

چکیده:

امروزه استفاده از شمع جهت انتقال بار سازه، به خاک مناسب در اعماق پایین تر رو به افزایش است. کاربرد روز افزون شمع‌ها در سازه‌هایی نظیر سکوهاى نفتى ، توربین‌های بادی دریایی و دکل‌های مخابراتی، افزایش اهمیت چگونگی رفتار شمع‌ها را در پی دارد. در سال‌های اخیر رویکردهای جامع نظری برای پیش‌بینی تغییر مکان جانبی و یا لنگر توسعه داده شده‌اند. اگرچه پژوهشگران زیادی تعدادی منحنی و جدول برای ارجاع ارائه کرده‌اند، اما اکثر این موارد به راحتی قابل استفاده نیستند.

در روش‌های قدیمی، شمع‌های در معرض بارهای جانبی با استفاده از روش $p-y$ تحلیل می‌شوند. در روش $p-y$ خاک اطراف شمع به صورت فنرهای غیرخطی گسسته که تولید مقاومت در برابر تغییر شکل جانبی شمع می‌کنند، تقریب زده می‌شود. در این تحقیق با به کار گرفتن روش انرژی به تحلیل رفتار خاک و شمع تحت بار جانبی و لنگر سر شمع پرداختیم. به این ترتیب که انرژی مقاومتی خاک، در حالت الاستیک و پلاستیک، انرژی وارده به شمع و نیروهای وارده به سیستم با هم جمع شده و سپس طبق اصل انرژی پتانسیل حداقل سازی می‌شوند. برای دستیابی به مقدار جابه‌جایی پلاستیک نیز از روش $p-y$ مطابق با آیین‌نامه API استفاده شده است.

در این تحقیق پس از به دست آوردن راه حل تحلیلی برای حالت پلاستیک تحلیل حساسیت برای حالات مختلف بارگذاری و پارامترهای مختلف شمع و خاک صورت گرفته و به بررسی مقادیر جابه‌جایی و لنگر در سر شمع‌ها و در طول آن‌ها پرداخته شده است. در این بررسی، اثر طول و قطر شمع‌ها، مقدار نیرو و لنگر، اثر ضریب عکس‌العمل خاک، محاسبه شده و در قالب نمودار ارائه گردیده است. همچنین برای راه حل ارائه شده صحت سنجی با روش‌های عددی در دو حالت الاستیک و الاستو پلاستیک صورت گرفت، که مطابقت خوبی دارد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول ها.....	أ.....
فهرست شکل ها.....	ب.....
فصل ۱- مقدمه و کلیات	۱.....
۱-۱- مقدمه	۲.....
۱-۲- ضرورت تحقیق.....	۳.....
۱-۳- هدف تحقیق.....	۴.....
۱-۴- ساختار تحقیق.....	۴.....
فصل ۲- مروری بر ادبیات فنی و بررسی ماهیت رفتار الاستیک و پلاستیک خاک	۵.....
۲-۱- مقدمه	۶.....
۲-۲- مصالح الاستیک-پلاستیک	۷.....
۲-۳- مطالعات انجام شده	۸.....
۲-۳-۱- روش Rodrigo Salgado و Dipanjan Basu.....	۸.....
۲-۳-۲- روش C.Yang و San-Shyan lin.....	۱۰.....
۲-۳-۳- تئوری Yun-mei Hsiung.....	۱۵.....
۲-۳-۳-۱- مدل خاک وینکلر.....	۱۶.....
۲-۴- مروری بر روش تحلیل p-y شمع ها.....	۲۰.....

۲۰	۲-۴-۱-بارگذاری جانبی استاتیکی :
۲۹	فصل ۳- روش تحلیل
۳۰	۳-۱-راه حل تغییر
۳۱	۳-۱-۱-انرژی پتانسیل
۳۲	۳-۱-۲-مجموعه جابه‌جایی‌ها
۳۴	۳-۲-روش حل
۳۴	۳-۲-۱-حداقل سازی انرژی پتانسیل
۳۴	۳-۳-معادله برای حالت پلاستیک
۳۶	۳-۴-بدست آوردن مقدار u_z^* با استفاده از منحنی های $p-y$
۳۶	۳-۴-۱-روش منحنی‌های $p-y$
۳۶	۳-۴-۱-۱-ظرفیت باربری جانبی ماسه
۳۸	۳-۴-۲-منحنی‌های بار بر حسب جابه‌جایی ($p-y$) برای ماسه
۴۳	۳-۵-حل عددی معادله پلاستیک
۵۰	۳-۶-حل عددی و جاگذاری در برنامه Matlab
۵۲	۳-۷-صحت سنجی برنامه برای حالت الاستیک
۵۳	۳-۸-صحت سنجی برای حالت الاستو پلاستیک
۵۴	۳-۸-۱-ماسه با بار جانبی 400 kN
۵۵	۳-۸-۲-ماسه بار جانبی 500 kN

فصل ۴- تحلیل حساسیت ۵۷

۴-۱- مقدمه ۵۸

۴-۲- قطر شمع ۵۸

۴-۳- طول شمع ۶۱

۴-۴- نیرو جانبی وارد بر شمع ۶۲

۴-۵- لنگر وارد بر شمع ۶۴

۴-۶- تغییرات مدول عکس العمل بستر خاک: ۶۶

فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات ۶۹

۵-۱- نتایج ۷۰

۵-۲- پیشنهادات ۷۱

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲- حل ماکزیمم جابه‌جایی [28].....	۱۵
جدول ۲-۲- حل ماکزیمم لنگر [28].....	۱۶
جدول ۱-۳- مشخصات خاک و شمع.....	۴۰
جدول ۲-۳- سطرهای ماتریس سختی بدست آمده از تحلیل.....	۴۶
جدول ۳-۳- سطرهای ماتریس سختی بدست آمده از تحلیل.....	۴۸
جدول ۴-۳- مشخصات شمع و خاک به‌کار رفته در تحلیل.....	۵۱
جدول ۵-۳- مشخصات خاک و شمع به‌کار رفته در صحت‌سنجی الاستیک.....	۵۲
جدول ۶-۳- مشخصات خاک و شمع به‌کار رفته در صحت‌سنجی الاستوپلاستیک.....	۵۴
جدول ۱-۴- پارامترهای ورودی برای تحلیل تغییرات قطر شمع.....	۵۸
جدول ۲-۴- پارامترهای ورودی برای تحلیل تغییرات طول شمع.....	۶۱
جدول ۳-۴- پارامترهای ورودی برای تحلیل تغییرات نیروی جانبی وارد بر شمع.....	۶۲
جدول ۴-۴- پارامترهای ورودی برای تحلیل تغییرات لنگر وارد بر شمع.....	۶۵
جدول ۵-۴- پارامترهای ورودی برای تحلیل تغییرات مدول عکس‌العمل بستر خاک.....	۶۶

