

بررسی امکان پایدارسازی دیواره معدن روباز عمیق مهدی آباد یزد با استفاده از روش شمع برجا

امین ظفری^۱، جواد غلام‌نژاد^۲، مهدی نجفی^۳، محمد فاتحی مرجی^۲

- ۱- کارشناسی ارشد، گروه مکانیک سنگ، دانشگاه یزد
- ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد
- ۳- استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت ۱۳۹۷/۰۱/۲۵، پذیرش ۱۳۹۷/۰۶/۱۴)

چکیده

هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر استفاده از شمع برجا بر پایداری دیواره نهایی بخش غربی معدن سرب، روی و باریت مهدی آباد برای افزایش پایداری و کاهش باطله برداری است. بنابراین، ابتدا برداشت‌های صحرایی در معدن انجام و هندسه دیواره معدن یاد شده در نرم‌افزار FLAC2D مدلسازی و دیواره در حالت‌های مختلف دیواره بدون اجرای شمع و با یک تا سه ردیف شمع تحلیل پایداری شده است. نتایج بررسی‌های انجام‌شده از مدلسازی دیواره در حالت بدون اجرای شمع و در زوایای مختلف نشانگر آن است که شیب ۴۲ درجه، شیب پایدار معدن است. در مرحله بعد، ۱۰ محل شمع با ۴ طول مختلف و به فواصل ۵۰ متر مدلسازی شده و فاکتور ایمنی دیواره محاسبه شده است. نتایج حاصل شده بیانگر آن است که اجرای شمع با طول عبوری ۳۰ متر از پایین‌ترین سطح لغزش و در میانه شیب دیواره نهایی بهترین ضریب ایمنی را دارد و سبب می‌شود که زاویه پایدار دیواره از ۴۲ درجه به ۴۵٫۳ درجه افزایش یابد. در مرحله بعد مدلسازی ردیف دوم و سوم شمع نشان داده است که زاویه شیب دیواره نهایی با دو ردیف شمع به ۴۶٫۳ درجه رسیده و با سه ردیف شمع تغییر چندانی در زاویه پایداری شیب دیواره حاصل نشده است. همچنین بررسی اثر فاصله‌داری شمع‌ها نشان داده است که با افزایش فاصله‌داری آن‌ها پایداری شیب نهایی معدن کاهش می‌یابد. با توجه به این‌که بیشتر هزینه شمع مربوط به بخش حفاری عمیق است، بررسی فنی و اقتصادی نشان داد که هزینه باطله برداری در معادن عمیق نسبت به شمع کوبی مقدار کمتری است.

کلمات کلیدی

پایداری شیب، شمع کوبی، نرم‌افزار FLAC 2D، معدن روباز عمیق.

۱- مقدمه

هر شیب سنگی با توجه به مقیاس عملیات، ویژگی‌های منحصر به فردی دارد. امکان یافتن دو شیب سنگی شبیه هم وجود ندارد و تغییر مصالح این سازه‌ها تنها در صورت تغییر موقعیت ساختگاه امکان‌پذیر است. ارتفاع دیواره، شرایط زمین‌شناسی، وضعیت آب‌های زیرزمینی و شرایط آتشفشانی در معدن از جمله عوامل اثرگذار در پایداری شیب و دیوارهای معدن محسوب می‌شوند. با در نظر گرفتن داده‌های زمین‌شناسی، اطلاعات ژئومکانیکی، مشاهده وضعیت آب زیرزمینی و قضاوت مهندسی می‌توان راه حل عملی برای این مساله ارائه داد [۲].

در شیب‌های معدن روباز بسته به وضعیت ناپیوستگی‌ها، چهار نوع شکست صفحه‌ای، گوه‌ای، واژگونی و دایره‌ای امکان وقوع دارد. شکست صفحه‌ای در توده سنگ‌های دارای دسته درزه‌های پیوسته با امتداد موازی شیب و شیب به سمت بیرون شیروانی، شکست گوه‌ای بر روی دو دسته درزه متقاطع، شکست واژگونی در توده سنگ صلب دارای ناپیوستگی با شیب به سمت خلاف سطح شیروانی و شکست دایره‌ای در دیوهای سنگی و توده سنگ خردشده یا شدید درزه‌دار با درزه داری تصادفی به وقوع می‌پیوندد. در صورتی که ابعاد شیب خیلی بیشتر از ابعاد بلوک‌های سنگی باشد ریزش دایروی اتفاق می‌افتد. با توجه به موارد بیان شده روشن است که ریزش در دیوارهای معدن با شیروانی‌های خاکی متفاوت است. در شیروانی‌های خاکی ریزش بیشتر از نوع دایروی است.

