

# مطالعه‌ی عددی تأثیر اصطکاک منفی در رفتار شمع‌های باریک‌شونده‌ی واقع در خاک‌های چسبنده

حمیدعلی اِلهی\* (استادیار)

مرتضی عبدی زاد (کارشناس ارشد)

گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۷ (۳۴-۲، شماره ۱/۴، ص. ۱۱۱-۱۱۷، یادداشت ثنی)

در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس به مدل‌سازی یک شمع منفرد با مقطع غیریکنواخت تحت پدیده‌ی اصطکاک منفی واقع در خاک‌های چسبنده‌ی اشباع پرداخته شده است. در این راستا، تأثیر زوایای مختلف شمع در پدیده‌ی اصطکاک منفی و محل تار خنثی تحت اثر نشست تحکیمی مطالعه شده است. در ادامه، جهت بررسی اثر شکل سطح مقطع شمع در اصطکاک منفی از ۳ شمع با حجم ثابت و با شکل‌های دایره‌یی، مثلثی و مربعی استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که باریک‌شوندگی شمع در خاک‌های چسبنده، موجب افزایش اصطکاک منفی و عمق تار خنثی می‌شود و از ظرفیت باربری محوری شمع خواهد کاست. همچنین استفاده از شمع‌های باریک‌شونده‌ی مثلثی شکل با توجه به سطح تماس بیشتر با خاک، نشست کمتر خاک اطراف شمع را به دنبال خواهد داشت که موجب کاهش پدیده‌ی اصطکاک منفی در آن‌ها نسبت به شکل‌های دیگر شمع خواهد شد.

واژگان کلیدی: اصطکاک منفی، تار خنثی، شمع‌های باریک‌شونده، خاک‌های

چسبنده، روش عددی.

h.alielahi@iauz.ac.ir  
morteza.rad1986@gmail.com

## ۱. مقدمه

پایین بر روی جدار شمع است که به علت نشست خاک اطراف آن صورت می‌گیرد و موجب اعمال بار اضافی به شمع می‌شود. بنابراین از ظرفیت باربری شمع کاسته و به نشست شمع افزوده می‌شود. در بعضی حالات نیز نیروی اصطکاک‌ی رو به پایین ممکن است آنقدر بزرگ باشد که موجب از بین رفتن ظرفیت باربری شالوده شود.<sup>[۷]</sup> محلی از شمع را که در آن اصطکاک جدار منفی به اصطکاک جدار مثبت تبدیل می‌شود، تار خنثی<sup>۲</sup> می‌نامند.<sup>[۸]</sup>

به عبارتی دیگر، تار خنثی در مکانی واقع شده است که دیگر هیچ جابه‌جایی نسبی بین خاک و شمع وجود ندارد و تنش برشی ایجاد شده در محل نقطه‌ی مذکور برابر صفر است. اغلب تار خنثی پایین‌تر از میانه‌ی عمق شمع قرار می‌گیرد.<sup>[۹]</sup> اگر خاک زیر تار خنثی قوی باشد، تار خنثی در نزدیکی نوک شمع و چنانچه به جای خاک قوی سنگ بستر وجود داشته باشد، تار خنثی در تراز سنگ بستر قرار خواهد گرفت.<sup>[۱۰]</sup> از جمله مطالعات عددی مهمی که در آن‌ها به بررسی پدیده‌ی اصطکاک منفی در شمع‌ها پرداخته شده است، می‌توان به مطالعاتی در سال ۱۹۹۶ اشاره کرد،<sup>[۱۱]</sup> که در آن نشان داده شده است که تار خنثی تحت تأثیر اضافه بار قرار دارد، به گونه‌یی که هر چه اضافه بار اعمال شده بر روی خاک افزایش یابد، عمق تار خنثی نیز افزایش خواهد یافت و به تبعیت از آن، ناحیه‌یی که تحت تأثیر اصطکاک منفی قرار دارد، بیشتر می‌شود. همچنین در چهارچوب یک مطالعه‌ی عددی در سال

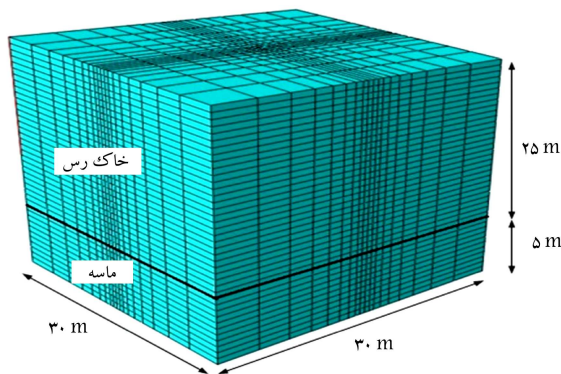
استفاده‌ی روزافزون از شالوده‌های عمیق (شمع‌ها)، به ویژه در سازه‌های مهمی نظیر: پل‌ها، برج‌ها و مناطقی که در آنجا لایه‌های سطحی ظرفیت باربری کافی ندارند، موجب شده است که از دیرباز به مطالعه و پژوهش در باره‌ی رفتار و عملکرد شالوده‌های عمیق، توجه ویژه‌یی شود. با پیشرفت علم مهندسی ژئوتکنیک، نوع جدیدی از شمع‌ها به نام شمع‌های مخروطی یا باریک‌شونده معرفی شده است. در شمع‌های باریک‌شونده با افزایش عمق، سطح مقطع آن کاهش می‌یابد و در نهایت، انتهای شمع، سطح مقطع کوچک‌تری نسبت به سر شمع دارد که علاوه بر سهولت اجرا و اقتصادی بودن نسبت به شمع‌های با مقطع یکنواخت، افزایش ظرفیت باربری به خصوص برای بارهای فشاری را نیز به همراه خواهد داشت.<sup>[۲]</sup> تمرکز بیشتر مطالعات انجام شده در مورد شمع‌های باریک‌شونده، به بررسی عملکرد و رفتار آن‌ها در خاک‌های دانه‌یی است.<sup>[۳]</sup> مطالعاتی که در مورد رفتار شمع‌های باریک‌شونده در خاک‌های چسبنده انجام شده است، علاوه بر انگشت‌شمار بودن، در آن‌ها هیچ اشاره‌یی به پدیده‌ی اصطکاک منفی جدار شمع‌ها (NSF)<sup>۱</sup> نشده است. در واقع پدیده‌ی اصطکاک جدار منفی در شمع‌ها،<sup>[۴]</sup> یک نیروی اصطکاک‌ی به سمت

