مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۳۱-۳۷

Original Article

بررسی اصطکاک منفی در شمع قائم و مایل منفرد با استفاده از مدل‌سازی عددی

محمد مهدی حاجی‌طاهری‌ها (کارشناس ارشد)
محمود حسنلوراد* (استادیار)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام (ره)
ابوالفضل اسلامی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر

در این نوشتار اصطکاک منفی در شمع قائم و مایل منفرد بررسی شده است. ابتدا به منظور صحت‌سنجی نتایج، یک شمع قائم اتکایی و اصطکاکی مدل شده و نتایج به دست‌آمده از آن با نتایج ارائه‌شده توسط سایر پژوهشگران مقایسه و تأیید شده است، سپس یک شمع منفرد قائم اتکایی و یک شمع قائم اصطکاکی تحت سربارهای سطحی متفاوت مدل‌سازی شده و نیروی فروکش آنها مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، رفتار شمع منفرد مایل اتکایی و اصطکاکی با زوایای تمایل بین ° تا ۳۰ درجه نسبت به قائم تحت شرایط مشابه شمع قائم مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که نیروی فروکش در شمع قائم و مایل کاملاً وابسته به مقدار بارگذاری سطحی و نوع شمع به لحاظ اتکایی و اصطکاکی است. در حالت شمع مایل متناسب با نحوه‌ی توزیع تنش در خاک اطراف شمع بین حالت‌های محرک، سکون و مقاوم عمل می‌کند و مقادیر نیروی فروکش متناسب با آن ایجاد می‌شود.

mahdi_hajitaheri@yahoo.com
hassanlou@eng.ikiu.ac.ir
afeslami@aut.ac.ir

واژگان کلیدی: اصطکاک منفی، شمع قائم و مایل، نیروی فروکش.

۱. مقدمه

اصطکاک جداره‌ی منفی (NSF)[1] در اثر تنش‌های برشی رو به پایین خاک نزدیک به جداره‌ی شمع رخ می‌دهد. در واقع، این حالت هنگامی ایجاد می‌شود که خاک مجاور شمع بیش از خود شمع نشست کند. شرایط مذکور می‌تواند در اثر بارگذاری سطحی اطراف شمع و یا در شرایط پایین‌رفتن سطح آب زیرزمینی ایجاد شود.[۱-۳] NSF باعث به وجودآمدن نیروی فشاری اضافی به طور تجمعی به نام نیروی فروکش در جداره‌ی شمع می‌شود. از طرفی افزایش نشست رو به پایین شمع می‌تواند باعث بسیج‌شدن کامل ظرفیت باربری نوک شمع شود.[۴]

اما آنچه مسلم است، NSF تابع تنش مؤثر نرمال در سطح شمع است و برای به وجودآمدن نیروی اصطکاکی لازم باید دو سطح نسبت به هم دچار لغزش شوند. اما نیروی فروکش خود باعث نشست نمی‌شود.[۵]

NSF در بیشتر حالات تا مقاومت نهایی حدی خاک بسیج می‌شود، جز نقاطی که نزدیک تار خنثی شمع هستند. این پدیده در اثر جابه‌جایی نسبی چند میلی‌متری بین خاک و شمع ایجاد می‌شود.[۶و۷] لذا نادیده گرفتن نیروی فروکش در ملاحظات طراحی می‌تواند سبب تخریب فونداسیون ساختمان، اسکله‌ها و پل‌ها شود.

روش‌های زیادی برای محاسبه‌ی نیروی فروکش و فرو نشست بر روی شمع منفرد در سال‌های ۱۹۸۰، ۱۹۹۰، ۱۹۹۳ و ۱۹۹۵ به‌صورت شبیه‌سازی و مدل عددی پیشنهاد شده است.[۸-۱۱] در مطالعات انجام‌شده در سال‌های ۱۹۷۲ و ۱۹۸۹ نشان داده شده است که ایجاد تار خنثی در همه‌ی شرایط حاکم بین خاک و شمع به مقادیر نشست خاک و صلبیت مصالح شمع وابسته است. در پژوهش دیگری در سال ۱۹۸۹، برای یک شمع مفروض بیان شده است که با افزایش نشست مجاز، عمق تار خنثی افزایش می‌یابد و در نتیجه، نیروی فروکش پایین‌تر می‌رود. همچنین یک فرمول نیمه تجربی برای پیش‌بینی محل تار خنثی براساس شرایط خاک ـ شمع و نهایتاً تخمین نیروی فروکش ارائه شده است.[۱۲]

با وجود این، نیروی فروکش در شمع مایل کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. شمع‌های مایل به‌صورت ترکیبی با شمع‌های قائم و یا انحصاراً به‌عنوان عضو انتقال نیرو در فونداسیون‌ها به کار برده می‌شوند.

کارایی شمع‌های مایل در برابر بارهای افقی به این صورت است که این شمع‌ها بارهای افقی وارده از طرف سازه‌ها را جذب و سپس این بارها را به زمین منتقل می‌کنند. در اینجا به نمونه‌هایی از مطالعات انجام‌شده بر روی اصطکاک جداره در شمع‌های مایل اشاره شده است:

در پژوهشی در سال ۲۰۰۳، براساس مطالعات آزمایشگاهی بر روی شمع فولادی مایل پرداخته و نشان داده شده است که مقاومت جداره‌ی شمع فشاری

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۴/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۲/۹/۱۷، پذیرش ۱۳۹۲/۱۱/۹.

