

به نام خدا



دانشگاه گیلان
دانشکده عمران

گرایش ژئوتکنیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی رفتار شمع توسط مدل سازی فیزیکی

استاد راهنما: دکتر حسن قاسم زاده

دانشجو: حمید رضا شعبان زاد

شماره دانشجویی: ۸۸۰۱۴۶۴

بهمن ۹۰

اظہارنامہ دانشجو

موضوع پایان نامہ: بررسی رفتار شمع توسط مدل سازی فیزیکی

استاد راهنما: جناب آقای دکتر قاسم زاده

نام دانشجو: حمیدرضا شعبان زاد

شماره دانشجویی: ۸۸۰۱۴۶۴

اینجناب حمیدرضا شعبان زاد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارایه شده در این پایان نامہ توسط شخص اینجناب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تایید می‌باشد، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به‌علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامہ تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجناب یا فرد دیگری در هیچ جا ارایه نشده است و در تدوین متن پایان نامہ چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را به‌طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضا دانشجو:

تاریخ:

فرم حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱. حق طبع و نشر نتایج این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری به صورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد. ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.
 ۲. کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.
- هم چنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تقدیم بہ

دامن پر مہر ماکہم کین درسِ رحمتِ آموخت

و آغوشِ گرمی کہ ہم بہتر توانہ پرتن درِ خطِ سحرِ زندگانی بود

حال که با یاری و لطف پروردگار منان، رسالت خویش در تدوین این پژوهش را به سرانجام رساندم، لازم میدانم تا از تمامی عزیزانی که با مساعدت‌های بی‌دریغ خویش در پیشبرد اهداف این پایان‌نامه مرا یاری نمودند، مراتب تشکر و قدردانی را بجای آورم.

با تقدیر و درود فراوان خدمت پدر و مادر بسیار عزیز ، دلسوز و فداکارم که پیوسته جرعه نوش جام تعلیم و تربیت ، فضیلت و انسانیت آنها بوده ام و همواره چراغ وجودشان روشنگر راه من در سختی ها و مشکلات بوده است.

با تشکر و سپاس فراوان از جناب آقای دکتر حسن قاسم زاده، که با صبر و بردباری وصف‌ناپذیر خویش، همواره مرا یاری نموده‌اند. همواره مقام شاگردی ایشان بر لوح زندگیم نشانی از افتخار خواهد بود .

با تقدیر فراوان از جناب آقای دکتر بهروز عسگریان و دکتر فرزین کلانتری که دلسوزانه مرا در انجام این پژوهش یاری کردند، بی‌شک راهنمایی‌های بی‌دریغ ایشان مانند چراغی، هدایتگر مسیرم در گذار زندگی خواهد بود.

با سپاس بی دریغ خدمت دوستان گران مایه ام صدرا جوادی و مصطفی کاهانی، که برادرانه در تمام مراحل ساخت پایلوت مدل سازی و انجام آزمایش‌ها مرا یاری کردند. همچنین با تشکر از دکتر شکرگذار، مهندس شاهچراغی ، مهندس ابراهیمی و میلاد آبخیز که در طول انجام این پژوهش، قدم به قدم مرا مساعدت و همراهی نمودند.

حمیدرضا شعبان زاد

چکیده

عملکرد لرزه‌ای پی‌های عمیق سال‌ها است که توجه بسیاری از محققین را به خود مشغول ساخته است. کاربرد روز افزون شمع‌ها در سازه‌هایی نظیر سکوه‌های نفتی، توربین‌های بادی دریایی و دکل‌های مخابراتی، افزایش اهمیت چگونگی رفتار شمع‌ها را در پی دارد. پایداری این سازه‌ها به وسیله نصب شمع‌های عمیق تامین می‌شود که غالباً به صورت گروهی استفاده می‌شوند. جهت مدل‌سازی گروه شمع، تعیین اندرکنش شمع-خاک-شمع به دلیل نزدیک بودن فاصله شمع‌ها در گروه حایز اهمیت است. چگونگی عملکرد آن‌ها تحت بارهای جانبی دینامیکی و استاتیکی ناشی از بار باد، موج دریا و نیروهای زلزله و تخمین اثرات اندرکنش شمع-خاک-شمع بر عملکرد آن‌ها یکی از موارد پیچیده در مسائل مدل‌سازی شمع‌ها می‌باشد.

در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از یک مدل فیزیکی با مقیاس بزرگ (۱/۱۵) از شمع‌های بکار رفته در یکی از سکوه‌های نفتی در خلیج فارس رفتار دینامیکی این شمع‌ها به صورت تکی و گروهی تحت بارهای جانبی دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته و اثرات اندرکنش شمع-خاک-شمع بر رفتار گروه شمع ارزیابی گردد. جهت نیل به این مقصود ابتدا وضعیت ژئوتکنیکی ساختگاهی در خلیج فارس مورد بررسی قرار گرفت و سپس با استفاده از قوانین مقیاس و تحلیل ابعادی مشخصات مصالح شمع‌ها و خاک مورد نیاز در مدل‌سازی تعیین شده و تهیه گردید. جهت مدل‌سازی از یک محفظه با مرزهای مناسب با ابعاد $6 \times 6 \times 6$ متر و شمع‌های آلومینیومی با طول ۳ متر و قطر خارجی ۶ سانتی‌متر، استفاده گردید.

پس از اعمال بار دینامیکی جانبی مشخص در آزمایش‌های مختلف با توجه به اهداف هر آزمایش و ثبت داده‌ها در تمامی مراحل بارگذاری و آزمایش، مقادیر تنش‌های خمشی در طول شمع‌ها و مقدار شتاب سر شمع‌ها در هر آزمایش تعیین و مقادیر بدست آمده با یکدیگر مقایسه شدند. بدین ترتیب روند تغییرات تنش‌های خمشی در طول بارگذاری و همچنین مقدار نسبت تنش خمشی انتقال یافته از شمع بارگذاری شده به شمع‌های مجاور مورد بررسی قرار گرفت.

با ارزیابی نتایج بدست آمده از مدل بزرگ مقیاس این نکات استنتاج گردید که با افزایش سیکل‌های بارگذاری عمق گیرداری در شمع افزایش یافته و مقدار لنگر خمشی ماکزیمم افزایش می‌یابد. همچنین مقدار تنش‌های خمشی ایجاد شده در طول شمع به دلیل حضور شمع‌های مجاور از ۱۰٪ تا ۷۰٪ با کاهش فاصله شمع‌های مجاور و افزایش سیکل‌های مختلف بارگذاری، کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سیکل‌های بارگذاری مقدار ضریب تنشی اندرکنش افزایش یافته و با افزایش فاصله بین شمع‌های مجاور و مرجع مقدار ضریب تنشی اندرکنش کاهش پیدا می‌کند.

