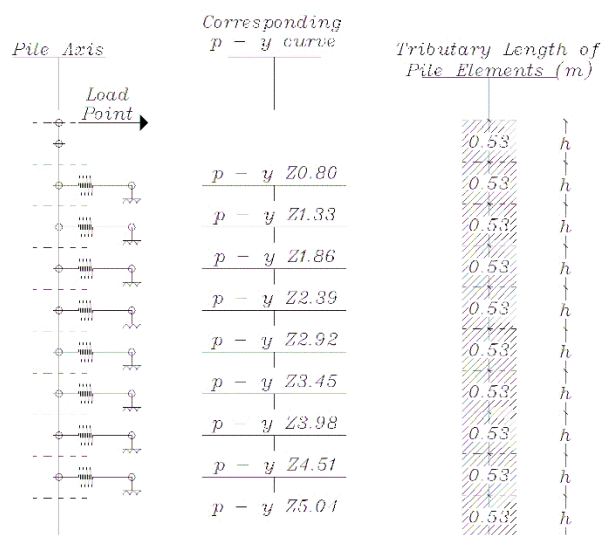
جهت مدل سازی شمع منفرد و گروه شمع متناظر با آن در SAP2000، مشخصات شمع شامل قطر، طول و ضخامت جدار عینا مشابه با مدل L-Pile و Group انتخاب شده است. نکات حائز اهمیت در مدل سازی SAP2000 به شرح زیر می باشد:

- جهت مدل سازی رفتار خاک با استفاده از منحنی  $p-y$  از المان Link از نوع چندخطی-پلاستیک<sup>۱۰</sup> به صورت غیرخطی استفاده شده است. با توجه به اینکه المان Link از نوع نیرو تغییرمکان ( $f-y$ ) می باشد، نیاز است که در هنگام انتقال منحنی های  $p-y$  از L-Pile به SAP2000 مقاومت خاک در بازه مورد نظر به نیروی متناظر با آن تبدیل شود. با توجه به شکل ۴-۱۱، این کار با استفاده از ضرب کردن مقاومت خاک در طول شاخه ای<sup>۱۱</sup> از شمع که

<sup>۱۰</sup> MultiLinear - Plastic

<sup>۱۱</sup> Tributary Length

منحنی p-y برای آن تعریف شده، انجام می‌شود. طول شاخه‌ی منحنی‌ها در مدل صحت-سنجی برابر با ۰/۵۳ متر در نظر گرفته شده است.

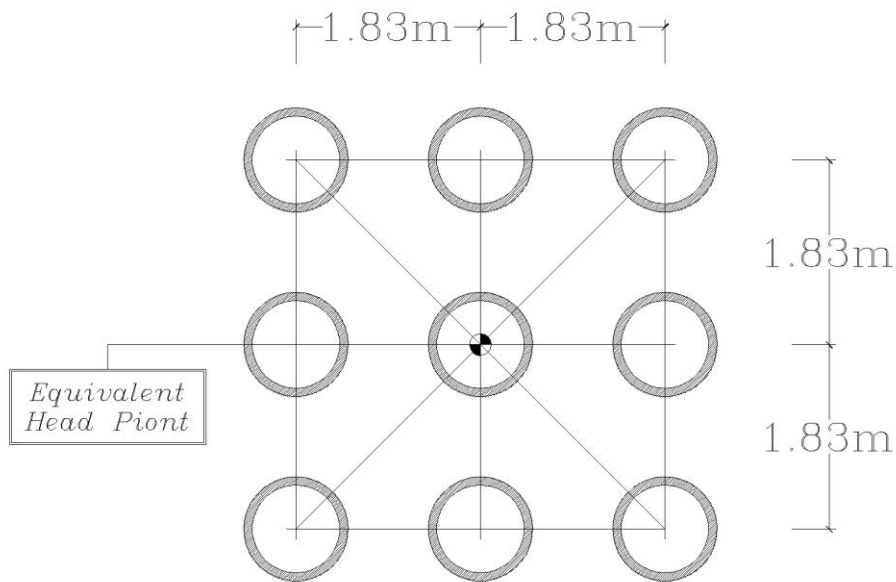


شکل ۴-۱۱ نمایی شماتیک از نحوه مدل سازی منحنی p-y در SAP2000 به صورت منحنی f-y

- نوع آنالیز به سبب غیرخطی بودن رفتار خاک از نوع استاتیک غیرخطی<sup>۱۲</sup> با کنترل تغییرمکان برای تغییرمکان‌های هدف در شمع منفرد و گروه شمع انتخاب شده است.
- در هنگام مدل سازی گروه شمع، با توجه به ضرایب کاهش مقاومت به دلیل اندرکنش میان شمع‌ها و خاک، نیاز است که این اصلاحات در ضرایب مقاومت در تعاریف المان Link لحاظ شود. بدین صورت که می‌بایست برای شمع‌های موجود در هر ردیف یک دسته منحنی p-y خاص با ضریب کاهشی خاص همان ردیف نسبت به منحنی‌های p-y شمع منفرد استفاده شود.
- در هنگام مدل سازی گروه شمع، شرایط مرزی سرشمع می‌بایست مورد توجه قرار بگیرد و به درستی مدل شود. در گروه شمع موردنظر با توجه به اینکه اتصال قاب فولادی سرشمع از نوع

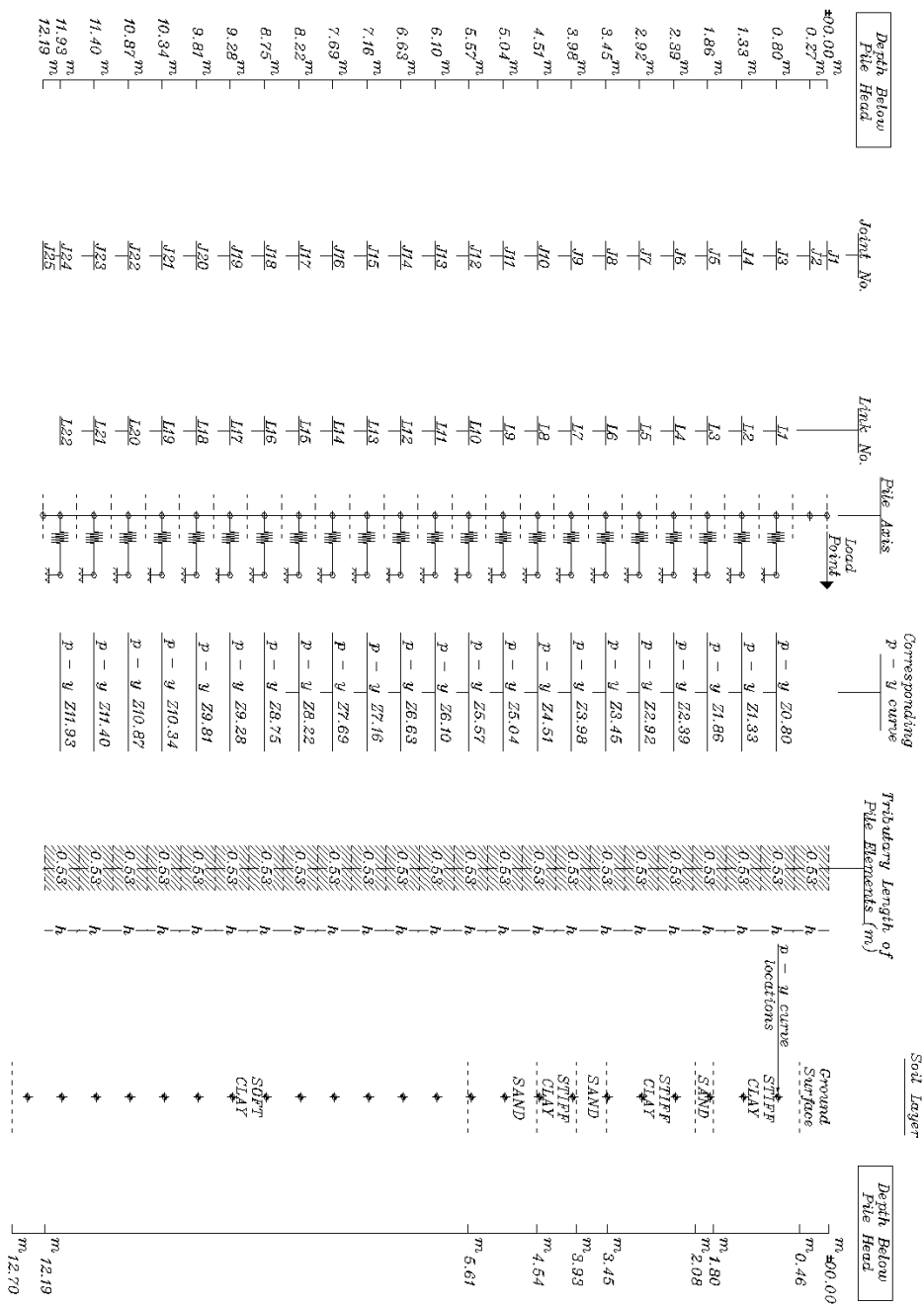
<sup>۱۲</sup> Nonlinear Static

ممان آزاد در نظر گرفته شده و تغییرمکان تمامی سرشمع‌ها یکسان می‌باشد، نقاط مربوط به سرشمع‌ها توسط Equal Displacement Constraint به یکدیگر مرتبط شده‌اند، در واقع این نوع محدودیت در سرشمع باعث می‌شود که نقاط انتخاب شده با در درجات آزادی مشخص با یکدیگر حرکت کنند و تغییرمکان ثابتی را تجربه کنند. شکل ۴-۱۲ این شرایط را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۲ شرایط مرزی سرشمع در گروه شمع مدل صحت‌سنجی

– شکل ۴-۱۳ نمایی شماتیک از مدل شمع منفرد را به همراه المان‌های Link و فواصل آن نشان می‌دهد. مدل گروه شمع مشابه با شمع منفرد می‌باشد، با این تفاوت که منحنی‌های p-y در هر ردیف ضریب کاهش خاصی خود را دارند.



شکل ۴-۱۳ نمایی شماتیک از مدل شمع منفرد صحت‌سنجی در SAP2000

## ۴-۴ نتایج

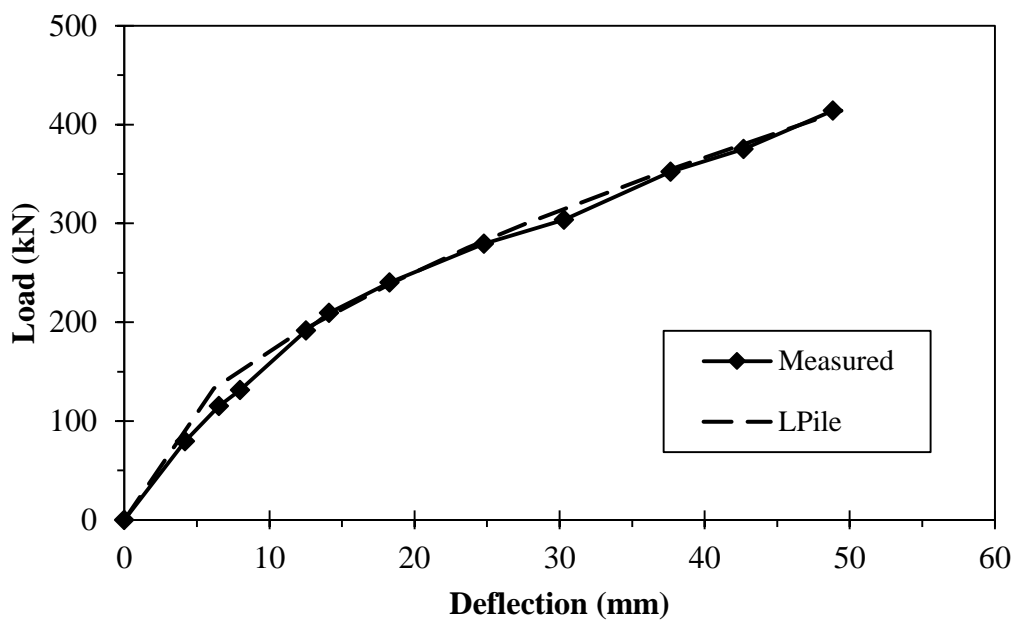
در این بخش نتایج حاصل از مدل‌سازی شمع منفرد و گروه شمع متناظر با آن در نرم‌افزارهای L-Pile، Group و SAP2000 با نتایج آزمایش‌های با مقیاس واقعی مقایسه خواهد شد. همان‌طور که در ادامه نشان داده خواهد شد، نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها مطابقت خوبی با نتایج آزمایش واقعی دارند و به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت که مدل ارائه شده از لحاظ صحت مورد تایید می‌باشد.

### ۴-۴-۱ منحنی بار-تغییرمکان در سر شمع (شمع منفرد)

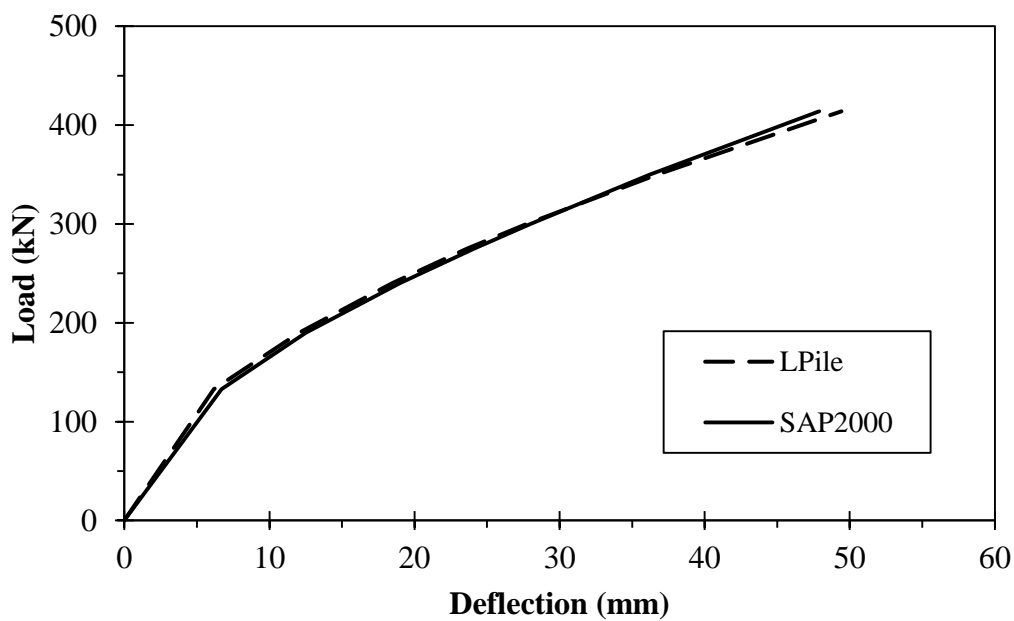
در شکل ۴-۱۴ منحنی بار-تغییرمکان اندازه‌گیری شده در چرخه اول بارگذاری با مقادیر به دست آمده از نرم‌افزار L-Pile مقایسه شده است. در تغییرمکان‌های کوچکتر از ۱۲ میلی‌متر، منحنی L-Pile از مقادیر اندازه‌گیری شده بزرگتر است. با این حال در تغییرمکان‌های بزرگتر از ۱۲ میلی‌متر، دو منحنی مشابه یکدیگر هستند و اختلاف‌ها در حدود ۵ درصد می‌باشد.

در شکل ۴-۱۵ مقایسه نتایج محاسبه شده توسط L-Pile و SAP2000 انجام شده است. به طور کلی تطابق میان مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش و مقادیر محاسبه شده توسط L-Pile و SAP2000 مطلوب می‌باشد.

با توجه به نتایج آزمایش شمع منفرد در برابر بار حداکثر ۳/۴۱۴ کیلونیوتن قرار می‌گیرد، که مرتبط به تغییرمکان ۸/۴۸ میلی‌متر می‌باشد. [Rollins, et al, 2003]



شکل ۴-۱۴ منحنی بار-تغییرمکان اندازه گیری شده در آزمایش و مدل LPile



شکل ۴-۱۵ منحنی بار-تغییرمکان مدل LPile و مدل SAP2000

#### ۴-۴-۲ منحنی لنگر خمشی در طول شمع (شمع منفرد)

منحنی لنگر خمشی در برابر عمق شمع بر اساس اندازه‌گیری، مدل LPile و مدل SAP2000 در شکل ۴-۱۶ و شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است. در آنالیز LPile و SAP2000 عمق لنگر خمشی حداکثر با افزایش بار افزایش می‌یابد، در حالی که به نظر نمی‌رسد در لنگر خمشی ثبت شده در آزمایش با افزایش بار، افزایش محسوسی در عمق وجود داشته باشد. با این وجود، متوسط عمقی که در آن لنگرهای حداکثر در مدل محاسباتی اتفاق افتاده است، به عمقی که در آن لنگر خمشی حداکثر در آزمایش اتفاق افتاده است، ۲/۳۸ متر، می‌رسد.

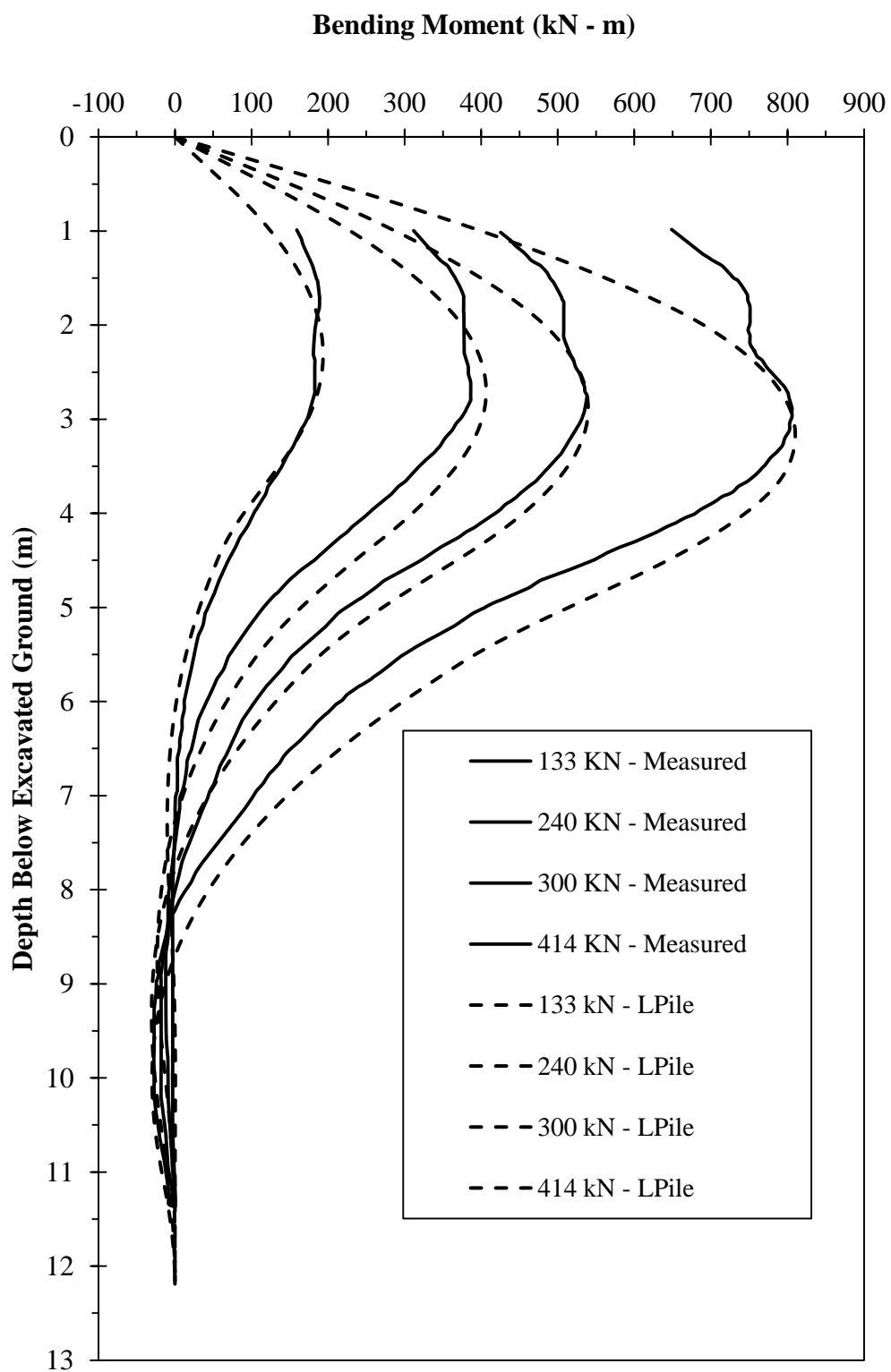
رولینز<sup>۱۳</sup> و همکارانش در توجیه مقادیر لنگر خمشی در عمق ۱/۷۸ متری، به قرائت نادرست کرنش-سنج در این عمق که باعث ایجاد لنگرهای کوچکتر می‌شود، اشاره کرده‌اند. با این حال حتی اگر لنگر خمشی در نقطه ۱/۷۸ متری بزرگتر از مقدار ثبت شده باشد، منحنی‌های اندازه‌گیری و محاسبه شده شباهت بیشتری پیدا می‌کردند، به خصوص در سطح بار پایین‌تر. [Rollins, et al, 2003]

حداکثر لنگر خمشی در این آزمایش برابر با ۸۱۲/۶ کیلونیوتن-متر می‌باشد. لنگر-خمشی‌ای که باعث تسلیم شمع می‌شود، در حدود ۱۱۲۹ کیلونیوتن-متر تخمین زده شده است، در نتیجه تسلیم‌شدگی در هیچ یک از نقاط شمع رخ نداده است [Rollins, et al, 2003].

