

تحلیل عددی شمع سرگیردار مدفون در خاک برای برآورد رابطه‌ی ظرفیت باربری جانبی

محمد علیایی* (استادیار)

نرجس حسایی‌راد (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

منصور مصلی‌نژاد (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه شراز

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۵ (ص. ۵۱-۵۹)
دوری ۲-۳، شماره ۱/۴، ص. ۵۱-۵۹

امروزه پی‌های شمعی در سکوهای دریایی، پل‌ها، و ساختمان‌های بلند استفاده‌ی وسیعی دارند، که باید در برابر نیروهای جانبی ناشی از زلزله، باد، موج دریا، و... مقاومت کنند. تاکنون برای تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها عموماً از منحنی $p - y$ مبتنی بر آزمایش‌های صحرایی استفاده شده است. با وجود این، ارائه‌ی یک رابطه‌ی عمومی ظرفیت باربری جانبی (مشابه ظرفیت باربری قائم) برای شمع‌ها، یک نیاز اصلی در مهندسی ژئوتکنیک است. در این پژوهش، با انجام تحلیل‌های سه بعدی غیرخطی بر مبنای روش اجزاء محدود به کمک نرم‌افزار OpenSeesPL، رفتار شمع سرگیردار تحت بار جانبی استاتیکی در خاک ماسه‌یی مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین عوامل تأثیرگذار در ظرفیت باربری شمع، از قبیل: مشخصات هندسی شمع (L, D) و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک از قبیل (φ, γ) مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین میزان تأثیر این پارامترها ارزیابی و در نهایت، رابطه‌ی پیشنهادی ظرفیت باربری جانبی استاتیکی شمع‌های سرگیردار در خاک ماسه‌یی ارائه شده است.

واژگان کلیدی: OpenSees، اندرکنش خاک و شمع، بار جانبی، تحلیل عددی، شمع سرگیردار.

m.olyaei@modares.ac.ir
narjes.hesabirad@modares.ac.ir
mmosalla@shirazu.ac.ir

۱. مقدمه

که برخی از آنها براساس آزمایش‌های تمام‌مقیاس بوده و برخی دیگر مبنای نظری داشته‌اند، که روش‌ها، به دو دسته تقسیم می‌شوند:^[۱]

الف) روش محاسبه‌ی مقاومت جانبی نهایی

۱. روش Brinch Hansen (۱۹۶۱): این روش براساس تئوری فشار زمین است و برای خاک‌های $c - \varphi$ دار و همچنین برای سیستم لایه‌یی خاک قابلیت استفاده دارد. کاربرد این روش فقط برای شمع‌های کوتاه است و نیاز به روش آزمون و خطا برای یافتن نقطه‌ی دوران، از معایب این روش است.^[۲]

۲. روش ارائه‌شده‌ی Broms (۱۹۶۴): این روش نیز براساس تئوری فشار زمین است، اما در آن از فرضیات ساده‌کننده‌یی برای توزیع مقاومت نهایی خاک در طول شمع استفاده شده است. این روش با در نظر گرفتن هر دو نوع خاک چسبیده و غیرچسبیده، لحاظ کردن شرایط سرشمع، و تحلیل جداگانه برای هر کدام از حالات سرشمع و بررسی جداگانه‌ی شمع‌های کوتاه و بلند، دامنه‌ی کاربرد بیشتری نسبت به روش Brinch Hansen دارد. با وجود این، روش مذکور معایبی دارد که می‌توان به غیر قابل استفاده بودن این روش برای

حل مسائل مهندسی ژئوتکنیک به چند دلیل پیچیده است. اول اینکه مسائل ژئوتکنیکی معمولاً شامل سازه‌های بزرگ و غیرهمگن است، ثانیاً محیط به صورت چندفازه است و فازهای مختلف اندرکنش دارند. ثالثاً رفتار خاک غیرخطی، غیرهمسان، تابع مسیر بارگذاری و هیستریزس است.^[۱] اصول طراحی پی‌های شمعی عمدتاً جهت تحمل بار محوری است، ولی علاوه بر بار محوری، امکان وارد شدن بار جانبی و ممان نیز به شمع وجود دارد. بنابراین، پی‌های شمعی باید ظرفیت کافی برای تحمل این نوع بار را داشته باشند.

در طول ۵ دهه‌ی گذشته، پژوهشگران زیادی شمع‌های تحت بار جانبی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مقدار مجاز بار جانبی شمع، از این دو روش تعیین می‌شود:^[۲]

۱. با تقسیم بار نهایی بر ضریب اطمینان مناسب؛

۲. مقدار بار جانبی مجاز، متناسب با میزان جابه‌جایی قابل قبول است.

روش‌های متنوعی برای تحلیل شمع تحت بار جانبی به کار گرفته شده است،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۷/۸، اصلاحیه ۱۳۹۴/۲/۱، پذیرش ۱۳۹۴/۲/۲۹.

۴. خاک در شکل پیوسته‌ی خود نشان داده می‌شود، در حالی که مقاومت خاک توسط فنرهای غیرپیوسته مدل می‌شود.

۵. اثر هندسه‌ی شمع به صورت غیرمستقیم در نظر گرفته می‌شود.

۶. برای سازه‌هایی که درجه اهمیت زیادی ندارند، کاربرد دارد.

روش منحنی $p - \gamma$ نیز مزایا و معایب ذکرشده‌ی برای روش عکس‌العمل بستر دارند، با این تفاوت که مقاومت خاک به صورت تابعی غیرخطی از جابه‌جایی شمع لحاظ می‌شود. این روش مستقل از شکل و سختی شمع است و تغییر شکل جداگانه‌ی لایه‌های خاک را به صورت مستقل از بارگذاری انجام شده در بالا و پایین آن لایه نشان می‌دهد؛ در واقع پیوستگی خاک را لحاظ نمی‌کند.^[۶]

روش کشسان با در نظر گرفتن خاک به صورت پیوسته، روشی ساده برای محاسبه‌ی تغییر شکل است. در نظر گرفتن مدل خاک به شکل کشسان و تغییر آن با تغییر سطح تنش، از معایب روش کشسان است. همچنین روش مذکور، تغییر شکل‌های بزرگ و شکست شمع در خاک‌های غیرخطی را جوابگو نیست.^[۷]

روش المان محدود، یک روش پرکاربرد برای مدل کردن خاک به صورت پیوسته، در نظر گرفتن خاک به صورت غیرخطی، رفتار فصل مشترک شمع و خاک و شرایط مرزی به صورت سه‌بعدی است، که در نتیجه روش تحلیلی دقیق‌تری نسبت به سایر روش‌هاست.^[۴]

به طور کلی روش‌های ساده‌ی مانند عکس‌العمل بستر و منحنی $p - \gamma$ ، روش‌های تحلیلی پرکاربردی برای پیش‌بینی پاسخ کمی شمع تحت بارگذاری جانبی در کارهای مهندسی هستند؛ با وجود این، در روش‌های ذکرشده، تأثیرات و ویژگی‌های اساسی خاک نظیر مقاومت و سختی، در پاسخ خاک و شمع تحت بارگذاری جانبی به خوبی قابل مشاهده نیست. علاوه بر آن، چالش‌هایی در روش‌های مذکور راجع به تأثیرات و ویژگی‌های شمع از قبیل سختی و قطر آن در پاسخ خاکی، که شمع تحت بارگذاری جانبی در آن واقع شده است، با افزایش پژوهش‌ها به وجود آمده است.^[۴] بنابراین، مطالعه‌ی تأثیرات و ویژگی‌های اساسی شمع و خاک روی پاسخ شمع تحت بار جانبی، به درک این موضوع کمک شایانی خواهد کرد.