\* نویسنده مسئول

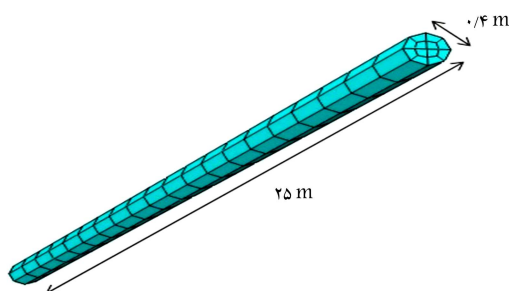
تاریخ: دریافت ۱۸/۵/۱۳۹۵، اصلاحیه ۱۶/۱۱/۱۳۹۵، پذیرش ۲۵/۱۱/۱۳۹۵.

DOI:10.24200/J30.2019.1435

بر نتایج مدل عددی، از دو مطالعه‌ی تجربی و عددی انجام‌شده در خصوص تأثیر اصطکاک منفی در شمع منفرد با مقطع بکنواخت واقع در خاک‌های چسبیده استفاده شده است. در پژوهشی در سال ۱۹۹۲<sup>[۱۴]</sup> با استفاده از آزمایش بارگذاری شمع به اندازه‌گیری مقدار اصطکاک منفی در منطقه‌ی واقع در شرق بانکوک پرداخته شده و در آن از دو شمع بتنی کوبشی به طول ۲۵ متر و قطر ۴۰۰ میلی‌متر، با پوشش قیری و نیز بدون پوشش قیری، استفاده شده و پروفیل خاک منطقه از یک خاک رسی با ۴ زیرلایه‌ی خاک ماسه‌ی تشکیل شده است.<sup>[۱۵]</sup> در شمع‌های مذکور جهت اندازه‌گیری تنش برشی در طول شمع از ابزارهای اندازه‌گیری به فاصله‌ی ۴ متر از سر شمع استفاده شده است. همچنین از ابزارهایی جهت اندازه‌گیری کرنش در طول و انتهای شمع و پیزومترهای هیدرولیکی جهت تعیین فشار آب حفره‌ی در طول شمع استفاده شده است. پس از کوبش شمع‌ها، یک خاکریز به ابعاد  $۱۲ \times ۲۴$  متر و به ارتفاع ۲ متر و در مدت ساخت ۳ روز بر روی این دو شمع به‌عنوان سربار جهت ایجاد نشست در خاک اطراف شمع و ایجاد پدیده‌ی اصطکاک منفی اجرا شده است. بارها و نشست‌های ایجاد شده در مدت ۲۶۵ روز اندازه‌گیری و در نهایت برای شمع بدون پوشش قیری، بیشینه‌ی اصطکاک منفی معادل  $۱۵/۷$  کیلوپاسکال در عمق ۱۱ متری ثبت و تار خنثی نیز در عمق  $۱۷/۵$  متر از طول شمع مشاهده شد. همچنین در سال ۲۰۱۳<sup>[۱۶]</sup> به مدل‌سازی عددی آزمایش شمع مذکور با کمک نرم‌افزار پلکسیس<sup>۴</sup> دو بُعدی پرداخته شده است که در ادامه هر دو مطالعه‌ی اشاره‌شده جهت اعتبارسنجی نتایج پژوهش حاضر مدنظر قرار گرفته است. در شکل ۱، مدل عددی به همراه مش‌بندی محیط و در شکل ۲، مش‌بندی شمع مشاهده می‌شود. برای این منظور از المان‌های ۸ گره‌ی استفاده شده است. همچنین مش‌بندی خاک اطراف شمع با حرکت به سمت شمع جهت افزایش دقت در محاسبات، به تدریج ریزتر شده است. محدوده‌ی خاک مدل‌سازی‌شده جهت بررسی پدیده‌ی اصطکاک منفی (ابعاد مدل)، به ابعاد  $۳۰ \times ۳۰$  متر و عمق ۳۰ متر



شکل ۱. هندسه‌ی سه بُعدی مدل عددی در نرم‌افزار جهت اعتبارسنجی.



شکل ۲. مش‌بندی شمع جهت اعتبارسنجی در برنامه‌ی آباکوس.

۲۰۰۱<sup>[۱۷]</sup> نشان داده شده است که یک شمع اتکایی نسبت به یک شمع شناور (اصطکاک‌کمی) در شرایط یکسان، تحت نیروی اصطکاک منفی کمتری قرار دارد. در سال ۲۰۰۴<sup>[۱۸]</sup> نیز با استفاده از روش اجزاء محدود سه بُعدی، به بررسی تأثیر بار وارد بر روی سر شمع در مقدار اصطکاک منفی ایجادشده، به صورت منفرد و گروهی پرداخته شده و نتایج نشان داده است که افزایش بار شمع، موجب افزایش نشست شمع و کاهش نشست خاک اطراف شمع به دلیل افزایش نشست شمع خواهد شد، که این امر کاهش اصطکاک منفی را به همراه خواهد داشت.