مایل با افزایش زاویه‌ی تمایل آن کاهش می‌یابد.[۱۵] از سوی دیگر، نتایج آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس در پژوهشی در سال ۱۹۹۲ نشان داده شده است که مقاومت جداره‌ی شمع در اثر افزایش زاویه‌ی تمایل شمع افزایش می‌یابد.[۱۶] همچنین در مطالعه‌ی دیگری در سال ۱۹۸۶ نشان داده شده است که با افزایش زاویه‌ی شمع، تغییرات مهمی در مقاومت جداره ایجاد نمی‌شود.[۱۷] و نیز در مطالعه‌یی در سال ۲۰۰۲، به بررسی نیروی فروکش و نشست رو به پایین شمع و تأثیرگروه شمع تحت NSF توسط نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده است.[۱۸]

پژوهشگری نیز در سال ۲۰۰۵، به مطالعه‌ی نیروی فروکش و تار خنثی در شمع منفرد واقع در خاک چند لایه و تحت تأثیر توالی اعمال بار بر روی سر شمع و بارگذاری سطحی به کمک نرم‌افزار فلک (FLAC) پرداخته است.[۱۹] همچنین پژوهشگر دیگری در سال ۲۰۰۸، یک روش طراحی برای شمع تحت NSF را مطرح و بر روی ویژگی‌های تأثیرگذار آن در تنش‌های باقی‌مانده‌ی شمع، بارگذاری سر شمع و کارایی گروه شمع بحث کرده است.[۲۰]

پژوهشگران دیگری نیز در سال ۱۹۶۵، چند آزمایش مدل بر روی شمع‌های مایل انجام و نشان دادند که مقاومت شمع‌های مایل منفی تحت اثر بارهای جانبی بیشتر از مقاومت شمع‌های مایل مثبت است.[۲۱] همچنین در مطالعه‌یی در سال ۲۰۰۱، مدلی براساس روش اجزاء محدود برای مطالعه‌ی رفتار غیرخطی شمع‌های مایل ارائه شده و در آن برای مطالعه‌ی مقاومت شمع‌های مایل و تغییرمکان جانبی به وجودآمده تحت اثر بارهای جانبی استاتیکی و سیکلیک، یک سری توابع P-Y ارائه شده است. در مطالعه‌ی مذکور، خاک به‌صورت محیط پیوسته مدل نشده است، بلکه برای مدل‌کردن خاک از فنرهایی با سختی معادل استفاده شده است و نیز رفتار شمع‌های قائم و مایل منفرد تحت اثر بارهای محوری و جانبی بررسی و نتایج حاصل از آنها با هم مقایسه شده است.[۲۲]

در پژوهشی در سال ۱۹۷۱ نیز رفتار شمع‌های مایل تحت اثر بارهای استاتیکی جانبی بررسی و نشان داده شد که تغییرمکان جانبی شمع‌های مایل به زاویه‌ی تمایل شمع بستگی دارد.[۲۳]

در این مطالعه برخی از نتایج مطالعات ذکرشده به‌صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار عددی آباکوس مورد ارزیابی قرارگرفته است. ابتدا یک مدل تحلیلی عددی سه بعدی برای تخمین اثر اصطکاک منفی در شمع قائم منفرد اصطکاکی و اتکائی تحت بارگذاری متفاوت در سطح خاک اطراف شمع ساخته شده و نیروی فروکش در بارگذاری متفاوت بر روی شمع قائم مورد تحلیل قرارگرفته است. در ادامه، تحلیل‌ها بر روی شمع مایل اتکائی و اصطکاکی توسعه داده شده و عوامل تأثیرگذاری از قبیل بارگذاری و تغییرات زاویه‌ی تمایل و شرایط دو بعدی و سه بعدی در مدل‌سازی شمع مایل مورد مقایسه و بحث قرارگرفته است.

۲. مدل‌سازی و صحت‌سنجی آن

به منظور بررسی اثرات اصطکاک منفی جداره و پیش‌بینی نیروی فروکش و نشست مازاد رو به پایین و مقایسه‌ی رفتار شمع مایل و قائم منفرد، پروفیل خاک و مشخصات آن و ضرایب اصطکاک ارائه‌شده توسط لی و همکاران (۲۰۰۲)،[۱۸] استفاده شده است.

مدل شمع از جنس بتن و به قطر ۰٫۵ متر و طول ۲۰ متر است. رفتار مصالح شمع، خطی و کشسان در نظر گرفته شده است. پروفیل خاک لایه‌یی، به طوری است که لایه‌ی بالایی آن رس نرم و با ضخامت ۲۰ متر و لایه‌ی زیری آن، ماسه متراکم با مقاومت برشی بالا به ضخامت ۵ متر است. نوک شمع بر روی لایه‌ی مقاوم قرار داده شده است و جداره‌ی شمع در خاک نرم قرار دارد. محیط خاک با مدل رفتاری موهر ـ کولمب لحاظ شده است. خاک به‌صورت همگن با پارامترهای مقاومتی ثابت در هر لایه مفروض شده است. مشخصات مصالح، پروفیل خاک و شمع در این مدل تحلیلی، در جدول ۱ ارائه شده است.

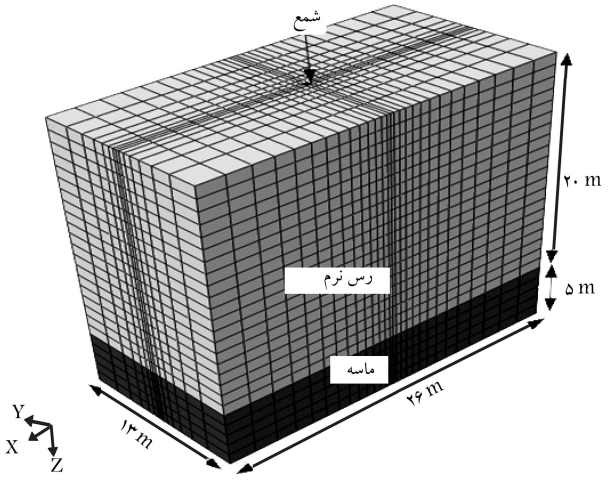
هندسه، لایه‌بندی، محل شمع و مش‌بندی مدل عددی ساخته‌شده در شکل ۱ نشان داده شده است. مش‌ها در نزدیک سطح مشترک خاک و شمع برای افزایش دقت تحلیل‌ها، نسبتاً ریز بودند و با دورشدن از اطراف شمع، درشت لحاظ شدند تا از حجم عملیاتی بالا ممانعت شود. همچنین شرایط مرزی جانبی مدل به اندازه‌ی کافی از شمع دور شده بود، به گونه‌یی که در تحلیل نهایی تأثیرگذار نباشد. تغییرات تنش‌های برجا در خاک و سختی خاک ناشی از نصب شمع نادیده گرفته شده است. بنابراین قبل از شروع آنالیز، شمع از تنش‌ها و نشست خاک آزاد است و توسعه‌ی NSF با شروع اعمال بارگذاری سطحی در بالای سطح خاک رس رخ می‌دهد. برای بررسی و تحلیل نحوه‌ی گسترش تنش برشی و نیروی فروکشی در یک شمع اصطکاکی، سختی لایه‌ی زیرین برابر سختی لایه‌ی رس در نظرگرفته شده است. در حالی که سختی خاک واقع در نوک شمع اتکائی، ۱۰۰۰ برابر سختی رس لحاظ شده است.