به طور کلی پایدارسازی دیوارهای سنگی به روش‌های بهسازی (مانند زهکشی و تزریق)، پوشش (مانند ساتکریت)، اصلاح پله و نگهداری (مانند استفاده از مهار و شمع کوبی) قابل انجام است. تزریق در مواردی انجام می‌شود که سنگ دیواره قابلیت تزریق‌پذیری داشته باشد و در مواردی که بلوک‌های سنگی در دیواره وجود داشته باشد از میل مهار برای پایدارسازی آن استفاده می‌شود.

در مورد معدن روباز عمیق بسته به وضعیت دیواره از روش‌های فوق می‌توان استفاده کرد ولی باید توجه داشت که به دلیل ارتفاع زیاد دیواره معمولاً ریزش‌های اتفاق افتاده حجم بالایی دارد و می‌تواند خطرات زیادی را به دنبال داشته باشد. شمع به طور گسترده برای پایدارسازی شیروانی‌ها استفاده شده و کارآمدی آن اثبات شده است در ژاپن بیش از ۱۰۰ سال است که از شمع‌های چوبی برای جلوگیری از لغزش زمین استفاده می‌شود [۴]. پایداری یک شیروانی با شمع به عواملی مانند هندسه شیروانی، ویژگی‌های خاک و شمع بستگی دارد.

امروزه حضور ماشین‌آلات بزرگ در معدن روباز که ظرفیت بالایی دارند، سبب شده که منابع بیشتری از مواد معدنی به ذخیره قابل استخراج تبدیل شوند و عیار حد بیشتر کانی‌ها به پایین‌ترین حد ممکن کاهش یابد. علاوه بر این به دلیل افزایش نرخ رشد اقتصادی و تقاضای مواد معدنی، بسیاری از معدنی که در سطح و نزدیک سطح زمین بودند استخراج شده و امروزه ذخایری برای استخراج در دست طراحی‌اند که نسبتاً در اعماق قرار دارند. از این رو نقش پایداری شیب چه در مرحله طراحی، چه در استخراج و یا پیش‌بینی شکست بسیار حایز اهمیت است. در بخش طراحی از نظر اقتصادی، شیب زیاد باعث کاهش نسبت باطله‌برداری، کاهش زمان برگشت سرمایه و افزایش ذخیره ماده معدنی قابل استخراج می‌شود. در مرحله استخراج نیز پایداری شیب این امکان را فراهم می‌کند تا انفجارهای متعدد و دلخواه برای خرد شدن کامل سنگ انجام گیرد. از نظر ایمنی چه در مرحله طراحی و یا در مرحله استخراج، پایداری شیب موجب کنترل بهتر دیواره‌های معدن، کنترل بهتر آب‌های سطحی و زیرزمینی و طراحی و ایجاد دیواره‌های ایمن در دیواره نهایی معدن می‌شود. در شیب پایدار میزان از دست رفتن مواد معدنی، تجهیزات و آسیب دیدن کارکنان به حداقل می‌رسد و از نظر اقتصادی مناسب‌تر و از نظر ایمنی، ایمن‌تر خواهد بود [۱]. برای بررسی پایداری شیروانی‌های سنگی و خاکی و به عبارتی دیواره معدن روباز روش‌های مختلفی وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های تجربی، روش‌های تعادل حدی و روش‌های عددی اشاره کرد. در روش‌های تجربی بر اساس سیستم طبقه‌بندی به بررسی پایداری شیب‌ها می‌پردازند. روش‌های تجربی آسان‌ترین و سریع‌ترین روش برای تحلیل پایداری‌اند [۲]. روش‌های تعادل حدی یکی از پرکاربردترین روش‌ها در تحلیل پایداری شیروانی‌ها هستند. از این روش‌ها می‌توان برای تعیین ضریب اطمینان انواع مختلف ناپایداری‌های محتمل در شیب‌های خاکی و سنگی استفاده کرد [۳]. روش‌های عددی که در علم مکانیک سنگ کاربرد دارند از نظر محیط تحلیل به سه دسته شامل روش‌های پیوستار^۱، روش‌های ناپیوستار و روش‌های ترکیبی^۲ تقسیم می‌شوند [۲]. امروزه روش‌های عددی به طور گسترده در تحلیل پایداری شیروانی‌ها به کار می‌روند. یکی از مهم‌ترین مسایل طراحی شیب در اکثر معدن روباز، تعیین ساز و کار شکست است. توده سنگ تشکیل‌دهنده