همچنین برخی پژوهشگران (۲۰۰۹)<sup>[۱۹]</sup> با کمک روش عددی نشان دادند که تئوری یک بُعدی تحکیم ترزافی در میزان اصطکاک منفی ایجادشده بر روی شمع اغراق شده و مقدار آن را بیشتر از واقعیت نشان داده است. در سال ۲۰۱۱<sup>[۲۰]</sup> نیز با استفاده از نتایج اندازه‌گیری‌های واقعی در محل و به کمک آنالیز برگشتی به محاسبه‌ی اصطکاک منفی بر مبنای دو روش محاسبات اصطکاک آلفا و بتا پرداخته شده است. همچنین در سال ۲۰۱۴<sup>[۲۱]</sup> در بررسی مدل عددی سه بُعدی مبتنی بر روش اجزاء محدود، با استفاده از نتایج آزمایش‌های بارگذاری واقعی بر روی شمع‌های دریایی، پدیده‌ی اصطکاک منفی در شمع‌های کوبشی واقع در خاک‌های رسی تحکیم‌پذیر با و بدون پوشش قیری مطالعه شد و نتایج حاصل نشان داد که استفاده از پوشش قیری در شمع‌های واقع در خاک‌های نرم نشست‌پذیر می‌تواند مقادیر اصطکاک منفی را از ۴۹ تا ۹۳ درصد بسته به شرایط کاهش دهد. در سال ۲۰۱۶<sup>[۲۲]</sup> نیز در مورد تأثیر در نظر گرفتن اصطکاک منفی در محاسبات مربوط به شمع‌های فراساحلی با استفاده از دو روش اندازه‌گیری‌های واقعی و روابط تحلیلی مطالعه و نتیجه گرفته شد که هم‌خوانی مناسبی بین دو روش مذکور وجود دارد و می‌توان از روابط تحلیلی ارائه‌شده به سادگی در محاسبات اصطکاک منفی در طراحی شمع‌های ذکرشده استفاده کرد. مطالعات اندکی در زمینه‌ی تأثیر اصطکاک منفی در شمع‌های باریک‌شونده در خاک‌های ماسه‌ی انجام شده است، که فقط می‌توان به مطالعاتی در سال‌های ۱۹۸۲ و ۱۹۹۸<sup>[۱۹،۲۳]</sup> اشاره کرد که در آن‌ها به بررسی تأثیر اضافه بار ناشی از احداث سربار و زاویه‌ی باریک‌شوندگی در شمع‌ها پرداخته شده و نتایج به دست‌آمده‌ی آن‌ها نشان داده است که در خاک‌های درشت‌دانه، افزایش زاویه‌ی باریک‌شوندگی شمع‌ها می‌تواند موجب کاهش پدیده‌ی اصطکاک منفی در خاک‌های درشت‌دانه شود.

با مرور ادبیات فنی موضوع مورد بحث مشاهده می‌شود که بیشتر مطالعات انجام‌شده در موضوع بررسی اثر پدیده‌ی اصطکاک منفی در شمع‌های مقطع ثابت تمرکز داشته‌اند و مطالعات اندکی در مورد تأثیر پدیده‌ی مذکور در شمع‌های باریک‌شونده و فقط در خاک‌های درشت‌دانه انجام شده است. از این رو، در پژوهش حاضر به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس<sup>۳</sup> به شبیه‌سازی سه بُعدی پدیده‌ی اصطکاک منفی واقع در خاک‌های چسبیده برای یک شمع با مقطع متغیر پرداخته شده است. در این راستا، تأثیر باریک‌شوندگی شمع در پدیده‌ی اصطکاک منفی و تار خنثی تحت اثر نشست تحکیمی بررسی شده است. در ادامه، جهت مطالعه‌ی تأثیر شکل سطح مقطع شمع در پدیده‌ی اصطکاک منفی در خاک‌های چسبیده، رفتار ۳ شمع با حجم ثابت و با شکل‌های مختلف دایره‌ی، مثلثی و مربعی تحت شرایط یکسان مطالعه شده است.

## ۲. مدل‌سازی عددی و اعتبارسنجی آن

در پژوهش حاضر، به منظور مدل‌سازی سه بُعدی پدیده‌ی اصطکاک منفی در شمع‌ها از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شده است. از این رو، جهت صحه‌گذاری

جدول ۱. مشخصات مصالح جهت اعتبارسنجی مدل عددی [۲۲]

مصالح	مدل	$\gamma (kN/m^3)$	$C (kN/m^2)$	$\phi^\circ$	$\nu$	$E (kPa)$	$K (m/s)$	$\psi^\circ$
شمع بتنی	کشسان	۲۵	۰	-	۰٫۳	۲۰۰۰۰۰۰	-	-
خاک رس	موهر-کلمب	۱۸	۳	۲۰	۰٫۳	۵۰۰۰	۰٫۶۵	۰٫۱
ماسه	موهر-کلمب	۲۰	۰٫۱	۳۵	۰٫۳	۵۰۰۰۰	۰٫۵	۱۰

۱- تراز آب زیرزمینی بر روی سطح خاک رس در نظر گرفته شده است.

۲- توزیع آب حفره‌ای به صورت هیدرواستاتیک فرض شده است.

