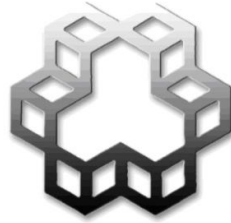


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده عمران

گرایش ژئوتکنیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

شبیه‌سازی عددی گروه شمع‌های مایل و تعیین اندرکنش بین شمع‌ها

استاد راهنما: دکتر حسن قاسمزاده

دانشجو: محسن ترزبان

شماره دانشجویی: ۸۹۰۰۲۱۴

بهمن ۱۳۹۱

تقدیم به دو یاور مہربان زندگی

پدر و مادر

با سپاس فراوان از راهنمایی های صبورانه استاد گرامی

جناب آقای دکتر قاسم‌زاده

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 موهر کلمب در نظر گرفته شده و شمع-ها 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، اثر فرکانس بارگذاری نیز بر روی ضرایب اندرکنش بررسی شده‌است. برای صحت‌سنجی جوابها، بین نتایج بدست‌آمده از مدل‌سازی عددی و نتایج حاصل از روابط تحلیلی مقایسه صورت گرفته است.

فهرست مطالب

.....	چکیده:
۱.....	فهرست مطالب
۳.....	فهرست شکلها
۷.....	فصل (۱) پیش‌گفتار
۸.....	۱-۱) مقدمه
۹.....	۲-۱) بیان مساله
۹.....	۳-۱) هدف پایان‌نامه
۱۰.....	۴-۱) ساختار پایان‌نامه
۱۱.....	فصل (۲) مروری بر ادبیات موضوع
۱۲.....	۱-۲) مقدمه
۱۲.....	۲-۲) روشهای تحلیلی
۱۲.....	۱-۲-۲) اندرکنش استاتیکی شمع- خاک - شمع
۱۲.....	۲-۲-۲) روش راندولف و روٹ
۱۳.....	۲-۲-۲) روش پولوس و دیویس
۱۳.....	۲-۲-۲) روش روان‌شناس و قضاوی
۱۴.....	۲-۲-۲) روش قاسم زاده و علی بیک لو
۱۸.....	۲-۲-۲) اندرکنش دینامیکی شمع- خاک - شمع
۱۸.....	۲-۲-۲) روش شتا و نواک
۱۹.....	۲-۲-۲) روش کی‌نیا و کازل
۱۹.....	۲-۲-۲) روش قدیمی و قضاوی
۲۰.....	۲-۲-۲) روش روان‌شناس و قضاوی
۲۰.....	۳-۲) تحقیقات تجربی
۲۳.....	۴-۲) پژوهش‌های عددی
۳۰.....	۵-۲) تحلیل گروه‌های شمع همراه با شمع مایل
۳۱.....	۲-۵-۱) تحلیل شمع مایل تک
۳۳.....	۲-۵-۱) شمع مایل تحت اثر بار افقی و قائم
۳۴.....	۲-۵-۱) نشست شمع اصطکاکی
۳۴.....	۲-۵-۱) تحلیل گروه‌های شمع
۳۶.....	۲-۶) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۳۷.....	فصل (۳) معرفی نرم افزار و مراحل مدلسازی
۳۸.....	۱-۳) مقدمه
۳۸.....	۲-۳) انتخاب نرم افزار
۳۹.....	۳-۳) معرفی نرم افزار ABAQUS
۳۹.....	۳-۳-۱) الگوریتم حل مسائل با نرم افزار ABAQUS
۴۱.....	۳-۳-۲) روش حل اجزاء محدود
۴۱.....	۳-۴) مراحل مدل سازی عددی
۴۱.....	۳-۴-۱) مدل سازی شمع و خاک
۴۱.....	۳-۴-۲) مدل رفتاری مورد استفاده
۴۲.....	۳-۴-۳) سطح تماس شمع و خاک
۴۳.....	۳-۴-۴) میرایی
۴۴.....	۳-۴-۵) شرایط تکیه گاهی
۴۵.....	۳-۴-۶) مرزهای مدل
۴۶.....	۳-۴-۷) تقارن
۴۶.....	۳-۴-۸) اعمال تنش های اولیه
۴۶.....	۳-۴-۹) مراحل تحلیل

