

بررسی عددی رفتار شمع‌های مارپیچ در تثبیت شیب‌های خاکی

مسعود مکارچیان*^۱ و نفیسه وفائی^۲

^۱ استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان
^۲ کارشناس ارشد مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

(دریافت: ۹۵/۱/۲۹، پذیرش: ۹۷/۶/۳۱، نشر آنلاین: ۹۷/۶/۳۱)

چکیده

پایدارسازی شیب‌های خاکی و پیشنهاد راهکارهای گوناگون برای این مسئله، یکی از موضوعات مهم در مهندسی ژئوتکنیک است. امروزه استفاده از نوع خاصی از شمع‌ها به نام شمع‌های مارپیچ (Helical Screw Pile) گسترش یافته است. کاربرد این سیستم جدید در پروژه‌های مختلف، موفقیت‌آمیز بوده است. این شمع‌ها می‌توانند جایگزین اقتصادی و مؤثری برای شمع‌های رایج کنونی باشند. در تحقیق حاضر، عملکرد شمع‌های مارپیچ در تثبیت شیب ماسه‌ای با استفاده از روش اجزاء محدود در نرم‌افزار ABAQUS, V.6.13.1 مورد مطالعه قرار گرفته است. متغیرهای این تحقیق شامل قطر پره‌های مارپیچی شمع، فاصله پره‌ها از یکدیگر، طول شمع و تعداد ردیف شمع‌ها در گروه شمع است. طبق بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش، استفاده از شمع‌های مارپیچ در مقایسه با شمع‌های معمولی روش مناسب و مؤثری برای تثبیت شیب‌های خاکی است. تحلیل‌های کلی صورت گرفته در پژوهش، ایده‌هایی برای بهینه‌تر کردن پروژه تثبیت به طراحان ارائه می‌دهد. طبق نتایج متغیرهای قطر پره‌های مارپیچی، فاصله پره‌ها از یکدیگر، طول شمع و تعداد ردیف شمع‌ها با ضریب اطمینان شیب در برابر گسیختگی، رابطه مستقیم دارند. تأثیر این پارامترها در نزدیکی طول بحرانی شمع قابل ملاحظه‌تر است. همچنین تعداد ردیف شمع‌ها، قطر پره‌ها و نیز فواصل آن‌ها از یکدیگر با طول بحرانی شمع رابطه مستقیم دارند.

کلیدواژه‌ها: شمع مارپیچ، تثبیت شیب، روش اجزاء محدود، هندسه شمع، شیب ماسه‌ای.

۱- مقدمه

می‌شوند. این شمع‌ها با اعمال گشتاور پیچشی به داخل زمین چرخانده می‌شوند. اجزاء اصلی شمع‌های مارپیچ شامل قسمت پیشرو (هادی)، قسمت‌های الحاقی و پره‌ها است. قسمت پیشرو، اولین قسمتی است که وارد خاک شده و پس از آن افزودن میله‌های الحاقی که با پیچ به یکدیگر متصل می‌شوند، تا رسیدن قسمت پیشرو به عمق مورد نظر ادامه می‌یابد (شکل ۱). شمع‌های مارپیچ از جنبه‌های قطر، ضخامت و طول بدنه و همچنین تعداد، اندازه و محل قرارگیری پره‌ها، از یکدیگر متفاوت هستند (Perko, ۲۰۰۹ و Seider و Lutenegeger, ۲۰۱۵).

شمع‌های مارپیچ می‌توانند به صورت قائم یا تحت هر زاویه‌ای نصب شده و بارهای فشاری و کششی را تحمل کنند. این شمع‌ها کاربردهای زیادی در پی‌بندی یا تقویت ظرفیت باربری پی ساختمان‌ها، تقویت جاده‌ها و پل‌ها، مقاوم‌سازی جانبی خاکبرداری‌ها نظیر میخ‌کوبی سیستم دیوارهای حائل و دوخت از پشت در سازه‌های نگهبان و نیز تثبیت و پایدارسازی شیب‌های خاکی دارند.

نزدیک به ۱۸۰ سال است که از شمع‌های مارپیچ در مهندسی عمران استفاده می‌شود. به طور خاص از ۲۰ سال گذشته شمع‌های مارپیچ در مطالعات دانشگاهی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند. امروزه شمع‌های مارپیچ به وسیله مهندسی عمران با تجربه، به خوبی شناخته شده است و لازم است به عنوان بخش مهمی از مطالعات مهندسی پی قرار گیرد. تا امروز بیش از ۵۰ شرکت سازنده شمع‌های مارپیچ در سراسر دنیا مشغول فعالیت هستند (Perko, ۲۰۰۹). کاربردهای مختلف این شمع‌ها باعث جلب توجه مهندسان زیادی در آمریکا و انگلستان شده و موجب گردیده است که طی ۳۰ سال اخیر، کاربردهای نوین زیادی برای آن‌ها پیدا شود (Lutenegeger, ۲۰۱۱).

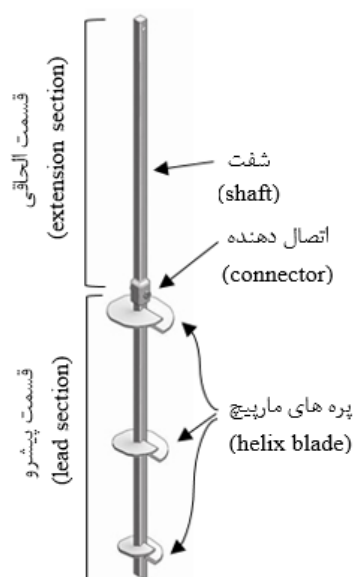
شمع مارپیچ به پی عمیقی گفته می‌شود که شامل یک یا چند صفحه فولادی مارپیچ (پره) است که به میله فولادی گالوانیزه سبکی به نام شفت جوش شده‌اند. شفت این شمع‌ها متشکل از تعدادی میله کوتاه‌تر است که با پیچ یا جوش به یکدیگر متصل

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۸۱-۳۸۲۹۲۶۳۰

سازه‌های موقت، تولید لرزش خیلی کم در حین نصب (مناسب برای مناطق پرازدحام و شلوغ)، امکان بارگذاری آنی پس از نصب، امکان کنترل ظرفیت باربری شمع حین اجرا، قابلیت اجرا در خاک‌های با سطح آب زیرزمینی بالا از جمله این مزیت‌ها است. (Sakr, ۲۰۰۹ و Perko, ۲۰۱۱؛ El Sharnouby, ۲۰۰۹).

Baranov و Ponomarenko (۲۰۱۳) با مروری بر مطالعات انجام گرفته در خصوص شمع‌های مارپیچ، معتقدند فقدان اطلاعات مبسوط در حوزه طراحی این شمع‌ها، موجب ناشناخته ماندن و عدم استفاده بیش از پیش آن‌ها در پروژه‌ها شده است. با وجود این که شمع‌های مارپیچ به‌عنوان عامل مؤثری برای تثبیت و افزایش ضریب اطمینان شیروانی‌ها در برابر لغزش هستند (Perko, ۲۰۰۹)، متأسفانه تعداد زیادی از پژوهش‌های علمی دقیق که به‌طور خاص مکانیزم رفتاری این شمع‌ها را در تثبیت شیب‌های خاکی مورد بررسی قرار داده باشند، در دست نیست.

پروژه‌های عملی زیادی از تثبیت شیب و نیز کنترل زمین لغزش‌ها و تغییر شکل‌های در حال توسعه شیروانی‌های خاکی با استفاده از شمع‌ها و مهارهای مارپیچ توسط شرکت‌های مختلف در اروپا و علی‌الخصوص آمریکای شمالی انجام گرفته است. (Avalon Structural, Inc., ۲۰۱۵ و Monata Helical Piers, ۲۰۱۷ و EBS Geotechnical Inc., ۲۰۱۷ و غیره) که نمونه‌ای از آن‌ها در شکل (۲) آمده است. اخیراً در ایران، اولین شرکت طراح و مجری سیستم شمع‌های مارپیچ (گروه مهندسی آرپا آرآر بتیس، ۱۳۹۶) با وارد کردن دستگاه‌های کلیدی مورد نیاز این روش از آمریکا، پروژه‌های محدودی را با استفاده از شمع‌های مارپیچ انجام داده است؛ اما تاکنون در کشور گزارشی مبنی بر استفاده از این شمع‌ها به‌منظور تثبیت شیب ارائه نشده است. از این رو این پژوهش به دنبال مطالعه علمی این کاربرد مهم شمع‌های مارپیچ است. امید است این مطالعه گامی برای معرفی و به‌کارگیری این شمع‌ها در پروژه‌های ژئوتکنیکی توسط مهندسان کشورمان باشد.



شکل ۱- تصویر شماتیک شمع مارپیچ

همچنین از این شمع‌ها به‌عنوان اعضای کششی برای مهار برج‌ها و دکل‌ها، تأسیسات شهری، برج‌های مخابراتی، لوله‌های انتقال و دیگر سازه‌ها استفاده می‌شود (Perko, ۲۰۰۹).

شمع‌های مارپیچ یکی از بهترین گزینه‌ها برای مقاومت در برابر بارهای وارده به پی سازه‌های مرتفع و لاغر هستند (Nazir و همکاران، ۲۰۱۴). از این شمع‌ها به‌عنوان فونداسیون در مکان‌های دور از دسترس، خاکریزهای شیب‌دار غیرقابل کنترل و موارد حاد نیز استفاده می‌شود (Perko, ۲۰۰۵).

