



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران مرکزی

دانشکده دانشکده فنی و مهندسی ، گروه مهندسی عمران

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد (M.Sc)

گرایش : ژئوتکنیک

عنوان :

شبیه سازی رفتار شمع های مماسی و تعیین اندر کنش بین آنها

استاد راهنما :

دکتر حسن قاسم زاده

استاد مشاور :

دکتر سید محمد فرید آستانه

پژوهشگر:

محمد علی حیدری

تابستان ۱۳۹۳

چکیده:

در بسیاری از پروژه های ساختمانی لازم است که زمین به صورتی خاکبرداری شود که جداره های آن قائم یا نزدیک به قائم باشد. فشار جانبی وارد بر این جداره ها ناشی از رانش خاک بر اثر وزن خود آن، و نیز سر بار های احتمالی روی خاک کنار گود می باشد. یکی از روشهای متداول در پایداری و حفاظت جداره ها با شرایط متنوع اعم از زمین سخت و زمین های سست و نرم استفاده از شمع های درجا می باشد. که در بسیاری موارد به جهات فنی و اقتصادی بر سایر روش های موجود ارجحیت دارد. و به همین جهت است که امروزه استفاده از دیواره های شمعی بمنظور ایجاد پایداری جانبی گودبرداری به تنهایی و در ترکیب با سایر روش ها بسیار رایج می باشد. در این حالت شمع ها غالباً به صورت گروهی به کار می روند. در گروه شمع، فاصله بین شمع ها کم بوده و شمع ها در محدوده تاثیر یکدیگر قرار گرفته و اندرکنش بین شمع ها وجود دارد. بنابراین برای بررسی گروه شمع های مماسی علاوه بر در نظر گرفتن رفتار شمع تحت اثر بارهای جانبی وارد، نحوه تاثیر پذیری شمع ها از یکدیگر نیز می بایست در نظر گرفته شود. چگونگی عملکرد شمع ها تحت بارهای جانبی و تخمین اثرات اندرکنش شمع- خاک- شمع بر عملکرد آن ها یکی از موارد پیچیده در مسایل مدل سازی شمع ها می باشد. در تحقیقات انجام شده در زمینه اندرکنش شمع- خاک - شمع، باتوجه به محدودیت روش های استفاده شده، وجود فرضیات ساده کننده ناگزیر بوده است، بنابراین برای درک صحیح و واقعی از رفتار اندرکنش شمع- خاک- شمع نیاز است تا با روشی قدرتمند از فرضیات ساده کننده بکاهیم. تحقیق حاضر به روش عددی اجزاء محدود انجام گرفته است. در این تحقیق به تعیین ضریب اندرکنش شمع - خاک - شمع برای شمع های موجود در دیواره گودبرداری تحت بار جانبی استاتیکی پرداخته شده است. خاک به صورت محیط پیوسته و با مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهركلمب در نظر گرفته شده و امکان ایجاد جدایش و لغزش بین شمع و خاک فراهم شده است. شمع ها از جنس بتن و با مدل رفتاری الاستیک فرض شده اند. همچنین و تاثیر پلاستیک شدن خاک بر روی ضرایب اندرکنش، محاسبه شده و در قالب نمودار ارائه شده است.

در این تحقیق پس از بررسی ابعاد مناسب محیط مدل و تعیین نحوه درست المان بندی، با مدل سازی گود و شمع های موجود در دیواره گود و پس از آن اجرای گودبرداری، به بررسی مقادیر جابجایی در سر شمع ها پرداخته شد. در مرحله بعد با اعمال بار به سر شمع به بررسی نشست در سر شمع ها و در طول آنها پرداخته شد. در این بررسی، اثر نسبت پواسون خاک، زاویه اصطکاک داخلی خاک، چسبندگی خاک، نسبت فاصله به قطر شع ها، و نسبت لاغری شمع ها و سختی نسبی شمع و خاک بر روی رفتار شمع ها و ضرایب اندرکنش، محاسبه شده و در قالب نمودار ارائه شده است.



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران مرکزی

دانشکده دانشکده فنی و مهندسی ، گروه مهندسی عمران

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد (M.Sc)

گرایش : ژئوتکنیک

عنوان :

شبیه سازی رفتار شمع های مماسی و تعیین اندر کنش بین آنها

استاد راهنما :

دکتر حسن قاسم زاده

استاد مشاور :

دکتر سید محمد فرید آستانه

پژوهشگر:

محمد علی حیدری

فهرست مطالب

فصل ۱) پیش گفتار	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۱-۱ شمع های مماسی	۳
۲-۱ بیان مساله	۴
۳-۱ هدف پایان نامه	۵
۴-۱ ساختار پایان نامه	۶
فصل ۲) مروری بر ادبیات موضوع	۷
۱-۲ مقدمه	۸
۲-۲ بررسی شمع های منفرد تحت اثر بارهای جانبی	۹
۱-۲-۲ روش حالت حدی	۱۰
۱-۲-۲-۱ روش های مرسوم استاتیکی	۱۰
۲-۲-۲-۱ تئوری برامز	۱۰
۳-۲-۲ روش انستیتو تحقیقات نفتی امریکا	۱۳
۲-۲-۲ روش عکس العمل بستر	۱۳
۳-۲-۲ روش الاستیک	۱۸
۴-۲-۲ روش بار شاخص	۱۹

- ۲۵.....۵-۲-۲ روش بار -تغییر شکل ($P-Y$).....
- ۲۵.....۱-۵-۲-۲ عکس العمل خاک در مقابل بار جانبی شمع.....
- ۲۸.....۲-۵-۲-۲ عکس العمل خاک در تغییر مکان جانبی خاک:.....
- ۲۹.....۳-۵-۲-۲ بررسی شکل منحنی $p-y$
- ۳۰.....۴-۵-۲-۲ روشهای تجربی در بدست آوردن منحنی $p-y$
- ۳۳.....۶-۲-۲ روش های عددی.....
- ۳۶.....۳-۲ اندرکنش شمع - خاک - شمع تحت بار جانبی استاتیکی.....
- ۳۷.....۱-۳-۲ روش پیوسته.....
- ۳۸.....۲-۳-۲ مدل اندرکنش وینکلر.....
- ۳۸.....۳-۳-۲ روش بار واحد انتقالی اصلاح شده.....
- ۳۸.....۴-۳-۲ مدل سختی تجربی.....
- ۳۹.....۵-۳-۲ روش ضریب کاهش گروه.....
- ۳۹.....۶-۳-۲ مدل هیبرید.....
- ۴۰.....۷-۳-۲ روش اجزا محدود.....
- ۴۱.....۸-۳-۲ روش تحلیلی.....
- ۴۳.....۴-۲ جمع بندی و نتیجه گیری.....
- ۴۵.....فصل ۳) معرفی نرمافزار و مراحل مدلسازی.....
- ۴۶.....۱-۳ مقدمه.....