همچنین با استفاده از آزمایش‌های کوچک مقیاس صورت گرفته مقادیر اندرکنش جانبی استاتیکی در فواصل مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت نیل به این مقصود از شمع‌های آلومینیومی با طول ۰/۵ متر و با قطر خارجی ۰/۰۲۵ متر بهره گرفته شد. در انتها نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها با مقادیر ضریب اندرکنش استاتیکی بدست آمده از روابط تحلیلی علی‌بیگلو مورد مقایسه قرار گرفت. با ارزیابی نتایج مذکور این نکته حاصل گردید که مقادیر ضریب اندرکنش استاتیکی بدست آمده توسط روابط تحلیلی از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردارند.

فهرست مطالب:

۱	پیشگفتار.....	۱
۱-۱	مقدمه.....	۱
۲-۱	بیان مساله.....	۲
۳-۱	ضرورت تحقیق.....	۳
۴-۱	روش تحقیق.....	۳
۵-۱	هدف پایان‌نامه.....	۴
۶-۱	ساختار فصول.....	۵
۲	مروری بر ادبیات موضوع.....	۷
۱-۲	مدلهای موجود در تحلیل رفتار پی‌های عمیق در برابر بارهای جانبی.....	۷
۲-۲	پژوهشهای صورت گرفته در مورد اندرکنش شمع-خاک-شمع تحت بار جانبی.....	۱۶
۱-۲-۲	اندرکنش شمع-خاک-شمع تحت بار جانبی استاتیکی.....	۱۶
۲-۲-۲	اندرکنش شمع-خاک-شمع تحت بار جانبی دینامیکی.....	۱۹
۲-۲-۳	اثر حضور شمع در سایه در بارگذاری استاتیکی و دینامیکی گروه شمع.....	۲۲
۳-۲	پژوهشهای آزمایشگاهی و صحرایی صورت گرفته.....	۲۷
۳	مدل سازی فیزیکی و کاربرد قوانین مقیاس در مدل سازی.....	۳۷
۳-۱	مقدمه.....	۳۷
۲-۳	تحلیل ابعادی.....	۳۸
۱-۲-۳	مقدمه.....	۳۸
۲-۲-۳	الزامات روابط شبیه‌سازی.....	۳۹
۳-۲-۳	کاربرد روابط شبیه سازی در معادلات اندرکنش خاک-شمع.....	۴۲
۴-۲-۳	تعیین خاک مورد نیاز در مدل سازی فیزیکی صورت گرفته با مقیاس ۱:۱۵.....	۴۸
۴	مراحل آزمایش های مدل سازی فیزیکی.....	۵۴
۱-۴	مقدمه.....	۵۴
۲-۴	آماده سازی مدل فیزیکی طراحی شده و کالیبراسیون سنسورها.....	۵۷
۱-۲-۴	طراحی و احداث گودال محل انجام مدل سازی فیزیکی.....	۵۸
۲-۲-۴	طراحی زهکش مورد استفاده در گودال مدل سازی.....	۶۰
۳-۲-۴	تهیه و پر کردن گودال از ماسه محاسبه شده از روابط تحلیل ابعادی.....	۶۱

تهیه و ساخت شمع های آلومینیومی بدست آمده از روابط تحلیل ابعادی.....	۴-۲-۴
طراحی و ساخت اتصالات و کلاhek شمع های تکی و گروهی.....	۵-۲-۴
تهیه، خرید و نصب کرنش سنج ها و سیم های اتصال آن ها بر روی شمع های آلومینیومی.....	۶-۲-۴
کالیبراسیون کرنش سنج ها با استفاده از آزمایش های خمش خالص تیر.....	۷-۲-۴
استفاده از شتاب سنج و کالیبراسیون شتاب سنج.....	۸-۲-۴
انجام عملیات آب بندی کرنش سنج های نصب شده بر روی شمع ها.....	۹-۲-۴
شیوه اعمال نیرو و نحوه اتصال لرزاننده به کلاhek شمع ها.....	۱۰-۲-۴
بارگذاری مدل فیزیکی و اندازه گیری و ثبت پارامترهای مختلف.....	۴-۳
آزمایش شماره ۱- بررسی رفتار تک شمع تحت بارگذاری جانبی دینامیکی.....	۱-۳-۴
آزمایش شماره ۲- بررسی رفتار دینامیکی شمع مرجع در حضور شمع مجاور با S-۲D.....	۴-۳-۲
آزمایش شماره ۳- بررسی رفتار دینامیکی شمع مرجع در حضور شمع مجاور با S-۳D.....	۳-۳-۴
آزمایش شماره ۴- بررسی رفتار دینامیکی شمع مرجع در حضور شمع مجاور با S-۴D.....	۴-۳-۴
آزمایش شماره ۵- بررسی رفتار دینامیکی شمع مجاور در S-۲D.....	۴-۳-۵
آزمایش شماره ۶- بررسی رفتار دینامیکی شمع مجاور در S-۳D.....	۶-۳-۴
آزمایش شماره ۷- بررسی رفتار دینامیکی شمع مجاور در S-۴D.....	۷-۳-۴
آزمایش شماره ۸- بررسی اثر شمع در سایه در گروه شمع ۳×۱ در S-۲D.....	۸-۳-۴
آزمایش شماره ۹- بررسی اثر شمع در سایه در گروه شمع ۳×۱ در S-۳D.....	۹-۳-۴
۵ بررسی و نتیجه گیری از نتایج آزمایشها.....	۹۷
مقدمه.....	۱-۵
تفسیر نتایج بدست آمده از آزمایشها.....	۲-۵
آزمایش های بررسی رفتار تک شمع با وجود یا عدم وجود شمعهای مجاور.....	۱-۲-۵
بررسی آزمایش های رفتار شمع دریافت کننده بر اثر بارگذاری شمع مرجع.....	۲-۲-۵
بررسی نتایج حاصله از آزمایش گروه شمع S-۲D (آزمایش شماره ۸).....	۵-۲-۳
بررسی نتایج حاصله از آزمایش گروه شمع S-۳D (آزمایش شماره ۹).....	۵-۲-۴
۶ آزمایشهای بررسی اندرکنش استاتیکی شمع-خاک-شمع.....	۱۱۶
مقدمه.....	۱-۶
مشخصات مخزن خاک.....	۲-۶
قاب فولادی بارگذاری.....	۳-۶
مشخصات شمع های استفاده شده در آزمایشها.....	۴-۶
ابزار اندازه گیری جابجایی و کالیبراسیون آنها.....	۵-۶
روش آماده سازی خاک استفاده شده در آزمایشها.....	۶-۶

