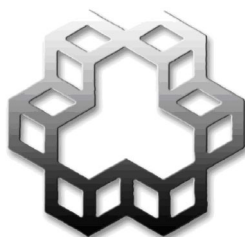


به نام خدا



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده عمران

گرایش ژئوتکنیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدل سازی گروه شمع در سکوه های دریایی

استاد راهنما: دکتر حسن قاسم زاده

دانشجو: مهرناز علی بیکلو

شماره دانشجویی: ۸۶۱۷۲۳۴

اردیبهشت ۸۹

تقدیم به پدرم که بی‌نیازیم آموخت

به مادرم که به من درس محبت داد و

به همسرم که سرشار از زندگی‌م نمود

راهنمایی‌های بی دریغ استاد گرامی جناب آقای دکتر حسن قاسم‌زاده را
در انجام این تحقیق ارج می‌نهم و از ایشان سپاسگزارم.

فهرست مطالب

فصل ۱) پیش‌گفتار.....	۱
۱-۱) مقدمه.....	۲
۱-۱-۱) پی عمیق یا شمع.....	۲
۲-۱) بیان مساله.....	۳
۳-۱) هدف پایان‌نامه.....	۳
۴-۱) اهمیت مساله.....	۴
۵-۱) ساختار فصول.....	۴
فصل ۲) مروری بر ادبیات موضوع.....	۵
۱-۲) مقدمه.....	۷
۲-۲) اندرکنش شمع - خاک - شمع تحت بار قائم استاتیکی.....	۷
۱-۲-۲) روش راندولف و روث.....	۷
۲-۲-۲) روش لی.....	۸
۳-۲-۲) روش جزتاس و میلانوکیس.....	۸
۳-۲) اندرکنش شمع - خاک - شمع تحت بار قائم دینامیکی.....	۱۰
۱-۳-۲) روش دس.....	۱۰
۲-۳-۲) روش شتا و نواک.....	۱۱
۳-۳-۲) روش کی‌نیا و کازل.....	۱۲
۴-۳-۲) روش قدیمی و قضاوی.....	۱۳
۴-۲) اندرکنش شمع - خاک - شمع تحت بار جانبی استاتیکی.....	۱۳
۱-۴-۲) روش پیوسته.....	۱۳
۲-۴-۲) مدل اندرکنش وینکلر.....	۱۴
۳-۴-۲) روش بار واحد انتقالی اصلاح شده.....	۱۴
۴-۴-۲) مدل سختی تجربی.....	۱۴
۵-۴-۲) روش ضریب کاهش گروه.....	۱۵
۶-۴-۲) مدل هیبرید.....	۱۵
۵-۲) رفتار دینامیکی گروه شمع تحت بار جانبی.....	۱۶
۱-۵-۲) روش اجزا محدود.....	۱۶
۲-۵-۲) روش پیوسته.....	۱۷
۳-۵-۲) روش پارامتر متمرکز.....	۱۷

۱۷	۲-۵-۴۱) روش تحلیلی.....
۲۰	۲-۶) شمع‌های مایل.....
۲۰	۲-۶-۱) تحقیقات تجربی.....
۲۳	۲-۶-۲) تحقیقات نظری و مدل‌سازی عددی.....
۲۵	۲-۶-۳) تحلیل گروه‌های شمع همراه با شمع مایل.....
۲۶	۲-۶-۳-۱) تحلیل رفتار شمع در محیط پیوسته.....
۲۶	۲-۶-۳-۱-۱) تحلیل شمع مایل تک.....
۳۰	۲-۷) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۵۷	فصل ۳) اندرکنش استاتیکی شمع - خاک - شمع.....
۳۳	۳-۱) مقدمه.....
۳۳	۳-۲) تعریف مساله.....
۳۳	۳-۳) مدل‌سازی مساله.....
۳۴	۳-۴) محاسبه نشست شمع مایل.....
۳۶	۳-۴-۱) نشست محوری شمع مایل.....
۳۸	۳-۴-۲) نشست جانبی شمع مایل.....
۴۴	۳-۵) محاسبه اندرکنش محوری شمع - خاک - شمع.....
۴۵	۳-۵-۱) نشست محوری شمع مرجع.....
۴۵	۳-۵-۲) کاهش تغییر مکان خاک با دور شدن از شمع مرجع.....
۴۶	۳-۵-۳) نشست محوری شمع دریافت‌کننده.....
۵۴	۳-۵-۴) تغییر مکان جانبی شمع دریافت‌کننده ناشی از تغییر مکان محوری شمع مرجع.....
۶۲	۳-۵-۵) مقایسه‌ی ضریب اندرکنش محوری - محوری و جانبی - محوری.....
۶۳	۳-۶) محاسبه اندرکنش جانبی شمع - خاک - شمع.....
۶۳	۳-۶-۱) نشست جانبی شمع مرجع.....
۶۳	۳-۶-۲) کاهش تغییر مکان خاک با دور شدن از شمع مرجع.....
۶۴	۳-۶-۳) نشست جانبی شمع دریافت‌کننده.....
۷۸	۳-۶-۴) نشست محوری شمع دریافت‌کننده ناشی از نشست جانبی شمع مرجع.....
۸۲	۳-۶-۵) مقایسه‌ی ضریب اندرکنش جانبی - جانبی و محوری - جانبی.....
۸۳	۳-۷) مقایسه ضرایب اندرکنش در حالت کلی.....
۸۵	۳-۸) خلاصه، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۸۶	فصل ۴) اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع.....
۸۷	۴-۱) مقدمه.....

۲-۴	تعریف مساله	۸۷
۳-۴	فرضیات در روش جدید اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع	۸۸
۴-۴	تیر بر روی بستر دینامیکی وینکلر (BDWF) (مدل مورد استفاده در این پژوهش)	۸۹
۵-۴	مدل‌سازی مساله	۹۰
۶-۴	محاسبه اندرکنش محوری شمع - خاک - شمع	۹۳
۶-۴-۱	نشست محوری شمع مرجع	۹۳
۶-۴-۲	کاهش تغییرمکان خاک با دور شدن از شمع مرجع	۹۵
۶-۴-۳	نشست محوری شمع دریافت‌کننده	۹۶
۶-۴-۴	تغییرمکان جانبی شمع دریافت‌کننده ناشی از تغییرمکان محوری شمع مرجع	۱۱۰
۶-۴-۵	مقایسه‌ی ضریب اندرکنش محوری-محوری و جانبی-محوری در حالت دینامیکی	۱۱۷
۷-۴	محاسبه اندرکنش جانبی شمع - خاک - شمع	۱۱۸
۷-۴-۱	نشست جانبی شمع مرجع	۱۱۸
۷-۴-۲	کاهش تغییرمکان خاک با دور شدن از شمع مرجع	۱۲۰
۷-۴-۳	نشست جانبی شمع دریافت‌کننده	۱۲۵
۷-۴-۴	نشست محوری شمع دریافت‌کننده ناشی از نشست جانبی شمع مرجع	۱۳۹
۷-۴-۵	مقایسه‌ی ضریب اندرکنش جانبی - جانبی و محوری - جانبی در حالت دینامیکی	۱۴۶
۸-۴	مقایسه ضرایب اندرکنش در حالت کلی	۱۴۶
۹-۴	خلاصه، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	۱۴۸
۵	فصل ۵) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	۱۴۹
۱-۵	خلاصه کارهای انجام شده	۱۵۰
۲-۵	خلاصه نتایج پژوهش حاضر	۱۵۰
۳-۵	پیشنهادهای برای ادامه کار	۱۵۲