۴۷.....	۲-۳ انتخاب نرمافزار.....
۴۷.....	۳-۳ معرفی نرمافزار ABAQUS.....
۴۷.....	۱-۳-۳ الگوریتم حل مسائل با نرمافزار ABAQUS.....
۴۹.....	۲-۳-۳ روش حل اجزاء محدود.....
۵۰.....	۴-۳ مراحل مدلسازی عددی.....
۵۰.....	۱-۴-۳ مدلسازی شمع و خاک.....
۵۰.....	۲-۴-۳ مدل رفتاری مورد استفاده.....
۵۱.....	۳-۴-۳ سطح تماس شمع و خاک.....
۵۳.....	۵-۴-۳ مرزهای مدل.....
۵۴.....	۷-۴-۳ اعمال تنشهای اولیه.....
۵۵.....	۸-۴-۳ مراحل تحلیل.....
۵۵.....	۱۰-۴-۳ المانبندی و اندازه المانها.....
۵۹.....	۱-۴ مقدمه.....
۵۹.....	۲-۴ تعریف مساله.....
۶۰.....	۳-۴ مدلسازی شمع و خاک.....
۶۳.....	۴-۴ صحت سنجی.....
۶۳.....	۱-۴-۴ صحت سنجی نشست تک شمع.....
۶۵.....	۲-۳-۴ ضرایب اندرکنش در حالت شمع قائم.....

۶۶	۳-۴-۴ صحتسنجی المان سطح تماس.....
۶۸	۵-۴ بررسی عوامل موثر بر عملکرد شمع های مماسی.....
۶۸	۱-۵-۴ تاثیر نسبت پوآسون خاک.....
۷۲	۲-۵-۴ تاثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک.....
۷۵	۳-۵-۴ تاثیر چسبندگی خاک.....
۷۸	۴-۵-۴ تاثیر فاصله به قطر شمع.....
۸۱	۵-۵-۴ تاثیر نسبت طول به قطر شمع.....
۸۴	۶-۵-۴ تاثیر سختی نسبی شمع و خاک.....
۸۸	۶-۴ نتایج تحلیل های پارامتریک ضرایب اندر کنش.....
۸۹	۱-۶-۴ تاثیر نسبت پوآسون خاک.....
۹۱	۲-۶-۴ تاثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک.....
۹۳	۳-۶-۴ تاثیر مقدار چسبندگی خاک.....
۹۵	۴-۶-۴ اثر نسبت فاصله به قطر شمعها.....
۹۷	۵-۶-۴ اثر نسبت لاغری شمعها.....
۹۹	۶-۶-۴ تاثیر سختی نسبی شمع و خاک.....
۱۰۱	۷-۶-۴ تغییرات ضرایب اندرکنش در طول شمع.....
۱۰۳	۸-۶-۴ تغییرات ضریب اندرکنش در مدت بارگذاری.....
۱۰۵	فصل ۵ (جمع بندی و ارایه پیشنهادات.....

۱-۵ خلاصه نتایج پژوهش حاضر.....۱۰۶

۲-۵ پیشنهادها برای ادامه کار.....۱۰۹

منابع و مراجع:.....۱۱۱

فصل ۱) پیش گفتار

۱-۱ مقدمه

در سال های اخیر با افزایش تراکم و تعداد طبقات و نیاز به تأمین پارکینگ و سایر سطوح خدماتی در ساختمان ها بویژه در مناطق مرکزی شهرها ، نیاز به گودبرداری های عمیق نیز بیشتر شده است . در بسیاری از پروژه های ساختمانی لازم است که زمین به صورتی خاکبرداری شود که جداره های آن قائم یا نزدیک به قائم باشد. این کار ممکن است به منظور احداث زیر زمین ، پارکینگ ، کانال ، منبع آب و .. صورت گیرد. فشار جانبی وارد بر این جداره ها ناشی از رانش خاک بر اثر وزن خود آن ، و نیز سربار های احتمالی روی خاک کنار گود می باشد. این سربارها می توانند شامل خاک بالاتر از تراز افقی لبه ی گود ، ساختمان مجاور ، بارهای ناشی از بهره برداری از معابر مجاور و ... باشند. به منظور جلوگیری از ریزش ترانشه و تبعات منفی احتمالی ناشی از این خاکبرداری ، سازه های موقتی را برای مهار ترانشه اجرا می کنند که به آن سازه های نگهدارنده می گویند. اهداف اصلی ایمن سازی جداره های گود با استفاده از سازه های نگهدارنده عبارتند از : حفظ جان انسانهای خارج و داخل گود ، حفظ اموال خارج و داخل گود و نیز فراهم آوردن شرایط امن و مطمئن برای اجرای کار.