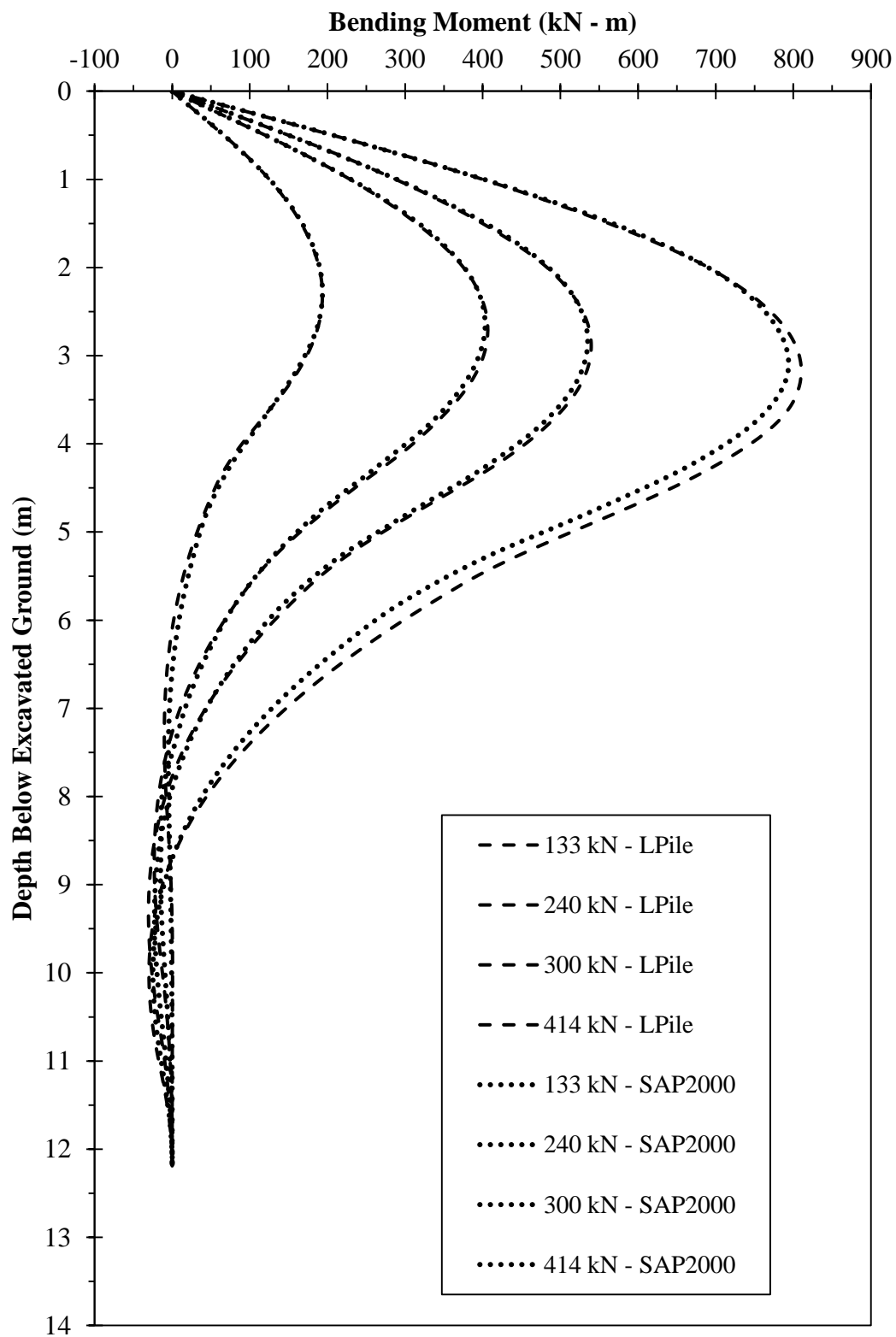
---

<sup>۱۳</sup> Rollins





شکل ۴-۱۶ منحنی لنگر خمشی-عمق اندازه گیری شده در آزمایش و مدل LPile

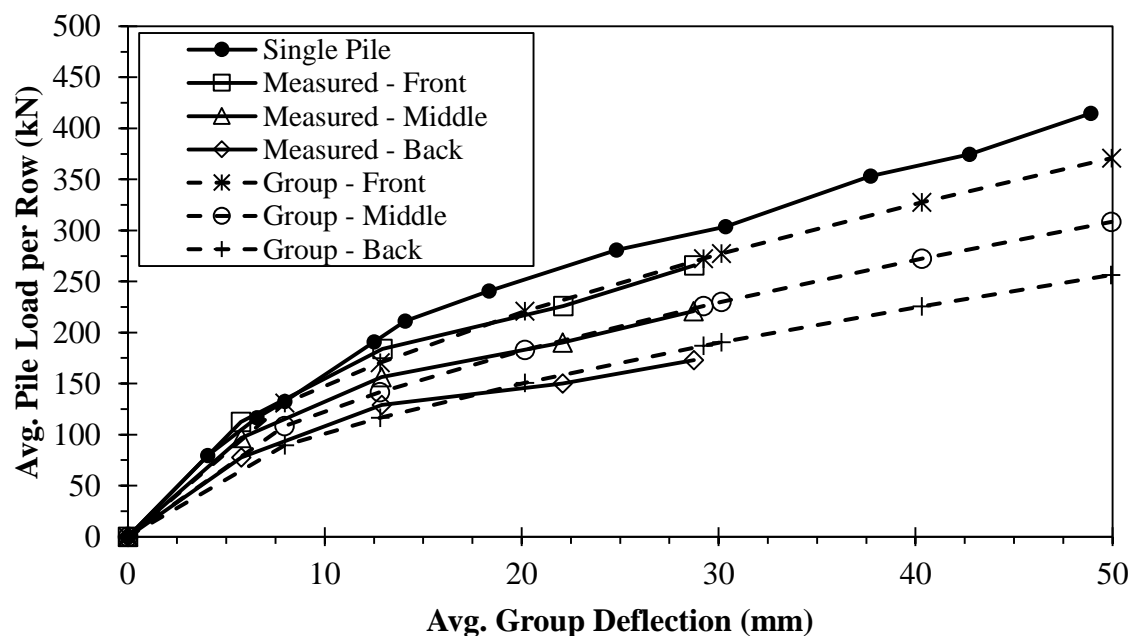


شکل ۱۷-۴ منحنی لنگر خمشی-عمق در مدل L-Pile و مدل SAP2000

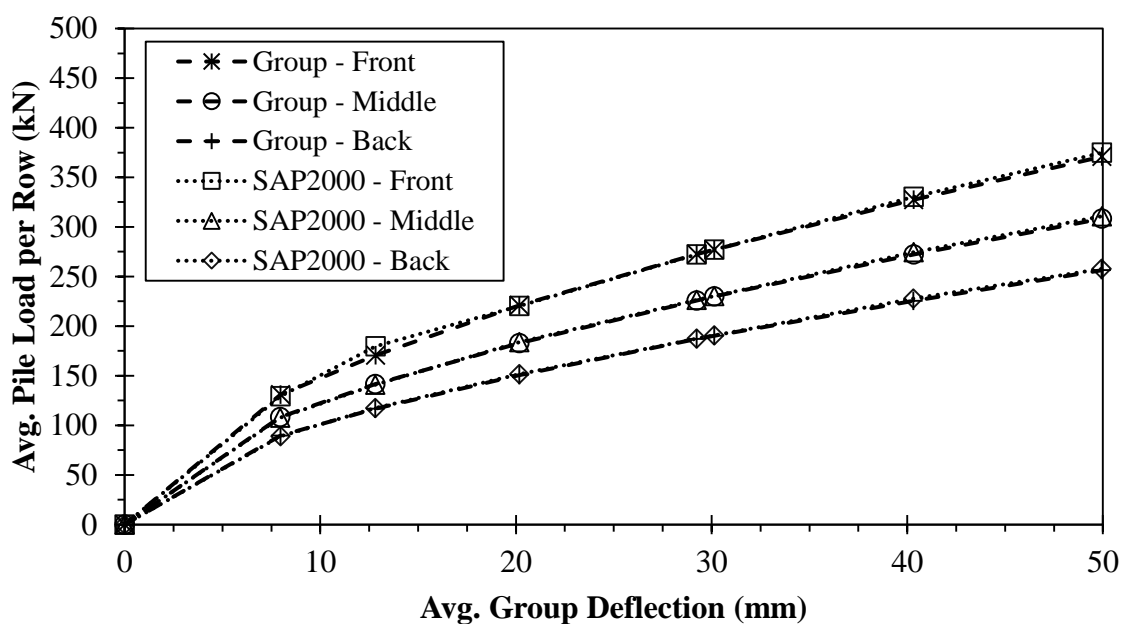
### ۳-۴-۴ منحنی بار-تغییرمکان در سرشمع (گروه شمع)

شکل ۱۸-۴ منحنی بار-تغییرمکان اندازه‌گیری شده برای سه ردیف شمع در گروه و شمع منفرد را به همراه نتایج به دست آمده از نرم‌افزار Group نشان می‌دهد. همچنین مقایسه میان نتایج مدل Group و SAP2000 در شکل ۱۹-۴ نشان داده شده است. بار در هر ردیف میانگین بار حمل شده توسط شمع‌هایی است که آن ردیف را می‌سازند و تغییرمکان به صورت میانگین تغییرمکان کل گروه شمع می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رود، مطابق آنچه در فصل ۳ ارائه شده است، ردیف جلویی شمع‌ها (شمع مقدم) باری مشابه با بار شمع منفرد را تحمل می‌کند، در حالی که ردیف‌های عقبی (دنباله) در تغییرمکان‌های مساوی بار کمتری را تحمل می‌کنند.

در سطح تغییرمکان پایین، نتایج مدل‌های محاسباتی به نوعی مقاومت خاک را کمتر تخمین می‌زند، اما نتایج مدل‌های محاسباتی و اندازه‌گیری‌ها در تغییرمکان‌های بالاتر مشابه هم می‌باشد.



شکل ۱۸-۴ منحنی بار-تغییرمکان اندازه‌گیری شده در آزمایش و مدل Group

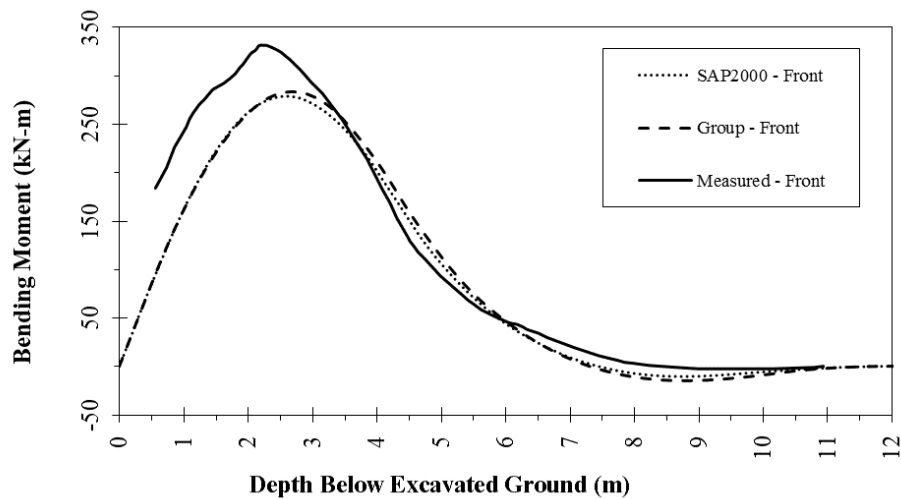
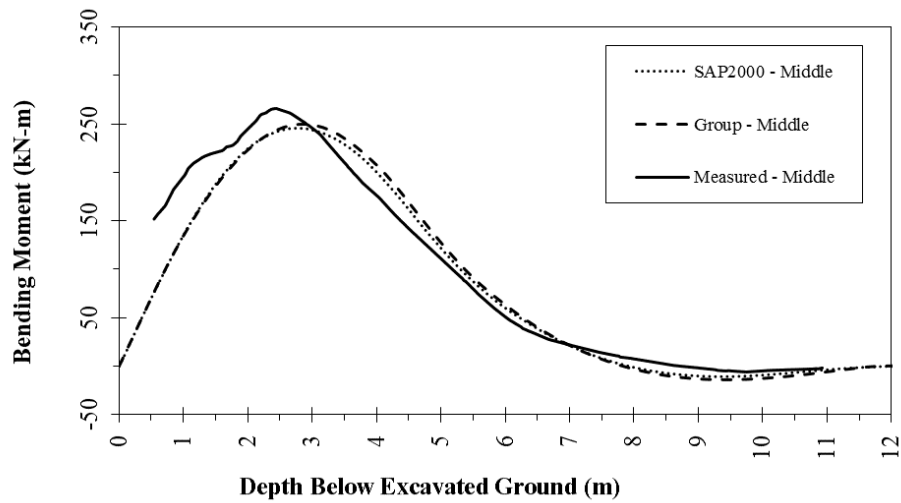
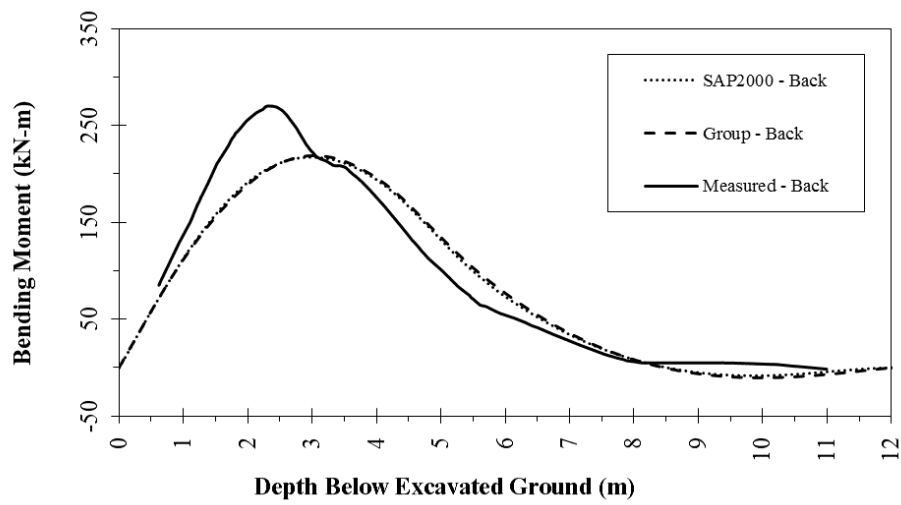


شکل ۱۹-۴ منحنی بار-تغییرمکان مدل Group و مدل SAP2000

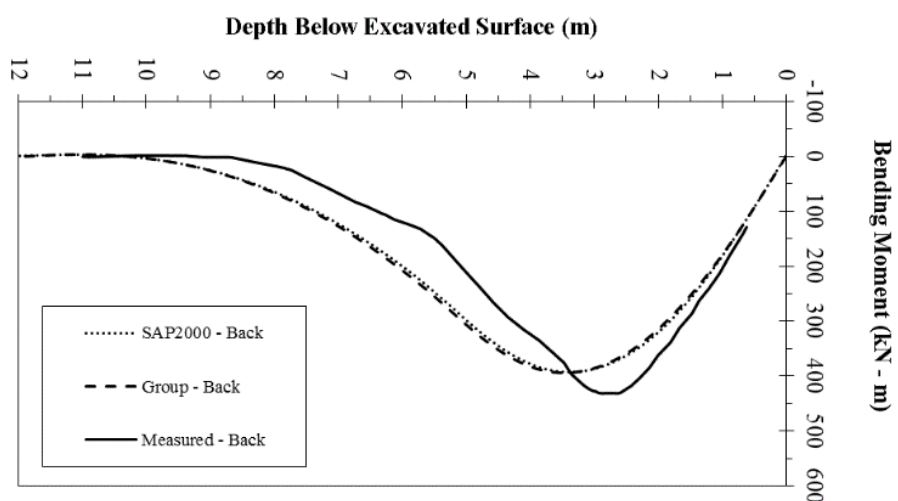
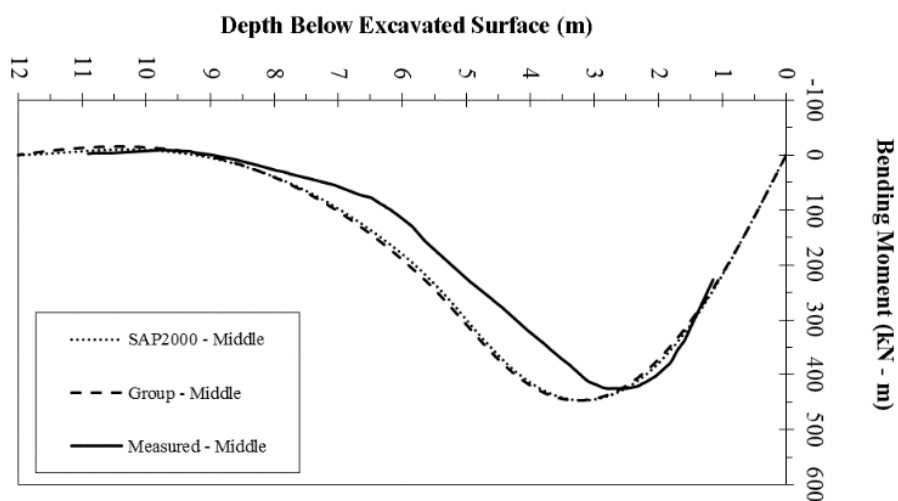
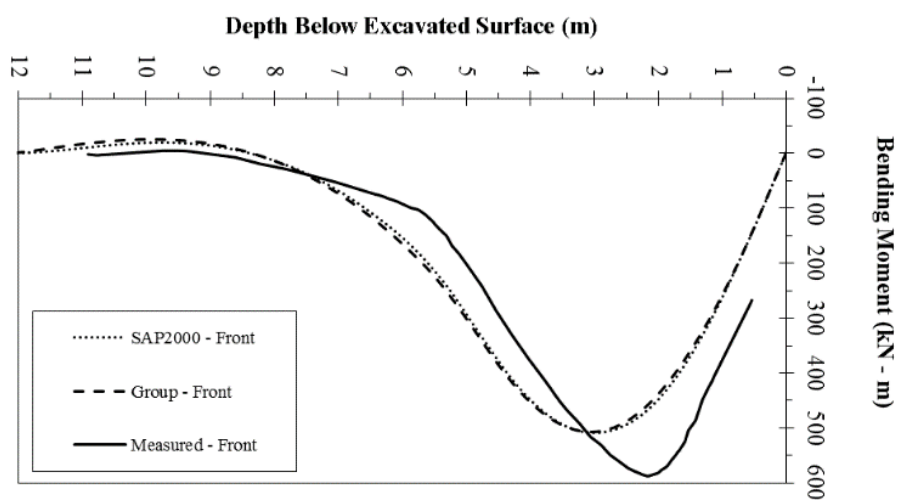
#### ۴-۴-۴ لنگر خمشی در طول شمع (گروه شمع)

شکل ۲۰-۴ و شکل ۲۱-۴ منحنی لنگر خمشی در برابر عمق را برای هر ردیف از گروه شمع نشان داده است. شکل ۲۰-۴ مربوط به تغییرمکان ۱۲/۷۵ میلی‌متر و شکل ۲۱-۴ مربوط به تغییرمکان ۲۹/۲۰ میلی‌متر می‌باشد. در حالت کلی، شکل منحنی‌های محاسباتی با استفاده از Group و SAP2000 نزدیک به منحنی‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش است. با این حال در هر ردیف، منحنی محاسباتی در عمق کمتری نسبت به منحنی‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش به صفر می‌رسد.

ردیف مقدم شمع‌ها لنگر خمشی بزرگتری را نسبت به شمع‌های موجود در ردیف وسط و عقب تحمل می‌کنند. با این حال، با افزایش عمق، لنگر خمشی در هر سه ردیف تقریباً نزدیک به یکدیگر می‌شوند. مقادیر حداکثر لنگر خمشی به طور کلی برای هر سه ردیف در عمقی برابر با ۲/۳۸ متر (۳/۹ برابر قطر شمع) اتفاق افتاده‌اند. در عمقی پایین‌تر از ۵ متر (۸/۲ برابر قطر شمع) مقادیر لنگر خمشی در هر سه ردیف تفاوت کمی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۰ لنگر خمشی اندازه‌گیری شده در آزمایش و محاسبه شده توسط Group و SAP2000 برای تغییرمکان ۱۲/۷۵ میلی‌متر



شکل ۴-۲۱ لنگر خمشی اندازه‌گیری شده در آزمایش و محاسبه شده توسط Group و SAP2000 برای تغییرمکان ۲۹/۲۰ میلی‌متر

# فصل ۵ دل و لہنہ پہلوگیری

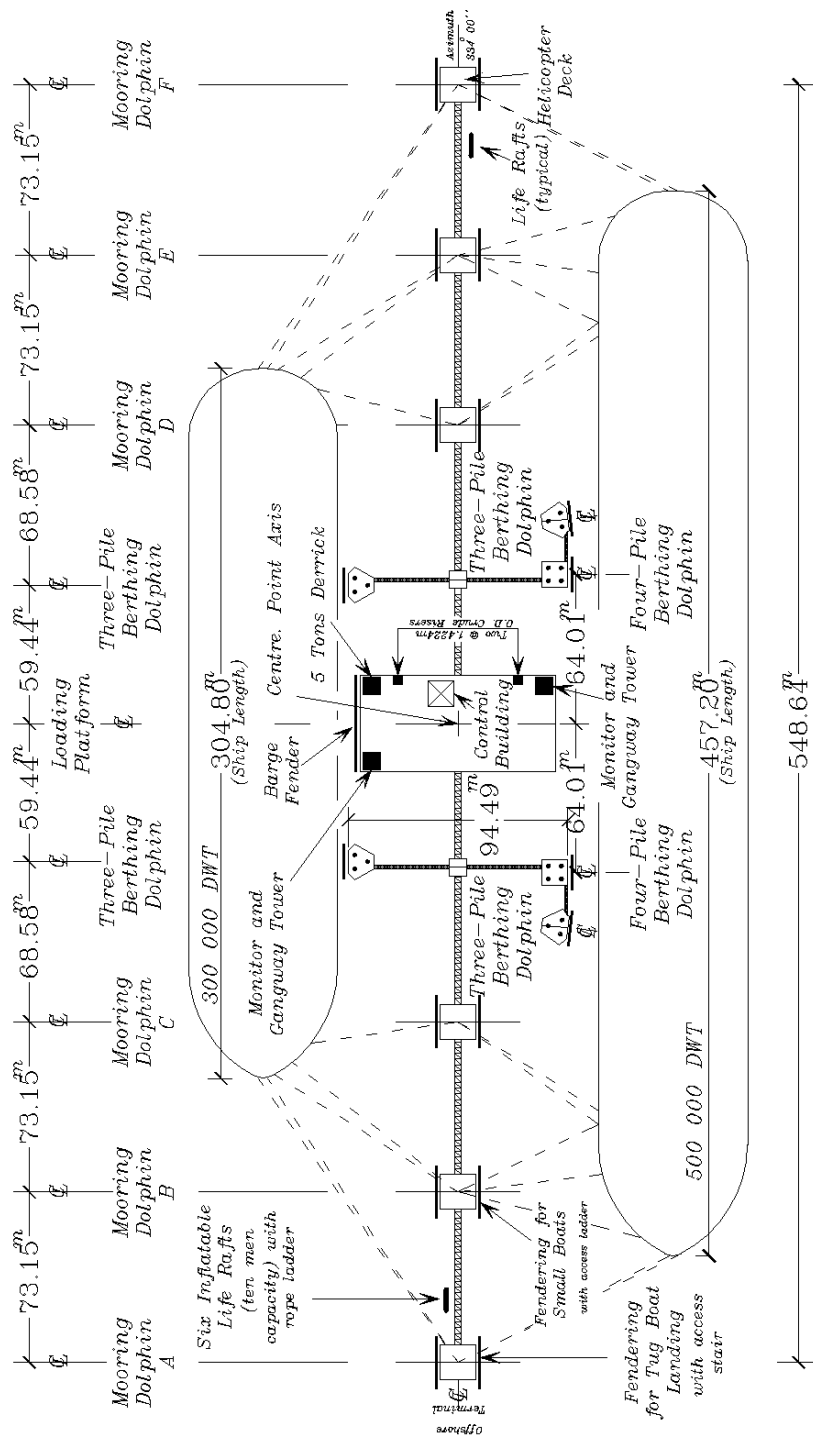
## ۱-۵ مقدمه

در این فصل به بررسی رفتار یک دلفین پهلوگیری از یک سازه خاص دریایی پرداخته خواهد شد. در ابتدا با مروری بر سازه موردنظر، مشخصات موردنیاز جهت مدل‌سازی ارائه خواهد شد. سپس نتایج حاصل از تحلیل الاستیک جهت محاسبه ظرفیت جذب انرژی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. ذکر این نکته ضروری است که رفتارهای غیرخطی مدل می‌تواند از رفتار غیرخطی سازه و یا ورود لایه‌های خاک به محدوده‌های غیرخطی ناشی شود. همان‌طور که در ادامه نشان داده خواهد شد، در محدوده رفتار خطی مصالح شمع، تعدادی از منحنی‌های  $p-y$  وارد حد غیرخطی و یا حتی پلاستیک می‌شوند.

## ۲-۵ مدل دلفین پهلوگیری

مدل انتخاب شده برای دلفین پهلوگیری اقتباسی از دلفین‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر در یکی از بزرگترین ترمینال‌های نفتی در دنیا است. این ترمینال برای پهلوگیری به شناورهای در رده تناژ ۲۰۰،۰۰۰ تا ۵۰۰،۰۰۰ طراحی شده است. طرح آن مربوط به سال ۱۹۷۰ میلادی می‌باشد. شکل ۱-۵ نمایی از این اسکله و سازه‌های پهلوگیری آن نشان می‌دهد. با وجود این که برخی از داده‌های مربوط به این اسکله (ضخامت جدار شمع‌ها، مشخصات بتن موجود در شمع‌های فولادی و...) در مقالات موجود نمی‌باشد، سعی بر آن شده است که تا حد امکان مدل مشابه با نمونه واقعی باشد.

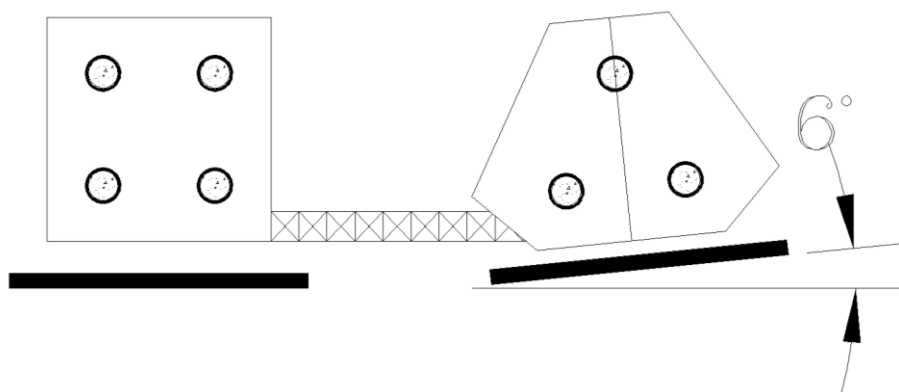




شکل ۱-۵ نمایی از ترمینال نفتی [Marriott & Van Den Berg 1974]

به طور مشخص، سازه پهلوگیری موردنظر جهت طراحی در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. این سازه از دو واحد جدا از هم تشکیل شده است؛ یک دلفین ۴ شمع و یک دلفین ۳ شمع. دلفین ۳ شمع به

همراه صفحه ضربه گیر چوبی آن زاویه ۶ درجه با خط پهلوگیری می‌سازند. در نتیجه در هنگام پهلوگیری موازی شناور با سازه پهلوگیری (هر چند غیرمعمول)، دلفین ۳ شمعی خواهد چرخید و به عنوان یک واحد جذب انرژی نسبت به دلفین ۴ شمعی کمتر از کارایی کمتری برخوردار خواهد بود. این فلسفه طراحی برای در نظر گرفتن پهلوگیری شناور با زاویه ۶ درجه نسبت به خط پهلوگیری می‌باشد. توزیع انرژی بین سازه ۴ شمعی و ۳ شمعی در حالت پهلوگیری موازی به ترتیب ۷۳ و ۲۷ درصد بوده در حالی که در هنگام پهلوگیری شناور با زاویه حداکثر ۶ درجه این توزیع به ۴۰ و ۶۰ درصد می‌رسد. [Marriott & Van Den Berg 1974] [Marriott, et al, 1974]

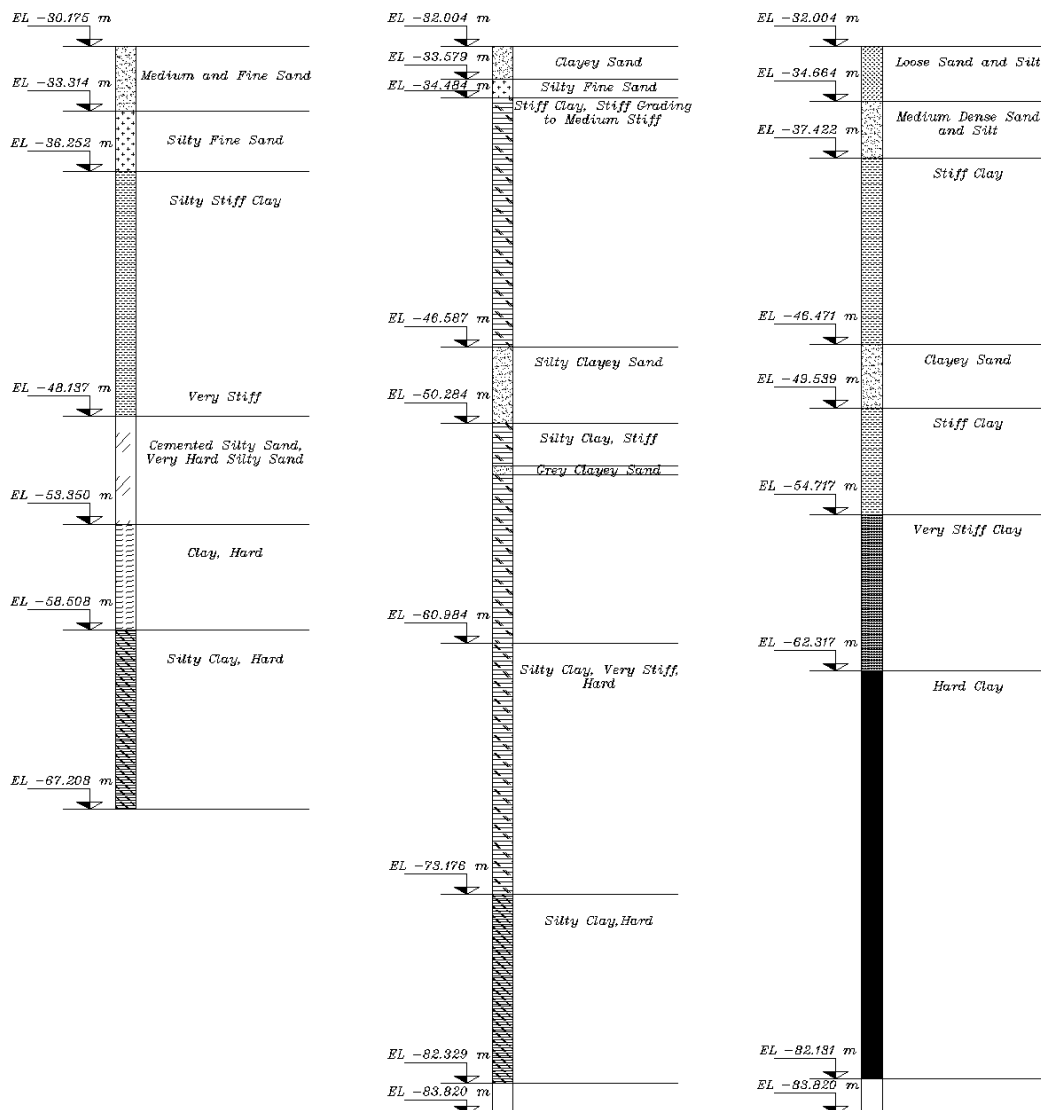


شکل ۵-۲ نمایشی از سازه پهلوگیری ۳ و ۴ شمعی [Marriott & Van Den Berg 1974]

هدف در پژوهش حاضر مدل‌سازی دلفین پهلوگیری ۴ شمعی می‌باشد.