استفاده از شمع‌های مارپیچ مزایای زیادی در پی دارد. نصب آسان بدون ایجاد صدای قابل ملاحظه، کاهش دست‌خوردگی در خاک، کاهش زمان اجرای پروژه (Saftner, ۲۰۱۷؛ Perko, ۲۰۰۹)، حذف عمل‌آوری بتن و قالب‌بندی، حذف ضایعات خاکبرداری، عدم نیاز به جوشکاری، قابلیت اجرا در دماهای کم، قابلیت نصب با تجهیزات کوچک قابل دسترس، قابلیت انتقال به مناطق دور از دسترس، قابلیت جابه‌جایی شمع پس از استفاده در



شکل ۲- نمونه‌ای از تثبیت شیب با شمع مارپیچ (Avalon Structural, Inc., ۲۰۱۵)

$$\theta = t \quad (۵)$$

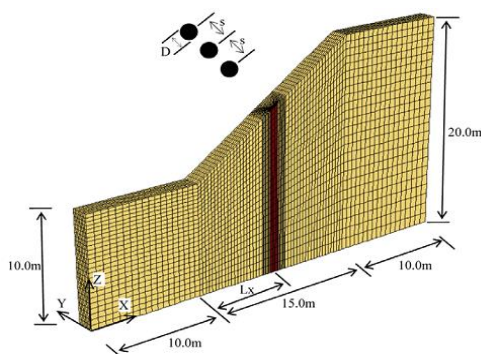
با جایگذاری رابطه (۵) در رابطه (۳) داریم:

$$F_{trial} = \frac{1}{1 - 0.9\theta} \quad (۶)$$

با رابطه (۶)، F_{trial} در هر زمان به دست می‌آید. با استفاده از نتایج تحلیل نرم‌افزاری، منحنی حداکثر جابه‌جایی نسبی در شیب نسبت به زمان قابل ترسیم است. نقطه شکست در این منحنی، زمان بحرانی است. در نتیجه با رابطه (۶)، F_{trial} و ضریب اطمینان شیب در برابر گسیختگی به دست می‌آید (Xu و همکاران، ۲۰۰۹).

۲-۲- اعتبارسنجی مدل سازی نرم‌افزاری

برای اطمینان از صحت تحلیل‌ها در خصوص شیب خاکی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS- که نرم‌افزار بین رشته‌ای بوده و به صورت تخصصی مختص تحلیل مسائل ژئوتکنیکی نیست- شیب خاکی که قبلاً توسط Cai و Ugai (۲۰۰۰)، Won و همکاران (۲۰۰۵) و Wei و Cheng (۲۰۰۹) مورد بررسی پایدار قرار گرفته و برای تثبیت آن از شمع‌های فولادی استفاده شده بود، مجدداً توسط نرم‌افزار ABAQUS، مورد تحلیل پایدار قرار گرفت و نتایج حاصله با تحلیل‌های برخی نرم‌افزارهای ژئوتکنیکی و همچنین روش‌های تئوری مطرح در تحلیل پایدار شیب‌های خاکی مقایسه گردید. شکل (۳) هندسه این شیب را نشان می‌دهد. شیب مورد بررسی این محققان از نوع ماسه‌ای و دارای چسبندگی 10 kPa ، زاویه اصطکاک داخلی 20° درجه، وزن مخصوص 20 kN/m^3 ، نسبت پواسون 0.25 و مدول ارتجاعی 200 MPa بوده است. Wei و Cheng (۲۰۰۹) با استفاده از نرم‌افزار FLAC 3D ضریب اطمینان این شیب را در برابر گسیختگی در حالت غیرمسلح $1/20$ به دست آورده‌اند.



شکل ۳- هندسه مدل به کاررفته توسط Cai و Ugai (۲۰۰۰)؛ Won و همکاران (۲۰۰۵)؛ Wei و Cheng (۲۰۰۹)

آنان همچنین با استفاده از روش اسپنسر، ضریب اطمینان $1/18$ را گزارش کرده‌اند. در بررسی‌های سببعدی Cai و Ugai

۲- تشریح مدل و تحلیل‌ها

در تحقیق حاضر با مدل‌سازی شمع‌های مارپیچ در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS, V 6.13.1 عملکرد این شمع‌ها در تثبیت شیب خاکی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- رویکرد محاسباتی نرم‌افزار

در این پژوهش، به منظور تحلیل پایداری شیب به شیوه کاهش مقاومت برشی، از روش Xu و همکاران، ۲۰۰۹ استفاده شده است. با استفاده از روش بیان شده، پژوهش‌های مشابهی نیز انجام گرفته است (Jun و همکاران، ۲۰۱۱ و Jian-Cong و Ning، ۲۰۱۲). در این تکنیک مشخصات c و ϕ خاک که در کاهش مقاومت مورد استفاده قرار می‌گیرند، تابع دما فرض می‌شوند؛ لذا یافتن ضریب اطمینان، به حل مسئله بارگذاری حرارتی متداول منجر می‌شود. گام‌های بارگذاری حرارتی نیز می‌توانند به طور خودکار تنظیم شوند تا به روند حل مسئله، شتاب دهند.

با تعریف خصوصیات خاک به صورت تابعی از دما در نرم‌افزارهای اجزاء محدود، هم زمان با کاستن از دما، مقاومت برشی نیز به تدریج کاهش می‌یابد. در این روش، ضریب انبساط حرارتی مصالح صفر فرض می‌شود؛ در نتیجه تغییرات دمایی هیچ تأثیری در تولید تنش و کرنش‌های حرارتی نخواهد داشت (Xu و همکاران، ۲۰۰۹). طبق رابطه (۱) و (۲) با تقسیم پارامترهای مقاومت برشی واقعی بر فاکتور آزمایشی F_{trial} ، پارامترهای مقاومت برشی مورد استفاده در تحلیل به دست می‌آیند.

$$c_{trial} = c / F_{trial} \quad (۱)$$

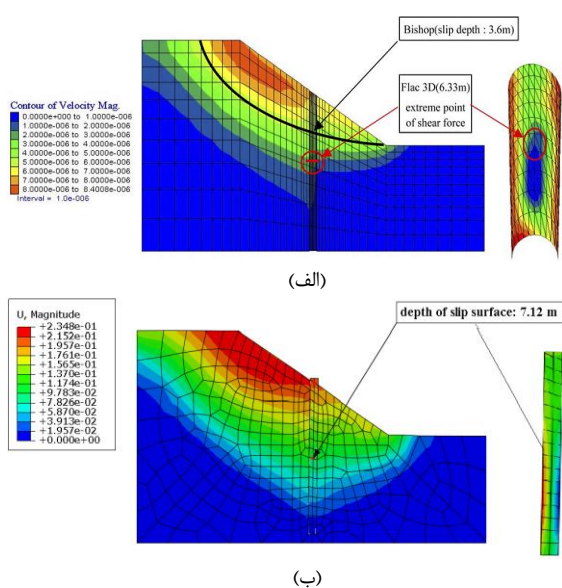
$$\phi_{trial} = \phi / F_{trial} \quad (۲)$$

در نرم‌افزارهای رایج اجزاء محدود خصوصیات مواد از طریق داده‌ها یا فایل ورودی به نرم‌افزار داده می‌شود. این اطلاعات پس از شروع تحلیل نمی‌توانند تغییر داده شوند؛ اما به کمک پارامترهای مستقلی مانند دما، به طور غیرمستقیم قابل تغییرند. در فایل ورودی ABAQUS می‌توان c و ϕ را صرفاً به صورت قراردادی، تابع دما تعریف کرد.

$$c_{trial} = (1 - 0.9\theta)c \quad (۳)$$

$$\phi_{trial} = \tan^{-1}[(1 - 0.9\theta)\tan\phi] \quad (۴)$$

با تغییر خطی دما در هر نقطه از صفر تا یک، مقادیر c_{trial} و ϕ_{trial} نیز قابل کنترل هستند. با توجه به این که فاکتور نسبت بار- که در مسائل شبه‌استاتیکی معنای گام زمانی دارد- نیز از صفر تا یک تغییر می‌کند، می‌توان نوشت:



شکل ۴- مقایسه شکل و عمق سطح گسیختگی در روش بیشاپ، نرم‌افزار FLAC و ABAQUS: الف) الف) سطح گسیختگی Won و همکاران (۲۰۰۵)، ب) سطح گسیختگی حاصل از ABAQUS

۲-۳- تشریح مدل

در این پژوهش، شیب انتخاب شده برای تثبیت با شمع‌های مارپیچ قبلاً توسط Cai و Ugai (۲۰۰۰)، Won و همکاران (۲۰۰۵) و Wei و Cheng (۲۰۰۹) مورد بررسی پایداری قرار گرفته است که برای تثبیت آن از شمع‌های فولادی معمولی استفاده نموده‌اند و در بخش (۲-۲) به آن اشاره شد. مشخصات مصالح خاکی و شمع در جدول (۳) آمده است. این مشخصات از اعداد ارائه شده در بررسی‌های محققان فوق اقتباس شده است. طول شیب ۱۵ متر و ارتفاع آن ۱۰ متر است. ضریب اطمینان این شیب در برابر گسیختگی در حالت غیرمسلح، ۱/۱۵ است.

