



گرایش ژئوتکنیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

شبیه سازی عددی گروه شمع های مایل و تعیین اندرکنش بین شمع ها

استاد راهنما: دکتر حسن قاسم زاده

دانشجو: محسن ترزبان

شماره دانشجویی: ۸۹۰۰۲۱۴

بهمن ۱۳۹۱

چکیده:

امروزه استفاده از شمع جهت انتقال بار سازه، به خاک مناسب در اعماق پایین تر روبه افزایش 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. شمع‌ها غالباً به صورت گروهی به کار می‌روند و معمولاً در گروه شمع به منظور مقابله با نیروهای جانبی، از شمع‌های مایل استفاده می‌شود. در گروه شمع، فاصله بین شمع‌ها کم بوده و شمع‌ها در محدوده تاثیر یکدیگر قرار گرفته و اندرکنش بین شمع‌ها وجود دارد. چگونگی عملکرد شمع‌ها تحت بارهای 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 مسایل مدل سازی شمع‌ها می‌باشد. در تحقیقات انجام شده در زمینه اندرکنش شمع- خاک - شمع، باتوجه به محدودیت روش‌های استفاده شده، وجود فرضیات ساده‌کننده ناگزیر بوده است، بنابراین برای درک صحیح و واقعی از رفتار اندرکنش شمع- خاک- شمع نیاز است تا با روشی قدرتمند از فرضیات ساده‌کننده بکاهیم. تحقیق حاضر به روش عددی اجزاء محدود انجام گرفته است. در این تحقیق به منظور تعیین ضرایب اندرکنش شمع- خاک- شمع، گروه شمع مایل دوتایی و اصطکاکی، تحت اثر بارگذاری استاتیکی و دینامیکی جانبی و محوری به طور جداگانه تحلیل می‌شوند. خاک به صورت محیط پیوسته و با مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهركلومب در نظر گرفته شده و شمع‌ها از جنس بتن و با مدل رفتاری الاستیک فرض شده‌اند.

در این تحقیق پس از بررسی ابعاد مناسب محیط مدل و تعیین نحوه درست المان‌بندی، با مدل‌سازی شمع‌های مایل در کنار یکدیگر و اعمال بار به سر شمع، به بررسی مقادیر نشست در سر شمع‌ها و در طول آنها پرداخته شد. در این بررسی، اثر زاویه تمایل و نسبت لاغری شمع‌ها، تاثیر فاصله مرکز به مرکز سر شمع‌ها، اثر نسبت سختی شمع به خاک، تاثیر ایجاد جدایش و لغزش بین شمع و خاک و تاثیر پلاستیک‌شدن خاک بر روی ضرایب اندرکنش، محاسبه شده و در قالب نمودار ارائه شده است. در حالت بارگذاری دینامیکی، با اعمال میرایی مادی، طبق فرمول رایلی و اعمال میرایی تشعشعی با در نظر گرفتن المان نامحدود در اطراف مدل و بارگذاری هارمونیکی سینوسی با فرکانس‌های مختلف به صورت تاریخچه تنش به سر شمع، سعی شد تا اثر فرکانس بارگذاری را نیز بر روی ضرایب اندرکنش بررسی کنیم. برای صحت‌سنجی جوابها، بین نتایج بدست‌آمده از مدل‌سازی عددی و نتایج حاصل از روابط تحلیلی مقایسه صورت گرفته است.

فهرست مطالب

۲	چکیده:
أ	فهرست مطالب
ج	فهرست شکل ها
۱	فصل (۱) پیش گفتار
۲	(۱-۱) مقدمه
۳	(۲-۱) بیان مساله
۳	(۳-۱) هدف پایان نامه
۴	(۴-۱) ساختار پایان نامه
۵	فصل (۲) مروری بر ادبیات موضوع
۶	(۱-۲) مقدمه
۶	(۲-۲) روش های تحلیلی
۶	(۱-۲-۲) اندرکنش استاتیکی شمع - خاک - شمع
۶	(۱-۲-۲-۱) روش راندولف و روٹ
۷	(۲-۲-۲-۱) روش پولوس و دیویس
۷	(۲-۲-۲-۲) روش روان شناس و قضاوی
۸	(۲-۲-۲-۳) روش قاسم زاده و علی بیک لو
۱۴	(۲-۲-۲) اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع
۱۴	(۱-۲-۲-۲) روش شتا و نواک
۱۵	(۲-۲-۲-۲) روش کی نیا و کازل
۱۵	(۳-۲-۲-۲) روش قدیمی و قضاوی
۱۵	(۴-۲-۲-۲) روش روان شناس و قضاوی
۱۶	(۳-۲) تحقیقات تجربی
۱۹	(۴-۲) پژوهش های عددی
۲۶	(۵-۲) تحلیل گروه های شمع همراه با شمع مایل
۲۷	(۱-۱-۵-۲) تحلیل شمع مایل تک
۲۹	(۲-۱-۵-۲) شمع مایل تحت اثر بار افقی و قائم
۲۹	(۳-۱-۵-۲) نشست شمع اصطکاکی
۳۰	(۴-۱-۵-۲) تحلیل گروه های شمع
۳۲	(۶-۲) جمع بندی و نتیجه گیری
۳۳	فصل (۳) معرفی نرم افزار و مراحل مدل سازی
۳۴	(۱-۳) مقدمه
۳۴	(۲-۳) انتخاب نرم افزار
۳۵	(۳-۳) معرفی نرم افزار ABAQUS
۳۵	(۱-۳-۳) الگوریتم حل مسائل با نرم افزار ABAQUS
۳۷	(۲-۳-۳) روش حل اجزاء محدود
۳۷	(۴-۳) مراحل مدل سازی عددی
۳۷	(۱-۴-۳) مدل سازی شمع و خاک
۳۷	(۲-۴-۳) مدل رفتاری مورد استفاده
۳۸	(۳-۴-۳) سطح تماس شمع و خاک
۳۸	(۴-۴-۳) میرایی
۴۰	(۵-۴-۳) شرایط تکیه گاهی
۴۱	(۶-۴-۳) مرزهای مدل
۴۱	(۷-۴-۳) تقارن
۴۲	(۸-۴-۳) اعمال تنش های اولیه