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲ : نمودار تنش- کرنش ماده در حالت یک بعدی و منطبق بر رفتار الاستوپلاستیک	۷
شکل ۲-۲- شمع و سیستم مختصات استوانه ای a- شمع و سیستم لایه خاک b- جابه جایی c- تنش [1].....	۱۱
شکل ۳-۲- مقایسه روش پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی برای خاک لایه ای [1].....	۱۳
شکل ۴-۲- شمع با بار جانبی [28].....	۱۵
شکل ۵-۲ : شمع نیمه محدود (a) و شمع طولی (b). [29].....	۱۸
شکل ۶-۲ : مدل بارگذاری جانبی شمع [32].....	۲۱
شکل ۷-۲ : منحنی API برای رس نرم [32].....	۲۱
شکل ۸-۲ : منحنی بار-جابه جایی برای شمع تک در خاک الاستوپلاستیک [33].....	۲۲
شکل ۹-۲ : ضریب اندرکنش برای یک ردیف شمع در خاک الاستوپلاستیک [33].....	۲۳
شکل ۱۰-۲ : تعریف مفهوم p-y با (a) شمع ساکن (b) شمع تحت بارگذاری جانبی همراه مقاومت بسیج شده خاک [35].....	۲۴
شکل ۱۱-۲ : مجموعه منحنی‌های p-y، افزایش سختی با زیاد شدن عمق [35].....	۲۵
شکل ۱۲-۲ : شکل اختصاصی منحنی p-y در رس نرم برای (a) بارگذاری استاتیک، (b) بارگذاری سیکلی [35].....	۲۶

- شکل ۲-۱۳ : 8 SPASM (a) مدل سازه‌ای شمع و خاک (b) تنوع در رفتار بار-تغییر شکل در مقابل عمق ۲۷
- شکل ۲-۱۴ : 8 SPASM (a) مدل فضای خالی بین شمع و خاک (b) رفتار نیرو-جاب‌جایی ۲۷
- شکل ۲-۱۵ : 8 SPASM مدل عنصر فرعی فنر غیر خطی ۲۸
- شکل ۳-۱ - پروفیل لایه خاک با تغییرات ممکن [38] ۳۰
- شکل ۳-۲ - نشانه گذاری برای سیستم شمع و خاک [38] ۳۱
- شکل ۳-۳ - منحنی رفتار الاستوپلاستیک شمع و خاک ۳۵
- شکل ۳-۴ - مدل بارگذاری جانبی شمع [35] ۳۶
- شکل ۳-۵ - ضرایب **C1, C2, C3** ۳۷
- شکل ۳-۶ - ضرایب بستر [40] ۳۹
- شکل ۳-۷ - نمودار p-y برای $H=5m$ ۴۱
- شکل ۳-۸ - نمودار p-y برای $H=10m$ ۴۱
- شکل ۳-۹ - نمودار p-y برای $H=20m$ ۴۱
- شکل ۳-۱۰ - نمودار p-y برای $H=30m$ ۴۲
- شکل ۳-۱۱ - نمودار p-y برای $H=40m$ ۴۲
- شکل ۳-۱۲ - نمودار p-y برای $H=50m$ ۴۲
- شکل ۳-۱۳ : نمودار تغییر شکل شمع با توجه به بارهای افقی سر شمع ۵۱
- شکل ۴-۱ : تغییرات جاب‌جایی در طول شمع برای حالتی که قطر شمع تغییر می‌کند. ۵۹

- شکل ۲-۴ : تغییرات لنگر در طول شمع برای حالتی که قطر شمع تغییر می کند ۶۰
- شکل ۳-۴ : تغییرات جابه جایی در طول شمع برای حالتی که طول شمع تغییر می کند..... ۶۱
- شکل ۴-۴ : تغییرات لنگر در طول شمع برای حالتی که طول شمع تغییر می کند..... ۶۲
- شکل ۵-۴ : تغییرات جابه جایی در طول شمع برای حالتی که بار جانبی وارد بر شمع تغییر می کند
(طول ۱۰ متر)..... ۶۳
- شکل ۶-۴ : تغییرات لنگر در طول شمع برای حالتی که بار جانبی وارد بر شمع تغییر می کند (طول
۱۰ متر)..... ۶۴
- شکل ۷-۴ : تغییرات جابه جایی در طول شمع برای حالتی که لنگر وارد بر شمع تغییر می کند
(طول ۱۰ متر)..... ۶۵
- شکل ۸-۴ : تغییرات لنگر در طول شمع برای حالتی که لنگر وارد بر شمع تغییر می کند (طول ۱۰
متر)..... ۶۶
- شکل ۹-۴ : تغییرات جابه جایی در طول شمع برای حالتی که مدول عکس العمل بستر خاک تغییر
می کند..... ۶۷
- شکل ۱۰-۴ : تغییرات لنگر در طول شمع برای حالتی که مدول عکس العمل بستر خاک تغییر
می کند..... ۶۸