## ۵-۲-۱ مشخصات ژئوتکنیکی محل دلفین

گمانه‌های متعددی در محل سازه‌های پهلوگیری و در طول خط لوله احتمالی بین سازه و ساحل برای شناسایی خاک و انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی در محل حفر شده است. نتایج این گمانه‌ها برای خاک در محل سازه و دلفین‌های پهلوگیری آن در شکل ۵-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵ گمانه‌ها در محل سازه و دلفین‌های پهلوگیری [Marriott & Van Den Berg 1974]

## ۲-۲-۵ مشخصات شمع مورد استفاده

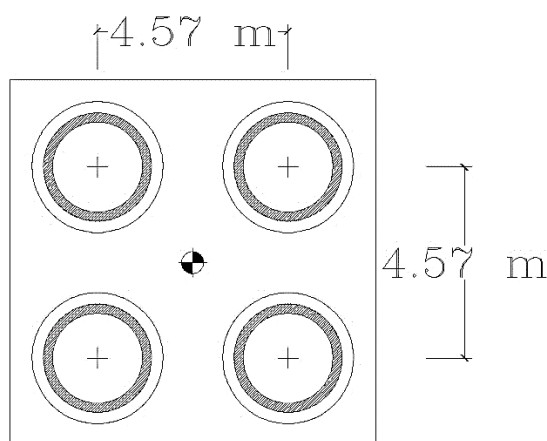
جدول ۱-۵ مشخصات شمع مورد استفاده در دلفین پهلوگیری ۴ شمعی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، بعضی از داده‌های شمع نظیر ضخامت جدار، تنش تسلیم و شرایط انتهایی شمع فرض شده است.

جدول ۱-۵ مشخصات شمع مدل دلفین پهلوگیری [Marriott & Van Den Berg 1974]

مشخصات	
مصالح شمع	ASTM A252, Grade 3, Spiral Weld Steel Pipe Pile
قطر خارجی	1828.9 mm
ضخامت جداره	25.4 mm (Assumed)
مدول الاستیسیته	200 GPa
ممان اینرسی	$5.8523 \times 10^{10} \text{ mm}^4$ (Assumed)
تنش تسلیم میانگین	420,000 kN/m <sup>2</sup> (Assumed)
عمق نفوذ شمع	31.4 m
طول کلی شمع	68.4 m
شرایط انتهایی شمع	Open – Ended (Assumed)
نوع اجرای شمع	Driven

### ۳-۲-۵ آرایش گروه شمع

آرایش گروه شمع و فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. عرشه این دلفین پهلوگیری از نوع مفصلی یا ممان آزاد می‌باشد (در این حالت عرشه با شمع‌ها فواصل مشخصی دارد)، در نتیجه تمامی شمع‌ها به یک اندازه تغییرمکان خواهند داشت. با توجه به فاصله ۴/۵۷ متری (حدود ۲/۵ برابر قطر شمع) بین شمع‌ها اندرکنش شمع خاک شمع قابل توجه خواهد بود.



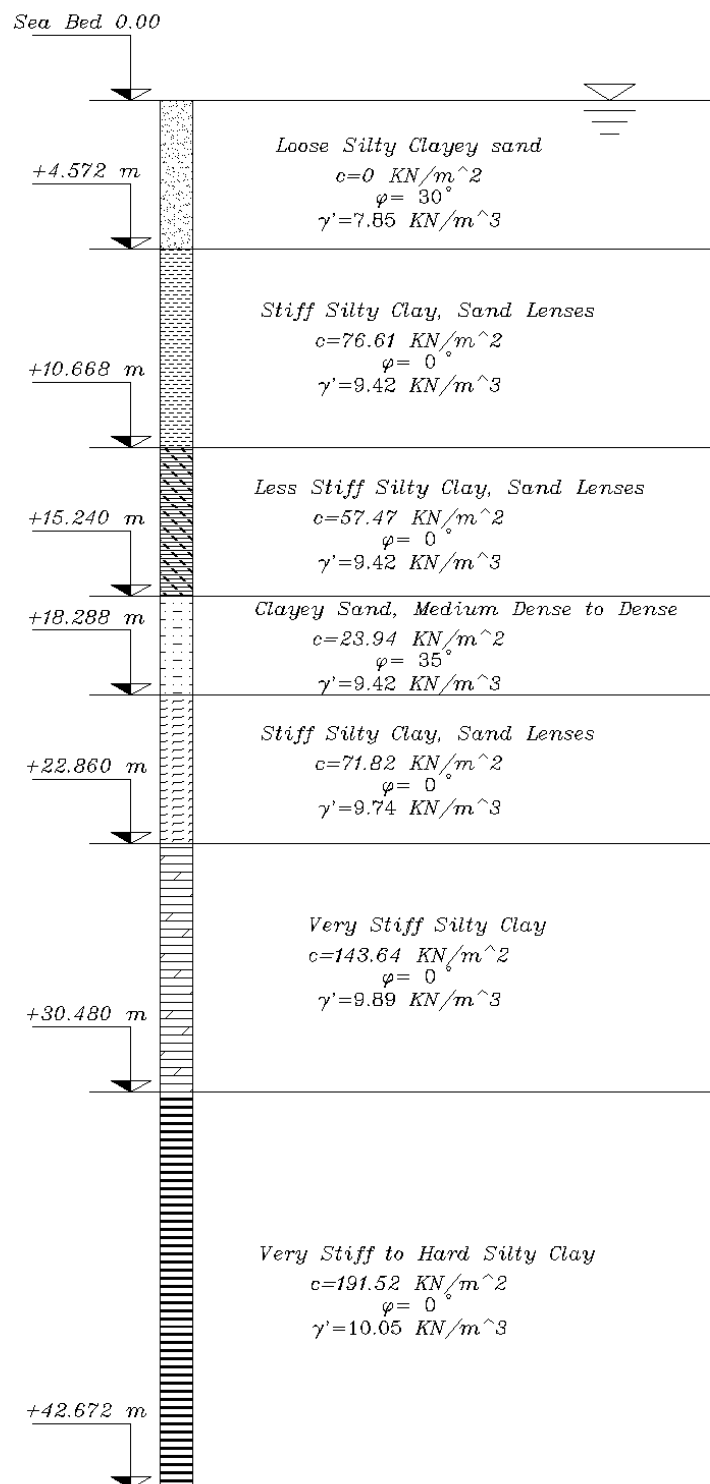
*Section Detail*  
Piles Head were pin –  
connected to deck..

شکل ۴-۵ نمایی از دلفین ۴ شمعی و عرشه آن

#### ۴-۲-۵ مشخصات منحنی‌های p-y

با توجه به نتایج گمانه‌ها و آزمایش‌ها پروفیل ایده‌آل خاک همانند آنچه در شکل ۵-۵ نشان داده شده، توسعه داده شده است. مشخصات منحنی‌ها در جدول ۲-۵ از تفسیر نتایج مربوط به پروفیل خاک به دست آمده است و از آن به عنوان داده‌های ورودی برای مدل‌سازی خاک استفاده شده است. به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات دقیق خاک، فرضیاتی مطابق موارد ذکر شده در جدول ۳-۵ نیز در نظر گرفته شده است.

ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که معیار انتخاب منحنی‌های p-y برای خاک‌ها، بر اساس نتایج پروفیل ایده‌آل خاک می‌باشد و در هر صورت نیاز به انجام آزمایش با مقیاس واقعی در محل و اصلاح منحنی‌ها با توجه به شرایط وجود دارد. بدیهی است که هر چه شناسایی‌های ژئوتکنیکی در محل دقیق‌تر انجام شود، رفتار منحنی‌ها به رفتار واقعی خاک در محل نزدیک‌تر خواهد بود.



شکل ۵-۵ پروفیل ایده آل خاک برای مدل سازی دلفین پهلوگیری [Marriott, et al, 1974]

جدول ۲-۵ ضخامت لایه‌ها در مدلسازی خاک

لایه	نوع خاک-منحنی p-y (فرضیات)	تراز بالای لایه (متر)	تراز پایین لایه (متر)
۱	ماسه (Reese, et al, 1974)	۳۷	۴۱/۶۰
۲	رس سخت در حضور آب آزاد (Reese, et al., 1975)	۴۱/۶۰	۴۷/۷۰
۳	رس سخت در حضور آب آزاد (Reese, et al., 1975)	۴۷/۷۰	۵۲/۲۷
۴	ماسه (Reese, et al, 1974)	۵۲/۲۷	۵۵/۳۲
۵	رس سخت بدون حضور آب آزاد (Reese and Welch, 1975)	۵۵/۳۲	۵۹/۸۹
۶	رس سخت بدون حضور آب آزاد (Reese and Welch, 1975)	۵۹/۸۹	۶۷/۵۱
۷	رس سخت بدون حضور آب آزاد (Reese and Welch, 1975)	۶۷/۵۱	۷۹/۷۰

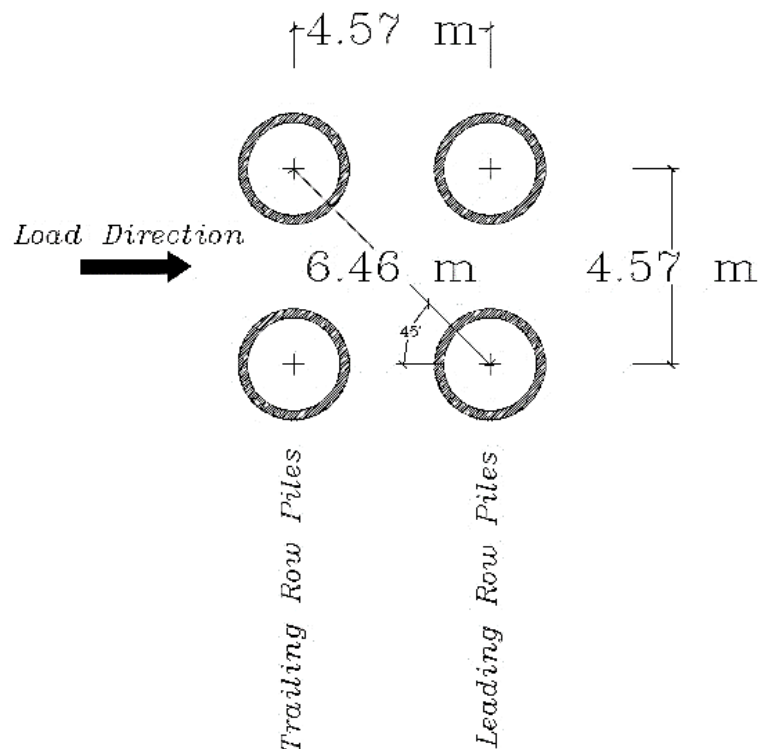
جدول ۳-۵ فرضیات مربوط به منحنی های p-y در مدل سازی خاک

لایه	نوع خاک-منحنی p-y	$\epsilon_{50}$	k (kN/m <sup>3</sup> )
۱	ماسه	-	۵۴۰۰
۲	رس سخت در حضور آب آزاد	۰/۰۰۷	۱۳۵۰۰۰
۳	رس سخت در حضور آب آزاد	۰/۰۰۷	۱۳۵۰۰۰
۴	ماسه	-	۱۶۳۰۰
۵	رس سخت بدون حضور آب آزاد	۰/۰۰۷	۱۳۵۰۰۰
۶	رس سخت بدون حضور آب آزاد	۰/۰۰۵	۲۷۰۰۰۰
۷	رس سخت بدون حضور آب آزاد	۰/۰۰۵	۲۷۰۰۰۰

## ۵-۲-۵ ضرایب کاهش مقاومت در گروه شمع

با توجه به شکل ۵-۶ اگر از روش ارائه شده در فصل ۳ جهت در نظر گرفتن اندرکنش شمع خاک شمع در گروه شمع استفاده شود، ضرایب کاهش مقاومت با توجه به آرایش گروه شمع و فواصل بین شمع‌ها برای شمع‌های مقدم و دنباله به ترتیب برابر با  $0/76$  و  $0/53$  خواهد بود.

ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که این ضرایب بر اساس آزمایش‌های تجربی به دست آمده است و نتایج دقیق در مورد این ضرایب تنها با استفاده از آزمایش با مقیاس واقعی در محل قابل دسترسی می‌باشد. با این حال، همان‌طور که در فصل ۴ نشان داده است، نتایج مربوط ضرایب کاهش مقاومت در مدل صحت‌سنجی، بر اساس آزمایش و روابط تجربی مطابقت نسبتاً مناسبی داشت و به همین دلیل نیز این ضرایب مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۵-۶ آرایش شمع و فواصل آن جهت محاسبه ضرایب کاهش مقاومت



## ۳-۵ مدل سازی

مدل سازی در این بخش مشابه آنچه در فصل ۴ برای مدل صحت سنجی ارائه شد، انجام شده است. روش متداول برای به دست آوردن منحنی های  $p-y$  استفاده از مدل شمع منفرد و سپس انتقال نتایج منحنی ها به مدل Group یا SAP2000 می باشد. به همین دلیل یک شمع منفرد فرضی با مشخصات مشابه با گروه دلفین ۴ شمعی در نظر گرفته شده است.

### ۱-۳-۵ نحوه مدل سازی شمع منفرد فرضی در L-Pile

مدل سازی شمع در L-Pile شامل مراحل مختلفی می باشد که در ادامه شرح داده شده است:

- تنظیمات محاسباتی: تنظیمات محاسباتی بر اساس حالت متداول طراحی (بدون در نظر گرفتن ضرایب بار و مقاومت) در نظر گرفته شده است.
- تنظیمات مربوط به خاک های لایه ای: اثرات لایه ای خاک ها به روش جور جیادس در نظر گرفته شده است.
- نوع بارگذاری و تعداد چرخه های بار: نوع بارگذاری از نوع استاتیکی در نظر گرفته شده است.
- تنظیمات مربوط به آنالیز: مقادیر اشاره شده در جدول ۴-۵ استفاده شده است.

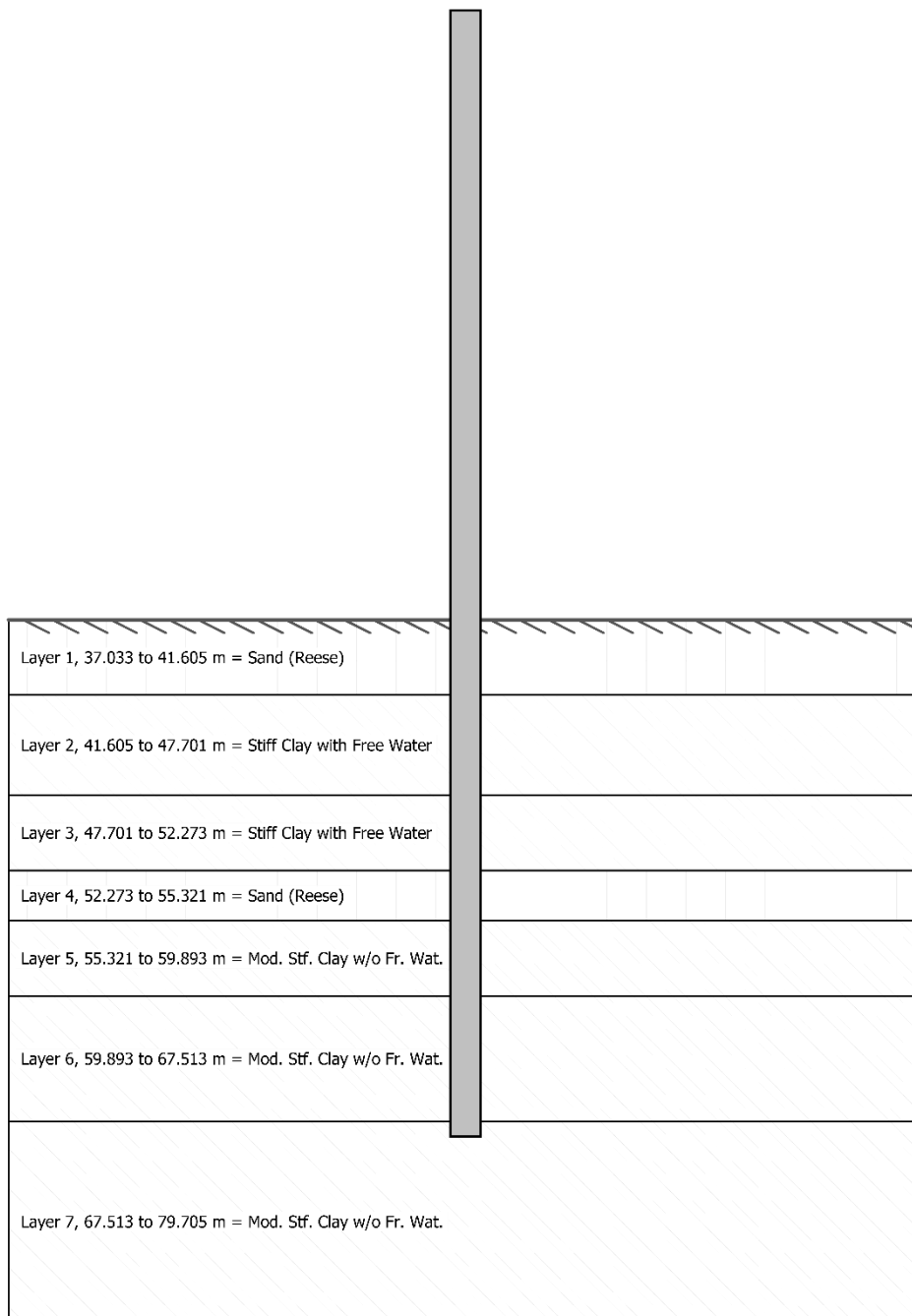
جدول ۴-۵ تنظیمات مربوط به آنالیز شمع منفرد فرضی در L-Pile

Analysis Control Options	
Number of Pile Increments	110
Maximum Number of Iterations	1000
Convergence Tolerance on Deflections (m)	2.54E-07
Limit on Excessive Deflection of Pile Head (m)	2.54

- تنظیمات مربوط به مشخصات شمع: این تنظیمات مشابه آنچه در بخش ۵-۲-۲ ارائه شده، انجام شده است. شمع از نوع مقطع لوله‌ای با قطر ۱۸۳۰ میلی‌متر، ضخامت جدار ۲۵/۴۰ میلی‌متر انتخاب شده است.
- تنظیمات مربوط به مشخصات خاک: این تنظیمات مشابه آنچه در بخش ۵-۲-۴ ارائه شده، انجام شده است. شکل ۵-۷ پروفیل خاک و شمع رسم شده در LPILE را نشان می‌دهد.
- تنظیمات مربوط به شرایط تکیه‌گاهی سر شمع و بارها: با توجه به اینکه آنالیز شمع منفرد فرضی برای ساخت منحنی‌ها استفاده شده است، شرایط مرزی مشابه گروه شمع متناظر از نوع ممان آزاد انتخاب شده است. این تنظیمات در بخش مربوط به آنالیز پوش انتخاب شده است و گام‌های بارگذاری خاصی جدا از آنالیز پوش در نظر گرفته نشده است.
- تنظیمات مربوط به آنالیز Pushover: آنالیز پوش در LPILE بر اساس شرایط مرزی سر شمع، حداقل و حداکثر تغییر مکان، تعداد گام‌های بارگذاری و مقدار نیروی محوری تعیین می‌شود. این تنظیمات در جدول ۵-۵ نشان داده شده است.

جدول ۵-۵ شرایط مرزی سر شمع و بارگذاری در شمع منفرد فرضی مدل دلفین

<b>Controls for Pushover Analysis</b>	
Pinned Head	Pinned Head
(deflection & zero moment)	(deflection & zero moment)
Pile Head Fixity Condition	Pinned Head
Maximum Deflection (m)	2.25
Minimum Deflection (m)	2.54E-06
Number of Loading Steps	100
Axial Thrust Force (kN)	0
Deflection Computation Method	Arithmetic (evenly spaced)



LPile 2018.10.03, © 2018 by Ensoft, Inc.

شکل ۷-۵ پروفیل شمع و خاک در LPile

## ۵-۳-۲ نحوه مدل سازی دلفین ۴ شمعی پهلوگیری در Group

مدل سازی گروه شمع در Group شامل مراحل مختلفی می باشد که در ادامه شرح داده شده است:

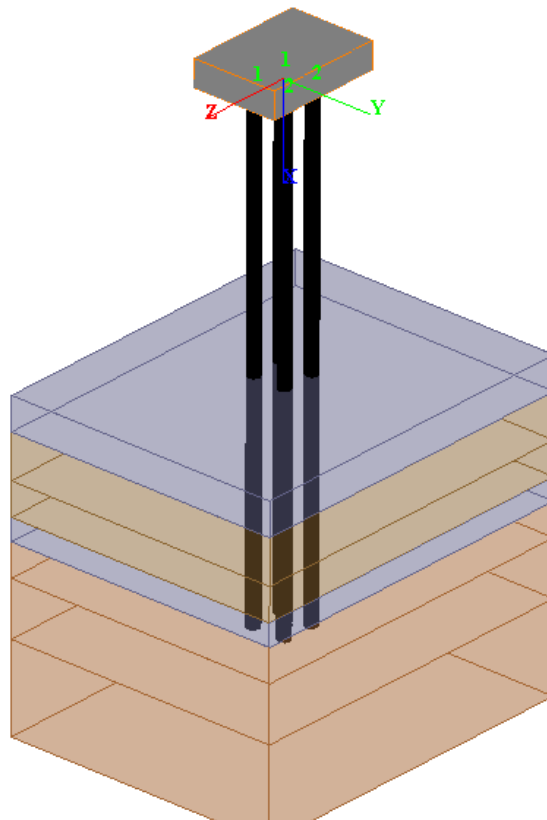
- تنظیمات مربوط مقطع عرضی شمع: مقطع شمع مورد استفاده در مدل سازی مشابه مقطع تعریف شده در LPile و از نوع رفتار غیرخطی انتخاب شده است.
- تنظیمات مربوط به مشخصات شمع: در آنالیز حاضر شمع از نوع کوبشی با طول ۶۸/۴۰ متر و با تعداد ۱۰۰ المان تعریف شده است.
- تنظیمات مربوط به مشخصات گروه شمع: با توجه به بخش ۵-۲-۳ و ۵-۲-۵ تنظیمات مطابق جدول ۵-۶ اعمال شده است.
- تنظیمات مربوط به مختصات سر شمعها: با توجه به مشخصات مدل مرتبط با گروه شمع، زاویه مایل شمعها برابر با صفر، فاصله سر شمع از سطح زمین برابر با ۳۷ متر و فاصله میان شمعها ۴/۵۷ متر تنظیم شده است.

جدول ۵-۶ مشخصات گروه شمع دلفین پهلوگیری در Group

Sub-Group	Pile Head Condition	Number of Piles	Rotational Spring (kN-m/rad)	Pile to Pile Spacing (m)	P-Multiplier	Y-Multiplier
1	Pinned	2	0	4.57	0.76	1.00
2	Pinned	2	0	4.57	0.53	1.00

- تنظیمات مربوط به بارگذاری: بارگذاری در نرم افزار Group بر اساس یک بار واحد و تعداد گامهای مشخص بر سازه وارد می شود. بدین ترتیب بار ۳۴۵۰ کیلونیوتن در ۱۰۰ گام مساوی به سازه اعمال شده و نتایج دریافت شده است.

- تنظیمات مربوط به سرشمع (کلاهک): اگر نوع سرشمع به صورت مدفون در خاک انتخاب شود، می‌بایست برای محاسبه مقاومت ناشی از خاک در مجاور سرشمع، ابعاد سرشمع وارد شود. اگر سرشمع به صورت غیرمدفون انتخاب شود و ابعادی برای آن وارد نشود، مشخصات سرشمع برای حالت سه‌بعدی تخمین زده می‌شود. در آنالیز حاضر ابعاد سرشمع وارد نشده است. بنابراین فرض به عدم وجود سرشمع می‌باشد.
- تنظیمات مربوط به لایه‌های خاک: تنظیمات مربوط به لایه‌های خاک عیناً مطابق با ورودی‌های نرم‌افزار LPile مطابق آنچه در مشخصات مدل آماده، وارد شده است. شکل ۸-۵ مدل - ساخته برای گروه شمع به همراه لایه‌های خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۵ مدل گروه شمع دلفین پهلوگیری به همراه لایه‌های خاک در نرم‌افزار Group

- تنظیمات مربوط به آنالیز گروه شمع: تنظیمات مربوط به آنالیز گروه شمع شامل فضای آنالیز و تنظیمات مربوط به تعداد خطا و تکرارها می‌باشد. آنالیز در گروه شمع به دلیل یکسان بودن مشخصات شمع‌ها در هر ردیف از نوع ۲ بعدی انتخاب شده است. تنظیمات مربوط به خطا و تکرار به صورت نشان داده شده در جدول ۷-۵ انتخاب شده است.