با توجه به معایب موجود در روش‌های پرکاربرد برای تحلیل تک‌شمع تحت بار جانبی، در بیشتر مطالعاتی که تاکنون انجام شده است به مقایسه‌ی روش‌های مذکور با یکدیگر و تلاش برای رفع عیوب آن‌ها پرداخته شده است. معایب موجود در روش‌های ذکرشده از قبیل لحاظ نکردن پیوستگی خاک، در نظر نگرفتن رفتار غیرخطی برای خاک، لحاظ نکردن ابعاد هندسی شمع، سختی یافتن پارامترهای اصلی روش، و... مانع از به وجود آمدن یک رابطه‌ی کلی برای تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع شده است.

لذا مشخص است که روش دقیقی جهت برآورد ظرفیت باربری جانبی پی‌های شمعی به وجود نیامده و نتایج بیشتر مطالعات در راستای توسعه‌ی انواع مدل‌های رفتاری خاک و شمع بوده است، تا ارائه‌ی رابطه‌ی مشخص برای ظرفیت باربری جانبی. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی رفتار شمع تحت بار جانبی استاتیکی و ارائه‌ی رابطه‌ی عمومی ظرفیت باربری جانبی بوده است.

در این پژوهش بر مبنای روش اجزاء محدود به کمک نرم‌افزار OpenSees PL^[۸]، رفتار شمع‌های گیردار تحت بار جانبی استاتیکی در خاک‌های ماسه‌ی مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل‌سازی به صورت سه‌بعدی بوده و رفتار شمع به صورت کشسان در نظر گرفته شده است. همچنین برای مدل‌سازی رفتار خاک، از مدل کشسانی بر مبنای چندسطحی استفاده شده است. همچنین تأثیر پارامترهای ابعادی شمع (L, D),

سیستم‌های لایه‌ی خاک و عدم کاربرد این روش برای خاک‌های $c - \varphi$ دار اشاره کرد.^[۳]

ب) روش محاسبه‌ی مقدار جابه‌جایی مجاز تحت بار سرویس

۱. روش Reese and Matlock (۱۹۵۶) یا روش مدل عکس‌العمل بستر: در این روش فرض می‌شود که خاک به صورت یک سری فنرهای کشسان خطی مستقل عمل می‌کند. ساده بودن این روش، در نظر گرفتن عواملی نظیر غیرخطی بودن خاک (منحنی‌های $p - \gamma$)، تغییر عکس‌العمل بستر با عمق، و لحاظ کردن سیستم لایه‌ی خاک از مزایای عمده‌ی این روش است. در مقابل، نادیده گرفتن پیوستگی خاک و عوامل مؤثر در مدل عکس‌العمل بستر از قبیل اندازه‌ی شالوده، از معایب این روش است.^[۳]

۲. روش Poulos (۱۹۷۱) یا روش کشسان: این روش خاک را به صورت پیوسته‌ی کشسان در نظر می‌گیرد. قابلیت استفاده از این روش برای سیستم لایه‌ی و شرایطی که مدل کشسانی با عمق تغییر می‌کند، است. اما در مسائل صحرایی، به دست آوردن مقدار کرنش و مدل کشسانی متناسب خاک مشکل است.^[۳]

به طور خلاصه، روش‌های موجود و پرکاربرد برای تجزیه و تحلیل تک شمع تحت بار جانبی دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند:^[۴]

۱. روش محاسبه‌ی مقاومت جانبی نهایی،

۲. روش عکس‌العمل بستر،

۳. روش منحنی $p - \gamma$ ،

۴. روش کشسان،

۵. روش المان محدود.

روش برومزی یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین روش‌های دسته‌ی اول برای تعیین بار نهایی جانبی تک شمع کوتاه و بلند است. از معایب روش مذکور می‌توان به این موارد اشاره کرد:

۱. عدم تلاش برای داشتن یک مبنای تئوری کامل برای فرضیات موجود،

۲. غیر قابل استفاده بودن روش ذکرشده برای سیستم‌های لایه‌ی خاک،

۳. عدم کاربرد این روش برای خاک‌های $c - \varphi$ دار،

۴. همچنین فرضیات ساده‌کننده‌ی روش برومزی، محدودیت‌هایی را در کارهای عملی با توجه به آشفتگی و پراکنندگی خاک، که ناشی از نصب شمع است، اعمال می‌کند.

روش عکس‌العمل بستر و منحنی $p - \gamma$ ، با استفاده از مفهوم تیر روی بستر کشسان و به دلیل سادگی و دقت قابل قبول، از پرکاربردترین روش‌ها هستند. با وجود این، روش عکس‌العمل بستر معایبی دارد که می‌توان به این موارد اشاره کرد:^[۵]

۱. مقاومت خاک به طور خطی با جابه‌جایی شمع متناسب است، در حالی که در واقعیت، این تناسب به صورت غیرخطی است.

۲. مدل عکس‌العمل افقی بستر، به عنوان یک پارامتر لحاظ می‌شود، نه به عنوان یک خاصیت بنیادی خاک.

۳. از الزامات روش مذکور، یافتن مدل واقعی عکس‌العمل بستر است، که تمامی روابط موجود برای آن، از نوع تجربی است.

بنابراین در این پژوهش از مدل حالت خمیری بر مبنای چندسطحی با یک قانون جریان غیرهمراه برای باز تولید اثر اتساع استفاده شده است. سطح تسلیم از نوع دراکر-پراگر هستند. لذا، سه مشخصه اصلی مدل رفتاری مورد استفاده برای ماسه به این صورت است:

۱. تغییر شکل خمیری در سراسر فرایند بارگذاری وجود دارد.
۲. از قانون جریان غیرهمراه استفاده شده است.
۳. قانون سخت شوندهگی، جنبشی است.

تأکید اصلی مدل رفتاری استفاده شده در این پژوهش بر پیش‌بینی تجمع تغییرشکل‌های برشی در خاک‌های غیرچسبنده تمیز و نسبتاً متراکم است. این دقت در ارزیابی خرابی و پایداری پی‌ها و سازه‌ها اهمیت به‌سزایی دارد.

۳. مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی

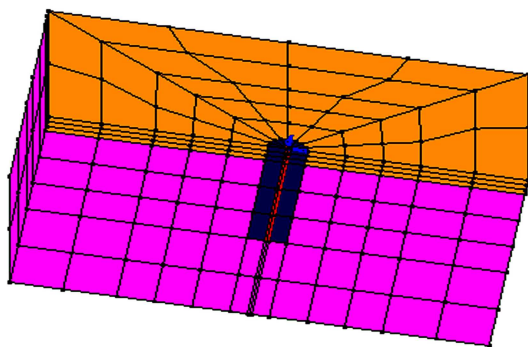
برای صحت‌سنجی فرض شده است که شمع سرگردار به طول ۲۰ متر و قطر ۰/۵ متر در توده‌ی خاکی به ارتفاع ۳۴ متر قرار دارد. در این مرحله، رفتار شمع و خاک به‌صورت کاملاً کشسان بوده و مدول کشسانی شمع برابر 10^7 kPa است. خاک مورد استفاده در تحلیل، ماسه‌ی خشک متراکم با مدول کشسانی 55000 kPa بوده است.