منابع و مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ تاثیر فاصله شمع‌ها و نسبت سختی شمع - خاک بر ضریب اندرکنش [۲]..... ۸
- شکل ۲-۲ مقایسه ضریب اندرکنش به‌ازای مقادیر مختلف E_p / E_s در دو روش پولوس و دیویس و جزئاس و میلانوکیس [۳]..... ۱۰
- ($L/d = 25, \nu_s = 0.5$)..... ۱۰
- شکل ۳-۲ منحنی اندرکنش برای تغییرمکان قائم شمع دوم در اثر نیروی قائم دینامیکی شمع اول [۷]..... ۱۲
- شکل ۴-۲ سکوی دریایی همراه با گروه شمع مایل..... ۲۰
- شکل ۵-۲ تفاوت شمع‌های مایل مثبت و منفی [۴۵]..... ۲۱
- شکل ۶-۲ تحلیل شمع مایل تحت اثر بار محوری [۴]..... ۲۷
- شکل ۷-۲ تحلیل شمع مایل تحت اثر بار نرمال [۴]..... ۲۷
- شکل ۸-۲ فاصله معادل برای شمع‌های مایل [۴]..... ۲۹
- شکل ۱-۳ انتقال نیروهای وارد بر شمع مایل از سیستم مختصات اصلی (xyz) به سیستم مختصات محلی ($x'y'z'$)..... ۳۵
- شکل ۲-۳ استفاده از مدل وینکلر برای تحلیل شمع و پاسخ خاک..... ۳۶
- شکل ۳-۳ استفاده از فیر وینکلر جهت مدل‌سازی شمع مایل در راستای محوری..... ۳۶
- شکل ۴-۳ نمودار بار - نشست محوری شمع مایل ($\psi = 30^\circ, \nu_s = 0.5, E_p / E_s = 1000, L/D = 25$)..... ۳۸
- شکل ۵-۳ المانی از شمع دریافت کننده به طول dz' تحت بارگذاری نرمال استاتیکی..... ۳۸
- شکل ۶-۳ انواع شمع‌ها در برابر بار جانبی..... ۳۹
- شکل ۷-۳ المان‌بندی مورد استفاده برای تحلیل عددی شمع مایل [۶۰]..... ۴۱
- شکل ۸-۳ نمودار به‌دست آمده از مدل عددی و نمودار روش تحلیلی ارائه شده برای شمع مایل منفی..... ۴۲
- شکل ۹-۳ نمودار به‌دست آمده از مدل عددی و نمودار روش تحلیلی ارائه شده برای شمع قائم..... ۴۲
- شکل ۱۰-۳ نمودار به‌دست آمده از مدل عددی و نمودار روش تحلیلی ارائه شده برای شمع مایل مثبت..... ۴۳
- شکل ۱۱-۳ مقایسه تغییرمکان جانبی شمع مایل مثبت و منفی و شمع قائم $\psi = 0, \pm 30^\circ$ ۴۳
- شکل ۱۲-۳ کانتور تغییرمکان جانبی انواع شمع تحت اثر بارهای جانبی بر اساس تحلیل عددی [۶۰]..... ۴۴
- شکل ۱۳-۳ نشست خاک به فاصله S و در راستای محوری شمع مرجع..... ۴۵
- شکل ۱۴-۳ المان در نظر گرفته شده جهت محاسبه جابه‌جایی محوری شمع دریافت کننده..... ۴۶
- شکل ۱۵-۳ مقایسه ضریب اندرکنش محوری - محوری بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج پولوس و دیویس در حالت شمع قائم..... ۴۹
- ($\nu_s = 0.5, E_p / E_s = 1000, \psi_1 = \psi_2 = 0$)..... ۴۹
- شکل ۱۶-۳ مقایسه ضریب اندرکنش محوری - محوری بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج پولوس و دیویس در حالت شمع مایل..... ۵۰
- ($S/D = 3, \nu_s = 0.5, E_p / E_s = 1000, \psi_1 = \psi_2$)..... ۵۰
- شکل ۱۷-۳ تغییرات ضریب اندرکنش محوری و استاتیکی شمع مایل نسبت به فاصله بین دو شمع برای مقادیر مختلف ψ ۵۱
- ($E_p / E_s = 1000, \nu_s = 0.5, L/D = 25$)..... ۵۱
- شکل ۱۸-۳ تغییرات ضریب اندرکنش محوری و استاتیکی شمع مایل نسبت به فاصله بین دو شمع برای مقادیر مختلف E_p / E_s ۵۱
- ($\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ, \nu_s = 0.5, L/D = 25$)..... ۵۱
- شکل ۱۹-۳ تغییرات ضریب اندرکنش محوری و استاتیکی شمع مایل نسبت به فاصله بین دو شمع برای مقادیر مختلف L/D ۵۲
- ($\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ, \nu_s = 0.5, E_p / E_s = 1000$)..... ۵۲
- شکل ۲۰-۳ تغییرات ضریب اندرکنش محوری شمع مایل در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف ψ ۵۳
- ($E_p / E_s = 1000, \nu_s = 0.5, S/D = 3$)..... ۵۳

شکل ۳-۲۱ تغییرات ضریب اندرکنش محوری شمع مایل در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف L/D ($S/D=3$)	۵۴
شکل ۳-۲۲ القاء جابجایی از جانب خاک به شمع دریافت کننده به دلیل بارگذاری شمع مرجع در حالت استاتیکی	۵۵
شکل ۳-۲۳ المانی از شمع دریافت کننده به طول dz' تحت تغییر مکان جانبی ناشی از بارگذاری محوری شمع مرجع	۵۵
شکل ۳-۲۴ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری شمع مایل نسبت به فاصله بین دو شمع برای مقادیر مختلف ψ	۵۸
شکل ۳-۲۵ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری شمع مایل نسبت به فاصله بین دو شمع برای مقادیر مختلف E_p/E_s	۵۸
شکل ۳-۲۶ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری شمع مایل نسبت به فاصله بین دو شمع برای مقادیر مختلف L/D	۵۹
شکل ۳-۲۷ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری شمع مایل در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف ψ ($S/D=3$)	۶۰
شکل ۳-۲۸ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری شمع مایل در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف L/D ($S/D=3$)	۶۱
شکل ۳-۲۹ مقایسه‌ای بین ضرایب اندرکنش در حالت بارگذاری محوری برای مقادیر مختلف زاویه میل شمع برای مقادیر مختلف S/D	۶۲
شکل ۳-۳۰ فاصله مرکز به مرکز دو شمع S و زاویه انحراف θ تحت بار استاتیکی	۶۴
شکل ۳-۳۱ نشست جانبی خاک به فاصله S از شمع مرجع	۶۴
شکل ۳-۳۲ القاء جابجایی از جانب خاک به شمع دریافت کننده به دلیل بارگذاری جانبی شمع مرجع در حالت استاتیکی	۶۵
شکل ۳-۳۳ المانی از شمع دریافت کننده به طول dz' تحت تغییر مکان جانبی ناشی از بارگذاری جانبی شمع مرجع	۶۵
شکل ۳-۳۴ مقایسه ضریب اندرکنش جانبی - جانبی بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج روان شناس در حالت شمع قائم	۶۷
شکل ۳-۳۵ مقایسه ضریب اندرکنش جانبی - جانبی بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج پولوس و دیویس در حالت شمع قائم	۶۸
شکل ۳-۳۶ مقایسه ضریب اندرکنش جانبی - جانبی بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج پولوس و دیویس در حالت شمع مایل	۶۹
شکل ۳-۳۷ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی و استاتیکی شمع مایل نسبت به فاصله بین دو شمع برای مقادیر مختلف ψ	۷۰
شکل ۳-۳۸ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی و استاتیکی شمع مایل نسبت به زاویه میل دو شمع برای مقادیر مختلف S/D	۷۱
شکل ۳-۳۹ حالت‌های مختلف قرارگیری شمع مرجع و دریافت کننده (الف) شمع مرجع قائم و شمع دریافت کننده مایل (ب) شمع مرجع مایل و شمع دریافت کننده قائم	۷۱
شکل ۳-۴۰ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی و استاتیکی شمع مایل نسبت به زاویه میل دو شمع برای حالت شکل ۳-۳۹-الف	۷۲
شکل ۳-۴۱ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی و استاتیکی شمع مایل نسبت به زاویه میل دو شمع برای حالت شکل ۳-۳۹-ب	۷۲
شکل ۳-۴۲ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی و استاتیکی شمع مایل نسبت به فاصله بین دو شمع برای مقادیر مختلف E_p/E_s	۷۴
شکل ۳-۴۳ نحوه تغییرات δ با نسبت سختی نسبی شمع و خاک E_p/E_s	۷۴

