

تحلیل عددی اثر موقعیت شمع بر تغییر مکان‌های ایجاد شده در شیب خاکی اطراف جاده‌ها

مقاله علمی - پژوهشی

احمدرضا مظاهری*، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی، ایران

مسعود نصیری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

اسماعیل واعظی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اراک، اراک، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.mazaheri@abru.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

صفحه ۳۱۷-۳۲۸

چکیده

یکی از راه‌حل‌های پیشنهادی برای مقاوم‌سازی و بهبود پایداری شیب‌های خاکی، استفاده از شمع‌هایی است که به صورت قائم و در طول شیب به صورت ردیف شمع جای خواهند گرفت. در انجام این پژوهش با استفاده از ساخت مدل عددی اجزای محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس، پارامترهای تاثیرگذار بر پایداری شیب‌های خاکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که موقعیت $\frac{Lx}{L}$ برابر $\frac{1}{6}$ بهینه‌ترین محلی است که شمع می‌تواند در آن قرار گیرد، زیرا بزرگترین تغییر مکان در آن محل موقعیت شده است. با توجه به مدل‌های عددی مورد بررسی و همچنین شرایط خاکی مورد نظر می‌توان بیان کرد که سطح گسیختگی از سطح میان دو خاک عبور نکرده و گسیختگی تنها در ناحیه‌ی خاک بالایی باقی مانده است. با افزایش میزان ضریب اطمینان در مدل‌هایی که محل شمع تغییر می‌کند، مقدار تغییر مکان قائم و جانبی خاک افزایش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، با افزایش ضریب اطمینان، مقدار تغییر مکان جانبی و قائم شمع نیز افزایش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: شمع، شیب خاکی، تغییر مکان، مسلح سازی، اجزای محدود، تحلیل عددی

۱- مقدمه

نگهدارنده برخوردار است. هو (۲۰۱۴) مطالعاتی عددی به کمک نرم افزار اجزای محدود در رابطه با شمع‌های پایدارکننده‌ی شیب‌ها در بسترهای رسی زهکشی نشده همراه با یک لایه‌ی ضعیف انجام داد. حضور یک لایه نازک ضعیف معمولاً اثر منفی بر پایداری شیب دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که حضور شمع می‌تواند سازوکار شکست و عمق سطح لغزش را تغییر دهد. شرایط محدود اعمال شده به سر شمع نیز اثرات مشابه در تغییر مکانیزم شکست در یک شیب دارد. برای یک شیب که شامل لایه ضعیف است، هر دو شمع با سر آزاد و سر گیردار منجر به بهبودی و پایداری شیب خواهد شد. برای شیب‌های

یکی از راه‌حل‌های پیشنهادی جهت پایداری شیب‌های خاکی استفاده از شمع‌هایی است که به صورت قائم و در طول شیب جای خواهند گرفت. به منظور تصمیم‌گیری جهت طراحی و اجرای این شمع‌ها در سطوح شیب‌دار پارامترها و عوامل متعددی تاثیرگذار خواهند بود. از جمله‌ی این عوامل می‌توان به نوع ریزدانه و درشت‌دانه بودن خاک، مقدار چسبندگی خاک، مقدار زاویه‌ی اصطکاک خاک، نوع شمع، طول کلی شمع، مقدار فرورفتگی شمع در خاک شیب، قطر شمع، سختی شمع و غیره اشاره کرد. شناخت تأثیر هر یک از این عوامل به تنهایی از اهمیت بسیار بالایی جهت انجام عملیات طراحی سیستم

اطمینان افزایش نمی‌یابد، با کاهش فاصله بین شمع‌ها افزایش می‌یابد. هرچه مقدار فاصله بین شمع‌ها کمتر باشد، یکپارچگی شیب مسلح بیشتر خواهد بود.

به‌طور کلی روش‌های متعددی برای پایدارسازی شیب‌های خاکی پیشنهاد شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به ستون‌های سنگی، ژئوستتیک‌ها، لاستیک‌های فرسوده و شمع‌ها اشاره کرد (حاجی‌عزیزی و نصیری، ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹؛ حاجی‌عزیزی و همکاران، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰). در این بین اما، شمع‌ها روشی مناسب و اصولی محسوب می‌شوند (مظاهری و همکاران، ۲۰۲۱). شمع‌ها به‌خوبی قادر به پایدارسازی شیب‌های در معرض خطر هستند. در بین مطالعاتی که به بررسی رفتار شیب‌های خاکی مسلح به شمع پرداختند، نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی در مقایسه کوچک نشان دادند که وجود شمع در میانه شیب به عنوان بهینه‌ترین موقعیت، منجر به افزایش پایداری و ضریب اطمینان خواهد شد (حاجی‌عزیزی و نصیری، ۱۳۹۶، ۱۳۹۷، ۱۳۹۸، نصیری و حاجی‌عزیزی، ۲۰۲۱). در بین نرم‌افزارهای اجزای محدود، آباکوس یکی از پُر کاربردترین نرم‌افزار مهندسی محسوب می‌شود، که به خوبی قادر به مدل‌سازی انواع محیط‌های ژئوتکنیکی نیز هست (قیاسی و مرادی، ۱۳۹۷، قیاسی و کوشکی، ۱۴۰۰، فصیحی و همکاران، ۱۴۰۰).

در این پژوهش سعی بر آن است تا یک سطح شیب‌دار خاکی در شرایط وجود شمع پایدار کننده تحلیل شده و اثر عوامل مختلف بیان شده به کمک نرم افزار اجزای محدود آباکوس بررسی گردد. از جمله پارامترهایی که در انجام این پژوهش مورد بررسی قرار خواهند گرفت، عبارتند از تغییر مکان‌های جانبی و قائم در خاک، مقدار تنش در خاک، مقدار تنش اعمالی بر شمع و همچنین تغییر مکان‌های شمع. استفاده از شمع‌های پایدار کننده مدت زمانی است که به‌عنوان یک راه‌حل مناسب برای پایدارسازی شیب‌های خاکی مطرح شده است. با این وجود، همچنان شناخت کامل و دقیقی نسبت به این سیستم نگهداری وجود ندارد. عوامل تأثیر گذار بر سیستم مذکور شامل موارد گوناگونی است که بررسی هر یک از آن‌ها می‌تواند در پیشرفت شناخت رفتار این سیستم نگهدارنده مفید باشد.