فصل ۱ – مقدمه و کلیات

علیرغم پیشرفت چشمگیر علم مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک در دهه‌های اخیر، ارزیابی نسبتاً دقیق و نزدیک به واقعیت جابه‌جایی شمع و خاک هنوز با دشواری‌هایی همراه است. خواص فیزیکی و مکانیکی منحصر به فرد خاک مانند ناهمگونی، وجود آب، تنوع ترکیبات مختلف خاک در طبیعت، استعداد خزش، رفتار پیچیده تنش-کرنش از یک سو و تنوع شمع‌ها از لحاظ جنس مصالح، شکل مقاطع، روش‌های ساخت و استقرار و سایر موارد دیگر موجب پیچیدگی اندرکنش المان سازه‌ای شمع و خاک اطراف آن می‌گردند. لذا مدل کردن چنین شرایط پیچیده‌ای که متغیرهای مختلفی در آن تاثیر دارند، به سادگی میسر نیست. به همین دلیل پژوهشگران متعددی در دهه‌های گذشته تلاش در جهت ارائه روابط نظری یا تجربی مختلفی برای تعیین جابه‌جایی شمع و متعاقب آن جابه‌جایی خاک ارائه نموده‌اند.

در این راستا روش‌های مختلفی برای ارزیابی این جابه‌جایی‌ها وجود دارد که از آن‌ها می‌توان به استفاده از نرم‌افزارهای متعدد، استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی و در نهایت روش‌های قدرتمند اجزای محدود اشاره کرد.

در طراحی فونداسیون‌های شمع که قادر به مقاومت در برابر بارهای جانبی می‌باشند، مسئله عمده برای مهندسین معمولاً ظرفیت نهایی جانبی شمع‌ها نمی‌باشد، بلکه تغییر مکان و لنگر ماکزیمم شمع‌ها می‌باشد. تغییر مکان ماکزیمم معمولاً در قسمت بالای شمع رخ می‌دهد و این بطور بحرانی مربوط به ایمنی سازه‌ای می‌شود که دارد پشتیبانی می‌شود^۱. لنگر ماکزیمم در یک شمع و عمقی که آن رخ می‌دهد بستگی به سختی سیستم شمع-خاک و شرایط بارگذاری دارد. حالت تنش بیش از حد شمع زمانی رخ می‌دهد که لنگر از لنگر مجاز مصالح شمع تجاوز کند. از این‌رو مهم‌ترین کار برای

¹ Being Supported

مهندسين ژئوتكنيك پيش‌بيني دقيق تغييرمكان و لنگر ماكزيمم در فاز طراحي مي‌باشد [1].

معمولاً استفاده از روش المان محدود برای تحلیل شمع‌های جانبی بارگذاری شده که در طبیعت به صورت سه بعدی می‌باشند، زمان‌بر است. از اینرو دو روش اصلی، روش عکس‌العمل ساختار زمین^۱ (لین ۱۹۹۷ و ریس ۱۹۸۲) [2] و راهکار الاستیک (پولوس و دیویس ۱۹۸۰ و دیویس ۱۹۷۱) [3,4,5]، اغلب برای آنالیز شمع‌های در معرض بار جانبی استفاده می‌شوند. هر دو فنر خطی و غیرخطی می‌تواند با رویکرد عکس‌العمل ساختار زمین استفاده شود. با این حال، روش الاستیک خاک را بعنوان محیط پیوسته بجای فنرهای غیرمتصل که در روش عکس‌العمل ساختار زمین در نظر گرفته می‌شود، در نظر می‌گیرد. بعلاوه متغیرهای ورودی می‌توانند مستقیماً به خصوصیات خاک اندازه‌گیری شده مربوط شوند، مانند سفتی و مقاومت آن در مدل الاستیک پیوسته.

۱-۲- ضرورت تحقیق

در سال‌های اخیر رویکردهای جامع نظری برای پیش‌بيني تغييرمکان جانبی و یا لنگر توسعه داده شده‌اند. اگرچه پژوهشگران زیادی مانند برومز [6] و متلاک و ریس [7] تعدادی منحنی و جدول برای ارجاع ارائه کرده‌اند، اما این موارد براحتی قابل استفاده نیستند. هنگامی که با تسلیم خاک سروکار داریم، روش عددی باید به کار گرفته شود. به عنوان مثال رویکرد عکس‌العمل زیرساختی در روش المان محدود توسط باولز [8] که خاک را با مدل وینکلر در نظر می‌گیرد. رویکرد الاستیک که از روش تفاضل محدود استفاده و خاک را محیط پیوسته الاستیک ایده‌آل فرض می‌کند، توسط پولوس ۱۹۷۳ [5] ارائه شده است. معمولاً طراح یک برنامه کامپیوتری برای این نوع تحلیل انتخاب می‌کند. هسیونگ و چن ۱۹۹۷ [2] نشان دادند که ارتباط بار-ماكزيمم تغييرمکان و یا بار-ماكزيمم لنگر شمع‌های بلند که در معرض نیرو یا لنگر برای مدل تسلیم خاک وینکلر قرار

¹ Subgrade

گرفته‌اند، می‌توانند به یک منحنی تحت روش عکس‌العمل زیرساختی نرمالیزه شوند. از آنجایی که راهکارها بعد از یک سری عملیات عددی بدست می‌آیند، در این تحقیق از آن‌ها بعنوان راهکارهای عددی یاد می‌شود. با استفاده از این روش‌ها به ارائه یه روش تحلیلی مناسب برای پیش‌بینی تغییرمکان جانبی و یا لنگر می‌پردازیم.

۳-۱- هدف تحقیق

در این تحقیق، راهکارهای نظری تغییرشکل ماکزیمم و لنگر برای شمع‌های بلند در معرض بار جانبی در یک خاک با یک مدول عکس‌العمل بستر الاستیک-پلاستیک ارائه شده‌است. این راهکارها به‌صورت نمودار می‌باشند و محاسبات نسبتاً دقیق و ساده‌ای را برای تغییرمکان و لنگر در سه الگوی ضریب عکس‌العمل خاک فراهم می‌کنند. مقایسه‌ها بین راهکار نظری و یک راهکار عددی [39]، هماهنگی خوبی را نشان داد.