شکل ۳-۴۴ تغییرات تغییرمکان جانبی شمع مرجع و دریافت‌کننده در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف ψ ($L/D = 20$)	۷۵
شکل ۳-۴۵ تغییرات تغییرمکان جانبی شمع مرجع و دریافت‌کننده در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف L/D ($S/D = 3$)	۷۶
شکل ۳-۴۶ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - جانبی شمع مایل در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف ψ و L/D	۷۷
شکل ۳-۴۷ المانی از شمع دریافت‌کننده به طول dz' تحت تغییرمکان محوری ناشی از بارگذاری جانبی شمع مرجع	۷۸
شکل ۳-۴۸ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - جانبی شمع مایل نسبت به فاصله بین دو شمع برای مقادیر مختلف ψ ($L/D = 25$)	۸۰
شکل ۳-۴۹ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - جانبی شمع مایل نسبت به فاصله بین دو شمع برای مقادیر مختلف E_p/E_s	۸۰
شکل ۳-۵۰ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - جانبی شمع مایل نسبت به فاصله بین دو شمع برای مقادیر مختلف L/D	۸۱
شکل ۳-۵۱ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - جانبی شمع مایل در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف ψ ($S/D = 3$)	۸۲
شکل ۳-۵۲ مقایسه‌ای بین ضرایب اندرکنش در حالت بارگذاری جانبی برای مقادیر مختلف زاویه میل شمع ($L/D = 25$)	۸۳
شکل ۳-۵۳ مقایسه بین ضرایب اندرکنش نسبت به زاویه میل شمع برای مقادیر مختلف S/D	۸۴
شکل ۳-۵۴ مقایسه بین ضرایب اندرکنش نسبت به زاویه میل شمع برای مقادیر مختلف L/D ($S/D = 25$)	۸۴
شکل ۴-۱ انتقال نیروهای وارد بر شمع مایل از سیستم مختصات اصلی (XYZ) به سیستم مختصات محلی ($x'y'z'$)	۹۱
شکل ۴-۲ استفاده از مدل پیوسته برای شمع و فنر و میراگر وینکلر برای اندرکنش شمع و خاک	۹۳
شکل ۴-۳ نشست خاک به فاصله S و در راستای محوری شمع مرجع	۹۵
شکل ۴-۴ امان در نظر گرفته شده جهت محاسبه جابجایی محوری شمع دریافت‌کننده	۹۶
شکل ۴-۵ مقایسه ضریب اندرکنش دینامیکی محوری - محوری بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج کی‌نیا و کازل در حالت شمع قائم و $S/D = 2$	۱۰۰
شکل ۴-۶ مقایسه ضریب اندرکنش دینامیکی محوری - محوری بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج کی‌نیا و کازل در حالت شمع قائم و $S/D = 5$	۱۰۱
شکل ۴-۷ مقایسه ضریب اندرکنش دینامیکی محوری - محوری بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج کی‌نیا و کازل در حالت شمع قائم و $S/D = 10$	۱۰۲
شکل ۴-۸ مقایسه ضریب اندرکنش دینامیکی محوری - محوری بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج قدیمی در حالت شمع قائم و $S/D = 2$	۱۰۳
شکل ۴-۹ مقایسه ضریب اندرکنش دینامیکی محوری - محوری بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج قدیمی در حالت شمع قائم و $S/D = 5$	۱۰۴
شکل ۴-۱۰ مقایسه ضریب اندرکنش دینامیکی محوری - محوری بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج قدیمی در حالت شمع قائم و $S/D = 10$	۱۰۵
شکل ۴-۱۱ تغییرات ضریب اندرکنش دینامیکی و محوری شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ψ	۱۰۶
شکل ۴-۱۲ تغییرات ضریب اندرکنش دینامیکی و محوری شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف S/D	۱۰۷

شکل ۴-۱۳ تغییرات ضریب اندرکنش دینامیکی و محوری شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف سختی نسبی شمع و خاک E_p / E_s	۱۰۸
شکل ۴-۱۴ تغییرات ضریب اندرکنش محوری و دینامیکی شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ضریب لاغری (L/D)	۱۰۹
شکل ۴-۱۵ المانی از شمع دریافت‌کننده به طول dz' تحت تغییرمکان جانبی ناشی از بارگذاری محوری شمع مرجع.....	۱۱۰
شکل ۴-۱۶ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری در حالت دینامیکی شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ψ	۱۱۳
شکل ۴-۱۷ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری در حالت دینامیکی برای شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف S/D	۱۱۴
شکل ۴-۱۸ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری در حالت دینامیکی برای شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف سختی نسبی شمع و خاک E_p / E_s	۱۱۵
شکل ۴-۱۹ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری در حالت دینامیکی برای شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ضریب لاغری (L/D)	۱۱۶
شکل ۴-۲۰ مقایسه‌ای بین ضرایب اندرکنش دینامیکی در حالت بارگذاری محوری برای مقادیر مختلف زاویه میل شمع.....	۱۱۷
شکل ۴-۲۱ المانی از شمع مرجع به طول dz' تحت بارگذاری جانبی دینامیکی.....	۱۱۸
شکل ۴-۲۲ مدل پیشنهادی توسط دبری و جزتاس (۱۹۸۶) [۶۶].....	۱۲۰
شکل ۴-۲۳ فاصله مرکز به مرکز دو شمع S و زاویه انحراف θ (تحت بار دینامیکی).....	۱۲۰
شکل ۴-۲۴ مقادیر $\phi(r, 0)$ تابع کاهنده بر حسب تغییرات a_0 و S/D	۱۲۲
شکل ۴-۲۵ مقادیر $\phi(r, \pi/2)$ تابع کاهنده بر حسب تغییرات a_0 و S/D	۱۲۴
شکل ۴-۲۶ نشست جانبی خاک به فاصله s از شمع مرجع.....	۱۲۵
شکل ۴-۲۷ المانی از شمع دریافت‌کننده به طول dz' تحت تغییرمکان جانبی ناشی از بارگذاری جانبی شمع مرجع.....	۱۲۶
شکل ۴-۲۸ مقایسه ضریب اندرکنش دینامیکی جانبی - جانبی بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج کی‌نیا و کازل در حالت شمع قائم و $\theta = 0, S/D = 2$	۱۲۸
شکل ۴-۲۹ مقایسه ضریب اندرکنش دینامیکی جانبی - جانبی بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج کی‌نیا و کازل در حالت شمع قائم و $\theta = 0, S/D = 5$	۱۲۹
شکل ۴-۳۰ مقایسه ضریب اندرکنش دینامیکی جانبی - جانبی بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج کی‌نیا و کازل در حالت شمع قائم و $\theta = 0, S/D = 10$	۱۳۰
شکل ۴-۳۱ مقایسه ضریب اندرکنش دینامیکی جانبی - جانبی بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج کی‌نیا و کازل در حالت شمع قائم و $\theta = 90^\circ, S/D = 2$	۱۳۱
شکل ۴-۳۲ مقایسه ضریب اندرکنش دینامیکی جانبی - جانبی بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج کی‌نیا و کازل در حالت شمع قائم و $\theta = 90^\circ, S/D = 5$	۱۳۲
شکل ۴-۳۳ مقایسه ضریب اندرکنش دینامیکی جانبی - جانبی بین روش تحلیلی ارائه شده با نتایج کی‌نیا و کازل در حالت شمع قائم و $\theta = 90^\circ, S/D = 10$	۱۳۳
شکل ۴-۳۴ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - جانبی در حالت دینامیکی شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ψ	۱۳۵
شکل ۴-۳۵ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - جانبی در حالت دینامیکی برای شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف.....	۱۳۶
شکل ۴-۳۶ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - جانبی در حالت دینامیکی برای شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف سختی نسبی شمع و خاک E_p / E_s	۱۳۷