جدول ۳- مشخصات مصالح خاکی و شمع

مقدار	مشخصات	مدل	مصالح
۲۰	وزن مخصوص (kN/m^3)		
۲۰	زاویه اصطکاک داخلی ()		
۱۰	چسبندگی (kPa)	مور- کولمب	خاک
۲۰۰	مدول الاستیسیته (MPa)		
۰/۲۵	نسبت پواسون		
۷۸/۵	وزن مخصوص (kN/m^3)		
۲۰۳	مدول الاستیسیته (GPa)	الاستیک خطی	شمع
۰/۳	نسبت پواسون		
۱۱/۵	قطر (cm)		
۰/۳	خاک- شمع	ضریب اصطکاک	سطح مشترک

(۲۰۰۰) ضریب اطمینان این شیب ۱/۱۳ است. همچنین Won و همکاران (۲۰۰۵) با روش بیشاپ و نیز نرم‌افزار FLAC ضریب اطمینان شیب را به ترتیب ۱/۱۳ و ۱/۱۵ محاسبه کرده‌اند. برای مقایسه بهتر، در جدول (۱) این نتایج آورده شده است. دیده می‌شود نتایج نرم‌افزار ABAQUS تا حد زیادی شبیه به نتایج دیگر است و اندک تفاوت ضرایب اطمینان به دلیل تأثیر الگوریتم تحلیل، معیار خاتمه تحلیل‌ها و همچنین اندازه مش‌بندی و غیره است. سپس این شیب مجدداً در حالت مسلح شده با شمع فولادی که مشخصات آن در جدول (۲) آمده است، مورد تحلیل پایداری قرار گرفت. ضرایب اطمینان به دست آمده برای این شیب در حالت مسلح با استفاده از نرم‌افزارهای FLAC و ABAQUS به ترتیب ۱/۵۵ و ۱/۵۰ است که مشابهت زیادی دارند. در اینجا نیز تفاوت اندک ضرایب اطمینان، به دلیل تفاوت نرم‌افزار مورد استفاده و اختلاف در پارامترهای هندسه مدل است.

در شکل (۴)، شکل و عمق سطح گسیختگی حاصل از روش بیشاپ و دو نرم‌افزار فوق‌الذکر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به طور کلی نتایج حاکی از آن است که نرم‌افزار ABAQUS قابلیت خوبی در تحلیل پایداری شیب‌های خاکی داشته و نتایج آن دقیق و قابل اعتماد است.

جدول ۱- ضرایب اطمینان شیب در مطالعات مختلف

مطالعه صورت گرفته	روش مورد استفاده	FS
Cheng و Wei (۲۰۰۹)	FLAC 3D	۱/۲۰
Cheng و Wei (۲۰۰۹)	اسپنسر	۱/۱۸
Ugai و Cai (۲۰۰۰)	FEM	۱/۱۳
Won و همکاران (۲۰۰۵)	FLAC	۱/۱۵
Won و همکاران (۲۰۰۵)	بیشاپ ساده شده	۱/۱۳
تحقیق حاضر	ABAQUS	۱/۱۵

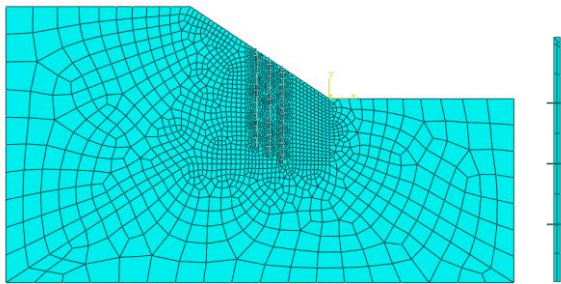
جدول ۲- مشخصات شمع فولادی مسلح کننده شیب در مطالعه

Won و همکاران (۲۰۰۵)

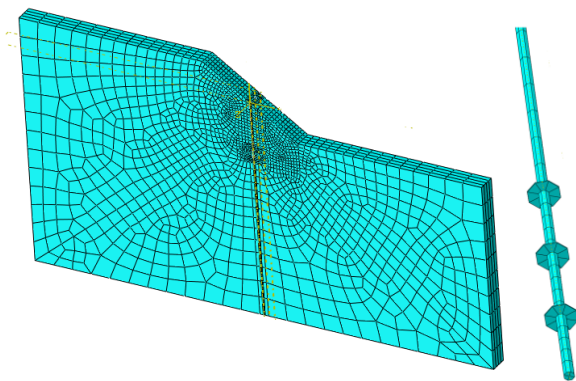
وزن مخصوص (kN/m^3)	۷۸/۵
مدول الاستیسیته (GPa)	۶۰ و ۲۰۰
نسبت پواسون	۰/۲
قطر شمع (m)	۰/۸

در مدل‌سازی‌های دوبعدی، برای خاک و شمع از المان‌های چهارضلعی چهار گره‌ای (CPE4) از نوع کرنش مسطح و در مدل‌های سه‌بعدی، از المان‌های شش‌وجهی هشت گره‌ای (C3D8) از نوع تنش سه‌بعدی استفاده شد. شکل‌های (۶) و (۷) به عنوان نمونه، شبکه‌بندی المان محدود شیب خاکی و شمع را در مدل‌های دو و سه‌بعدی نشان می‌دهند.

در تمامی مدل‌ها هر دو مرز قائم در طرفین شیب در راستای افقی مقید شده‌اند و مرز پایینی شیب، در دو جهت افقی و قائم اجازه جابه‌جایی ندارد.



شکل ۶- نمونه‌ای از شبکه‌بندی المان محدود شیب خاکی و شمع مارپیچ در مدل‌های دوبعدی



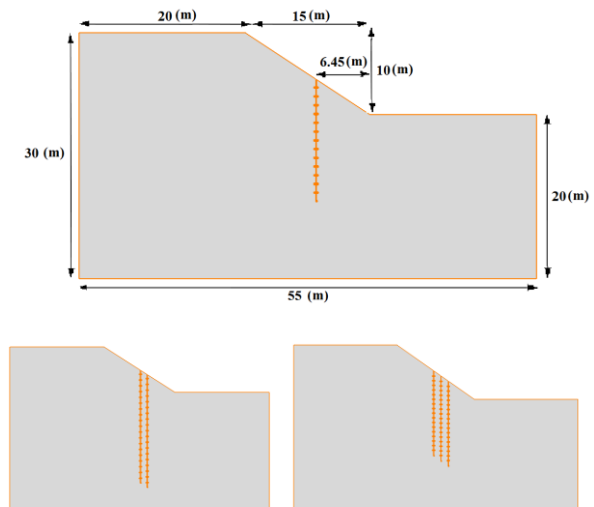
شکل ۷- نمونه‌ای از شبکه‌بندی المان محدود شیب خاکی و شمع مارپیچ در مدل‌های سه‌بعدی

۳- نتایج مطالعات عددی

۳-۱- بررسی‌های سه‌بعدی

به‌منظور بررسی میزان خطای حاصل از تحلیل مدل‌های سه‌بعدی به‌صورت دوبعدی، چندین تحلیل سه‌بعدی با استفاده از یک گروه شمع- شامل یک ردیف شمع در طول شیب و سه عدد شمع در بُعد سوم شیب- انجام گرفت. فاصله شمع‌ها در گروه شمع برابر $4D$ فرض شد. این شیب در حالت‌های مختلف، مورد تحلیل پایداری قرار گرفت و به‌ازای هر یک از حالات بررسی شده، نمونه

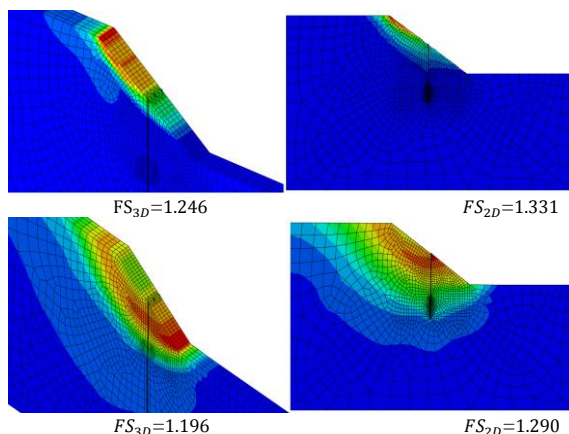
به‌منظور تثبیت شیب، شمع‌های مارپیچ در ۳ نوع چیدمان گروهی به‌صورت یک یا دو یا سه ردیف شمع در طول شیب قرار داده شدند. شکل (۵) هندسه شیب و نحوه قرارگیری شمع‌ها در طول شیب را نشان می‌دهد. در این مطالعه از ۹ نوع شمع مارپیچ با سه قطر پره و سه فاصله پره متفاوت استفاده شد. این مشخصات با توجه به معیارهای طراحی این شمع‌ها IGC-AC358 اقتباس شده‌اند. شفت شمع‌ها از نوع دایره توپر است. قطر پره‌ها در هر شمع ثابت در نظر گرفته شده است. فاصله پایین‌ترین پره تا نوک شمع در همه مدل‌ها ثابت و برابر یک متر فرض شده است. جدول (۴) مشخصات شمع‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. D ، قطر شمع در ناحیه دارای پره و به عبارتی، برابر قطر پره‌ها است. فاصله پره‌ها معمولاً به صورت ضریبی از قطر پره‌ها در نظر گرفته می‌شود. فاصله شمع‌ها در گروه شمع برابر $4D$ در نظر گرفته شد. در گروه شمع‌ها، شمع مرکزی کمی پایین‌تر از نقطه میانه شیب قرار داده شد. نصب شمع‌ها در این نقطه، بیشترین ضرایب اطمینان را برای شیب در برابر گسیختگی ایجاد می‌کند و به عبارتی بهینه‌ترین نقطه برای نصب شمع است (وفائی، ۱۳۹۳).



شکل ۵- هندسه شیب و نحوه قرارگیری شمع‌ها در طول آن

جدول ۴- مشخصات شمع‌های مارپیچ

۲۰/۳ cm	
۲۸ cm	قطر پره‌های مارپیچ
۳۵/۵ cm	
$2/4D$	
$3D$	فاصله پره‌ها از یکدیگر
$3/6D$	
۱/۲۵ cm	ضخامت پره‌های مارپیچ
۱۱/۵ cm	قطر شفت شمع



شکل ۸- مقایسه سطوح گسیختگی و ضرایب اطمینان حاصل از تحلیل‌های دوبعدی با تحلیل‌های سه‌بعدی

برای درک میزان کارایی شمع‌های مارپیچ نسبت به شمع‌های فولادی معمولی، سه نوع شمع ساده فولادی دایره‌ای که قطرهای آن‌ها برابر با قطر "پره"های شمع‌های مارپیچ مورد استفاده در این پژوهش است، مورد بررسی قرار گرفتند و با چیدمان‌های یک، دو و سه ردیف شمع در طول شیب قرار داده شدند. نتایج حاصل از تحلیل شمع‌های فولادی معمول با عبارت مخفف SP به طور هم‌زمان در کنار نتایج شمع‌های مارپیچ نمایش داده شده‌اند.