۴۲	 ۳-۴-۹) مراحل تحلیل
۴۲	 ۳-۴-۱۰) المان بندی و اندازه المانها
۴۳	 ۳-۴-۱۱) بارگذاری
۴۴	 فصل ۴) اندرکنش استاتیکی شمع - خاک - شمع
۴۵	 ۴-۱) مقدمه
۴۵	 ۴-۲) تعریف مساله
۴۶	 ۴-۳) مدل سازی شمع و خاک با سطح تماس کاملاً چسبیده به یکدیگر
۴۷	 ۴-۳-۱) صحت سنجی نشست تک شمع
۴۸	 ۴-۳-۲) ضرایب اندرکنش در حالت شمع قائم
۴۹	 ۴-۳-۳) نتایج تحلیل های پارامتریک در حالت بارگذاری محوری
۵۰	 ۴-۳-۳-۱) تاثیر زاویه تمایل شمع
۵۱	 ۴-۳-۳-۲) اثر نسبت لاغری شمع ها
۵۲	 ۴-۳-۳-۳) تاثیر سختی نسبی شمع و خاک
۵۴	 ۴-۳-۳-۴) تغییرات ضرایب اندرکنش در طول شمع
۵۶	 ۴-۳-۴) نتایج تحلیل های پارامتریک در حالت بارگذاری جانبی
۵۷	 ۴-۳-۴-۱) تاثیر زاویه تمایل شمع ها
۶۰	 ۴-۳-۴-۲) اثر نسبت لاغری شمع ها
۶۱	 ۴-۳-۴-۳) تاثیر سختی نسبی شمع و خاک
۶۲	 ۴-۳-۴-۴) تغییرات ضرایب اندرکنش در طول شمع
۶۴	 ۴-۴) مدل سازی شمع و خاک با سطح تماس اصطکاکی
۶۵	 ۴-۴-۱) نتایج تحلیل پارامتریک در حالت بارگذاری محوری
۶۵	 ۴-۴-۱-۱) تاثیر زاویه تمایل شمع
۶۶	 ۴-۴-۱-۲) اثر نسبت لاغری شمع ها
۶۹	 ۴-۴-۲) نتایج تحلیل پارامتریک در حالت بارگذاری جانبی
۶۹	 ۴-۴-۲-۱) تاثیر زاویه تمایل شمع
۷۱	 ۴-۴-۲-۲) اثر نسبت لاغری شمعها
۷۴	 ۴-۵) جمع بندی و نتیجه گیری
۷۵	 فصل ۵) اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع
۷۶	 ۵-۱) مقدمه
۷۶	 ۵-۲) تعریف مساله
۷۶	 ۵-۳) مراحل مدل سازی
۷۷	 ۵-۴) نتایج تحلیل های پارامتریک در حالت بارگذاری محوری
۷۷	 ۵-۴-۱) تاثیر زاویه تمایل شمع
۷۹	 ۵-۴-۲) اثر نسبت لاغری شمع ها
۸۰	 ۵-۴-۳) تاثیر سختی نسبی شمع و خاک
۸۱	 ۵-۴-۴) اثر نسبت فاصله به قطر شمع
۸۲	 ۵-۵) نتایج تحلیل های پارامتریک در حالت بارگذاری جانبی
۸۲	 ۵-۵-۱) تاثیر زاویه تمایل شمع ها
۸۴	 ۵-۵-۲) اثر نسبت لاغری شمع ها
۸۵	 ۵-۵-۳) تاثیر سختی نسبی شمع و خاک
۸۷	 ۵-۵-۴) اثر نسبت فاصله به قطر شمع
۸۸	 ۵-۶) جمع بندی و نتیجه گیری
۸۹	 فصل ۶) جمع بندی و ارایه پیشنهادات
۹۰	 ۶-۱) خلاصه نتایج پژوهش حاضر
۹۲	 ۶-۳) پیشنهادات برای ادامه کار
۹۳	 منابع و مراجع:

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ استفاده از مدل وینکلر برای تحلیل شمع و پاسخ خاک [۸] ۸
- شکل ۲-۲ القاء جابجایی از جانب خاک به شمع دریافت کننده به دلیل بارگذاری شمع مرجع ۱۰
- شکل ۳-۲ القاء تغییر مکان جانبی (عمود بر شمع مرجع) و نشست محوری (در راستای شمع مرجع) به شمع دریافت کننده در اثر بارگذاری محوری شمع مرجع ۱۳
- شکل ۴-۲ القاء نشست محوری (در راستای شمع مرجع) و تغییر مکان جانبی (عمود بر شمع مرجع) به شمع دریافت کننده در اثر بارگذاری جانبی شمع مرجع ۱۴
- شکل ۵-۲ تفاوت شمع‌های مایل مثبت و منفی [۱۸] ۱۷
- شکل ۶-۲ تحلیل شمع مایل تحت اثر بار محوری [۵] ۲۸
- شکل ۷-۲ تحلیل شمع مایل تحت اثر بار نرمال [۵] ۲۸
- شکل ۸-۲ فاصله معادل برای شمع‌های مایل [۵] ۳۱
- شکل ۱-۳ مراحل تحلیل در نرم‌افزار ABAQUS ۳۶
- شکل ۲-۳ شبکه المان نیمه بینهایت در اطراف مدل، جهت انجام آنالیز دینامیکی (نصف محیط شبیه سازی شده است) ۴۰
- شکل ۳-۳ نمودار تغییرات ضریب اندرکنش محوری-محوری بر حسب افزایش ابعاد مدل ۴۱
- شکل ۴-۳ شبکه المان‌های مورد استفاده برای تحلیل گروه شمع مایل (نصف محیط شبیه سازی شده است) ۴۳
- شکل ۵-۳ کانتورهای نشست در اثر بارگذاری محوری شمع مرجع ۴۳
- شکل ۱-۴ نمودار بار-نشست محوری جهت صحت سنجی ۴۷
- شکل ۲-۴ نمودار بار-تغییر مکان جانبی جهت صحت سنجی ۴۸
- شکل ۳-۴ مقایسه ضریب اندرکنش محوری-محوری بین روش عددی ارایه شده با نتایج پولوس و دیویس [۵] و علی بیک لو [۸] در حالت شمع قائم ($L/D=25$, $\nu_s=0.5$, $E_p/E_s=1000$, $\psi_1=\psi_2=0$) ۴۹
- شکل ۴-۴ مقایسه ضریب اندرکنش جانبی-جانبی بین روش عددی ارایه شده با نتایج پولوس و دیویس [۵] و علی بیک لو [۸] در حالت شمع قائم ($L/D=25$, $\nu_s=0.5$, $E_p/E_s=1000$, $\psi_1=\psi_2=0$) ۴۹
- شکل ۵-۴ تغییرات ضریب اندرکنش محوری-محوری بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s=1000$, $\nu_s=0.5$, $L/D=25$) ۵۰
- شکل ۶-۴ تغییرات ضریب اندرکنش محوری-جانبی بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s=1000$, $\nu_s=0.5$, $L/D=25$) ۵۱
- شکل ۷-۴ تغییرات ضریب اندرکنش محوری-محوری بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D ($\psi_1=\psi_2=30^\circ$, $\nu_s=0.5$, $E_p/E_s=1000$) ۵۲
- شکل ۸-۴ تغییرات ضریب اندرکنش محوری-جانبی بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D ($\psi_1=\psi_2=30^\circ$, $\nu_s=0.5$, $E_p/E_s=1000$) ۵۲
- شکل ۹-۴ تغییرات ضریب اندرکنش محوری-محوری بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف E_p/E_s ($\psi_1=\psi_2=30^\circ$, $\nu_s=0.5$, $L/D=25$) ۵۳
- شکل ۱۰-۴ تغییرات ضریب اندرکنش محوری-جانبی بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف E_p/E_s ($\psi_1=\psi_2=30^\circ$, $\nu_s=0.5$, $L/D=25$) ۵۳