موضوعی که در انجام این پژوهش مورد بحث قرار خواهد گرفت این است که تأثیر پارامترهای فیزیکی شمع‌های پایدارکننده و همچنین تأثیر پارامترهای خاکی بر سیستم چگونه است؟ به‌عبارت دیگر شرایط متفاوتی از پارامترهای تأثیر گذار

همگن، شمع‌ها با سرگردار نتایج مؤثرتری نسبت به شمع با سر آزاد نشان می‌دهد.

پژوهش ژو و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی مطالعات موردی شیب خاکی‌ای در چین که به وسیله‌ی شمع‌ها پایدار شده‌اند، پرداختند. نتایج تحقیقات نشان داد که ضریب ایمنی در حالت بدون شمع که از روش کاهش مقاومت اجزای محدود به‌دست آمده، اندکی بزرگ‌تر از روش تعادل حدی است. در پژوهش فیرات (۲۰۰۹) نیروی جانبی وارده به شمع به عنوان یک پارامتر تأثیرگذار و مهم در طراحی شمع برای نگهداری سطوح شیب‌دار مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش همچنین پاسخ تئوری‌های مختلفی مربوط به پیش‌بینی نیروهای وارده به شمع مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش نیروی جانبی وارده به شمع به‌عنوان یک پارامتر تأثیرگذار و مهم در طراحی شمع برای نگهداری سطوح شیب‌دار مورد بررسی قرار گرفت. همچنین پاسخ تئوری‌های مختلفی مربوط به پیش‌بینی نیروهای وارده به شمع نیز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. محاسبات با استفاده از روش‌های به‌دست آمده نشان می‌دهد که نصب یک ردیف شمع تأثیر به‌سزایی در بهبود پایداری شیب دارد، به ویژه زمانی که سطح لغزش برای شیب غیر مسلح نسبتاً سطحی است. نتایج روشن ساخت که تأثیر شمع‌ها زمانی که در وسط شیب نصب شده‌اند، بسیار کارآمد خواهد بود.

حاجی‌عزیزی و مظاهری (۲۰۱۵) نشان دادند که برای دستیابی به حداکثر ضریب ایمنی برای یک ردیف شمع در شیب‌های همگن، شمع‌ها باید در وسط شیب نصب شوند. اغلب مطالعات تجربی و عددی نشان داده‌اند که وسط شیب به عنوان بهترین مکان برای نصب شمع است. افزایش طول شمع در شیب‌های همگن خاک نمی‌تواند ضریب ایمنی را افزایش دهد. اگر شمع در محل نامناسب نصب شود و طول ناکافی داشته باشد ضریب ایمنی کاهش می‌یابد. موقعیت شمع در لایه‌ی شیب همگن ضریب ایمنی را ۳۰ درصد افزایش می‌دهد، در نتیجه طول شمع و هزینه‌های پایداری کاهش می‌یابد. مقادیر ضریب اطمینان حاصل از روش تعادل حدی کمتر از روش تفاضل محدود است (حاجی‌عزیزی و رحمانی، ۱۳۹۴). یانگ و همکاران (۲۰۱۱) عمق مدفون شمع‌ها در شیب‌های خاکی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که فاصله شمع‌ها و شرایط سر شمع، اثر به‌سزایی بر طول مدفون بحرانی شمع دارد. دریافته شد که عمق مدفون بحرانی در ورای آن مقداری که ضریب

در مدل عددی ساخته شده مرزهای کناری در برابر تغییر مکان جانبی محدود شده و همچنین مرز انتهایی مدل عددی در راستاهای X و Y و به بیانی دیگر در هر دو راستای ممکن محدود شده است. بدین معنی که شرایط مرزی استاتیکی برای مدل‌ها در نظر گرفته شده است.

از آنجایی که تحلیل‌های انجام گرفته در این پژوهش به صورت دو بعدی بوده است، المان‌های انتخاب شده برای مدل عددی در نرم‌افزار به اختصار CPE4R نام داشته که بیانگر المان کرنش مسطح از نوع کاهش یافته است.

۲-۲- مدل‌های تحلیل شده در این پژوهش

در این پژوهش، ۱۲ مدل متفاوت انتخاب شده که در هر کدام دارای متغیرهایی بوده که در شرایط متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است. در جدول ۲ مشخصات مدل‌سازی‌ها نشان داده شده است. به منظور بررسی موارد اشاره شده در انجام این پژوهش، مدل‌های عددی متعددی ساخته شده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. بر این اساس، مواردی که مورد بررسی قرار گرفت عبارتند از: بررسی تأثیر محل نصب شمع بر ضریب اطمینان، بررسی نیروی وارده به شمع در یک سوم میانی و همچنین بررسی عمق نفوذ شمع.

در ادامه با توجه به سختی‌ای که ستون بتنی دارد مقدار جابه جایی قائم سر شمع، جابه جایی افقی سر شمع و مقدار ضریب اطمینان استخراج گردید. همچنین سطح گسیختگی خاکی، نیروی جانبی ایجاد شده، تغییر مکان جانبی و قائم ایجاد شده در محیط خاکی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

۲-۳- تحلیل و تفسیر تأثیر محل نصب شمع بر مقدار

ضریب اطمینان

در جدول ۳ نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی به منظور بررسی اثر موقعیت نصب شمع بتنی در شیب خاکی مورد نظر ارائه شده است. در این جدول نسبت Lx/L عبارتست از موقعیت شمع در طول شیب خاکریز مدل.

در شکل ۲ نتایج بررسی فاصله شمع و اثر آن بر میزان جابجایی‌ها و شکل ۳ نیز مقادیر ضریب اطمینان با توجه به موقعیت قرارگیری شمع نشان داده است.

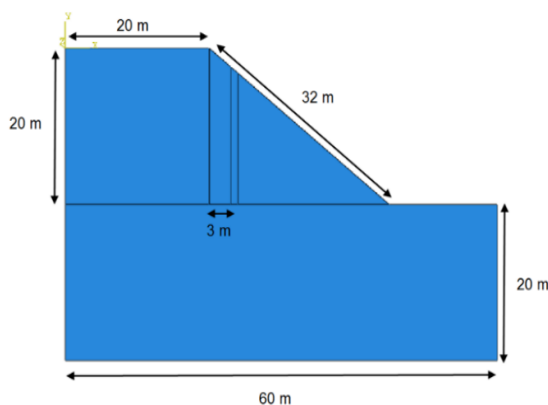
بر سیستم شیب خاکی مسلح شده با شمع‌های پایدارکننده به کمک مدل‌سازی عددی با نرم افزار آباکوس بررسی خواهد شد و حالت بهینه استفاده از پارامترهایی مرتبط با شمع بیان خواهد گردید.