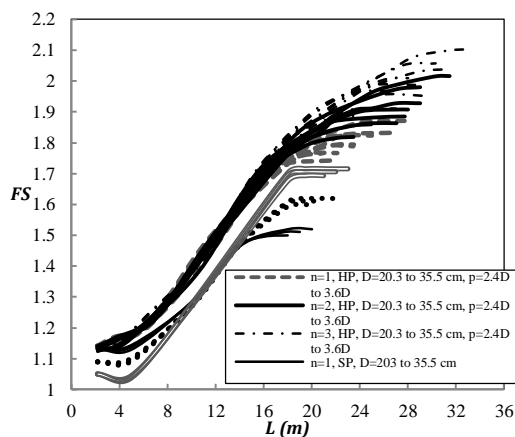
نتایج تحلیل‌ها به‌ازای هر کدام از یک، دو و سه ردیف شمع مارپیچ و معمولی در نمودارهای شکل‌های (۹) تا (۱۱) ترسیم شده است (در راهنمای نمودارها عدد اول و دوم به ترتیب نشان‌دهنده قطر و فاصله پره‌های مارپیچ است). این نمودارها خلاصه‌ای از حدود ۳۵۰ تحلیل نرم‌افزاری انجام گرفته برای هندسه‌ها (قطر و فواصل پره‌ها و طول شمع) و چیدمان‌های مختلف (آرایش یک، دو و سه ردیفه) شمع‌ها است. به‌منظور مقایسه بهتر، شکل‌های (۹) تا (۱۱)، در نمودار شکل (۱۲) خلاصه گردیده است. در شکل (۱۲) نمودارهایی که مربوط به شمع‌های دارای قطر و فاصله پره‌های بیشتر هستند، در بالاتر قرار دارند که برای اجتناب از شلوغی شکل‌ها، هم‌شکل ترسیم شده‌اند. در این نمودار عبارت مخفف HP نشان‌دهنده شمع‌های مارپیچ است.

براساس شکل‌های (۹) تا (۱۲)، استفاده از شمع‌های مارپیچ ضرایب اطمینان قابل قبولی در برابر گسیختگی ایجاد می‌نماید.

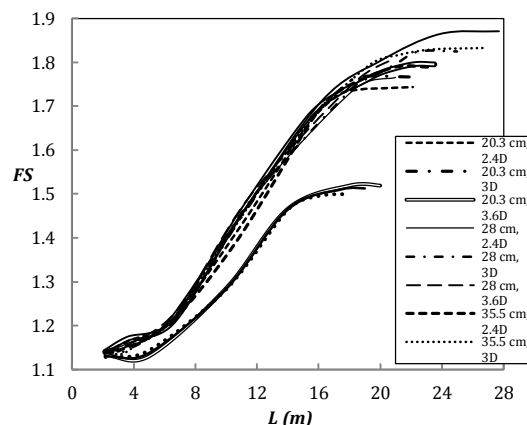
مشابه آن نیز به صورت دوبعدی مورد تحلیل قرار گرفت. سپس ضرایب اطمینان و نیز سطوح گسیختگی هر دو تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی با یکدیگر مقایسه شد. به عنوان نمونه، نتایج دو مورد از این بررسی‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است. در مقایسه تحلیل‌های انجام گرفته، شباهت زیادی بین سطوح لغزش حاصل از تحلیل‌های دوبعدی با تحلیل‌های سه‌بعدی از نظر عمق و نحوه شکل‌گیری سطوح لغزش، الگوی گسترش تنش‌ها و غیره مشاهده گردید. همچنین ملاحظه شد در خاکریز مورد تحلیل، ضرایب اطمینان به دست آمده از مدل‌های دوبعدی، اندکی بیش از مقادیر متناظر در حالت‌های سه‌بعدی هستند. این مسئله به دلیل ایجاد دیوار شمع به جای شمع مارپیچ دایره‌ای در تحلیل مسائل به‌روشن کرنش مسطح است که باعث افزایش ضرایب اطمینان می‌گردد. در عین حال، اختلاف ضرایب اطمینان تحلیل‌های دو و سه‌بعدی نسبتاً کم و در حد ۸٪ و حتی کمتر بود و تغییرات زیادی را به ازای حالات متفاوت تحلیل تجربه نکرد. لذا همان‌گونه که تحلیل سایر شمع‌های رایج به‌صورت دوبعدی، امری پذیرفته شده و متداول است، تحلیل شمع‌های مارپیچ مورد استفاده در تثبیت شیب‌ها، به صورت دوبعدی نیز دور از واقعیت نبوده و ضمن اجتناب از زمان و حافظه مصرفی قابل ملاحظه، خطای زیادی در نتایج نرم‌افزاری ایجاد نمی‌نماید. از آنجا که هدف از تحلیل‌های آتی، صرفاً مقایسه تأثیر پارامترهای مختلف شمع روی پایداری شیب است، سایر تحلیل‌ها به صورت دوبعدی مورد مطالعه قرار گرفتند.

۳-۲- تحلیل‌های پارامتریک

با در نظر گرفتن انواع حالات مفروض برای شمع‌های مارپیچ، تدریجاً با افزایش طول شمع (L) در گام‌های ۲ تا ۴ متری (بسته به هندسه شمع)، ضرایب اطمینان شیب در برابر گسیختگی محاسبه گردید. این روند تا رسیدن طول شمع به مقدار ثابتی به نام "طول بحرانی" ادامه پیدا کرد. طول بحرانی، به طولی از شمع اطلاق می‌شود که ضریب اطمینان شیب به‌ازای آن، حداکثر مقدار خود را دارد و پس از آن، افزایش بیشتر در طول شمع، تأثیری در افزایش ضریب اطمینان شیب نخواهد داشت. در مواردی که با رسیدن طول شمع به نزدیکی مرز پایینی مدل، هنوز روند ثابت برای FS به دست نیامده بود، عمق مدل نیز افزوده می‌شد. کمترین طول انتخابی برای شمع، تقریباً برابر با عمق سطح گسیختگی در میانه شیب در حالت غیرمسلح و حدود ۳ متر بود.



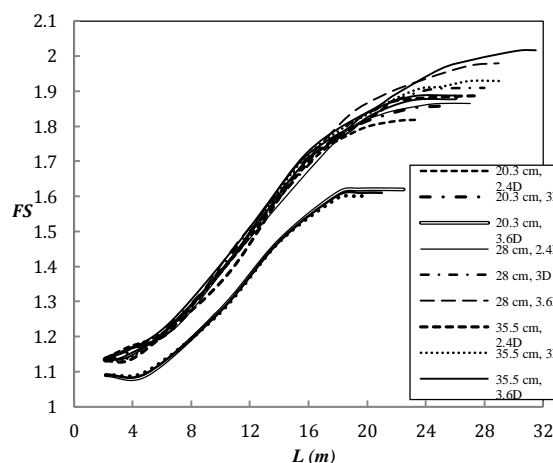
شکل ۱۲- رابطه ضریب اطمینان شیب با طول یک، دو و سه ردیف شمع ماریج



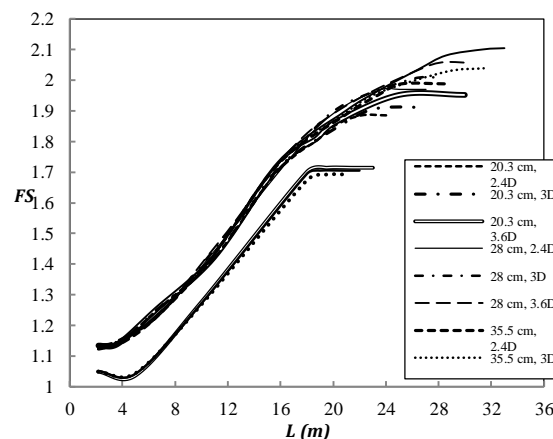
شکل ۹- رابطه ضریب اطمینان شیب با طول یک ردیف شمع ماریج

در تمامی حالات، استفاده از شمعی‌های ماریج ضرایب اطمینان بیشتری را نسبت به شمعی‌های معمولی هم‌قطر و حتی قطورتر از پره‌های خود، و نیز هم‌طول یا حتی بلندتر از طول خود، ایجاد می‌نمایند؛ این در حالی است که مواد خام مصرفی برای ساخت شمع ماریج، بسیار کمتر از شمع فولادی نظیر بوده و از نظر اقتصادی، مقرون به‌صرفه‌تر خواهد بود. با مطالعه هم‌زمان تصاویر ۹ تا ۱۲ و دقت در حالات متناظر بر روی نمودارها، می‌توان مثال‌های متعددی را برای این مطلب ذکر نمود. به عنوان نمونه، به‌منظور ایجاد ضریب اطمینان ۱/۵، می‌توان از یک ردیف "شمع ماریج" با قطر پره‌های ۲۸ cm و فواصل پره $3/6 D$ (۱ m) (دارای ۱۰ پره) و طول ۱۱/۵ m و یا یک ردیف "شمع معمولی" با قطر ۳۵/۵ cm و طول ۱۵ m استفاده نمود. در این بین انتخاب حالت اول (شمع ماریج) مناسب‌تر است و ۵۰ درصد مصرف مواد اولیه کمتری را در پی خواهد داشت. مثال دیگر در این خصوص، استفاده از یک ردیف "شمع ماریج" با قطر پره ۲۰/۳ cm و فواصل پره‌های $2/4 D$ (۴۸ cm) (دارای ۳۲ پره) و طول ۱۷ m و یا سه ردیف "شمع معمولی" با قطر ۲۸ cm و طول ۱۸ m است که هر دو ضریب اطمینان شیب در برابر گسیختگی را به ۱/۷ می‌رسانند، اما انتخاب حالت اول به میزان ۶۳ درصد فولاد کمتری نیاز داشته و نسبت به شمعی معمولی بهینه‌تر است که درصد قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. مقادیر صرفه اقتصادی استفاده از شمعی‌های ماریج نسبت به شمعی معمولی، با توجه به نوع مقایسه‌ها متفاوت بوده و مقدار ثابتی ندارد؛ لذا لازم است طراح با توجه به پروژه بهترین حالت را برگزیند.