- شکل ۴-۱۱ تغییرات ضریب اندرکنش محوری-محوری در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s=1000$ ، $v_s=0.5$ ، $S/D=3$) ۵۵
- شکل ۴-۱۲ تغییرات ضریب اندرکنش محوری-جانبی در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s=1000$ ، $v_s=0.5$ ، $S/D=3$) ۵۶
- شکل ۴-۱۳ تفاوت نشست محوری شمع مثبت و منفی ۵۷
- شکل ۴-۱۴ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی-جانبی برحسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s=1000$ ، $v_s=0.5$ ، $L/D=25$) ۵۸
- شکل ۴-۱۵ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی-محوری برحسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s=1000$ ، $v_s=0.5$ ، $L/D=25$) ۵۸
- شکل ۴-۱۶ حالت‌های مختلف قرارگیری شمع مرجع و دریافت‌کننده (الف) شمع مرجع قائم و شمع دریافت‌کننده مایل (ب) شمع مرجع مایل و شمع دریافت‌کننده قائم ۵۹
- شکل ۴-۱۷ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی-جانبی شمع مایل نسبت به زاویه میل دو شمع برای حالت‌های شکل ۴-۱۵ ($S/D=3$ ، $E_p/E_s=1000$ ، $v_s=0.5$ ، $L/D=25$) ۵۹
- شکل ۴-۱۸ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی-جانبی برحسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D ($\psi_1=\psi_2=30^\circ$ ، $v_s=0.5$ ، $E_p/E_s=1000$) ۶۱
- شکل ۴-۱۹ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی-محوری برحسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D ($\psi_1=\psi_2=30^\circ$ ، $v_s=0.5$ ، $E_p/E_s=1000$) ۶۱
- شکل ۴-۲۰ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی-جانبی برحسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف E_p/E_s ($\psi_1=\psi_2=30^\circ$ ، $v_s=0.5$ ، $L/D=25$) ۶۱
- شکل ۴-۲۱ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی-محوری برحسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف E_p/E_s ($\psi_1=\psi_2=30^\circ$ ، $v_s=0.5$ ، $L/D=25$) ۶۱
- شکل ۴-۲۲ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی-جانبی در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s=1000$ ، $v_s=0.5$ ، $S/D=3$) ۶۳
- شکل ۴-۲۳ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی-محوری در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s=1000$ ، $v_s=0.5$ ، $S/D=3$) ۶۳
- شکل ۴-۲۴ نمودار بار-نشست محوری جهت صحت‌سنجی در حالت سطح تماس اصطکاکی ۶۴
- شکل ۴-۲۵ نمودار بار-تغییر مکان جانبی جهت صحت‌سنجی در حالت سطح تماس اصطکاکی ۶۵
- شکل ۴-۲۶ تغییرات ضریب اندرکنش محوری-محوری برحسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ در دو حالت سطح تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($v_s=0.5$ ، $L/D=25$) ۶۶
- شکل ۴-۲۷ تغییرات ضریب اندرکنش محوری-جانبی برحسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ در دو حالت سطح تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($v_s=0.5$ ، $L/D=25$) ۶۶
- شکل ۴-۲۸ تغییرات ضریب اندرکنش محوری-محوری برحسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D در دو حالت سطح تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($v_s=0.5$ ، $E_p/E_s=1000$) ۶۷
- شکل ۴-۲۹ تغییرات ضریب اندرکنش محوری-جانبی برحسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D در دو حالت سطح تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($v_s=0.5$ ، $E_p/E_s=1000$) ۶۸
- شکل ۴-۳۰ تغییرات ضریب اندرکنش محوری-محوری برحسب افزایش بار محوری برای مقادیر مختلف L/D در حالت سطح تماس اصطکاکی ($\psi_1=\psi_2=30^\circ$ ، $v_s=0.5$ ، $E_p/E_s=1000$) ۶۸
- شکل ۴-۳۱ تغییرات ضریب اندرکنش محوری-جانبی برحسب افزایش بار محوری برای مقادیر مختلف L/D در حالت سطح تماس اصطکاکی ($\psi_1=\psi_2=30^\circ$ ، $v_s=0.5$ ، $E_p/E_s=1000$) ۶۹

شکل ۴-۳۲ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- جانبی برحسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ در دو حالت تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($v_s = 0.5$, $L/D = 25$) $(E_p/E_s = 1000)$

شکل ۴-۳۳ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- محوری برحسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ در دو حالت تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($v_s = 0.5$, $L/D = 25$) $(E_p/E_s = 1000)$

شکل ۴-۳۴ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- جانبی برحسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D در دو حالت تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($v_s = 0.5$, $E_p/E_s = 1000$) $(\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ)$

شکل ۴-۳۵ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- محوری برحسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D در دو حالت تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($v_s = 0.5$, $E_p/E_s = 1000$) $(\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ)$

شکل ۴-۳۶ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- جانبی برحسب افزایش بار محوری برای مقادیر مختلف L/D در دو حالت تماس اصطکاکی بدون امکان جدایش و همراه با جدایش ($E_p/E_s = 1000$) $(\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ, v_s = 0.5)$

شکل ۴-۳۷ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- محوری برحسب افزایش بار محوری برای مقادیر مختلف L/D در دو حالت تماس اصطکاکی بدون امکان جدایش و همراه با جدایش $(\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ, v_s = 0.5, E_p/E_s = 1000)$

شکل ۵-۱ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ψ $(E_p/E_s = 1000, L/D = 25, v_s = 0.4, S/D = 3)$

شکل ۵-۲ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ψ $(E_p/E_s = 1000, L/D = 25, v_s = 0.4, S/D = 3)$

شکل ۵-۳ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف L/D $(E_p/E_s = 1000, v_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ)$

شکل ۵-۴ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف L/D $(E_p/E_s = 1000, v_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ)$

شکل ۵-۵ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف E_p/E_s $(L/D = 25, v_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ)$

شکل ۵-۶ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف E_p/E_s $(L/D = 25, v_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ)$

شکل ۵-۷ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف S/D $(E_p/E_s = 1000, L/D = 25, v_s = 0.4, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ)$

شکل ۵-۸ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف S/D $(E_p/E_s = 1000, L/D = 25, v_s = 0.4, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ)$

شکل ۵-۹ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ψ $(E_p/E_s = 1000, L/D = 25, v_s = 0.4, S/D = 3)$

شکل ۵-۱۰ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ψ $(E_p/E_s = 1000, L/D = 25, v_s = 0.4, S/D = 3)$

شکل ۵-۱۱ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف L/D $(E_p/E_s = 1000, v_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ)$

شکل ۵-۱۲ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف L/D $(E_p/E_s = 1000, v_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ)$

شکل ۵-۱۳ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف E_p/E_s $(L/D = 25, v_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ)$

شکل ۵-۱۴ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر
 ۸۶ $(L/D = 25, \nu_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ) E_p/E_s$

شکل ۵-۱۵ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف
 ۸۷ $(E_p/E_s = 1000, L/D = 25, \nu_s = 0.4, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ) S/D$

شکل ۵-۱۶ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر
 ۸۷ $(E_p/E_s = 1000, L/D = 25, \nu_s = 0.4, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ) S/D$ مختلف

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. از نظر عمق قرارگیری می‌توان پی‌ها را به سه دسته سطحی، نیمه عمیق و عمیق تقسیم کرد.