۷-۶	شرح آزمایشها	۱۲۴
۱-۷-۶	نتایج بدست آمده از آزمایشهای ۲۰۱ و ۳ (S-۶, ۷.۵, ۱۱ cm)	۱۲۵
۷	جمع بندی و ارایه پیشنهادات	۱۲۸
۱-۷	خلاصه کارهای صورت پذیرفته	۱۲۸
۲-۷	خلاصه نتایج پژوهش صورت گرفته	۱۲۹
۳-۷	پیشنهاها برای ادامه کار	۱۳۱
۸	فهرست مراجع:	۱۳۲

فهرست اشکال:

- شکل ۱-۲: خمش شمع تحت بارگذاری جانبی [۴]..... ۹
- شکل ۲-۲: توزیع تنش قبل و هنگام تغییر شکل جانبی در یک شمع با مقطع دایره. P_t نمایشگر نیروی برآیند وارد بر شمع در عمق x_t می‌باشد. [۴]..... ۱۰
- شکل ۳-۲: نمونه‌ای از یک منحنی P-Y [۴]..... ۱۰
- شکل ۴-۲: چگونگی تغییرات مدول بستر E_{py} با تغییر مکان [۴]..... ۱۱
- شکل ۵-۲: منحنی‌های بار-جابه جایی (P-Y) در امتداد طول شمع [۵]..... ۱۱
- شکل ۶-۲: شکل شماتیک شمع با سر آزاد تحت بارگذاری جانبی [۷]..... ۱۳
- شکل ۷-۲: فاصله مرکز به مرکز دو شمع S و زاویه انحراف θ تحت بار استاتیکی [۱]..... ۱۹
- شکل ۸-۲: مدل پیشنهادی توسط دبری و جزتاس (۱۹۸۸) [۱۸]..... ۲۱
- شکل ۹-۲: رسمی توضیحی از اثر حضور شمع در سایه در گروه شمع تحت بارگذاری جانبی [۱۹]..... ۲۳
- شکل ۱۰-۲: نواحی معمول تنش در پی‌های عمیق تحت بارگذاری جانبی [۲۰]..... ۲۵
- شکل ۱۱-۲: ناحیه تاثیر تنش ناشی از بارگذاری جانبی شمع [۲۲]..... ۲۵
- شکل ۱۲-۲: مثالی از روند یک آزمایش در مقیاس کامل برای شمع تحت بارگذاری محوری و جانبی [۲۷]..... ۲۸
- شکل ۱۳-۲: مثالی از روند یک آزمایش در مقیاس کامل برای شمع تحت بارگذاری محوری و جانبی [۲۷]..... ۳۰
- شکل ۱-۳: سیستم ساده‌ی جرم - فنر - میراگر [۳۲]..... ۴۰
- شکل ۲-۳: نمایی از یک شمع تحت بار جانبی [۳۳]..... ۴۳
- شکل ۳-۳: تغییرات سختی برشی سکانتی و تانژانتی با تغییرات کرنش برشی [۳۳]..... ۴۵
- شکل ۴-۳: سختی برشی و دقت اندازه‌گیری تجهیزات گوناگون [۳۳]..... ۴۵
- شکل ۵-۳: چگونگی تغییرات سختی برشی با توجه به داده‌های آزمایشگاهی بر روی ماسه‌ی Quiou در آزمایش‌های ستون تشدید و برش پیچشی. نتایج سختی سکانتی G با سختی خاک در کرنش‌های خیلی کوچک G_{max} نرمال سازی شده است. [۳۳]..... ۴۶
- شکل ۶-۳: نمودار تنش - کرنش معمول بدست آمده از آزمایش سه محوری [۳۴]..... ۴۹
- شکل ۷-۳: پروفیل خاک خلیج فارس در گمانه در محل سکوی SPQ1 به عمق ۶۰ متر [۳۵]..... ۵۰
- شکل ۸-۳: نمای سکوی SPQ1 [۳۵]..... ۵۲
- شکل ۹-۳: نمایی از فاصله شمع‌ها از یکدیگر در SPQ1 ($S=2.27D$) [۳۶]..... ۵۳
- شکل ۱۰-۳: پلان از سکوی SPQ1 [۳۵]..... ۵۳
- شکل ۱-۴: مراحل ساخت گودال انجام مدل سازی فیزیکی..... ۵۹
- شکل ۲-۴: مراحل ساخت زهکش مورد استفاده در مدل سازی..... ۶۰
- شکل ۳-۴: نمایی از گودال مدل سازی پر شده از ماسه و عایق پلاستیکی اجرا شده در پیرامون گودال..... ۶۴
- شکل ۴-۴: نمایی از کلاهک و غلاف فولادی استفاده شده در آزمایشها..... ۶۶