۴۷	..... المانبدی و اندازه المانها (۱۰-۴-۳)
۴۷	..... بارگذاری (۱۱-۴-۳)
۴۹	..... فصل ۴) اندرکنش استاتیکی شمع - خاک - شمع
۵۰	..... (۱-۴) مقدمه
۵۰	..... (۲-۴) تعریف مساله
۵۱	..... (۳-۴) مدل سازی شمع و خاک با سطح تماس کاملا چسبیده به یکدیگر
۵۲	..... (۱-۳-۴) صحت سنجی نشست تک شمع
۵۳	..... (۲-۳-۴) ضرایب اندرکنش در حالت شمع قائم
۵۴	..... (۳-۳-۴) رابطه تغییرمکان جانبی و نشست محوری یک نقطه از سطح خاک در فواصل مشخص
۶۰	..... (۴-۳-۴) نتایج تحلیلهای پارامتریک در حالت بارگذاری محوری
۶۰	..... (۱-۴-۳-۴) تاثیر زاویه تمایل شمع
۶۱	..... (۲-۴-۳-۴) اثر نسبت لاغری شمع ها
۶۲	..... (۳-۴-۳-۴) تاثیر سختی نسبی شمع و خاک
۶۴	..... (۴-۴-۳-۴) تغییرات ضرایب اندرکنش در طول شمع
۶۶	..... (۵-۳-۴) نتایج تحلیلهای پارامتریک در حالت بارگذاری جانبی
۶۷	..... (۱-۵-۳-۴) تاثیر زاویه تمایل شمعها
۷۰	..... (۲-۵-۳-۴) اثر نسبت لاغری شمعها
۷۱	..... (۳-۵-۳-۴) تاثیر سختی نسبی شمع و خاک
۷۲	..... (۴-۵-۳-۴) تغییرات ضرایب اندرکنش در طول شمع
۷۳	..... (۴-۴) مدلسازی شمع و خاک با سطح تماس اصطکاکی
۷۵	..... (۱-۴-۴) نتایج تحلیل پارامتریک در حالت بارگذاری محوری
۷۵	..... (۱-۱-۴-۴) تاثیر زاویه تمایل شمع
۷۶	..... (۲-۱-۴-۴) اثر نسبت لاغری شمع ها
۷۹	..... (۲-۴-۴) نتایج تحلیل پارامتریک در حالت بارگذاری جانبی
۷۹	..... (۱-۲-۴-۴) تاثیر زاویه تمایل شمع
۸۱	..... (۲-۲-۴-۴) اثر نسبت لاغری شمعها
۸۴	..... (۵-۴) جمع بندی و نتیجه گیری
۸۵	..... فصل ۵) اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع
۸۶	..... (۱-۵) مقدمه
۸۶	..... (۲-۵) تعریف مساله
۸۶	..... (۳-۵) مراحل مدل سازی
۹۱	..... (۴-۵) نتایج تحلیل های پارامتریک در حالت بارگذاری محوری
۹۱	..... (۱-۴-۵) تاثیر زاویه تمایل شمع
۹۲	..... (۲-۴-۵) اثر نسبت لاغری شمعها
۹۴	..... (۳-۴-۵) تاثیر سختی نسبی شمع و خاک
۹۵	..... (۴-۴-۵) اثر نسبت فاصله به قطر شمع
۹۶	..... (۵-۵) نتایج تحلیل های پارامتریک در حالت بارگذاری جانبی
۹۶	..... (۱-۵-۵) تاثیر زاویه تمایل شمعها
۹۷	..... (۲-۵-۵) اثر نسبت لاغری شمعها
۹۸	..... (۳-۵-۵) تاثیر سختی نسبی شمع و خاک
۱۰۰	..... (۴-۵-۵) اثر نسبت فاصله به قطر شمع
۱۰۱	..... (۶-۵) جمع بندی و نتیجه گیری
۱۰۲	..... فصل ۶) جمع بندی و ارایه پیشنهادات
۱۰۳	..... (۱-۶) خلاصه نتایج پژوهش حاضر
۱۰۵	..... (۳-۶) پیشنهادهای برای ادامه کار
۱۰۶	..... منابع و مراجع:

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ استفاده از مدل وینکلر برای تحلیل شمع و پاسخ خاک [۸] ۱۴
- شکل ۲-۲ القاء جابجایی از جانب خاک به شمع دریافت کننده به دلیل بارگذاری شمع مرجع ۱۷
- شکل ۳-۲ تفاوت شمع‌های مایل مثبت و منفی [۱۸] ۲۱
- شکل ۴-۲ تحلیل شمع مایل تحت اثر بار محوری [۵] ۳۲
- شکل ۵-۲ تحلیل شمع مایل تحت اثر بار نرمال [۵] ۳۳
- شکل ۶-۲ فاصله معادل برای شمع‌های مایل [۵] ۳۵
- شکل ۱-۳ مراحل تحلیل در نرم افزار ABAQUS ۴۰
- شکل ۲-۳ شبکه المان نیمه بینهایت در اطراف مدل، جهت انجام آنالیز دینامیکی (نصف محیط شبیه سازی شده است) ۴۵
- شکل ۳-۳ نمودار تغییرات ضریب اندرکنش محوری- محوری بر حسب افزایش ابعاد مدل ۴۶
- شکل ۴-۳ شبکه المانهای مورد استفاده برای تحلیل گروه شمع مایل (نصف محیط شبیه سازی شده است) ۴۷
- شکل ۵-۳ کانتورهای نشست محوری در اثر بارگذاری محوری شمع مرجع ۴۸
- شکل ۶-۳ کانتورهای تغییرمکان جانبی در اثر بارگذاری جانبی شمع مرجع ۴۸
- شکل ۱-۴ نمودار بار- نشست محوری جهت صحت سنجی ۵۲
- شکل ۲-۴ نمودار بار- تغییرمکان جانبی جهت صحت سنجی ۵۳
- شکل ۳-۴ مقایسه ضریب اندرکنش محوری- محوری بین روش عددی ارایه شده با نتایج پولوس و دیویس [۵] و علی بیگ لو [۸] در حالت شمع قائم ($L/D=25, \nu_s=0.5, E_p/E_s=1000, \psi_1=\psi_2=0$) ۵۴
- شکل ۴-۴ مقایسه ضریب اندرکنش جانبی- جانبی بین روش عددی ارایه شده با نتایج پولوس و دیویس [۵] و علی بیگ لو [۸] در حالت شمع قائم ($L/D=25, \nu_s=0.5, E_p/E_s=1000, \psi_1=\psi_2=0$) ۵۴
- شکل ۵-۴ القاء تغییرمکان جانبی (عمود بر شمع مرجع) و نشست محوری (در راستای شمع مرجع) به شمع دریافت کننده در اثر بارگذاری محوری شمع مرجع ۵۶
- شکل ۶-۴ القاء نشست محوری (در راستای شمع مرجع) و تغییرمکان جانبی (عمود بر شمع مرجع) به شمع دریافت کننده در اثر بارگذاری جانبی شمع مرجع ۵۶
- شکل ۷-۴ تغییرات نسبت تغییرمکان جانبی به نشست محوری خاک اطراف شمع بر حسب نسبت فاصله به شعاع شمع تحت اثر بارگذاری محوری شمع برای مقادیر مختلف ψ ($L/D=25, \nu_s=0.5, E_p/E_s=1000$) ۵۷
- شکل ۸-۴ تغییرات نسبت تغییرمکان جانبی به نشست محوری خاک اطراف شمع بر حسب نسبت فاصله به شعاع شمع تحت اثر بارگذاری محوری شمع برای مقادیر مختلف ψ در $0 \leq s/r_0 \leq 6$ ($L/D=25, \nu_s=0.5, E_p/E_s=1000$) ۵۷
- شکل ۹-۴ تغییرات نسبت نشست محوری به تغییرمکان جانبی خاک اطراف شمع بر حسب نسبت فاصله به شعاع شمع تحت اثر بارگذاری جانبی شمع برای مقادیر مختلف ψ ($L/D=25, \nu_s=0.5, E_p/E_s=1000$) ۵۸