پی‌های عمیق یا 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 حایل 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 بعضی 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 باشد. 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 شمع‌ای احداث می‌شوند.
- همچنین به منظور کاهش دامنه حرکت ماشین آلات لرزنده و چرخشی و کنترل فرکانس طبیعی سیستم پی - خاک - ماشین از شمع استفاده می‌شود.

(۲-۱) بیان مساله

شمع‌ها غالباً به‌صورت گروهی به‌کار می‌روند. جهت مقابله با نیروهای جانبی استفاده از شمع‌های مایل مرسوم است. 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. ضریب اندرکنش شمع - خاک - شمع، عبارت است از نسبت نشست شمع بدون بار در اثر بارگذاری شمع مجاور به نشست شمع بارگذاری شده. 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.

(۳-۱) هدف پایان‌نامه

هدف اصلی این پایان‌نامه مدل‌سازی گروه شمع مایل می‌باشد. از آنجا که یکی از روش‌های بررسی رفتار گروه شمع، استفاده از ضرایب اندرکنش می‌باشد و همچنین غالباً استفاده از شمع‌های مایل جهت مقابله با نیروهای جانبی اجتناب‌ناپذیر است، در این پایان‌نامه به تعیین ضرایب اندرکنش شمع - خاک - شمع در حالت شمع مایل تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی با در نظر گرفتن تاثیر حضور شمع دوم و به صورت عددی، با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS نسخه ۶.۱۱ در حالت سه‌بعدی 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 برای شمع‌های قائم صورت گرفته است و حضور شمع مایل در نظر گرفته نشده است. همچنین در بسیاری از پژوهش‌ها اثر لغزش و جدایش بین شمع و خاک را در نظر گرفته نشده و خاک نیز الاستیک فرض شده است.

در این تحقیق سعی شده است که با مقایسه آرایش‌های مختلف برای قرارگیری شمع مایل در گروه و با تحلیل پارامتری و مقایسه نتایج حاصل، یک جمع‌بندی جامع و کامل از تغییرات ضرایب اندرکنش در گروه شمع مایل تحت اثر بارهای محوری و جانبی در دو حالت استاتیکی و دینامیکی حاصل شود. همچنین اثرات غیرالاستیک بودن خاک و جدایش بین شمع و خاک بررسی می‌شوند.

۱-۴) ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در قالب شش 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.

در فصل ۳، نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق معرفی می‌شود. در این فصل سعی شده است فرضیات و روشهای استفاده شده در این نرم‌افزار معرفی شود.

فصل ۴ به اندرکنش استاتیکی شمع - خاک - شمع با حضور شمع مایل تحت اثر بار محوری و جانبی می‌پردازد. در این فصل به منظور صحت‌سنجی نتایج، نشست تک شمع مایل تحت اثر بار محوری و جانبی با نتایج ارایه شده توسط محققین دیگر مقایسه می‌شود. در ادامه فصل، مدل‌سازی گروه‌های شمع مایل انجام می‌گیرد و با تحلیل آرایشهای مختلف، تغییرات ضرایب اندرکنش نسبت به پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل ۵ به اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع با حضور شمع مایل تحت اثر بار محوری و جانبی می‌پردازد. در این فصل با اعمال میرایی مادی توسط فرمول رایلی و همچنین افزودن المان نامحدود به اطراف مدل‌های ساخته شده در فصل قبل جهت جلوگیری از انعکاس امواج به داخل مدل و اعمال بار هارمونیک محوری و جانبی به طور جداگانه به سر شمع‌ها، شرایط را جهت تعیین ضرایب اندرکنش دینامیکی مهیا می‌کنیم. در ادامه فصل، مدل‌سازی گروه‌های شمع مایل انجام می‌گیرد و با تحلیل آرایشهای مختلف، تغییرات ضرایب اندرکنش نسبت به پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل ۶، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارایه 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 ارایه پیشنهادهایی جهت ادامه پژوهش در زمینه کار انجام شده در این پایان‌نامه پرداخته شده است.

فصل ۲) مروری بر ادبیات موضوع

۲-۱) مقدمه

هدف اصلی این پایان نامه مدل سازی عددی گروه شمع های مایل می باشد. جهت بررسی رفتار گروه شمع از ضرایب اندرکنش استاتیکی و دینامیکی با در نظر گرفتن تاثیر حضور شمع دوم استفاده می شود. با توجه به اینکه تحقیقات نسبتاً زیادی در زمینه تعیین اندرکنش شمع - خاک - شمع به صورت تحلیلی انجام شده است، در این فصل ابتدا به بررسی مطالعات تحلیلی انجام شده در این زمینه می پردازیم و سپس پژوهش های عددی و تجربی انجام شده در زمینه مدل سازی گروه شمع را مورد بررسی قرار می دهیم.

۲-۲) روش های تحلیلی

روش های تحلیلی متنوعی در محاسبات مربوط به تعیین ضرایب اندرکنش شمع - خاک - شمع مورد استفاده قرار گرفته اند. از مزایای روش های تحلیلی، می توان به دقت و سرعت استفاده از آنها اشاره کرد، اما در بعضی موارد، وجود فرضیات ساده کننده در این روشها ناگزیر است. در این بخش، به بعضی از روش های تحلیلی موجود، جهت محاسبه ضریب اندرکنش شمع - خاک - شمع تحت اثر بار محوری و جانبی در دو حالت استاتیکی و دینامیکی، اشاره می شود.

۲-۲-۱) اندرکنش استاتیکی شمع - خاک - شمع

طبق تعریف، ضریب اندرکنش از، نسبت نشست شمع بدون بار، در اثر بارگذاری شمع مجاور، به نشست شمع بارگذاری شده بدست می آید. ساده ترین مفهوم ضریب اندرکنش در ابتدا توسط پولوس^۱ [۱] در سال ۱۹۶۸ بیان شده است. پولوس نشان داده است که تاثیر شمع ها در گروه را می توان با اصل رویهم گذاری برای دو شمع در آن واحد در نظر گرفت. در این بخش روش های تحلیلی محاسبه ضریب اندرکنش استاتیکی آورده شده است.

۲-۲-۱-۱) روش راندولف و روث^۲

این روش توسط راندولف و روث [۲] در سال ۱۹۷۸ ارایه شده است. در این روش نسبت بار - نشست برای تنه شمع و نوک شمع محاسبه شده است و با استفاده از اصل رویهم گذاری با یکدیگر جمع می شوند. بنابراین برای محاسبه ضریب اندرکنش بین دو شمع می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\left(\frac{G_L r_0 w_t}{P_t} \right)_2 = (1 + \alpha) \left(\frac{G_L r_0 w_t}{P_t} \right)_1 \quad (۱-۲)$$

در رابطه فوق P_t مجموع نیروی تنه شمع و نوک شمع می باشد. w_t مجموع تغییر مکان تنه شمع و نوک شمع می باشد. α ضریب اندرکنش استاتیکی بین دو شمع و r_0 شعاع سطح مقطع شمع و G_L مدول برشی خاک می باشد. همان طور که ملاحظه می شود با وجود سادگی و سهولت استفاده از این

^۱ - Poulos^۲ - Randolph & Wroth

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.