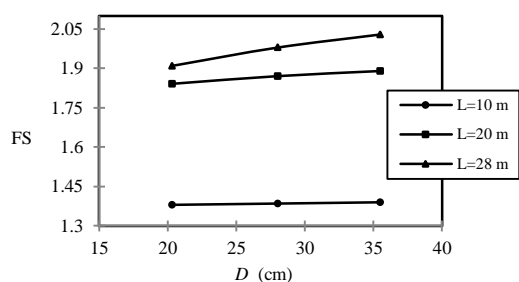
همان‌طور که در شکل‌های (۹) تا (۱۲) دیده می‌شود، منحنی‌های مربوط به شمعی‌های دارای پره‌های با قطر بزرگ‌تر و فواصل پره‌های بیشتر، بالاتر از سایر منحنی‌ها قرار گرفته‌اند. همچنین دیده می‌شود که در طول‌های کمتر (که برای شمعی و



شکل ۱۰- رابطه ضریب اطمینان شیب با طول دو ردیف شمع ماریج

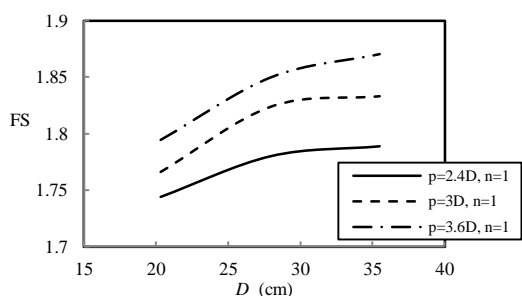


شکل ۱۱- رابطه ضریب اطمینان شیب با طول سه ردیف شمع ماریج

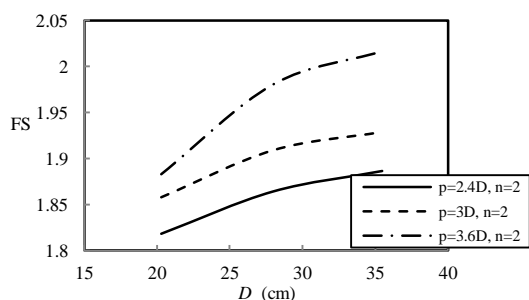


شکل ۱۳- تأثیر طول شمع بر رابطه ضریب اطمینان با قطر پره در حالت $n=3$ و $p=3.6D$

با دقت در شکل‌های (۹) تا (۱۲) دیده می‌شود که نمودارهای مربوط به شمع‌هایی که قطر پره‌های کمتری دارند، سریع‌تر به روند ثابت و افقی می‌رسند. به عبارت دیگر طول بحرانی شمع‌های دارای پره‌های با قطر کمتر، مقدار کمتری دارد. جهت مقایسه بهتر و تعیین میزان تأثیر قطر پره‌ها بر نحوه رفتار شمع مارپیچ در پایداری شیب خاکی، نمودارهای ضریب اطمینان شیب برحسب قطر پره‌ها (D) به‌ازای طول ثابتی از شمع ($L=29m$) ترسیم گردیده‌اند. این نمودارها در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نمایش داده شده‌اند. در تحلیل‌های مربوط به هر یک از این نمودارها، مقادیر تعداد ردیف شمع و فاصله پره‌ها و نیز طول شمع، ثابت در نظر گرفته شده و تنها تأثیر پارامتر قطر پره (D) بررسی شده است.



شکل ۱۴- رابطه ضریب اطمینان شیب با قطر پره در حالت $n=1$



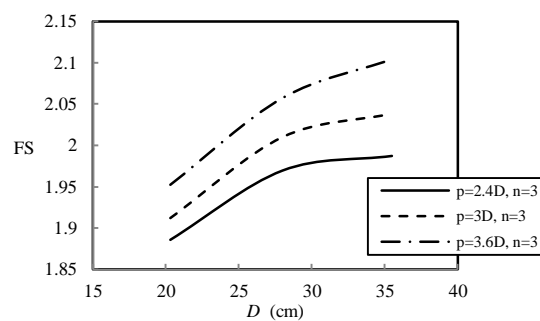
شکل ۱۵- رابطه ضریب اطمینان شیب با قطر پره در حالت $n=2$

شیب خاص مورد مطالعه در این پژوهش حدود ۱۶ متر است)، پارامترهای قطر و فاصله پره‌های و نیز تعداد ردیف شمع‌ها در طول شیب، نقش به‌سزایی در تغییرات ضریب اطمینان ندارند، بلکه این تغییرات در طول‌های بیشتر و در نزدیکی طول بحرانی شمع، واضح و قابل ملاحظه‌تر می‌گردد. مقایسه این نمودارها، نتیجه حائز اهمیتی برای کمک به طراحان شمع در پی دارد و آن این است که اگر در پروژه‌ای، افزایش ضریب اطمینان شیب تا مقدار خاصی مد نظر باشد، گاهی از لحاظ اقتصادی استفاده از شمع مارپیچ با قطر پره‌های کوچک‌تر و فاصله پره‌های بیشتر، اما دارای طول کمی بلندتر می‌تواند نسبت به استفاده از شمع مارپیچ دیگری با قطر پره‌های بیشتر و با فاصله پره‌های کم‌تر ولی طول کوتاه‌تر، مناسب‌تر بوده و با مصرف مواد اولیه کمتر، هزینه‌های پروژه را کاهش دهد. به عنوان مثال همان‌گونه که در شکل (۱۱) دیده می‌شود، می‌توان با بهره‌گیری از سه ردیف شمع مارپیچ با قطر پره‌های $35/5cm$ و فواصل پره $2/4D$ (دارای ۲۶ پره) و طول $24m$ و یا سه ردیف شمع مارپیچ با قطر پره‌های $20/3cm$ و فواصل پره $3/6D$ ($73cm$) (دارای ۳۲ پره) و طول $25/5m$ ، ضریب اطمینان شیب در برابر گسیختگی را به $1/95$ رسانید. در این بین انتخاب حالت دوم بهینه‌تر خواهد بود و به میزان ۶۳ درصد در مصرف مواد خام اولیه صرفه‌جویی می‌شود. مثال دیگری که در شکل (۱۲) دیده می‌شود، آن است که ضریب اطمینان $1/8$ می‌تواند با چندین حالت برای شیب به‌دست آید؛ به‌عنوان مثال، یک حالت استفاده از یک ردیف شمع ۱۵ پره‌ای با قطر پره‌های $35/5cm$ و حالت دیگر، استفاده از دو ردیف شمع ۳۸ پره‌ای با قطر پره‌های $20/3cm$ است. در اینجا نیز حالت اول مناسب‌تر بوده و به میزان ۲۶ درصد کاهش مصرف فولاد را در پی دارد. با توجه به مثال‌های مذکور، این قضیه جدی به‌نظر می‌رسد که در طراحی‌های مهندسان، بایستی لزوماً حالات مختلفی از چیدمان و هندسه شمع تحلیل شده و نهایتاً مقرون به صرفه‌ترین حالت ممکن انتخاب گردد.

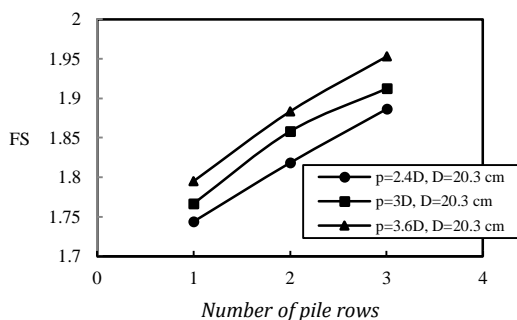
۳-۳- تأثیر قطر پره‌های شمع مارپیچ

در نمودارهای بخش ۳-۲، دسته منحنی‌هایی که دارای فواصل پره (p) و تعداد ردیف شمع (n) یکسان بوده و تنها پارامتر قطر پره‌ها (D) در آن‌ها متفاوت بود، به‌طور مجزا مورد بررسی قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شدند. طبق این مقایسه‌ها، با افزایش قطر پره‌های شمع‌های مارپیچ، به دلیل درگیری حجم بیشتری از خاک اطراف شمع در برابر بارهای وارده، ضریب اطمینان شیب در برابر گسیختگی افزایش می‌یابد. این اثر افزایشی در نزدیکی طول بحرانی شمع مشهودتر است. این مسئله در شکل (۱۳) که به‌عنوان نمونه برای حالت سه ردیف شمع با فواصل پره $3/6D$ ترسیم شده است، بهتر دیده می‌شود.