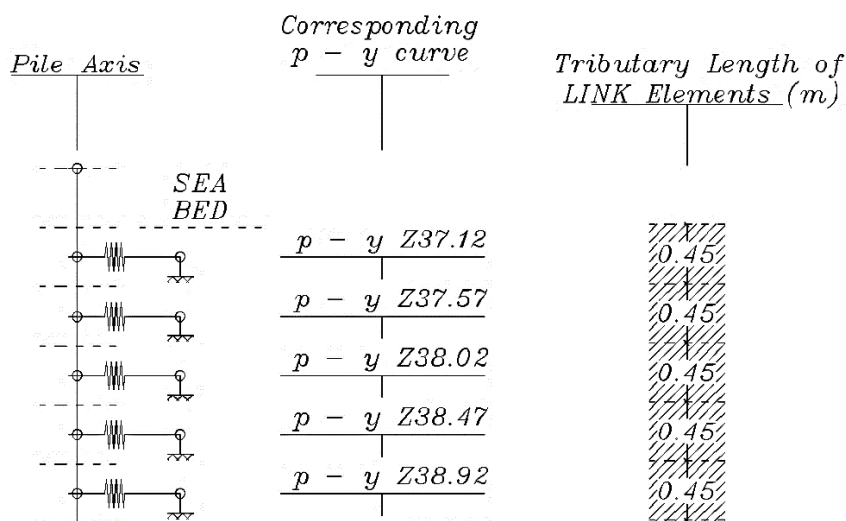
جدول ۷-۵ تنظیمات مربوط به آنالیز شمع در Group

Control Options for Load Cases	
Maximum Iteration on Pile Group	300
Maximum Iteration on Individual Pile	300
Tolerance on Equilibrium of Pile Group (DU/U)	0.0001
Tolerance of Pile Deflection (m)	0.0001
Initial Step Increment	1
Minimum Step Increment	1

### ۳-۳-۵ نحوه مدل‌سازی شمع منفرد فرضی و دلفین ۴ شمع در SAP2000

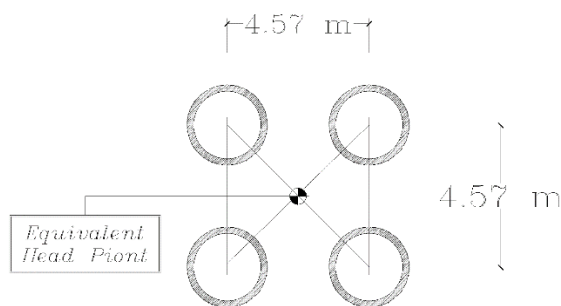
جهت مدل‌سازی شمع منفرد فرضی و دلفین ۴ شمع در SAP2000، مشخصات شمع شامل قطر، طول و ضخامت جدار عینا مشابه با مدل L-Pile و Group انتخاب شده است. نکات حائز اهمیت در مدل‌سازی SAP2000 به شرح زیر می‌باشد:

- جهت مدل‌سازی رفتار خاک از روش ارائه شده در فصل ۴ استفاده شده است. با توجه به شکل ۹-۵، این کار با استفاده از ضرب کردن مقاومت خاک در طول شاخه‌ای از شمع که منحنی p-y برای آن تعریف شده، انجام می‌شود. طول شاخه‌ی منحنی‌ها در مدل دلفین برابر با ۰/۴۵ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۹-۵ نمایی شماتیک از نحوه مدل سازی منحنی  $p-y$  در SAP2000 به صورت منحنی  $f-y$

- نوع آنالیز به سبب غیرخطی بودن رفتار خاک از نوع استاتیک غیرخطی با کنترل تغییرمکان برای تغییرمکان های هدف در شمع منفرد و گروه شمع انتخاب شده است.
- مشابه آنچه در مدل صحت سنجی ارائه شد، ضرایب کاهش مقاومت برای اندرکنش میان شمع ها در نظر گرفته شده است.
- در هنگام مدل سازی دلفین ۴ شمعی، شرایط مرزی سرشمع توسط Equal Displacement Constraint به یکدیگر مرتبط شده اند. شکل ۱۰-۵ این شرایط را نشان می دهد.

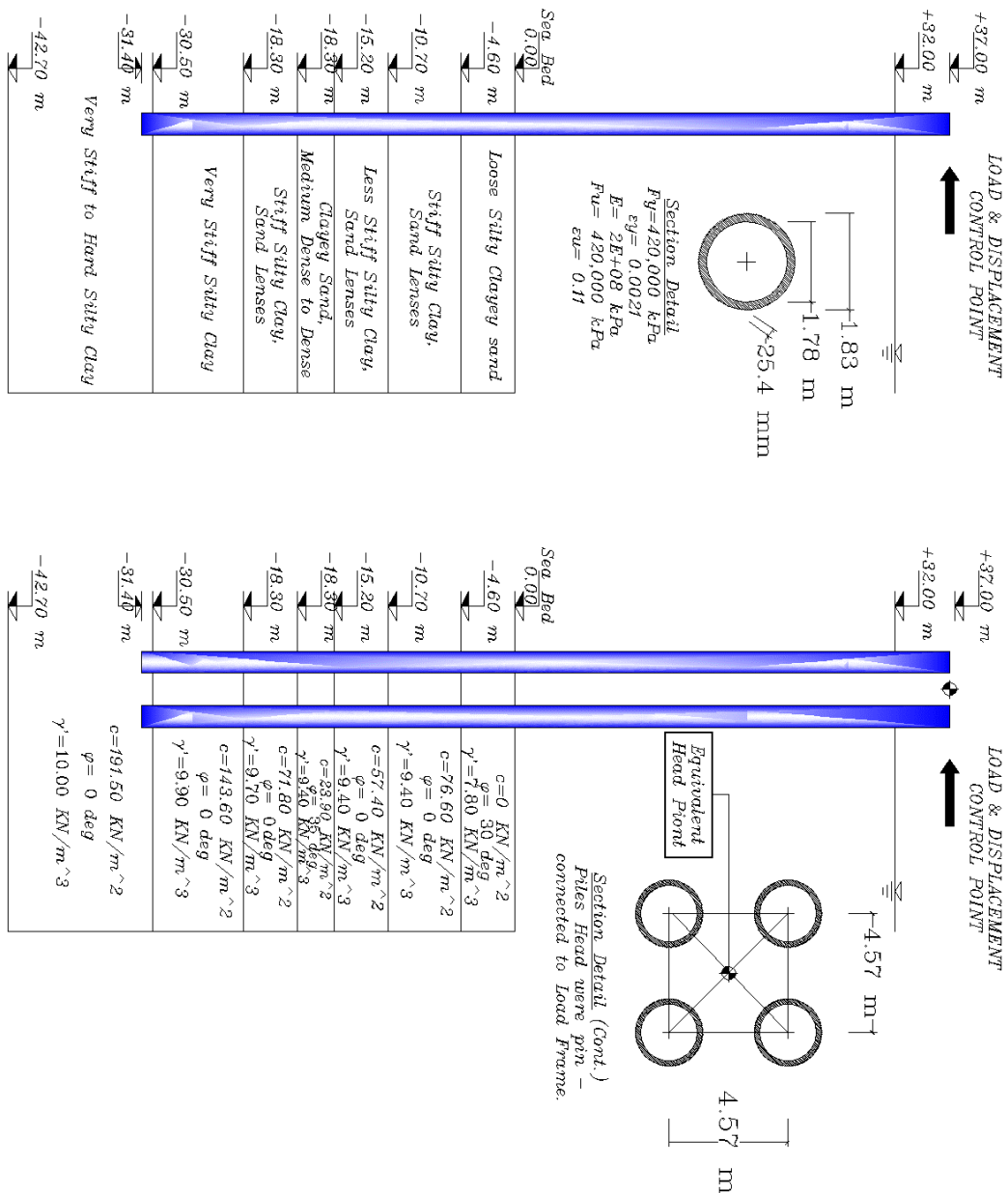


Section Detail (Cont.)  
Piles Head were pin -  
connected to Load Frame.

شکل ۱۰-۵ شرایط مرزی سرشمع در دلفین ۴ شمعی پهلوگیری

## ۴-۵ تحلیل الاستیک دلفین پهلوگیری انعطاف پذیر شمعی

خلاصه اطلاعات و داده‌های دلفین شمعی و شمع منفرد فرضی متناظر با آن در شکل ۱۱-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۵ خلاصه اطلاعات مربوط به مدل سازی دلفین شمعی و شمع منفرد فرضی متناظر با آن



دلفین‌های پهلوگیری انعطاف‌پذیر به طور کلی به صورت سازه‌های الاستیکی طراحی می‌شوند که در شرایط عادی وارد محدوده غیرخطی نمی‌شوند. در این سازه‌ها از ظرفیت پلاستیک مقطع به عنوان یک حاشیه ایمن برای شرایط غیرمعمول<sup>۱</sup> پهلوگیری استفاده می‌شود.

به غیر از شرایط خاص که در آن نیاز به ظرفیت جذب انرژی بیشتری برای پهلوگیری به شناورهای بزرگ وجود دارد، حداکثر تغییرمکان دلفین پهلوگیری انعطاف‌پذیر برای جلوگیری از مشکلات مربوط به ناپایداری شناور، نباید از حدود ۱/۵ متر بیشتر باشد. [BS 6349 – 4 2014] [EAU 2012]

انرژی جذب شده توسط دلفین پهلوگیری تغییرشکل یافته، ظرفیت جذب انرژی نامیده می‌شود و با توجه به شکل ۵-۱۲ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A = \int_0^{s_{max}} F_R(s) \cdot ds \quad ۱-۵$$

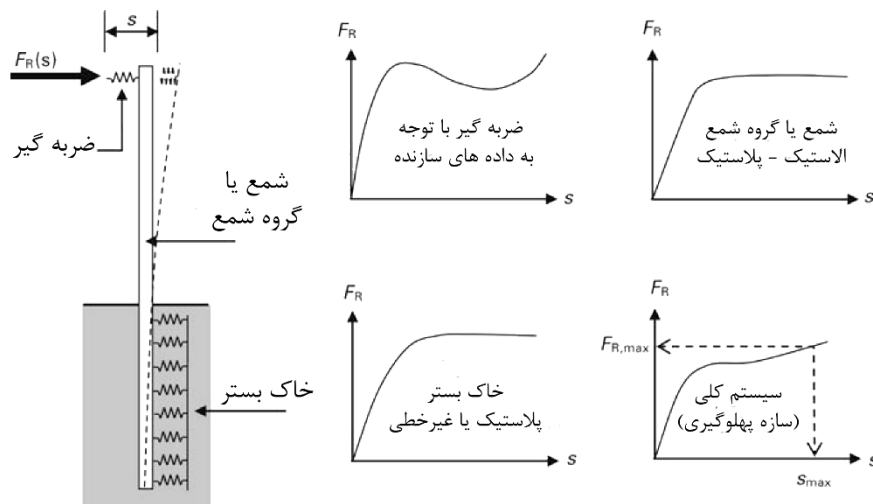
که در آن؛ A: ظرفیت جذب انرژی دلفین (کیلونیوتن‌متر)،  $F_R(s)$ : نیروی عکس‌العمل بین شناور و دلفین (نیروی پهلوگیری) تابعی از تغییرمکان در نقطه اثر بار (کیلونیوتن) و  $s_{max}$  حداکثر تغییرمکان دلفین در نقطه اثر بار (متر) می‌باشد.

برای رفتار خطی بار-تغییرمکان، معادله ۵-۱ به فرم زیر ساده می‌شود:

$$A = \frac{1}{2} \cdot F_{R,max} \cdot s_{max} \quad ۲-۵$$

---

<sup>۱</sup> Extraordinary



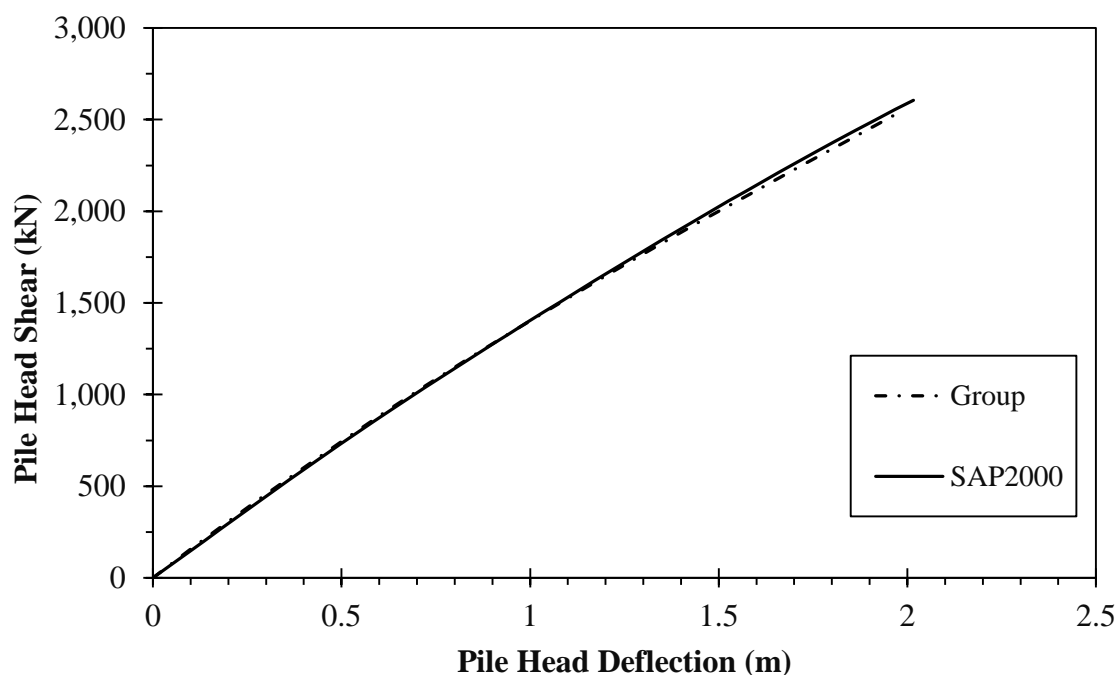
شکل ۵-۱۲ منحنی بار-تغییرمکان دلفین پهلوگیری و اجزای آن [EAU 2012]

### ۵-۴-۱ منحنی بار-تغییرمکان الاستیک در دلفین پهلوگیری ۴شمعی

منحنی بار-تغییرمکان الاستیک دلفین پهلوگیری ۴شمعی با قطر ۱/۸۳ متر در دو مدل Group و SAP2000 در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است. حد رفتار خطی در دو منحنی با توجه به محاسبات برابر با تغییرمکان ۲/۰۰ متر و نیروی ۲۶۰۰ کیلونیوتن می‌باشد. در نتیجه با توجه به تغییرمکان انتخاب شده برای سیستم، انرژی جذب شده در دلفین پهلوگیری ۴شمعی برابر است با:

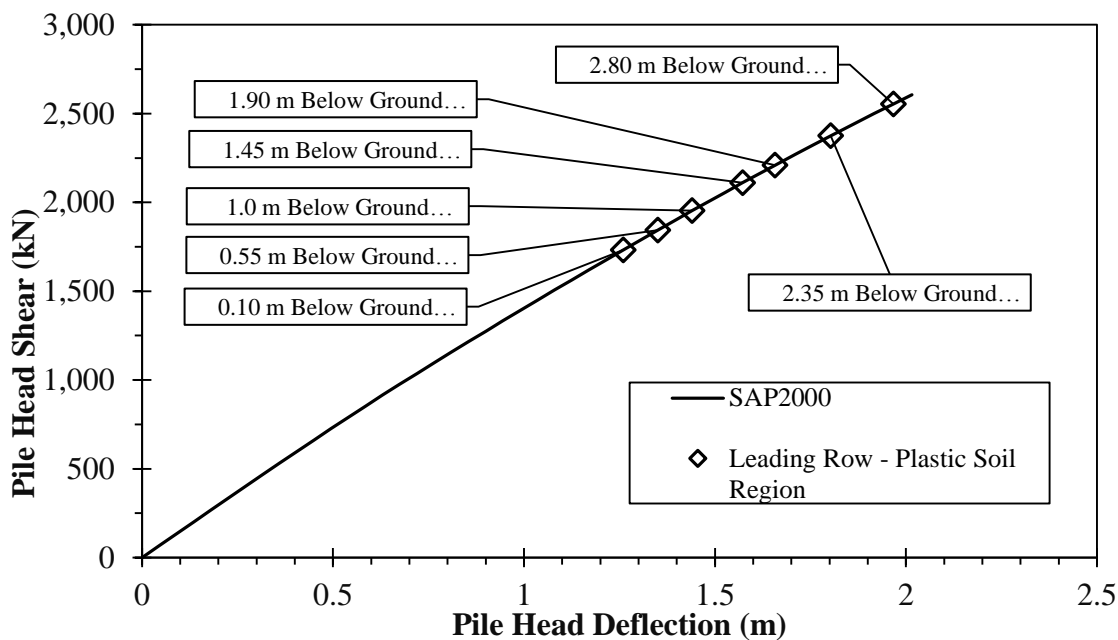
$$E_{1.50m} = \frac{1}{2} \times 2000 \times 1.50 \cong 1500 \text{ kNm} \cong 150 \text{ t.m} \quad \text{انرژی جذب شده در تغییرمکان ۱/۵۰ متر}$$

$$E_{2.00m} = \frac{1}{2} \times 2600 \times 2.00 \cong 2600 \text{ kNm} \cong 260 \text{ t.m} \quad \text{انرژی جذب شده در تغییرمکان ۲/۰۰ متر}$$

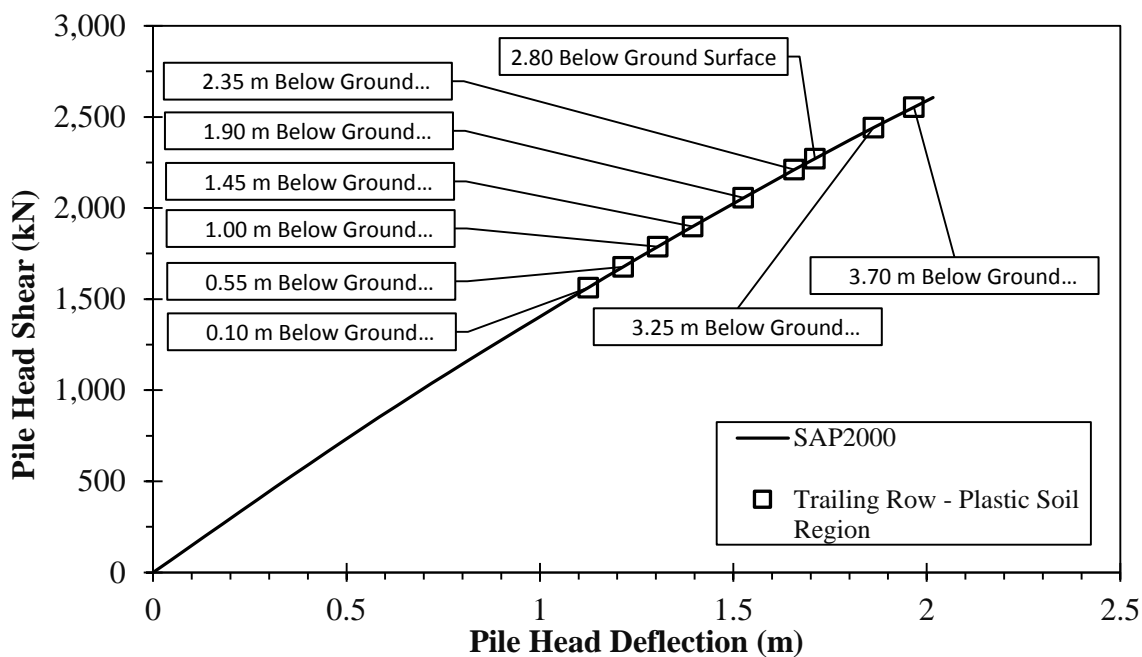


شکل ۱۳-۵ منحنی بار-تغییرمکان الاستیک در دلفین پهلوگیری ۴ شمعی مدل Group و SAP2000

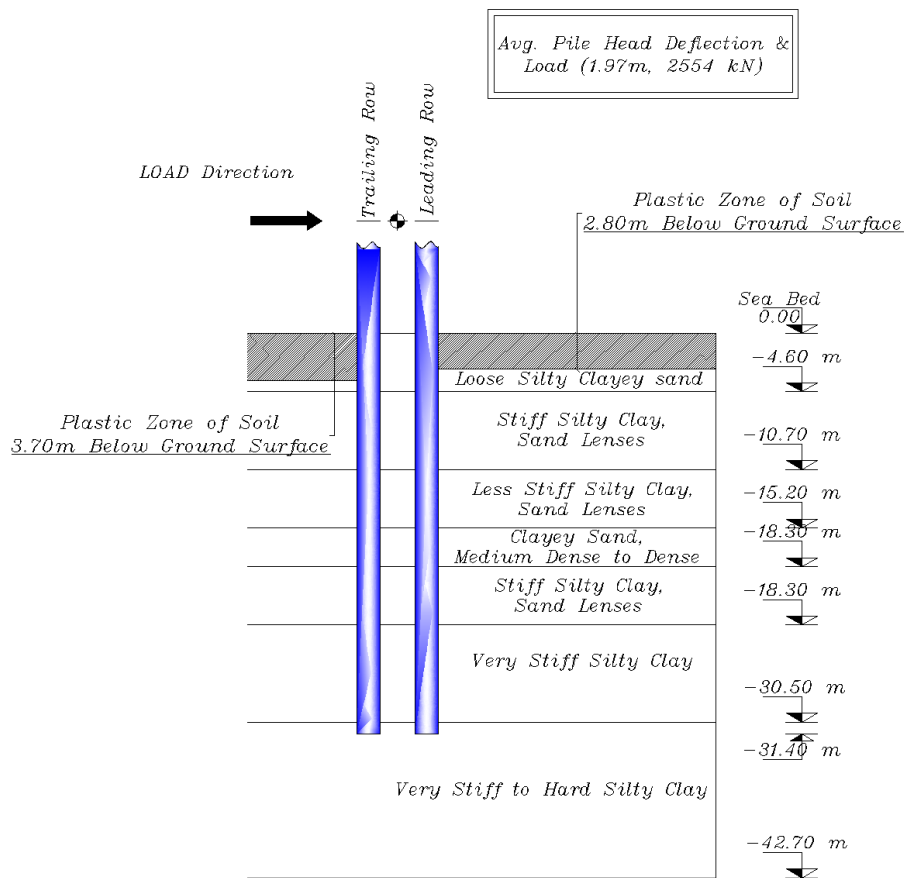
شکل ۱۴-۵ و شکل ۱۵-۵ منحنی بار-تغییرمکان الاستیک در دلفین ۴ شمعی به همراه نقاطی که در آن به ترتیب شمع مقدم و دنباله، خاک پلاستیک شده را نشان می‌دهد. به عنوان مثال برای ردیف گروه شمع‌های مقدم در نقطه با تغییرمکان  $1/26$  متر و نیروی  $1732$  کیلونیوتن، میزان  $0/10$  متر خاک از سطح زمین پلاستیک شده است. روند افزایشی محدوده پلاستیک خاک با افزایش تغییرمکان ادامه پیدا می‌کند، به طوری که در تغییرمکان  $1/97$  متر و نیروی  $2554$  کیلونیوتن، حدود  $3$  متر از خاک از سطح زمین پلاستیک شده است. به روش مشابه برای ردیف گروه شمع‌های دنباله در نقطه با تغییرمکان  $1/12$  متر و نیروی  $1563$  کیلونیوتن، میزان  $0/10$  متر خاک از سطح زمین پلاستیک شده است. در نهایت در تغییرمکان  $1/97$  متر و نیروی  $2554$  کیلونیوتن، محدوده پلاستیک خاک از سطح زمین حدود  $4$  متر می‌باشد. این محدوده در پروفیل خاک در شکل ۱۶-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۴-۵ منحنی بار-تغییر مکان الاستیک دلفین ۴ شمعی به همراه محدوده پلاستیک خاک در شمع مقدم



شکل ۱۵-۵ منحنی بار-تغییر مکان الاستیک دلفین ۴ شمعی به همراه محدوده پلاستیک خاک در شمع دنباله



شکل ۵-۱۶ محدوده پلاستیک خاک در ردیف شمع مقدم و دنباله در دلفین ۴ شمعی

## ۵-۴-۲ بحث در مورد ظرفیت جذب انرژی در دلفین ۴ شمعی

به عنوان مقایسه، اگر با استفاده از روش‌های متداول ارائه شده در آیین‌نامه‌های سازه‌های دریایی [BS 6349-4 2014][PIANC 2002]، انرژی مورد نیاز برای پهلوگیری شناور طرح (در اینجا شناور با تناژ ۵۰۰,۰۰۰) محاسبه شود و توزیع انرژی میان سازه پهلوگیری ۴ شمعی و ۳ شمعی با توجه به بخش ۵-۲ انجام شود، مطابق جدول ۵-۸ داریم:

جدول ۸-۵ مقادیر مورد نیاز انرژی پهلوگیری در شناور طرح

Code	Total Berthing Energy Requirement	4-Pile Dolphin	4-Pile Dolphin
		Energy Requirement Berthing Angle 0°	Energy Requirement Berthing Angle 6°
PIANC	420 ton.m	290 ton.m	170 ton.m
British Standard	440 ton.m	300 ton.m	180 ton.m

اگر مقادیر میان ۱۷۰ تا ۳۰۰ تن متر را به عنوان انرژی مورد نیاز برای پهلوگیری شناور طرح در نظر بگیریم، از مقایسه آن با مقادیر محاسبه شده در بخش ۵-۴-۱ (۱۵۰ تا ۲۶۰ تن متر)، می توان این گونه نتیجه گیری کرد، که با وجود فرض ضخامت جدار در شمع ها، مطابقت خوبی میان نتایج محاسبات ظرفیت سازه و انرژی مورد نیاز جهت پهلوگیری شناور طرح وجود دارد.