۲-۲-۱) روش پولوس و دیویس^۱

این روش شامل دست یافته‌های پولوس [۳،۴] در سال ۱۹۷۱ است. در این روش شمع و خاک به المان‌هایی تقسیم می‌شوند و با استفاده از معادلات میندلین^۲ و به صورت الاستیک جابه‌جایی‌های نقاط گره‌ای در مرکز هر المان شمع و خاک برای تنش خاص نوشته شده و با یکدیگر مساوی قرار داده می‌شوند. با حل معادلات به دست آمده برای شمع‌های مرجع و دریافت‌کننده جابه‌جایی‌ها و در نتیجه ضریب اندرکنش به دست می‌آید [۵].

۲-۲-۲) روش جزتاس و میلانوکیس^۳

جزتاس و میلانوکیس [۶] در سال ۱۹۹۸ شیوه جدیدی برای محاسبه اندرکنش شمع - خاک - شمع ارائه داده‌اند. در این روش جهت مدل کردن اندرکنش خاک و شمع از روش فنرهای وینکلر استفاده شده است. در این روش تاکید می‌شود که شمع از تغییر شکل خاک اطراف که در نتیجه بارگذاری شمع‌های مجاور ایجاد شده به طور 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.

$$\varphi(s) = \frac{w_s(s, z)}{w_s(r_0, z)} = \begin{cases} \frac{\ln\left(\frac{r_m}{s}\right)}{\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)} & r_0 \leq s < r_m \\ 0 & s \geq r_m \end{cases} \quad (2-2)$$

۲-۲-۳) روش روان‌شناس و قضاوی

روان‌شناس [۷] در سال ۱۳۸۶ به صورت تحلیلی و با در نظر گرفتن تاثیر حضور شمع دوم به محاسبه ضریب اندرکنش استاتیکی شمع قایم، تحت اثر بار جانبی در خاک‌های یک لایه و چند لایه پرداخته است. در این روش شمع به صورت پیوسته و خاک با استفاده از فنرهای وینکلر مدل شده‌اند.

مبنای روابط مورد استفاده بر اساس روابط تعادل نیروهای وارد بر المانی از شمع و سپس استخراج معادلات دیفرانسیل حاصل از آن است. در این روش نیز با استفاده از تعریف ضریب اندرکنش جانبی و مدل پیوسته، معادله دیفرانسیل شمع بدون بار نوشته شده است و پس از حل این معادله و اعمال

^۱ - Poulos & Davis

^۲ - Mindlin

^۳ - Gazetas & Mylanokis

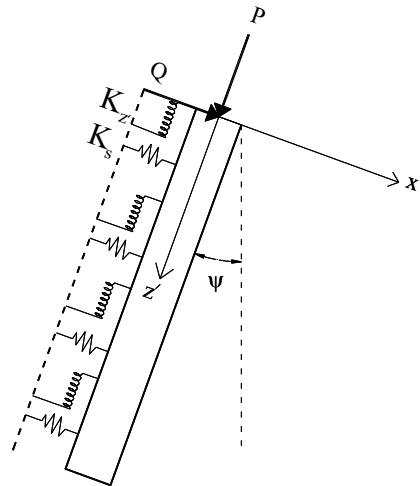
شرایط مرزی، تغییر مکان جانبی سر شمع بدون بار حاصل می‌شود که از این نسبت تغییر مکان به تغییر مکان جانبی شمع مرجع ضریب اندرکنش محاسبه می‌شود.

۲-۱-۵) روش قاسم‌زاده و علی‌بیک‌لو

قاسم‌زاده و علی‌بیک‌لو [۸] در سال ۱۳۸۹، به صورت تحلیلی و با استفاده از مدل وینکلر، ضرایب اندرکنش استاتیکی شمع- خاک- شمع را تحت اثر بارهای محوری و جانبی، برای شمع‌های مایل و قائم مورد محاسبه قرار دادند. در این روش یک شمع بارگذاری شده به نام شمع مرجع^۱ و یک شمع مشابه ولی بدون بار به نام شمع دریافت‌کننده^۲ فرض شده است. روش ارائه شده جهت محاسبه ضرایب اندرکنش در این مرجع دارای سه گام زیر می‌باشد:

۱- محاسبه نشست شمع مرجع تحت اثر بار محوری و جانبی به طور جداگانه:

در این بخش المانی از شمع در نظر گرفته می‌شود و با رسم نیروهای وارد بر سطوح آن، به حل همزمان معادلات تعادل بر روی این المان پرداخته می‌شود.



شکل ۱-۲ استفاده از مدل وینکلر برای تحلیل شمع و پاسخ خاک [۸]

$$w_{11}(z') = A_{11} \cdot e^{\Lambda z'} + B_{11} \cdot e^{-\Lambda z'} \quad (۳-۲)$$

$$A_{11} = \frac{P}{E_p A_p \Lambda} \frac{1}{e^{\Lambda L} - e^{-\Lambda L}} e^{-\Lambda L} \quad (۴-۲)$$

$$B_{11} = \frac{P}{E_p A_p \Lambda} \frac{1}{e^{\Lambda L} - e^{-\Lambda L}} e^{\Lambda L} \quad (۵-۲)$$

^۱ -Source Pile

^۲ -Receiver Pile

$$\Lambda = \sqrt{\frac{K_{z'}}{E_p \cdot A_p}} \quad (۶-۲)$$

$$K_z = \frac{2\pi G}{\ln(\frac{r_m}{r_0})}, \quad r_m = 2.5L(1-\nu_s) \quad (۷-۲)$$

$$u_{11}(z') = \left(\frac{Q\lambda}{K_{sBatter}}\right) \cdot e^{-\lambda z'} [\cos(\lambda z') + \sin(\lambda z')] \quad (۸-۲)$$

$$\lambda = \left[\frac{K_{sBatter}}{4E_p \cdot I_p} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (۹-۲)$$

$$\begin{aligned} K_{sBatter} &= B \cdot K_s \\ K_s &= \delta \cdot E_s \\ \delta &= 1.67 \left[\frac{E_p}{E_s} \right]^{-0.053} \rightarrow 0.9 < \delta < 1.2 \end{aligned} \quad B = (1 - \frac{\psi}{90}) \rightarrow \begin{cases} B > 1 & -45 < \psi < 0 \\ B = 1 & \psi = 0 \\ B < 1 & 0 < \psi < 45 \end{cases} \quad (۱۰-۲)$$

در روابط بالا، L طول شمع، r_0 شعاع شمع، ν_s ضریب پواسون خاک، G مدول برشی خاک، K_z سختی لغزشی فنر، E_s مدول الاستیسیته خاک، A_p سطح مقطع شمع، $w_{11}(z')$ نشست شمع در راستای طول شمع، P بار محوری وارده در سر شمع، $u_{11}(z')$ تغییرمکان جانبی شمع مایل در راستای طول شمع، Q بار جانبی وارده در سر شمع، E_p مدول الاستیسیته شمع و I_p ممان دوم سطح شمع می باشد.