است. هدف اصلی این تحقیق، بررسی اثر شمع برجا بر پایداری دیواره غربی کاواک نهایی معدن سرب، روی و باریت مهدی آباد با استفاده از مدلسازی عددی است. بدین منظور ابتدا پایداری دیواره معدن در حالت بدون پایدارسازی بررسی شده و پس از رسیدن به ضریب ایمنی مورد نظر (۱/۳)، شمع در دیواره مدل شده و اثر آن بر روی ضریب ایمنی بررسی می‌شود و بهترین مکان در دیواره برای ردیف اول پیدا می‌شود، سپس برای مکان‌یابی ردیف دوم شمع، ردیف اول شمع را در بهترین مکان خود ثابت نگه داشته و مکان ردیف دوم را تغییر می‌دهند تا بهترین نتیجه حاصل شود. همین روند برای به دست آوردن محل ردیف سوم شمع اجرا می‌شود. در تمامی مراحل، اثر شمع روی پایداری دیواره و حداکثر زاویه دیواره به ازای ۱، ۲ و ۳ ردیف شمع بررسی می‌شود.

۲- پایداری شیروانی با روش شمع برجا

استفاده از شمع‌ها همواره به عنوان یکی از مفیدترین راهکارها برای جلوگیری از وقوع زمین‌لغزش در شیروانی‌ها مطرح است. در واقع، شمع کوبی در داخل شیروانی‌ها یکی از کارآمدترین راهکارها برای پایدارسازی آن‌ها در برابر وقوع گسیختگی‌های دایره‌ای یا صفحه‌ای در امتداد سطوح لغزش است. شمع‌ها به عنوان المان‌های مقاوم در برابر جابه‌جایی توده خاک مستعد گسیختگی به سمت پایین عمل کرده و نیروهای ایجاد شده ناشی از این اندرکنش را به لایه‌های پایدار زیرین منتقل می‌کنند [۲۲]. در مورد دیواره‌های معدن روباز عمیق، در صورتی که دیواره از جنس سنگ‌های دگرگونی خرد شده باشد (فاصله‌داری درزه‌ها نزدیک به هم) ریزش به وقوع پیوسته از نوع دایروی است و شمع‌ها وسیله کارآمدی برای پایداری دیواره به نظر می‌رسند.

شمع‌ها اعضای از جنس فولاد، بتن، بتن مسلح و چوب‌اند که برحسب طول و مکانیزم انتقال بار به خاک به سه دسته شمع‌های اتکایی^۱، اصطکاکی^{۱۱} و تراکمی^{۱۲} تقسیم می‌شوند. برای انتخاب سیستم شمع، پارامترهایی شامل موقعیت و مشخصات لایه‌های خاک، وضعیت آب زیرزمینی، موقعیت و نوع سازه‌ای که بار آن باید از طریق شمع به زمین منتقل شود و شرایط محیطی، امکانات اجرایی و ملاحظات اقتصادی باید لحاظ شود [۲۳].

در طراحی و اجرای شمع مشخصات شمع، شامل نوع و طول شمع، قطر، فاصله‌داری و محل قرارگیری شمع از اهمیت زیادی دارد.

با این حال تنها پارامتری که مهندسان می‌توانند آن را کنترل کنند، ویژگی‌های شمع و طراحی آن است. کنترل ویژگی‌های زمین و هندسه آن کار راحتی نیست و اغلب همان‌گونه‌اند که پذیرفته می‌شوند [۵].