برای سطح مشترک خاک و شمع از مدل اصطکاکی موهر ـ کولمب استفاده شده است. المان‌های سطح مشترک در این نرم‌افزار به گونه‌یی است که اگر نیروی کششی تولیدشده در سطح مشترک از محدوده‌ی مجاز برای کشش بیشتر شود، این امکان وجود دارد که اجزاء سطح مشترک از هم جدا شوند.

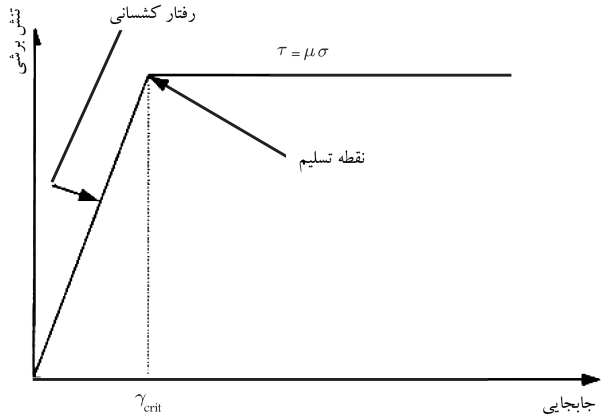
همچنین تنش مؤثر نرمال بین دو سطح تماس در ضریب اصطکاک داخلی (μ) ضرب و به‌عنوان تنش برشی اصطکاکی حدی اعمال می‌شود تا اگر تنش

جدول ۱. مشخصات مصالح مدل تحلیلی.[۲۳]

مصالح	E (Pa)	C (KPa)	ψ	γ (KN/m^3)	ϕ	υ
شمع	۲e۱۰	—	—	۲۵	—	۰٫۳
رس نرم	۵e۳	۳	۰٫۱	۱۸	۲۰	۰٫۳
ماسه	۵e۴	۰٫۱	۱۰	۲۰	۳۵	۰٫۳



شکل ۱. مش‌بندی اجزاء محدود شمع قائم.



شکل ۲. رفتار المان سطح مشترک.[۲۳]

برشی اعمالی در طول سطوح کمتر از تنش برشی حدی $\tau = \mu.\sigma'$ اعمال شود، سطوح در هم فرو نروند. لذا گره‌های المان خاک در ارتباط با شمع می‌توانند در امتداد شمع بلغزند. شکل ۲، رفتار المان سطح مشترک را نشان می‌دهد.[۱۸]

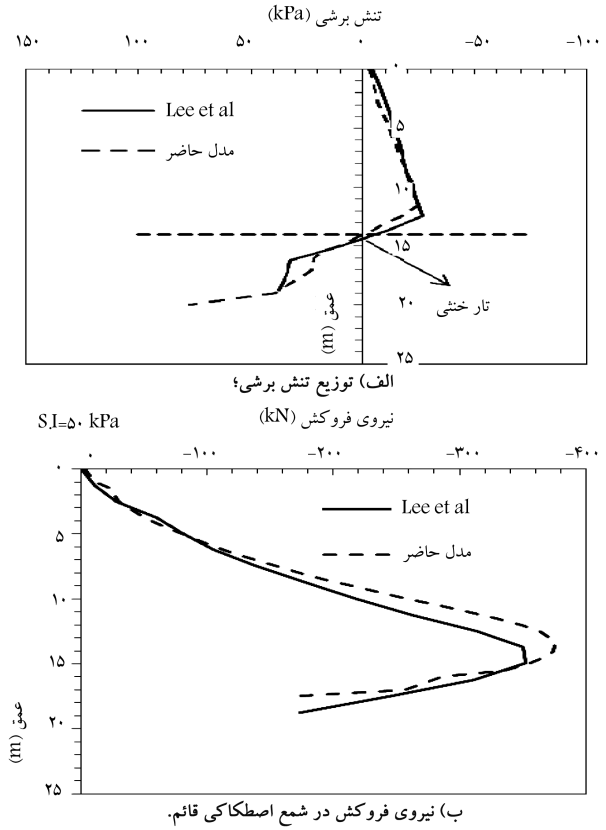
ضریب اصطکاک سطح مشترک شمع و خاک برابر ۰٫۴–۰٫۳ = $\mu = \tan\delta$، ضریب فشار جانبی خاک متناسب با روش جکی و بروکو برای خاک رس و ماسه در نظر گرفته شده است. این مقدار برای رس در حالت زهکشی‌شده برابر ۰٫۶۵ و برای ماسه ۰٫۵ لحاظ شده است. زاویه‌ی اصطکاک داخلی رس ۲۰° و زاویه‌ی اتساع خیلی کم $\psi = 0{,}1$ است. برای ماسه، بیشینه‌ی زاویه‌ی اصطکاک داخلی ۴۵° و زاویه‌ی اتساع ۱۰ درجه لحاظ شده است. در این حالت زاویه‌ی اصطکاک داخلی حالت بحرانی حدوداً $\phi = 35$ درجه است. این تذکر لازم است که اعداد مذکور مطابق با مدل عددی لی و همکاران،[۱۸] انتخاب شده است.