۴-۱- ساختار تحقیق

در فصل دوم این پایان‌نامه به بررسی متون فنی مرتبط با موضوع تحقیق، که عمدتاً شامل بررسی کارهای انجام‌شده در رابط با جابه‌جایی الاستیک و پلاستیک شمع می‌باشد، پرداخته می‌شود. در فصل سوم پایان‌نامه به ارائه روش تحلیل و صحت‌سنجی روش، پرداخته می‌شود. در فصل چهارم به تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مختلف موثر در روش تحلیلی ارائه شده پرداخته می‌شود. در فصل پنجم نیز به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات جهت تحقیقات آتی پرداخته می‌شود. در فصل ششم نیز به منابع و مراجع مورد استفاده در پایان‌نامه اشاره می‌شود.

فصل ۲- مروری بر ادبیات فنی و بررسی ماهیت رفتار

الاستیک و پلاستیک خاک

شمع تحت بار جانبی عموماً در کارهای مهندسی استفاده می‌شود، و یک سری روش‌های نظری برای این قبیل شمع‌ها به وجود آمده‌است. برای مثال با رویکرد واکنش بستر باربر (۱۹۵۳) [9]، مت لوک و ریز (۱۹۷۷) [10] و با رویکرد الاستیک پیوسته پولوس و داویز (۱۹۸۰) [5]، زانگ و اسمال (۲۰۰۰) [11] و شن و ته (۲۰۰۲) [12] یک سری روش‌هایی برای تحلیل شمع تحت بار جانبی ارائه داده‌اند. این روش‌هایی که ذکر شده‌اند، به‌رحال نیازمند برنامه‌های کامپیوتری عددی کاملی می‌باشند و همین باعث شده‌است، برای کارهای مهندسی در طراحی عمومی این روش‌ها از مقبولیت کمتری برخوردار باشند.

شمع‌ها علاوه بر مقاومت فشاری و کششی، یک مقاومت جانبی نیز دارند. بین بار محوری و بار جانبی در شمع تفاوت وجود دارد. به‌رحال حتی تحت یک بار گذاری محوری حرکات جانبی شمع نیز مهم است. از اینرو طراحی فونداسیون‌های شمعی برای بار گذاری جانبی یکی از بزرگترین نگرانی‌های مهندسی است که ظرفیت نهایی جانبی شمع را نمی‌دانند ولی جابه‌جایی ماکزیمم و لنگر ماکزیمم شمع را محاسبه می‌کنند. ماکزیمم جابه‌جایی معمولاً در بالای شمع جایی که بحرانی است، اتفاق می‌افتد. ایمنی سازه تکیه‌گاهی در یک شمع انتها آزاد، تحت بار جانبی معمولاً در عمقی اتفاق می‌افتد که ۰٫۴ تا ۰٫۱ برابر طول شمع زیر سطح هستند [8]. این بستگی به سختی نسبی بین شمع و خاک و شرایط بارگذاری دارد. شمع زمانی به تنش بیش از حد مجاز می‌رسد که لنگر ماکزیمم بیشتر از لنگر مجاز مصالح شمع باشد. از اینرو برای مهندسین خاک بسیار مهم است تا پیش‌بینی درستی در طول مراحل طراحی جایی که جابه‌جایی و لنگر خمشی در شمع اتفاق خواهند افتاد، داشته باشند.

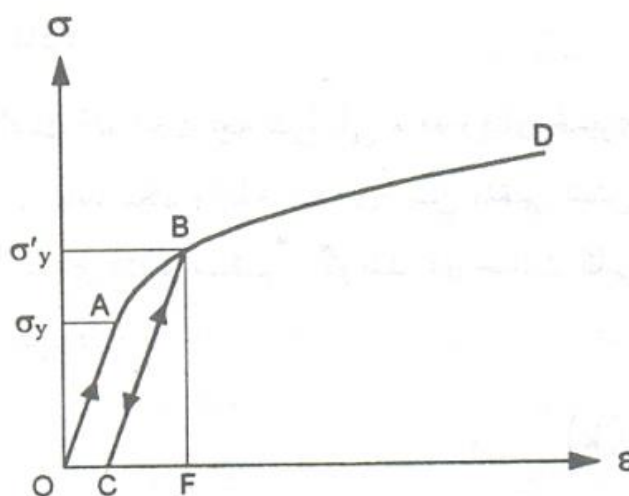
اگرچه رویکردهای وسیع نظری برای تحلیل رفتار شمع‌های با بار جانبی در سال‌های اخیر توسعه یافته‌است. تمام این روش‌ها محدودیت دارند، به طور مثال اگر خاک در نظر گرفته شده توده الاستیک فرض شود. شکل‌های محاسبات ساده خواهند شد، اما تغییر شکل پلاستیک خاک را نمی‌توان در نظر

گرفت [13].

اما رفتار واقعی خاک‌ها جدا از یک توده الاستیک است. اگر خاک به صورت مصالح الاستوپلاستیک در نظر گرفته شود که بیشتر رفتار واقعی خاک را مدل می‌کند، در این صورت این روش‌های تحلیل بسیار پیچیده خواهند شد که نیازمند تحلیل‌های کامپیوتری می‌باشد [13].

۲-۲- مصالح الاستیک-یلاستیک

شکل ۱-۲ رفتار تنش-کرنش ماده را در حالت یک بعدی نشان می‌دهد. مطابق این شکل، رفتار ماده تا نقطه A به صورت الاستیک و خطی بوده و بعد از آن چنانچه کرنش تا حد نقطه F افزایش یابد، تنش به میزان σ'_y (معادل نقطه B در شکل) خواهد رسید. در صورتی که از نقطه B باربرداری آغاز شود، پس از حذف کل بار وارده، کرنش معادل CF به ماده بازگشت نموده و کرنشی معادل پاره‌خط OC در آن باقی خواهد ماند. اگر از نقطه C، سیستم مجدد بارگذاری شود، رفتار ماده تا حد تنش σ'_y به صورت الاستیک و خطی بوده و سپس از یک رابطه غیر خطی طبیعت می‌کند. در واقع در این حالت از یک دوره باربرداری و بارگذاری مجدد، تنش تسلیم ماده از σ_y به σ'_y رسیده و جسم سخت‌تر گردیده‌است.