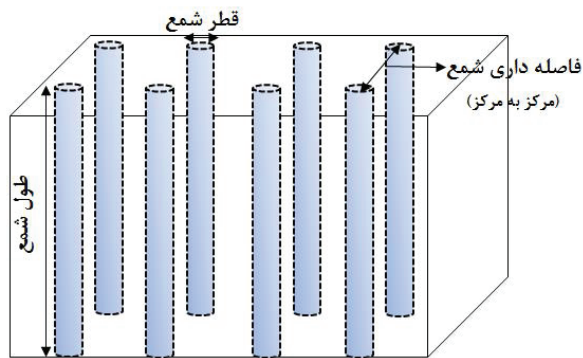
مکان‌یابی بهینه شمع در شیروانی‌های خاکی توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه به مواردی از آن پرداخته شده است.

مطالعات ایتو^۲ نشان داده است که بهترین موقعیت برای شمع در وسط شیروانی به سمت بالای آن است [۵]. لی^۴ و همکاران بیان کردند که شمع در نزدیکی تاج شیروانی می‌تواند بیشترین تاثیر را بر ضریب ایمنی داشته باشد. همچنین دریافتند وقتی شمع در نیمه پایینی شیروانی نصب می‌شود، تاثیر کمی بر افزایش ضریب ایمنی دارد [۶]. مطالعات هاسیوتیس^۵ نشان داده است که شمع‌ها باید در نیمه بالایی شیروانی قرار بگیرند تا بهترین ضریب ایمنی به دست آید. همچنین بیان کرد که محل قرارگیری شمع به تندی زاویه شیب هم بستگی دارد. برای شیروانی‌های با شیب زیاد، شمع‌ها باید در قسمت بالای شیروانی نصب شوند [۷]. کای^۶ و یوگای^۷ نتایج حاصل از کاهش مقاومت برشی در روش المان محدود و روش ساده بیشاپ را مقایسه کردند. نتایج به دست آمده برای این دو روش متفاوت بوده است. در روش المان محدود محل بهینه شمع در وسط شیروانی به دست آمد و در روش بیشاپ ساده بهترین ضریب ایمنی برای شمع در بالای شیروانی به دست آمد [۸]. بر همین اساس تعدادی از محققان از روش اصلاح‌شده بیشاپ استفاده کردند و محل بهینه شمع را در تاج شیروانی به دست آوردند [۵]. اوزیلیو^۸ و همکاران با استفاده از روش آنالیز حدی دریافتند که محل بهینه شمع می‌تواند در نزدیکی پای شیروانی باشد [۹]. لی^۹ و همکاران بیان کردند که موثرترین محل شمع، مناسب‌ترین محل شمع و محلی که در آن بزرگ‌ترین ضریب ایمنی به دست می‌آید با هم متفاوت‌اند و با بررسی‌های عددی دریافتند در صورتی که محل شمع (شمع بلند) در نیمه بالایی شیب باشد، بزرگ‌ترین ضریب ایمنی را ایجاد می‌کند [۱۰]. علاوه بر مطالعات بیان شده، در جدول ۱ به مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در زمینه مکان‌یابی شمع پرداخته شده است.

بررسی تحقیقات بیان شده نشان می‌دهد بیشتر تحقیقات انجام شده بر روی شیروانی‌های خاکی انجام شده است و تاکنون تحقیق مستقلی برای استفاده از شمع در پایدارسازی دیواره معدن با هدف کاهش میزان باطله‌برداری انجام نشده