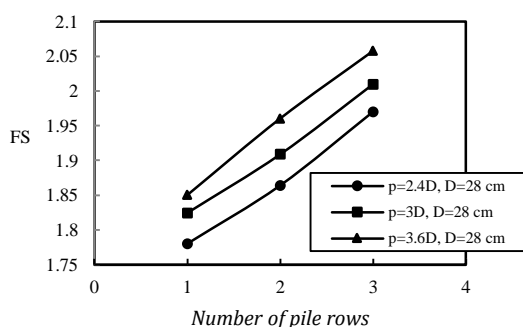
شمع‌ها در گروه، به دلیل درگیری حجم بیشتری از خاک اطراف در برابر بارهای وارده، ضریب اطمینان شیب افزایش می‌یابد. برای تعیین دقیق‌تر میزان تأثیر تعداد ردیف شمع‌ها در پایداری شیب خاکی، نمودارهای ضریب اطمینان شیب برحسب تعداد ردیف شمع (n) برای حالات ۹ گانه شمع در شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) ترسیم شده‌اند. در هر کدام از این شکل‌ها طول شمع یکسان و ثابت در نظر گرفته شده است تا مقایسه امکان‌پذیر گردد.



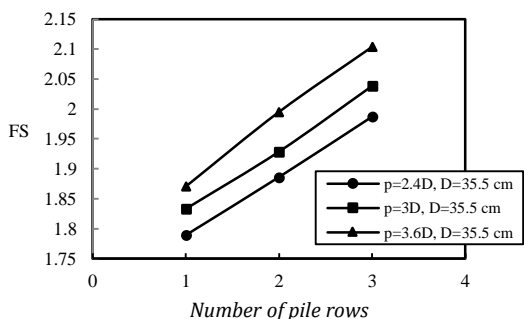
شکل ۱۶- رابطه ضریب اطمینان شیب با قطر پره در حالت $n=3$



شکل ۱۷- رابطه ضریب اطمینان شیب با تعداد ردیف شمع مارپیچ برای حالت $D=20.3\text{ cm}$



شکل ۱۸- رابطه ضریب اطمینان شیب با تعداد ردیف شمع مارپیچ برای حالت $D=28\text{ cm}$



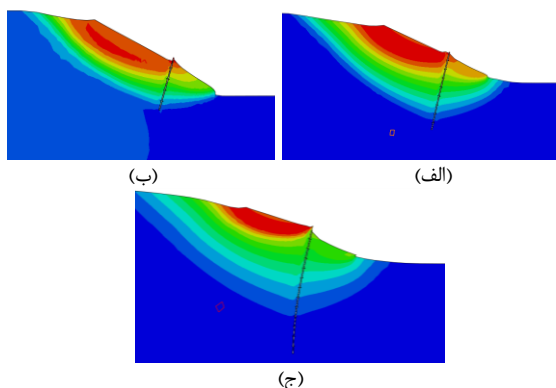
شکل ۱۹- رابطه ضریب اطمینان شیب با تعداد ردیف شمع مارپیچ برای حالت $D=35.5\text{ cm}$

شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) نشان می‌دهند که روند افزایش ضریب اطمینان شیب در برابر گسیختگی با افزایش قطر پره‌ها، همواره از الگوی ثابتی پیروی نمی‌کند. شیب نمودار در ابتدا زیاد است؛ اما به تدریج از آن کاسته می‌شود و شتاب تغییرات ضریب اطمینان کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر، به نظر می‌رسد نمودارها به سمت افقی شدن پیش می‌روند. این بدان معناست که پس از رسیدن مقدار قطر پره به یک حد مشخص، افزایش بیشتر قطر، کمکی به افزایش ضریب اطمینان شیب نخواهد کرد. دلیل این قضیه آن است که پره‌های مورد استفاده در این نوع شمع‌ها از ضخامت زیادی برخوردار نیستند و هرچه مساحت ورق پره افزایش یابد، احتمال کمانش به مقدار قابل ملاحظه‌ای زیاد شده و پره خم می‌گردد و به این ترتیب نقش باربری خود را از دست می‌دهد.

در شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) روند نمودارها برای فاصله پره‌های متفاوت یکسان نیست؛ به طوری که برای فاصله پره‌های کمتر، روند کاهش شیب سریع‌تر اتفاق می‌افتد. دلیل این مسئله آن است که اگر فاصله بین پره‌ها کم باشد، حجم خاک محصور بین دو پره متوالی نیز به نسبت کمتر است. حال اگر پره بخواند به دلیل مساحت زیادش خم گردد، این میزان خاک قادر به تأمین نیروی مقاوم کافی برای جلوگیری از کمانش پره نبوده و سریعاً خم می‌شود. لذا در طراحی‌ها به این نکته توجه شود که اگر استفاده از پره‌های با قطر زیاد در پروژه‌های مدنظر است، بهتر است فاصله پره‌های شمع نیز به نسبت افزایش داده شود.

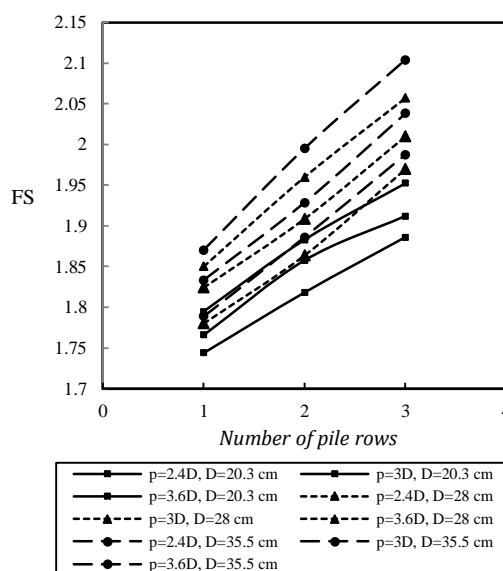
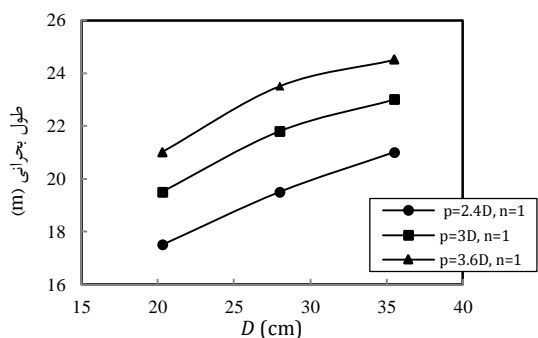
۳-۴- بررسی تأثیر تعداد ردیف شمع‌های مارپیچ

به منظور بررسی تأثیر تعداد ردیف شمع‌های مارپیچ بر ضریب اطمینان شیب در برابر گسیختگی، در نمودارهای شکل‌های (۹) تا (۱۲)، دسته منحنی‌هایی که در آنها پارامترهای قطر و فاصله پره‌ها یکسان بوه و تنها پارامتر تعداد ردیف شمع آن‌ها متفاوت بود، بررسی و با یکدیگر مقایسه شدند. طبق این بررسی‌ها، با افزایش تعداد ردیف شمع‌های مارپیچ و یا به عبارتی افزایش تعداد



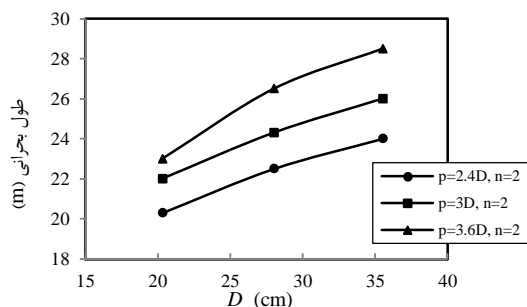
طبق این شکل‌ها، برای قطر ثابتی از پره، روند افزایش ضریب اطمینان شیب با افزایش تعداد ردیف شمع‌ها به‌ازای هر فاصله پره، از شیب ثابتی برخوردار است. هر سه شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) به‌طور هم‌زمان در شکل (۲۰) رسم شده‌اند. طبق این شکل دیده می‌شود که نمودارهای مربوط به شمع‌های دارای پره‌های با قطر بیشتر، شیب بیشتری نسبت به سایرین دارند. به عبارت دیگر، اثر استفاده از گروه شمع در افزایش ضریب اطمینان شیب، وقتی بارزتر می‌گردد که قطر پره‌ها بیشتر باشد.

شکل ۲۱- تأثیر طول گیرداری شمع در نحوه شکل‌گیری سطح لغزش و مقدار ضریب اطمینان در لحظه گسیختگی:
 (الف) $L=6\text{ m}$, $FS=1.20$ (ب) $L=11\text{ m}$, $FS=1.46$
 (ج) $L=16\text{ m}$, $FS=1.71$

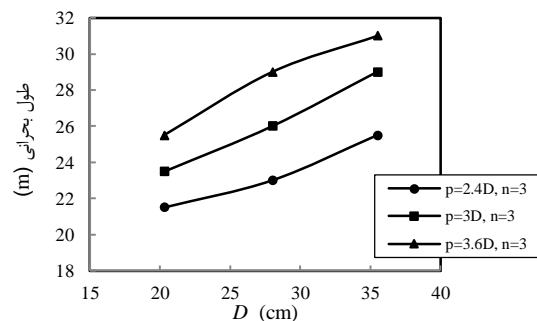


شکل ۲۲- رابطه طول بحرانی با قطر پره‌ها برای حالت $n=1$

شکل ۲۰- رابطه ضریب اطمینان شیب و تعداد ردیف شمع مارپیچ



شکل ۲۳- رابطه طول بحرانی با قطر پره‌ها برای حالت $n=2$



شکل ۲۴- رابطه طول بحرانی با قطر پره‌ها برای حالت $n=3$

۳-۵- بررسی تأثیر طول شمع‌های مارپیچ

همان‌طور که در شکل‌های (۹) تا (۱۲) دیده می‌شود، با افزایش طول شمع، به دلیل افزایش طول گیرداری شمع در خاک منطقه مقاوم شیب، ضریب اطمینان شیب در برابر گسیختگی افزایش می‌یابد. روند افزایش ضریب اطمینان، با رسیدن طول شمع به طول بحرانی متوقف می‌شود و پس از آن افزایش طول، کمکی به افزایش ضریب اطمینان نمی‌کند. با افزایش طول گیرداری، امکان حرکت شمع در برابر نیروهای محرک خاک کمتر می‌گردد. همچنین عمق سطح لغزش نیز کاهش می‌یابد. این مسئله در شکل (۲۱) نمایش داده شده است. در این شکل، برای شمعی با هندسه یکسان اما با طول‌های متفاوت، جابه‌جایی شمع و سطح شیب در لحظه گسیختگی نمایش داده شده است. در شکل (۲۱) ملاحظه می‌شود که اگر طول شمع کوتاه باشد، سطح لغزش از زیر شمع عبور می‌کند و آن را با خود حرکت می‌دهد؛ اما با افزایش طول شمع، از جابه‌جایی‌های افقی شمع و خاک کاسته شده و عمق سطح گسیختگی نیز کمتر می‌شود.