شکل ۴-۱۰ تغییرات نسبت نشست محوری به تغییرمکان جانبی خاک اطراف شمع بر حسب نسبت فاصله به شعاع شمع تحت اثر بارگذاری جانبی شمع برای مقادیر مختلف ψ در فاصله $0 \leq s/r_0 \leq 6$ ($L/D = 25, \nu_s = 0.5, E_p/E_s = 1000$) ۵۸

شکل ۴-۱۱ تغییرات نسبت تغییرمکان جانبی به نشست محوری خاک اطراف شمع بر حسب نسبت فاصله به شعاع شمع تحت اثر بارگذاری محوری شمع برای مقادیر مختلف $L/D, D$ ($\psi = 30^\circ, \nu_s = 0.5, E_p/E_s = 1000$) ۵۹

شکل ۴-۱۲ تغییرات نسبت تغییرمکان جانبی به نشست محوری خاک اطراف شمع بر حسب نسبت فاصله به شعاع شمع تحت اثر بارگذاری محوری شمع برای مقادیر مختلف $L/D, D$ در فاصله $0 \leq s/r_0 \leq 6$ ($\psi = 30^\circ, \nu_s = 0.5, E_p/E_s = 1000$) ۵۹

شکل ۴-۱۳ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- محوری بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s = 1000, \nu_s = 0.5, L/D = 25$) ۶۰

شکل ۴-۱۴ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- جانبی بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s = 1000, \nu_s = 0.5, L/D = 25$) ۶۱

شکل ۴-۱۵ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- محوری بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D ($\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ, \nu_s = 0.5, E_p/E_s = 1000$) ۶۲

شکل ۴-۱۶ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- جانبی بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D ($\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ, \nu_s = 0.5, E_p/E_s = 1000$) ۶۲

شکل ۴-۱۷ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- محوری بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف E_p/E_s ($\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ, \nu_s = 0.5, L/D = 25$) ۶۳

شکل ۴-۱۸ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- جانبی بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف E_p/E_s ($\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ, \nu_s = 0.5, L/D = 25$) ۶۳

شکل ۴-۱۹ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- محوری در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s = 1000, \nu_s = 0.5, S/D = 3$) ۶۵

شکل ۴-۲۰ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- جانبی در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s = 1000, \nu_s = 0.5, S/D = 3$) ۶۶

شکل ۴-۲۱ تفاوت نشست محوری شمع مثبت و منفی ۶۷

شکل ۴-۲۲ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- جانبی بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s = 1000, \nu_s = 0.5, L/D = 25$) ۶۸

شکل ۴-۲۳ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- محوری بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s = 1000, \nu_s = 0.5, L/D = 25$) ۶۸

شکل ۴-۲۴ حالت‌های مختلف قرارگیری شمع مرجع و دریافت‌کننده الف) شمع مرجع قائم و شمع دریافت‌کننده مایل ب) شمع مرجع مایل و شمع دریافت‌کننده قائم ۶۹

شکل ۴-۲۵ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - جانبی شمع مایل نسبت به زاویه میل دو شمع برای حالت‌های شکل ۴-۲۴ ($S/D = 3, E_p/E_s = 1000, \nu_s = 0.5, L/D = 25$) ۶۹

شکل ۴-۲۶ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- جانبی بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D ($\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ, \nu_s = 0.5, E_p/E_s = 1000$) ۷۰

شکل ۴-۲۷ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- محوری بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D ($\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ, \nu_s = 0.5, E_p/E_s = 1000$) ۷۱