موضوع گودبرداری و طراحی و اجرای سازه های نگهدارنده در مهندسی عمران دارای گستره وسیعی است و نیاز به بررسی ها و مطالعات و ملاحظات ژئوتکنیکی، سازه ای ، مواد و مصالح، تکنولوژیکی و اجرایی و اقتصادی و اجتماعی دارد .به طوری که برای یک پروژه خاص می توان از چندین روش پایدارسازی استفاده نمود در نتیجه می توان گفت که انتخاب روش مناسب بستگی به جمیع شرایط تأثیرگذار دارد و می توان در شرایط مختلف، به صورت های گوناگونی باشد. از سوی دیگر، تئوری ها و روش های اجرایی گود برداری و سازه های نگهدارنده، هم مبتنی بر اصول تئوریک و هم متأثر از ملاحظات اجرایی ، تجربی و اقتصادی به صورت همزمان می باشد.

پایدارسازی جداره های گودبرداری به صورتها و روشهای مختلفی صورت می گیرد که از جمله آنها به روشهای زیر اشاره نمود:

- مهار سازی ۱

- دوخت به پشت ۲

- دیواره دیافراگمی ۱

۱ anchorage

2 tie back

- مهار متقابل ۲
- شمع های مماسی ۳
- سپر کوبی ۴
- سازه های نگهبان خربایی ۵

۱-۱-۱ شمع های مماسی

یکی از روشهای متداول در پایداری و حفاظت جداره ها با شرایط متنوع اعم از زمین سخت و زمین های سست و نرم استفاده از شمع های درجا می باشد. که در بسیاری موارد به جهات فنی و اقتصادی بر سایر روش های موجود ارجحیت دارد. و به همین جهت است که امروزه استفاده از دیواره های شمعی بمنظور ایجاد پایداری جانبی گودبرداری به تنهایی و در ترکیب با سایر روش ها بسیار رایج می باشد. روش اجرای شمع در این روش، در پیرامون زمینی که قرار است گودبرداری شود در فواصل معینی از هم، شمعهایی را اجرا می کنیم. این شمع ها می توانند از انواع مختلف مصالح سازه ای نظیر فولاد بتن و چوب باشند همچنین شمع های بتنی را می توان به صورت پیش ساخته یا درجا اجرا کرد .

در این روش، شمعها فشار جانبی خاک را به صورت تیرهای یکسر گیردار تحمل می کنند. پس از اجرای شمعها، می توان عملیات گودبرداری را اجرای کرد. در صورت لزوم باید شمع ها را در امتداد دیواره گود مهاربندی کرد .

برخی مزایای اجرای شمع جهت گود برداری

- سرعت عملیات اجرایی بسیار بالا است .
- سیستم به هیچ وجه دست و پاگیر نیست.
- در احجام زیاد، هزینه عملیات کاهش می یابد.

1 diaphragm wall
۲ reciprocal support)
3 Soldier pile
4 sheet piling
5 truss construction

- گاهی از اوقات می‌توان از شمع‌ها به عنوان سازه نگهبان دائم (نظیر دیوار حایل) یا بخشی از آن نیز استفاده کرد.
 - شمع‌های پیش ساخته را پس از جمع‌آوری می‌توان در پروژه‌های دیگر نیز استفاده کرد.
- برخی معایب اجرای شمع جهت گود برداری**
- در صورتی که ارتفاع گودبرداری زیاد باشد هم باید فواصل شمعها از هم کم شوند و هم باید از مقاطع سازه‌ای قوی‌تری برای اجرای کار استفاده کرد.
 - در برخی مناطق شهری امکان استفاده از شمع پیش ساخته و کوبشی به دلیل ایجاد مزاحمت و نیاز به استفاده از ماشین آلات بزرگ امکان پذیر نمی باشد.
 - حفر چاه در زمین های ناپایدار و تراز های آب زیر زمینی بالا با مشکلات زیادی همراه است.
 - نصب نمرخ فولادی یا قفس آرماتور در چاه از پیش حفر شده به مهارت و تجربه زیاد و جرثقال های سنگین نیاز دارد. [۱]

۲-۱ بیان مساله

در بسیاری از پروژه های ساختمانی لازم است که زمین به صورتی خاکبرداری شود که جداره ها قائم و یا نزدیک به قائم باشند. فشار جانبی وارد بر این جداره ها ناشی از رانش خاک بر اثر وزن خود آن، و نیز سربارهای احتمالی روی خاک کنار گود می باشد. یکی از روشهای متداول در پایداری و حفاظت جداره ها با شرایط متنوع اعم از زمین سخت و زمین های سست و نرم استفاده از شمع های درجا می باشد. که در بسیاری موارد به جهات فنی و اقتصادی بر سایر روش های موجود ارجحیت دارد. و به همین جهت است که امروزه استفاده از دیواره های شمعی بمنظور ایجاد پایداری جانبی گودبرداری به تنهایی و در ترکیب با سایر روش ها بسیار رایج می باشد. بنابراین تحلیل عملکرد شمع در این حالت و تعیین رفتار دقیق آن به جهت طراحی مهاربندی گود از ضروریات است. در چنین مواردی شمع ها اغلب به صورت گروهی بکار می روند و به علت فاصله کم بین شمع ها، شمع ها در محدوده تاثیر یکدیگر قرار می گیرند در این حالت یکی از روش های بررسی رفتار گروه شمع در نظر گرفتن اندرکنش بین شمع ها است. با داشتن 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 شمع های مجاور، علاوه بر نشست شمع تحت تاثیر بار اعمال شده به خود شمع میسر می شود .

۱-۳ هدف پایان نامه

هدف اصلی این تحقیق مدل سازی عددی رفتار ردیف شمع موجود در دیواره گودبرداری می باشد که به منظور تامین پایداری جانبی گودبرداری در دیواره گود بکار رفته اند. این مدل سازی در حالت ۳ بعدی وبا استفاده از نرم افزار ABAQUS نسخه ۶.۱۱ صورت گرفته است .و با مدل سازی های صورت گرفته رفتار شمع های موجود در دیواره گود بررسی شود و با مقایسه پارامترهای مختلف ، عوامل موثر در رفتار شمع های نگهبان نظیر پارامترهای طول به قطر (l/d) فاصله به قطر (s/d) و همچنین استفاده از انواع مختلف خاک ساختگاه، و بعلاوه با در نظر گرفتن حالت جدایش بین شمع و خاک نقش تغییرات این پارامتر ها بر روی رفتار گروه شمع به صورت دقیق تعیین گردید. شمع ها به صورت یک ردیفی وبدونه سر شمع مدل خواهد شد و بمنظور سهولت وکاهش محاسبات از تقارن نیز استفاده می شود .هدف بررسی رفتار شمع های موجود در دیواره گود و تعیین عوامل تاثیر گذار بر روی آنها و نیز میزان اثر گذاری هر یک از عوامل فوق وهمچنین تعیین ضریب اندرکنش شمع- خاک -شمع برای شمع های موجود در دیواره گود می باشد.