شکل ۳۷-۴ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - جانبی در حالت دینامیکی برای شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ضریب لاغری (L/D).....	۱۳۸
شکل ۳۸-۴ المانی از شمع دریافت‌کننده به طول dz' تحت تغییر مکان محوری ناشی از بارگذاری جانبی شمع مرجع در حالت دینامیکی.....	۱۳۹
شکل ۳۹-۴ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - جانبی در حالت دینامیکی شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ψ	۱۴۲
شکل ۴۰-۴ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - جانبی در حالت دینامیکی برای شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف S/D	۱۴۳
شکل ۴۱-۴ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - جانبی در حالت دینامیکی برای شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف سختی نسبی شمع و خاک E_p/E_s	۱۴۴
شکل ۴۲-۴ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - جانبی در حالت دینامیکی برای شمع مایل نسبت به فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ضریب لاغری (L/D).....	۱۴۵
شکل ۴۳-۴ مقایسه‌ای بین ضرایب اندرکنش دینامیکی در حالت بارگذاری جانبی برای مقادیر مختلف زاویه میل شمع.....	۱۴۶
شکل ۴۴-۴ مقایسه بین ضرایب اندرکنش نسبت به زاویه میل شمع برای مقادیر مختلف S/D	۱۴۷

فصل ۱) پیش‌گفتار

۱-۱) مقدمه

پی به مجموعه بخش‌هایی از سازه و خاک تکیه‌گاه که کار انتقال بارهای سازه به تکیه‌گاه و یا به اعماق زمین را انجام می‌دهند گفته می‌شود. پی‌های مورد استفاده در ساختمان‌ها و دیگر ابنیه فنی را می‌توان از جهات مختلف طبقه‌بندی نمود. به‌عنوان مثال از نظر مصالح تشکیل‌دهنده و از نظر عمق قرارگیری می‌توان پی‌ها را طبقه‌بندی نمود. اگر طول و عرض پی به ترتیب با L و B و عمق پی (کم‌ترین فاصله کف پی از سطح زمین) با D نشان داده شود، بنا به قرارداد برای پی‌های سطحی نسبت D/B همواره کمتر از ۴، برای پی‌های نیمه عمیق بین ۴ و ۱۰ و برای پی‌های عمیق بیش‌تر از ۱۰ می‌باشد.

۱-۱-۱) پی عمیق یا شمع

شمع‌ها اعضای سازه‌ای از جنس چوب، بتن یا فولاد می‌باشند که به منظور انتقال بارهای سطحی به اعماق زمین به دو صورت قائم و مایل مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از شمع‌های مایل اغلب در مواردی که نیروهای جانبی وارده زیاد باشند، توصیه می‌شود. مخارج احداث شمع‌ها خیلی بیش‌تر از پی‌های سطحی می‌باشد. علی‌رغم مخارج بیش‌تر، در عمل موارد متعددی وجود دارد که برای ایمنی سازه در مقابل نشست و عوامل دیگر، از شمع‌ها استفاده می‌شود. بعضی از شرایطی که ممکن است استفاده از شمع توجیه‌پذیر باشد، عبارتند از:

- وقتی که لایه یا لایه‌های فوقانی خاک دارای قابلیت فشرده‌گی زیاد و یا خیلی ضعیف باشند، به‌طوری‌که نتوان از پی سطحی برای انتقال بار استفاده نمود، شمع‌ها برای انتقال بار به لایه‌های تحتانی محکم‌تر و یا سنگ بستر مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- اگر شمع‌ها تحت تاثیر نیروی افقی قرار گیرند، در این صورت مقاومت خمشی شمع برای انتقال بار به‌کار گرفته می‌شود. این وضعیت اغلب در شالوده‌های حائل خاک که وظیفه آن‌ها مقاومت در مقابل فشار جانبی خاک است و یا سازه‌های بلند که تحت تاثیر نیروهای باد یا زلزله قرار دارند پیش می‌آید.
- در خیلی از موارد در منطقه مورد نظر برای احداث سازه، خاک قابل تورم و یا فروریزی (رمبنده) وجود دارد. این لایه ممکن است دارای عمق قابل توجهی باشند. خاک‌های قابل تورم در اثر افزایش یا کاهش میزان رطوبت، تورم و یا کاهش حجم پیدا می‌کنند. فشار تورم چنین خاک‌هایی ممکن است به طرز قابل توجهی زیاد باشد. اگر در چنین خاک‌هایی از پی سطحی استفاده شود، سازه ممکن است با صدمات جدی روبرو شود. در این حالت استفاده از شمع‌هایی که از لایه قابل تورم عبور کرده و وارد لایه پایدار شوند مفید می‌باشد.
- شالوده بعضی سازه‌ها نظیر خطوط انتقال برق، اسکله‌ها و شالوده‌های گسترده در زیر آب زیرزمینی تحت تاثیر نیروی برکنش قرار دارند، در برخی موارد برای مقابله با نیروی برکنش از شمع استفاده می‌شود.
- به خاطر وجود مسئله آب‌شستگی و فرسایش در محل پایه‌های پل، این پایه‌ها اغلب بر روی شالوده‌های شمعی احداث می‌شوند.

- در بسیاری از موارد به منظور کاهش دامنه حرکت ماشین آلات لرزنده و چرخشی و کنترل فرکانس طبیعی سیستم پی - خاک - ماشین از شمع استفاده می‌شود.