- شکل ۴-۵: نحوه نصب سیم های اتصال در طول شمع و عبور آن ها از درون لوله های آلومینیومی..... ۶۷
- شکل ۴-۶: نحوه نصب کرنش سنج ها در طول لوله های آلومینیومی ۶۸
- شکل ۴-۷: تصویری از بارگذاری لوله آلومینیومی جهت کالیبراسیون کرنش سنج ها..... ۶۹
- شکل ۴-۸: نمایی از شتاب سنج و اتصالات مربوط به کار رفته در آزمایشها..... ۷۰
- شکل ۴-۹: نمونه کوچک آزمایشگاهی مورد استفاده جهت کالیبره کردن شتاب سنجها..... ۷۱
- شکل ۴-۱۰: تبدیل فوریه رکورد ثبت شده از شتاب سنج جهت کالیبره کردن آن..... ۷۱
- شکل ۴-۱۱: نمایی از آب بندی کرنش سنج ها با استفاده از پوشش N1..... ۷۲
- شکل ۴-۱۲: نمایی از نحوه اعمال نیرو توسط لرزاننده با دو جرم خارج از مرکز..... ۷۴
- شکل ۴-۱۳: دستگاه مرتعش کننده جهت اعمال بار سینوسی به سیستم..... ۷۵
- شکل ۴-۱۴: قسمت زیر دستگاه مرتعش کننده و چرخ دنده ها..... ۷۵
- شکل ۴-۱۵: دستگاه مبدل برق تکفاز به سه فاز و صفحه نمایش تعداد دور موتور..... ۷۶
- شکل ۴-۱۶: آزمایش شماره ۱ - بررسی رفتار تک شمع تحت بارگذاری دینامیکی..... ۷۸
- شکل ۴-۱۷: نمایی از آزمایش شماره ۱ - بررسی رفتار تک شمع تحت بارگذاری دینامیکی جانبی..... ۷۹
- شکل ۴-۱۸: نمودار مقدار تغییرات تنش خمشی در کرنش سنجها در سیکلهای مختلف بارگذاری..... ۷۹
- شکل ۴-۱۹: نمونه ای از خروجی دستگاه ثبت دادهها در مورد مقادیر تنش خمشی در طول شمع..... ۸۰
- شکل ۴-۲۰: نمودار تنش خمشی به وجود آمده در طول تک شمع در طول سیکلهای بارگذاری..... ۸۰
- شکل ۴-۲۱: آزمایش شماره ۲ - بررسی رفتار تک شمع تحت بارگذاری دینامیکی تحت اثر اندرکنش شمع-خاک-شمع در فاصله ۲ برابر قطر خارجی شمع..... ۸۲
- شکل ۴-۲۲: نمودار تنش خمشی به وجود آمده در طول شمع با وجود شمعهای مجاور در فاصله ۲ برابر قطر شمع در سیکلهای مختلف بارگذاری..... ۸۲
- شکل ۴-۲۳: آزمایش شماره ۳ - بررسی رفتار تک شمع تحت بارگذاری دینامیکی تحت اثر اندرکنش شمع-خاک-شمع در فاصله ۳ برابر قطر خارجی شمع..... ۸۳
- شکل ۴-۲۴: نمودار تنش خمشی به وجود آمده در طول شمع با وجود شمعهای مجاور در فاصله ۳ برابر قطر شمع در سیکلهای مختلف بارگذاری..... ۸۴
- شکل ۴-۲۵: آزمایش شماره ۴- بررسی رفتار تک شمع تحت بارگذاری دینامیکی تحت اثر اندرکنش شمع-خاک-شمع در فاصله ۴ برابر قطر خارجی شمع..... ۸۵
- شکل ۴-۲۶: نمودار تنش خمشی به وجود آمده در طول شمع با وجود شمعهای مجاور در فاصله ۴ برابر قطر شمع در سیکلهای مختلف بارگذاری..... ۸۵
- شکل ۴-۲۷: نمودار تنش خمشی های به وجود آمده در طول شمع کناری در مجاورت شمع بارگذاری شده در فاصله ۲ برابر قطر شمع در سیکلهای مختلف بارگذاری..... ۸۷
- شکل ۴-۲۸: نمودار تنش خمشی های به وجود آمده در طول شمع کناری در مجاورت شمع بارگذاری شده در فاصله ۳ برابر قطر شمع در سیکلهای مختلف بارگذاری..... ۸۸

شکل ۴-۲۹: نمودار تنش خمشی های به وجود آمده در طول شمع کناری در مجاورت شمع بارگذاری شده در فاصله‌ی ۴ برابر قطر شمع در سیکل‌های مختلف بارگذاری	۸۹
شکل ۴-۳۰: آزمایش شماره ۸ - بررسی اثر شمع در سایه در گروه شمع ۱×۳ با فاصله ۲ برابر قطر شمع از یکدیگر. ۹۰	۹۰
شکل ۴-۳۱: جهات متفاوت بارگذاری	۹۰
شکل ۴-۳۲: نمایی از آزمایش شماره ۸ و گسیختگی و جداسازی اتفاق افتاده پس از بارگذاری دینامیکی	۹۱
شکل ۴-۳۳: نمودار تنش خمشی های به وجود آمده در طول شمع میانی (ردیف ۲) در گروه شمع بارگذاری شده در فاصله‌ی ۲ برابر قطر شمع در سیکل‌های مختلف بارگذاری در جهت مثبت	۹۲
شکل ۴-۳۴: نمودار تنش خمشی های به وجود آمده در طول شمع کناری (ردیف ۳) در گروه شمع بارگذاری شده در فاصله‌ی ۲ برابر قطر شمع در سیکل‌های مختلف بارگذاری در جهت مثبت	۹۲
شکل ۴-۳۵: نمودار تنش خمشی های به وجود آمده در طول شمع میانی (ردیف دوم) در گروه شمع بارگذاری شده در فاصله‌ی ۲ برابر قطر شمع در سیکل‌های مختلف بارگذاری در جهت منفی	۹۳
شکل ۴-۳۶: نمودار تنش خمشی های به وجود آمده در طول شمع کناری (ردیف ۱) در گروه شمع بارگذاری شده در فاصله‌ی ۲ برابر قطر شمع در سیکل‌های مختلف بارگذاری در جهت منفی	۹۳
شکل ۴-۳۷: تصویری از آزمایش نهم در محل مدل سازی	۹۴
شکل ۴-۳۸: نمودار تنش خمشی های به وجود آمده در طول شمع میانی (ردیف ۲) در گروه شمع بارگذاری شده در فاصله‌ی ۳ برابر قطر شمع در سیکل‌های مختلف بارگذاری در جهت مثبت	۹۵
شکل ۴-۳۹: نمودار تنش خمشی های به وجود آمده در طول شمع کناری (ردیف ۳) در گروه شمع بارگذاری شده در فاصله‌ی ۳ برابر قطر شمع در سیکل‌های مختلف بارگذاری در جهت مثبت	۹۵
شکل ۴-۴۰: نمودار تنش خمشی های به وجود آمده در طول شمع میانی (ردیف ۲) در گروه شمع بارگذاری شده در فاصله‌ی ۳ برابر قطر شمع در سیکل‌های مختلف بارگذاری در جهت منفی	۹۶
شکل ۴-۴۱: نمودار تنش خمشی های به وجود آمده در طول شمع کناری (ردیف ۱) در گروه شمع بارگذاری شده در فاصله‌ی ۳ برابر قطر شمع در سیکل‌های مختلف بارگذاری در جهت منفی	۹۶
شکل ۵-۱: افزایش عمق محل وقوع لنگر خمشی ماکزیمم با افزایش سیکل‌های بارگذاری در تک شمع	۹۹
شکل ۵-۲: ضریب کاهش تنش خمشی بر اثر حضور شمع مجاور سیکل‌های گوناگون بارگذاری	۹۹
شکل ۵-۳: نمودار تنش خمشی در طول شمع در سیکل اول بارگذاری در آزمایشهای ۱ تا ۴	۱۰۰
شکل ۵-۴: نمودار تنش خمشی در طول شمع در سیکل دوم بارگذاری در آزمایشهای ۱ تا ۴	۱۰۰
شکل ۵-۵: نمودار تنش خمشی در طول شمع در سیکل هشتم بارگذاری در آزمایشهای ۱ تا ۴	۱۰۱
شکل ۵-۶: طیف پاسخ بدست آمده از داده‌های شتاب سنج موجود در سر شمعها در آزمایشها مختلف	۱۰۲
شکل ۵-۷: مقادیر تنشهای خمشی ایجاد شده در طول شمعهای مرجع و دریافت کننده در سیکل دوم بارگذاری	۱۰۴
شکل ۵-۸: مقادیر تنشهای خمشی ایجاد شده در طول شمعهای مرجع و دریافت کننده در سیکل سوم بارگذاری	۱۰۴
شکل ۵-۹: مقادیر تنشهای خمشی ایجاد شده در طول شمعهای مرجع و دریافت کننده در سیکل ششم بارگذاری	۱۰۵
شکل ۵-۱۰: مقادیر تنشهای خمشی ایجاد شده در طول شمعهای مرجع و دریافت کننده در سیکل دهم بارگذاری	۱۰۵
شکل ۵-۱۱: ضرایب اندرکنش در سیکل‌های مختلف بارگذاری و در فواصل متفاوت شمعها از یکدیگر	۱۰۶