۲- مدل‌سازی‌های عددی

با هدف بررسی رفتار شیب‌های خاکی مسلح با شمع و شناخت تغییر مکان‌های ایجاد شده در آن از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. در ادامه به شرح و بررسی شرایط مدل‌سازی و نتایج تحلیل‌ها پرداخته می‌شود.

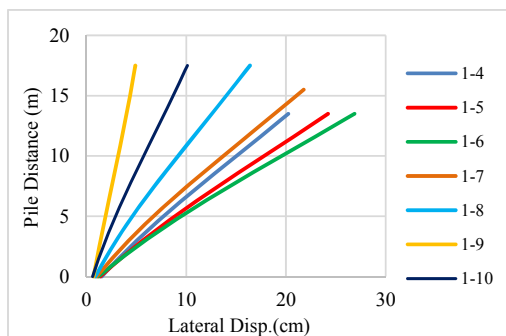
۱-۲- هندسه مدل

در این پژوهش به منظور هرچه دقیق‌تر شدن نتایج، مدل‌سازی با ابعاد موجود در واقعیت انجام پذیرفت. نمای کلی از هندسه‌ی ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس در شکل ۱ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که قطر شمع برابر با ۰/۸ متر بوده و تا سطح شیب ادامه کرده است.

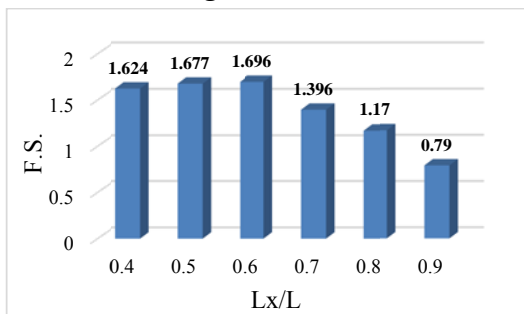


شکل ۱. هندسه مدل‌سازی در نرم افزار آباکوس

مدل‌های رفتاری انتخابی در انجام این پژوهش، مدل رفتاری الاستیک-پلاستیک کامل موهر-کلمب برای خاکریز و مدل رفتاری الاستیک برای شمع‌ها بوده است. با توجه به نوع بارگذاری و نحوه انجام تحلیل‌ها می‌توان بیان کرد که این مدل رفتاری نتایج صحیح و قابل قبولی ارائه خواهد کرد. مشخصات خاک و شمع انتخاب شده در جدول ۱ نشان داده شده است. شمع مدل‌سازی شده از جنس بتنی فرض شده است.



شکل ۲. نمودار تغییر مکان جانبی شمع برای حالات مختلف مدل ۱



شکل ۳. مقادیر ضریب اطمینان مدل‌سازی‌های سری اول

با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردید که مدل شماره ۱-۶ با مقدار ضریب اطمینان ۱/۶۹۶ بیشترین ضریب اطمینان را داشته و پایدارترین حالت را به خود اختصاص داده است. در این مدل عددی که دارای نسبت $\frac{Lx}{L}$ برابر ۰/۶ است، مقدار جابه‌جایی افقی سر شمع برابر ۲۶۹ میلی‌متر است که بیشترین تغییر مکان جانبی را در بین مدل‌های عددی موجود داراست. همچنین مدل عددی شماره ۱-۶ با مقدار تغییر مکان قائم ۷۱/۶ میلی‌متر بیشترین مقدار تغییر مکان را بین مدل‌های موجود داراست. با توجه به موارد بیان شده مشخص می‌گردد که مدلی که در آن نوک شمع بیشترین تغییر مکان را در راستای قائم و افقی داراست از بالاترین مقدار ضریب اطمینان برخوردار است. موضوع بیان شده بر اساس شکل ۲ که تغییر مکان جانبی شمع را نشان می‌دهد نیز قابل مشاهده است. نکته قابل توجه در این شکل این است که مدل شماره ۱-۹ تغییر مکان اندکی داشته و سریعاً به گسیختگی رسیده است. نکته دیگری که می‌توان بیان کرد این است که محل بهینه شمع در میانه‌ی شیب قرار دارد و در صورتی که شمع چه به پنجه‌ی شیب و چه به تاج شیب نزدیک گردد، از مقدار ضریب اطمینان کاسته خواهد شد.

با بررسی سطح گسیختگی ایجاد شده مشخص شد که با نزدیک شدن شمع به پنجه‌ی شیب سطح گسیختگی عموماً در خود شیب ایجاد خواهد شد و این در حالی است که زمانی که شمع به تاج شیب نزدیک گردد، سطح گسیختگی در کناره‌های دیواره‌ی شمع ایجاد خواهد شد. در شکل ۴ نمونه‌ای از سطح