۲- کاهش تغییرمکان خاک با دور شدن از شمع مرجع:

در این گام تغییرمکان خاک در موقعیت شمع دریافت کننده، به دلیل بارگذاری شمع مرجع محاسبه می شود. در این قسمت با توجه به مایل بودن شمع، این نکته باید در نظر گرفته شود که جابه جایی خاک اطراف شمع مرجع دارای دو مولفه یکی در راستای شمع دریافت کننده و دیگری عمود بر راستای شمع دریافت کننده می باشد. مولفه جابه جایی در راستای شمع دریافت کننده باعث حرکت محوری شمع و مولفه عمود بر راستای شمع دریافت کننده موجب خمش این شمع می شود. که s فاصله شعاعی از محور شمع دریافت کننده می باشد که در شمع مایل این فاصله در جهت عمود بر محور شمع می باشد. $u_{11}(z',s), w_{11}(z',s)$ به ترتیب تغییرمکان در فاصله s (چنانچه شمع دریافت کننده نباشد) و در عمق z' در اثر بارگذاری محوری و جانبی شمع مرجع می باشند.

$$\phi(s, \theta) = 0.6(1 + \cos^2 \theta) \left[\frac{E_p}{G_s} \right]^{\frac{1}{7}} \cdot \left(\frac{s}{r_0} \right)^{-1} \quad (11-2)$$

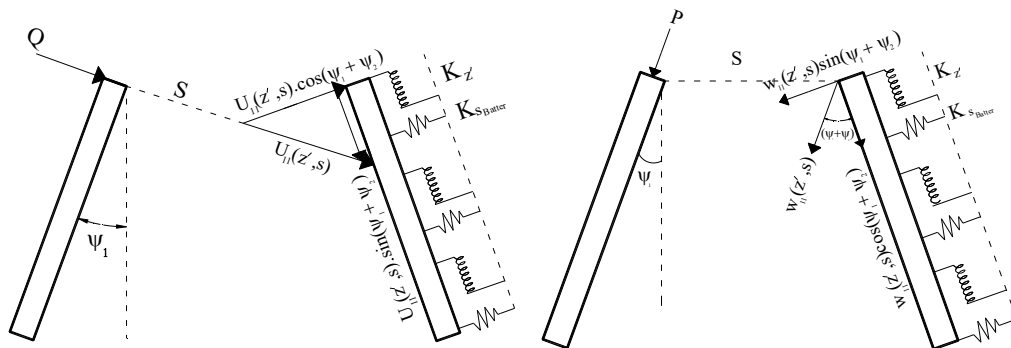
$$\varphi(s) = \begin{cases} \frac{\ln\left(\frac{r_m}{s}\right)}{\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)} & r_0 \leq s < r_m \\ 0 & s \geq r_0 \end{cases} \quad (12-2)$$

$$w_{11}(z', s) = w_{11}(z')\varphi(s) \quad (13-2)$$

$$u_{11}(z', s) = u_{11}(z')\varphi(s) \quad (14-2)$$

۳- محاسبه نشست شمع دریافت کننده:

حضور شمع دریافت کننده، تغییرمکان محاسبه شده در گام ۲ را عموماً کاهش می دهد و شمع دریافت کننده کاملاً از نشست خاک پیروی نمی کند. برای مدل کردن شمع دریافت کننده و اندرکنش آن با خاک، شمع به صورت میله ای که در امتداد آن فنرهای وینکلر وجود دارند، مدل می شود و به فنرها تغییرمکانی معادل آن چه در گام ۲ محاسبه شده، داده می شود. عملکرد این گام بر عکس عملکرد گام ۱ می باشد. در گام ۱ شمع مرجع، تغییرمکان را به خاک القاء می کند در حالی که در این گام، خاک تغییرمکان را به شمع دریافت کننده اعمال می کند. در حالت شمع مایل بایستی به این نکته توجه شود که جابه جایی محوری و یا جانبی شمع مرجع دو نوع جابه جایی در شمع دریافت کننده القا می کند، یکی در راستای محوری و دیگری عمود بر محور شمع دریافت کننده.



شکل ۲-۲ القاء جابجایی از جانب خاک به شمع دریافت کننده به دلیل بارگذاری شمع مرجع

$$w_{21}(z') = \frac{\Lambda}{2} \Gamma_1 z' (-A_{11} \cdot e^{\Lambda z'} + B_{11} \cdot e^{-\Lambda z'}) + A_{21} \cdot e^{\Lambda z'} + B_{21} \cdot e^{-\Lambda z'} \quad (۱۵-۲)$$

$$A_{21} = \frac{\Gamma_1}{2} \left[\frac{\Lambda L(A_{11} \cdot e^{\Lambda L} + B_{11} \cdot e^{-\Lambda L}) + (-A_{11} + B_{11})e^{-\Lambda L}}{e^{\Lambda L} - e^{-\Lambda L}} \right] \quad (۱۶-۲)$$

$$B_{21} = \frac{\Gamma_1}{2} \left[\frac{\Lambda L(A_{11} \cdot e^{\Lambda L} + B_{11} \cdot e^{-\Lambda L}) + (-A_{11} + B_{11})e^{+\Lambda L}}{e^{\Lambda L} - e^{-\Lambda L}} \right] \quad (۱۷-۲)$$

$$\Gamma_1 = \varphi(s) \cdot \cos(\psi_1 + \psi_2) \quad (۱۸-۲)$$

$$\alpha_{aa} = \frac{w_{21}(z' = 0)}{w_{11}(z' = 0)} \quad (۱۹-۲)$$

$$u_{21}(z') = C_{21} \cdot e^{-\lambda z'} \cos(\lambda z') + D_{21} \cdot e^{-\lambda z'} \sin(\lambda z') + \Gamma(A_{11} \cdot e^{\Lambda z'} + B_{11} \cdot e^{-\Lambda z'}) \quad (۲۰-۲)$$

$$C_{21} = \frac{\Gamma \Lambda (B_{11} - A_{11})(\Lambda^2 - 2\lambda^2)}{4\lambda^3} \quad (۲۱-۲)$$

$$D_{21} = \frac{\Gamma \Lambda (B_{11} - A_{11})(\Lambda^2 + 2\lambda^2)}{4\lambda^3} \quad (۲۲-۲)$$

$$\Gamma = \frac{K_{s_{Batter}} \cdot \varphi(s) \cdot \sin(\psi_1 + \psi_2)}{E_p \cdot I_p \cdot \Lambda^4 + K_{s_{Batter}}} \quad (۲۳-۲)$$

$$\alpha_{an} = \frac{u_{21}(z' = 0)}{w_{11}(z' = 0)} \quad (۲۴-۲)$$

$$\alpha_{nn} = \frac{u'_{21}(z' = 0)}{u_{11}(z' = 0)} = \frac{3}{4} \phi(s, \theta) \cdot \cos(\psi_1 + \psi_2) \cdot \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_p} \right)^3 \quad (۲۵-۲)$$

$$\alpha_{na} = \frac{w'_{21}(z' = 0)}{u_{11}(z' = 0)} = \phi(s, \theta) \cdot \sin(\psi_1 + \psi_2) \cdot \frac{B'_{21} + \frac{\lambda}{K_{s_{Batter}}} C'_{21}}{\frac{\lambda}{K_{s_{Batter}}}} \quad (۲۶-۲)$$

$$C'_{21} = 1 - \Gamma' D'_{21} \quad (2-27)$$

$$D'_{21} = \frac{1 + \Gamma'}{1 + \Gamma'^2} \quad (2-28)$$

$$\Gamma' = \frac{2E_p \cdot A_p \cdot \lambda^2}{K_{z'}} \quad (2-29)$$

$$B'_{21} = -\frac{\lambda^2}{\Lambda \cdot K_{S \text{ Batter}}} (C'_{21} - D'_{21}) \quad (2-30)$$