### ۳. بررسی تأثیر باریک‌شوندگی شمع در پدیده‌ی

#### اصطکاک منفی و موقعیت تار خنثی

در بخش حاضر، به منظور بررسی تأثیر زاویه‌ی باریک‌شوندگی شمع منفرد واقع در خاک‌های چسبنده در پدیده‌ی اصطکاک منفی، ابتدا شمعی با مقطع یکنواخت مدل‌سازی و سپس با باریک کردن تدریجی آن در زوایای متفاوت نسبت به عمق، به مطالعه‌ی اثر مذکور پرداخته شده است. شمع موردنظر با مقطع ثابت و به قطر ۰٫۸ متر و طول ۲۰ متر با سطح مقطع دایره‌ای در نظر گرفته شده و پروفیل خاک و پارامترهای ژئوتکنیکی مدل، همان پروفیل خاک مدل اعتبارسنجی شده است (جدول ۱). مدل‌سازی عددی شامل ۹ فاز بود که فاز اول مربوط به تنش‌های اولیه قبل از احداث خاکریز و فازهای بعدی مربوط به تحکیم خاک بعد از احداث خاکریز بودند که به ترتیب به محاسبه‌ی تحکیم ۱، ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۱۸۰ روزه و ۱، ۳ و ۵ سال بعد از احداث خاکریز پرداخته شده است. همچنین به منظور مدل‌سازی خاکریز، ناشی از آن بر روی سطح موردنظر خاک اعمال شده است.

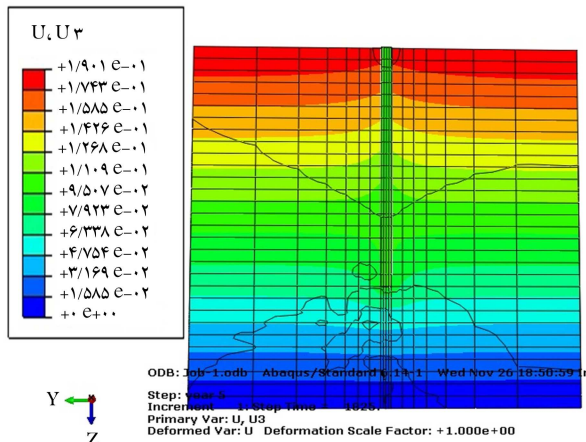
جهت اعمال اصطکاک منفی، خاک اطراف شمع باید نشست بیشتری داشته باشد. شمع را در مدت موردنظر تجربه کند. تنش ناشی از خاکریز که موجب نشست مذکور خواهد شد، معادل ۵۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است [۲۱]. در شکل‌های ۴ و ۵، به ترتیب کانتورهای نشست خاک اطراف شمع و کانتور تنش برشی ایجاد شده به روی شمع و در شکل ۶ تنش برشی محاسبه شده توسط نرم‌افزار آباکوس در شمع نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی اصطکاک منفی محاسبه شده، ۱۸ کیلوپاسکال است که در عمق ۱۱ متری ایجاد شده و تار خنثی نیز ۱۵ متر برآورد شده است.

در ادامه، جهت بررسی تأثیر باریک‌شوندگی شمع در پدیده‌ی اصطکاک

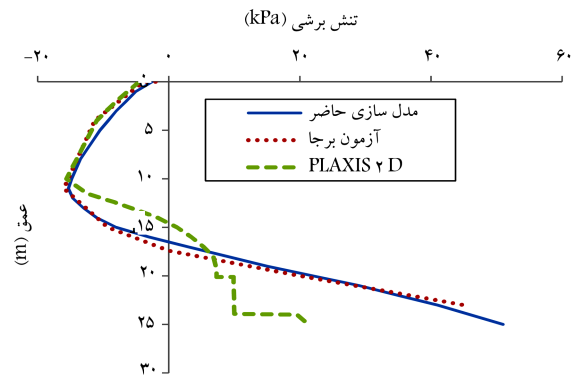
در نظر گرفته شده است. هدف از اتخاذ ابعاد ذکر شده، در نظر گرفتن نشست کامل خاک در اطراف شمع تا فاصله‌ی بی‌پایان بوده است که مقدار نشست در آن فاصله‌ناچیز شود. برای مدل‌سازی محیط اطراف شمع از ۶۱۲ المان و برای مش‌بندی شمع از ۲۴۰ المان استفاده شده است. همچنین ۵ فاز برای محاسبه‌ی مدل عددی در نظر گرفته شده است که فاز اول مربوط به تنش‌های اولیه قبل از احداث خاکریز و فازهای بعدی مربوط به تحکیم خاک بعد از احداث خاکریز است، که به ترتیب به محاسبه‌ی تحکیم ۲۵، ۹۲، ۱۵۶ و ۲۵۶ روز پس از احداث خاکریز اختصاص دارد.

در نرم‌افزار آباکوس در مرحله‌ی اول مدل‌سازی، ابتدا تنش‌های اولیه در خاک به‌عنوان تنش‌های مؤثر و در شمع به‌عنوان نیروی وزن مد نظر قرار گرفته است. سپس مراحل نشست تحکیمی پس از احداث خاکریز و با معرفی مدت زمان مربوط به اندازه‌گیری نشست تحکیمی معرفی شده است. همچنین جهت مدل‌سازی خاکریز، بار ناشی از آن (معادل ۵۰ کیلوپاسکال) بر روی سطح خاک اعمال شده است. در اطراف مدل، تکیه‌گاه غلتکی تعریف شده است، تا مدل اجازه‌ی حرکت در جهت قائم را داشته باشد و همچنین حرکت کف مدل در هر ۳ جهت محدود شده است. مدل رفتاری خاک با معیار موهر-کلمب و مدل رفتاری شمع به‌صورت کشسان و ضریب تماس بین خاک و شمع، ۰٫۳ در نظر گرفته شده است. سایر مشخصات مربوط به خاک و شمع برای مدل‌سازی عددی در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۳، نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس، جهت مقایسه و اعتبارسنجی مدل عددی با مدل‌سازی عددی برخی مطالعات [۲۱، ۲۰] توسط پلکسیس ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی اصطکاک منفی محاسبه شده در مطالعه‌ی حاضر برابر ۱۵٫۴ کیلوپاسکال بوده است که در عمق ۱۱ متری ایجاد و همچنین تار خنثی در عمق ۱۶٫۵ متری برآورد شده است که نشان از صحت مناسب نتایج پژوهش حاضر با اندازه‌گیری‌ها و مطالعات پیشین دارد.