شکل ۱-۲: نمودار تنش-کرنش ماده در حالت یک بعدی و منطقه بر رفتار الاستوپلاستیک

به این گونه مصالح که حد تسلیم آنها باربرداری و بارگذاری‌های مجدد، افزایش یا کاهش می‌یابد، مصالح الاستو-پلاستیک یا کشسان-خمیری گویند. قانونی که روند افزایش سطح تنش تسلیم مصالح از آن تبعیت می‌کند قانون سخت شدگی^۱ و قانونی که روند کاهش سطح تنش تسلیم از آن پیروی می‌کند قانون نرم‌شدگی^۲ نام دارد. در این حالت کرنش کل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad ۱-۲$$

در این رابطه:

$$\varepsilon = \text{کرنش کل}$$

$$\varepsilon^e = \text{کرنش الاستیک}$$

$$\varepsilon^p = \text{کرنش پلاستیک}$$

۲-۳- مطالعات انجام شده

۲-۳-۱- روش Rodrigo Salgado و Dipanjan Basu^۱

Dipanjan Basu و Rodrigo Salgado تحلیلی جدید برای محاسبه پاسخ شمع‌های بارگذاری شده بطور جانبی در حوزه الاستیک چند لایه بسط داده‌اند. معادلات دیفرانسیل حاکم بر تغییر شکل شمع در لایه‌های متفاوت خاک با استفاده از قوانین انرژی و راهکارها به صورت تحلیلی بدست می‌آیند. حوزه تغییر مکانی در خاک اطراف شمع طوری در نظر گرفته می‌شود که از توابع مستقلی که در جهات عمودی، شعاعی و جانبی تغییر می‌یابند، حاصل شود. پارامترهای ورودی

^۱ - Hardening Law

^۲ - Softening Law

موردنیاز برای آنالیز عبارتند از هندسه شمع، مقطع عرضی خاک و ثابت‌های الاستیک خاک و شمع. این روش نتایج با دقت قابل مقایسه با دقت روش المان محدود سه‌بعدی تولید می‌کند اما نیازمند زمان محاسباتی خیلی کمتری می‌باشد [14,15,16].

با در نظر گرفتن خاک اطراف شمع بعنوان محیط پیوسته سان ۱۹۹۴ [17]، ژانگ و همکاران ۲۰۰۰ و گوئو و لی ۲۰۰۱ [18] راه‌حل‌های فرم بسته را بر اساس الاستیسیته خطی که می‌تواند برای بدست آوردن تغییرشکل جانبی شمع با عمق استفاده شود، توسعه دادند. تحلیل‌های آنها جنبه‌های سه بعدی اندرکنش سیستم خاک-شمع را می‌گیرد و نتایج را به سرعت تولید می‌کند، که در عمل بسیار به صرفه است. با این وجود، این مولفان فرض کردند که تغییرات جابه‌جایی‌ها در جرم خاک به همان تابع جابه‌جایی برای هر دو جهت شعاعی و پیرامونی بستگی دارد. این به پاسخی از سازه که از حالت واقعی سخت‌تر می‌باشد منجر می‌شود. در این تحقیق بسط تحلیل براساس حالت پیوسته شمع منفرد بطور جانبی بارگذاری شده، که اندرکنش سه بعدی خاک-شمع را می‌گیرد و پاسخ نیمه تحلیلی شمع با حفظ سطح دقت روش سه بعدی المان محدود ولی با زمان محاسباتی کمتر را تولید می‌کند، طرح‌ریزی شده است. معادلات دیفرانسیل حاکم برای جابه‌جایی‌های شمع و خاک با استفاده از اصول تغییرپذیر توسعه داده می‌شوند. راه‌حل‌های فرم بسته برای تغییرشکل شمع بدست می‌آیند، این در حالی است که تغییر مکان‌های خاک با استفاده از روش یک‌بعدی تفاضل محدود بدست می‌آیند [16].

یک روش تحلیل پیشرفته برای شمع تک دایروی که در محیط الاستیک چندلایه مدفون شده است و در معرض یک نیروی افقی و یک لنگر در سر شمع قرار دارد، ارائه شده است. معادلات دیفرانسیل حاکم بر تغییرشکل شمع و جابه‌جایی خاک از قوانین انرژی حاصل شده‌اند. معادله جابه‌جایی شمع بصورت تحلیلی حل شده است، در حالیکه روش یک‌بعدی تفاضل محدود برای حل معادلات جابه‌جایی خاک استفاده شده است. راهکار بسیار سریع است و نتایج قابل مقایسه با تحلیل

المان محدود سه بعدی بدست می دهد. با استفاده از این روش تغییر مکان شمع، شیب منحنی تغییر شکل، لنگر خمشی و نیروی برشی برای کل طول شمع می تواند بدست آید اگر موارد زیر موجود باشند: شعاع و طول شمع، ضخامت لایه های خاک، مدول یانگ متریال شمع، ثابت های الاستیک خاک در لایه های متفاوت و مقادیر نیرو و لنگر اعمالی [16].

این راهکار به یک سری از پارامترها γ_1 تا γ_6 که نرخ جابه جایی های زائل شده در محیط خاک با افزایش فاصله شعاعی از محور شمع را تعیین می کند، وابسته است. این پارامترها از راه قیاسی شناخته نمی شوند و باید از راه تکرار تعیین شوند. از اینرو یک طرح تکراری برای تعیین راهکارهای تغییرات شرایط مرزی و مقاطع عرضی خاک توسعه داده شد. با وجود تکرار در مقادیر γ نتایج در چند ثانیه بدست آمد [16].