۱-۲) بیان مساله

شمع‌ها معمولاً به صورت گروهی به کار می‌روند. از جمله مواردی که استفاده از گروه شمع اجتناب ناپذیر است، سکوه‌های دریایی می‌باشد. مدل‌سازی گروه شمع در سکوه‌های دریایی به دلیل این که این سازه‌ها، سازه‌های حساس و پرهزینه‌ای می‌باشد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شمع سکوه‌های دریایی به جهت مقابله با نیروهای جانبی معمولاً به صورت مایل کار گذاشته می‌شوند. جهت مدل‌سازی گروه شمع، تعیین اندرکنش شمع - خاک - شمع به دلیل نزدیک بودن فاصله شمع‌ها در گروه حائز اهمیت است. یکی از فراسنج‌های در نظر گرفتن اندرکنش شمع - خاک - شمع استفاده از ضریب اندرکنش می‌باشد.

ضریب اندرکنش شمع - خاک - شمع، عبارت است از نسبت نشست شمع بدون بار در اثر بارگذاری شمع مجاور به نشست شمع بارگذاری شده. محاسبه ضریب اندرکنش شمع - خاک - شمع در بررسی عملکرد و طراحی گروه شمع از اهمیت انکارناپذیری برخوردار است و حتی می‌توان آن را مهم‌ترین عامل مورد نیاز جهت طراحی و یا تحلیل عملکرد گروه شمع دانست که علی‌رغم اهمیت آن در بسیاری از موارد به دلیل حجم زیاد عملیات و پیچیدگی مباحث مرتبط، از منظور نمودن آن در مطالعات مربوط به گروه شمع صرف‌نظر شده است. در این پژوهش سعی شده است نحوه محاسبه و تحلیل این ضریب با بهره‌گیری از روش‌های ساده‌تر از آنچه تاکنون انجام شده، و در عین حال با دقت قابل قبول جهت استفاده از تحلیل‌ها و طراحی‌ها ارائه شود و ضریب اندرکنش شمع - خاک - شمع در حالات استاتیکی و دینامیکی در گروه شمع با حضور شمع مایل محاسبه شود.

۱-۳) هدف پایان‌نامه

هدف اصلی این پایان‌نامه مدل‌سازی گروه شمع در سکوه‌های دریایی می‌باشد. از آن جا که یکی از روش‌های بررسی رفتار گروه شمع، استفاده از ضرایب اندرکنش می‌باشد و همچنین در سکوه‌های دریایی جهت مقابله با نیروهای جانبی، غالباً استفاده از شمع‌های مایل اجتناب ناپذیر است، در این پایان‌نامه به طور خاص به تعیین ضریب اندرکنش شمع - خاک - شمع در حالت شمع مایل تحت بار محوری و جانبی استاتیکی و دینامیکی با در نظر گرفتن تاثیر حضور شمع دوم و به صورت تحلیلی پرداخته شده است. نتایج حاصل از این آنالیز با سایر روش‌های موجود نیز مقایسه شده است.

همان‌گونه که پیش‌تر تشریح شد، اهمیت ضریب اندرکنش شمع - خاک - شمع در بررسی عملکرد و یا طراحی گروه شمع پر واضح است. اما اندک بررسی نشان خواهد داد که اکثر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه هر چند دارای دقت قابل قبول هستند، اما به سبب پیچیدگی و حجم زیاد محاسبات، در بسیاری از محاسبات مربوط به ضریب اندرکنش شمع - خاک - شمع از پاره‌ای فرضیات ساده‌کننده (علی‌الخصوص در محاسبات مربوط به ضریب اندرکنش در حالت بارگذاری دینامیکی) استفاده شده

است. همچنین بیش‌تر روش‌های ارائه شده جهت محاسبه ضریب اندرکنش در حالت شمع قائم می‌باشد و حضور شمع مایل در نظر گرفته نشده است. هدف از انجام این پژوهش ارائه روشی ساده، دارای اعتبار قابل قبول و در عین حال دارای کم‌ترین میزان فرضیات ساده‌کننده، به منظور نزدیک‌تر شدن هرچه بیش‌تر به واقعیت موضوع جهت محاسبه ضریب اندرکنش شمع - خاک - شمع در گروه شمع با در نظر گرفتن حضور شمع مایل در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی می‌باشد.

۱-۴) اهمیت مساله

اهمیت این مساله در این است که 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 می‌سازد. البته لحاظ نمودن این ضریب در صورت ارائه روشی ساده و در عین حال قابل اعتماد بسیار راحت‌تر و معمول‌تر خواهد بود. به نظر می‌رسد که این موضوع کمک شایانی به تحلیل و طراحی گروه شمع در صنعت عمران نماید.

۱-۵) ساختار فصول

این پایان‌نامه در قالب پنج فصل طرح‌ریزی و تدوین شده است که در ادامه علاوه بر ذکر عناوین این فصول به محتوا و شرح فعالیت‌های انجام شده در هر فصل به‌طور خلاصه اشاره شده است:
در فصل ۱، ضمن تعریف مساله و بیان ابعاد آن، پیرامون اهمیت و لزوم انجام این پژوهش سخن به میان می‌آید.

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 اندرکنش استاتیکی شمع - خاک - شمع با حضور شمع مایل تحت اثر بار محوری و جانبی می‌پردازد. در این فصل با استفاده از مدل پیوسته و فنر استاتیکی وینکلر، معادلات دیفرانسیل تعادل نیروی شمع بدون بار در مجاورت شمع مشابه دیگری تحت بارگذاری محوری و جانبی استاتیکی به‌دست می‌آید. پس از حل این معادلات ضرایب اندرکنش استاتیکی شمع - خاک - شمع در حالت شمع مایل محاسبه شده و با نتایج پژوهش‌های قبلی مقایسه شده است.

فصل ۴ به اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع با حضور شمع مایل تحت اثر بار محوری و جانبی می‌پردازد. در این فصل با استفاده از مدل پیوسته و فنر - میراگر دینامیکی وینکلر، معادلات دیفرانسیل تعادل نیروی شمع بدون بار در مجاورت شمع مشابه دیگری تحت بارگذاری محوری و جانبی دینامیکی به‌دست می‌آید. پس از حل این معادلات ضرایب اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع در حالت شمع مایل محاسبه شده و نتایج حاصل با نتایج پژوهش‌های قبلی نیز مقایسه شده است.

در فصل ۵، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد. در این فصل پس از مرور اجمالی کارهای انجام شده در فصول قبلی، به بررسی نتایج حاصله و تحلیل آن‌ها، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری و همچنین ارائه پیشنهادهایی جهت ادامه پژوهش در زمینه کار انجام شده در این پایان‌نامه پرداخته شده است.

فصل ۲) مروری بر ادبیات موضوع

۲-۱) مقدمه

همان‌طور که اشاره شد هدف اصلی این پایان‌نامه مدل‌سازی گروه شمع در سکوهای دریایی می‌باشد. از آن‌جا که در سکوهای دریایی جهت مقابله با نیروهای جانبی اغلب از شمع‌های مایل استفاده می‌شود، جهت بررسی رفتار گروه شمع از ضرایب اندرکنش استاتیکی و دینامیکی برای گروه شمع با حضور شمع مایل و در نظر گرفتن تاثیر حضور شمع دوم استفاده می‌شود. بر اساس جستجوهای به عمل آمده توسط نگارنده، روشی تحلیلی جهت محاسبه ضریب اندرکنش برای گروه شمع دارای شمع مایل یافت نشده است. بر همین اساس در این بخش به مرور پژوهش‌های انجام شده جهت محاسبه ضریب اندرکنش گروه شمع قائم در حالت استاتیکی و دینامیکی پرداخته شده است. همچنین به برخی روش‌های عددی و تجربی جهت آنالیز گروه شمع مایل نیز اشاره شده است.