شکل ۵-۱۲: ضرایب اندرکنش با افزایش فواصل بین شمعها در چند سیکل مختلف بارگذاری	۱۰۶
شکل ۵-۱۳: جهت‌های مختلف بارگذاری در آزمایش شماره ۸ و ۹	۱۰۸
شکل ۵-۱۴: نمودار تنشهای خمشی در طول شمعهای میانی و کناری در سیکل دوم بارگذاری در جهت مثبت $S=2D$	۱۰۹
شکل ۵-۱۵: نمودار تنشهای خمشی در طول شمعهای میانی و کناری در سیکل دهم بارگذاری در جهت مثبت $S=2D$	۱۰۹
شکل ۵-۱۶: نمودار تنشهای خمشی در طول شمعهای میانی و کناری در سیکل دوم بارگذاری در جهت منفی $S=2D$	۱۱۰
شکل ۵-۱۷: نمودار تنشهای خمشی در طول شمعهای میانی و کناری در سیکل دهم بارگذاری در جهت منفی $S=2D$	۱۱۰
شکل ۵-۱۸: اثر حضور شمع در سایه در سیکلهای مختلف بارگذاری در جهت بارگذاری مثبت $S=2D$	۱۱۱
شکل ۵-۱۹: قرار گیری شمع میانی (شماره ۲) در سایه شمع کناری (شماره ۳) و همپوشانی نواحی تنش	۱۱۱
شکل ۵-۲۰: نمودار تنشهای خمشی در طول شمعهای ردیف ۲ و ۳ در سیکل دوم بارگذاری در جهت مثبت ($S=3D$)	۱۱۳
شکل ۵-۲۱: نمودار تنشهای خمشی در طول شمعهای ردیف ۲ و ۳ در سیکل دهم بارگذاری در جهت مثبت ($S=3D$)	۱۱۳
شکل ۵-۲۲: نمودار تنشهای خمشی در طول شمعهای ردیف ۱ و ۲ در سیکل دوم بارگذاری در جهت منفی ($S=3D$)	۱۱۴
شکل ۵-۲۳: نمودار تنشهای خمشی در طول شمعهای ردیف ۱ و ۲ در سیکل دهم بارگذاری در جهت منفی ($S=3D$)	۱۱۴
شکل ۵-۲۴: اثر حضور شمع در سایه در سیکلهای مختلف بارگذاری در جهت بارگذاری مثبت و منفی ($S=3D$) ..	۱۱۵
شکل ۶-۱: تصویر شماتیک مخزن خاک استفاده شده در آزمایشها	۱۱۸
شکل ۶-۲: نمایی از مخزن خاک انجام آزمایشها	۱۱۸
شکل ۶-۳: نمایی از قاب بارگذاری استفاده شده در آزمایشها	۱۱۹
شکل ۶-۴: نمایی از شمع آلومینیومی و مخروط انتهایی استفاده شده در آزمایشها	۱۲۰
شکل ۶-۵: تصویری از سنسور جابجایی سنج استفاده شده در روند آزمایشها	۱۲۱
شکل ۶-۶: نمودار دانه بندی خاک استفاده شده	۱۲۲
شکل ۶-۷: تصویری از مراحل متراکم سازی خاک استفاده شده در آزمایشها	۱۲۴
شکل ۶-۸: نمایی از آزمایش شماره ۱	۱۲۵
شکل ۶-۹: تصویری از نصب سنسور جابجایی در آزمایش شماره ۲	۱۲۶
شکل ۶-۱۰: نمودار تغییرات ضریب اندرکنش با افزایش تغییرات جابجایی شمع مرجع در آزمایشهای ۱، ۲ و ۳ ...	۱۲۶
شکل ۶-۱۱: مقادیر ضریب اندرکنش در فواصل مختلف شمعها از یکدیگر، در جابجایی مختلف شمع مرجع و مقایسه با مقادیر بدست آمده از روابط تحلیلی	۱۲۷

فهرست جداول:

جدول ۱-۲: تخمین اولیه طول موثر شمع تحت بار دینامیکی [۱۳].....	۱۵
جدول ۲-۲: ضریب شکل S [۱۳].....	۱۶
جدول ۳-۲: پژوهشهای صورت گرفته در سالهای اخیر در مورد چگونگی توزیع نیرو در ردیفهای مختلف گروه ۳ تایی با فاصله $S=3D$	۲۶
جدول ۴-۲: پژوهشهای آزمایشگاهی و صحرایی صورت گرفته در زمینه بررسی رفتار پیه‌های عمیق به صورت گروهی و تک تک.....	۳۳
جدول ۱-۳: مشخصات ماسه شات کریت شهریار.....	۴۸
جدول ۲-۳: مشخصات شمع و خاک در مدل واقعی و مدل فیزیکی.....	۵۱
جدول ۱-۴: برنامه مقدماتی آزمایشها به همراه اهداف و جرئیات هر آزمایش.....	۵۶
جدول ۳-۴: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه مورد استفاده.....	۶۳
جدول ۴-۴: نیروی وارده توسط دستگاه مرتعش کننده.....	۷۶
جدول ۵-۴: نمایش چگونگی قرارگیری کرنش سنج ها در طول شمع آلومینیومی.....	۷۸
جدول ۶-۴: محل قرار گیری کرنش سنج ها در طول شمعهای میانی و کناری.....	۸۶
جدول ۱-۵: فرکانس طبیعی بدست آمده از طیف پاسخ هر یک از آزمایشهای ۱ تا ۴ و مقایسه با یک روش تحلیلی.....	۱۰۲
جدول ۲-۵: مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج سایر محققین.....	۱۱۵
جدول ۱-۶: مشخصات خاک استفاده شده در آزمایشها.....	۱۲۳