در روابط بالا، $u_{21}(z')$ و $w_{21}(z')$ به ترتیب تغییرمکان محوری و جانبی شمع دریافت‌کننده در اثر نشست محوری شمع مرجع، $w'_{21}(z')$ و $u'_{21}(z')$ به ترتیب تغییرمکان محوری و جانبی شمع دریافت‌کننده در اثر تغییرمکان جانبی شمع مرجع می‌باشند. همچنین ضریب اندرکنش محوری-محوری (α_{aa})، جانبی-جانبی (α_{nn})، محوری-جانبی (α_{an}) و جانبی-محوری (α_{na}) می‌باشند.

همانطور که مشاهده شد، طبق فرضیات روش تحلیلی قاسم‌زاده و علی‌بیک‌لو، نشست محوری شمع مرجع تنها باعث نشست خاک اطراف شمع در جهت اعمال بار می‌شود که با انتقال این نشست از خاک به شمع دریافت‌کننده در دو جهت محوری و عمود بر آن و تقسیم این نشست‌ها به نشست شمع مرجع، ضرایب اندرکنش محوری-محوری و محوری-جانبی حاصل می‌شوند، اما نکته‌ای که در این روش به آن پرداخته نشد را می‌توان، به این صورت بیان کرد، که نشست محوری شمع مرجع، علاوه بر اینکه باعث نشست خاک اطراف شمع در جهت اعمال بار می‌شود، در جهت عمود بر آن نیز باعث ایجاد تغییرمکان در خاک می‌شود، که با انتقال این تغییرمکان به شمع دریافت‌کننده، مولفه محوری آن باعث کاهش ضریب اندرکنش محوری-محوری و مولفه جانبی آن باعث افزایش ضریب اندرکنش محوری-جانبی می‌شود. این عامل در اثر بارگذاری جانبی هم اتفاق می‌افتد، به این صورت که بارگذاری جانبی روی شمع مرجع، علاوه بر ایجاد تغییرمکان جانبی عمود بر شمع مرجع در خاک اطراف، باعث نشست خاک اطراف شمع در جهت محور شمع نیز می‌شود، این در حالی است که در روش تحلیلی فرض بر آن است که بارگذاری جانبی روی شمع مرجع، تنها باعث تغییرمکان جانبی در خاک اطراف شمع می‌شود. این موضوع در شکل‌های ۴-۲۳ و ۴-۲۴ مشهود است.

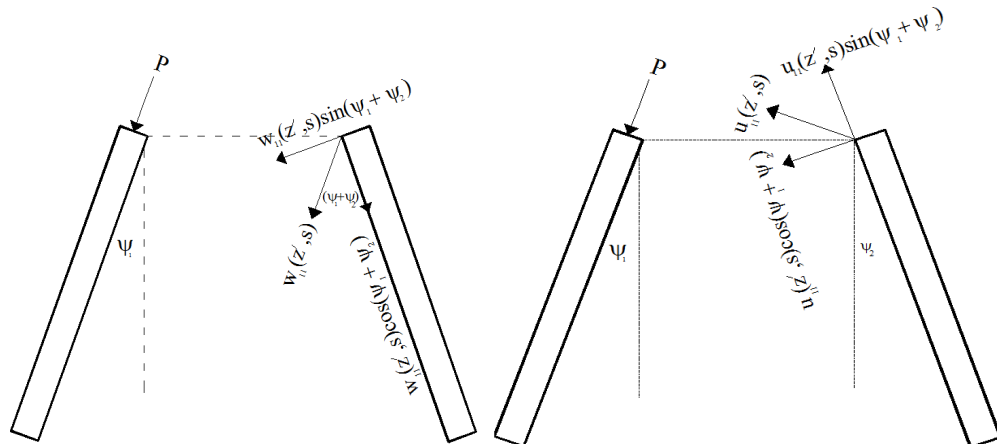
در ادامه با مدل‌سازی چندین شمع با قطر، زوایه و طول‌های مختلف، مشاهده شد که تغییرمکان جانبی خاک در اطراف شمع مرجع، تحت اثر بار محوری را می‌توان به صورت تابعی از نشست محوری خاک اطراف شمع در نظر گرفت، که این تابع را در رابطه ۲-۳۱ مشاهده می‌کنید. همچنین رابطه ۲-۲

۳۲ نشست محوری خاک اطراف شمع مرجع را به صورت تابعی از تغییرمکان جانبی خاک اطراف این شمع تحت اثر بارگذاری جانبی نشان می‌دهد.

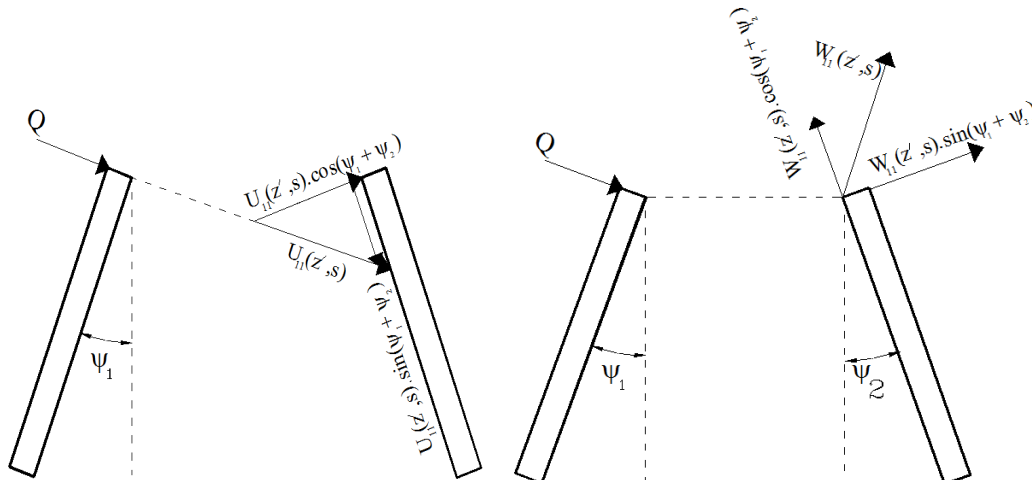
$$\varphi_{jm}(s, \psi) = \frac{U_{jm}}{U_m} = \begin{cases} 0.1 \times (1 + 0.5 \sin(4.5\psi)) \ln\left(\frac{s}{r_0}\right) & r_0 \leq s \leq 6r_0 \\ \varphi_{jm}(6r_0, \psi) & s \geq 6r_0 \end{cases} \quad (۳۱-۲)$$

$$\varphi_{mj}(s, \psi) = \frac{U_{mj}}{U_j} = \begin{cases} 0.05 \times (1 + 6\psi) \ln\left(\frac{s}{r_0}\right) & r_0 \leq s \leq 6r_0 \\ \varphi_{jm}(6r_0, \psi) & s \geq 6r_0 \end{cases} \quad (۳۲-۲)$$

در روابط بالا S فاصله شعاعی از مرکز شمع مرجع و در طرف راست شمع مرجع، r_0 شعاع شمع، ψ زاویه تمایل شمع بر حسب رادیان، U_j تغییرمکان جانبی بر روی سطح خاک اطراف شمع تحت اثر بار جانبی، U_{mj} نشست محوری بر روی سطح خاک اطراف شمع تحت اثر بار جانبی، U_m نشست محوری بر روی سطح خاک اطراف شمع تحت اثر بار محوری، U_{jm} تغییرمکان جانبی بر روی سطح خاک اطراف شمع تحت اثر بار محوری می‌باشند.