۲-۲) اندرکنش شمع - خاک - شمع تحت بار قائم استاتیکی

طبق تعریف ضریب اندرکنش استاتیکی تحت بار قائم، نسبت نشست شمع بدون بار در اثر بارگذاری شمع مجاور به نشست شمع بارگذاری شده می‌باشد. در این بخش چند روش برای محاسبه ضریب اندرکنش استاتیکی برای شمع قائم تحت بار محوری به عنوان نمونه آورده شده است.

۲-۲-۱) روش راندولف و روث^۱

این روش نشست گروه شمع را بدون نیاز به انجام دادن آنالیزهای سخت با دقت مناسبی محاسبه می‌کند. این روش بر پایه اصل رویهم‌گذاری بنا شده و یکی از محدودیت‌های آن این است که عمق مدفون تمامی شمع‌ها باید برابر باشد و ضریب پواسون ثابت فرض شده است [۱]. در این روش نسبت بار - نشست برای تنه شمع و نوک شمع محاسبه شده است و با استفاده از اصل رویهم‌گذاری با یکدیگر جمع می‌شوند. بنابراین برای محاسبه ضریب اندرکنش بین دو شمع می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۱]:

$$\left(\frac{G_L r_0 w_t}{P_t} \right)_2 = (1 + \alpha) \left(\frac{G_L r_0 w_t}{P_t} \right)_1 \quad (1-2)$$

که در رابطه فوق P_t مجموع نیروی تنه شمع و نوک شمع می‌باشد. w_t مجموع تغییر مکان تنه شمع و نوک شمع می‌باشد. α ضریب اندرکنش استاتیکی بین دو شمع و r_0 شعاع سطح مقطع شمع می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با وجود سادگی و سهولت استفاده از این روش، اما تاثیر حضور شمع دوم در نظر گرفته نشده است و اضافه نشست به دلیل بارگذاری شمع مجاور با نشست خاک به دلیل بارگذاری شمع مجاور، یکسان فرض شده است.

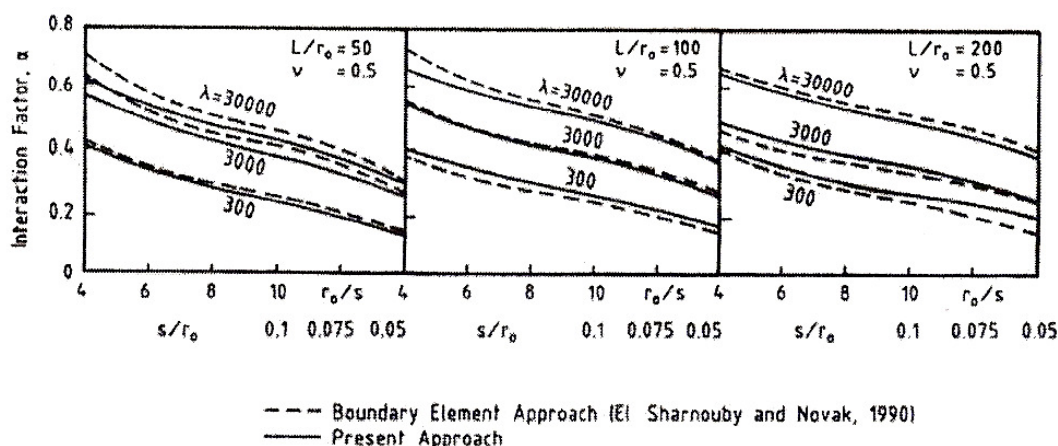
¹ - Randolph & Wroth

۲-۲-۲ روش لی^۱

ضریب اندرکنش طبق تعریف روش لی برابر است با [۲]:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{G_L r_0 w_i}{P_i} \right)_2}{\left(\frac{G_L r_0 w_i}{P_i} \right)_1} - 1 \quad (2-2)$$

شکل ۱-۲ تاثیر نسبت $\frac{L}{r_0}$ ، نسبت قابلیت فشردگی شمع $\frac{E_p}{G}$ و فاصله شمع‌ها را بر روی ضریب اندرکنش نشان می‌دهد. در این روش نیز مانند روش قبل اثر شمع دوم لحاظ نشده است.



شکل ۱-۲ تاثیر فاصله شمع‌ها و نسبت سختی شمع - خاک بر ضریب اندرکنش [۲]

۲-۲-۳ روش جزتاس و میلانوکیس^۲

در این روش شیوه جدیدی برای محاسبه اندرکنش شمع - خاک - شمع بیان می‌شود. در این روش، تاکید می‌شود که شمع از تغییر شکل خاک اطراف که در نتیجه بارگذاری شمع‌های مجاور ایجاد شده به‌طور کامل پیروی نمی‌کند. تابع زیر نسبت تغییر مکان در فاصله s و ارتفاع z به تغییر مکان در فاصله r_0 در همان ارتفاع را نشان می‌دهد [۳].

¹ -Lee

² -Gazetas & Mylanokis

$$\varphi(s) = \frac{w_s(s, z)}{w_s(r_0, z)} = \begin{cases} \frac{\ln\left(\frac{r_m}{s}\right)}{\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)} & r_0 \leq s < r_m \\ 0 & s \geq r_m \end{cases} \quad (۳-۲)$$

چنانچه ملاحظه می شود این تابع مستقل از z می باشد. اگر شمع از تغییر مکان خاک اطراف که به خاطر بارگذاری شمع مجاور ایجاد شده به طور کلی پیروی کند، تابع بالا همان ضریب اندرکنش خواهد بود. اما صلبیت محوری شمع و عکس العمل خاک در نوک شمع باعث می شود که نشست شمع مجاور از مقدار محاسبه شده در رابطه (۳-۲) عموماً کمتر شود.

در این روش یک شمع بارگذاری شده به نام شمع مرجع^۱ و یک شمع مشابه ولی بدون بار به نام شمع دریافت کننده^۲ فرض شده است. نشست شمع مرجع به صورت زیر محاسبه می شود:

$$w_{11}(z) = A_{11}e^{\Lambda z} + B_{11}e^{-\Lambda z} \quad (۴-۲)$$

$$\Lambda = \sqrt{\left(\frac{\delta G_s}{E_p \cdot A_p}\right)} \quad (۵-۲)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{r_m}{r_o}\right)}, \quad r_m = 2.5L(1-\nu_s) \quad (۶-۲)$$

که $w_{11}(z)$ نشست شمع مرجع، A_p سطح مقطع شمع، E_p مدول الاستیسیته شمع، G مدول برشی خاک و ν_s ضریب پواسون خاک می باشد.

و A_{11} و B_{11} ثابت های انتگرال گیری هستند که با استفاده از شرایط مرزی شمع مرجع به دست می آیند [۳].

$$w_{21}(z) = \frac{\Lambda}{2} \varphi(s) z (-A_{11}e^{\Lambda z} + B_{11}e^{-\Lambda z}) + (A_{21}e^{\Lambda z} + B_{21}e^{-\Lambda z}) \quad (۷-۲)$$

که $w_{21}(z)$ نشست شمع دریافت کننده و A_{21} و B_{21} ثابت های جدید انتگرال گیری هستند که با استفاده از شرایط مرزی شمع دریافت کننده به دست می آیند.