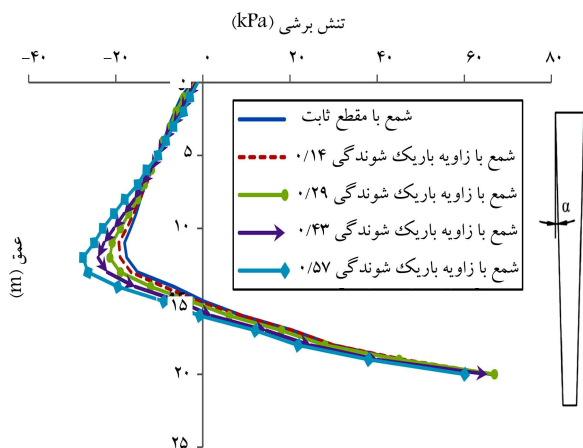
شکل ۴. کانتور نشست خاک اطراف شمع.



شکل ۳. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی حاضر با برخی آزمایش‌ها [۲۰ و ۲۱]

جدول ۲. مشخصات مربوط به شمع‌های باریک‌شونده.

حجم شمع ( $m^3$ )	قطر معادل شمع ( $m$ )	قطر پایین شمع ( $m$ )	قطر بالای شمع ( $m$ )	زاویه باریک‌شوندگی (درجه)
۱۰	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۸	۰
۸٫۸	۰٫۷۵	۰٫۷	۰٫۸	۰٫۱۴
۷٫۶	۰٫۷	۰٫۶	۰٫۸	۰٫۲۹
۶٫۶	۰٫۶۵	۰٫۵	۰٫۸	۰٫۴۳
۵٫۶	۰٫۶	۰٫۴	۰٫۸	۰٫۵۷



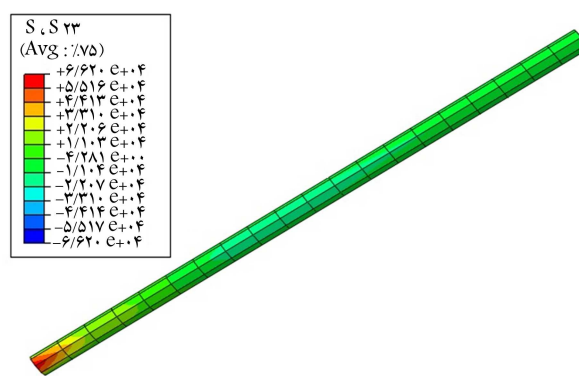
شکل ۷. تنش برشی محاسبه‌شده در شمع‌های باریک‌شونده تحت زوایای باریک‌شدگی مختلف.

جدول ۳. بیشینه‌ی اصطکاک منفی و عمق تارخشی در شمع‌های باریک‌شونده.

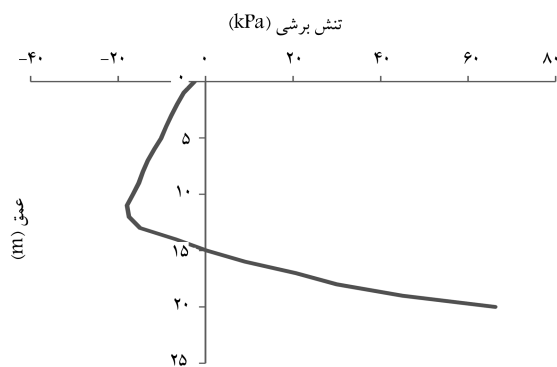
عمق خنثی ( $m$ )	بیشینه‌ی اصطکاک منفی ( $kPa$ )	نوع شمع
۱۵	۱۸	شمع با مقطع ثابت
۱۵٫۱	۱۹٫۲	شمع باریک‌شونده با زاویه ۰٫۱۴
۱۵٫۴	۲۱٫۳	شمع باریک‌شونده با زاویه ۰٫۲۹
۱۵٫۹	۲۴٫۱	شمع باریک‌شونده با زاویه ۰٫۴۳
۱۶٫۱	۲۶٫۴	شمع باریک‌شونده با زاویه ۰٫۵۷

نیز افزایش می‌یابد و به طور چشم‌گیری از ظرفیت باربری شمع کاسته می‌شود. علت چنین رخدادی در شمع‌های باریک‌شونده نسبت به شمع‌های با مقطع ثابت را می‌توان در نشست خاک اطراف شمع جستجو کرد. دلیل این موضوع را می‌توان از بررسی نشست خاک اطراف شمع در زوایای باریک‌شوندگی مختلف مطالعه کرد. در شکل ۸، منحنی‌های نشست محاسبه‌شده جهت مقایسه و بررسی نتایج حاصل با یکدیگر در کنار هم نشان داده شده‌اند. با توجه به اینکه پدیده‌ی اصطکاک منفی در اثر نشست خاک اطراف شمع ایجاد می‌شود، در نتیجه با باریک‌شوندگی بیشتر مقطع شمع، نشست خاک اطراف شمع با افزایش زاویه‌ی باریک‌شوندگی، افزایش و به دنبال آن مقادیر اصطکاک منفی بر شمع افزایش می‌یابد. این تذکر لازم است که به علت وجود چسبندگی در خاک، نشست ایجادشده در خاک اطراف شمع کاملاً به شمع منتقل خواهد شد. [۱۳، ۱۴]

در صورتی که مطالعات پیشین نشان داده‌اند که مقدار اصطکاک منفی در شمع‌های باریک‌شونده‌ی واقع در خاک‌های دانه‌بزرگ به دلیل جدا شدن خاک از