هدف در این مثال، مقایسه‌ی نتایج مدل به‌کاررفته در این پژوهش با نتایج حاصل از روابط پیشنهادی Poulos and Davis (۱۹۸۰) است.^[۱۲] شبکه‌ی اجزاء محدود در مدل موردنظر شامل ۲۱۷۶ المان مکعبی ۸ گره‌یی برای مدل‌سازی خاک و ۳۴ المان ۱ متری از نوع Beam Element برای مدل‌سازی شمع بوده است.

مدل المان محدود ساخته‌شده در نرم‌افزار و جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده برای شمع، به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده‌اند. خاطر نشان می‌شود شمع مدل‌شده در گام صحت‌سنجی، تحت بار 1000 kN در محل سرشمع قرار گرفته است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، میزان بیشینه‌ی جابه‌جایی برابر $1/42 \text{ cm}$ است. برای صحت‌سنجی نتایج حاصل شده، از روابط ارائه‌شده‌ی Poulos and Davis (۱۹۸۰) استفاده شده است. طبق روابط مذکور، بیشینه‌ی جابه‌جایی شمع تحت بار جانبی استاتیکی، از رابطه‌ی ۱ به‌دست می‌آید:

$$\rho = I_{\rho F} \times \frac{H}{E_s L} \quad (1)$$



شکل ۲. هندسه‌ی مدل.

سختی خاک و شمع و همچنین تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک (φ, γ) در ظرفیت باربری جانبی شمع مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها، بعد از انجام تحلیل و صحت‌سنجی آن، نتایج مربوط به تأثیر پارامترها در ظرفیت باربری جانبی شمع و رابطه‌ی به‌دست‌آمده برای ظرفیت باربری جانبی ارائه شده است.

۲. مدل‌های رفتاری خاک

انتخاب مدل رفتاری مناسب برای ماسه، اهمیت زیادی دارد. مدل‌های رفتاری که مشخصه‌های بیشتری از رفتار ماسه را در بر دارند، همواره قادر به پیش‌بینی نتایج دقیق‌تر در مدل‌سازی عددی هستند. در ادامه، مدل رفتاری به‌کاررفته در پژوهش حاضر معرفی شده است.

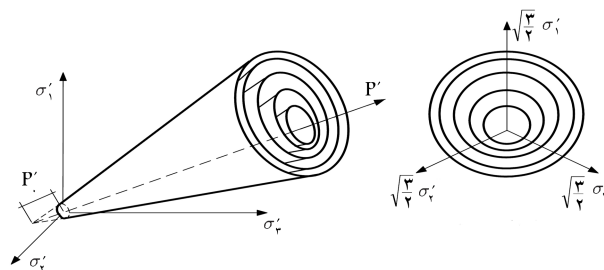
۱.۲. مدل رفتاری ماسه

به‌طور کلی یک مدل رفتاری مناسب باید در بردارنده‌ی رفتارهای بارز و برجسته‌ی مکانیک جامدات در شرایط خاص مسئله مانند: سطح کرنش، سرعت بارگذاری، و دما باشد. رفتار خاک‌های ماسه‌یی کاملاً تابعی از میزان چگالی نسبی ماسه و شرایط تنش‌های اولیه‌ی خاک است. لذا مدل رفتاری باید توانایی پیش‌بینی تغییر رفتار خاک با تغییر مشخصات اولیه‌ی آن را داشته باشد.^[۹]

Dafalias (۱۹۹۳) مدل‌های رفتاری کشسان خمیری ارائه‌شده برای خاک‌های ماسه‌یی را براساس رویکرد استفاده‌شده در فرمولاسیون آنها به ۴ دسته‌ی کلی تقسیم‌بندی کرده است:^[۱۰]

۱. مدل‌های مبتنی بر حالت خمیری کلاسیک^۱،
۲. مدل‌های سطح مرزی^۲،
۳. مدل‌های سطح تودرتو^۳،
۴. مدل‌های تعمیم‌یافته‌ی حالت خمیری^۴.

که از میان مدل‌های ذکرشده، به علت پاسخ‌های نسبتاً دقیق مدل‌های سطح تودرتو در پیش‌بینی رفتار ماسه، تعداد پارامترهای موردنیاز کم‌تر و در دسترس بودن پارامترهای مذکور برای ماسه با تراکم نسبی مختلف، مدل‌های سطح تودرتو کاربرد بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها دارند. همچنین مدل ذکرشده، نحوه‌ی تغییرات کرنش خمیری را در طول بارگذاری نشان می‌دهد، که در واقع نشان‌دهنده‌ی رفتار کشسان خمیری خاک است. ضمناً مدل مذکور با رفتار حقیقی خاک در آزمایشگاه تناسب دارد.^[۱۱] شکل ۱، نمایی از مدل مذکور در فضای تنش‌های اصلی و صفحه‌ی تنش انحرافی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نحوه‌ی عملکرد تئوری حالت خمیری چند صفحه‌یی در فضای تنش‌های اصلی و صفحه‌ی تنش انحرافی.

جدول ۱. محدوده‌ی تغییرات پارامترهای مورد بررسی در تحلیل‌های عددی.

پارامترهای شمع		پارامترهای خاک		
L (m)	D (m)	φ (deg)	γ (ton/m ^۳)	E (kg/cm ^۲)
۱۰	۰٫۴	۲۳	۱٫۴	۲۰۰
۱۵	۰٫۵	۲۵	۱٫۵	۳۰۰
۲۰	۰٫۶	۲۷	۱٫۶	۴۰۰
۲۵	۰٫۷	۲۹	۱٫۷	۵۰۰
۳۰	۰٫۸	۳۱	۱٫۸	۶۰۰
	۰٫۹	۳۳	۱٫۹	۷۰۰
	۱	۳۵	۲٫۰	۸۰۰
		۳۷	۲٫۱	۹۰۰

جدول ۲. مشخصات خاک و شمع مرجع.

L (m)	D (m)	φ (deg)	γ (ton/m ^۳)	E (kg/cm ^۲)
۲۰	۰٫۷	۳۰	۱٫۷۵	۵۵۰

ب) پارامترهای مکانیکی و فیزیکی خاک شامل: زاویه‌ی اصطکاک، مدول کشسانی، و وزن مخصوص،

ج) شرایط سرشمع از لحاظ گیرداری.