شکل‌های ۳ و ۴ نتایج تحقیق حاضر را به صورت مقایسه‌یی با نتایج تحقیقات لی و همکاران و کمادروس به ترتیب برای دو شمع اصطکاکی نشان می‌دهند. منظور از نیروی فروکش در این جا عبارت از مجموع نیروی برشی رو به پایین ایجادشده در جداره‌ی طول شمع و یا همان اصطکاک منفی در اثر بارگذاری خاک در سطح زمین و به تبع آن نشست خاک اطراف شمع است. برای محاسبه‌ی این پارامتر، تنش برشی در طول شمع بعد از تحلیل مدل قرائت و به‌صورت جداگانه با توجه به مقدار سطح جانبی شمع محاسبه شده است.

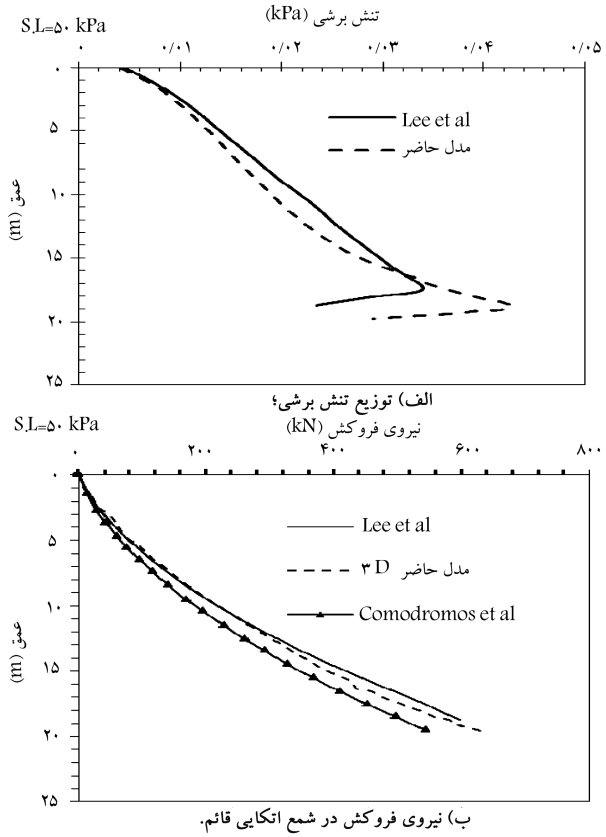
شکل‌های ۳ و ۴ الف توزیع تنش برشی و شکل های ۳و ۴ ب نیروی فروکش را در بدنه شمع اصطکاکی نشان می‌دهند. در شمع اصطکاکی تار خنثی در محلی رخ داده است که تنش برشی در دو سمت آن تغییر علامت داده است. در شمع اتکایی تقریبا تار خنثی در انتهای شمع رخ می‌دهد و تغییر علامت تنش برشی محسوس نمی‌باشد.

۳. مقایسه‌ی مدل‌های دو بعدی و سه بعدی

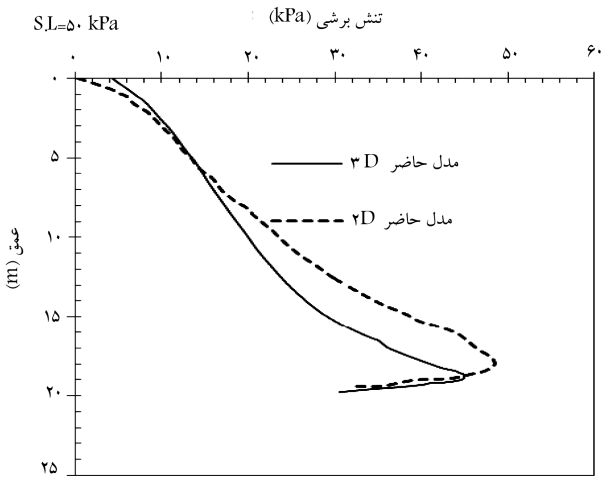
ابتدا مدل‌های دو بعدی و سه بعدی شمع قائم و مایل منفرد اتکائی قائم مورد مقایسه قرارگرفته است. ویژگی‌های مصالح مدل در هر دو حالت یکسان و بارگذاری اطراف شمع ۵ KPa، از نوع بارگذاری سطحی است. همان‌گونه که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، به طورکلی سازگاری نسبتاً خوبی بین مدل‌های دو بعدی و سه بعدی وجود دارد. در مدل دو بعدی، مقدار تنش برشی جداره در سر شمع مقدار تقریباً صفر را



شکل ۳. مقایسه نتایج تحقیق حاضر و تحقیق لی و همکاران.



شکل ۴. مقایسه نتایج تحقیق حاضر و تحقیق لی و همکاران در حالت سه بعدی.



شکل ۵. مقایسه‌ی تنش برشی بین شمع اتکایی قائم و خاک در مدل‌های دو بعدی و سه بعدی.

نشان می‌دهد. در مدل سه بعدی، سر شمع تنش برشی بیشتری را نسبت به مدل دو بعدی نشان می‌دهد. سپس در ادامه، مدل دو بعدی در بدنه‌ی شمع، تنش برشی بیشتری را بین خاک و شمع نشان می‌دهد.

ولی در انتهای شمع، هر دو مدل نتایج نسبتاً یکسانی نشان داده‌اند. دلیل این موضوع می‌تواند تفاوت کرنش مسطح و سه بعدی و تأثیر کرنش بعد سوم باشد.

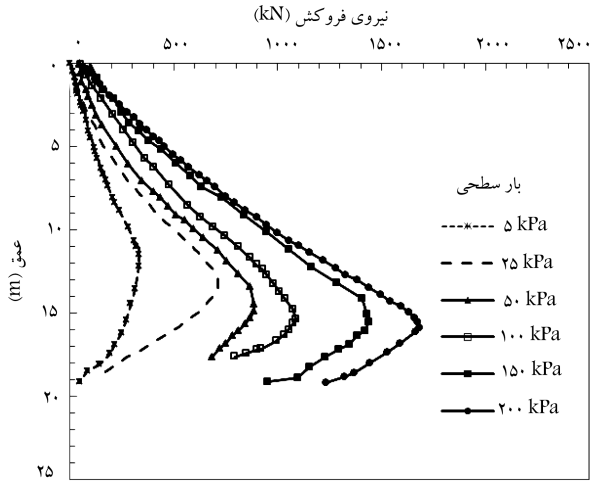
در مدل سه بعدی به دلیل افزایش درجه آزادی، قیدهای کمتری به خاک اطراف شمع اعمال شده است، گوه‌ی گسیختگی در نوک شمع در ۳ جهت گسترش پیدا می‌کند و ناحیه‌ی گسیختگی در نوک شمع، مقاومت بیشتری دارد و درنهایت، باربری کمتری در جداره‌ی شمع ایجاد می‌شود. همان‌گونه که از نمودارها مشاهده می‌شود، مقادیر تنش برشی (حتی در حالت منفی) در مدل دو بعدی بیشتر از مدل سه بعدی است.