و از آنجایی که یکی از روش های بررسی رفتار گروه شمع تعیین ضرایب اندرکنش می باشد ، با توجه به شرایط مفروض برای ردیف شمع و سربار وارد به خاک پشت گود به تعیین اندر کنش شمع ها با در نظر گرفتن تاثیر حضور شمع دوم نیز پرداختیم ودر این بین سعی کردیم که با برطرف کردن نواقص موجود در پژوهش های پیشین و مقایسه میزان تاثیر پارامتر های موثر در عملکرد گروه شمع، رفتار جامع وکاملی از گروه شمع برای موارد مشابه ارائه شود. تا با استفاده از نتایج آن بتوان طراحی ایمن تر و بهینه تری را جهت ردیف شمع های محافظ گود برداری ارائه نمود .

۴-۱ ساختار پایان نامه

این پایان نامه در قالب پنج فصل طرح ریزی و تدوین شده است که در ادامه علاوه بر ذکر عناوین این فصول، به محتوا و شرح فعالیت انجام شده در هر فصل به طور خلاصه اشاره شده است :

در فصل ۱، ضمن تعریف مساله و بیان ابعاد آن، پیرامون اهمیت و لزوم انجام این پژوهش سخن به میان می آید.

در فصل ۲، به عنوان نخستین گام، به جمع آوری، معرفی و بررسی نقاط قوت و ضعف احتمالی تعدادی از معتبر ترین پژوهش های موجود پرداخته می شود.

در فصل ۳، نرم افزار مورد استفاده در این تحقیق معرفی می شود. در این فصل سعی شده است فرضیات و روش های استفاده شده در این نرم افزار معرفی شود.

در فصل ۴، به مدل سازی عددی شمع های مماسی در دیواره گود می پردازد و با مدل سازی های انجام شده مطالعات پارامتریک بر روی این شمع ها صورت گرفته است.

در فصل ۵، جمع بندی و نتیجه گیری ارائه خواهد شد. در این فصل پس از مرور اجمالی کارهای انجام شده در فصول قبلی، به بررسی نتایج حاصله و تحلیل آن ها، جمع بندی و نتیجه گیری و همچنین ارائه پیشنهادهایی جهت ادامه پژوهش در زمینه کار انجام شده در این پایان نامه پرداخته شده است.

فصل ۲) مروری بر ادبیات موضوع

۲-۱ مقدمه

هنگامی که شمع ها به منظور پایدار سازی گود و تحمل بار های ناشی از خاک موجود در اطراف گود و سربارهای احتمالی بکار می روند تحت نیروی جانبی و قرار می گیرند . بعلاوه چنانچه در مقاصد طراحی تحمل بارهای قایم وارده از سازه که در آینده در محل احداث می گردد نیز مد نظر باشد این شمع ها باید بتوانند نیروهای قایم ، جانبی و لنگر خمشی را توأماً تحمل نمایند .

در چنین مواقعی نیاز مبرم به این است که رفتار شمع تحت اثر بار جانبی به خوبی درک شود و این امر نیازمند تحقیق و بررسی جامع در این زمینه می باشد . محققان زیادی لزوم درک صحیح از رفتار شمع تحت بار جانبی را مطرح کرده و به بررسی هایی در این زمینه پرداخته اند . اساساً روش های موجود برای تحلیل شمع هایی که تحت بار جانبی واقع شده اند همانند بسیاری از مسائل ژئوتکنیکی در دو رویکرد متفاوت قرار دارد : بررسی ظرفیت باربری نهایی جانبی شمع ، و بررسی تغییر شکل های شمع تحت اثر بارگذاری جانبی . در اکثر مواقع در شمع ها ، معیار طراحی آنها را ظرفیت باربری نهایی آنها تعیین نمی کند ، بلکه این تغییر مکان ها هستند که بر طرح حاکم می شوند؛ چرا که در بسیاری از شمع ها (مخصوصاً شمع های بلند) ، شمع تا رسیدن به ظرفیت باربری نهایی خود تغییر شکل های بزرگی می دهد و این برای بسیاری سازه ها که نباید در معرض تغییر شکل های بزرگ واقع شوند مشکل ساز می شود .

در کنار کارهای آزمایشگاهی در مقیاس بزرگ و کوچک ، می توان از روشهای عددی جهت بررسی رفتار شمع ها بهره جست . به طور کلی بررسی عددی بسیار کم هزینه تر و سریعتر از بررسی آزمایشگاهی در چنین پژوهش هایی می باشد . برای بررسی بهتر رفتار شمع ها تحت بارهای جانبی به دلیل وجود اندرکنش های موجود بین خاک و شمع استفاده از نرم افزارهایی که قابلیت تحلیل سه بعدی داشته باشند مناسب تر به نظر می رسد .

در سالیان اخیر تحقیقات زیادی بر روی رفتار شمع های منفرد تحت شرایط گوناگون به عمل آمده است . بررسی رفتار شمع تحت بارهای جانبی در مقیاس واقعی به دلیل هزینه زیاد آن کمتر صورت می گیرد و تحقیقات انجام شده در این زمینه بیشتر در مقیاس کوچک در آزمایشگاه صورت گرفته است . [۱] در تحقیق حاضر هدف استفاده از مدل سازی عددی در حالت ۳ بعدی جهت بررسی

عملکرد و رفتار شمع های موجود در دیواره گود می باشد که به منظور ایجاد پایداری در دیواره گود بکار می روند و اصطلاحاً شمع های مماسی نامیده می شوند.