جدول ۱. مشخصات خاک و شمع

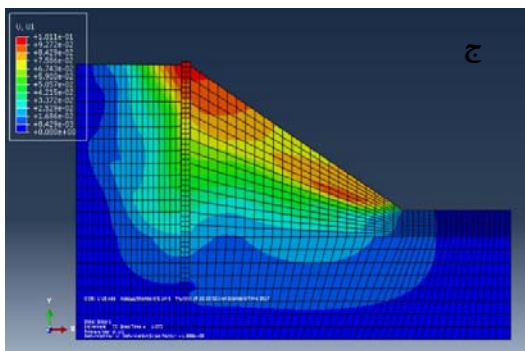
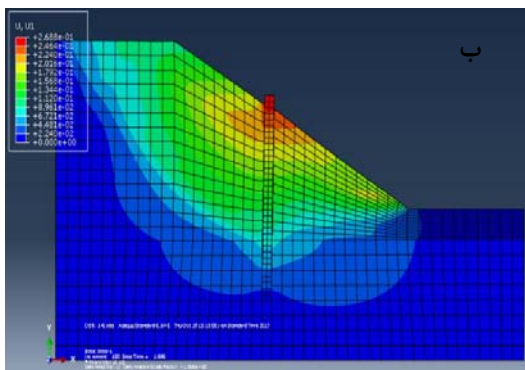
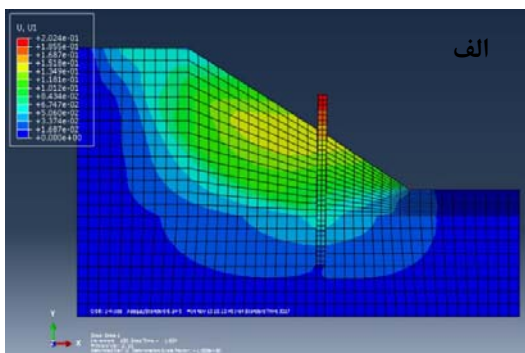
نسبت پواسون	وزن مخصوص (kg/m^3)	مدول یانگ (kPa)	زاویه اصطکاک ($^\circ$)	چسبندگی (kPa)	مصالح
۰/۳	۱۸	۴۰	۳۵	۱۰	خاکریز
۰/۳	۲۴	۲۰۰۰۰	-	-	شمع

جدول ۲. مشخصات مدل‌سازی‌های عددی

مقدار پارامتر متغیر	پارامتر مدل پایه	پارامتر متغیر
Model 1 – Base Model	-	-
Model 2	D = 0.6 m	D = 0.8 m D (قطر ستون‌ها)
Model 3	D = 1.2 m	
Model 4	S = 1 m	S = 2 m S (فاصله ستون‌ها)
Model 5	S = 3 m	
Model 6	C = 30 kPa	C = 10 kPa C (مقدار چسبندگی خاک)
Model 7	C = 50 kPa	
Model 8	$\phi=25$	$\phi=35$ ϕ (زاویه اصطکاک خاک)
Model 9	$\phi=45$	
Model 10	2 Pile	1 Pile چیدمان
Model 11	2 Pile – Space	
Model 12	3 Pile	

جدول ۳. نتایج به دست آمده ناشی از تغییر موقعیت شمع در مدل ۱

شماره	$\frac{Lx}{L}$	FOS	جابجایی افقی سر شمع (میلی‌متر)	جابجایی قائم سر شمع (میلی‌متر)
۴-۱	۰/۴	۱/۶۲۴	۲۰۲	۶۰/۹
۵-۱	۰/۵	۱/۶۷۷	۲۴۲	۶۶/۷
۶-۱	۰/۶	۱/۶۹۶	۲۶۹	۷۱/۶
۷-۱	۰/۷	۱/۳۹۶	۲۱۸	۶۵/۲۷
۸-۱	۰/۸	۱/۱۷	۱۶۴	۶۰/۵
۹-۱	۰/۹	۰/۷۹	۴۹	۴۴/۸
۱۰-۱	۱	۱/۰۷	۱۰۱	۶۱/۵



شکل ۵. تغییر مکان‌های جانبی در شیب مسلح با شمع در مدل ۱: الف) مدل ۱-۴ (شمع در نزدیکی پنجه شیب)، ب) مدل ۱-۶ (شمع در وسط تاج)، ج) مدل ۱-۱۰ (شمع در تاج شیب)

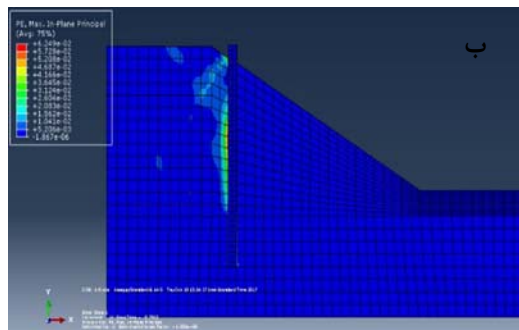
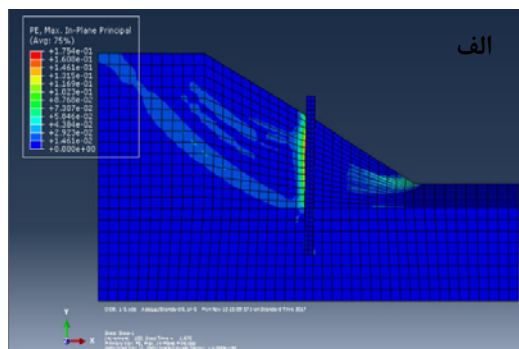
در بررسی تغییر مکان‌های قائم شیب مشخص گردید که با حرکت شمع به سمت تاج شیب، مقدار تغییر مکان قائم در پایین دست شمع افزایش پیدا می‌کند و زمانی که شمع در پنجه شیب قرار گیرد، مشخص شد که مقدار نشست در بالا دست شمع بیشتر می‌شود.

۲-۳- بررسی نیروی وارد بر شمع در یک سوم میانی شیب

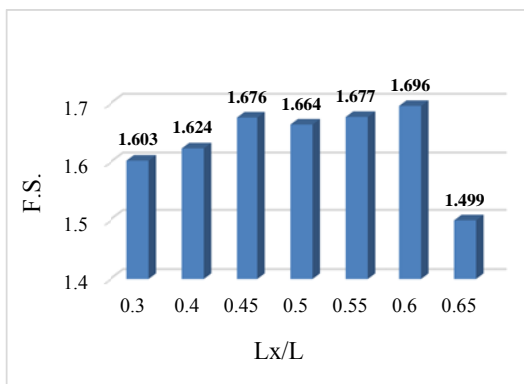
در این گام، موارد ذکر شده در بخش‌های پیشین به صورت ویژه و دقیق‌تر برای یک سوم میانی شیب بررسی می‌گردد. این

لغزش در شیب‌ها نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، در شکل ۴-الف سطح لغزش به خوبی دیده می‌شود. در حالی که بیشینه جابجایی در شکل ۴-ب در پشت شمع نمایان است.