۴. نیروی فروکش و محل تار خنثی در شمع قائم

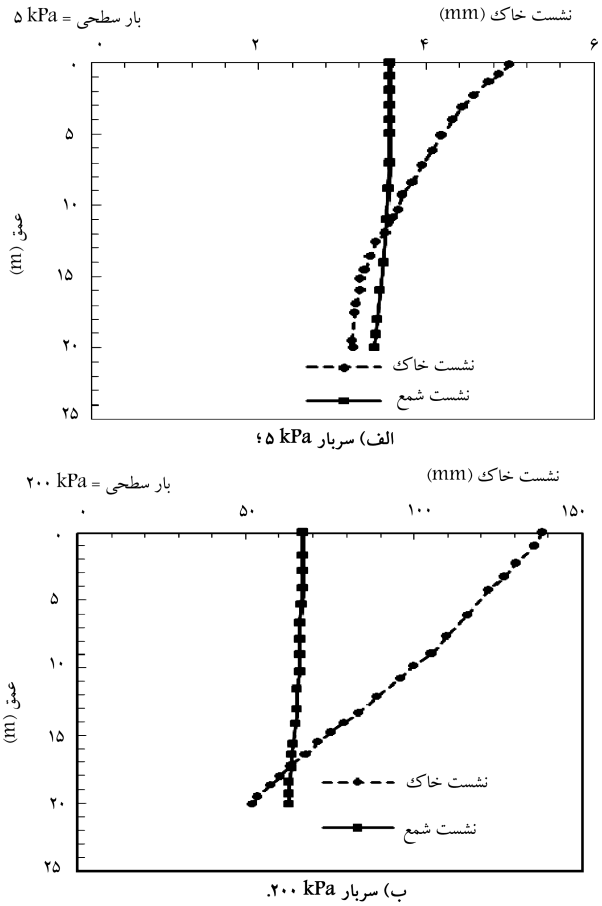
در این قسمت، مقادیر نیروی فروکش در شمع اصطکاکی و اتکایی تحت سربارهای متفاوت در روی خاک اطراف شمع بررسی و محل تار خنثی تحت شرایط حاضر ارزیابی می‌شود. همان‌طورکه در شکل ۶، که مربوط به نیروی فروکش شمع اصطکاکی است، مشاهده می‌شود با افزایش سربار روی خاک، نیروهای تجمعی فروکش افزایش می‌یابند. به گونه‌یی که برای سربار نسبتاً کوچک به اندازه‌ی ۵ KPa مقدار نیروی فروکش به ۰٫۳ MN و با افزایش سربار به ۲۰۰ KPa، این مقدار روند افزایشی دارد و به مقدار نیروی فروکش بیشینه‌ی ۱٫۶MN می‌رسد، که نشان‌دهنده‌ی یک ارتباط غیرخطی بین سربار سطح زمین و نیروی فروکش است. روند کاهشی نیروی فروکش در نمودار از مقدار بیشینه به بعد، به دلیل تغییر تنش برش در جداره‌ی شمع است.

شکل ۷، تغییرات محل تار خنثی تحت بارگذاری سطحی ۵ و ۲۰۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، محل تار خنثی با افزایش سربار از عمق ۱۲ متر تا ۱۷٫۴ متر تغییر پیدا کرده است. این مسئله به دلیل افزایش نشست‌های رو به پایین خاک با افزایش بارگذاری و افزایش نیروی برشی و نرمال در جداره‌ی شمع است.

شکل ۸، نیروی فروکش شمع اتکائی قائم تحت بارگذاری متفاوت بر روی خاک

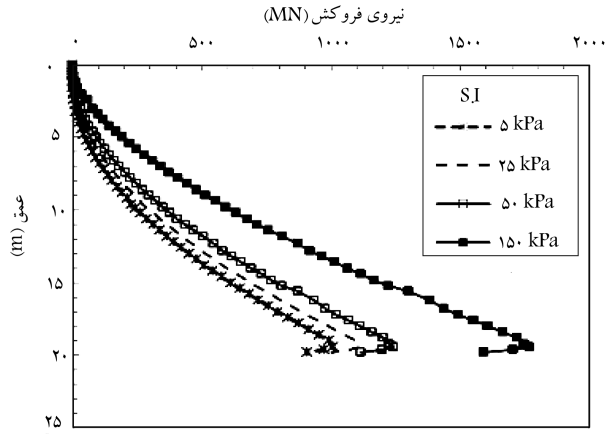


شکل ۶. توزیع نیروی فروکش در طول شمع قائم منفرد اصطکاکی برای سربارهای مختلف سطح زمین.



شکل ۷. نشست خاک اطراف شمع و شمع اصطکاکی.

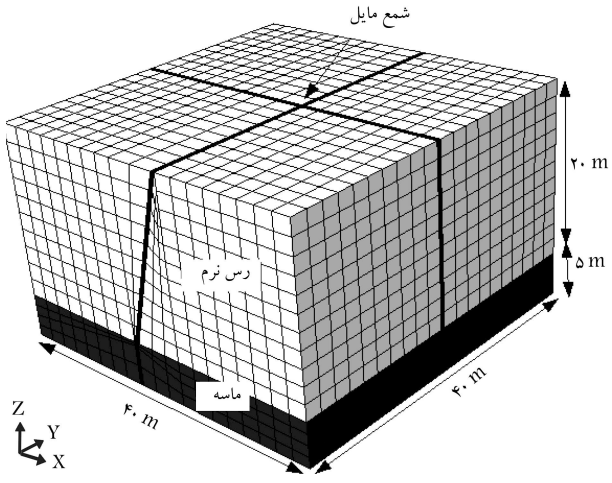
اطراف شمع را نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، نیروی فروکش در شمع اتکائی قائم با افزایش سربار افزایش پیدا کرده است. با توجه به این مطلب که شمع بر روی خاک سخت بوده و خاک بالای آن نرم است، تار خنثی در نزدیک لایه‌ی باربر زیرین شکل می‌گیرد و افزایش سربار منجر به پایین‌تر رفتن آن می‌شود و حتی ممکن است در نوک شمع شکل گیرد.