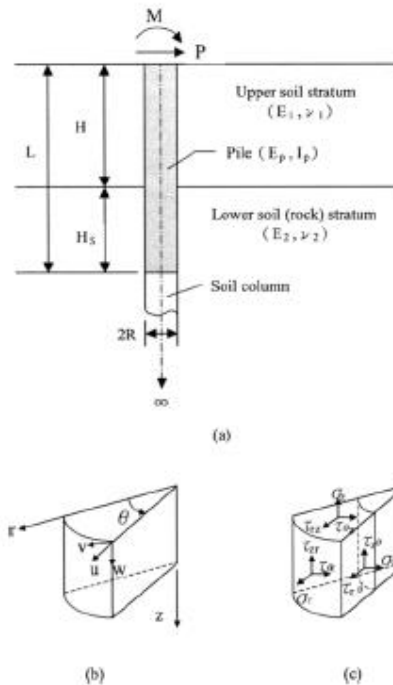
توصیفات استفاده از این تحلیل برای خاک های لایه ای نشان می دهد که لایه دار کردن خاک اثر مشخصی بر پاسخ شمع می گذارد. از اینرو برای پیش بینی دقیق پاسخ جانبی شمع توصیف اختصاصی سایت و بررسی صریح لایه های مختلف خاک لازم می باشد. تحلیل حاضر قادر به تولید پاسخ شمع با در نظر گرفتن کامل لایه های خاک می باشد [16].

۲-۳-۲- روش C.Yang و San-Shyan lin

Lin و Yang یک روش تحلیلی برای آنالیز شمع های بارگذاری جانبی شده در سیستم خاک الاستیک بررسی کرده اند. در این فرایند از روش تغییر پذیری^۱ برای بدست آوردن معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم خاک و شمع استفاده می شود. خصوصیات بنیادی و مهم به یک پارامتر اندرکنش γ برای لایه های خاک محدود می شوند. پارامتر γ زوال تنش در خاک به دور از شمع را کنترل میکند. هر دو حالت سر آزاد و گیردار شمع می تواند در نظر گرفته شود. نتایج بدست آمده از روش مذکور با نتایج

¹ Variational Method

آزمایشگاهی و نظری حاصل از پژوهشگران دیگر مقایسه می‌شود [1].



شکل ۲-۲- شمع و سیستم مختصات استوانه ای a- شمع و سیستم لایه خاک b- جابه‌جایی c- تنش [1].

در روش‌های قدیمی، شمعی‌های در معرض بارهای جانبی با استفاده از روش $p-y$ تحلیل می‌شوند (ریس و ون‌ایمپ ۲۰۰۱). [7] در روش $p-y$ خاک اطراف شمع به‌صورت فنرهای غیرخطی گسسته که تولید مقاومت در برابر تغییر شکل جانبی شمع می‌کنند، تقریب زده می‌شود (مدل می‌شود). مدل فنر مدل بسیار ساده شده اندرکنش پیچیده خاک-شمع می‌باشد چرا که روش $p-y$ اغلب نمی‌تواند رفتار واقعی ناحیه را پیش‌بینی کند (کیم و همکاران ۲۰۰۴، اندرسون و همکاران ۲۰۰۳). [19,20] روش‌های عددی براساس محیط پیوسته (راندلف ۱۹۸۱، وریوت و کویجمن ۱۹۸۹) [21] بخصوص روش المان محدود سه بعدی (تروکانیس و همکاران ۱۹۹۱)، [22] از لحاظ در نظر گرفتن اندرکنش خاک-شمع به روش $p-y$ برتری دارند. اما روش‌های عددی سه بعدی بسیار گران هستند و در طراحی عادی و روتین نمی‌توانند استفاده شوند.

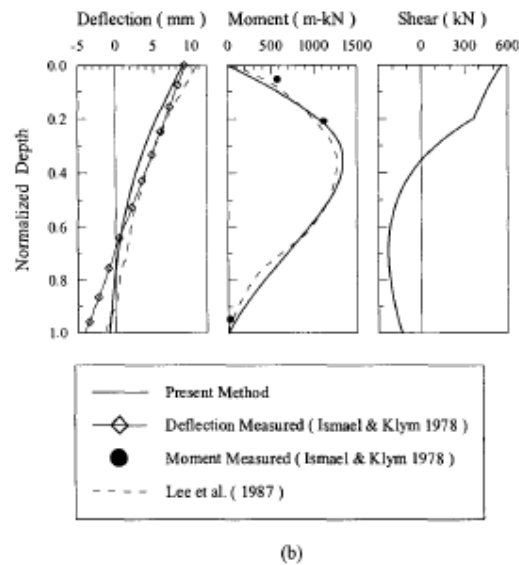
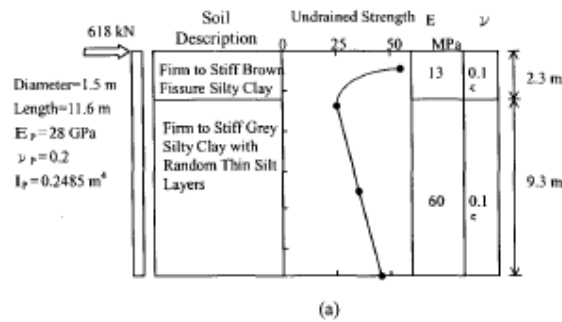
اکثر راهکارهای الاستیک موجود (پولوس و دیویس ۱۹۸۰ و اسکات ۱۹۸۱) [4,23] یک شمع مدفون در یک لایه منفرد سیستم خاک همگن را در نظر می‌گیرند. از آنجایی که شمع‌ها اغلب در صخره قرار می‌گیرند یا در یک مصالح ثابت مدفون می‌شوند، یک روش که شمع‌ها را در یک محیط خاک لایه‌ای در نظر بگیرد قسمت مهمی از تحلیل فونداسیون شمع به شمار می‌رود. تحلیل دیویسون و گیل ۱۹۶۳ [24] بر اساس مدل عکس‌العمل زیرساختی بود که کاملاً رضایت‌بخش نبود. پاپس ۱۹۸۲ [25] معادله میندلین را برای مطالعه اثر لایه‌بندی خاک بر رفتار خاکهای جانبی بارگذاری شده بکار گرفت. محل لنگر خمشی ماکزیمم ارزیابی نشد. وریوت و کویچمن ۱۹۸۹ [26] از روش المان محدود برای تحلیل شمع‌های جانبی بارگذاری شده در یک محیط الاستیک لایه‌ای استفاده کردند. لی و همکاران ۱۹۸۷ نظریه چان و همکاران ۱۹۷۴ را که راهکاری فرم بسته برای نیرو در یک نقطه از قسمت میانی نیم فضای لایه‌ای الاستیک بود، برای مطالعه مسئله شمع‌های جانبی بارگذاری شده در خاک لایه‌ای را توسعه دادند [1].