۲-۲ بررسی شمع های منفرد تحت اثر بارهای جانبی

شمع ها وقتی در معرض بارهای جانبی قرار می گیرند، از خود تغییر مکان می دهند. طراحی شمع تحت بارهای قائم و محوری با حل معادلات تعادل در راستای نیرو صورت می گیرد؛ در حالی که در شمع های با بارگذاری جانبی مسئله به حل معادلات دیفرانسیلی غیر خطی منجر می شود . بررسی ظرفیت باربری نهایی یک شمع قائم تحت اثر بار جانبی و کنترل تغییر مکان سر شمع به لحاظ پیچیدگی اندرکنش بین یک شمع نیمه صلب و خاک الاستوپلاستیک جزء مسائل مبهم در علم ژئوتکنیک می باشد. بارهای محوری صرفاً تغییر مکانی به موازات محور شمع ایجاد می کنند (سیستم یک بعدی) . در حالیکه بارهای جانبی می توانند در هر جهتی باعث ایجاد تغییر مکان شوند. در صورتی که سطح مقطع شمع به صورت دایره ای نباشد، سیستم شمع - خاک تحت اثر بار جانبی به یک مسأله سه بعدی تبدیل می شود. مقاومت نهایی شمع قائم در برابر بار جانبی و تغییر شکل شمع در برابر بار نهایی وارد شده موضوع پیچیده ای است که در آن می بایست اندرکنش المان سازه ای نیمه صلب و خاک در نظر گرفته شود . روشهای موجود در زمینه ی پیش بینی رفتار شمعها تحت بارهای جانبی را می توان به پنج دسته ی کلی تقسیم کرد [۳]. این پنج دسته عبارتند از:

- روش حالت حدی ۱
- روش عکس العمل بستر ۲
- روش الاستیک ۳
- روش بار شاخص ۴

1 - Limit state method
2 - Subgrade reaction method
3 - Elastic continuum approach
۴ -

• روش بار-تغییرشکل^۱

• روش عددی^۲

۲-۲-۱ روش حالت حدی

اساس روشهای موجود بر روی شمع هایی که تحت بار جانبی قرار گرفته اند به دو دسته ی کلی تقسیم می شوند:

بررسی ظرفیت باربری نهایی جانبی شمع، و بررسی تغییرشکل شمع تحت بارهای جانبی. روش حاضر تنها به بررسی ظرفیت باربری نهایی می پردازد، چرا که پیش از همه برای محققین ظرفیت باربری نهایی اهمیت داشت. در این زمینه کارهای ارزشمندی صورت پذیرفته است که به طور خلاصه چنین اند:

۲-۲-۱-۱ روش های مرسوم استاتیکی

با در نظر گرفتن شمع به صورت یک نوار باریک به عرض یا قطر d و اعمال بار در سر شمع، با نوشتن تعادل نیروهای افقی و لنگر خمشی به صورت استاتیکی و حل همزمان در عمق مشخص z ، با فرض صلب در نظر گرفتن شمع، و با فرض توزیع مقاومت خاک، می توان شمع را تحلیل نمود. با فرض هر توزیع مقاومتی که برای خاک در نظر بگیریم، می توانیم با نوشتن معادلات تعادل، تحلیل را انجام دهیم. از جمله ی محققینی که در این زمینه کار کرده اند، هانسن^۳ در سال ۱۹۶۱ بوده است. شرط صلب بودن شمع، تنها برای شمع های کوتاه جوابگو می باشد و در این شرایط، خاک قبل از شمع به مقدار مقاومت نهایی خود می رسد. [۴]

۲-۲-۱-۲ تئوری برامز^۴

تئوری برامز برای شمع های بلند و کوتاه به طور جداگانه فرمولاسیون ارائه کرده است. وی با توجه به چگونگی توزیع عکس العمل خاک به محاسبه ظرفیت باربری جانبی شمع در خاک رسی پرداخت و شمعها را به دو گروه شمع با انتهای گیردار و شمع با انتهای آزاد تقسیم بندی کرد. این روش نیز اساساً مشابه روش بالاست، با این تفاوت که در این روش توزیع مقاومت نهایی خاک در طول شمع ساده سازی شده و گیرداری یا آزاد بودن سر شمع به صورت مناسبی در این تئوری

1 -P-y Method

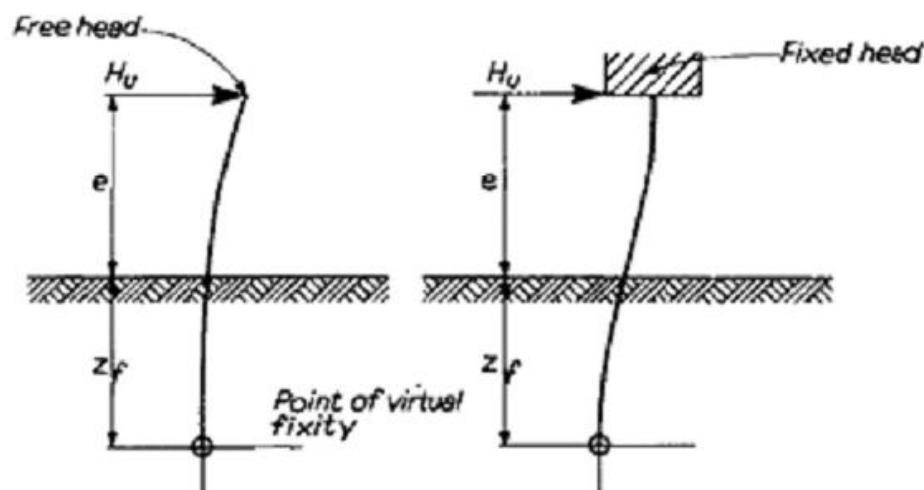
2 -

3 -Brinch Hansen

4 -Broms Theory

گنجانده شده است. و این فرضیات در دو نوع خاک کاملاً چسبنده و یا کاملاً دانه ای جداگانه در نظر گرفته شده است. فرمولاسیون شمع های بلند تئوری برامز در ادامه شرح داده می شود. [۴]