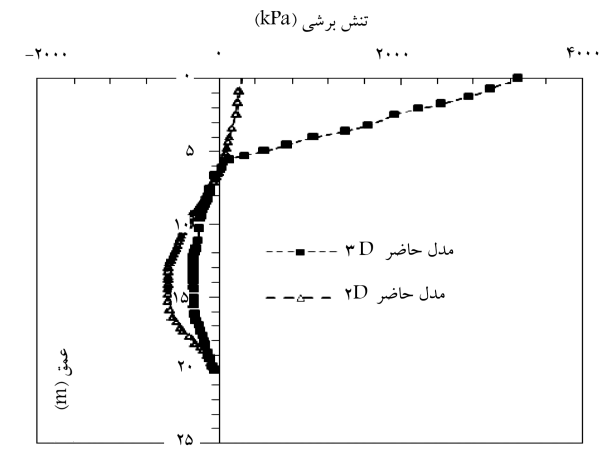
شکل ۸. توزیع نیروی فروکش در طول شمع اتکایی قائم.

۵. تحلیل نیروی فروکش در شمع مایل

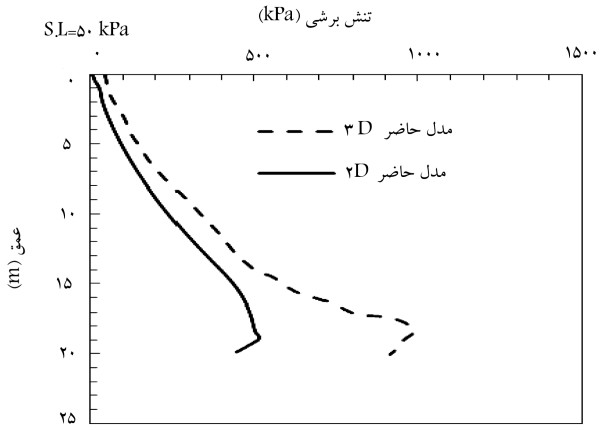
برای بررسی و تحلیل تغییرزاویه‌ی تمایل شمع نسبت به راستای قائم برروی نیروی فروکش شمع، یک مدل تحلیلی شامل شمع مایل در دو حالت سه بعدی و دو بعدی با زاویه‌ی تمایل 15° ایجاد شده است. شکل ۹، مدل سه بعدی را نشان می‌دهد. خواص مصالح خاک و شمع مایل همانند شمع قائم ذکرشده است، فقط برای جلوگیری از تأثیر شرایط مرزی در جواب نهایی دراثر زاویه‌ی تمایل، مرزهای جانبی مدل تا حدکافی از شمع مایل دور شده‌اند. در هنگام اعمال سربار یکنواخت بر خاک اطراف شمع، شرایط به گونه‌یی است که شمع مایل به دلیل تغییرشکل‌های خمشی و اعوجاج طولی، تحت شرایط مختلف بین حالت‌های مقاوم و محرک خاک اطراف با ضرایب k_p و k_a قرار می‌گیرد، لذا درک رفتار شمع را پیچیده می‌کند. شکل ۱۰، نتایج تحلیل‌ها را به‌صورت تنش برشی جداره‌ی شمع در دو حالت دو بعدی و سه بعدی برای شمع اتکائی و اصطکاکی مایل نشان می‌دهد. براساس شکل ۱۰الف، برای شمع اصطکاکی، اختلاف تنش برشی در جداره درابتدای شمع بسیار فاحش است؛ هر چند درادامه و با افزایش عمق شمع، این اختلاف کمترشده و روندکلی در دو مدل مشابه هم است. دراین حالت، در حالت سه بعدی در سمت بالای شمع در اثر اعوجاج شمع، مقدار تنش برشی بین شمع و خاک افزایش نامعقولی نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد این امر نشان از ضعف و یا خطای



شکل ۹. مش‌بندی اجزاء محدود شمع مایل در پروفیل ساده‌شده‌ی خاک با نرم‌افزار آباکوس.



الف) شمع مایل اصطکاکی؛



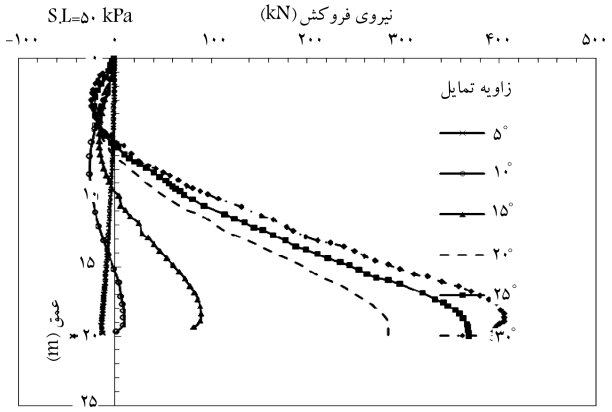
ب) شمع مایل اتکایی.

شکل ۱۰. تنش برشی جداره‌ی شمع در دو حالت دوبعدی و سه بعدی.

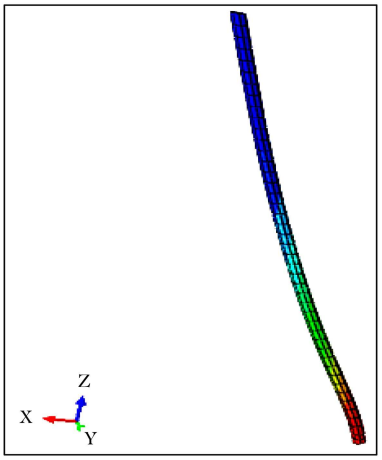
مدل عددی در این مورد باشد. شکل ۱۰ب نشان می‌دهد که روند کلی تغییرات تنش برشی در جداره‌ی شمع بین دو مدل دو بعدی و سه بعدی به طورکلی مشابه هم است. هر چند برخلاف شمع اصطکاکی با افزایش عمق، اختلاف دو مدل افزایش یافته است.