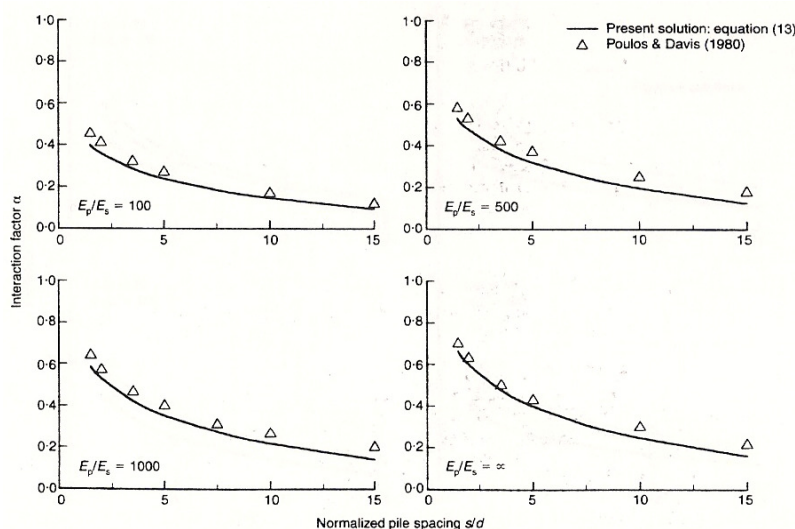
با استفاده از روابط (۴-۲) و (۷-۲) می توان ضریب اندرکنش را محاسبه کرد:

$$\alpha = \frac{w_{21}(z=0)}{w_{11}(z=0)} \quad (۸-۲)$$

^۱ - Source Pile

^۲ - Receiver Pile

در شکل ۲-۲ مقادیر ضریب اندرکنش محاسبه شده در دو روش پولوس و دیویس^۱ [۴] و جزتاس و میلانوکیس [۳] با هم مقایسه شده‌اند. مقادیر ضریب اندرکنش محاسبه شده در روش جزتاس و میلانوکیس کوچک‌تر از مقادیر به‌دست آمده در روش پولوس و دیویس می‌باشد، که این اختلاف ناشی از لحاظ نمودن تاثیر حضور شمع دوم در روش جزتاس و میلانوکیس می‌باشد.



شکل ۲-۲ مقایسه ضریب اندرکنش به‌ازای مقادیر مختلف E_p / E_s در دو روش پولوس و دیویس و جزتاس و میلانوکیس [۳] ($L/d = 25, \nu_s = 0.5$)

۳-۲) اندرکنش شمع - خاک - شمع تحت بار قائم دینامیکی

در اکثر موارد از شمع‌ها به‌صورت گروهی استفاده می‌شود. چنان‌چه فاصله بین شمع‌ها زیاد باشد، توابع سختی گروه شمع از جمع توابع سختی هر شمع به تنهایی حاصل می‌شود، اما در اکثر موارد فاصله شمع‌ها زیاد نمی‌باشد و در این حالت بررسی رفتار گروه شمع بسیار پیچیده‌تر می‌شود. به‌دلیل این‌که نشست یک شمع بر نشست سایر شمع‌ها تاثیر می‌گذارد و تحت شرایط دینامیکی پراکندگی موج میان شمع‌ها اتفاق می‌افتد. در ذیل به بیان چندین روش برای محاسبه اندرکنش شمع - خاک - شمع تحت بار قائم در حالت دینامیکی پرداخته شده است.

۲-۳-۱) روش دس^۲

همان‌طور که گفته شد شمع‌ها به‌صورت گروهی به‌کار می‌روند. و به‌علت اندرکنش میان شمع‌ها و خاک، تغییر مکان گروه شمع بیش‌تر از $\frac{1}{2}$ برابر (تعداد شمع‌های گروه) تغییر مکان تک شمع می‌باشد و هم‌چنین سختی و میرایی گروه شمع از $\frac{1}{2}$ برابر (تعداد شمع‌های گروه) سختی و میرایی تک شمع

^۱ -Poulos & Davis

^۲ -Das

کمتر می‌شود. رابطه سختی و میرایی گروه شمع با سختی و میرایی شمع منفرد به صورت زیر است [۵]:

$$K_{z(g)} = \frac{\sum_{r=1}^n K_{z(s)}}{\sum_{r=1}^n \alpha_r} \quad (۸-۲)$$

$$C_{z(g)} = \frac{\sum_{r=1}^n C_{z(s)}}{\sum_{r=1}^n \alpha_r} \quad (۹-۲)$$

که در آن $K_{z(g)}$ و $C_{z(g)}$ به ترتیب سختی و میرایی گروه شمع، $K_{z(s)}$ و $C_{z(s)}$ به ترتیب سختی و میرایی شمع منفرد و α_r ضریب اندرکنش می‌باشند. ضریب اندرکنش α_r در روابط بالا، بیان گر سهم شمع r ام در تغییر مکان شمع مرجع می‌باشد.

در این روش برای محاسبه α_r از ضرایب استاتیکی پولوس [۴] استفاده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، در این روش تاثیر حضور شمع دوم و همچنین فرکانس بارگذاری در ضریب اندرکنش لحاظ نشده است.

۲-۳-۲ روش شتا و نواک^۱

همان طور که توضیح داده شد برای اندرکنش شمع - خاک - شمع در حالت استاتیکی از نسبت بار - نشست استفاده می‌شود، اما برای اندرکنش شمع - خاک - شمع در حالت دینامیکی استفاده از نسبت بار - نشست به خصوص در گروه‌های بیش تر از دوتایی مناسب نمی‌باشد. در این روش برای بیان اندرکنش دینامیکی از تعریف دیگری تحت عنوان راندمان گروه شمع استفاده شده است. راندمان گروه شمع (GER)^۲ برابر با نسبت سختی گروه شمع بر مجموع سختی شمع‌های گروه می‌باشد.

به دلیل این که سختی گروه شمع در حالت دینامیکی شامل یک قسمت حقیقی مربوط به سختی و یک قسمت موهومی مربوط به میرایی می‌باشد، می‌توان راندمان گروه شمع را نیز در دو قسمت مجزا بیان کرد [۶]:

$$GER = \frac{K_G}{\sum K_s} \quad (۱۰-۲)$$

^۱ -Sheta & Novak

^۲ -Group Efficiency Ratio

$$GER = \frac{C_G}{\sum C_s} \quad (۱۱-۲)$$

که در آن C_G و K_G به ترتیب سختی و میرایی گروه شمع و C_s و K_s به ترتیب سختی و میرایی هر تک شمع در گروه می باشد.

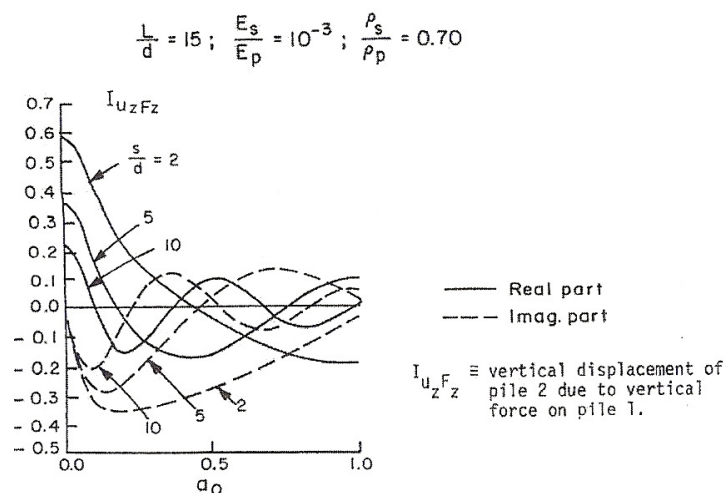
۲-۳-۳ روش کی نیا و کازل^۱

در این روش ضریب اندرکنش دینامیکی برای دو شمع برابر با نسبت تغییرمکان دینامیکی شمع دوم بر تغییرمکان استاتیکی شمع اول به صورت منفرد می باشد. تغییرمکان دینامیکی شمع دوم در شرایطی است که شمع دوم بدون بار و شمع اول تحت بار واحد هارمونیک باشد [۷].

$$I_{U_z F_z} = \frac{(w_{21})_d}{(w_{11})_s} \quad (۱۲-۲)$$

که در آن $(w_{21})_d$ تغییرمکان دینامیکی شمع دوم، $(w_{11})_s$ تغییرمکان استاتیکی شمع اول به صورت منفرد و $I_{U_z F_z}$ ضریب اندرکنش تحت بار قائم دینامیکی می باشد.