هرچه تعداد ردیف شمع‌ها بیشتر می‌شود، مقدار طول بحرانی نیز افزایش می‌یابد. این افزایش به صورتی است که برای فاصله پره‌های یکسان، با استفاده از دو ردیف شمع به جای یک ردیف، طول بحرانی به مقدار زیادی افزایش می‌یابد؛ اما اگر دو ردیف شمع به سه ردیف تبدیل شود، میزان افزایش طول بحرانی به اندازه قبل نخواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

۱- استفاده از شمع مارپیچ در مقایسه با شمع معمولی، روش مناسب و مؤثری برای تثبیت شیب خاکی است و از نظر میزان مواد خام اولیه، از صرفه اقتصادی زیادی برخوردار است.

۲- با استفاده از نتایج تحلیل‌های پارامتریک، می‌توان در طراحی‌ها، بهترین حالت را برای هندسه و چیدمان شمع‌ها، به‌منظور کاهش هزینه‌های پروژه‌ی تثبیت شیب با شمع مارپیچ انتخاب نمود.

۳- برای طول‌های کم شمع، پارامترهای قطر و فاصله پره‌های شمع‌های مارپیچ و نیز تعداد ردیف شمع‌ها، تأثیر به‌سزایی در تغییرات ضریب اطمینان شیب خاکی مورد مطالعه ندارند، بلکه این تأثیر در طول‌های بیشتر شمع و در نزدیکی طول بحرانی بارزتر می‌گردد.

۴- با افزایش طول شمع ضریب اطمینان شیب در برابر گسیختگی افزایش می‌یابد؛ اما بعد از طول بحرانی، این روند متوقف می‌شود. همچنین با افزایش طول، عمق سطح لغزش کاهش می‌یابد.

۵- افزایش قطر پره‌های شمع‌های مارپیچ، باعث افزایش ضریب اطمینان شیب در برابر گسیختگی می‌شود. سرعت این افزایش در ابتدا زیاد است؛ ولی به تدریج به علت افزایش احتمال کماتش پره‌ها از سرعت آن کاسته می‌شود.

۶- تعداد ردیف شمع‌های مارپیچ با ضریب اطمینان شیب رابطه مستقیم دارد. این مسئله برای شمع‌های دارای پره‌های با قطر بیشتر، بارزتر است.

۷- افزایش قطر پره‌ها و افزایش فواصل آن‌ها از یکدیگر و نیز افزایش تعداد ردیف شمع‌ها در گروه، باعث افزایش طول بحرانی شمع می‌گردد.

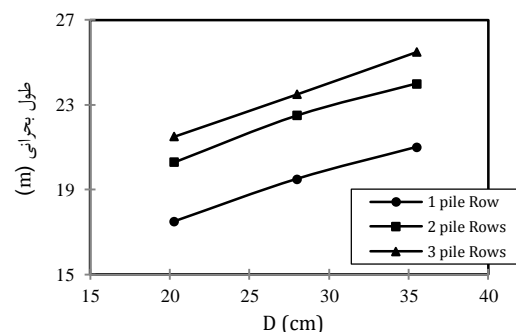
۵- مراجع

گروه مهندسی آریا آراد بتیس، "محصولات دانش‌بنیان، شمع مارپیچ"، www.arpaarad.ir، ۱۰ آبان، ۱۳۹۶.
وفائی ن، "مدل‌سازی عددی عملکرد شمع‌های پیچوار در پایدارسازی شیروانی‌ها"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، ۱۳۹۳.

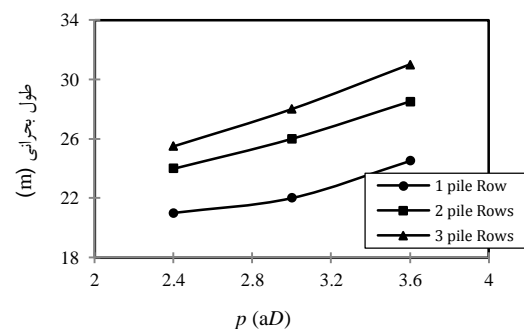
ABAQUS Inc., ABAQUS/Standard User's Manual, Version

در هر یک از حالات ۲۷گانه شمع (سه قطر پره، سه فاصله پره و سه تعداد ردیف شمع)، مقادیر طول بحرانی شمع از نمودارهای اصلی به دست آمده است. شکل‌های (۲۲) تا (۲۵) تغییرات میزان طول بحرانی شمع را به‌ازای این حالت‌ها نمایش می‌دهد. طبق این نمودارها افزایش قطر پره و افزایش فواصل آن‌ها از یکدیگر باعث افزایش طول بحرانی شمع می‌شود. به عبارت دیگر برای قطر خاصی از پره، هرچه فواصل بین پره‌ها زیادتر می‌شود، طول بحرانی شمع افزایش می‌یابد. همچنین برای میزان فاصله پره‌های یکسان، افزایش قطر پره باعث افزایش طول بحرانی خواهد شد.

برای مقایسه بهتر، به عنوان نمونه، روند تغییرات طول بحرانی یک، دو و سه ردیف شمع با تغییر قطر پره‌ها برای شمع‌های با فواصل پره‌های ۲/۴D در شکل ۲۵ و نمودار تغییرات طول بحرانی یک، دو و سه ردیف شمع مارپیچ با تغییر فواصل پره‌ها، برای شمع‌های با قطر ۳۵/۵cm در شکل (۲۶) رسم شده است. در شکل‌های (۲۵) و (۲۶) برای هر سه مقدار ردیف شمع، روند نمودارها تقریباً مشابه است. یعنی نقش افزایش قطر و فاصله پره‌ها در افزایش طول بحرانی به‌ازای تعداد ردیف شمع‌ها فرقی نمی‌کند و روند افزایشی آن تقریباً شیب ثابتی دارد.



شکل ۲۵- رابطه طول بحرانی با قطر پره‌ها برای تعداد ردیف شمع‌های مختلف در حالت $p=2.4D$



شکل ۲۶- رابطه طول بحرانی با فاصله پره‌ها برای تعداد ردیف شمع‌های مختلف در حالت $D=35.5 \text{ cm}$

- Slope Reinforced with One Row of Piles", *Computers and Geotechnics*, 2009, 36 (7), 1176-1185.
- Won J, You K, Jeong S, Kim S, "Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems", *Computers and Geotechnics*, 2005, 32 (4), 304-315.
- Xu Q, Yin H, Cao X, Li Z, "A temperature-driven strength reduction method for slope stability analysis", *Mechanics Research Communications*, 2009, 36, 224-231.
- 6.13.1, 2013.
- Avalon Structural Inc., "helical piles", www.avalonstructural.com/DeepFoundations.html, 12 October, 2017.
- Cai F, Ugai K, "Numerical Analysis of the Stability of Slope Reinforced with Piles", *Soils and Foundations*, 2000, 40 (1), 73-84.
- EBS Geosturctural Inc., "Emergency Structure and Slope Stabilization", www.ebsgeo.com/project-gallery, 1 November, 2017.
- El Sharnouby MM, El Naggar MH, "Field Investigation of Axial Monotonic and Cyclic Performance of Reinforced Helical Pulldown Micropiles", *Canadian Geotechnique Journal*, 2012, 49, 560-573.
- ICC-Evaluation Services, "AC308 Acceptance Criteria for Helical Pile Foundations and Devices", www.icces.org, 2007.
- Jun O, Qian-jun X, Ke-bin S, Xin-jun Y, Jing-wei G, "Temperature-driven parameter reduction finite element method for slope stability analysis of earth-rockfill dam", *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32 (8), 2549-2554.
- Lutenegger AJ, "Historical Development of Iron Screw-Pile Foundations", *International Journal for the History of Engineering & Technology*, 2011, 81 (1), 108-128.
- Lutenegger A, Seider G, "Helical screw pile", US Patent 9,115, 478, 2015.
- Monata Helical Piers, "Residential Projects, Landslide Repair, Slope Stabilization, Erosion Control", www.montanahelical.com/residential-projects-landslide-repair-erosion-control, 25 October, 2017.
- Nazir R, Chuan HS, Niroumand H, Kassim KA, "Performance of single vertical helical anchor embedded in dry sand", *Measurement*, 2014, 49, 42-51.
- Ning L, Jian-Cong X, "Strength reduction FEM for slope stability analysis based on field variable", *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(1), 314-318.
- Perko HA, "Underpinning and Shoring for Underground MRI Research Facility at Ohio University", *Proceedings of Underground Construction in Urban Environments, Specialty Seminar by ASCE Metropolitan Section Geotechnical Group at the Geo-Institute of ASCE, New York*, 2005.
- Perko HA, "Helical Piles-A Practical Guide to Design and Installation", John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2009.
- Ponomarenko Y, Baranov NB, "Peculiarities of regulatory documents for design of Foundations formed from helical anchors and piles", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2013, 50 (1).
- Saftner D, Carranza-Torres C, Nelson M, "Slope Stabilization and Repair Solutions for Local Government Engineers", Department of Civil Engineering, University of Minnesota Duluth, 2017.
- Sakr M, "Installation and performance characteristics of high capacity helical piles in cohesionless soils", *Deep Foundation*, 2011, 5 (1), 39-57.
- Sakr M, "Performance of helical piles in oil sand", *Canadian Geotechnique Journal*, 2009, 46 (9), 1046-1061.
- Wei WB, Cheng YM, "Strength Reduction Analysis for

EXTENDED ABSTRACT

Numerical Investigation of Helical Piles Performance in Stabilization of Earth Slopes

Masoud Makarchian *, Nafise Vafaea

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Received: 17 April 2016; Accepted: 22 September 2018

Keywords:

Helical piles, Slope stabilization, Finite element Method, Pile's geometry, Sandy Slope.