۱ پیش‌گفتار

۱-۱ مقدمه

رشد سریع تکنولوژی باعث افزایش روزافزون نیاز بشر به منابع انرژی می‌باشد. در این میان استفاده از انرژی‌های پاک از قبیل توربین‌های مولد نیرو بادی که غالباً به صورت سازه‌های فراساحل می‌باشند، در کشورهای توسعه یافته کاربرد قابل توجه پیدا کرده‌اند. از سوی دیگر منابع هیدروکربنی از جمله نفت و گاز به عنوان یکی از منابع پر اهمیت انرژی، به صورت قابل توجهی در دریاها وجود دارند. بنابراین با افزایش روز افزون سازه‌های دریایی، نیاز به افزایش دانش نسبت به رفتار این قبیل سازه‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد. این سازه‌ها در معرض نیروهای مختلف محیطی و بهره‌برداری می‌باشند. از جمله نیروهای محیطی نیروهای ناشی از باد، امواج دریایی، زلزله و غیره می‌باشد. پایداری سازه‌های دریایی به وسیله نصب شمع‌های عمیق (طویل) به صورت گروه شمع تامین می‌شوند. گروه شمع می‌بایست در برابر نیروهای محیطی مذکور طراحی گردد. این بارها شامل بارهای افقی و قائم کششی و فشاری می‌باشند. [۱]

۲-۱ بیان مساله

چنان‌چه فاصله بین شمع‌ها کم باشد و شمع‌ها در محدوده تاثیر یکدیگر قرار گرفته باشند، یکی از روش‌های بررسی رفتار گروه شمع در نظر گرفتن اندرکنش بین شمع‌ها می‌باشد [۲]. در سکوه‌ای دریایی شمع‌ها از طریق کلاهک صلب به یکدیگر متصل نمی‌باشند بنابراین بهترین روش جهت در نظر گرفتن اندرکنش شمع‌ها استفاده از ضریب اندرکنش شمع-خاک-شمع می‌باشد. ضریب اندرکنش شمع-خاک-شمع، عبارت است از نسبت نشست شمع بدون بار در اثر بارگذاری شمع مجاور به نشست شمع بارگذاری شده [۳]. با داشتن مقدار ضریب اندرکنش شمع-خاک-شمع در هر مساله مربوط به گروه شمع، اعم از تحلیل عملکرد و یا طراحی، امکان محاسبه اضافه نشست هر شمع را در اثر بارگذاری شمع‌های مجاور، علاوه بر نشست شمع تحت تاثیر بار اعمال شده به خود شمع، میسر می‌شود. با توجه به وجود پژوهش‌های نسبتاً گسترده تئوری در این زمینه ([۲]) نیاز به انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی و بزرگ مقیاس در جهت صحت سنجی روابط موجود می‌باشد، که در این پژوهش به این مهم پرداخته شده است.

در این پژوهش ضریب اندرکنش شمع-خاک-شمع در مدل‌سازی فیزیکی به صورت نسبت بیشینه تنش خمشی ایجاد شده در شمع بدون بار بر اثر بارگذاری شمع مجاور به بیشینه تنش خمشی ایجاد شده در شمع بارگذاری شده و در آزمایش‌های کوچک مقیاس به صورت نسبت جابجایی جانبی شمع دریافت کننده بر اثر بارگذاری جانبی شمع مرجع، تعریف شده است. بدین ترتیب می‌توان مقدار بیشینه تنش و جابجایی ایجاد شده در یک شمع بر اثر بارگذاری شمع مجاور را مورد محاسبه قرار داد. همچنین یکی دیگر از فاکتورهای اساسی در طراحی گروه شمع، وجود اثر حضور شمع در سایه می‌باشد. جهت بررسی این اثر ضریبی به عنوان ضریب تنشی اندرکنش گروه به صورت نسبت بیشینه تنش خمشی به وجود آمده در شمع کناری به بیشینه تنش خمشی به وجود آمده در شمع قرار گرفته در سایه شمع مذکور معرفی و مقادیر آن در یک بارگذاری دینامیکی جانبی در دو گروه

۳×۱ با فواصل شمع‌های ۲ و ۳ برابر قطر از یکدیگر مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین ترتیب امکان محاسبه مقدار کاهش تنش خمشی در شمع‌های میانی بر اثر بارگذاری های جانبی میسر خواهد بود.

۳-۱ ضرورت تحقیق

با افزایش دانش در مورد ضرایب اندرکنش شمع-خاک-شمع و اثر حضور شمع در سایه امکان طراحی بهینه گروه‌های شمع تا مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌تواند در بعد اقتصادی طراحی پر فایده باشند. اندرکنش بین شمع و خاک اطراف، یک پروسه کاملاً پیچیده می‌باشد. با افزایش ابعاد شمع-ها در سازه های دریایی، دقت در طراحی بهینه شمع ها از نظر اقتصادی اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. انجام پژوهش‌های تجربی به خصوص در مقیاس بزرگ، امکان افزایش درک عمیق از رفتار پی-های عمیق در برابر بارهای جانبی را میسر می‌سازد. مدل فیزیکی در واقع کوچک شده سازه و توده ژئوتکنیکی واقعی است، که مطالعه آن اطلاعات ارزشمندی در مورد رفتار نمونه واقعی در اختیار ما قرار می‌دهد. در مورد ضرایب اندرکنش شمع-خاک-شمع پژوهش‌های گسترده‌ای به صورت تحلیلی و عددی صورت گرفته است، که انجام یک پژوهش تجربی در این زمینه به جهت فهم بهتر عملکرد واقعی، ضروری به نظر می‌رسد.

۴-۱ روش تحقیق

استفاده از مدل فیزیکی سابقه‌ای طولانی در تحقیقات و همچنین مطالعات مهندسی در پروژه-های مختلف دارد. یک مدل فیزیکی در واقع، کوچک شده‌ی سازه و یا توده واقعی مورد نظر است. اگر مدل فیزیکی بر اساس اصول صحیح طراحی و ساخته شده باشد، رفتار آن بسیار شبیه واقعیت خواهد بود و با مطالعه‌ی مدل فیزیکی می‌توانیم اطلاعات بسیار خوبی از واقعیت بدست آوریم. در این تحقیق

یک مدل فیزیکی از شمع‌های به کار رفته در ساخت سکوه‌های نفتی موجود در خلیج فارس جهت بررسی مقدار ضریب اندرکنش شمع-خاک-شمع و ضریب حضور شمع در سایه، با مقیاس ۱/۱۵ ساخته شد و عملکرد شمع‌ها تحت بارگذاری جانبی دینامیکی با استفاده از ابزار اندازه‌گیری به دقت مورد بررسی قرار گرفت.