در این روش مقاومت غیرفعال ایجاد شده توسط خاک برای شمع طولانی نامحدود است بنابراین بار جانبی نهایی تنها توسط مقاومت شمع در اثر ممان نهایی M_u کنترل می شود و فرض می شود که در نقطه ای به عمق Z_f یک نوع گیرداری مجازی وجود دارد. (شکل ۱-۲)



شکل ۱-۲ شمع بلند تحت بار جانبی در روش برومز

رابطه بار جانبی نهایی در رابطه (۱-۲) و رابطه (۲-۲) نشان داده شده است. [۵]

$$H_u = M_u / (e + Z_f) \quad (1-2)$$

$$H_u = 2M_u / (e + Z_f) \quad (2-2)$$

H_u : بار نهایی

M_u : ممان نهایی

e : خروج از مرکز

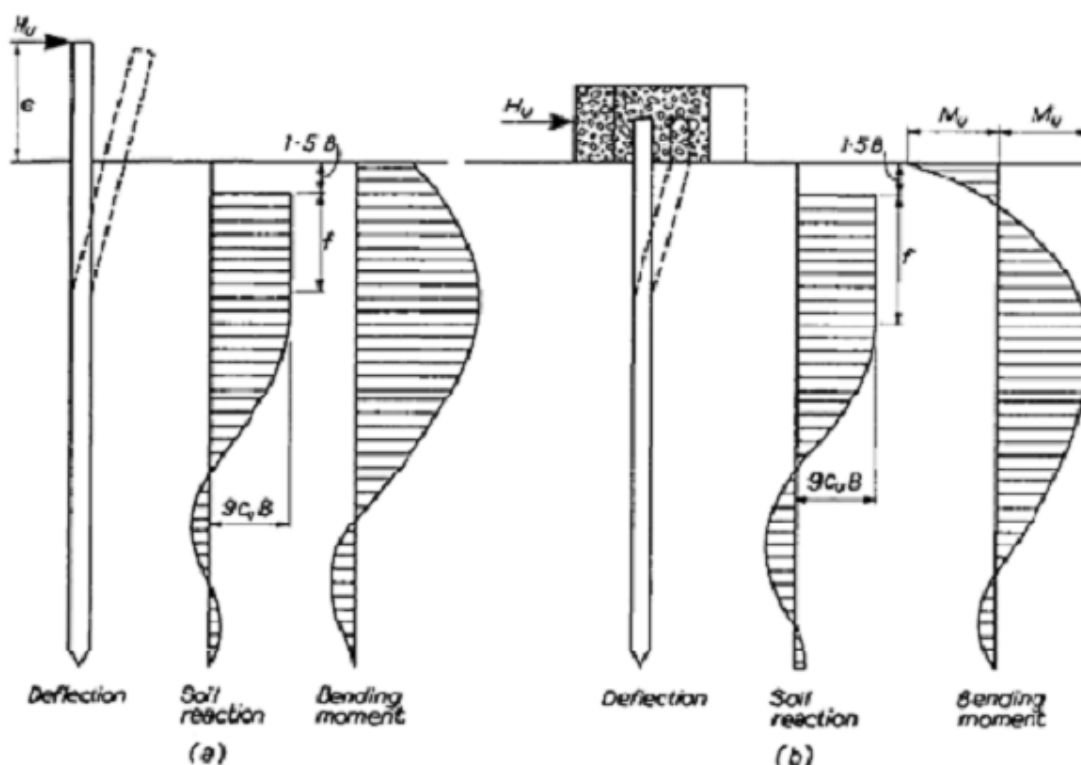
Z_f : عمق گیرداری مجازی، مقدار Z_f با توجه به روش برینچ هانسون ۱ به دست می آید. این مقدار برای خاک های رس سخت ۱.۵ متر و برای رس سست ۳ متر پیشنهاد شده است.

برامز با فرض گسیختگی در شمع بلند رابطه ای برای ممان نهایی شمع ارائه داده است. در این روش مفصل پلاستیکی که قادر به تحمل برش باشد در محل گسیختگی در شفت فرض یشود. عکس العمل خاک و ممان خمشی برای خاک چسبنده در شکل ۲-۲ دیده می شود.

ماکزیمم ممان خمشی برای شمع سر آزاد به صورت زیر خواهد بود:

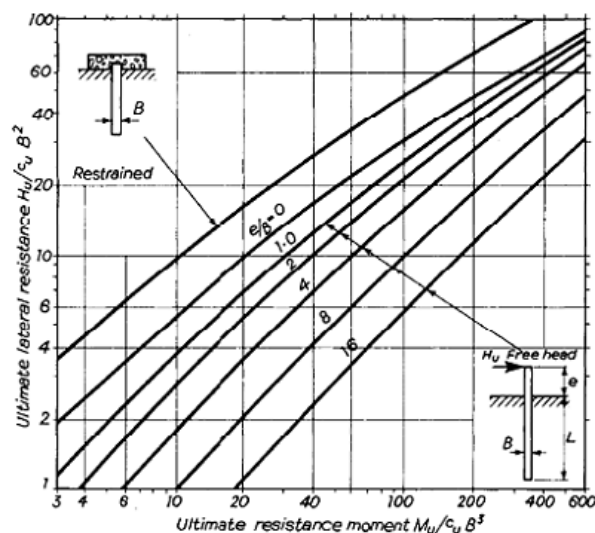
$$M_{\max} = H/(e + 1.5B + .5F) \quad (۳-۲)$$

که $F = H/(9C_u B)$ می باشد. مقدار نهایی H باری است که هنگام برابری $M_{\max}$ با ممان نهایی شمع بدست می آید.