## ۵-۵ مقدمه ای بر تحلیل پلاستیک دلفین پهلوگیری ۴ شمی

تحلیل پلاستیک دلفین های پهلوگیری انعطاف پذیر به صورت ضمنی در گزارش کارگروه شماره ۳۳ بیانک، برای طراحی سیستم های ضربه گیر، مورد توجه قرار گرفته است. در این گزارش ضرایب بار جهت طراحی در حالت حدی به ظرفیت شمع جهت مقاومت در برابر بارهای غیرعادی توسط پلاستیک شدن مقطع، وابسته شده است. بدین صورت که اگر پلاستیک شدن مقطع امکان پذیر نباشد، ضریب ۱/۲۵ و اگر پلاستیک شدن مقطع تا تغییر مکانی برابر با حداقل دو برابر حداکثر تغییر مکان الاستیک امکان پذیر باشد، ضریب ۱/۱۰۰ را برای بارها در نظر می گیرند. [PIANC 2002]

با این وجود، با توجه به روش فعلی طراحی، توصیه ارائه شده نمی تواند در عمل مناسب باشد، زیرا:

- فرم دقیق منحنی بار-تغییرمکان در حالت غیرخطی مشخص نیست.
- مودهای گسیختگی برای طراحی دلفین‌ها در آیین‌نامه‌های موجود فقط شامل تسلیم‌شدگی و تغییرمکان اضافی می‌باشد. در حالی که انتظار می‌رود کمانش و بیضی‌گون شدن مقطع دو مود قابل توجه در محدوده پلاستیک باشد و حتی ممکن است در برخی طرح‌ها در محدوده الاستیک نیز قابل توجه باشد. [Bruijn 2005]

در این موقعیت بحث طبقه‌بندی مقاطع برای شناسایی تاثیر کمانش موضعی و بیضی‌گون شدن بر مقاومت مقطع حائز اهمیت خواهد بود. نظیر آنچه که در شکل ۵-۱۷ در آیین‌نامه طرح سازه‌های فولادی اتحادیه اروپا آمده است. در این آیین‌نامه آنالیز پلاستیک فقط برای مقاطعی که در آن امکان رسیدن به لنگر خمشی پلاستیک وجود دارد، امکان‌پذیر است.

Class	Limits	Characteristics
1 – plastic	$D/t\epsilon^2 < 50$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Full plastic moment allowed</li> <li>• Section is able to develop a plastic hinge</li> <li>• Plastic redistribution allowed</li> </ul>
2 – compact	$50 < D/t\epsilon^2 < 70$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Full plastic moment allowed</li> </ul>
3 – semi-compact	$70 < D/t\epsilon^2 < 90$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Full elastic moment allowed (yield limit in outer fibre)</li> </ul>
4 – slender	$D/t\epsilon^2 > 90$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limited effectiveness, buckling stress (below yield limit) allowed in outer fibre</li> <li>• Refer to EN 1993-1-6</li> </ul>
Note that $D/t = 90$ as a commonly used limit below which buckling was not likely to occur, is not valid.		
For piling EN 1993-5 applies. EN 1993-5 refers to EN 1993-1-6 for evaluation of class 4 sections.		

$\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460
	$\epsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	$\epsilon^2$	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

شکل ۵-۱۷ مقادیر حدی دسته بندی مقاطع برای مقاطع دایره ای [SBRCURnet 2014]

بحث در مورد طبقه‌بندی مقاطع و اثرات مرتبه دوم نظیر کمانش موضعی و بیضی‌گون شدن خارج از چهارچوب این پژوهش می‌باشد. با این حال، یک حل متداول با فرض جوابگو بودن مقطع برای رسیدن به لنگر پلاستیک، در ادامه ارائه شده است.

در آنالیز سازه‌ها، رفتار خمشی غیرالاستیک تیر یا ستون با استفاده از یک مدل متمرکز<sup>۲</sup> یا توزیع‌شده<sup>۳</sup> مفصل پلاستیک مدل می‌شود. مدل توزیع‌شده مفصل پلاستیک تعداد زیادی مفصل را در محدوده پلاستیک قرار می‌دهد. در این حالت، طول مفصل پلاستیک با توجه به فاصله مفصل‌ها در محدوده پلاستیک تعیین می‌شود. [Chiou, et al, 2008]

در سیستم شمع-خاک استفاده از مدل توزیع‌شده مفصل پلاستیک، با توزیع مفاصل در یک محدوده، به صورت مناسب‌تری توسعه محدوده پلاستیک در شمع را نشان می‌دهد. بدین ترتیب، با افزایش بار، محدوده پلاستیک می‌تواند گسترش پیدا کند، به جای آن که در یک نقطه متمرکز شود. دو محدوده برای توسعه مفاصل پلاستیک در سیستم شمع-خاک قابل شناسایی می‌باشد:

- در عمق مشخصی در زیر سطح زمین (In-Ground Hinge).

- در ابتدای شمع، پایین شرایط گیرداری سر شمع (Pile/Deck Hinge).

در حالت اول، لنگر خمشی پلاستیک در عمق مشخصی اتفاق خواهد افتاد و محدوده پلاستیک به سمت بالا و پایین تا جایی که لنگر خمشی به حد لنگر خمشی تسلیم برسد، ادامه پیدا می‌کند. در حالت دوم لنگر خمشی پلاستیک به دلیل گیرداری سرشمع، در ابتدای شمع خواهد بود و محدوده پلاستیک فقط به سمت پایین، جایی که حد لنگر خمشی تسلیم برسد، ادامه پیدا می‌کند.

توصیه‌های مربوط به طول محدوده پلاستیک در شمع، بیشتر در راهنماها و آیین‌نامه‌های لرزه‌ای سازه‌های دریایی و ترمینال‌های نفتی موجود می‌باشد. مروری بر این آیین‌نامه‌ها شامل آیین‌نامه طرح

---

<sup>۲</sup> Concentrated Hinge Model

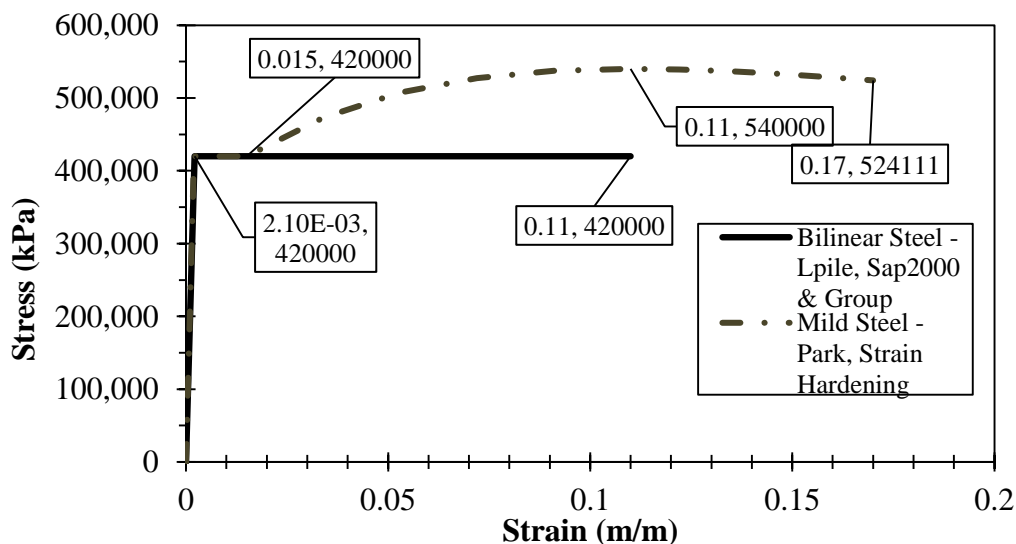
<sup>۳</sup> Distributed Hinge Model



لرزه‌ای ترمینال‌های نفتی کالیفرنیا [Ferritto, et al, 1999]، راهنمای طرح لرزه‌ای سازه‌های دریایی [PIANC, 2001]، آیین‌نامه طرح لرزه‌ای بندر لس آنجلس [POLA, 2010]، طرح لرزه‌ای بنادر و سازه‌های دریایی [ASCE/COPRI 61-14 2014]، آیین‌نامه طرح لرزه‌ای بندر لانگ بیچ<sup>۴</sup> [POLB, 2014] و طرح لرزه‌ای ترمینال‌های نفتی دریایی [MOTEMS, 2016] نشان می‌دهد عمده توصیه‌ها در مورد طول محدوده پلاستیک در شمع فولادی از سطح زمین تا عمقی به اندازه دو برابر قطر شمع می‌باشد، حداقل برای حل اولیه و بار جانبی ناشی از زلزله.

### ۵-۵-۱ منحنی تنش-کرنش مصالح شمع

شکل ۵-۱۸ منحنی تنش-کرنش در نرم‌افزارهای L-Pile، Group و SAP2000 به همراه منحنی تنش-کرنش فولاد با سخت‌شدگی کرنش را جهت مقایسه نشان می‌دهد. منحنی تنش-کرنش جهت به دست آوردن منحنی لنگر خمشی انحناء مقطع استفاده می‌شود.

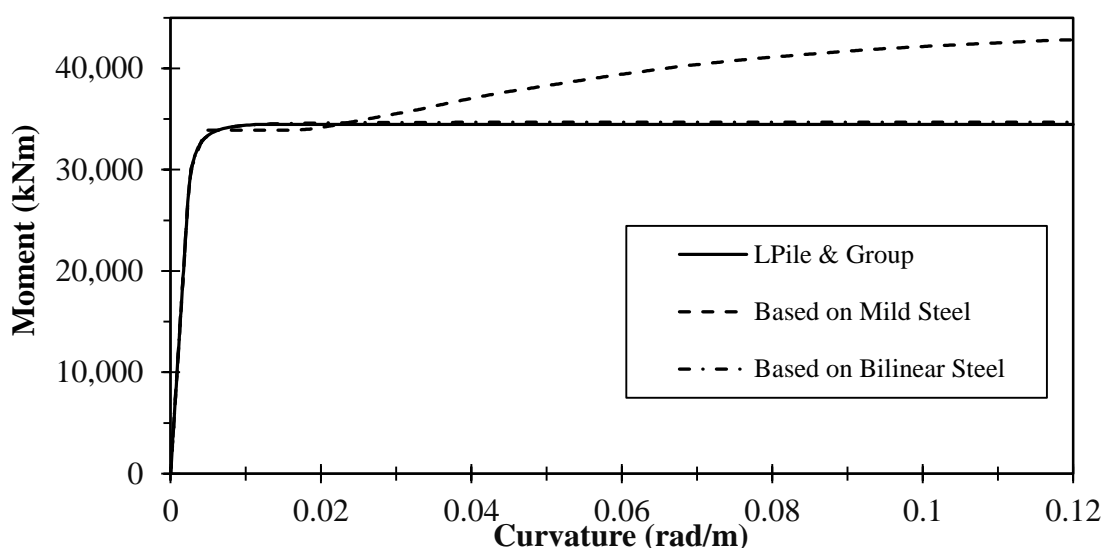


شکل ۵-۱۸ منحنی تنش-کرنش فرض شده در نرم‌افزارها به همراه منحنی فولاد نرمه متناظر با آن

<sup>۴</sup> Port of Long Beach

### ۵-۵-۲ منحنی لنگر خمشی-انحناء مقطع شمع (بار محوری صفر)

شکل ۵-۱۹ منحنی لنگر خمشی-انحناء بر اساس مقادیر محاسبه شده توسط نرم‌افزار را نشان می‌دهد. به دلیل فرض دو خطی بودن منحنی تنش کرنش در نرم‌افزار L-Pile و Group، مدل استفاده شده در SAP2000 نیز بر اساس این فرض توسعه داده شده است. با توجه به شکل، لنگر خمشی تسلیم برابر با ۲۶۸۶۷ کیلونیوتن متر و لنگر خمشی پلاستیک برابر با ۳۴۷۰۱ کیلونیوتن متر در نظر گرفته شده است.



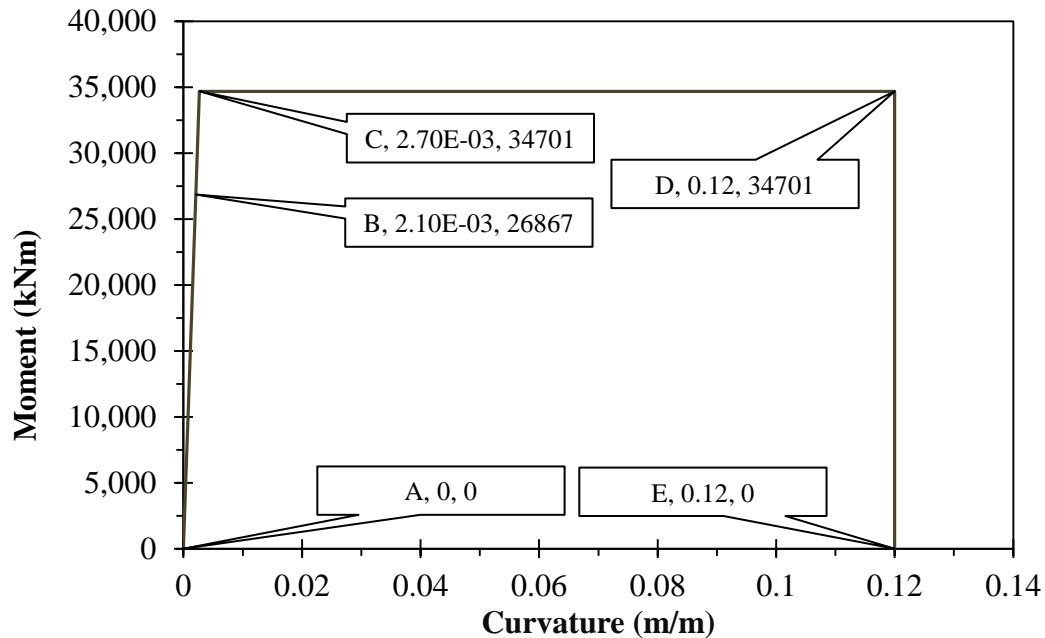
شکل ۵-۱۹ منحنی لنگر خمشی-انحناء مدل محاسباتی به همراه مدل سخت شدگی کرنش

### ۵-۵-۳ مشخصات مفصل پلاستیک تعریف شده در SAP2000

شکل ۵-۲۰ مشخصات مفصل پلاستیک تعریف شده در SAP2000 را نشان می‌دهد. با وجود اینکه مفاصل فیبری<sup>۵</sup> در SAP2000، تعریف دقیق‌تری از رفتار در محدوده غیرخطی را به دست می‌دهد، اما

<sup>۵</sup> Fiber Hinges

به دلیل مطابقت رفتار غیرخطی در SAP2000 و L-Pile و Group، از مفاصل از نوع نیرو و لنگر<sup>۶</sup> با صرف نظر کردن از سخت‌شدگی کرنش استفاده شده است.



شکل ۲۰-۵ مشخصات مفصل پلاستیک با توجه به منحنی لنگر خمشی-انحناء

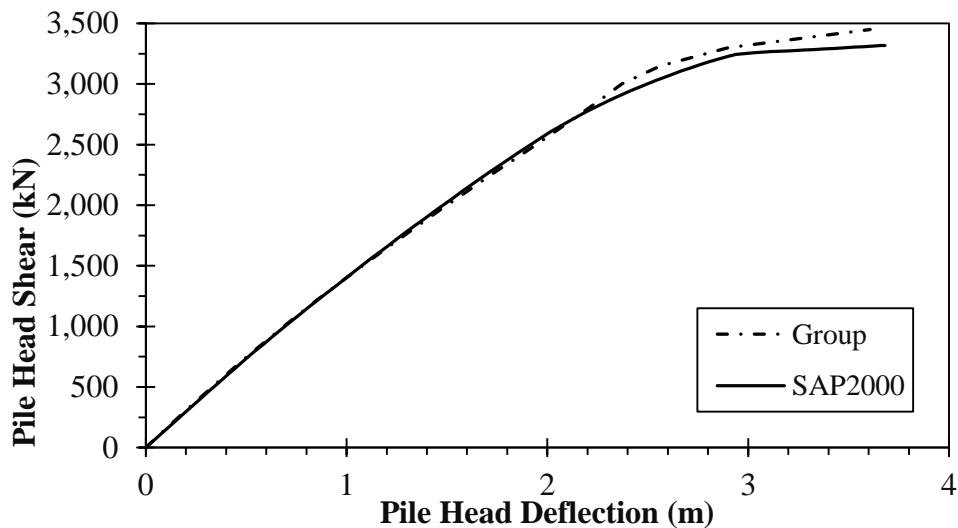
### ۴-۵-۵ منحنی بار-تغییر مکان دلفین پهلوگیری ۴ شمعی

منحنی بار-تغییر مکان دلفین پهلوگیری ۴ شمعی در شکل ۲۱-۵ نشان داده شده است. در تغییر مکان-های بزرگتر از ۲ متر رفتار غیرخطی مصالح شمع قابل مشاهده می‌باشد.

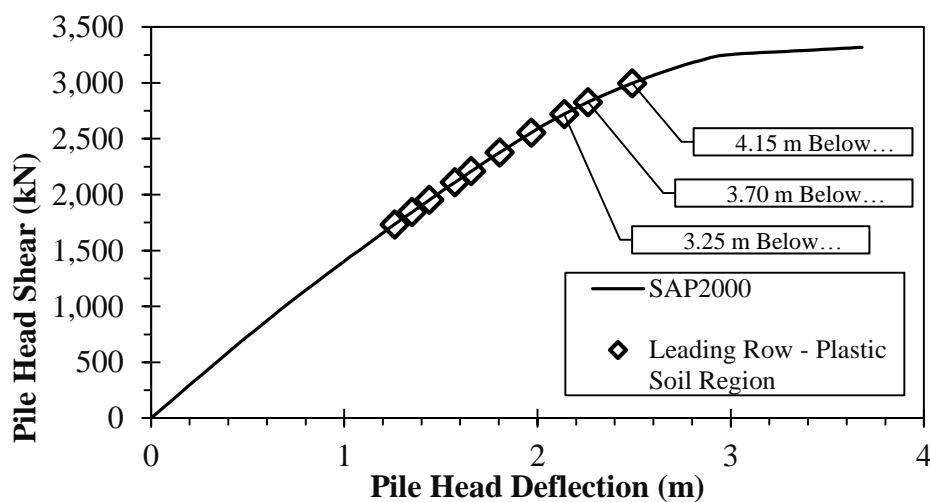
شکل ۲۲-۵ و شکل ۲۳-۵ منحنی بار-تغییر مکان پلاستیک در دلفین ۴ شمعی به همراه نقاطی که به ترتیب برای شمع مقدم و دنباله، خاک پلاستیک شده را نشان می‌دهد. به عنوان مثال برای ردیف گروه شمع‌های مقدم در نقطه با تغییر مکان ۲/۱۴ متر و نیروی ۲۷۲۲ کیلونیوتن، میزان ۳/۲۵

<sup>۶</sup> Force/Moment Hinges

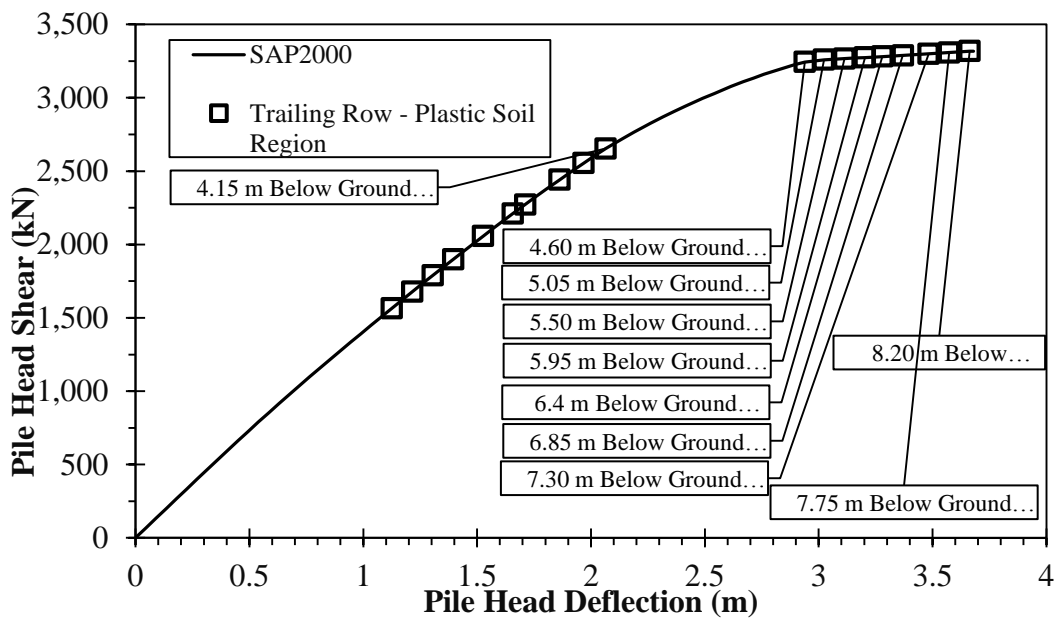
متر خاک از سطح زمین پلاستیک شده است. روند افزایشی محدوده پلاستیک خاک با افزایش تغییرمکان ادامه پیدا می‌کند، به طوری که در تغییرمکان ۲/۴۹ متر و نیروی ۲۹۹۵ کیلونیوتن، حدود ۴ متر از خاک از سطح زمین پلاستیک شده است. به طور مشابه برای ردیف گروه شمع‌های دنباله در نقطه با تغییرمکان ۲/۰۶ متر و نیروی ۲۶۵۳ کیلونیوتن، میزان ۴/۱۵ متر خاک از سطح زمین پلاستیک شده است. در نهایت در تغییرمکان ۳/۶۶ متر و نیروی ۳۳۱۷ کیلونیوتن، محدوده پلاستیک خاک از سطح زمین حدود ۸ متر می‌باشد.



شکل ۵-۲۱ منحنی بار-تغییرمکان پلاستیک دلفین پهلوگیری انعطاف پذیر ۴ شمعی



شکل ۵-۲۲ منحنی بار-تغییرمکان پلاستیک دلفین ۴ شمعی به همراه محدوده پلاستیک خاک در شمع مقدم



شکل ۵-۲۳ منحنی بار-تغییر مکان پلاستیک دلفین ۴ شمعی به همراه محدوده پلاستیک خاک در شمع دنباله

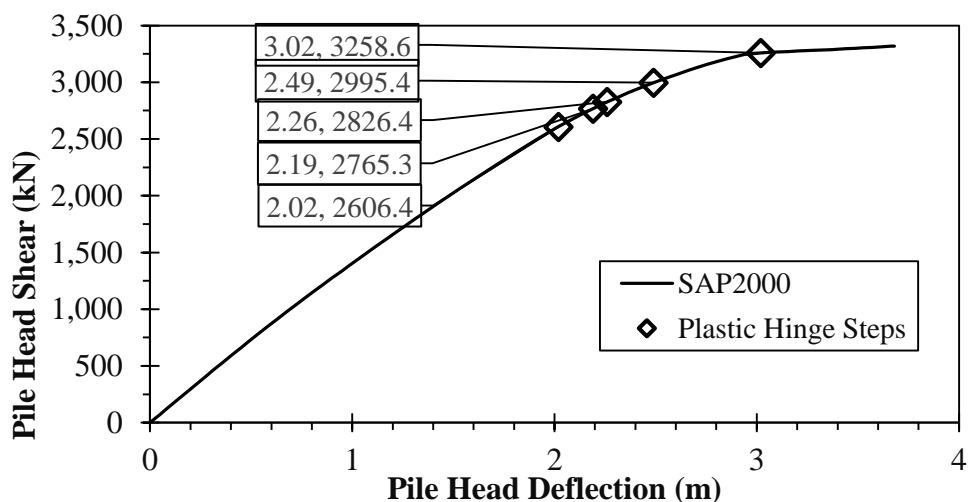
جهت بررسی رفتار غیرخطی شمع، نیاز است پاسخ مفاصل پلاستیک تعریف شده در طول شمع را

آنالیز کرد. این نتایج در شکل ۵-۲۴ نشان داده شده است. تغییر مکان‌های زیر مورد نظر می‌باشد:

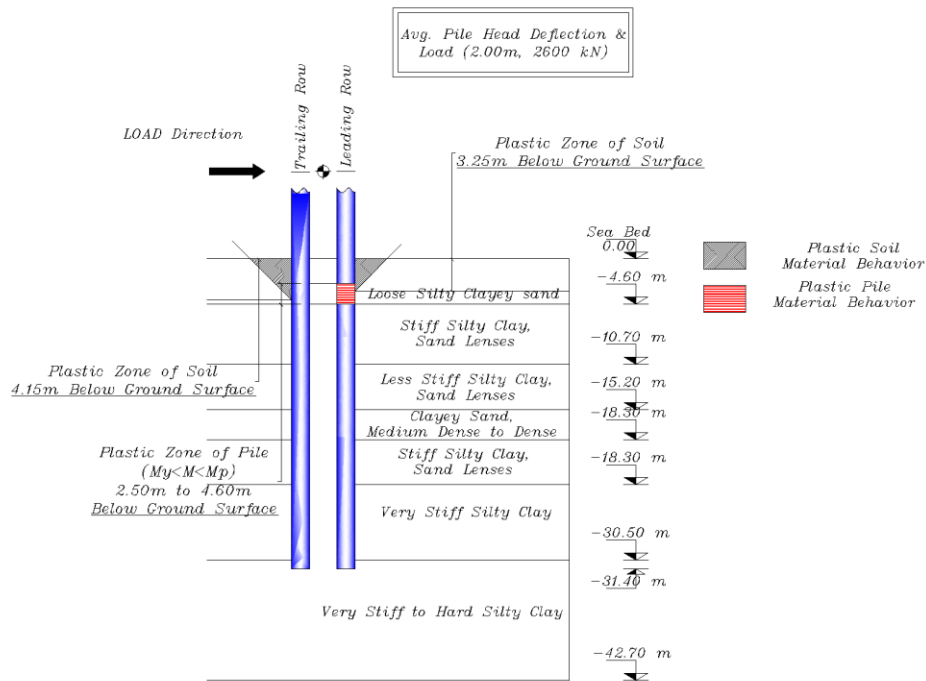
- تغییر مکان ۲/۰۲ متر: در این تغییر مکان لنگر خمشی برخی از مفاصل شمع مقدم از حد لنگر تسلیم بیشتر شده و باعث ایجاد محدوده‌ای به طول ۲/۱۰ متر (از ۲/۵۰ تا ۴/۶۰ متری زیر سطح زمین) می‌شود. در این گام مفاصل شمع دنباله هنوز از حد تسلیم رد نشده‌اند. این محدوده در پروفیل خاک در شکل ۵-۲۵ نشان داده شده است.