همانطور که انتظار می‌رفت، مشخص گردید که بیشترین مقدار تغییر مکان جانبی در نوک شمع ایجاد شده است. با رسیدن شمع به میانه‌ی شیب می‌توان مشاهده کرد که خاک موجود در اطراف نوک شمع نیز به اندازه نوک شمع از خود نشست نشان داده است. این اتفاق در مدل عددی شماره ۱-۶ که بیشترین مقدار ضریب اطمینان را دارد، رخ داده است (شکل ۵). نکته دیگر قابل بررسی این است که زمانی که شمع در نزدیکی پنجه شیب قرار دارد، نقاط پشت شمع نشست نزدیک‌تری به شمع از خود نشان می‌دهند که بیشتر از نشست ایجاد شده در پایین دست شمع است. همچنین زمانی که محل شمع به سمت تاج شیب میل پیدا می‌کند، مقدار نشست‌ها در پنجه شیب افزایش یافته و هم مقدار نشست شمع می‌گردد. در مدل شماره ۱-۱۰ مشاهده می‌گردد که تغییر مکان نوک شمع با تغییر مکان نقطه‌ی انتهایی از شیب یکسان عمل کرده است. علت آن است که وجود شمع در تاج، خود می‌تواند به عنوان عامل مخرب افزایش وزن و در نتیجه بدتر شدن شرایط ناپایداری محسوب شود.



شکل ۴. سطوح گسیختگی در شیب مسلح با شمع الف) مدل ۱-۵ (شمع در نزدیکی وسط شیب)، ب) مدل ۱-۹ (شمع در نزدیکی تاج شیب)



شکل ۷. مقادیر ضریب اطمینان مدل‌سازی‌های سری دوم

مشاهده گردید که بیشترین سطح گسیختگی در مدل‌های عددی در ناحیه‌ی پشت شمع بوده و این ناحیه در پشت شمع یعنی به سمت تاج گسترش پیدا می‌کند. همچنین در پنجه‌ی شیب نیز ناحیه‌ی گسیختگی محدودی مشاهده می‌گردد. این ناحیه با نزدیک شدن شمع به بالادست شیب افزایش پیدا می‌کند و وسیع‌تر می‌گردد.

۲-۴- بررسی عمق نفوذ شمع در لایه‌ی مستحکم‌تر

زیرین

در این بخش، لایه زیرین را مقاوم‌تر کرده و به بررسی رفتار عمق نفوذ شمع در بستر مستحکم‌تر زیرین پرداخته شد. با این هدف، مقدار چسندگی خاک زیرین را دو برابر کرده (یعنی ۲۰ کیلوپاسکال) و به انجام تحلیل‌های عددی پرداخته شد. نتایج بررسی‌ها مشخص کرد که مدل عددی شماره ۳-۲ از گروه سوم با مقدار $\frac{L_e}{D}$ برابر ۰/۶ بیشترین مقدار ضریب اطمینان را کسب کرده است.

بر خلاف نکاتی که در رابطه با تغییر مکان قائم و افقی شمع‌ها در دو قسمت پیشین مطرح شد، این موضوع در رابطه با تغییر عمق استقرار شمع متفاوت است. بر این اساس، با افزایش عمق قرارگیری شمع در خاک، مقدار ضریب اطمینان افزایش پیدا می‌کند. البته این افزایش در عمقی مشخص ثابت شده و در انتها نیز کاهش پیدا می‌کند. در جدول ۵ نتایج به‌دست آمده از نتایج تحلیل‌ها در مدل سوم نشان داده شده است.

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۸ مشخص است که مدل عددی شماره ۳-۷ از گروه سوم کمترین تغییر مکان و مدل عددی شماره ۳-۱ از گروه سوم بیشترین تغییر مکان جانبی را در بین شمع‌ها داشته است.

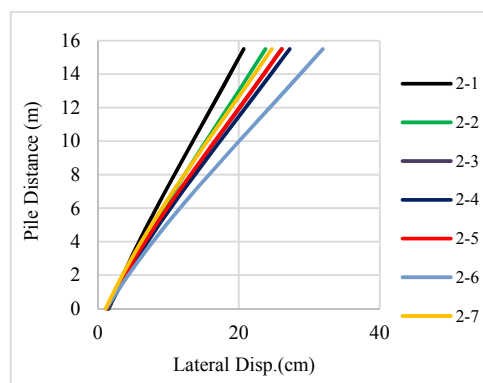
موضوع بدان معناست که یک سوم میانی از شیب در این قسمت به‌صورت دقیق‌تر مورد بررسی خواهد گرفت تا تغییرات در این حد فاصل مشخص گردد. با بررسی تغییرات مشخص گردید که در فاصله $\frac{Lx}{L}$ برابر با ۰/۶ (مدل ۲-۶)، بیشترین مقدار ضریب اطمینان حاصل شده است. این مدل عددی بیشترین تغییر مکان قائم را داشته است، اما بیشترین تغییر مکان افقی در مدل عددی شماره ۲-۴ با $\frac{Lx}{L}$ برابر ۰/۵ ایجاد شده است (جدول ۴).

با مشاهده شکل ۶ که تغییر مکان جانبی شمع را نشان می‌دهد، مشخص می‌گردد که شمع مدل شماره ۲-۶ از این سری از مدل‌هایی که مورد تحلیل قرار گرفته است، بیشترین مقدار تغییر مکان جانبی را داشته است. شمع شماره ۲-۱ از گروه دوم، کمترین مقدار تغییر مکان قائم را داشته است. در شکل ۷ مقادیر ضریب اطمینان مدل‌سازی‌های سری دوم نشان داده شده است.

جدول ۴. نتایج به‌دست آمده ناشی از تغییر نیروی وارد

بر شمع در مدل ۲

شماره	$\frac{Lx}{L}$	FOS	جابجایی افقی سر شمع (میلی‌متر)	جابجایی قائم سر شمع (میلی‌متر)
۱-۲	۰/۳۵	۱/۶۰۳	۲۰۷	۶۰/۷
۲-۲	۰/۴	۱/۶۲۴	۲۰۲	۶۴/۴
۳-۲	۰/۴۵	۱/۶۷۶	۲۶۰	۶۷/۴
۴-۲	۰/۵	۱/۶۶۴	۲۷۲	۶۸/۸
۵-۲	۰/۵۵	۱/۶۷۷	۲۴۲	۶۷/۹
۶-۲	۰/۶	۱/۶۹۶	۲۶۹	۷۵/۸
۷-۲	۰/۶۵	۱/۴۹۹	۲۴۷	۶۷/۷