- شکل ۴-۲۸ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- جانبی بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف E_p/E_s ($\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ$, $\nu_s = 0.5$, $L/D = 25$) ۷۲
- شکل ۴-۲۹ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- محوری بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف E_p/E_s ($\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ$, $\nu_s = 0.5$, $L/D = 25$) ۷۲
- شکل ۴-۳۰ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- جانبی در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s = 1000$, $\nu_s = 0.5$, $S/D = 3$) ۷۳
- شکل ۴-۳۱ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- محوری در راستای طول شمع برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s = 1000$, $\nu_s = 0.5$, $S/D = 3$) ۷۳
- شکل ۴-۳۲ نمودار بار- نشست محوری جهت صحت سنجی در حالت تماس اصطکاکی ۷۴
- شکل ۴-۳۳ نمودار بار- تغییر مکان جانبی جهت صحت سنجی در حالت تماس اصطکاکی ۷۵
- شکل ۴-۳۴ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- محوری بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ در دو حالت تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($\nu_s = 0.5$, $L/D = 25$) ۷۶
- شکل ۴-۳۵ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- جانبی بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ در دو حالت تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($\nu_s = 0.5$, $L/D = 25$) ۷۶
- شکل ۴-۳۶ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- محوری بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D در دو حالت تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($\nu_s = 0.5$, $E_p/E_s = 1000$) ۷۷
- شکل ۴-۳۷ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- جانبی بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D در دو حالت تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($\nu_s = 0.5$, $E_p/E_s = 1000$) ۷۸
- شکل ۴-۳۸ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- محوری بر حسب افزایش نسبت بار محوری به بار محدوده الاستیک برای مقادیر مختلف L/D در حالت تماس اصطکاکی ($\nu_s = 0.5$, $E_p/E_s = 1000$) ۷۸
- شکل ۴-۳۹ تغییرات ضریب اندرکنش محوری- جانبی بر حسب افزایش نسبت بار محوری به بار محدوده الاستیک برای مقادیر مختلف L/D در حالت تماس اصطکاکی ($\nu_s = 0.5$, $E_p/E_s = 1000$) ۷۹
- شکل ۴-۴۰ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- جانبی بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ در دو حالت تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($\nu_s = 0.5$, $L/D = 25$) ۸۰
- شکل ۴-۴۱ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- محوری بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف ψ در دو حالت تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($\nu_s = 0.5$, $L/D = 25$) ۸۰
- شکل ۴-۴۲ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- جانبی بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D در دو حالت تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($\nu_s = 0.5$, $E_p/E_s = 1000$) ۸۲
- شکل ۴-۴۳ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی- محوری بر حسب نسبت فاصله به قطر شمعها برای مقادیر مختلف L/D در دو حالت تماس کاملاً چسبیده و اصطکاکی ($\nu_s = 0.5$, $E_p/E_s = 1000$) ۸۲

شکل ۴-۴ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - جانبی برحسب افزایش نسبت بار جانبی به بار محدوده الاستیک برای مقادیر مختلف L/D در دو حالت سطح تماس اصطکاکی بدون امکان جدایش و همراه با جدایش ($\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ, \nu_s = 0.5, E_p/E_s = 1000$) ۸۳

شکل ۴-۴ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری برحسب افزایش نسبت بار جانبی به بار محدوده الاستیک برای مقادیر مختلف L/D در دو حالت سطح تماس اصطکاکی بدون امکان جدایش و همراه با جدایش ($\psi_1 = \psi_2 = 30^\circ, \nu_s = 0.5, E_p/E_s = 1000$) ۸۳

شکل ۵-۱ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s = 1000, L/D = 25, \nu_s = 0.4, S/D = 3$) ۹۲

شکل ۵-۲ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s = 1000, L/D = 25, \nu_s = 0.4, S/D = 3$) ۹۲

شکل ۵-۳ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف L/D ($E_p/E_s = 1000, \nu_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ$) ۹۳

شکل ۵-۴ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف L/D ($E_p/E_s = 1000, \nu_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ$) ۹۳

شکل ۵-۵ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف E_p/E_s ($L/D = 25, \nu_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ$) ۹۴

شکل ۵-۶ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف E_p/E_s ($L/D = 25, \nu_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ$) ۹۴

شکل ۵-۷ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف S/D ($E_p/E_s = 1000, L/D = 25, \nu_s = 0.4, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ$) ۹۵

شکل ۵-۸ تغییرات ضریب اندرکنش محوری - جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف S/D ($E_p/E_s = 1000, L/D = 25, \nu_s = 0.4, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ$) ۹۵