جدول ۱: مطالعات انجام شده در زمینه مکان‌یابی شمع در شیروانی

محقق	نوع خاک	نوع شکست	محل قرارگیری شمع در شیروانی	توضیحات
ایتو (۱۹۷۹)	چسبنده	قاشقی	وسط	_____
کروبا (۱۹۸۹)	رس	-	وسط	شمع برج با قطر ۱٫۲ متر
پولوس (۱۹۹۰)	رس	قاشقی	وسط	شمع برج با قطر ۱٫۲ متر
پولوس (۱۹۹۵) [۱۱]	رس - سیلت استون	قاشقی	وسط	_____
لی و همکاران (۱۹۹۵)	چسبنده - هموزن	قاشقی	پایه و تاج شیروانی	_____
لی و همکاران (۱۹۹۵)	دولایه	قاشقی	نیمه بالایی شیروانی	لایه بالایی نرم و لایه زیرین سخت
لی و همکاران (۱۹۹۵) [۶]	دولایه	قاشقی	پایه و تاج شیروانی	لایه بالایی سخت و لایه زیرین نرم
چاو (۱۹۹۶) [۱۲]	دولایه	صفحه‌ای	_____	شمع برج با قطر ۱ متر و فاصله‌داری ۲٫۵ متر
هاسیوتس (۱۹۹۷) [۷]	چسبنده	قاشقی	بالای شیروانی	_____
کای و یوگای (۲۰۰۰) [۸]	$c=10 \text{ kPa}$, $\phi=20$	قاشقی	بالای شیروانی	تحلیل با روش بیشاپ ساده
دیویس (۲۰۰۰)	$Cu=100 \text{ kPa}$	صفحه‌ای	بالای شیروانی	شمع فولادی با قطر ۱ متر و فاصله‌داری ۲٫۵ متر
اوزیلیو (۲۰۰۱) [۹]	$c=4.7 \text{ kPa}$, $\phi=25$	قاشقی	پایه شیروانی	_____
لیانگ (۲۰۰۲)	سنگ و خاک لایه‌ای	صفحه‌ای	پای شیروانی	شمع برج با قطر ۱٫۲۲ متر و فاصله‌داری ۲٫۴۴ متر
جوونگ (۲۰۰۳)	$c=10 \text{ kPa}$, $\phi=20$	قاشقی	وسط	_____
یامین (۲۰۰۷)	سنگ	صفحه‌ای	وسط	بتنی با قطر ۱٫۰۷ متر و فاصله‌داری ۲٫۱۴ متر
یامین (۲۰۰۷)	سنگ نرم - آبرفت	صفحه‌ای	وسط	بتنی با قطر ۱٫۲۲ متر و فاصله‌داری ۱٫۶۶ متر
یامین (۲۰۰۷)	-	صفحه‌ای	وسط	بتنی با قطر ۱٫۲۲ متر و فاصله‌داری ۲٫۴۴ متر
نیان (۲۰۰۸) [۱۳]	انیزوتروپ و غیرهموزن	-	پایه شیروانی	_____
شیکو و یانگ (۲۰۱۱) [۱۴]	$c=10 \text{ kPa}$, $\phi=20$	قاشقی	وسط	فولادی
آشور (۲۰۱۲) [۱۵]	$c=14 \text{ kPa}$, $\phi=10$	قاشقی	وسط	بتنی با قطر ۱٫۲ متر و فاصله‌داری ۲٫۵ متر
سالم تارک (۲۰۱۲) [۱۶]	رس سیلتی نرم	قاشقی	تاج شیروانی	بتنی
گالو (۲۰۱۳) [۱۷]	تناوب رس نرم و سخت	قاشقی	پای شیروانی	شمع بتنی با قطر ۰٫۵ متر
شوش پاشا (۲۰۱۴) [۱۸]	$c=10 \text{ kPa}$, $\phi=20$	قاشقی	وسط	شمع بتنی با قطر ۰٫۸ متر
هاسوان (۲۰۱۴) [۱۹]	رس	قاشقی	وسط	بتنی
خواجه‌پور (۱۳۸۶) [۲۰]	آهک و شیبست	قاشقی	بالای شیروانی	شمع بتنی با قطر ۰٫۵ متر
حاجی عزیز (۱۳۹۳) [۲۱]	ماسه	قاشقی	وسط	شمع بتنی (تحقیقات آزمایشگاهی)



شکل ۱: شماتیک پارامترهای شمع

۱-۲- نوع شمع

در پایدارسازی شیروانی‌ها، شمع‌های بتنی و فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۲- طول شمع

تعداد ردیف و طول شمع بستگی به ابعاد شیروانی دارد. همچنین طول شمع باید به گونه‌ای باشد که از سطح لغزش شیروانی عبور کند [۵].

۳-۲- قطر شمع

قطر شمع بر اساس جنس و کارایی شمع تعیین می‌شود. در شمع‌های بتنی، قطر شمع می‌تواند بزرگ‌تر انتخاب شود. برای شمع‌های برجا قطر شمع در بازه بزرگتری قرار می‌گیرد. در مطالعات موردی بیان شده در جدول ۱ قطر شمع‌ها از ۰٫۳ تا ۱٫۲ متر متغیر بوده است [۵].