۶. تأثیر زاویه‌ی تمایل شمع در نیروی فروکش

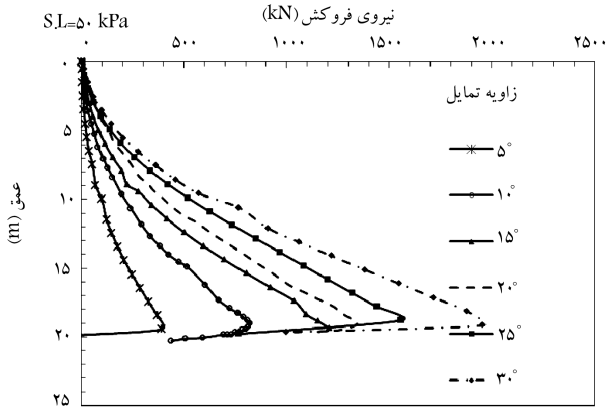
برای بررسی دقیق‌تر رفتار شمع مایل تحت زوایای تمایل متفاوت، آنالیزهای حساسیت به طور جداگانه برای شمع مایل اصطکاکی و اتکایی تحت یک سربار ثابت و یکنواخت ۵۰ KPa در اطراف شمع مایل در سطح زمین اعمال شده است. شکل ۱۱، نیروی فروکش شمع مایل اتکائی تحت زوایای تمایل متفاوت را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که برای شمع مایل، علامت و یا جهت نیروی فروکش در طول آن تغییر می‌کند و با افزایش زاویه‌ی تمایل، این وضعیت تشدید می‌شود. در این حالت، شمع تحت تنش‌های شعاعی ناشی از نیروهای محرک و مقاوم خاک اطراف در جداره‌ی خود قرار می‌گیرد، به گونه‌یی که در جداره‌ی شمع نواحی تغییر جهت تنش برشی ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر، شمع در این حالت تحت اعوجاج و خمش‌های طولی قرار می‌گیرد، که ممکن است منجر به تغییر جهت تنش برشی و همچنین نیروی فروکش در طول آن شود. در این ارتباط شکل ۱۲، اعوجاج در طول شمع مایل را نشان می‌دهد، که دلیل آن اعمال تنش‌های همه جانبه‌ی متفاوت در طول شمع در عمق



شکل ۱۱. نیروی فروکش در طول شمع اتکایی منفرد تحت زوایای تمایل مختلف.



شکل ۱۲. تغییرشکل در طول شمع مایل در اثر تنش‌های وارد از طرف خاک.



شکل ۱۳. نیروی فروکش در طول شمع مایل اصطکاکی تحت زوایای تمایل مختلف.

خاک است. ولی آنچه مسلم است این است که با افزایش زاویه‌ی تمایل شمع، مقدار نیروی فروکش هم زیاد می‌شود.

شکل ۱۳، نیروی فروکش شمع مایل اصطکاکی را تحت زوایای تمایل مختلف نشان می‌دهد. همان طورکه مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه‌ی تمایل، مقدار نیروی فروکش بیشینه نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین ملاحظه می‌شود که در شمع مایل اصطکاکی، مقادیر بیشینه‌ی نیروی فروکش در سمت نوک آن ایجاد می‌شود. سپس با تغییر جهت نیرو (نسبت به شمع اتکایی) به صورت خیلی سریع کاهش می‌یابد.

در انتها یادآور می‌شود بحث اصطکاک منفی در شمع به خصوص در حالت مایل موضوعی پیچیده است و برای تحلیل دقیق، نیازمند ساخت یک مدل فیزیکی با ابزارگذاری کامل در طول و داخل شمع و حتی درون خاک است. در این نوشتار با اینکه تعداد زیادی مدل‌سازی صورت گرفته است، هنوز تفسیر نتایج گاهی مواقع پیچیده نشان می‌دهد. در ضمن تمام نتیجه‌گیری‌ها و رفتارهای مشاهده‌شده مختص اصطکاک منفی در شرایط بارگذاری سطح زمین است. مسلماً در حالات دیگر، منجر به ایجاد اصطکاک منفی ممکن است رفتارهای دیگری ملاحظه شود.

۷. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، اثرات اصطکاک منفی در شمع قائم و مایل منفرد در خاک دو لایه مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا یک مدل شمع قائم سه بعدی با مدل لی و همکاران (۲۰۰۲) و کمادروموس (۲۰۰۵) مورد مقایسه قرار گرفته است، که نتایج انطباق نسبتاً خوبی با هم داشته‌اند. در ادامه‌ی مطالعه، مواردی مانند اثر بعد سوم مدل، شدت بار سطحی، نوع اصطکاکی و اتکایی شمع و زاویه‌ی تمایل آن مورد بررسی قرارگرفته است. به طور خلاصه، براساس مطالعات انجام‌شده در این پژوهش به این نتایج می‌توان اشاره کرد:

- مقادیر نیروی فروکش کاملاً وابسته به شرایط مصالح خاک در برگیرنده‌ی شمع، شدت بار سطحی، نوع شمع اتکایی و اصطکاکی و تغییرات زاویه‌ی تمایل شمع هستند. همچنین محل قرارگیری تار خنثی در طول شمع بسته به شرایط مذکور عموماً متمایل به سمت لایه‌ی خاک مقاوم زیرین است.
- به دلیل رفتار واقعی سه بعدی شمع، نتایج مدل‌های دو بعدی و سه بعدی با همدیگر متفاوت هستند. این اختلاف گاهی مواقع کم و گاهی مواقع قابل توجه هستند. ولی به طورکلی به نظر می‌رسد ضروری است همواره از مدل سه بعدی برای شمع‌ها استفاده شود.
- در شمع قائم و یا زوایای تمایل کم، شمع به‌صورت یک ستون در خاک عمل می‌کند و فقط تحت نیروی محوری قرار می‌گیرد و در زوایای تمایل زیاد، شمع به‌صورت تیر ـ ستون و تحت نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی قرار می‌گیرد. همین امر منجر به اعوجاج و خمش طولی در آن و احتمالاً تغییر جهت نیروی برشی در جداره‌ی شمع و نیروی فروکش می‌شود. در این حالت نیروی نرمال بین شمع و خاک بین شرایط محرک، سکون و مقاوم قرار می‌گیرد و باعث پیچیده‌شدن اندرکنش بین شمع و خاک اطراف در جداره‌ی شمع می‌شود.
- مقادیر نیروی فروکش در یک مقدار سربار ثابت برای شمع قائم اتکائی بیش از شمع اصطکاکی است. همین رفتار در شمع مایل اتکائی و اصطکاکی هم حاکم است، با این تفاوت که مقادیر بیشینه‌ی نیروی فروکش در جداره‌ی شمع الزاماً در محل تغییر جهت تنش برشی یا همان تار خنثی نیست.
- تار خنثی در شمع اصطکاکی و اتکائی با افزایش شدت بارگذاری سطحی به اعماق پایین‌تر خاک میل می‌کند. به طوری که در شمع اتکائی، تار خنثی تقریباً در انتهای شمع و در شمع اصطکاکی، موقعیت تار خنثی تقریباً در ۱/۳ انتهای شمع ایجاد می‌شود.
- برخلاف شمع قائم، در شمع مایل تار خنثی ایجاد نمی‌شود، بلکه نواحی تغییرات تنش برشی در جداره‌ی شمع ایجاد می‌شود. از طرفی با افزایش زاویه‌ی تمایل شمع، نیروی فروکش نیز افزایش می‌یابد.

پانوشت

1. negative skin friction

منابع (References)

1. Phamvan, P. "Negative skin friction on driven piles in Bangkok subsoils", Ph.D. thesis, AIT, Bangkok, Thailand (1989).
2. Little, J.A. and Ibrahim, K.I. "Predictions associated with the pile downdrag study at the SERC soft clay site at Bothkennar", In Predictive Soil Mechanics (Wroth Memorial Symposium), London: Thomas Telford, pp. 796-818 (1993).
3. Lee, C.J., Chen, H.T. and Wang, W.H. "Negative skin friction on a pile due to excessive groundwater withdrawal", *Proc. Int. Conf. Centrifuge,* New York, pp. 513-518 (1998).
4. Fellenius, B.H. "Piling terminology", http://www. geoforum.com/info/pileinfo/terminology.asp.
5. Fellenius, B.H. "Negative skin friction and settlement of piles", Second Int. Seminar, Pile foundations, Nanyang Technological Institue, Singapore (1984).
6. Broms, B. "Negative skin friction", *Proc. 6th Asian Regional Conf. Soil Mech. Found. Engrg.*, Singapore, **2**, pp. 41-75 (1979).
7. Fellenius, B.H. "Results from long-term measurement in piles of drag load and downdrag", *Can. Geotech J.,* **43**(4), pp. 409-430. (2006).
8. Poulos, H.G. and Davis, E.H., *Pile Foundation Analysis and Design*, Wiley, New York (1980).
9. Chow, Y.K., Chin, J.T. and Lee, S.L. "Negative skin friction on pile groups", *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.,* **14**(2), pp. 75-91 (1990).
10. Lee, C.Y. "Pile groups under negative skin friction", *J. Geotech. Engrg.,* **119**(10), pp. 1587-1600 (1993).
11. Teh, C.I. and Wong, K.S. "Analysis of downdrag on pile groups", *Geotechnique*, **45**(2), pp. 191-207 (1995).
12. Fellenius, B.H. "Unified design of piles and pile groups", Transportation Research Record 1169, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 75-82 (1989).
13. Fellenius, B.H. "Down-drag on piles in clays due to negative skin friction", *Can. Geotech. J.,* **9**(4), pp. 325-337 (1972).
14. Van Der, V. "A general formula to determine the allowable pile bearing capacity in case of negative friction", *DFI, Proc., Int. Conf. on Deep Found.*, Beijing, China, **2**, pp. 138-147 (1986).
15. Hanna, A. and Nguyen, T.G. "Shaft resistance of single vertical and batter piles driven in sand", *ASCE J. Geotech. and Geoenviro. Engrg.*, **129**(7), pp. 601-607 (2003).
16. Meyerhof, G. and yalsin, A. "Behavior of flexible batter Pile under inclined loads in layered Soil", *Can. Geotech. J.*, **30**(2), pp. 247-256 (1992).
17. Sabry, M. "Shaft resistance of single vertical or batter pile in sand subjected to axial compression or uplift loading", M.Sc. thesis, the Department of Building, Civil and Environmental Eng., Concordia University, Montreal, Quebe, Can. (2001).
18. Lee, C.J., Bolton, M.D. and Al-Tabbaa, A. "Numerical modeling of group effects on the distribution of drag loadsin pile foundations", *J. Geotechnique,* **52**(5), pp. 325-335 (2002).
19. Comodromos, E.M. and Bareka, S.V. "Evaluation of negative skin friction effects in pile foundations using 3D nonlinear analysis", *Computers and Geotechnics*, **32**(3), pp. 210-221 (2005).
20. Poulos, H.G. "A partial design approach for pile with negative friction", *GEI Geotech. Engrg. Issue,* **161**(2), pp. 19-27 (2008).
21. Prakash, S. and Subramanyam, G. "Behavior of battered piles under lateral loads", *J. Indian Nat. Soc of Soil Mech. And Found. Engrg.,* New Delhi, **4**, pp. 177-196 (1965).
22. Rajashree, S.S. and Sitharam, T.G. "Nonlinear finite element method of batter piles under lateral load", *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.,* **127**(7), pp. 604-612 (2001).
23. Poulos, H.G. and Madhav, M.R. "Analysis of the movement of battered piles", Rep. No. R173, University of Sydney, pp. 1-18 (1971).