در جدول ۱، مشخصات شمع و خاک مورد مطالعه ارائه شده است. در ادامه، تأثیر پارامترهای ذکر شده در رفتار شمع تحت بار جانبی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. به این منظور با مرجع قراردادن شمع سرگردار در خاک ماسه‌یی خشک، با مشخصاتی که در جدول ۲ ارائه شده است، تأثیر هر پارامتر به‌طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

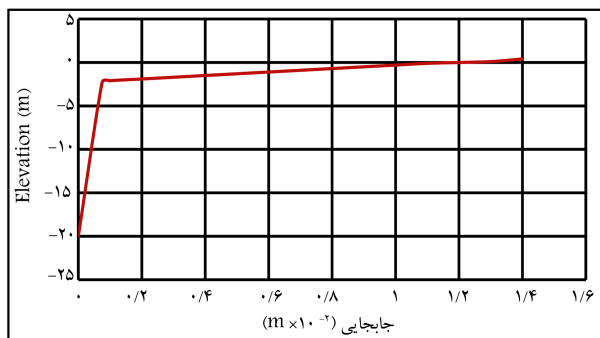
۱.۴. بررسی اثر طول شمع در میزان ظرفیت باربری جانبی آن

نتایج پژوهش‌هایی در سال ۱۹۹۱ نشان می‌دهد که افزایش طول شمع، تأثیر چندانی در کاهش تغییرشکل‌های جانبی شمع ندارد. این مطلب در شرایطی که سرشمع، گیردار کامل باشد، بیشتر نمایان است.^[۱۷] از طرفی در پژوهشی در سال ۱۹۶۰ نشان داده شده است که افزایش طول شمع از یک حد مشخص، تأثیری در میزان تغییرشکل جانبی ندارد.^[۱۲] همچنین طی مطالعاتی در سال ۲۰۱۰،^[۱۳] این نتیجه به‌دست آمده است که تغییر طول شمع بدون تغییر قطر آن، اثر بسیار کمی در جابه‌جایی سرشمع دارد.

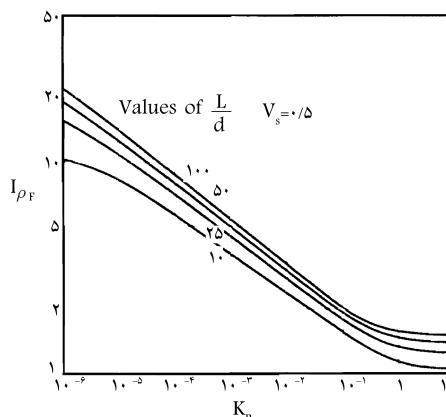
در پژوهش حاضر، برای بررسی اثر طول شمع در میزان تغییرشکل جانبی و ظرفیت باربری شمع، شمع‌هایی با قطر یکسان و طول متغیر از ۱۰ الی ۳۰ متر با گام ۵ متر، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. نمودار بار جانبی - جابه‌جایی جانبی ترسیم‌شده در شکل ۵ نشان می‌دهد که تغییر طول اثری در ظرفیت باربری جانبی شمع ندارد.

خاطر نشان می‌شود عمق گیرداری هر شمع، که مشخص‌کننده‌ی طول مؤثر شمع است، با قطر آن رابطه دارد. از آنجایی که در شمع‌های ذکر شده، مقدار قطر ثابت در نظر گرفته شده است، عمق گیرداری تمامی شمع‌های مذکور مقادیر برابری خواهد داشت.

به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که با تغییر طول یک شمع بلند به ازاء یک



شکل ۳. نمودار جابه‌جایی شمع.



شکل ۴. عامل تأثیر I_{PF} برای شمع.

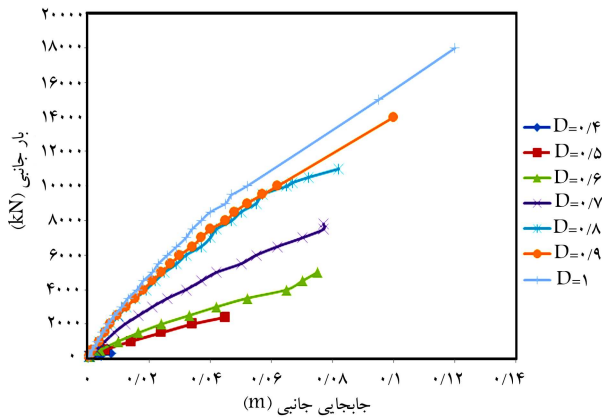
که در آن، H نیروی جانبی وارد به سرشمع، E_s مدول کشسانی خاک، L طول شمع، و I_{PF} عامل تأثیر برای شمع سرگردار است، که با توجه به شکل ۴ به‌دست می‌آید. با توجه به نسبت سختی $k = \frac{E_p \times I_p}{E_s \times L^3} = 6.18 \times 10^{-10}$ ، که در آن E_p مدول کشسانی شمع، I_p ممان اینرسی شمع، E_s مدول کشسانی خاک، و L طول شمع است و با توجه به نسبت طول به قطر شمع $\frac{L}{D} = 40$ ، مقدار عامل تأثیر از روی نمودار، برابر ۱۴ در نظر گرفته شده است و با جایگذاری در رابطه‌ی ۱، بیشینه‌ی جابه‌جایی برابر ۱٫۲۷ cm به‌دست آمده است، که اختلافی حدود ۱٪ با جابه‌جایی به‌دست‌آمده از تحلیل عددی دارد.

۴. نتایج تحلیل عددی

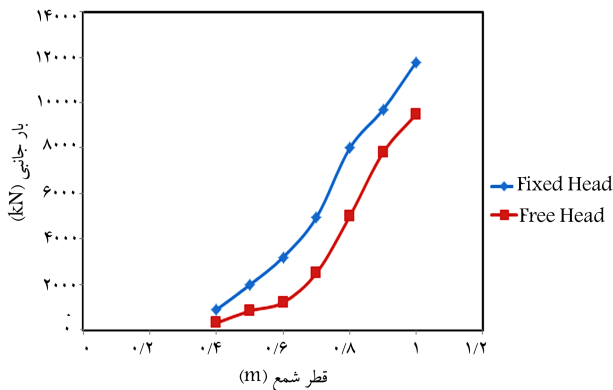
در این بخش، به‌منظور مطالعه و بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی شمع و خاک در عملکرد و میزان ظرفیت باربری شمع‌های درون خاک ماسه‌یی خشک در برابر بار جانبی، مطالعه‌ی پارامتریک صورت گرفته است.

طبق مطالعات انجام‌شده‌ی Long و همکاران (۲۰۰۵)،^[۴] مقاومت جانبی شمع در هنگامی که تحت بار جانبی قرار می‌گیرد، به شرایط سر و ابعاد شمع (D ، L)، سختی خاک و شمع بستگی دارد، تأثیر پارامترهای عنوان‌شده به همراه پارامترهای ژئوتکنیکی خاک (φ ، γ) در ظرفیت باربری جانبی شمع، یکی از اهداف پژوهش حاضر است. به این ترتیب، پارامترهایی که تأثیر آن‌ها مدنظر قرار گرفته شده است، عبارت‌اند از:

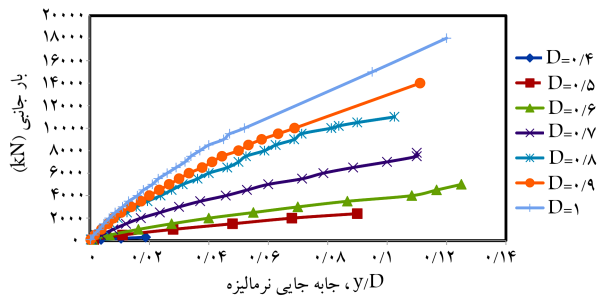
الف) ابعاد شمع شامل قطر و طول،



شکل ۷. تغییرات بار جانبی شمع سرگیردار در برابر جابه‌جایی جانبی (به ازاء قطرهای مختلف).