شکل ۵-۹ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s = 1000, L/D = 25, \nu_s = 0.4, S/D = 3$) ۹۶

شکل ۵-۱۰ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف ψ ($E_p/E_s = 1000, L/D = 25, \nu_s = 0.4, S/D = 3$) ۹۷

شکل ۵-۱۱ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف L/D ($E_p/E_s = 1000, \nu_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ$) ۹۸

شکل ۵-۱۲ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف L/D ($E_p/E_s = 1000, \nu_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ$) ۹۸

شکل ۵-۱۳ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف E_p/E_s ($L/D = 25, \nu_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ$) ۹۹

شکل ۵-۱۴ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف E_p/E_s ($L/D = 25, \nu_s = 0.4, S/D = 3, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ$) ۹۹

شکل ۵-۱۵ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - جانبی برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف S/D ($E_p/E_s = 1000, L/D = 25, \nu_s = 0.4, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ$) ۱۰۰

شکل ۵-۱۶ تغییرات ضریب اندرکنش جانبی - محوری برحسب فرکانس بدون بعد برای مقادیر مختلف S/D ($E_p/E_s = 1000, L/D = 25, \nu_s = 0.4, \psi_1 = \psi_2 = 30^\circ$) ۱۰۰

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 فشردگی 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 شمعی 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 به صورت گروهی به کار 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 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 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 شمعها 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 ارائه 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:

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

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

¹ - Poulos

² - 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].

۲-۲-۳) 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.

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

$$r_m = 2.5L(1 - \theta_s)$$

۲-۲-۴) 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.

^۱ - Poulos & Davis

^۲ - Mindlin

^۳ - Gazetas & Mylanokis

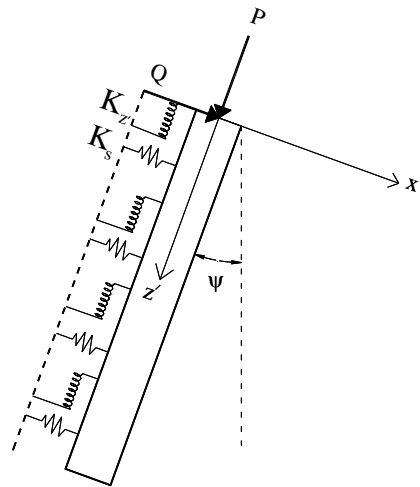
مبنای روابط مورد استفاده بر اساس روابط تعادل نیروهای وارد بر المانی از شمع و سپس استخراج معادلات دیفرانسیل حاصل از آن است. در این روش نیز با استفاده از تعریف ضریب اندرکنش جانبی و مدل پیوسته، معادله دیفرانسیل شمع بدون بار نوشته شده است و پس از حل این معادله و اعمال شرایط مرزی، تغییر مکان جانبی سر شمع بدون بار حاصل می‌شود که از این نسبت تغییر مکان به تغییر مکان جانبی شمع مرجع ضریب اندرکنش محاسبه می‌شود.

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

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

^۱ -Source Pile

^۲ -Receiver Pile

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

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

$$\Lambda = \sqrt{\frac{K_z}{E_p A_p}} \quad (۶-۲)$$

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

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

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

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

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 مرجع 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. این تغییرمکان در حالت بارگذاری محوری در راستای شمع مرجع و در حالت بارگذاری جانبی (عمود بر محور شمع مرجع) در راستای عمود بر شمع مرجع، طبق روابط ۲-۱۳ و ۲-۱۴ محاسبه می شوند. سپس طبق شکل ۲-۲ تغییرمکان های محاسبه شده، به دو مولفه یکی در راستای شمع دریافت کننده و دیگری عمود بر راستای شمع دریافت کننده تبدیل می شوند. روابط ۲-۱۱ و ۲-۱۲ به ترتیب توابع تبدیل تغییرمکان جانبی و نشست محوری شمع مرجع به تغییرمکان جانبی و نشست محوری سطح خاک، در فاصله s از شمع مرجع می باشند. s فاصله شعاعی از محور شمع