شکل ۶. نمودار تغییر مکان جانبی شمع برای حالات مختلف مدل ۲

جدول ۵. نتایج به دست آمده ناشی از تغییر نیروی وارد

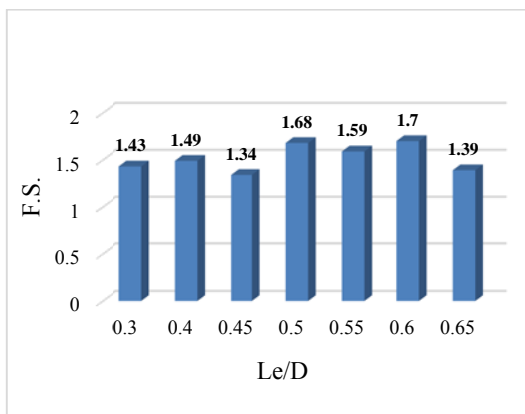
بر شمع در مدل ۳

شماره	$\frac{L_e}{D}$	FOS	جابجایی افقی سر شمع (میلی متر)	جابجایی قائم سر شمع (میلی متر)
۱-۳	۰/۳	۱/۴۳	۲۴۰	۷۱/۶
۲-۳	۰/۴	۱/۴۹	۲۱۷	۶۷/۱
۳-۳	۰/۴۵	۱/۳۴	۱۶۰	۵۷/۷
۴-۳	۰/۵	۱/۶۸	۲۴۲	۶۶/۷
۵-۳	۰/۵۵	۱/۵۹	۲۰۸	۵۹/۶
۶-۳	۰/۶	۱/۷	۲۲۲	۵۸/۸
۷-۳	۰/۶۵	۱/۳۹	۱۵۰	۴۵/۵

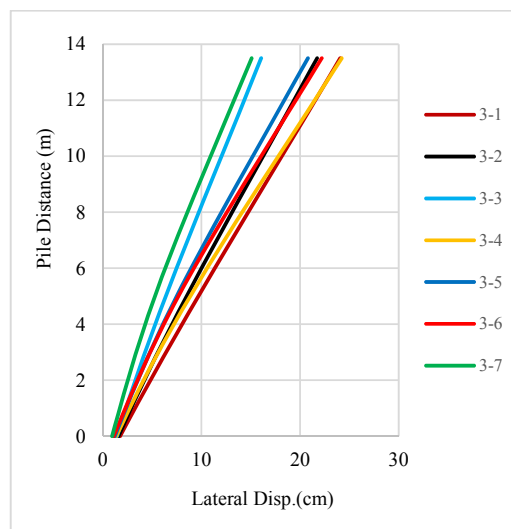
است، می توان بیان کرد که تغییراتی در مقدار تغییر شکل های جانبی ایجاد نشده است. دلیل این موضوع را می توان اینگونه بیان کرد که شمع تنها در اعماقی تغییر مکان داشته که تغییرات شرایط تنش در آن اعماق اتفاق نیافتاده است.

نکته مهم این است که مشخص گردید مقدار نشست قائم در نزدیکی تاج شیب با افزایش مقدار عمق نفوذ شمع در خاک مستحکم زیر اندکی افزایش پیدا کرده است. به بیان دیگر با افزایش عمق نفوذ شمع، مقدار نشست در نزدیکی تاج شیب افزایش پیدا می کند.

با افزایش عمق نفوذ شمع در خاک مقدار تغییر مکان در محل برخورد سطح خاک و شمع نیز افزایش پیدا می کند. البته لازم به ذکر است که تغییرات چندان محسوس نیست و مقدار آنها نیز بسیار اندک است. به بیانی دیگر با افزایش عمق نفوذ شمع در خاک زیرین، در محل برخورد شمع و سطح خاک شاهد نشست خواهیم بود (شکل ۱۰).



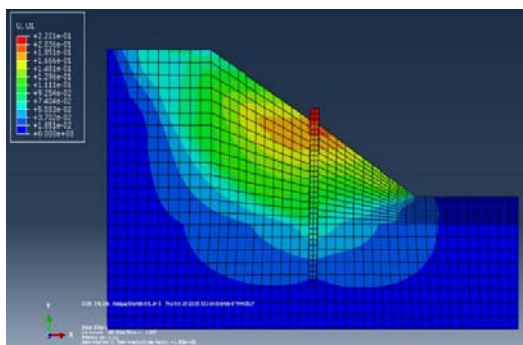
شکل ۹. مقادیر ضریب اطمینان مدل سازی های سری سوم



شکل ۸. نمودار تغییر مکان جانبی شمع برای حالات مختلف مدل ۳

با بررسی ضرایب اطمینان همانطور که پیشتر نیز بیان گردید مدل با نسبت عمق نفوذ ۰/۵ و ۰/۶ بالاترین ضرایب اطمینان را دارا هستند (شکل ۹).

بر اساس بررسی های انجام شده با توجه به نمودارهای جابجایی ها و تغییر شکل ها مشخص گردید که با تغییر عمق نفوذ شمع در خاک حالت و سطوح گسیختگی تغییر چندانی نخواهد داشت. دلیل این موضوع نیز این بوده که حداکثر سطح گسیختگی در ترازهای انتهایی شمع به شمع برخورد کرده و شمع با تغییر عمق خود تغییری در سطح گسیختگی ایجاد نمی کند. با توجه به اینکه تغییر خاصی در مدل عددی لحاظ نشده و تنها عمق نفوذ شمع در لایه ی پایین تغییر پیدا کرده

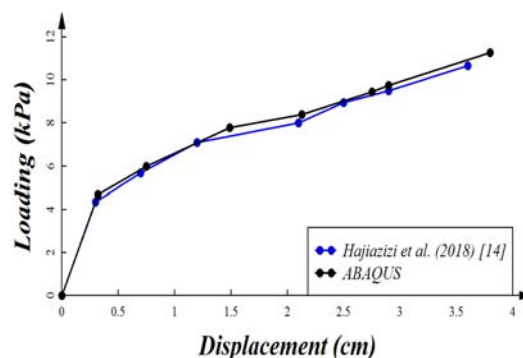


شکل ۱۰. تغییر مکان های جانبی در شیب مسلح با شمع

در مدل ۳-۶

۳-صحت سنجی نرم افزار آباکوس

با هدف بررسی صحت سنجی نرم افزار آباکوس، پژوهش انجام شده توسط حاجی عزیزی و همکاران (۲۰۲۰) مدل سازی شد و نتایج با تحلیل آن پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، همخوانی مناسبی بین مدل سازی های انجام شده در پژوهش (حاجی عزیزی و همکاران، ۲۰۱۸) و تحلیل های عددی با آباکوس وجود دارد. این مسأله حاکی از صحت مدل سازی های انجام شده در این مقاله است.