شکل ۲-۲ نمودارهای ممان و نیروی ایجاد شده در خاک چسبنده

برامز نمودار گرافیکی برای رابطه $H_u/L_u B^2$ و $M_u/C_u B^3$ ارائه داده است که برای شمع های بلند کاربرد دارد و با مشخص بودن H_u می توان ممان نهایی شمع را بدست آورد که این نمودار در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳ نمودارهای ارائه شده توسط برومز برای شمع های بلند در خاک رسی برای شمع بلند

۲-۱-۲-۲ روش انستیتو تحقیقات نفتی امریکا

انستیتو تحقیقات نفتی امریکا به دلیل استفاده گسترده شمع ها در سازه های دریایی، تحقیقات وسیع و دامنه داری را در زمینه ی تعیین بار نهایی جانبی شمع ها انجام داده است [۶]. فرمول های ارائه شده در این آئین نامه جهت بدست آوردن ظرفیت باربری شمع ها بر پایهی کارهای صحرایی استوار است.

در تحلیل پی های عمیق تحت اثر بارهای جانبی، در اکثر موارد ظرفیت باربری نهایی، ملاک طراحی نیست. بلکه تغییرمکان های جانبی شمع تعیین کننده بوده و در طراحی مورد استفاده قرار می گیرند. به جز روش حالت حدی که در بالا اشاره شد، باقی روشها همگی به ارزیابی خصوصیات بار-تغییرمکان شمعها تحت بارگذاری جانبی می پردازند.

۲-۲-۲ روش عکس العمل بستر

این روش بیانگر این ایده است که عکس العمل خاک در هر نقطه با تغییرمکان آن نقطه متناسب می باشد. در این روش از مدل تیر بر بستر الاستیک که توسط وینکلر ۲ در سال ۱۸۷۶ پیشنهاد شده است استفاده می شود. این مدل خاک را به صورت فنرهایی مجزا در نظر می گیرد که فقط وقتی تغییر مکان می دهند که بار به آنها اعمال شود. [۷] و [۸]

در این روش هر لایه خاک بطور مستقل از لایه های مجاور عمل کرده و یک تیر با استفاده از فنرهای مجزا برای مدل کردن تغییر شکل جانبی شمع مورد استفاده قرار میگیرد. اگر چه در این روش از انتقال نیرو و تغییر شکلهای برشی بین لایه ها صرفنظر میشود ولی برای بدست آوردن تغییر شکل جانبی شمع در بارگذاری استاتیکی و دینامیکی با تقریب خوبی بصورت گسترده مورد استفاده قرار میگیرد.

در این روش محل تماس خاک و شمع به بخشهای کوچکتری تقسیم شده و در هر نقطه یک فنر و یک میراگر برای نشان دادن سختی و میرایی شمع و خاک در هر لایه مشخص قرار میگیرد. فنرهای شمع - خاک میتواند الاستیک خطی و یا غیرخطی باشد که البته با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات تجربی صحرائی، استفاده از حالت غیرخطی مرسوم میباشد. استفاده از این روش دارای این مزیت است که اثرات نصب شمع را بر روی خاک مد نظر قرار داده و آن را در محاسبات منظور میدارد. در مطالعات پیشرفته این روش، ایجاد فاصله بین شمع و خاک، کاهش مقاومت بر اثر بارهای سیکلی و سرعت نصب شمع نیز مد نظر قرار گرفته است. [۹]

در این روش برای خاک مدول عکس العملی در نظر می گیرند و فرض می شود شمع همانند تیر الاستیکی باشد که بر روی یک بستر واقع شده است لذا باید معادلات زیر را حل کرد:

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} + K_h y = 0 \quad (۴-۲)$$

$$P = K_h y \quad (۵-۲)$$

که در آن y تغییر شکل جانبی شمع، K_h مدول عکس العمل بستر، d قطر شمع، z عمق شمع، P نیروی جانبی وارد بر سر شمع و I_p و E_p به ترتیب مدول الاستیسیته و ممان اینرسی شمع می باشند. در این معادله اثر بار قائم در نظر گرفته نشده است. برای حل این معادله ابتدا لازم است ضریب عکس العمل بستر خاک (K_h) تعیین شده باشد. برای تعیین آن سه راه وجود دارد:

- آزمایش بارگذاری جانبی روی شمع با مقیاس واقعی؛ از جمله کسانی که در این زمینه کار کرده‌اند، کارهای متلاک و ریپربرگ^۱ در سال ۱۹۵۸ و همچنین ریس و کاکس^۲ در سال ۱۹۶۸ و ۱۹۷۴ می‌باشند. [۱۰]
- آزمایش بارگذاری صفحه؛ در سال ۱۹۵۵ ابتدا ترزاقی برای بدست آوردن مدول عکس العمل بستر دست به کارآزمایش بارگذاری صفحه شد و نتایجی را ارائه کرد [۱۰]. بعد از او افراد دیگری نیز در این زمینه فعالیت کردند، از جمله آنها برومز می‌باشد که در سال ۱۹۶۴ دست به آزمایشاتی در این زمینه زد. [۲]
- روابط تجربی با استفاده از دیگر خصوصیات خاک؛ در این روش با در دست داشتن خصوصیات عمومی خاکها محققین بر آن شدند که روابطی را بین آنها و ضریب عکس العمل بستر بدست آورند. در این زمینه محققین روابط، بسیاری ارائه داده اند. از جمله کارهای انجام شده در این زمینه می توان به کارهای اسکمپتون^۳ در سال ۱۹۵۱ برامز در سال ۱۹۶۴ و دیویسن^۴ در سال ۱۹۷۰ در خاک های رسی و ترزاقی در سال ۱۹۵۵ بر روی خاک های ماسه ای اشاره کرد. [۱۱] و [۱۰]
- عوامل متعددی بر مدول عکس العمل بستر خاک اثر می گذارند، از جمله: شرایط محل آزمایش، اثر تغییر مکان شمع، اثر گروه شمع، اثر بارگذاری تناوبی، اثر شمع های مایل و غیره. [۱۱]
- روش عکس العمل بستر به دلیل سهولت، کاربردهای طراحی زیادی دارد ولی در مقابل معایب بزرگی دارد. معایب این روش را می توان چنین شمرد:
- در این روش خاک به صورت فشرده ای مجزا مدل می شود، در صورتی که خاک به صورت پیوسته عمل می کند.
- این روش مقاومت خاک را به صورت خطی به تغییر شکل شمع متناسب می کند.