1. Introduction

One of the major concerns of geotechnical engineering is to stabilize earth slopes and propose new methods for this purpose. The application of numerical and analytical methods for slope stabilization using piles is a conventional method discussed by various researchers. Nowadays the application of a special type of piles so called "helical pile", have been increased. This foundation system has been successfully employed at several sites. Helical piles may be a cost-effective alternative to conventional pile materials. In this research, the performance of helical piles in slope stabilization has been studied using finite element analysis and strength reduction method by ABAQUS V.6.13.1. The effect of different parameters such as helical pile diameters, helical plate spaces, and pile lengths have been investigated. The effect of 1, 2 and 3 rows of piles along the slope is studied as well.

2. Methodology

In this research, the FEM-based software package, ABAQUS V.6.13.1, was used for the numerical modeling and analysis. A new technique proposed by Xu et al., (2009) in strength reduction associated with the finite element method for slope stability analysis has been used. Cohesions and internal friction angles of soil are assigned as functions of temperature and used in strength reduction by changing nodal temperatures, so that the process of finding a factor of safety is transferred to the solution of a conventional thermal loading problem.

The slope already investigated by Cai and Ugai (2000), Won et al. (2005), and Wei and Cheng (2009) is reinforced this time with several types of helical piles with different geometries. Helical plate diameters of piles are 20.3, 28 and 35.5 cm and helical plate spaces are 2.4D, 3D and 3.6D, where D is plate diameter. These helical piles are arranged in 1, 2 and 3 rows nearby the middle of the slope. The length of piles is increased gradually, and the safety factor of the slope has been calculated for each cases and compared with each other.

3. Results and discussion

In order to compare the performance of helical piles with common steel piles, 3 different circular steel pile are investigated and displayed with "SP". The results of the analysis for each one, two, and three rows of helical and conventional piles are shown in Fig. 1. This figure explains that the use of helical piles provides acceptable safety factors against slope failure. In all cases, helical piles create more factor of safety (FS) than conventional piles which have equal or even less diameters than their helical plate diameters, and also equal or shorter than their length, while the raw materials used to make helical piles is less than steel conventional piles. It shows that helical piles are economically more affordable.

* Corresponding Author

E-mail addresses: makarchian@yahoo.com (Masoud Makarchian), nf1vafa@yahoo.com (Nafise Vafaea).

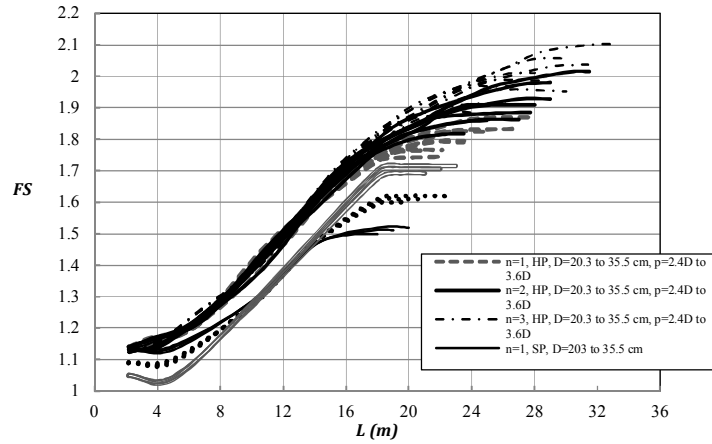


Fig. 1. Relation of the safety factor of the slope with piles length

Fig. 2 shows the relationship between the safety factor of the slope and the number of helical pile rows. It shows that with increasing number of rows in the group, FS increases because of increasing the volume of helix surrounding soil against loadings. Also, the effect of using a pile group on increasing FS is more significant when the diameter of the helix is greater.

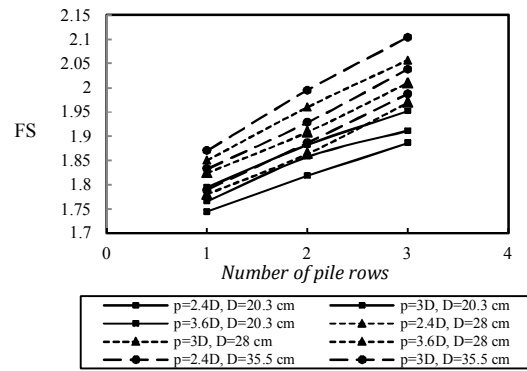


Fig. 2. Relation of the safety factor of the slope with a number of pile rows

Fig. 3 shows the critical length of helical piles compared with helix diameters for a different number of pile rows. According to these diagrams, increasing the diameter of the helix and increasing their distances from each other increases the critical pile length. In other words, for the particular helix diameter, the longer the helix spacing makes the longer critical length. Also, for the same distance between the helix, the helix diameter increase will increase the critical length.

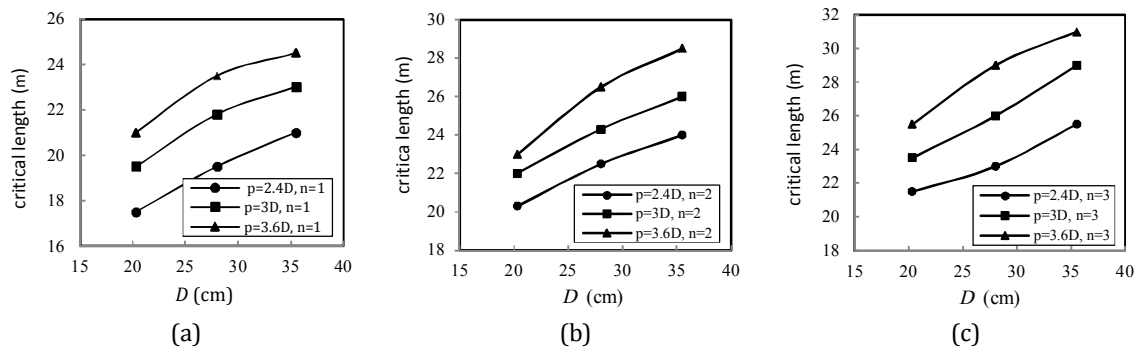


Fig. 3. Relation of the critical length of the pile with helix diameter for: (a) one row of pile, (b) 2 rows of piles, (c) 3 rows of piles

Fig. 4 shows the relationship between the safety factor of slope and helix diameters for a different number of pile rows. According to this figure, increasing the helix diameter increases the safety factor of slope. This incremental effect is more near the critical pile length. The trend of increasing of FS by increasing the diameter of the helix does not always follow a steady pattern. This means that after reaching the helix diameter to a specified limit, a further increase in diameter will increase the safety factor of slope.

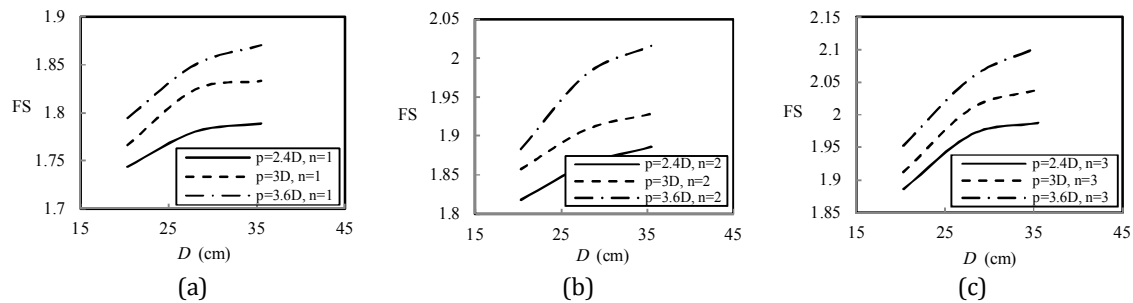


Fig. 4. Relation of the safety factor of the slope with helix diameter for: (a) one row of pile, (b) 2 rows of piles, (c) 3 rows of piles

4. Conclusions

The result of studies indicates that the application of helical piles is an effective and appropriate method for slope stabilization and has a high economic cost in terms of the amount of raw material. The safety factor of slope increases by increasing helix diameter, spaces between plates, pile length, and number of pile rows. This effect is more effective near the critical length of piles. Using the results of parametric analysis, it is possible to determine and select the most optimal mode for the geometry and arrangement of the helical piles, in order to reduce the cost of the project of slope stabilization with helical piles.

5. References

- Cai F, Ugai K, "Numerical Analysis of the Stability of Slope Reinforced with Piles", Soils and Foundations, 2000, 40 (1), 73-84.
- Wei WB, Cheng YM, "Strength Reduction Analysis for Slope Reinforced with One Row of Piles", Computers and Geotechnics, 2009, 36 (7), 1176-1185.
- Won J, You K, Jeong S, Kim S, "Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems", Computers and Geotechnics, 2005, 32 (4), 304-315.
- Xu Q, Yin H, Cao X, Li Z, "A temperature-driven strength reduction method for slope stability analysis", Mechanics Research Communications, 2009, 36, 224-231.