شکل ۱۱. مقایسه نتایج پژوهش حاجی عزیزی و همکاران (۲۰۲۰) و مدل سازی های عددی به کمک آباکوس

۴-نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی اثر موقعیت محل نصب شمع و عمق نفوذ آن بر مقدار ضریب اطمینان و تغییر مکان های رخ داده پرداخته شده است. یکی از مواردی که مورد بررسی قرار گرفت، بررسی تغییر مکان جانبی شمع ها در زمانی است که نیروی وارده بر شمع در یک سوم میانی اعمال شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از تغییر مکان جانبی مشخص گردید که مدل شماره ۱-۲ نسبت به سایر مدل ها تغییر مکان کمتری را تجربه کرده است. از نظر ضریب اطمینان نیز مدل شماره ۶ بالاترین ضریب اطمینان را داشته (در هر سه حالت ۱-۶، ۲-۶ و ۳-۶) و بعد از آن مدل های شماره ۱-۵ و ۲-۵ ضریب اطمینان بالایی را رقم زده اند. نکته ای که می توان بیان کرد این است که ضرایب اطمینان به دست آمده برای عموم مدل ها در یک محدوده ی خاص بوده و محدود هستند و از اختلاف چندانی برخوردار نیستند. این بدان معناست که مدل های عددی ۱ تا ۶ ضریب اطمینان تقریباً یکسان و نزدیک به همی دارند؛ حال آنکه

این مدل ها تغییر مکان های متفاوتی را تجربه می کنند. با توجه به موضوع بیان شده مدل شماره ۲ به عنوان مدل با عملکرد بهینه معرفی می گردد.

با بررسی عمق نفوذ شمع در لایه پایین مشخص گردید که مدل شماره ۳-۷ و ۳-۳ دارای کمترین تغییر مکان جانبی نسبت به سایر مدل های عددی هستند. از طرفی مدل شماره ۳-۴ و مدل شماره ۳-۶ با اختلاف زیادی دارای بیشترین ضرایب اطمینان نسبت به سایر مدل های عددی هستند. از این رو با در نظر گرفتن مدل شماره ۳-۶ با ضریب اطمینان ۱/۷ به عنوان مدل بهینه انتخاب شده و در صورتی که موضوع تغییر مکان جانبی مطرح باشد، مدل شماره ۳-۷ می تواند به عنوان گزینه انتخابی مطرح گردد. با مشاهده نمودارهای تأثیر محل نصب شمع، مشخص گردید که مدل عددی شماره ۱-۴ کمترین تغییر مکان را از خود نشان داده است.

با توجه به مدل های عددی مورد بررسی قرار گرفته برای تمامی حالت ها مشخص می گردد که تنش جانبی وارده به شمع در نیمه بالایی شمع بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. دلیل این موضوع می تواند آن باشد که از آنجایی که سطح گسیختگی در تمامی حالات به صورتی بوده که نیمه بالایی شمع را تحت تأثیر قرار می دهد، از این رو سطح بیشتری از خاک به شمع نیرو وارد می کند و وزن خود شمع می تواند عامل مخربی برای پایداری محسوب می شود.

شمع در اعماق بیشتر، تغییر مکان چندانی ندارد و از طرفی این موضوع برای خاک نیز صحت داشته و خاک نیز تغییر مکان چندانی را از خود نشان نخواهد داد. این کاهش تغییر مکان در خاک در اعماق، موجب کاهش مقدار تنش وارده بر شمع نیز می گردد و این موضوع نیز از نظر تجربی کاملاً استدلال درستی را رقم می زند. نکته ی دیگری که بایستی به آن اشاره کرد این است که برای مدل هایی که مقدار ضریب اطمینان بالاتری دارند، مقدار تنش جانبی بیشینه ی وارده به طور دقیق در فاصله یک سوم طول شمع از سطح خاک رخ می دهد. نتایج به دست آمده در این پژوهش به اختصار به شرح زیر هستند:

با توجه به مدل های عددی مورد بررسی و همچنین شرایط خاکی مورد نظر می توان بیان کرد که سطح گسیختگی از سطح میان دو خاک عبور نکرده و گسیختگی تنها در ناحیه ی خاک بالایی باقی می ماند.

-با افزایش نفوذ شمع در خاک و به ویژه در لایه‌ی مستحکم‌تر پایینی خاک، سطح گسیختگی و همچنین تغییر مکان‌های جانبی تغییر چندانی پیدا نمی‌کند. این موضوع بدان معنی است که سطح گسیختگی در تماس با شمع، سطح زیرین را قطع نکرده و در سطوح میانی با شمع برخورد دارد. در نتیجه، می‌توان اظهار کرد که تغییر عمق نفوذ شمع بر سطوح گسیختگی، تغییر مکان افقی و میزان نیروی جانبی در محیط اثرگذاری قابل توجهی ندارد.

-با افزایش عمق نفوذ شمع در خاک، میزان نشست در بالادست شیب خاکی افزایش پیدا می‌کند.

-بر اساس بررسی‌ها مشخص گردید که محل $\frac{Lx}{L}$ برابر $0/6$ بهینه‌ترین محلی است که شمع می‌تواند در آن محل قرار گیرد. زیرا بزرگترین تغییر مکان در آن محل حاصل شده است.

-با افزایش میزان ضریب اطمینان در مدل‌هایی که محل شمع تغییر می‌کند، مقدار تغییر مکان قائم و جانبی خاک افزایش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، با افزایش ضریب اطمینان مقدار تغییر مکان جانبی و قائم شمع نیز افزایش پیدا می‌کند.

۵-مراجع

-محمد حاجی‌عزیزی و مسعود نصیری (۱۳۹۹). مطالعه عددی سه بعدی پایداری شیب ماسه‌ای مسلح با ستون سنگی مسلح با ژئوگرید. *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، دوره ۵۲، شماره ۳، ۱-۱۹.