همچنین جهت بررسی ضرایب استاتیکی اندرکنش یک مدل در مقیاس کوچک جهت بررسی اندرکنش جانبی شمع-خاک-شمع ساخته شد، و نتایج حاصله با نتایج روابط تحلیلی ارایه شده توسط علی بیگلو مقایسه گردید.

۱-۵ هدف پایان‌نامه

هدف اصلی این پایان‌نامه بررسی رفتار دینامیکی و استاتیکی پی‌های عمیق تحت بارگذاری جانبی توسط مدل‌سازی فیزیکی می‌باشد. از آن‌جا که یکی از روش‌های بررسی رفتار گروه شمع، استفاده از ضرایب اندرکنش و اثر حضور شمع در سایه می‌باشد، در این پایان‌نامه به طور خاص به بررسی ضریب اندرکنش شمع-خاک-شمع در حالت شمع قایم تحت بارهای دینامیکی و استاتیکی با در نظر گرفتن تاثیر حضور شمع دوم و ضریب حضور شمع در سایه در گروه پرداخته شده است.

اهمیت ضریب اندرکنش شمع-خاک-شمع در بررسی عملکرد و یا طراحی گروه شمع پر واضح است. اما اندک بررسی نشان خواهد داد که تمامی پژوهش‌های انجام شده در این زمینه به صورت تحلیلی و یا به صورت عددی صورت گرفته است و اثر اندرکنش شمع-خاک-شمع به صورت مدل فیزیکی بزرگ مقیاس در نظر گرفته نشده است. هدف از انجام این پژوهش بررسی چگونگی عملکرد شمع تحت بارهای جانبی دینامیکی و استاتیکی با حضور و عدم حضور شمع‌های مجاور و همچنین بررسی اثر حضور شمع در سایه تحت بارگذاری دینامیکی می‌باشد.

۱-۶ ساختار فصول

این پایان‌نامه در ۶ فصل تدوین شده است:

این فصل، ضمن تعریف مساله و بیان ابعاد آن، پیرامون اهمیت و لزوم انجام این پژوهش سخن به میان آورده است.

در فصل ۲، به عنوان نخستین گام به جمع‌آوری، معرفی و بررسی نقاط قوت و ضعف احتمالی تعدادی از معتبرترین پژوهش‌های موجود پرداخته می‌شود.

فصل ۳ به بررسی روند پژوهش‌های مدل سازی فیزیکی و کاربرد روابط مقیاس و تحلیل‌های ابعادی در پدیده‌ی اندرکنش شمع-خاک می‌پردازد. در این فصل مشخصات مدل با استفاده از روابط تحلیل ابعادی بر اساس مشخصات شمع مدل اصلی بدست آمد.

در فصل ۴، جزئیات مراحل صورت گرفته جهت انجام آزمایش‌های مدل سازی فیزیکی با استفاده از لرزاننده به منظور ارزیابی اثرات ناشی از اثر اندرکنش شمع-خاک-شمع بر عملکرد پی‌های عمیق تحت بارهای دینامیکی جانبی ارایه خواهد شد. در این فصل آزمایش‌ها با توجه به اهداف در نظر گرفته شده که مهمترین آن‌ها بررسی اثر وجود شمعی بارگذاری نشده بر رفتار دینامیکی شمع بارگذاری شده در فاصله نزدیک از آن می باشد، همچنین با در نظر گرفتن عوامل مختلف از جمله ظرفیت لرزاننده، محدودیت زمانی و مالی، برنامه آزمایشات تهیه و طراحی گردید.

در فصل ۵، نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حین آزمایش‌ها پارامترهای مختلف نظیر شتاب در سر شمع و تنش خمشی ایجاد شده در طول شمع ثبت گردید. بمنظور بررسی نتایج ابتدا پارامترهای ثبت شده در آزمایش‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و سپس با استفاده از داده‌های ثبت شده فرکانس طبیعی سیستم شمع-خاک در حالت‌های مختلف آزمایش بدست آمد و مورد ارزیابی قرار گرفت.

در فصل ۶، جزئیات صورت گرفته در آزمایش‌های آزمایشگاهی صورت گرفته جهت بررسی مقدار ضریب اندرکنش شمع-خاک-شمع تحت بارگذاری استاتیکی ارایه خواهد شد. همچنین روابط بدست آمده از این آزمایش‌ها با مقادیر بدست آمده از روابط تحلیلی معتبر در این زمینه مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

در فصل ۷، یک جمع‌بندی از نتایج بدست آمده در این پژوهش ارایه خواهد گردید. در این فصل پس از مرور اجمالی کارهای انجام شده در فصول قبلی، به بررسی نتایج حاصله و تحلیل آن‌ها، جمع‌بندی و همچنین ارایه پیشنهادهایی جهت ادامه پژوهش در زمینه کار انجام شده در این پایان-نامه پرداخته شده است.

۲ مروری بر ادبیات موضوع

از آنجا که هدف این پایان نامه بررسی رفتار دینامیکی پی‌های عمیق تحت بارگذاری جانبی توسط مدل‌سازی فیزیکی می‌باشد، بنابراین در این فصل به بررسی پیشینه پژوهش‌های آزمایشگاهی و صحرایی صورت گرفته بر روی شمع‌ها پرداخته شده است. همچنین به جهت بررسی چگونگی رفتار شمع‌ها برخی از پژوهش‌ها و روابط معتبر در بررسی تحلیلی و عددی رفتار شمع‌ها تحت بارهای جانبی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲ مدل‌های موجود در تحلیل رفتار پی‌های عمیق در برابر بارهای جانبی

روش‌های مختلفی جهت تحلیل و طراحی شمع تحت بارهای جانبی وجود دارد، که تحلیل توسط روش منحنی $P-Y$ یکی از پرکاربردترین روش‌های از این دست می‌باشد. از دیگر روش‌های معمول در طراحی شمع تحت بارهای جانبی می‌توان موارد زیر را نام برد: [۴]