۴-۲- فاصله‌داری شمع‌ها

فاصله‌داری شمع‌ها یکی از پارامترهای تاثیرگذار در پایداری شیروانی‌ها است. معمولاً تاثیر فاصله‌داری را با نسبت فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها نسبت به قطر شمع (S/D) بیان می‌کنند. در تحقیقات انجام شده نسبت S/D بین ۲ تا ۳ متغیر است. تنش‌های وارده بر هر شمع و ضریب ایمنی می‌تواند با تغییر مقدار S/D تغییر کند. وقتی این مقدار بیشتر از ۸ شود، عملاً اثر قوس خاک (انتقال فشار از مصالح یک محیط دارای جابه‌جایی نسبی به بخش‌های ایستای مجاور آن) از بین رفته و دیگر گروه شمع معنی پیدا نمی‌کند و شمع‌ها هرکدام به صورت تک شمع عمل خواهند کرد. برای این که اثر گروه شمع به خوبی بیان شود نسبت S/D باید کمتر از ۳ باشد [۵]. در شکل ۱ به صورت شماتیک پارامترهای مختلف دو ردیف شمع نشان داده شده است.

۵-۲- سختی نرمال و سختی برشی شمع

سختی نرمال و برشی فصل مشترک بین دو جسم را می‌توان ۱۰ برابر سخت‌تر از سخت‌ترین منطقه مجاور در نظر گرفت. سختی ظاهری یک منطقه در جهت عمود بر فصل مشترک را می‌توان از رابطه ۱ محاسبه کرد [۲۴].

$$\text{سختی ظاهری} = \max \left(\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta Z_{\min}} \right) \quad (1)$$

که در آن:

K : مدول حجمی

G : مدول برشی

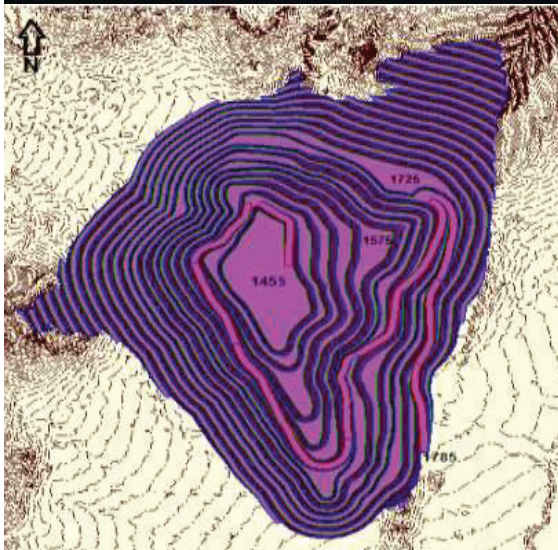
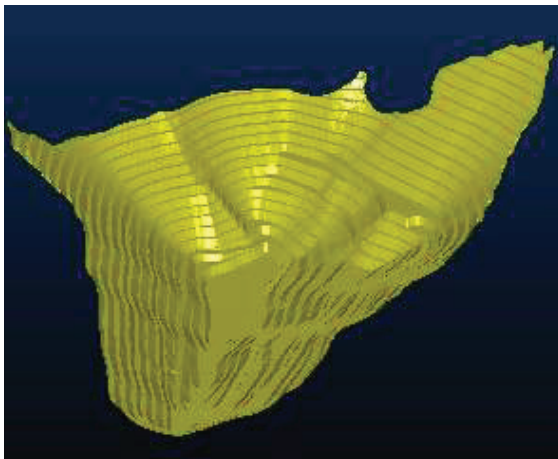
ΔZ_{\min} : کمترین بعد هندسی در راستای عمود بر سطح

تماس در مواردی که دو طرف فصل مشترک از لحاظ سختی متفاوت باشند، باید مقادیر بزرگتر سختی‌ها را در نظر گرفت.