-واحد قیاسی و مبین مرادی، (۱۳۹۷). مدل‌سازی عددی نشست پی‌های رادیه-مرکب منفصل با تاکید بر تعریف جدیدی از این سیستم‌ها با عنوان سیستم ترکیبی. *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۶، شماره ۵۵، ۲۴۵-۲۳۵.

-واحد قیاسی و مهدی کوشکی (۱۴۰۰). بررسی عددی نشست سطح زمین در تونل زنی دایره‌ای تحت اثر همزمان تغییرات مشخصات هندسی تونل و مکانیک خاک در محیط اشباع و پیش‌بینی آن در شبکه عصبی. *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۹، شماره ۶۴، در دست چاپ.

-فاصل فصیحی، محمودرضا کی‌منش، سید علی صحاف و سهیل قره (۱۴۰۰). تعیین ضریب بار هم ارز مبتنی بر الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی. *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، در دست چاپ.

-C. Zhou, W. Shao, and C.J. Van Western (2014). Comparing two methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles for a landslide in the Three Gorges Reservoir, China. *Engineering Geology*, Vol. 173, Issue 1, 41-53.

-محمد حاجی‌عزیزی و محمود رحمانی (۱۳۹۴). تحلیل استاتیکی و شبه‌دینامیکی تاثیر ستون‌های سنگی در پایداری شیب خاکی واقع بر خاک رسی نرم. *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۳، شماره ۴۲، ۵۲-۴۳.

-محمد حاجی‌عزیزی و مسعود نصیری (۱۳۹۶). بررسی آزمایشگاهی تاثیر میزان چسبندگی در پایداری شیب‌های خاکی مسلح با ستون سنگی. *مجله علمی-پژوهشی مهندسی عمران مدرس*، دوره ۱۷، شماره ۱، ۷۸-۶۵.

-محمد حاجی‌عزیزی و مسعود نصیری، (۱۳۹۷). تعیین عمق موثر نفوذ ستون سنگی در شیب‌های خاکی با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی. *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست*، دوره ۴۸، شماره ۱، ۱۲-۱.

-محمد حاجی‌عزیزی و مسعود نصیری (۱۳۹۸). مطالعه آزمایشگاهی و عددی پایداری شیب ماسه‌ای با استفاده از ستون سنگی مسلح با ورقه‌های افقی ژئوتکستایل. *نشریه مهندسی عمران فردوسی*، دوره ۳۲، شماره ۱، ۷۲-۵۵.

-A.R. Mazaheri, M. Paknahad, M. Nasiri, M. Hajiazizi, (2021). Limit analysis, numerical, and physical modeling of pile stabilized slopes using image processing analyses. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*.

- M. Hajiazizi, M. Nasiri, A.H. Mazaheri (2018). The effect of fixed-tip piles on stabilization of earth slopes. *Scientia Iranica*, Vol. 25, Issue 5, 2550-2560.
- M. Hajiazizi, M.H. Mir Naghizade, M. Nasiri (2019). Experimental study of sand slopes reinforced by waste tires. *International Journal of Mining and Geo-Engineering (IJMJE)*, Vol. 53, Issue 2, 183-191.
- M. Hajiazizi, M.H. Mir Naghizade, M. Nasiri (2020). Stabilization of earth slope by waste tire using experimental tests and PIV. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, Vol. 8, Issue 3, 39-157.
- S. Firat (2009). Stability analysis of pile-slope system. *Scientific Research and Essay*, Vol. 4, Issue 9, 842-852.
- Sh. Yang (2011). Study on embedded length of piles for slope reinforced with one row of piles. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 3 Issue 2, 167-178.
- M. Nasiri, M. Hajiazizi (2021). An experimental and numerical investigation of reinforced sand slope using geotextile encased stone column. *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 15, Issue 5.
- I. Ho. (2014). Numerical Study of Slope Stabilizing Piles in Undrained Clayey Slopes with a Weak Thin Layer. *International Journal of Geomechanics*, Vol. 15, Issue 5.
- M. Hajiazizi, A.R. Mazaheri (2015). Use of line segments slip surface for optimized design of piles in stabilization of the earth slopes. *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 13, Issue 1, 14-27.
- M. Hajiazizi, E. Nemati, M. Nasiri, M. Bavali, M. Sharidpur (2020). Optimal location of stone column for stabilization of sand slope: an experimental and 3D numerical investigation. *Scientia Iranica*, Vol. 27, Issue 1, 105-116.
- M. Hajiazizi, M. Nasiri (2019). Experimental and numerical investigation of reinforced sand slope using geogrid encased stone column. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, Vol. 52, Issue 1, 85-100.
- M. Hajiazizi, M. Nasiri (2018). Experimental and numerical study of earth slope reinforcement using ordinary and rigid stone column. *International Journal of Mining and Geo-Engineering (IJMJE)*, Vol. 52, Issue 1, 23-30.

Numerical Analysis of the Effect of Pile Position on the Displacements Created in the Soil Slope

*Ahmadreza Mazaheri, Civil Engineering Department, Engineering Faculty,
Ayatollah Borujerdi University, Borujerd, Lorestan, Iran.*

*Masoud Nasiri, Civil Engineering Department, Engineering Faculty,
Razi University, Kermanshah, Iran.*

*Esmaeil Vaesi, M.Sc., Civil Engineering Department, Engineering Faculty,
Islamic Azad University, Arak Branch, Arak, Iran.*

E-mail: a.mazaheri@abru.ac.ir

Received: February 2024- Accepted: June 2024

ABSTRACT

One of the proposed solutions to strengthen and improve the stability of earth slopes is to use piles that will be placed vertically and along the slope in a row. In this research, using the finite element numerical model with ABAQUS software, the parameters affecting the stabilization of soil slopes were investigated. The results showed that the location L_x/L equal to 0.6 is the most optimal place where the pile can be placed, since the largest displacements have taken place there. According to the studied numerical models as well as the soil conditions, it can be said that the failure surface does not pass between the two soils and the failure surface remains only in the upper soil area. As the factor of safety increases in models where the pile location changes, the values of vertical and lateral displacement of the soil increases. In other words, with increasing factor of safety, the amount of lateral and vertical displacement of the pile also increases.

Keywords: Pile, Earth Slope, Displacement, Reinforcement, Finite Element, Numerical Analysis