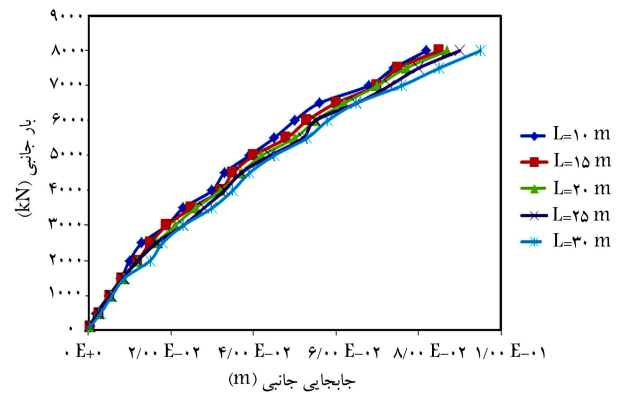
شکل ۸. مقایسه‌ی ظرفیت باربری جانبی شمع در دو حالت سرگیردار و آزاد (به ازاء قطرهای مختلف).



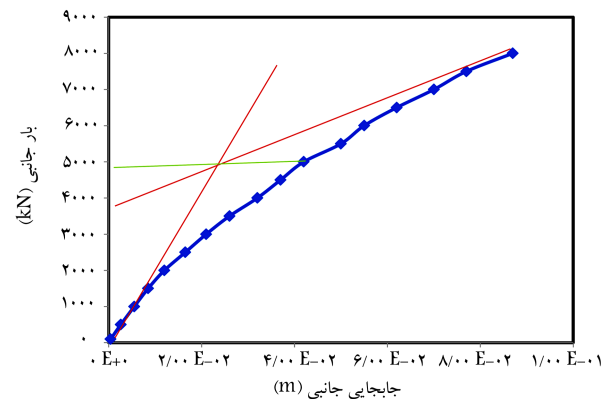
شکل ۹. تغییرات بار جانبی شمع سرگیردار در برابر جابه‌جایی جانبی نرمالیزه‌شده (Δ/D).

با توجه به شکل مذکور، چنین استنتاج می‌شود که بین افزایش ظرفیت شمع و قطر آن رابطه‌ی خطی برقرار نیست. به عبارت دیگر، فرضیه‌ی خطی بودن رابطه‌ی بین مقاومت خاک و قطر شمع که توسط برومز مطرح شده است، کاربرد ندارد. غیرخطی بودن رابطه‌ی بین ظرفیت باربری جانبی شمع و قطر شمع نیز در پژوهش‌های مختلف از طریق روابط مختلف مطرح شده است. [۱۶-۱۴]

جهت بررسی جامع‌تر، اثر کالیبراسیون قطر شمع مورد ارزیابی قرار گرفته است. این موضوع با نرمالیزه‌کردن جابه‌جایی جانبی نسبت به قطر شمع و ترسیم آن در برابر بار جانبی در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور و براساس بارهای جانبی محاسبه‌شده‌ی متناظر با آن مشاهده



شکل ۵. نمودار بار جانبی - جابه‌جایی جانبی (به ازاء طول‌های مختلف).



شکل ۶. نحوه‌ی ترسیم مماس بر نمودار و یافتن ظرفیت باربری جانبی شمع.

قطر ثابت، تغییر در عمق گیرداری شمع به وجود نمی‌آید و در نتیجه تغییر در میزان ظرفیت باربری و تغییر شکل جانبی به وجود نخواهد آمد.

۲.۴. بررسی اثر قطر شمع در میزان ظرفیت باربری جانبی آن

در این بخش از پژوهش، به بررسی میزان تأثیر قطر شمع در ظرفیت باربری جانبی شمع پرداخته شده است. به این منظور، قطرهای متغیر برای شمع‌های سرگیردار با طول ثابت شمع مرجع مورد بررسی قرار گرفته است. میزان این پارامتر از ۰/۴ تا ۱ m با گام ۰/۱ m تغییر داده شده و بار جانبی قابل تحمل شمع، به عنوان خروجی آنالیز مد نظر قرار گرفته است.

تعیین این بار، Q_{cr} از طریق یافتن نقطه‌ی تقاطع خطوط مماس بر منحنی بار-جابه‌جایی است. به طور مثال برای شمع مرجع در حالت سرگیردار، با ترسیم مماس وارد بر آن، مقدار ظرفیت باربری جانبی به دست آمده برابر ۴۹۵۰ kN است (شکل ۶). نتایج به دست آمده از آنالیز شمع‌های سرگیردار، با ترسیم بار جانبی در برابر جابه‌جایی در شکل ۷ ارائه شده است.

ملاحظه می‌شود که به ازاء بار جانبی یکسان وارد بر شمع، با افزایش قطر شمع، کاهش در میزان جابه‌جایی جانبی را خواهیم داشت. همان‌گونه که مورد انتظار است، علت این امر افزایش سختی شمع با بالا رفتن اندازه‌ی قطر است.

همچنین با مقایسه‌ی این دو نمودار به دست آمده در این پژوهش (شکل ۸)، می‌توان مشاهده کرد که گیردار کردن سرشمع، در میزان کاهش جابه‌جایی جانبی شمع سرگیردار نسبت به شمع سر آزاد و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع نقش به‌سزایی دارد.

می‌شود که باز هم رابطه‌ی خطی بین افزایش ظرفیت شمع و قطر آن برقرار نیست.

۴.۴. بررسی اثر وزن مخصوص خاک در میزان ظرفیت باربری

جانبی شمع

با تغییر دادن پارامتر وزن مخصوص خاک از مقدار $1/4$ تا $2/1$ (ton/m^3)، نحوه‌ی اثر تغییرات آن در ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳، نشان‌دهنده‌ی نتایج تحلیل نسبت به وزن مخصوص خاک هستند. ملاحظه می‌شود که با افزایش میزان تراکم خاک ماسه‌ی و در نتیجه بالا رفتن وزن مخصوص خاک، ظرفیت باربری جانبی شمع به‌طور قابل ملاحظه‌ی افزایش می‌یابد. بدین صورت که با افزایش وزن مخصوص خاک، فشار مقاوم افقی خاک نیز متعاقباً افزایش می‌یابد و در نتیجه افزایش مقاومت خاک و ظرفیت باربری جانبی رخ خواهد داد.