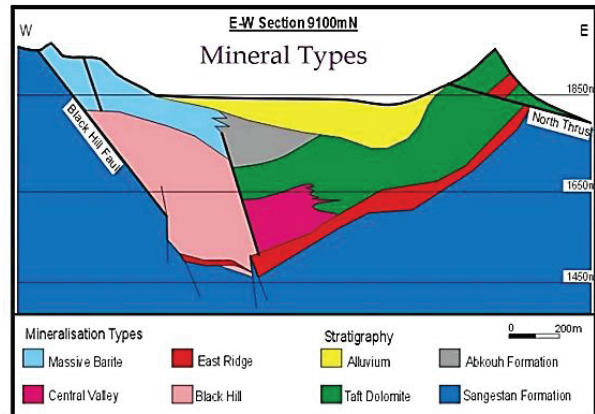
۳- تحلیل پایداری دیواره غربی معدن سرب و روی مهدی‌آباد به روش عددی

هدف اصلی این تحقیق بررسی پایدارسازی دیواره نهایی

معدن سرب و روی مهدی‌آباد است. کانسار مهدی‌آباد در ۱۱۰ کیلومتری جنوب شرقی یزد واقع شده است [۲۵]. واحدهای مختلف چینه‌شناسی که در محدوده معدن مهدی‌آباد رخنمون دارند عمدتاً از دو سازند اصلی سنگستان و تفت و همچنین یک سازند فرعی بنام آبکوه که توسط کارشناسان زمین‌شناسی به طور محلی نام‌گذاری شده، تشکیل شده است [۲۶]. مقطع زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. سازند سنگستان تناوبی از شیل و شیل‌های آهکی و ماسه‌ای سیلتستون، ماسه‌سنگ و آهک است. سازند تفت به طور کلی از آهک خاکستری، خاکستری روشن با لایه‌بندی متوسط تا توده‌ای و حفره‌دار و دولومیت‌های قهوه‌ای تا قهوه‌ای مایل به زرد با لایه‌بندی ضخیم تا توده‌ای تشکیل شده است. بر روی سازند تفت لایه‌هایی از آهک، آهک مارنی، شیل آهکی قرار می‌گیرد که شباهتی با رسوبات بالایی سازند تفت در دیگر نقاط یزد ندارد، بنابراین این سازند به طور محلی به نام سازند آبکوه معرفی شده است.



شکل ۳: کاواک طراحی شده معدن سرب و روی مهدی آباد



شکل ۲: مقطع زمین‌شناسی معدن سرب و روی مهدی آباد [۲۶]

بر اساس مطالعات انجام شده، حدود ۱۵۴ میلیون تن ماده معدنی با عیار میانگین کلی روی ۶ درصد و سرب ۲ درصد درون پیت بهینه قرار می‌گیرد. برای برداشتن این میزان ماده معدنی، نیاز به برداشت حدود ۱۲۰ میلیون تن باطله و آبرفت از معدن است. ورودی معدن از طریق جاده دسترسی واقع در قسمت جنوب شرقی معدن و در تراز ۱۷۸۵ متری خواهد بود. بر اساس طراحی‌های انجام شده اطلاعات فنی مربوط به طراحی پله‌های نهایی طرح معدن مهدی‌آباد در جدول ۲ و نیز شکل کاواک نهایی معدن در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲: اطلاعات فنی مربوط به طراحی پله‌های نهایی معدن سرب و روی مهدی‌آباد [۲۶]

پارامتر	واحد	مقدار
افق کف معدن	متر	۱۴۵۵
حداقل عرض معدنکاری کف معدن	متر	۱۰۰
عرض پله ایمنی	متر	۱۰
ارتفاع پله نهایی	متر	۳۰
عرض رمپ‌ها	متر	۲۸
شیب رمپ‌ها	درصد	۸
شیب دیواره پله	درجه	۴۴، ۵۵، ۶۰

در این تحقیق برای بررسی وضعیت ساختاری منطقه، برداشت درزه در دیواره‌های معدن انجام گرفت. بر این اساس مشخص شد که سه دسته درزه اصلی در منطقه وجود دارد که دارای فاصله‌داری نزدیک به هم‌اند. در جدول ۳ خلاصه نتایج آماری دسته درزه‌های منطقه مورد مطالعه نشان داده

شده است.