هدف از این تحقیق ارائه یک مدل نیمه تحلیلی برای شمع‌های جانبی بارگذاری شده در یک خاک الاستیک دو بعدی می‌باشد. ایده اصلی روش ولاسو، که در تحلیل استاتیکی یک تیر بر روی بستر الاستیک (اسکات ۱۹۸۱ و جونز و خنوفونتوس ۱۹۸۹ و والابان و داس ۱۹۹۱)، [23] یا شمع‌ها در نیم فضای الاستیک (سان ۱۹۹۴ و سان ۱۹۹۳) [27] استفاده شده‌است، در این تحقیق نیز پذیرفته می‌شود. اما این ایده اصلی طوری توسعه یافت که شمع‌ها را در شرایط خاک دولایه در نظر بگیرد. معادلات دیفرانسیل حاکم بر اساس روش تغییر پذیر بدست می‌آیند. پارامتر مهم اندرکنش γ برای نمایش بستر خاک استفاده می‌شود. پارامتر γ زوال تنش را در خاک به‌دور از شمع کنترل می‌کند. شرایط مرزی متفاوت نوک شمع در تحلیل در نظر گرفته می‌شود. چند نمونه برای مطالعه اعتبارسنجی و کاربردی بودن روش حاضر ارائه می‌شود. نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی بدست آمده توسط پژوهشگران دیگر مقایسه می‌شود [1].

معادله اسکات ۱۹۸۱ براساس روش تئوری مینیمم انرژی پتانسیل:

$$\delta U_p = E_P I_P \int_0^L \frac{d^2 F}{dz^2} \delta \frac{d^2 F}{dz^2} dz \quad ۲-۲$$

$$= E_P I_P \int_0^H \frac{d^2 F_1}{dz^2} \delta \frac{d^2 F_1}{dz^2} dz + E_P I_P \int_H^L \frac{d^2 F_2}{dz^2} \delta \frac{d^2 F_2}{dz^2} dz.$$



شکل ۲-۳- مقایسه روش پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی برای خاک لایه ای [۱].

نتیجه‌هایی که از این تحقیق گرفته‌اند به طور خلاصه شامل موارد زیر است:

یک رویکرد با استفاده از روش تغییر پذیری برای آنالیز رفتار شمع در یک خاک دولایه وقتی که شمع در معرض نیروهای جانبی و لنگرهای موجود در نوک شمع می‌باشد، بکار گرفته شده است. کاربرد مدل ولاسو برای شمع‌ها در یک خاک دولایه با ارزیابی پارامتر γ ، که زوال تنش در خاک بدور از شمع را کنترل میکند، افزایش یافته است. بعلاوه فرایندی محاسباتی ارائه شده است. همچنین روش پیشنهادی برای تفسیر تست بار یک ناحیه همانطور که در تاریخچه ادبی¹ گزارش شده است، اعمال شده است. بعلاوه اثرات پارامترهای مختلف بر جابه‌جایی نوک شمع، خمش ماکزیمم و محل لنگر ماکزیمم برای یک شمع با $L/D=25$ به ترتیب با راهکارهای موجود مقایسه شده و بررسی شده است. با استفاده از رویکردهایی که در این مقاله توضیح داده شد، پاسخ الاستیک شمع در یک سیستم خاک دولایه شامل جابه‌جایی، چرخش، خمش و نیروی برشی به راحتی می‌توانند محاسبه شوند.

اما این تکنیک پیشنهادی در تحقیق دارای محدودیت‌های زیر می‌باشد:

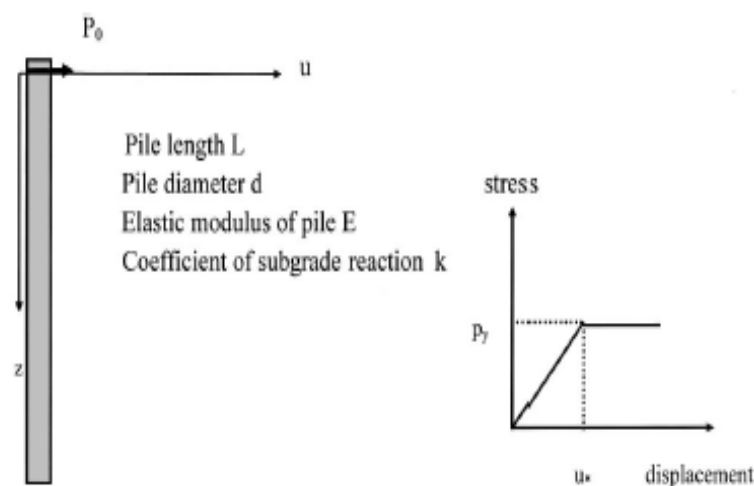
مکانیزم اعمال شده به تغییر شکل‌های شمع تنها تحلیل یک شمع بلند را بیان میکند. لایه سوم خاک برای طول شمع با سختی خمشی کمتر طول توسعه یافته‌ای (اضافی) فرض می‌کند. این موضوع از مقاومت نوک شمع می‌کاهد و باعث می‌شود که شمع مانند یک شمع بلند پاسخ دهد.