- روش حالت حدی
- روش عکس العمل بستر
- روش الاستیسیته

• روش اجزاء محدود

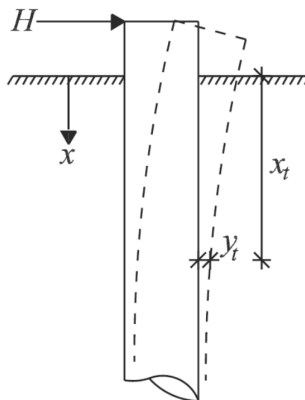
ساده‌ترین روش جهت تخمین مقاومت خاک تحت جابجایی‌های افقی توسط Reese و Matlock در سال‌های ۱۹۵۶ و ۱۹۶۰ ارائه گردید. در این روش مقاومت خاک به صورت وابسته خطی با تغییر مکان شمع فرض شده است. آزمایش‌های در مقیاس کامل رابطه‌ی غیرخطی مقاومت خاک و تغییر مکان شمع را اثبات کرده‌اند. روش عکس العمل بستر ارائه شده توسط Reese و Matlock قادر به محاسبه‌ی مقاومت جانبی نهایی نمی‌باشد. روش منحنی $P-Y$ وابستگی مقاومت خاک و تغییر مکان شمع را غیر خطی فرض کرده که این باعث افزایش دقت در حل می‌گردد. به علاوه مقاومت نهایی جانبی نیز در این روش قابل محاسبه می‌باشد. در هر دو روش منحنی $P-Y$ و عکس العمل بستر، تئوری وینکلر جهت محاسبه‌ی تغییر مکان جانبی شمع و نیروهای داخلی شمع استفاده شده است. با بهره‌گیری از روش وینکلر شمع به صورت یک تیر بر بستر الاستیک در نظر گرفته می‌شود. تیر بر روی تعدادی فنر با سختی‌های متفاوت که از نمودار $P-Y$ بدست می‌آید، قرار گرفته است. مسئله‌ی کلیدی در مباحث اندرکنش خاک-سازه در محاسبه‌ی پارامترهای سختی است. پارامتر سختی شمع E_p و پارامتر سختی خاک E_s شناخته شده و قابل محاسبه هستند، ولیکن پارامتر تلفیقی E_{py} در سطح تماس بین شمع و خاک پارامتری پیچیده و ناشناخته است. تاریخچه‌ی استخراج روش منحنی $P-Y$ در پایین گردآوری شده است: [۴]

در تحلیل پاسخ‌های تیر بر بستر الاستیک؛ خاک توسط یک سری فنرهای مجزای الاستیک توسط وینکلر در سال ۱۸۶۷ مدل گردید. در سال ۱۹۴۶، Heteyi یک راه حل جهت مسئله تیر بر بستر الاستیک ارائه کرد.

Maclelland و Focht در سال ۱۹۵۸ و Reese & Matlock در سال ۱۹۵۶ اصول اولیه‌ی به کارگیری روش منحنی $P-Y$ را ارائه کردند. آزمایش‌هایی در مقیاس کامل در جزیره‌ی Mustang بر خاک‌های ماسه‌ای در سال ۱۹۶۶ صورت گرفت و توسط Cox و همکارانش در سال ۱۹۷۴ منتشر

شد. در سال ۱۹۷۴ یک تعریف شبه تجربی از منحنی P-Y توسط Reese و همکارانش ارائه گردید. این تعریف نقطه‌ی پیشرفتی برای سال‌های آینده به حساب می‌آمد.

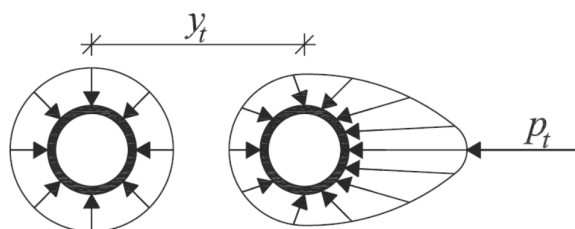
Murchison و O'Neil در سال ۱۹۸۴ به مقایسه‌ی فرمول‌های ارائه شده جهت منحنی P-Y توسط Reese (۱۹۷۴)، با سه تعریف ساده که مبتنی بر نتایج آزمایش‌های جزیره‌ی Mustang بود، پرداختند. آن‌ها موفق به ارائه‌ی یک فرم هیپربولیکی که انطباق بهتری نسبت به روابط Reese داشت، شدند. تحقیقات منجر به ارائه‌ی فرمول‌های منحنی P-Y گردید، به طوریکه در آن‌ها برای خاک‌های مختلف مقاومت خاک، P، وابسته به تغییر مکان شمع، Y، بود، که در طول شمع متغیر در نظر گرفته شده بود. فشار خاک در عمق مشخص x_t ، قبل و حین اعمال تغییر شکل استاتیکی در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است. فشار مقاوم^۱ در جلوی شمع با تغییر شکل شمع در حال افزایش است، در حالیکه فشار فعال^۲ پشت شمع کاهش می‌یابد. (شکل ۲-۲)



شکل ۱-۲: خمش شمع تحت بارگذاری جانبی [۴]

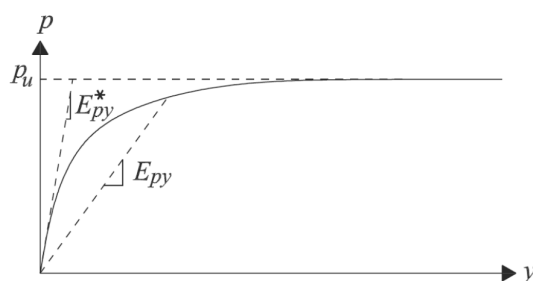
^۱ passive

^۲ Active



شکل ۲-۲: توزیع تنش قبل و هنگام تغییر شکل جانبی در یک شمع با مقطع دایره. P_t نمایشگر نیروی برآیند وارد بر شمع در عمق x_t می‌باشد. [۴]

یک نمونه منحنی P - Y در شکل ۳-۲ نمایش داده شده است. منحنی دارای یک حد بالایی است که مقاومت نهایی خاک، P_u نامیده می‌شود. افقی بودن خط مذکور نمایانگر این نکته است که خاک مورد نظر دارای رفتار پلاستیک کامل است و هیچگونه کاهشی در مقاومت برشی در هنگام افزایش کرنش، رخ نداده است. مدول عکس العمل بستر E_{py} ، در عمق داده شده x ، از مدول سکانتی P/y بدست می‌آید.



شکل ۳-۲: نمونه‌ای از یک منحنی P - Y [۴]

نمی‌توان E_{py} را به عنوان یک پارامتر مشخص خاک معرفی کرد، ولیکن یک پارامتر مناسب جهت شرح اندرکنش شمع-خاک است. E_{py} برای تغییرمکان‌های کوچک در یک عمق ثابت است، ولیکن با افزایش تغییرمکان، کاهش می‌یابد. (شکل ۴-۲)