- تغییر مکان ۲/۱۹ متر: این گام نیز مشابه گام قبلی می‌باشد، با این تفاوت که محدوده مفاصل پلاستیک در شمع مقدم به سطح زمین می‌رسد. در نتیجه باعث گسترش محدوده پلاستیک در شمع مقدم از سطح زمین تا ۶/۳۰ متری زیر سطح زمین می‌شود.

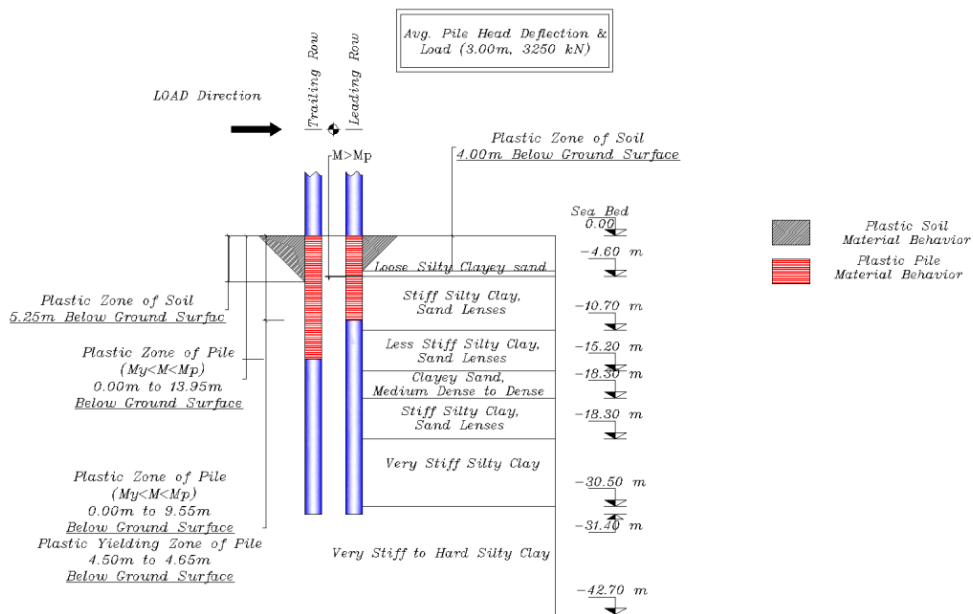
- تغییرمکان ۲/۲۶ متر: در این تغییرمکان برخی از مفاصل پلاستیک در شمع دنباله نیز از حد لنگر تسلیم می‌گذرند. طول محدوده پلاستیک در این گام در شمع مقدم برابر با ۷/۳۲ متر و در شمع دنباله ۳/۳۰ متر می‌باشد.
- تغییرمکان ۲/۴۹ متر: با ادامه گسترش محدوده مفاصل پلاستیک در هر دو ردیف شمع‌ها، مفاصل در شمع دنباله نیز به سطح زمین می‌رسند. طول محدوده پلاستیک در این گام در شمع مقدم ۷/۸۰ متر و در شمع دنباله ۷/۷۵ متر می‌باشد.
- تغییرمکان ۳/۰۲ متر: در این تغییرمکان تعدادی از مفاصل پلاستیک در شمع مقدم به حد لنگر پلاستیک می‌رسند. این مفاصل که به طور کامل پلاستیک شده‌اند طولی برابر با ۰/۱۵ متر (از ۴/۵۰ متری زیر سطح زمین) دارند. طول محدوده پلاستیک در این تغییرمکان در شمع مقدم ۹/۵۵ متر و در شمع دنباله ۱۳/۹۵ متر می‌باشد. این محدوده در پروفیل خاک در شکل ۲۶-۵ نشان داده شده است.
- در تغییرمکان‌های بزرگتر از ۳/۰۲ متر، گسترش در مفاصل پلاستیک شمع دنباله همچنان ادامه دارد.



شکل ۲۶-۵ آنالیز پاسخ مفاصل پلاستیک در منحنی بار تغییرمکان شمع



شکل ۵-۲۵ محدوده پلاستیک خاک و شمع در تغییر مکان ۲ متر در دلفین ۴ شمعی



شکل ۵-۲۶ محدوده پلاستیک خاک و شمع در تغییر مکان ۳ متر در دلفین ۴ شمعی

## ۵-۵-۵ بحث کمی در مورد ظرفیت جذب انرژی در تحلیل پلاستیک دلفین

اگر ظرفیت جذب انرژی در دلفین ۴ شمی برای حالت الاستیک مصالح شمع و آستانه ورود خاک به مقاومت نهایی خود در سطح زمین را به عنوان معیاری جهت بررسی رفتار کلی سیستم در تغییر مکان‌های مختلف قرار دهیم، نتایج مطابق جدول ۹-۵ قابل ارائه می‌باشد:

$$E_{Elastic(1.00m)} = \frac{1}{2} \times 1500 \times 1.00 \cong 750 \text{ kNm} \quad \text{انرژی الاستیک سیستم در تغییر مکان ۱/۰۰ متر}$$

$$\cong 75 \text{ t.m}$$

جدول ۹-۵ بررسی کمی رفتار سیستم دلفین پهلوگیری در تغییر مکان‌های مختلف

Disp. (m)	Force (kN)	Energy (t.m)	Pile Material Behavior (Depth Below Ground Surface)	Soil Material Behavior (Depth Below Ground Surface)
1.00	1500	1.0E <sub>elastic</sub>	Elastic	Nonlinear
1.12	1560	1.1E <sub>elastic</sub>	Elastic	Nonlinear Plastic Start at 0.0m
1.97	2500	3.3E <sub>elastic</sub>	Elastic	Nonlinear Plastic From 0.0m to 3.25m (Average)
2.00	2600	3.5E <sub>elastic</sub>	Leading Row: Plastic from 2.50m to 4.60m Trailing Row: Elastic	Nonlinear Plastic From 0.0m to 3.50m (Average)
2.26	2800	4.2E <sub>elastic</sub>	Leading Row: Plastic from 0.0m to 7.32m Trailing Row: Plastic from 2.40m to 5.97m	Nonlinear Plastic From 0.0m to 3.50m (Average)
3.00	3200	6.4E <sub>elastic</sub>	Leading Row: Plastic from 0.0m to 9.55m (Plastic Yield from 4.50m to 4.65m) Trailing Row: Plastic from 0.00m to 13.95m	Nonlinear Plastic From 0.0m to 4.62m (Average)



# فصل ۶ نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۱-۶ مقدمه

در پژوهش حاضر رفتار یک دلفین پهلوگیری انعطاف‌پذیر چندشمعی تحت اثر بارهای جانبی ناشی از پهلوگیری شناور بررسی شده است. بدین منظور جهت مدل‌سازی خاک به عنوان یکی از پارامترهای مهم در طرح دلفین‌ها، از روش منحنی‌های  $p-y$  استفاده شده است. در این روش رفتار خاک با استفاده از منحنی‌هایی که مقاومت خاک را در برابر تغییرشکل جانبی آن نشان می‌دهد، جایگزین می‌شود. جهت صحت‌سنجی مدل توسعه داده شده، ابتدا یک آزمایش با مقیاس واقعی انتخاب و نتایج حاصل از مدل و آزمایش با یکدیگر مقایسه شده است. سپس مدل دلفین پهلوگیری توسعه داده شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲-۶ نتیجه‌گیری

با توجه به خروجی‌های مدل صحت‌سنجی و دلفین پهلوگیری، نتایج زیر قابل ذکر می‌باشد:

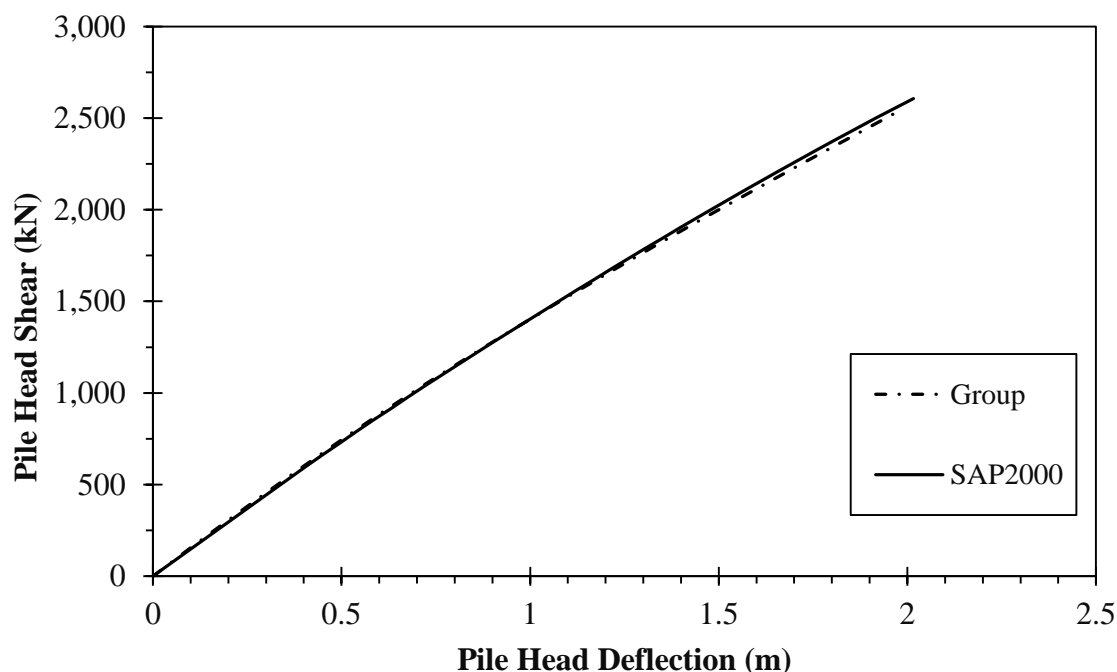
- در نتایج حاصل از مدل‌سازی شمع منفرد در بازه الاستیک و آزمایش میدانی برای نمودار بار-تغییرمکان، تا تغییرمکان ۱۲ میلی‌متر تا حد ۱۰ درصد و برای تغییرمکان‌های بزرگ‌تر از آن ۵ درصد اختلاف مشاهده می‌شود. همچنین برای نمودار لنگر خمشی-عمق در تغییرمکان‌های کوچک تا حد ۵ درصد و در تغییرمکان‌های بزرگ تا ۱۰ درصد اختلاف مشاهده می‌شود.
- در نتایج حاصل از مدل‌سازی گروه شمع در بازه الاستیک و آزمایش میدانی برای نمودار بار-تغییرمکان تا تغییرمکان ۱۵ میلی‌متر حدود ۵ درصد و برای تغییرمکان‌های بزرگ‌تر آن کمتر از ۲/۵ درصد اختلاف مشاهده می‌شود. همچنین برای نمودار لنگر خمشی-عمق تا عمق ۵

متر در ردیف‌های جلویی و عقبی تا حد ۲۵ درصد اختلاف مشاهده می‌شود. مقادیر ردیف میانی شمع‌ها بیشترین مطابقت را با نتایج حاصل از آزمایش میدانی دارد.

نتایج حاصل از مدل دلفین پهلوگیری در محدوده الاستیک مصالح شمع از نظر جذب انرژی اختلاف ۱۳ درصدی با حد بالایی انرژی مورد نیاز برای پهلوگیری شناور طرح، ۳۰۰ تن‌متر، دارد. شکل ۱-۶ نتایج حاصل از مدل دلفین پهلوگیری در محدوده الاستیک مصالح شمع را نشان می‌دهد.

$$E_{1.50m} = \frac{1}{2} \times 2000 \times 1.50 \cong 1500 \text{ kNm} \cong 150 \text{ t.m} \quad \text{انرژی جذب شده در تغییرمکان ۱/۵۰ متر}$$

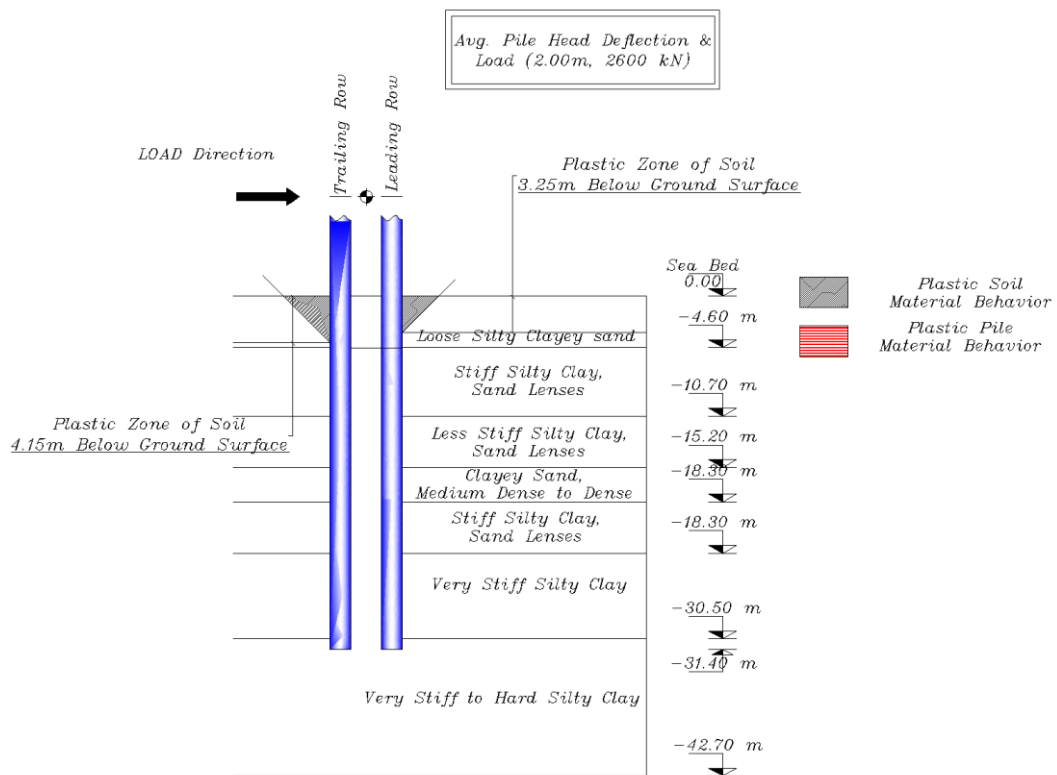
$$E_{2.00m} = \frac{1}{2} \times 2600 \times 2.00 \cong 2600 \text{ kNm} \cong 260 \text{ t.m} \quad \text{انرژی جذب شده در تغییرمکان ۲/۰۰ متر}$$



شکل ۱-۶ منحنی بار-تغییرمکان الاستیک در دلفین پهلوگیری ۴شمعی

بررسی نتایج مدل دلفین پهلوگیری در محدوده الاستیک مصالح شمع، رفتار پلاستیک خاک را در این محدوده نشان می‌دهد. حد انتهایی رفتار خطی مصالح شمع و خاک برای انرژی ۷۵

تن متر متناظر با تغییرمکان ۱ متر می‌باشد. برای انرژی ۲۶۰ تن متر متناظر با تغییرمکان ۲ متر، طولی از خاک برابر با ۱۱ درصد عمق مدفون شمع در ردیف مقدم و ۱۳ درصد عمق مدفون شمع در ردیف دنباله به مقاومت نهایی خود می‌رسد. شکل ۲-۶ این محدوده را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۶ محدوده پلاستیک خاک برای شمع‌های ردیف جلویی و عقبی در دلفین ۴ شمعی در انتهای محدوده الاستیک مصالح شمع

– نتایج حاصل از مدل دلفین پهلوگیری در محدوده پلاستیک مصالح شمع، اندرکنش قابل توجهی را برای شمع و خاک نشان می‌دهد. در این محدوده علاوه بر ادامه یافتن روند پلاستیک شدن خاک، شمع نیز رفتار غیرخطی خود را نشان می‌دهد. این رفتار غیرخطی توزیع شده تا حد رسیدن به لنگر پلاستیک ادامه پیدا می‌کند. مطابق شکل ۳-۶، اگر انرژی

۷۵ تن متر متناظر با تغییر مکان ۱ متر را به عنوان مقیاسی برای بررسی رفتار غیرخطی شمع

و خاک در تغییر مکان‌های بزرگ‌تر از ۲ متر قرار دهیم، نتایج به شرح زیر قابل ارائه می‌باشد:

۱. مطابق شکل ۴-۶ حد غیرخطی مصالح شمع در ردیف مقدم در طولی برابر با ۷ درصد

عمق مدفون شمع و از تراز ۲/۵۰ متری از سطح زمین شروع می‌شود.

۲. مطابق شکل ۵-۶ حد غیرخطی مصالح شمع در ردیف دنباله در تغییر مکان ۲/۲۶ متری

در طولی برابر با ۱۱ درصد عمق مدفون شمع و از تراز ۲/۴۰ متری از سطح زمین شروع

می‌شود.

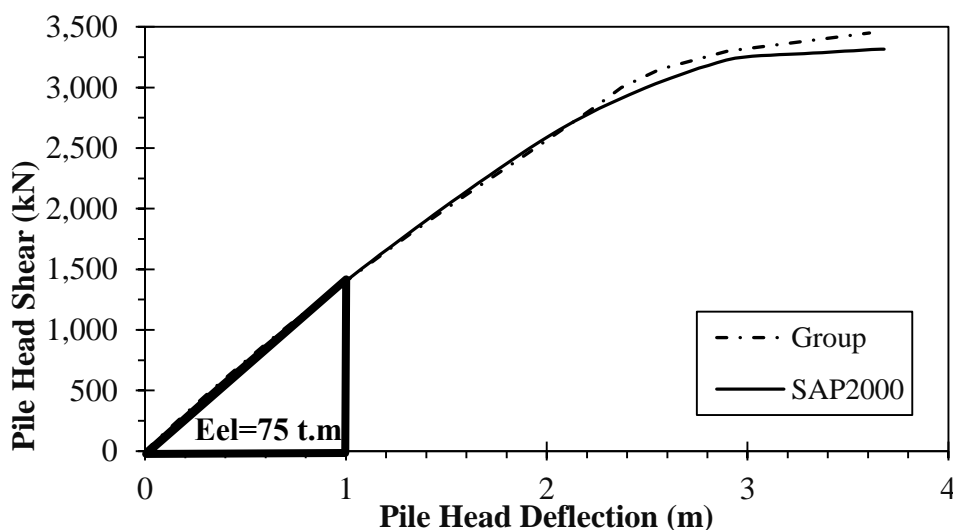
۳. در نهایت با توجه به شکل ۶-۶، در تغییر مکان ۳ متری مصالح شمع در ردیف مقدم و

دنباله به ترتیب در طولی برابر با ۳۱ و ۴۵ درصد عمق مدفون شمع از سطح زمین رفتار

غیرخطی از خود نشان می‌دهند. در این محدوده طولی از خاک برابر با ۱۳ درصد عمق

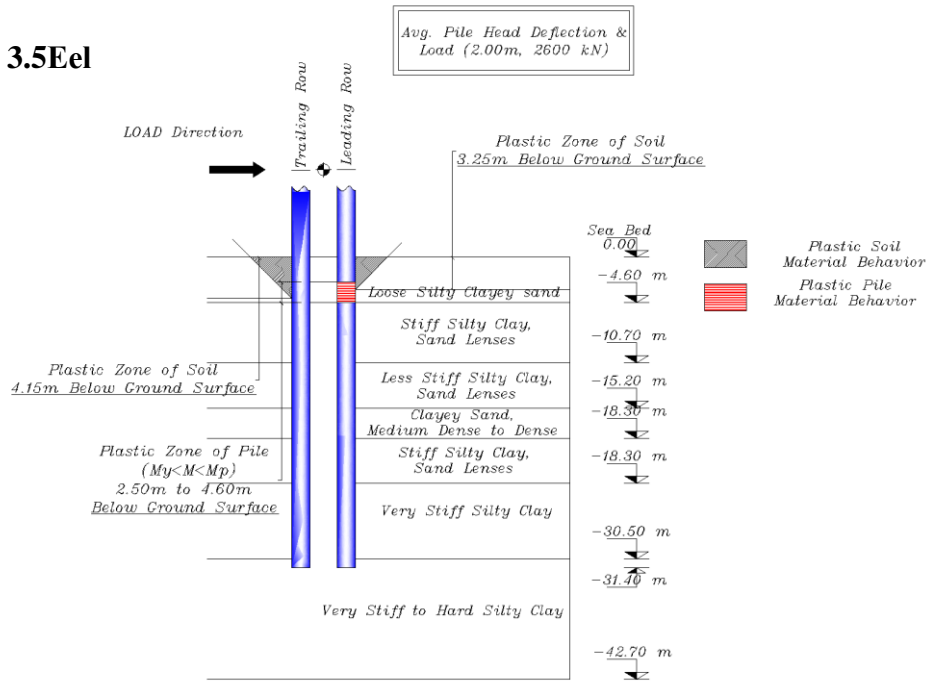
مدفون شمع در ردیف مقدم و ۱۷ درصد عمق مدفون شمع از سطح در ردیف دنباله از

سطح زمین، به مقاومت نهایی خود خواهد رسید.



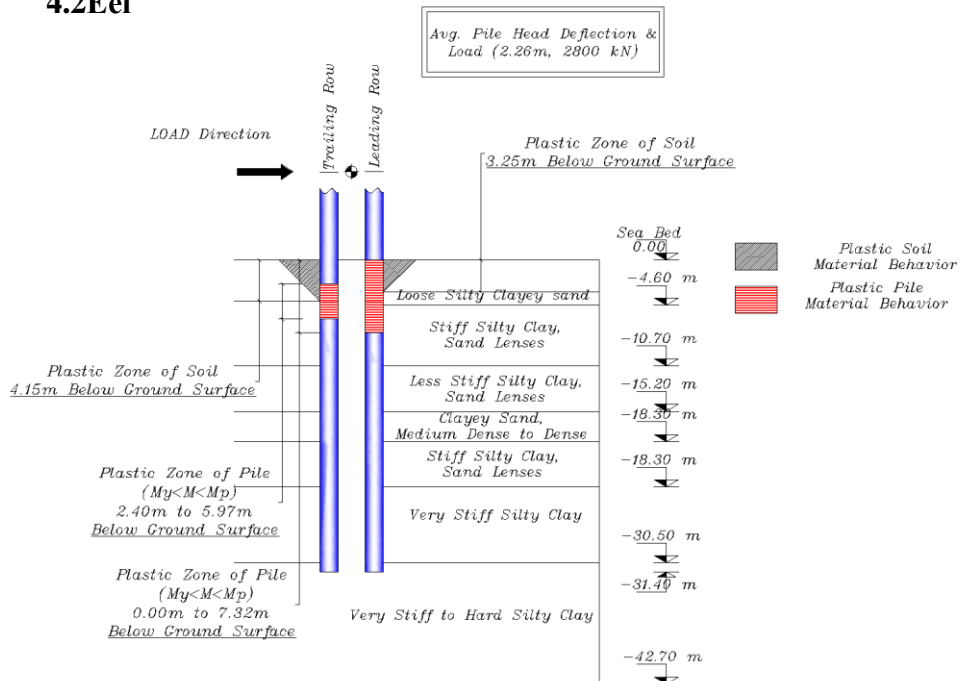
شکل ۳-۶ منحنی بار-تغییر مکان پلاستیک دلفین پهلوگیری انعطاف پذیر ۴ شمعی

### 3.5Eel

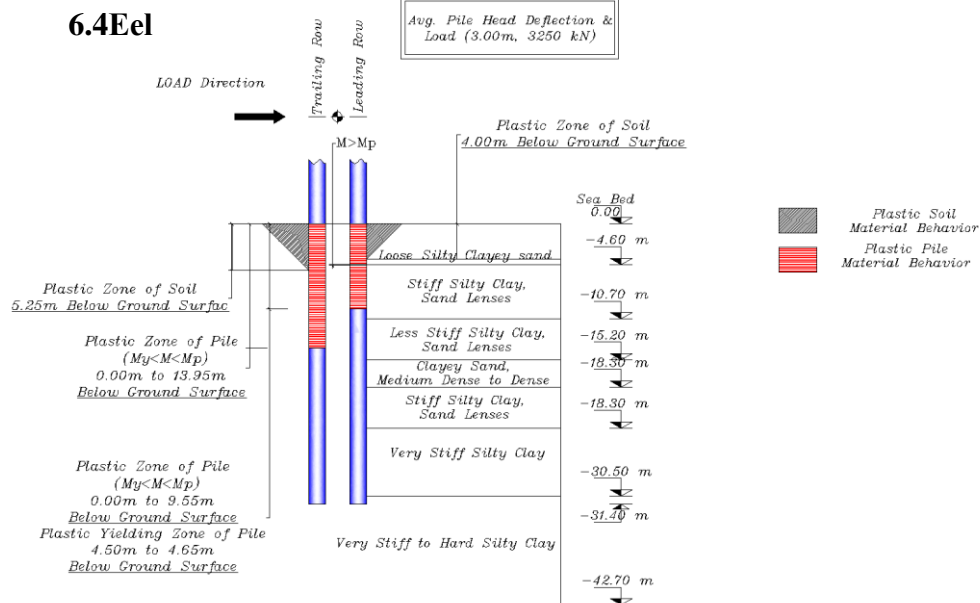


شکل ۴-۶ محدوده پلاستیک مصالح شمع و خاک در تغییر مکان ۲ متری در دلفین ۴ شمعی (3.5Eel)

### 4.2Eel



شکل ۵-۶ محدوده پلاستیک مصالح شمع و خاک در تغییر مکان ۲/۲۶ متری در دلفین ۴ شمعی (4.2Eel)



شکل ۶-۶ محدوده پلاستیک مصالح شمع و خاک در تغییر مکان ۳ متری در دلفین ۴ شمعی (6.4Eel)

### ۳-۶ پیشنهادات

با توجه به نتایج حاصل از مدل‌های محاسباتی، پیشنهادات زیر برای پژوهش‌های آینده به شرح زیر ارائه شده است:

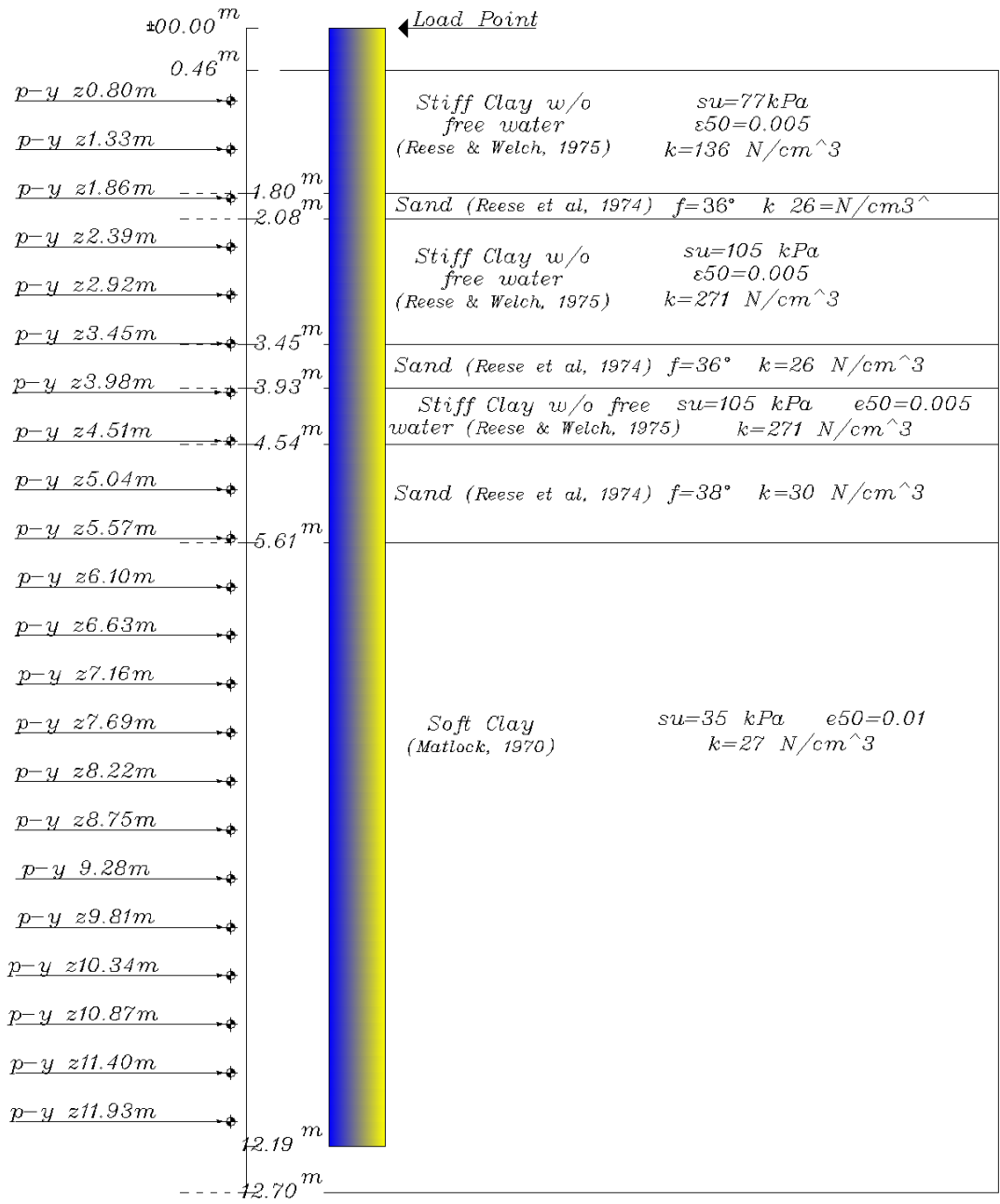
- توسعه مدل دلفین پهلوگیری انعطاف‌پذیر چندشمعی با در نظر گرفتن عملکرد توام ضربه‌گیر و تغییر شکل سازه که به صورت دو فنر سری عمل می‌کنند و آنالیز حساسیت مدل برای بررسی تغییر پارامترهای مختلف بر مدل سازه پهلوگیری.
- صحت‌سنجی رفتار غیرخطی شمع شامل؛ آزمایش‌های با مقیاس واقعی، عملکرد واقعی شمع در محدوده غیرخطی، طول محدوده پلاستیک در شمع و بحث ظرفیت مقاطع برای رسیدن به تغییر شکل پلاستیک.

- توسعه مدل دوبعدی شمع به حالت سه‌بعدی برای در نظر گرفتن اثر پیچشی ناشی از پهلوگیری شناور بر سازه پهلوگیری، از جمله موارد مهم به خصوص در پهلوگیری‌های با زاویه نسبت به خط پهلوگیری سازه.
- توسعه مدل سازه پهلوگیری برای در نظر گرفتن بار محوری به عنوان پارامتر مهم دیگری در طراحی، در فرم منحنی‌های  $t-z$  در طول شمع و  $q-w$  برای انتهای شمع و صحت‌سنجی آن با استفاده از روش‌هایی که اخیراً بر پایه آزمایش CPT تولید شده است و رفتار محوری شمع را دقیق‌تر توصیف می‌کند.

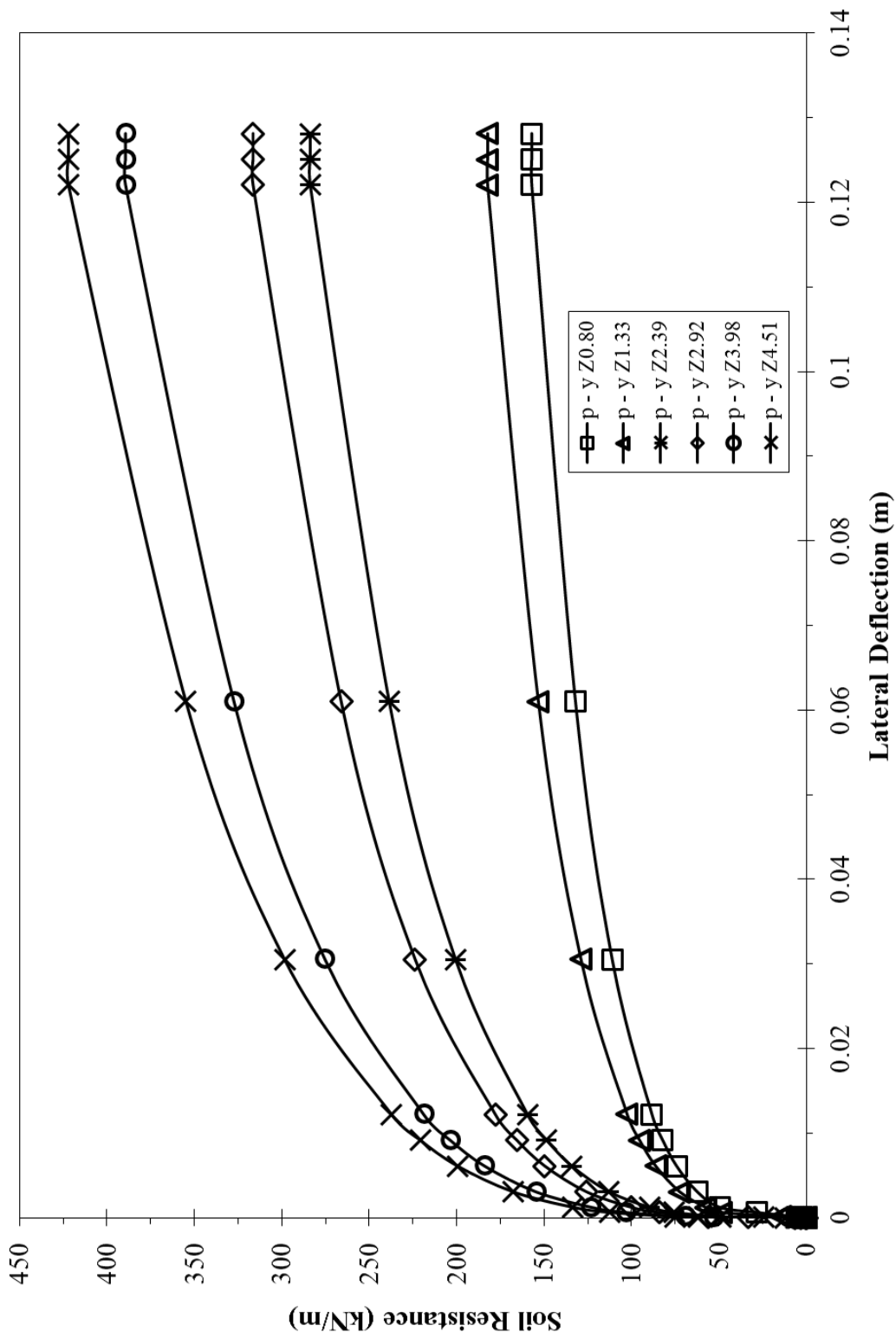


پیوست شماره ۱- منحنی های p-y در مدل صحت نسبی (برای شمع منفرد)

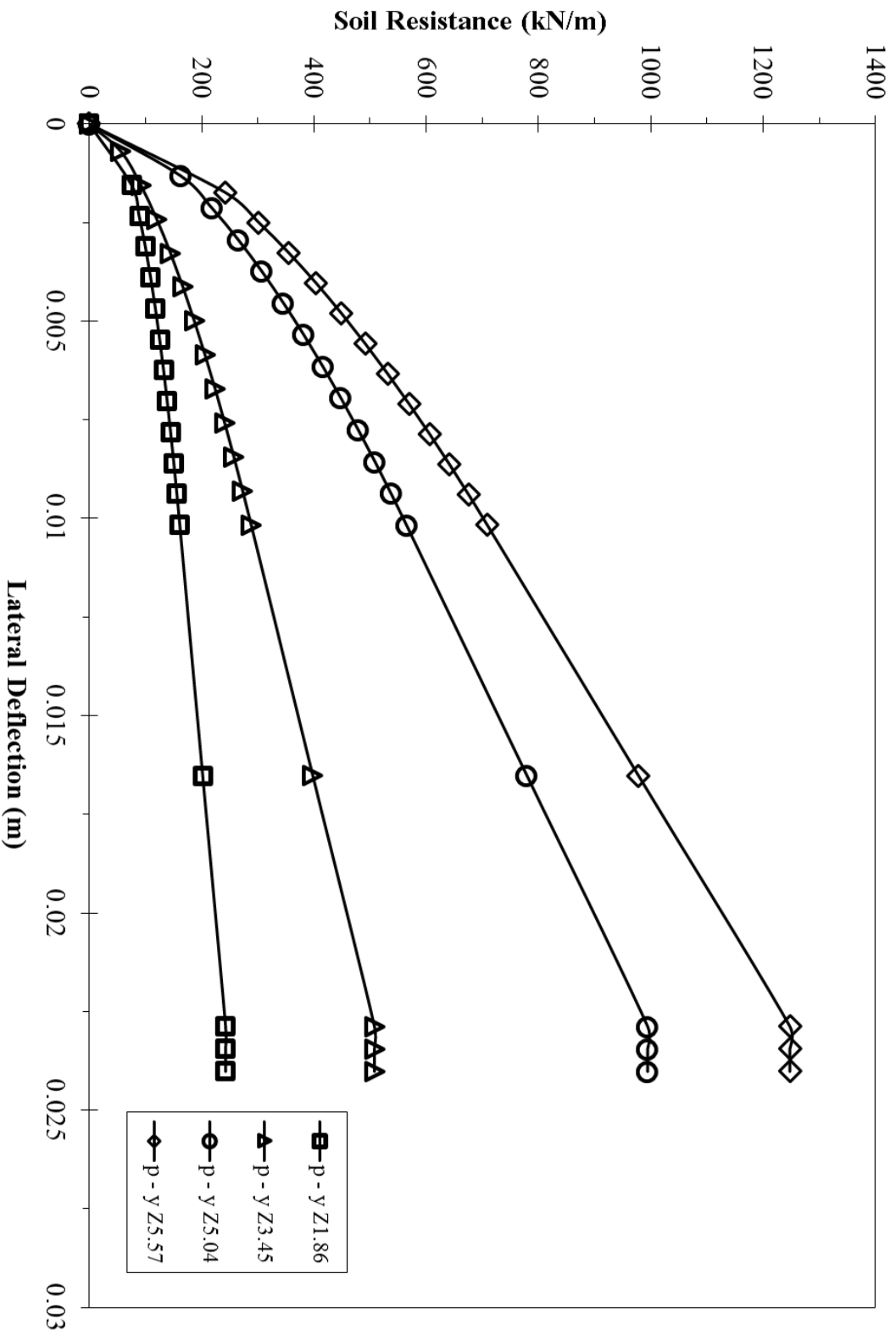
Depth Below Pile Head



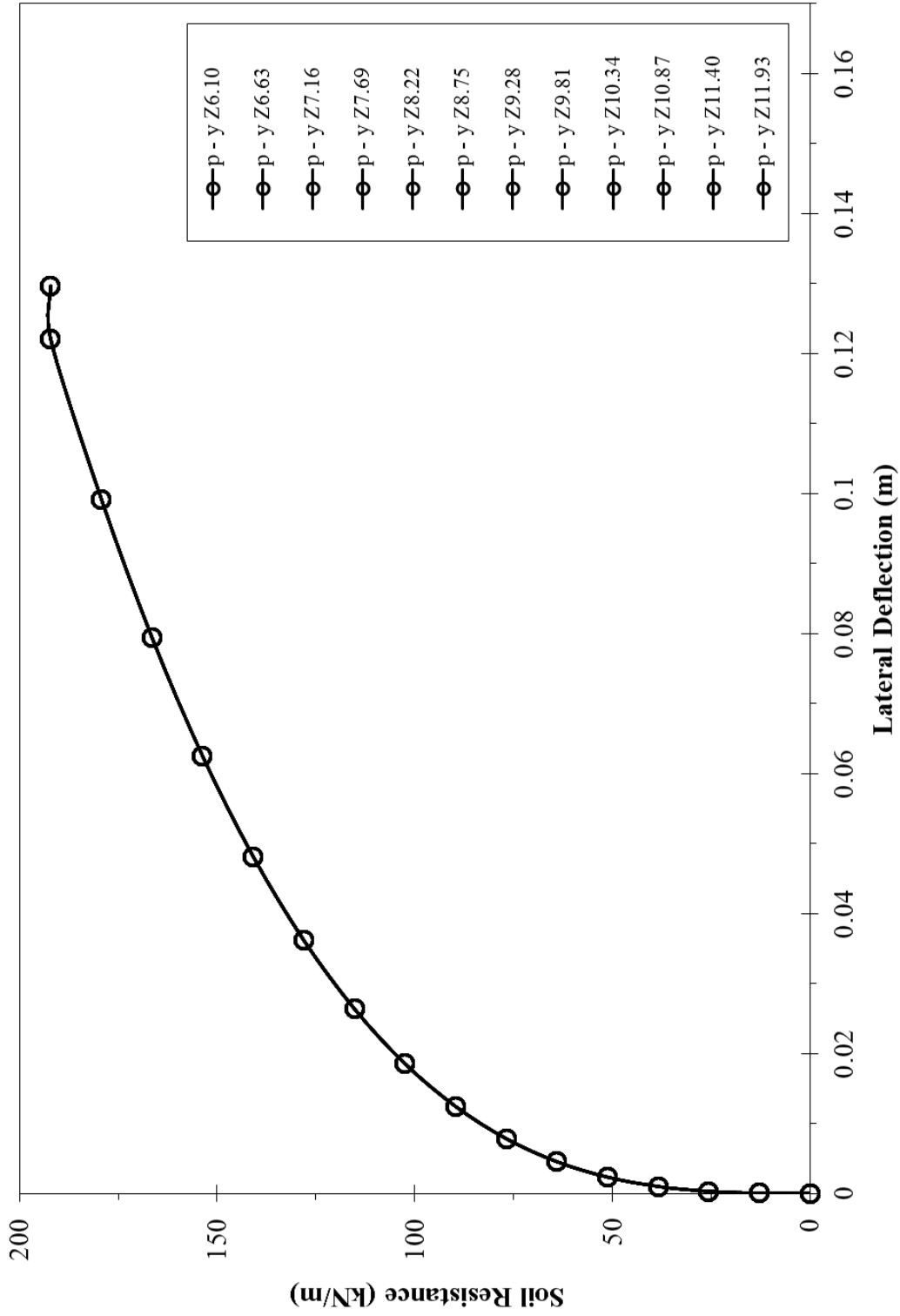
**p-y Curves for Stiff Clay without Free Water (Reese & Welch, 1975)**



p-y Curves for Sand ( Reese, et al, 1974)

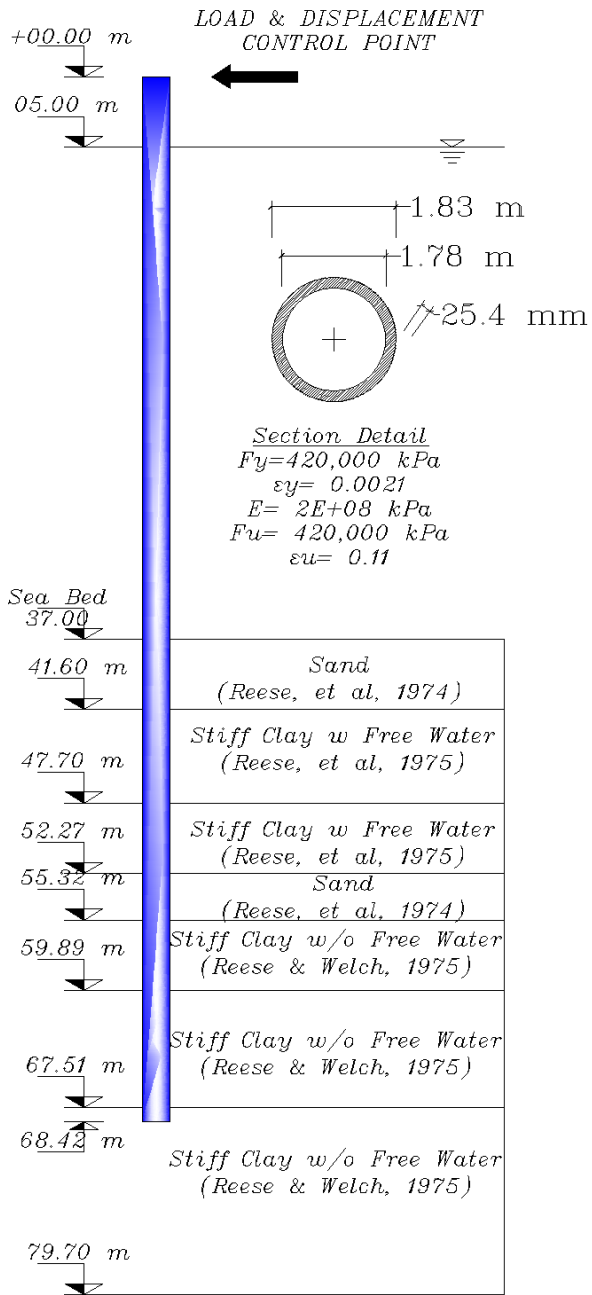


### p-y Curves for Soft Clay (Matlock, 1970)



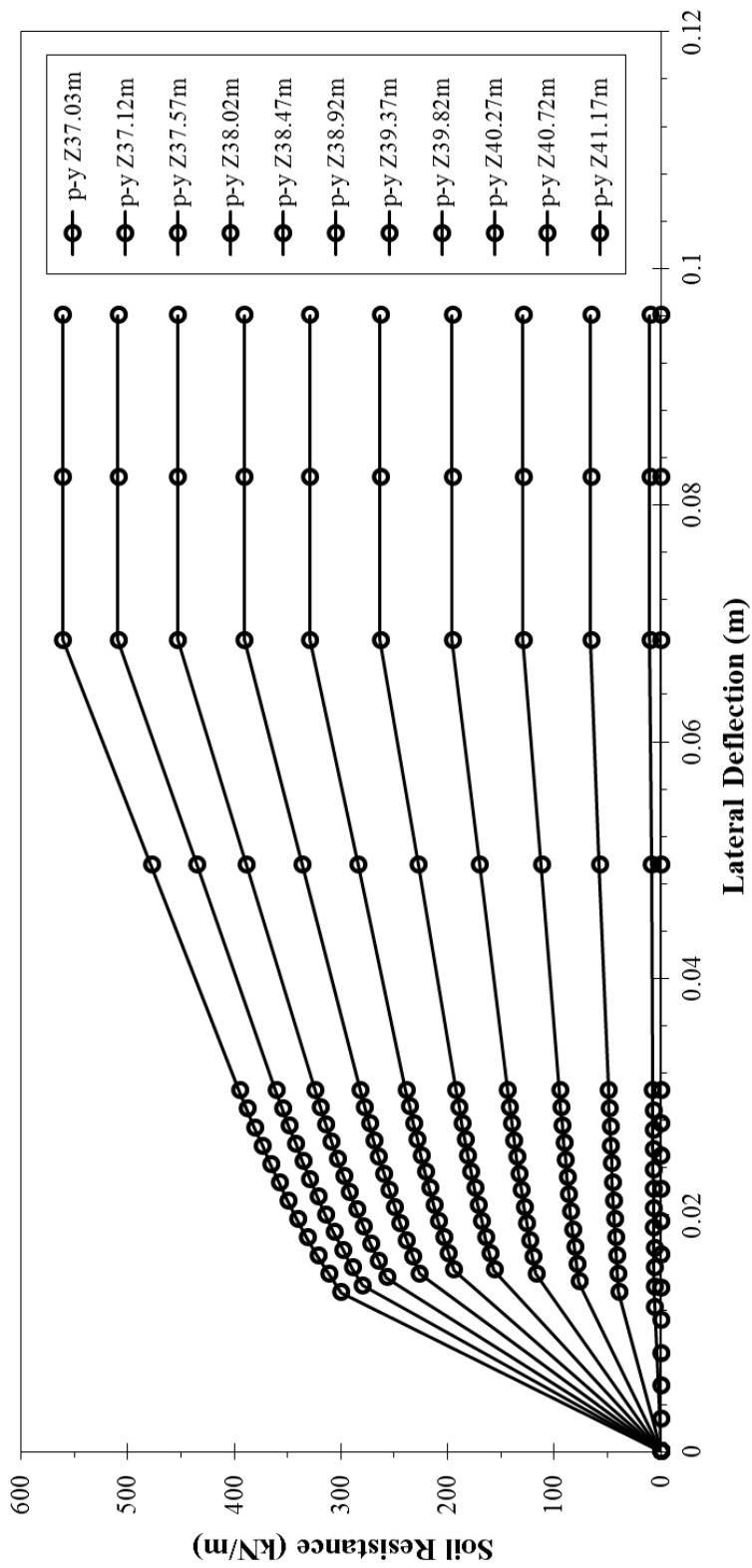


پیوست شماره ۲- منحنی های p-y در مدل دلفین (برای شمع منفرد)