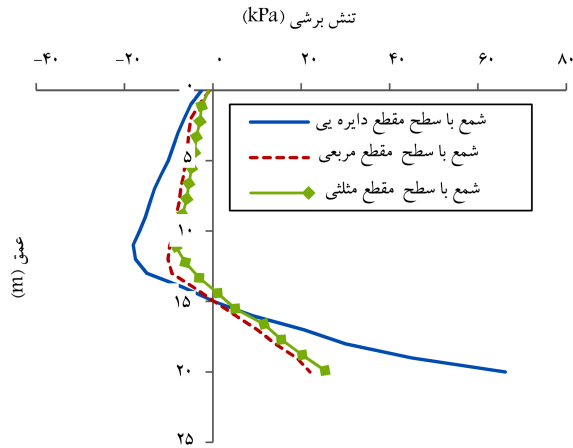
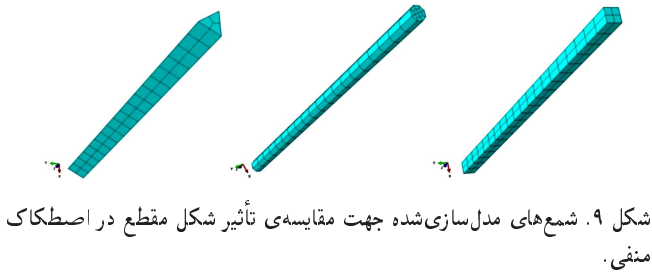
شکل ۵. کانتور تنش برشی ایجادشده.



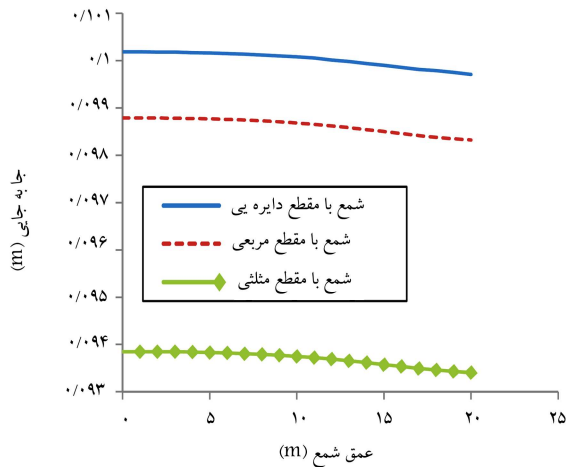
شکل ۶. تنش برشی ایجادشده در عمق شمع مقطع ثابت.

منفی، به باریک کردن آن در ۴ مرحله به زوایای مختلف ۰٫۱۴، ۰٫۲۹، ۰٫۴۳ و ۰٫۵۷ درجه نسبت به قائم و مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده پرداخته شده است. در جدول ۲، مشخصات مربوط به شمع‌های باریک‌شونده با شمع منفرد مقطع ثابت (بدون باریک‌شوندگی)، جهت بررسی ارائه شده است. در شکل ۷، تنش‌های برشی به‌دست آمده در عمق شمع با مقطع یکنواخت و شمع‌های باریک‌شونده جهت مقایسه در کنار یکدیگر نشان داده شده‌اند. همچنین در جدول ۳، مقادیر اصطکاک منفی بیشینه و تارخشی محاسبه‌شده، جهت مقایسه ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، پدیده‌ی اصطکاک منفی و تارخشی با زاویه‌ی باریک‌شوندگی شمع، رابطه‌ی مستقیم دارند. به عبارتی در خاک‌های چسبیده برخلاف خاک‌های درشت‌دانه، هر چه زاویه‌ی باریک‌شوندگی شمع بیشتر شود، اصطکاک منفی و عمق تارخشی نیز افزایش می‌یابد. افزایش زاویه‌ی باریک‌شوندگی شمع در خاک‌های چسبیده، نه فقط بر مقدار اصطکاک منفی می‌افزاید، بلکه با افزایش عمق تارخشی، طولی از شمع که در معرض پدیده‌ی اصطکاک منفی قرار دارد،



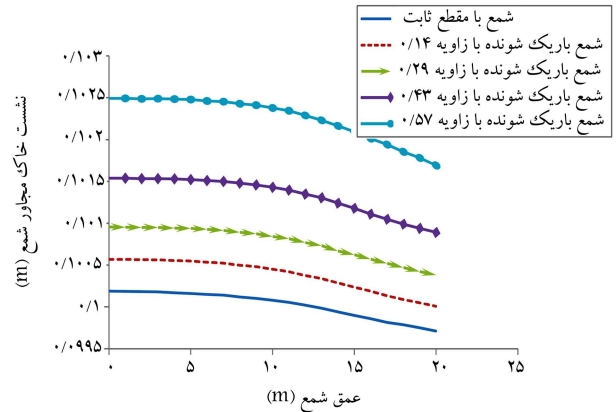
شکل ۱۰. تنش برشی شکل‌گرفته در عمق شمع‌های با سطح مقطع متفاوت.



شکل ۱۱. جابه‌جایی خاک مجاور شمع‌های با سطح مقطع متفاوت.

جدول ۴. مشخصات شمع‌های مدل‌سازی شده با سطح مقطع متفاوت.

شکل هندسی شمع	طول شمع (متر)	قطر یا ارتفاع سطح مقطع شمع (متر)	طول ضلع شمع (متر)	حجم شمع (مترمکعب)
دایره‌یی	۲۰	۰٫۸	۰٫۸	۱۰
مربعی	۲۰	۱	۰٫۷	۱۰
مثلثی	۲۰	۰٫۹	۱٫۱	۱۰



شکل ۸. نشست خاک مجاور شمع‌های باریک‌شونده تحت زوایای باریک‌شدگی متفاوت.