۵.۴. بررسی اثر مدول کشسانی خاک در ظرفیت باربری جانبی شمع

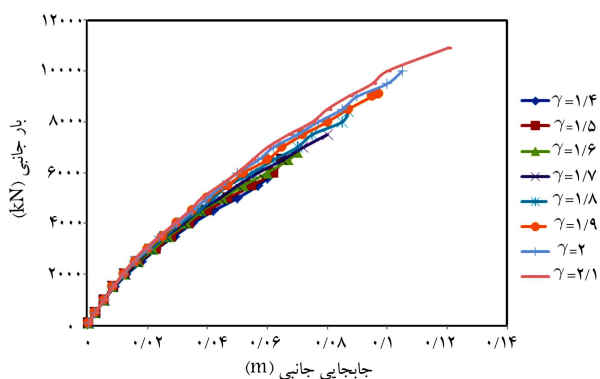
محدوده‌ی تغییرات مدول کشسانی خاک مورد مطالعه از 200 الی 900 (kg/cm^2) است. شکل ۱۴، نشان‌دهنده‌ی نحوه‌ی عملکرد پارامتر مدول کشسانی خاک در میزان تغییر شکل جانبی شمع است. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، میزان جابه‌جایی شمع در بار جانبی ثابت، به ازاء مقادیر مختلف مدول کشسانی خاک، تفاوت ناچیزی با هم دارد. دلیل این امر را می‌توان بالا بودن سختی شمع نسبت به خاک دانست، که افزایش مدول کشسانی خاک، تغییر زیادی در میزان

۳.۴. بررسی اثر زاویه‌ی اصطکاک خاک در میزان ظرفیت باربری

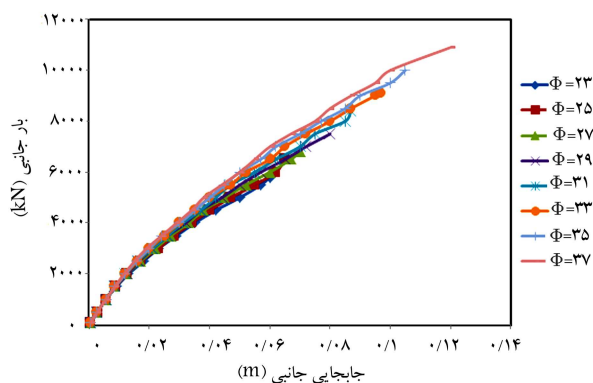
جانبی شمع

به منظور بررسی تأثیر زاویه‌ی اصطکاک در ظرفیت باربری جانبی شمع، زاویه‌ی اصطکاک از مقدار 23 تا 37 درجه با گام 2 درجه تغییر داده شده است. شکل ۱۰، نشان‌دهنده‌ی نتایج آنالیز نسبت به زاویه‌ی اصطکاک خاک است. نمودار بار جانبی در برابر جابه‌جایی به ازاء زوایای اصطکاک مختلف در شکل مذکور ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که افزایش زاویه‌ی اصطکاک خاک در بهبود رفتار شمع تحت بار جانبی اثر قابل ملاحظه‌ی دارد. افزایش در مقاومت جانبی شمع با افزایش میزان زاویه‌ی اصطکاک را می‌توان نوعی از اندرکنش خاک و شمع در نظر گرفت. وقتی که زاویه‌ی اصطکاک خاک افزایش می‌یابد، متعاقب آن قفل و بست میان ذرات نیز افزایش می‌یابد و سبب بالا رفتن مقاومت خاک در برابر جابه‌جایی شمع می‌شود. همچنین انتقال تنش برشی و مقاومت جانبی بسیج شده به دلیل اتساع ماسه‌ی متراکم، سبب بهتر شدن این اندرکنش می‌شود. به همین علت، در فرمول پیشنهادی، اثر زاویه‌ی اصطکاک، به‌صورت پارامتری از مقاومت جانبی بسیج شده است، که همان مقاومت Passive خاک در نظر گرفته شده است.

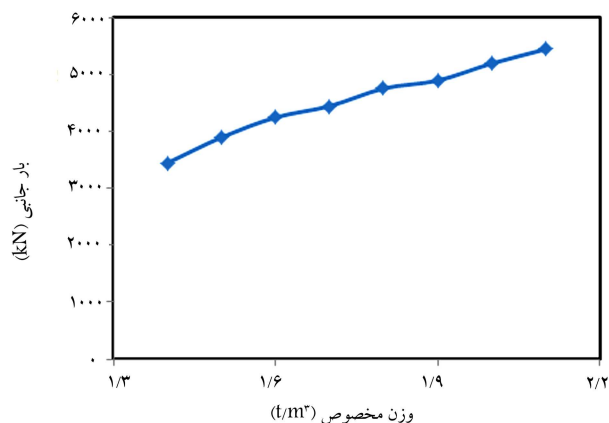
شکل ۱۱، نیز روند افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع را به ازاء زوایای اصطکاک مختلف نشان می‌دهد.



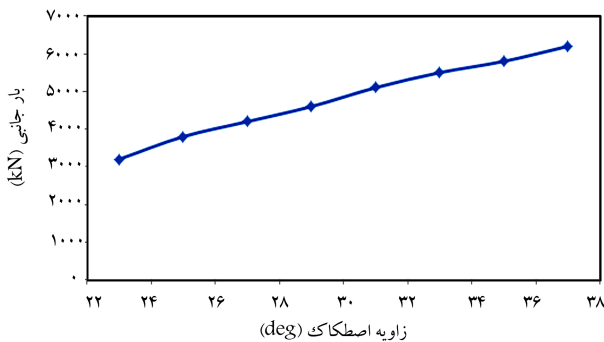
شکل ۱۲. تغییرات بار جانبی شمع سرگردار در برابر جابه‌جایی جانبی (به ازاء مقادیر مختلف وزن مخصوص خاک).



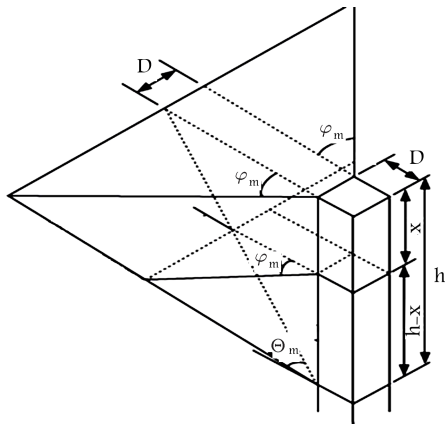
شکل ۱۰. تغییرات بار جانبی شمع سرگردار در برابر جابه‌جایی جانبی (به ازاء زوایای اصطکاک مختلف).



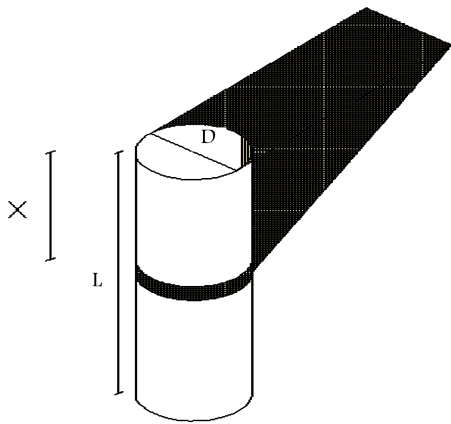
شکل ۱۳. ظرفیت باربری جانبی شمع سرگردار (به ازاء مقادیر مختلف وزن مخصوص خاک).



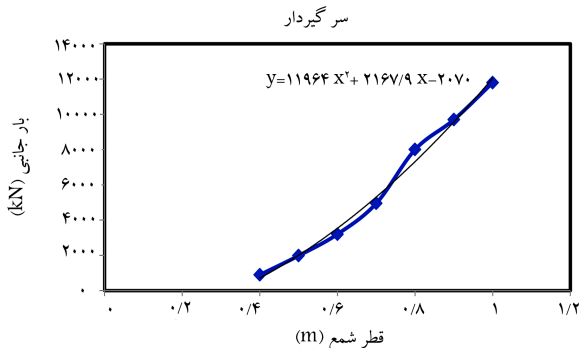
شکل ۱۱. ظرفیت باربری جانبی شمع سرگردار (به ازاء زوایای اصطکاک مختلف).