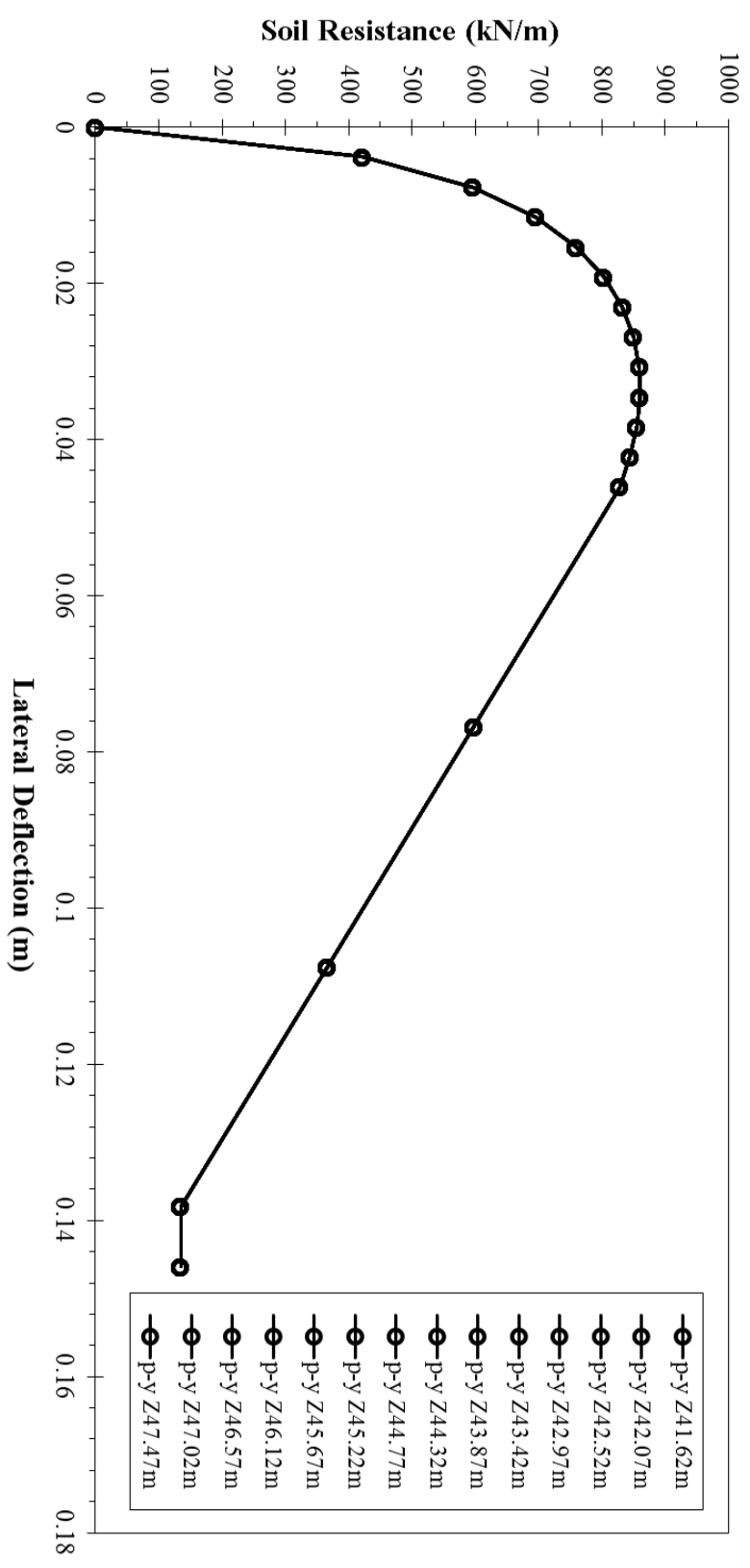




**p-y Curves for Sand (Reese, et al, 1974)**

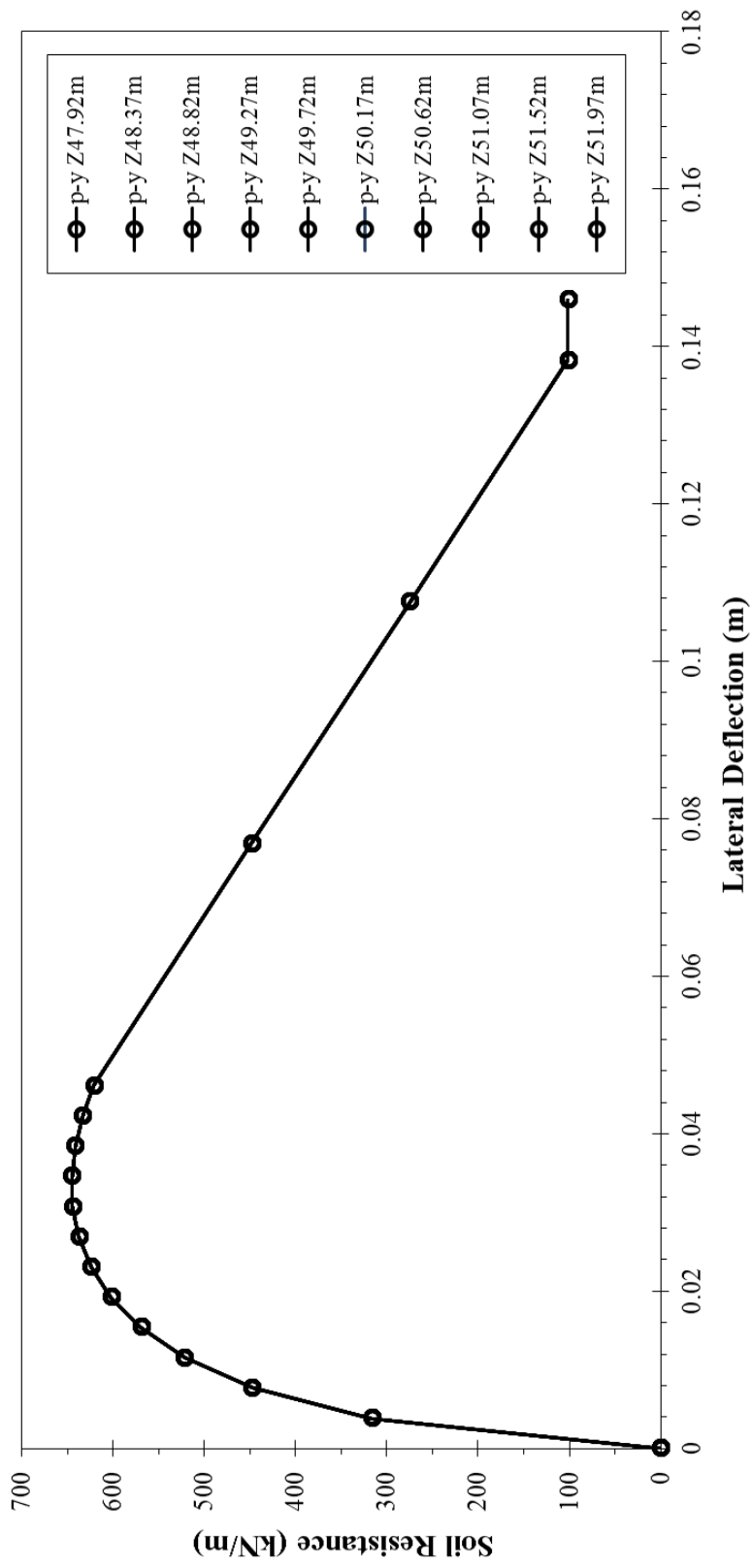


p-y Curves for Stiff Clay with Free Water (Reese, et al, 1975)

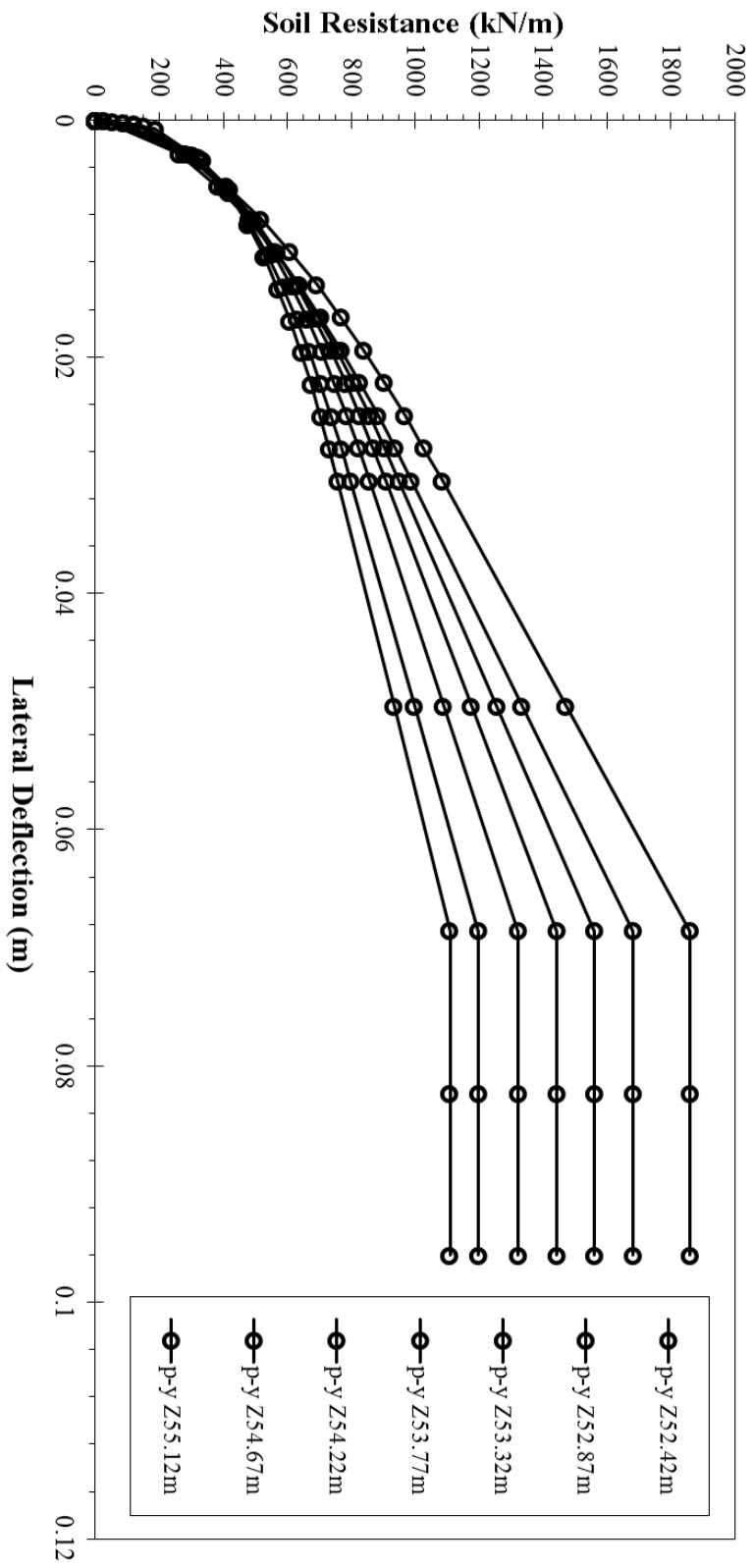


- p-y Z41.62m
- p-y Z42.07m
- p-y Z42.52m
- p-y Z42.97m
- p-y Z43.42m
- p-y Z43.87m
- p-y Z44.32m
- p-y Z44.77m
- p-y Z45.22m
- p-y Z45.67m
- p-y Z46.12m
- p-y Z46.57m
- p-y Z47.02m
- p-y Z47.47m

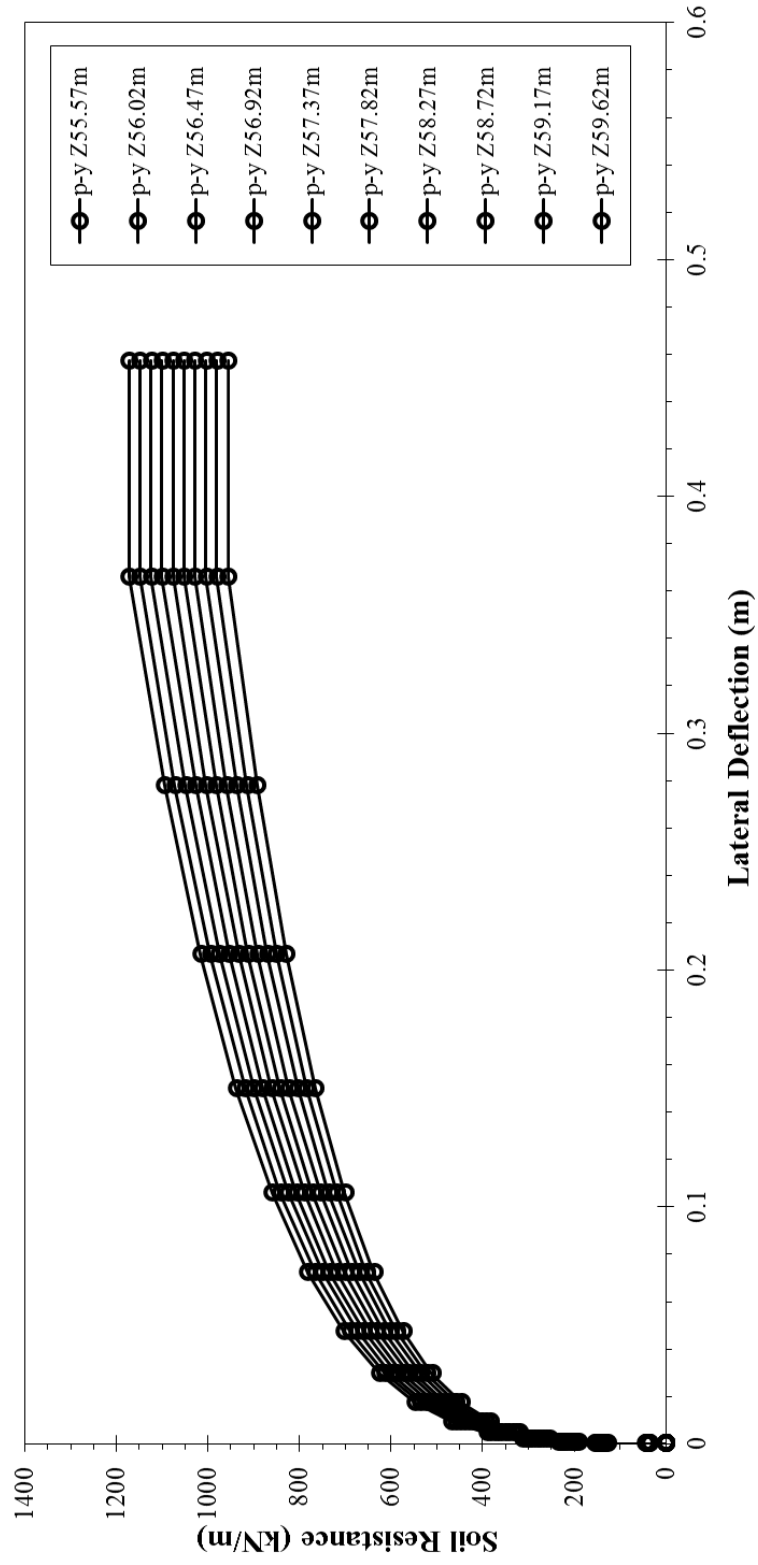
**p-y Curves for Stiff Clay with Free Water (Reese, et al, 1975)**



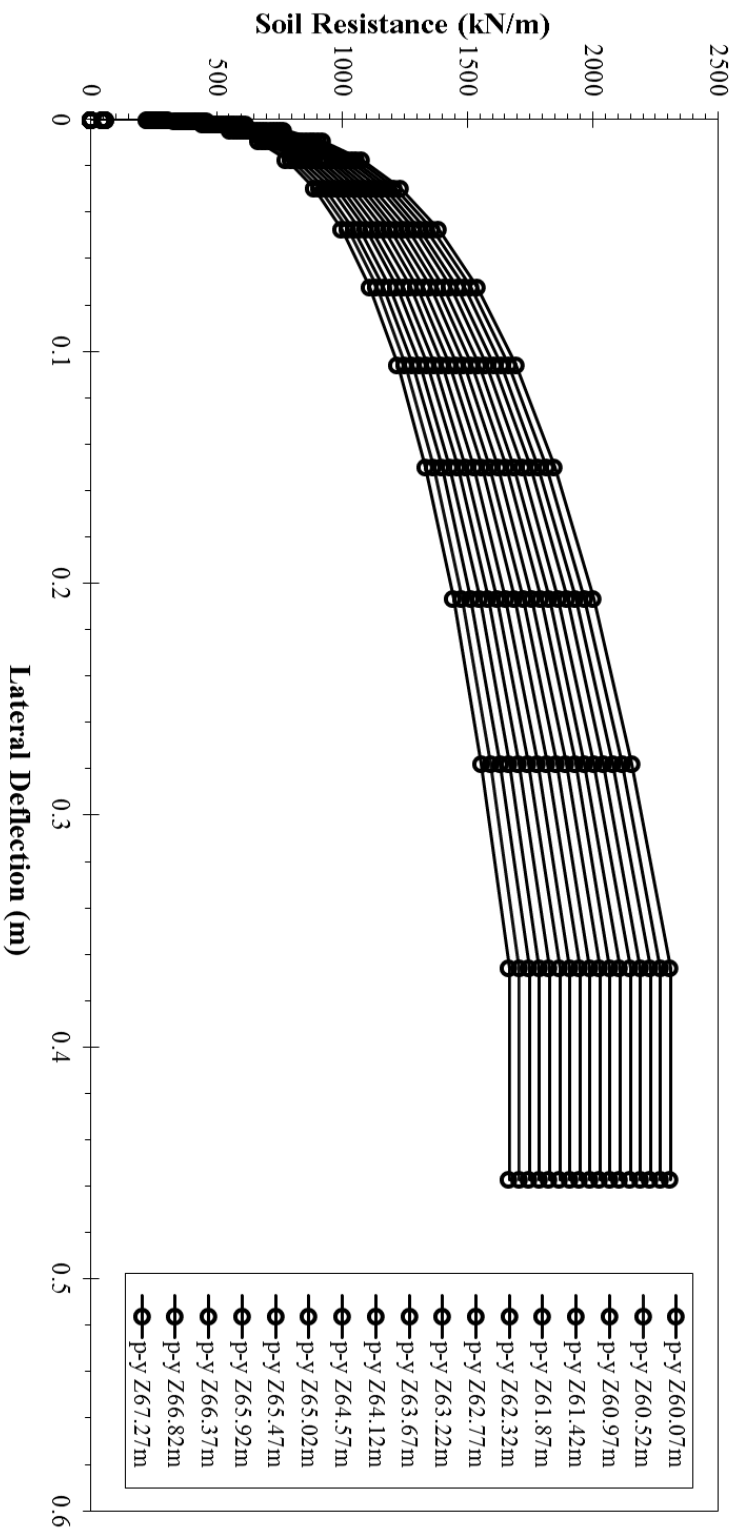
**p-y Curves for Sand ( Reese, et al, 1974)**



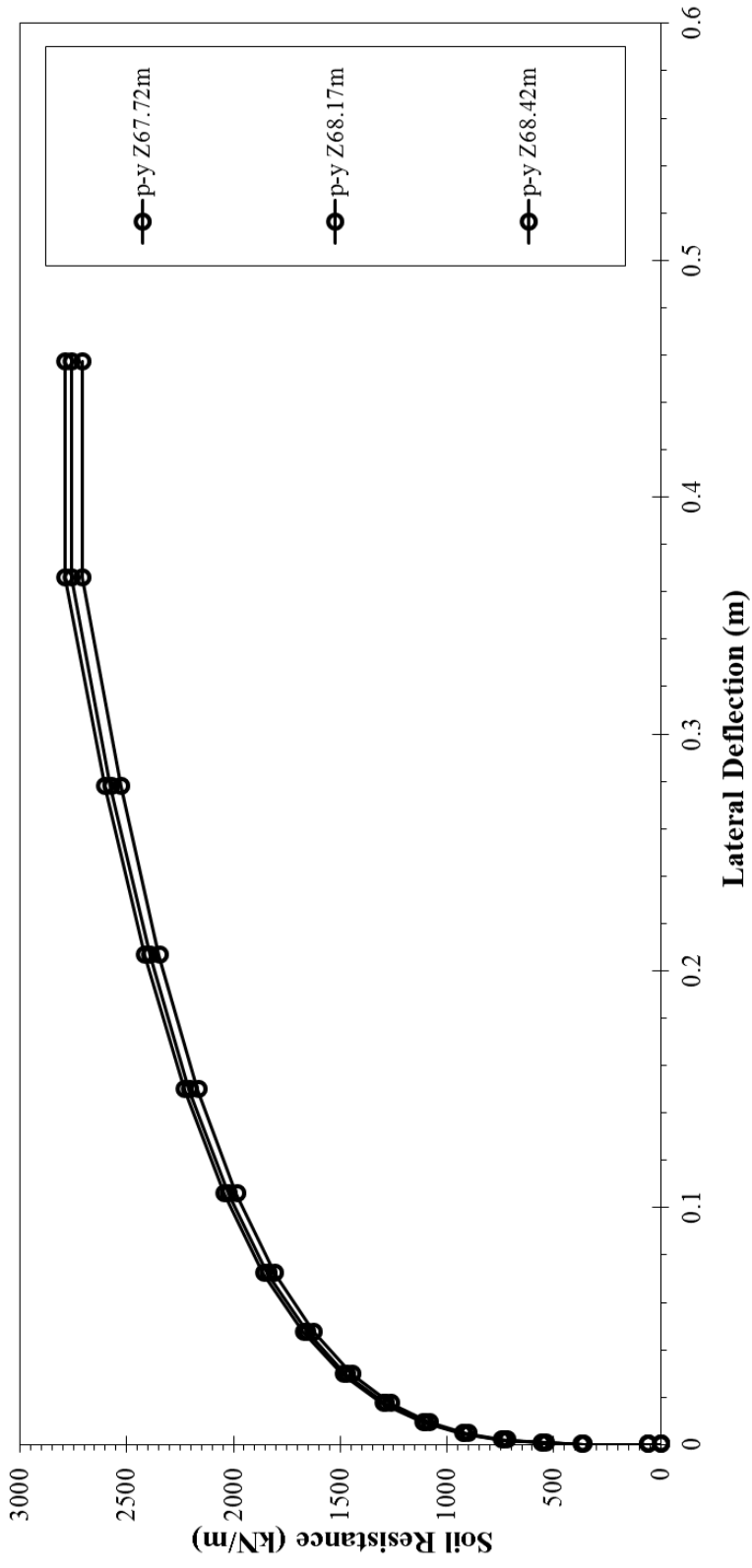
**p-y Curves for Stiff Clay without Free Water (Reese & Welch, 1975)**



p-y Curves for Stiff Clay without Free Water ( Reese & Welch, 1975)



**p-y Curves for Stiff Clay without Free Water (Reese & Welch, 1975)**







## مراجع

American Society of Civil Engineers, (2014), “**ASCE/COPRI 61-14: Seismic Design of Piers and Wharves**”, American Society of Civil Engineers, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, Virginia.

British Standard Institution, (2010), “**BS 6349-2:2010 Maritime Works – Part 2: Code of practice for design of quay walls, jetties and dolphins**”, British Standard Institution, London.

British Standard Institution, (2014), “**BS 6349-4:2014 Maritime Works – Part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems**”, British Standard Institution, London.

Bruijn E., (2004), MSc. Thesis, “Plastic Design of Breasting Dolphins”, Hydraulic and Geotechnic Engineering Depart. Delft University of Technology.

California State Lands Commission, (2016), “**California Code of Regulations, Part 2, California Building Code, Chapter 31F, Title 24, Marine Oil Terminal (MOTEMS)**”, California State Lands Commission, Sacramento, CA.

Chiou J.S., Yang H.H., and Chen C.C., (2009), “Use of Plastic Hinge Model in Nonlinear Pushover Analysis”, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, **135**, **9**.

Committee for Waterfront Structures of the German Port Technology Association, and German Geotechnical Society, (2012), “**EAU 2012 Recommendation of the Committee for Waterfront Structures: Harbours and Waterways**”, 9<sup>th</sup> English Ed., Ernst&Sohn, Berlin.

Ferritto J., Dickenson S., Priestley N., Werner S., and Taylor C., (1999), “**Seismic Criteria for California Marine Oil Terminals – Volume I**”, Volume I, Marine Facilities Division, California State Lands Commission, 330 Golden Shore, Suite 210, Long Beach.

Gaythwaite J.W., (2016), “**Design of Marine Facilities: Engineering and Design of Port and Harbor Structures**”, 3<sup>rd</sup> Ed., American Society of Civil Engineers, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, Virginia.

Isenhower W.M., and Wang S., (2013), “**Technical Manual for LPILE 2013: A Program for the Analysis of Deep Foundations under Lateral Loading**”, Ensoft, Inc., 3003 W. Howard Lane, Austin, Texas.

Marriott G.B., and Van den Berg Ir.J., (1974), “High Capacity Oil Loading Terminal at Kharg Island”, **Proc. Instn Civ. Engrs**, **56**, **1**, pp. **31-47**.

Marriott G.B., Cox P.A., Dennis J.A.N. Calderwood W., Dent G.E., Postlethwaite R.W., Holt J.B., Conway C.J., Palmer J.E.G., Baker A.L.L., Fletcher R.H., Fox D.A., Fluornoy S., and Van den Berg Ir.J., (1974), "Discussion: High Capacity Oil Loading Terminal at Kharg Island", **Proc. Instn Civ. Engrs**, **56, 3, pp. 365-372**.

PIANC Working Group 33 of the Maritime Navigation Commission, (2002), "**Guidelines for the design of Fender Systems: 2002**", International Navigation Association, Brussels.

POLA: City of Los Angeles Harbor Department, (2010), "**The Port of Los Angeles Code for Seismic Design, Upgrade and Repair of Container Wharves**", City of Los Angeles Harbor Department, Los Angeles.

POLB: Port of Long Beach, (2015), "**Port of Long Beach Wharf Design Criteria**", Harbor Department of the City of Long Beach, Long Beach, California, USA.

Reese L.C., and Impe W.V., (2011), "**Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading**", 2<sup>nd</sup> Ed., CRC Press, Taylor & Francis Group, London.

Reese L.C., Isenhower W.M., and Wang S., (2006), "**Analysis and Design of Shallow and Deep Foundations**", John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Reese L.C., Wang S., and Vasquez, (2016), "**Computer Program Group Version 2016: A Program for the Analysis of a Group of Piles Subjected to Vertical and Lateral Loading (Technical Manual)**", Ensoft, Inc., 3003 W. Howard Lane, Austin, Texas.

Rollins K.M., Oslen R.J., Egbert J.J., Oslen K.G., Jensen D.H., and Garrett B.H., (2003) "**Report No. UT-03.03: Response, Analysis, and Design of Pile Groups Subjected to Static and Dynamic Lateral Loads**", Utah Department of Transportation, 4501 So. 2700 W., Salt Lake City, Utah.

SBRCURnet Manicipality Rotterdam Port of Potterdam, (2014), "**Qauy Walls**", 2<sup>nd</sup> Ed., CRC Press/Balkema, Leiden, Netherlands.

The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, (2002), "**Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan**", 3-2-4 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-0013, Japan.

Thoresen C.A., (2014), "**Port Designer's Handbook**", 3<sup>rd</sup> Ed., ICE Publishing, London.

Tsinker G.P., (1997), "**Handbook of Port and Harbor Engineering: Geotechnical and structural aspects**", Chapman & Hall.

Tsinker G.P., (2004), "**Port Engineering: Planning, Construction, Maintenance, and Security**", John Wiley & Sons Inc., Hoboken.

Working Group No. 34 of the Maritime Navigation Commission International Navigation Association, (2001), "**Seismic Design Guidelines for Port Structures**", Swets & Zeitlinger B.V., Lisse.

طاحونی ش. و میرگلوی بیات م.، (۱۳۹۳)، "مهندسی سواحل و بنادر"، چاپ دوم، انتشارات علم و ادب، تهران.



# Abstract

Flexible breasting dolphins comprise one or more large diameter vertical piles designed to absorb the kinetic energy of a berthing vessel by deformation characteristics of piles. The capacity of pile (or piles) to withstand berthing loads depends on the stiffness of the berthing system. The stiffness of the berthing system is a function of the stiffness of different components of the system; namely: pile(s), soil, and fender (if it exists). In fact, in this study the interaction of the soil and the pile, as one of the class of soil–structure interaction problems, is investigated. First, using experimental p-y curves for soil, the lateral behavior of the structure in the presence of the soil is modeled, and after verifying the discussed model, a series of analyses were performed using linear and nonlinear behavior of the system (including the pile and the soil) for the lateral loads on the structure.

In a study on one of the most famous flexible marine structures in the world, it was observed that the energy absorption capacity of the proposed model is in good agreement with required berthing energy of the design vessel. It should be noted that in the defined linear range of the material behavior, a certain depth of the soil below ground surface reaches its ultimate strength. Results from analysis of the berthing system in the range of nonlinear material behavior also indicated a significant relationship between the soil and the piles in the form of plastic hinges. These hinges behave as a distributed model, as a result of soil confinement around the pile, and variation of maximum bending moment location as the development of soil plasticity around the pile.

**Keywords (5 to 7 keywords):** Flexible breasting dolphins, Pile under lateral loading, Stiffness of berthing system, Soil–structure interaction, p–y curves, Plastic hinges.



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Civil Engineering**

**MSc Thesis in Coastal Engineering, Ports and Marine Structures**

**On the Behavior of Flexible Multi – Pile Breasting Dolphins  
against Lateral Loads**

By: Ashkan Abedian

Supervisor

Dr Farshid Jandaghi Alaei

Advisor

Dr Hamid Bayesteh

December 2018