شکل ۳-۲ القاء تغییرمکان جانبی (عمود بر شمع مرجع) و نشست محوری (در راستای شمع مرجع) به شمع دریافت‌کننده در اثر بارگذاری محوری شمع مرجع



شکل ۲-۴: القاء نشست محوری (در راستای شمع مرجع) و تغییر مکان جانبی (عمود بر شمع مرجع) به شمع دریافت کننده در اثر بارگذاری جانبی شمع مرجع

۲-۲-۲) اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع

تاریخچه روش‌های تعیین ضریب اندرکنش شمع - خاک - شمع به صورت استاتیکی در قسمت قبل بررسی گردید، در ذیل به روش‌های تحلیلی برای محاسبه اندرکنش شمع - خاک - شمع تحت بار دینامیکی پرداخته شده است.

۲-۲-۲-۱) روش شتا و نواک^۱

در این روش که توسط شتا و نواک [۹] در سال ۱۹۸۲ ارائه شده است، به بررسی ضرایب اندرکنش دینامیکی، کاهش مقاومت خاک اطراف شمع، لایه‌بندی خاک و شرایط نوک شمع پرداخته است. در این روش بیان شده است که رفتار دینامیکی گروه شمع نسبت به رفتار استاتیکی گروه متفاوت می‌باشد و سختی گروه شمع در حالت دینامیکی علاوه بر ضریب اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع به فرکانس، فاصله بین شمع‌ها و ضعیف شدن خاک اطراف شمع نیز وابسته می‌باشد. 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 [۹]:

^۱ -Sheta & Novak

^۲ -Group Efficiency Ratio

$$GER = \frac{K_G}{\sum K_s} \quad (۳۳-۲)$$

$$GER = \frac{C_G}{\sum C_s} \quad (۳۴-۲)$$

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

۲-۲-۲-۲) روش کی نیا و کازل^۱

این روش به منظور بررسی کاربرد اصل رویهم گذاری پولوس در حالت دینامیکی، توسط کی نیا و کازل [۱۰] در سال ۱۹۸۲ ارایه شده است. در این روش شمع به صورت الاستیک خطی مدل شده و رفتار خاک به صورت ویسکوالاستیک می باشد و جدایشی بین شمع و خاک وجود ندارد. جهت مدل کردن خاک از تئوری تیر بر بستر الاستیک^۲ استفاده شده است. 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.

۳-۲-۲-۲) روش قدیمی و قضاوی

قدیمی [۱۱] در سال ۱۳۸۵ با در نظر گرفتن تاثیر حضور شمع دوم به محاسبه ضریب اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع تحت بار قایم، و به دست آوردن رابطه ای جهت محاسبه این ضریب برای شمع های قایم اصطکاکی در خاک های یک لایه و متعاقب آن بسط این رابطه در خاک های لایه ای پرداخته است. 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 می شود که از نسبت این نشست به نشست شمع مرجع، ضریب اندرکنش محاسبه شده و سپس این ضریب برای شمع های اتکایی نیز با تغییر شرایط مرزی معادله به دست آمده، محاسبه شده است.

۴-۲-۲-۲) روش روان شناس و قضاوی

روان شناس [۷] در سال ۱۳۸۶ به صورت تحلیلی و با در نظر گرفتن تاثیر حضور شمع دوم به محاسبه ضریب اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع تحت اثر بار جانبی در خاک های یک لایه و چند لایه پرداخته است. در مدل ارایه شده توسط روان شناس رفتار خاک به صورت ویسکوالاستیک خطی و کرنش مسطح و رفتار شمع به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. در این روش جهت مدل

^۱ -Kaynia & Kausel

^۲ - Beam on Elastic Foundation

کردن خاک از تئوری تیر بر بستر دینامیکی وینکлер^۱ (BDWF) استفاده شده است که در آن هر لایه از خاک را می‌توان به صورت معادل، مقاومت آن را توسط فنرهای الاستیک خطی و میراگرهای خطی محاسبه کرد. در روش دینامیکی میراگرها به صورت موازی با فنرها قرار دارند که در واقع خاک به صورت مدل کلونین رفتار می‌کند.

۲-۲-۳) روش قاسم‌زاده و علی‌بیک‌لو

قاسم‌زاده و علی‌بیک‌لو [۱۲] در سال ۲۰۱۱ به صورت تحلیلی و با در نظر گرفتن تاثیر حضور شمع دوم به محاسبه ضریب اندرکنش دینامیکی شمع- خاک- شمع در گروه شمع‌های مایل و تحت اثر نوسانات هارمونیک محوری و جانبی پرداختند. در این تحقیق جهت مدل کردن خاک از مدل وینکлер استفاده شده است. شمع به تعداد مناسبی قطعه تقسیم گردیده و جرم هر قطعه در مرکز آن تمرکز داده می‌شود. هم‌چنین رفتار خاک معادل تعدادی بی‌نهایت فنر و کمک فنر خطی که به صورت موازی (مدل کلونین) به یکدیگر وصل شده‌اند، فرض می‌شود. ضرایب اندرکنش محاسبه شده در این مقاله، در ماتریسی به عنوان ماتریس اندرکنش، شامل ۴ ضریب اندرکنش محوری- محوری (α_{aa})، جانبی- جانبی (α_{nn})، جانبی- محوری (α_{an}) و محوری- جانبی (α_{na}) ارائه شده است. مطالعات پارامتریک برای مقادیر مختلف زاویه میل شمع (ψ)، نسبت فاصله به قطر شمع‌ها (S/D)، سختی نسبی شمع و خاک (E_p/E_s) و ضریب لاغری (L/D) برای هر چهار نوع ضریب اندرکنش در این تحقیق انجام گرفته است.

۲-۳) تحقیقات تجربی

اولین آزمایش برای فهم رفتار شمع‌های مایل در سال ۱۹۵۳ توسط چبوتاریف^۲ [۱۳] انجام شد. در این آزمایش شمع‌های مایل بسته به نوع گسیختگی خاک به دو دسته مثبت و منفی تقسیم شده‌اند. این دو نوع آرایش در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.

^۱ - Beam on Dynamic Winkler Foundation

^۲ - Tschebotarioff