در این روش نسبت تغییرمکان شمع اول با حضور شمع دوم در شرایطی که شمع اول بارگذاری شده و شمع دوم بدون بار باشد، به تغییرمکان شمع اول به صورت منفرد برابر با واحد فرض شده است. در صورتی که به دلیل سختی محوری شمع دوم و اندرکنش آن با خاک این نسبت برابر با واحد نمی باشد. شکل ۳-۲ منحنی اندرکنش قائم دینامیکی را بر اساس مقادیر مختلف s/d و a_0 نشان می دهد. به دلیل این که تغییرمکان شمع در حالت دینامیکی دارای دو قسمت حقیقی و موهومی می باشد، ضریب اندرکنش نیز به صورت مختلط می باشد.



شکل ۳-۲ منحنی اندرکنش برای تغییرمکان قائم شمع دوم در اثر نیروی قائم دینامیکی شمع اول [۷]

^۱ -Kaynia & Kausel

۲-۳-۴) روش قدیمی و قضاوی

قدیمی در سال ۱۳۸۵ با درنظر گرفتن تاثیر حضور شمع دوم به محاسبه ضریب اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع تحت بار قائم، و به دست آوردن رابطه‌ای جهت محاسبه این ضریب برای شمع‌های اصطکاکی در خاک‌های یک لایه و متعاقب آن بسط این رابطه در خاک‌های لایه‌ای پرداخته است [۸]. در این تحقیق با استفاده از مدل پیوسته، معادله دیفرانسیل شمع بدون بار نوشته شده و پس از حل این معادله و اعمال شرایط مرزی، نشست سر شمع بدون بار حاصل می‌شود که از نسبت این نشست به نشست شمع مرجع، ضریب اندرکنش محاسبه شده و سپس این ضریب برای شمع‌های اتکایی نیز با تغییر شرایط مرزی معادله به دست آمده، محاسبه شده است.

همچنین برای گروه‌های چندتایی شمع (بیش از دو شمع) با استفاده از ضریب اندرکنش به دست آمده، سختی گروه شمع نیز حاصل شده است. در ادامه ضریب اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع، با استفاده از روش ساده قطعه به قطعه در خاک‌های لایه‌ای نیز تعمیم داده شده است.

۲-۴) اندرکنش شمع - خاک - شمع تحت بار جانبی استاتیکی

روش‌هایی که به اندرکنش استاتیکی شمع - خاک - شمع تحت بار جانبی در غالب گروهی می‌پردازند، شامل موارد زیر خواهند بود [۹]:

- ۱- روش‌های پیوسته^۱
- ۲- مدل اندرکنش وینکله^۲
- ۳- روش بار واحد انتقالی اصلاح شده^۳
- ۴- مدل سختی تجربی^۴
- ۵- روش ضرائب کاهش گروهی^۵
- ۶- مدل هیبرید^۶

۲-۴-۱) روش پیوسته

روش پیوسته شامل دست‌یافته‌های پولوس در سال ۱۹۷۱ می‌باشد که با استفاده از معادلات میندلین^۷ و به صورت سه بعدی و الاستیک به حل تنش‌ها و جابجایی‌های ناشی از بارهای گره‌ای افقی در نیم فضای الاستیک پرداخته است [۱۱، ۱۰]. روش پولوس فرض کرده که خاک الاستیک بوده و اثرات یک شمع بر روی دیگر شمع‌ها در گروه، با استفاده از ضرائب موثر که بر پایه تئوری الاستیک خطی

¹ - Continuum Methods

² - Winkler Interaction Model

³ - Modified Unit Load Transfer Method

⁴ - Empirical Stiffness Model

⁵ - Group Reduction Factor Method

⁶ - Hybrid Model

⁷ - Mindlin

محاسبه می‌شود، صورت می‌گیرد. عیب اساسی روش استفاده شده در این است که تعیین مقادیر مناسب مدول الاستیسیته خاک لازم است.

۲-۴-۲) مدل اندرکنش وینکلر

نوگامی و پالسون^۱ در سال ۱۹۸۵ [۱۲] و هریهاران و کوماراسامی^۲ در سال ۱۹۸۲ [۱۳] از یک شبکه فنر به جای شمع‌ها در گروه و خاک بین آن‌ها استفاده کردند و این روش تنها اندرکنش شمع - خاک - شمع را در جهت افقی نشان می‌دهد. روش‌های تحلیلی گوناگونی برای مدل کردن پاسخ گروه شمع ارائه شده است. به‌طوری‌که قبلاً بسیاری از آیین‌نامه‌ها از یک سری فنرهایی که بر اساس تئوری میندلین می‌باشند، استفاده می‌کردند که توزیع بارهای یکسان برای تمامی ردیف‌های موجود در یک گروه را نشان می‌داد که با نتایج تئوری توزیع غیر یکسان بار در گروه^۳ در تضاد بود و نیاز به اصلاح آن به شدت احساس می‌شد [۱۴].

۲-۴-۳) روش بار واحد انتقالی اصلاح شده

بوگارد و متلاک^۴ در سال ۱۹۸۳ [۱۵] تحلیل شمع تحت بار جانبی را با روش بار واحد انتقالی اصلاح شده ارائه کردند که شامل منحنی‌های $P-Y$ تکمیل شده برای گروه شمع همانند تک شمع بوده است. شمع تکی اصلاح شده، به‌طوری‌که قطر آن‌ها برابر عرض گروه شمع می‌باشد به جای گروه شمع و خاک بین آن‌ها قرار می‌گرفت. این روش که روش مناسبی برای گروه شمع دایره‌ای مدفون در رس نرم می‌باشد، فرض کرده که مقاومت جانبی به‌طور یکسان در تمام شمع‌های گروه تقسیم خواهد شد.

۲-۴-۴) مدل سختی تجربی

دونوانت و اونیل^۵ در سال ۱۹۸۶ [۱۶] مدل سختی تجربی را ارائه نمودند. این روش، روش معتبری برای تخمین توزیع بار در میان شمع‌ها در گروه می‌باشد. زیرا این روش توانایی اثر دادن پدیده توزیع غیر یکسان بار در گروه (اثری که بر طبق آن، شمع‌های ردیف جلو، بارهای بیش‌تری را نسبت به شمع‌های ردیف عقب تحمل می‌کنند) را دارد. در این روش نیاز به انتخاب مناسب مدول الاستیک خاک می‌باشد.

^۱ - Nogami & Paulson

^۲ - Hariharan & Kumarasamy

^۳ - Shadowing

^۴ - Bogard & Matlock

^۵ - Dunnavant & O'Neill