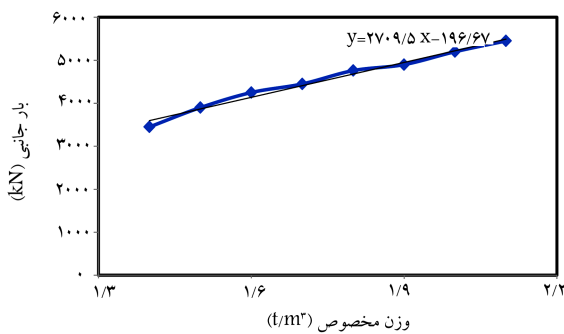
شکل ۱۵. گوهی کرنشی ایجادشده اطراف شمع تحت بار جانبی. [۱۷]



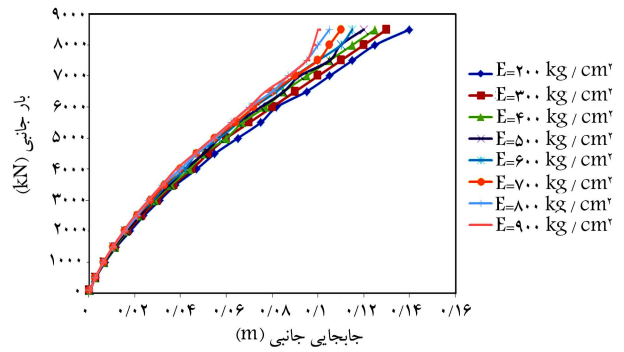
شکل ۱۶. مکانیزم گسیختگی خاک جلوی شمع تحت بار جانبی.



شکل ۱۷. عبور بهترین خط از نمودار بار جانبی - قطر شمع.



شکل ۱۸. عبور بهترین خط از نمودار بار جانبی - وزن مخصوص خاک.



شکل ۱۴. تغییرات بار جانبی شمع سرگردار در برابر جابه جایی جانبی (به ازاء مقادیر مختلف مدول کشسانی خاک).

جابه جایی شمع و در نتیجه میزان ظرفیت باربری جانبی شمع ایجاد نمی‌کند. این موضوع در تطابق با تحقیقات Long و همکاران است. [۴]

۵. رابطه‌ی پیشنهادی ظرفیت باربری جانبی

یکی از مدل‌هایی که در تحلیل شمع تحت بار جانبی مورد استفاده واقع می‌شود، مدل گوهی کرنشی است. یکی از معایب این روش آن است که فاقد اطلاعاتی راجع به جزئیات و چگونگی تعیین عمق گوه است. [۱۷] طبق مطالعات Norris (۱۹۹۶)، نحوه‌ی تشکیل گوهی کرنشی در خاک‌های یکسان مطابق شکل ۱۵ است. [۱۷] در واقع مدل گوهی کرنشی، نشان‌گر ویژگی‌های گوهی مقاوم تشکیل شده در جلوی شمع است. این گوهی مقاوم، در اعماق سطحی شمع و خاک به وجود می‌آید. در شکل ۱۵، زاویه‌ی تشکیل گوهی کرنشی در جلوی شمع، $\theta_m = 45 - \varphi_m/2$ ، طول شمع، و D قطر شمع است.

براساس تحلیل‌های عددی و با توجه به نتایج بررسی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله طول شمع در میزان ظرفیت باربری جانبی آن، عمق تشکیل گوهی کرنشی را می‌توان در عمق گیرداری شمع در نظر گرفت.

در صورتی که نیروی مقاوم کلمب جلوی یک دیوار حائل به عنوان مبنای محاسبه‌ی نیروی ظرفیت باربری جانبی شمع در نظر گرفته شود (با در نظر گرفتن تشابه نسبی مکانیزم گسیختگی یعنی تشکیل گوهی مقاوم در جلوی شمع و لحاظ کردن جزئیات در ضریب رابطه‌ی پیشنهادی)، گوهی گسیختگی شمع را می‌توان به این صورت فرض کرد (شکل ۱۶)، که این موضوع با نتایج آزمایشگاهی این محققین تطابق دارد.

نحوه‌ی اثر پارامترهای مؤثر در ظرفیت باربری جانبی شمع، با برآزش بهترین خط از نمودارهای مربوط، همان‌طور که در شکل‌های ۱۷ الی ۱۹ نشان داده شده است، به دست می‌آید.

مشاهده می‌شود که اثر غیرخطی (توان دوم) قطر شمع و اثر خطی وزن مخصوص خاک و ضریب فشار جانبی خاک در حالت مقاوم، نتایج دقیق‌تری برای ظرفیت باربری جانبی شمع ارائه می‌دهند.

در نهایت، رابطه‌ی عمومی ظرفیت باربری جانبی شمع سرگردار، به صورت رابطه‌ی ۲ پیشنهاد می‌شود:

$$P_u = (62.66 k_p \gamma D^2) \times L_f \quad (2)$$

که در آن، P_u نیروی ظرفیت باربری جانبی، γ وزن مخصوص ماسه، D قطر شمع، L_f طول مؤثر شمع، که برابر عمق گیرداری در نظر گرفته شده است، و

$k_p = \tan^2(45 + \frac{\varphi}{2})$ نحوه‌ی به‌دست‌آوردن ضرایب رابط، در پیوست مرجع [۱۸] ارائه شده است.

خاطر نشان می‌شود از آنجا که به لحاظ توانی، قطر شمع مهم‌ترین پارامتر به حساب می‌آید، ضریب رابطه بر این اساس به‌دست آمده و صحت‌سنجی رابطه‌ی پیشنهادی برای مقادیر مختلف زاویه‌ی اصطکاک و وزن مخصوص خاک صورت گرفته است (شکل‌های ۲۰ و ۲۱).

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج بیانگر کالیبراسیون بسیار خوب رابطه‌ی پیشنهادی برای پارامترهای مختلف است.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با انجام تحلیل‌های سه‌بعدی غیرخطی بر مبنای روش اجزاء محدود به کمک نرم‌افزار OpenSeesPL، رفتار شمع‌های سرگردار تحت بار جانبی استاتیکی در خاک ماسه‌یی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین عوامل تأثیرگذار در ظرفیت باربری شمع، از قبیل مشخصات هندسی شمع (L, D) و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک از قبیل (φ, γ) مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس، با استفاده از مدل‌سازی عددی و رسم نمودارهای ظرفیت باربری جانبی به ازاء پارامترهای مختلف، میزان تأثیر این پارامترها ارزیابی شده و در نهایت، رابطه‌ی پیشنهادی ظرفیت باربری جانبی استاتیکی شمع‌های سرگردار در خاک ماسه‌یی ارائه شده است.