- ملاحظه می‌شود که رابطه ثابتی بین مقادیر مدول یانگ لایه‌های خاک وجود دارد ($E1/E2$). از اینرو تکنیک ارائه شده یک تحلیل ساده الاستیک خطی می‌باشد.
- طی فرایند بارگذاری، نسبت $E1/E2$ ثابت نیست و بدون هیچ روند خاصی تغییر میکند. ممکن است که تعیین مقدار مدول یانگ سکانت برای هر لایه خاک و نسبت وابسته $E1/E2$ در هر گام بارگذاری مشکل باشد [1].

¹ literature

یون یک راهکار (پاسخ) نظری الاستیک-پلاستیک برای شمع‌های در معرض بار جانبی ارائه داده است. در این تحقیق راهکار نظری (تئوری) تغییرمکان و لنگر ماکزیمم برای شمع‌های بلند تحت بار جانبی در یک مدول یکنواخت عکس‌العمل زیرساختی تسلیم خاک وینکلر ارائه شده‌است. مقایسات بین راهکار عددی و نظری نیز ارائه شده‌است [28].

$$EI \frac{d^4 u}{dz^4} + k \times u = 0 \quad ۳-۲$$



شکل ۴-۲- شمع با بار جانبی [28].

جدول ۱-۲- حل ماکزیمم جابه‌جایی [28].

Pile head	Loading condition	Numerical equation	Theoretical equation	Load factor	Deflection factor
Free	P_0	$y_p = \frac{x_u}{0.32x_u + 0.66}$	$x_u = \frac{1}{2} + \frac{y_p}{3} + \frac{y_p^4}{6}$	$P_c = 2EI\lambda^3 u_*$	u_*
Free	M_0	$y_m = \frac{x_u}{0.15x_u + 0.87}$	$x_u = \frac{1}{2} + \frac{y_m^2}{2}$	$M_c = 2EI\lambda^2 u_*$	u_*
Fixed	P_0	$y_{pf} = \frac{x_u}{0.37x_u + 0.67}$	$x_u = 1 + \frac{1}{6}t^4 - \frac{2}{3}y_{pf}t^2 + 2y_{pf}t^2(1+t) - t^2(1+t)^2$ relation of y_{pf} and t shows in Fig. 5	$P_c^f = 4EI\lambda^3 u_*$	u_*

$x_u = \frac{u_0}{u_*}$; $y_p = \frac{P_0}{P_c}$; $y_m = \frac{M_0}{M_c}$; $y_{pf} = \frac{P_0}{P_c^f}$

جدول ۲-۲- حل ماکزیمم لنگر [28].

Pile head	Loading condition	Numerical equation	Theoretical equation	Load factor	Moment factor
Free	P_0	$y_p = 1.10x_{m1}^{0.52}$	$x_{m1} = \frac{e^{-\arctan((2-y_p)/y_p)}}{(0.3224)(2)} \sqrt{4-4y_p+2y_p^2}$ for $y_p \leq 2$ $x_{m1} = \frac{6.2y_p^2}{8}$ for $y_p \geq 2$	$P_c = 2EI\lambda^3 u_*$	$M_{mc} = \frac{0.3224P_c}{\lambda}$
Free	M_0	$y_m = x_{m2}$	$x_{m2} = y_m$	$M_c = 2EI\lambda^2 u_*$	$M_c = 2EI\lambda^2 u_*$
Fixed	P_0	$y_{pf} = 1.07x_{m3}^{0.54}$	$x_{m3} = 2y_{pf}(1+t) - (1+t)^2$ relation of y_{pf} and t shows in Fig. 5	$P_c^f = 4EI\lambda^3 u_*$	$M_{mc}^f = \frac{0.5P_c^f}{\lambda}$
$x_{m1} = \frac{M_m}{M_{mc}}; \quad x_{m2} = \frac{M_m}{M_c}; \quad x_{m3} = \frac{M_m}{M_{mc}^f}; \quad y_p = \frac{P_0}{P_c}; \quad y_m = \frac{M_0}{M_c}; \quad y_{pf} = \frac{P_0}{P_c^f}$					

۲-۳-۱- مدل خاک وینکلر

در مدل خاک وینکلر برای بارگذاری جانبی، فشار P و جابه‌جایی u در نوک فرض می‌شود و با مدول واکنش بستر K_h ، رابطه دارد:

$$P = K_h u \quad ۲-۴$$

جایی که

- K_h نیرو بر متر در توان ۳ است.
- شمع معمولاً به صورت قطعه باریک فرض می‌شود.
- رفتاری شبیه به معادلات تیر در مکانیک سازه.

معادله ۲-۵ معادلات حاکم برای جابه‌جایی یک شمع با بارگذاری جانبی:

$$E_p I_p \frac{d^4 u}{dz^4} + K_h u = 0 \quad ۲-۵$$

جایی که

$$\begin{aligned} E_p &= \text{مدول الاستیک شمع} \\ I_p &= \text{ممان اینرسی مقطع شمع} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z &= \text{عمق خاک} \\ d &= \text{عرض یا قطر شمع} \end{aligned}$$

تحلیل رفتار شمع با استفاده از رویکرد واکنش بستر نیازمند یک آگاهی از تغییرات K_h در طول شمع است. چندین توزیع برای K_h بیان شده است. بیشترین فرضیات رایج این هست که ضریب واکنش بستر با عمق افزایشی به صورت خطی برای رس عادی تحکیم یافته دارد و برای رس پیش تحکیم یافته این تغییرات ثابت است [13].

راه حل دوم برای K_h ثابت با عمق در شکل محدودی برای یک شمع بوسیله هتنی (۱۹۴۶) بدست آمده است [29]. بار جانبی P_0 اعمالی برای یک شمع با انتها آزاد در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. راه حل های هتنی برای ماکزیمم لنگر و ماکزیمم جابه جایی برای یک شمع نیمه محدود به صورت زیر است:

$$u_{\max} = \frac{P_0}{2E_p I_p \lambda^3} \quad ۶-۲$$

$$M_{\max} = 0.3224 \frac{P_0}{\lambda} \quad ۷-۲$$

جایی که مقدار شاخص λ به صورت رابطه سختی بین شمع و خاک بیان می شود.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{K_h d}{4E_p I_p}} \quad ۸-۲$$