شمع و عدم تأثیر خاک در شمع، نسبت به شمع با مقطع ثابت کاهش می‌یابد. [۱۴ و ۱۳] همچنین این توضیح لازم است که خاک اطراف شمع با زاویه‌ی باریک‌شوندگی ۰٫۵۷، نسبت به شمع با مقطع ثابت فقط ۲ میلی‌متر نشست بیشتری را تجربه کرده است؛ در حالی که همین مقدار کم نشست، موجب افزایش ۸٫۴ کیلوپاسکالی اصطکاک منفی در شمع مقطع متغیر نسبت به مقطع ثابت شده است، که این نکته می‌تواند بیانگر تأثیر زیاد نشست در مقدار اصطکاک منفی در خاک‌های چسبیده باشد.

#### ۴. بررسی تأثیر شکل هندسی مقطع شمع در پدیده‌ی اصطکاک منفی

جهت پاسخ به این سؤال که آیا استفاده از شمع‌ها با سطح مقطع متفاوت می‌تواند در کاهش اصطکاک منفی مؤثر باشد یا خیر، در بخش حاضر به مدل‌سازی عددی ۳ شمع با شکل سطح مقطع متفاوت، ولی با حجم یکسان پرداخته شده است. شکل‌های در نظر گرفته شده برای شمع‌های باریک‌شونده، شامل: شمع دایره‌یی، مربعی و مثلثی در شرایط یکسان هستند. در جدول ۴، مشخصات شمع‌ها و در شکل ۹، شمع‌های مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس مشاهده می‌شود. همچنین به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، تنش برشی در عمق و جابه‌جایی خاک مجاور شمع برای شمع‌های با سطح مقطع متفاوت ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، مقادیر اصطکاک منفی در شمع با مقطع دایره‌یی نسبت به شمع‌های با مقاطع مربعی و مثلثی بیشتر است. با بررسی شکل ۱۱ مشخص می‌شود که علت این موضوع را می‌توان در مقادیر جابه‌جایی خاک مجاور شمع‌ها مطالعه کرد که بیشترین جابه‌جایی خاک به شمع مقطع دایره‌یی تعلق دارد. از این رو، استفاده از شمع‌ها با مقاطعی که اضلاع آن‌ها سطح تماس بیشتری با خاک دارند، می‌تواند موجب ایجاد اصطکاک بیشتر با خاک شود و به دنبال آن، سبب کاهش جابه‌جایی خاک اطراف شمع شود. بنابراین، شمع با مقطع مثلثی، کمترین نشست خاک اطراف را نسبت به سایر شمع‌ها دارد و کمینه‌ی مقدار اصطکاک منفی در آن ایجاد شده است، که به موجب آن ظرفیت باربری بیشتری نسبت به سایر شمع‌ها دارد. این در حالی است که برای هر ۳ شمع، عمق تار خنثی تقریباً یکسان به دست آمده است. این نوع رفتار بیانگر این نکته است که اگر شکل سطح مقطع شمع باریک‌شونده به گونه‌یی باشد که بتواند سطح تماس بیشتری با

کاهش جابه‌جایی خاک مجاور شمع می‌شود. لذا، شمع با مقطع مثالی نسبت به شمع با مقاطع دایره‌یی و مربعی، موجب بروز کمترین نشست در خاک اطراف شمع می‌شود که سبب کاهش پدیده‌ی اصطکاک منفی خواهد شد. با توجه به این موضوع می‌توان ذکر کرد که شمع با مقطع مثالی، ظرفیت باربری بیشتری نسبت به سایر شمع‌ها دارد.

۴. با توجه به نتایج به‌دست آمده از مطالعه‌ی پارامتریک، استفاده از شمع‌های باریک‌شونده در خاک‌های ریزدانه‌ی اشباع به علت داشتن پتانسیل ایجاد پدیده‌ی اصطکاک منفی، می‌تواند آثار کاهشی در ظرفیت باربری در شمع‌های باریک‌شونده داشته باشد. در واقع باریک‌شوندگی شمع در خاک‌های چسبیده هر چند از لحاظ اقتصادی، حجم کمتر مصالح و سهولت اجرا می‌تواند مقرون به صرفه باشد، ولی از طرفی افزایش اصطکاک منفی در اثر نشست بیشتر خاک اطراف شمع نسبت به شمع با مقطع یکنواخت را به دنبال خواهد داشت، که می‌تواند موجب افزایش حجم محاسباتی و قیمت پروژه شود. بنابراین توصیه می‌شود در استفاده از شمع‌های باریک‌شونده در خاک‌های ریزدانه‌ی اشباع، که در معرض پدیده‌ی اصطکاک منفی در اثر نشست تحکیمی درازمدت قرار دارند، با احتیاط و مطالعات بیشتری انجام شود.

در انتها باید خاطرنشان ساخت که استفاده از شمع‌های مقطع متغیر به علت سهولت در اجرا و مصرف مصالح کمتر می‌تواند در پروژه‌های عمرانی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد. از طرفی پدیده‌ی اصطکاک منفی می‌تواند در طراحی شمع‌ها به خصوص شمع‌های باریک‌شونده، نقش مؤثری در کاهش ظرفیت باربری محوری آن‌ها داشته باشد، که در این خصوص انجام مطالعات جامع آزمایشگاهی و میدانی به خصوص در خاک‌های چسبیده‌ی اشباع نیاز است.

خاک در یک راستا ایجاد کند، می‌تواند موجب کاهش تمایل خاک اطراف شمع به نشست و به دنبال آن کاهش پدیده‌ی اصطکاک منفی در این نوع از شمع‌ها شود.

## ۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس به مدل‌سازی اثر باریک‌شوندگی در پدیده‌ی اصطکاک منفی در شمع‌های منفرد واقع در خاک‌های چسبیده تحت اثر نشست تحکیمی پرداخته شده است. همچنین جهت بررسی تأثیر شکل سطح مقطع شمع در مقادیر اصطکاک منفی، از ۳ شمع با حجم ثابت و شکل‌های مختلف دایره‌یی، مثلثی و مربعی در شرایط یکسان استفاده شده است. از جمله مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر می‌توان به این موارد اشاره کرد:

۱. باریک‌شوندگی شمع در خاک‌های چسبیده، موجب افزایش پدیده‌ی اصطکاک منفی می‌شود. در واقع با افزایش زاویه‌ی باریک‌شوندگی در خاک‌های چسبیده، مقادیر نشست خاک اطراف شمع فزونی می‌یابد، که سبب افزایش اصطکاک منفی در شمع‌های مذکور خواهد شد.

۲. باریک‌شوندگی شمع واقع در خاک‌های چسبیده موجب افزایش عمق تارخنتی می‌شود. در واقع، تارخنتی به عمقی گفته می‌شود که نشست خاک و شمع با هم برابر می‌شود و مرزی بین تنش برشی مثبت و منفی است. بنابراین با افزایش زاویه‌ی باریک‌شوندگی و افزایش عمق تارخنتی، طولی از شمع که دچار پدیده‌ی اصطکاک منفی است، نیز افزایش می‌یابد.

۳. استفاده از شمع‌ها با مقاطعی که سطح تماس بیشتری با خاک دارند، موجب

## پانویس‌ها

1. negative skin friction
2. neutral plane
3. Abaqus
4. Plaxis

## منابع (References)

1. Mardani, Z., Alielahi, H. and Hashemi, S.M. "Comparison of lateral bearing capacity of tapered pile groups with simple piles in granular soils using numerical method", *EJGE*, **20**(21), pp.11399-11406 (2015).
2. Gang Zhan, Y., Wang, H. and Chen Liu, F. "Numerical study on load capacity behavior of tapered pile foundations", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **17**, pp. 1969-1980 (2012).
3. Horvath, J.S. and Trochalides, T. "A Half century of tapered pile usage at the john f. kennedy international airport", *Paper NO. 11-05 to be Presented at the 5th Case History Conference on Geotechnical Engineering*, New York, N.Y., U.S.A. (2004).

4. Hataf, N. and Shafaghat, A. "Optimizing the bearing capacity of tapered piles in realistic scale using 3D finite element method", *Geotech. Geol. Eng.*, **33**(6), pp. 1465-1473 (2015).
5. Fellenius, B.H. "Downdrag on piles in clay due to negative skin friction", *Canadian Geotechnical Journal*, **9**(4), pp. 323-327 (1972).
6. 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).
7. Bozozuk, M. "Bearing capacity of a pile preloaded by down drag", *Proc. 10th ICSMFE*, Stockholm, 2, pp. 631-636 (1981).
8. Fellenius, B.H. "Results from long-term measurement in piles of drag load and downdrag", *Can. Geotech. J.*, **43**(4), pp. 409-430 (2006).
9. Fellenius, B.H. "Negative skin friction and settlement of piles", 2ed Int. Seminar: Pile Foundations, Nanyang Technological Institute, Singapore (1984).

10. Broms, B. "Negative skin friction", *Proc. 6th Asian Regional Conf. Soil Mech. Found. Engrg.*, Singapore, **2**, pp. 41-75 (1979).
11. Poorooshab, A.B., Alagmir, M. and Miura, N. "Negative skin friction on rigid and deformable piles", *Computer and Geotechnics*, **18**(2), pp. 109-126 (1996).
12. Lee, C.J., Bolton, M.D. and Al-Tabbaa, A. "Recent findings in negative skin friction in piles and pile groups in consolidating ground", *In: Proceedings of the 5th International Conference on Deep Foundations Practice*, Singapore, pp. 273-280 (2001).
13. Jeong, S., Lee, J. and Lee, C.J. "Slip effect at the pile-soil interface on dragload", *Computers and Geotechnics*, **3**(2), pp. 115-126 (2004).
14. Chen, R.P., Zhou, W.H. and Chen, Y.M. "Influences of soil consolidation and pile load on the development of negative skin friction of a pile", *Computers and Geotechnics*, **36**, pp. 1265-1271 (2009).
15. Gao, H.M., Liu, H.L., Liu, J.Y. and et al. "Back calculated  $\alpha$  and  $\beta$  coefficients from case histories of negative skin friction piles", *Materials Research Innovations*, **15**(1), pp. 597-600 (2011).
16. Jeong, S., Ko, J., Lee, C. and et al. "Response of single piles in marine deposits to negative skin friction from long-term field monitoring", *Marine Georesources & Geotechnology*, **32**(3), pp. 239-263 (2014).
17. Ma, Lu. and Wang, Yu-ke. "Calculation and analysis of negative skin of monopile applied for offshore wind turbine", *Marine Georesources & Geotechnology*, **35**(2), pp.275-280 (2017).
18. Sawaguchi M. "Model tests in relation to a method to reduce negative skin friction by tapering a pile", *Soil and Foundations*, **22**, pp. 131-133 (1982).
19. Spronken, J.T. "Bearing capacity of tapered piles", PhD Thesis , University of Calgary, Alberta, Canada (1998).
20. Indraratna, B., Balasubramaniam, A.S., Phamvan, P. and et al. "Development of negative skin friction on driven piles in soft Bangkok clay", *Canadian Geotechnical Journal*, **29**(3), pp. 393-404 (1992).
21. Mossallamy, Y.M., Hefney, A.M., Demerdash, M.A. and et al. "Numerical analysis of negative skin friction on piles in soft clay", *Housing and Building National Research Center, HBRC Journal*, **9**(1), pp. 68-76 (2013).
22. Lee, C.J., Bolton, M.D. and Al-Tabbaa, A. "Numerical modelling of group effects on the distribution of dragloads in pile foundations", *Geotechnique*, **52**(5), pp. 325-335 (2002).