اهم نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های عددی، برای شمع‌های بلند در این پژوهش، به اختصار عبارت‌اند از:

۱. ظرفیت باربری جانبی شمع رابطه‌ی غیرخطی (توان ۲) با قطر شمع دارد.
 ۲. رابطه‌ی ظرفیت باربری جانبی شمع - زاویه‌ی اصطکاک خاک و همچنین رابطه‌ی ظرفیت باربری جانبی شمع - وزن مخصوص خاک، تقریباً خطی هستند.
 ۳. در تطابق با مطالعات پیشین، افزایش طول شمع بیش از یک حد مشخص (عمق گیرداری)، تأثیری در میزان ظرفیت باربری جانبی شمع ندارد.
 ۴. به‌دلیل سختی بالای شمع، افزایش مدول کشسانی خاک، سختی قابل ملاحظه‌یی ایجاد نکرده است، در نتیجه با بالا رفتن ناچیز مقاومت نسبی خاک، ظرفیت باربری جانبی شمع چندان افزایش نخواهد یافت.
- در نهایت، رابطه‌ی عمومی ظرفیت باربری جانبی شمع، به‌صورت رابطه‌ی ۳ پیشنهاد شده است:

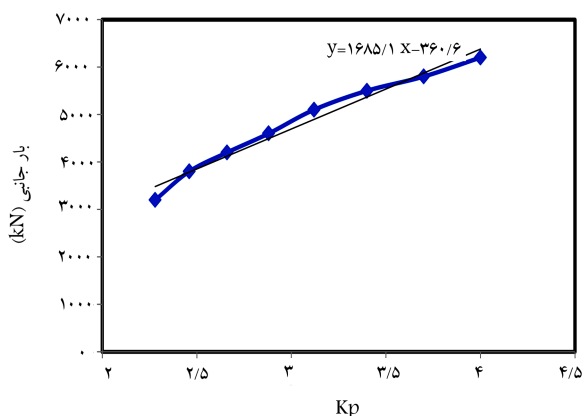
$$P_u = (62.66 k_p \gamma D^2) \times L_f \quad \text{شمع سرگردار} \quad (3)$$

که در آن، P_u نیروی ظرفیت باربری جانبی، γ وزن مخصوص ماسه، D قطر شمع، و L_f طول مؤثر شمع که برابر عمق گیرداری در نظر گرفته شده است و $k_p = \tan^2(45 + \frac{\varphi}{2})$.

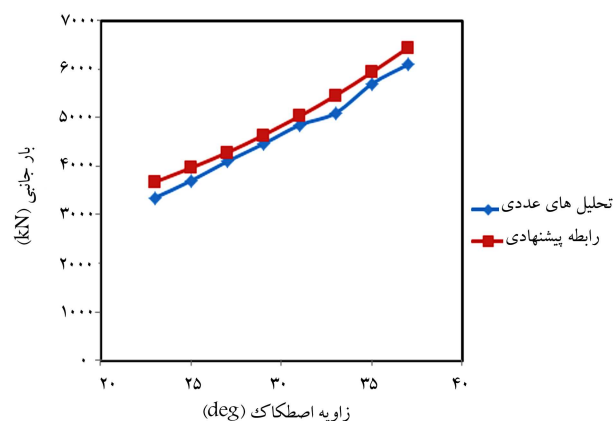
پانویس‌ها

1. classical plasticity- based models

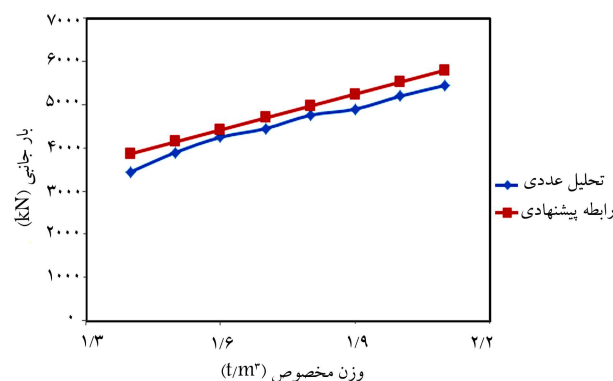
2. bounding surface models
3. nested surface models
4. generalized plasticity models



شکل ۱۹. عبور بهترین خط از نمودار بار جانبی - ضریب فشار مقاوم خاک.



شکل ۲۰. مقایسه‌ی ظرفیت باربری جانبی شمع سرگردار به‌دست‌آمده از تحلیل‌های عددی و رابطه‌ی پیشنهادی (به ازاء زوایای اصطکاک مختلف).



شکل ۲۱. مقایسه‌ی ظرفیت باربری جانبی شمع سرگردار به‌دست‌آمده از تحلیل‌های عددی و رابطه‌ی پیشنهادی (به ازاء وزن مخصوص مختلف).

منابع (References)

- Rahmani, A. "Dynamic analysis of pile in liquefaction", Master's Thesis, Sharif University of Technology (2010).
- Gustavo, E. "Dynamic lateral response of single piles considering soil inertia contribution", University of Puerto Rico, pp. 217- 287 (2007).
- Prakash, Sh., and Shamra, H., *Pile Foundations in Engineering Practice*, University of Missouri- Rolla, 768 p. (1990).
- Long. H. and Cheng Fan, Chia "Assessment of existing methods for predicting soil response of laterally loaded piles in sand", *Computers and Geotechnics*, **32**(3), pp. 274-289 (2005).
- Banerjee, P.K. and Davis, T.G. "The behavior of axially and laterally loaded single piles embedded in non-homogeneous soils", *Geotechnique*, **28**(3), pp. 309-326 (1978).
- Yu-Xo, L., Cai, F., Wang, G.-X. and Ugai, K. "Nonlinear analysis of laterally loaded single piles in sand using modified strain wedge model", *Computers and Geotechnics*, **51**, pp. 60-71 (2013).
- Trochanis, A., Bielak, J. and Christiano, P. "Three-dimensional nonlinear study of piles", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **117**(3), pp. 429-447 (1991).
- Open System for Earthquake Engineering Simulation*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley (1998-2002). (Website: <http://OpenSees.Berkeley.edu/>)
- Tayyebat, M. "Two-level critical state plasticity model for numerical modeling of liquefaction with correlated approach", Master's Thesis, Sharif University of Technology (2003).
- Dafalias. Y.F. "Overview of constitutive model used in VELACS", *Verifications of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems*, Arulanandan and Scott (eds), Rotterdam, Balkema, **II**, pp. 1293-1304 (1993).
- Elgamal, A., Parra, E., Yang, Z., Dobry, R. and Zeghal, M. "Liquefaction constitutive model", *Proc. Int. Workshop on the Physics and Mechanics of Soil Liquefaction*, P. Lade (ed.), Balkema, Rotterdam, the Netherlands (1998).
- Poulos, H.G. and Davis, E.H., *Pile Foundation Analysis and Design*, Chapter 8. Centre for Geotechnical Research University of Sydney (1980).
- Rahmani, A. and Pak, A. "Dynamic analysis of pile in liquefaction", *The 5th National Congress on Civil Engineering*, Ferdowsi University of Mashhad (2010).
- Fan-Ren, L., Yaho-Hua, J. and Ji-Ming, Y. "Study on proportional relationship lateral bearing capacity of batter pile by model experiments", In: *International Workshop on Automobile, Power and Energy Engineering*, *Procedia Engineering*, **16**, pp. 8-13 (2011).
- Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. "Analysis of laterally loaded pile in sand", In: *Proceedings of the Sixth Annual Offshore Technology Conference*, Houston (TX). Paper No. 2080 (1974).
- Hansen, J.B. and Christensen, N.H., *The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces*, Bull. No. 12, Danish Geotechnical Institute, Geoteknisk Institut (1961).
- Norris, G. "Theoretically based BEF laterally loaded pile analysis", In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling*, Paris, France. pp. 361-386 (1996).
- Hesabirad, N. "Evaluation of lateral bearing capacity of piles, considering the interaction of soil and pile", Master's Thesis, Tarbiat Modares University (2014).