1 - Matloc & Ripperberg
 2 - Reese & Cox
 3 - Skempton
 4 - Davisson

- ضریب عکس العمل بستر ($K_{\#}$) یک پارامتر مدل می باشد و جزو مشخصات ذاتی خاک نیست. این پارامتر اثرات کلی پیوستگی خاک را در یک عمق مشخص با کمک شمع ارائه می کند و لذا مقدار آن تنها به مشخصات خاک بستگی ندارد، بلکه به مشخصات شمع و همچنین شرایط بارگذاری نیز بستگی دارد. لذا هیچ آزمایش مستقیمی نمی تواند برای تعیین رابطه نیرو - تغییر مکان یک شمع و خاک مشخص به کار گرفته شود. [۴] و [۱۰]

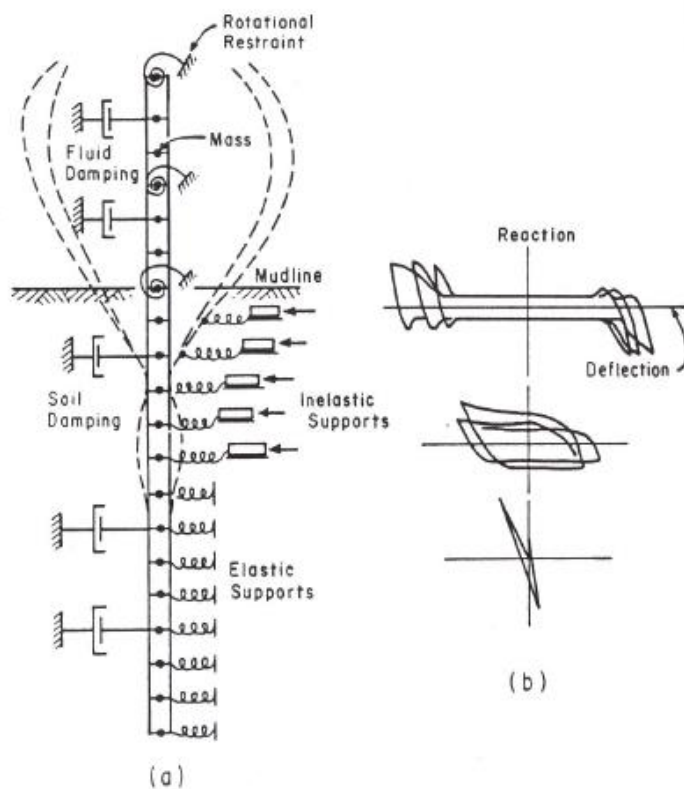
- هندسه ی شمع در این روش به صورت غیر مستقیم مدل می شود. [۳]

مبدعان این روش مک کللاند و فوخت ۱ بودند که در سال ۱۹۵۸ این روش را برای محاسبات باربری جانبی شمعها مورد استفاده قرار دادند. آنها روشی را برای همبستگی نتایج حاصل از آزمایش تنش - کرنش سه محوری با منحنی کمانش - بار سر شمع در هر لایه ارائه دادند و ریس ۲ با استفاده از گوه نزدیک سطح زمین و مدل گسیختگی عمیق پلاستیک با مقاومت زهکشی نشده نهایی برابر با $12S_{\#}$ این روش را گسترش داد. [۱۱]

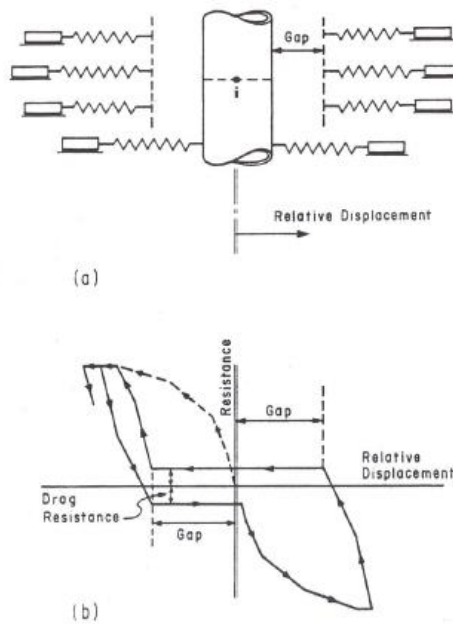
متلوک ۳ و همکارانش آزمایشهای صحرایی و آزمایشگاهی برای بارهای استاتیکی و سیکلی جانبی را بر روی شمعهای قرار گرفته در رسهای نرم انجام دادند و طرح $P-Y$ را بصورت رابطه بین نیروی خاک P ناشی از میدان تنش غیریکنواخت اطراف شمع که در اثر جابجایی جانبی خاک Y بوجود میآید ارائه دادند [۱۲]. این روش توسط مؤسسه نفت آمریکا در سال ۱۹۹۳ با تعریف ملاک هایی برای تحلیل جانبی شمع تحت بار محوری در رس نرم با استفاده از نرم افزار COM624 که در کامپیوترهای معمولی قابل استفاده است، ایجاد شد.

در مطالعات متلوک شمع با استفاده از المانهای مجزای الاستیک خطی، به المانهای هیستریزیس غیرخطی کامل خاک متصل شده و قابلیت استفاده از درز بین خاک و شمع نیز در نظر گرفته شده است (شکل ۲-۴). مدل مورد استفاده برای درز بین شمع و خاک در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.

1 - McClelland & Focht
2 - Reese
3 - Matlock



شکل ۲-۴ مدل SPASM8 (الف) مدل شمع و خاک [۱۴] - روسازه (ب) تغییرات رفتار بار - کمانش با



شکل ۲-۵ مدل SPASM8 (الف) مدل درز شمع و خاک (ب) رفتار نیرو - جابجایی [۱۳]