در این تحقیق برای مشخص کردن محیط مورد مطالعه در تحلیل عددی از معیار پالمستروم^{۱۳} استفاده شد [۲۷]. بر اساس معیار پالمستروم، فاکتور پیوستگی از رابطه ۲ قابل محاسبه است.

$$CF = \frac{H}{D} \quad (2)$$

که در آن:

CF: فاکتور پیوستگی

H: ارتفاع دیواره

D: میانگین فاصله‌داری درزه‌ها

در صورتی این معیار بین ۰٫۲ و ۰٫۱ باشد محیط ناپیوسته و برای محیط پیوسته دو گروه مشخص کرده است. برای

می‌کند در این تحقیق به ازای هر ۱۰۰ متر (بر اساس تنش برجا) تغییر ویژگی‌های دیواره در نظر گرفته شده است. این داده‌ها به عنوان ورودی‌های نرم‌افزار FLAC2D مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۱- تحلیل پایداری دیواره بدون اجرای شمع

مدل هندسی به صورت یک بلوک کامل ساخته شده و پس از بستن مرزها و رسیدن به تعادل اولیه، با توجه به نسبت‌های پیشنهادی شکل ۴ برای مدلسازی در نرم‌افزار استفاده شده است. مرزهای بسته شده مدل پر رنگ نشان داده شده است. بر اساس اطلاعات جدول ۴ ویژگی‌های ورودی به مدل اضافه شده و هر ۱۰۰ متر به صورت لایه‌بندی متفاوت در نظر گرفته شده است.

با توجه به پارامترهای توده سنگ کانسار مهدی‌آباد و هم چنین شرایط موجود و با کمک نرم‌افزار FLAC ضریب ایمنی دیواره غربی معدن مهدی‌آباد محاسبه شده است. با توجه به این که این تحلیل استاتیکی بوده و خطر ریزش متوسط در نظر گرفته شده است، ضریب ایمنی ۱/۳ به عنوان ضریب ایمنی مجاز برای تحلیل پایداری در روش تحلیل عددی در

مقادیر بیشتر از ۱۰۰، محیط به شدت درزه‌دار و خردشده در نظر گرفته می‌شود. این موضوع با توجه به معیار پالمستروم، و ارتفاع ۴۰۰ متری دیواره و میانگین فاصله‌داری ۰/۸، منطقه مورد مطالعه در محدوده محیط‌های خرد شده قرار می‌گیرد. با توجه به خردشدگی توده‌سنگ در اکثر محدوده معدن مهدی‌آباد و این که یکی از کاربردهای مدلسازی پیوسته در مناطقی است که توده‌سنگ بسیار خردشده و درزه‌دار باشد، در این تحقیق از مدلسازی پیوسته و روش تفاضل محدود به کمک نرم‌افزار FLAC2D برای دیواره غربی معدن استفاده شده است.

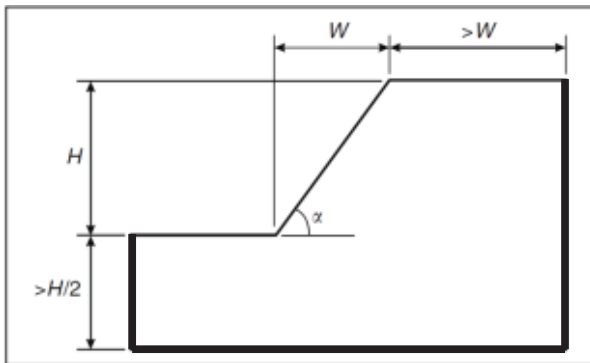
یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در مدلسازی عددی پارامترهای ورودی است. برای این منظور در این تحقیق بر اساس برداشت درزه‌های انجام شده در معدن GSI و MRMR توده سنگ مشخص شد که به ترتیب برابر با ۴۹ و ۵۴ محاسبه شد (دیواره دولومیت). برای به دست آوردن پارامترهای توده سنگ از نرم‌افزار Roclab استفاده شده است که نتایج خروجی‌های این نرم‌افزار برای دو سازند سنگستان و تفت (دیواره دولومیت) به ازای ارتفاع‌های مختلف دیواره نهایی در جدول ۴ بیان شده است (از آنجا که با افزایش عمق مشخصات توده سنگ فرق

جدول ۳: خلاصه نتایج آماری دسته‌درزه‌های منطقه مورد مطالعه

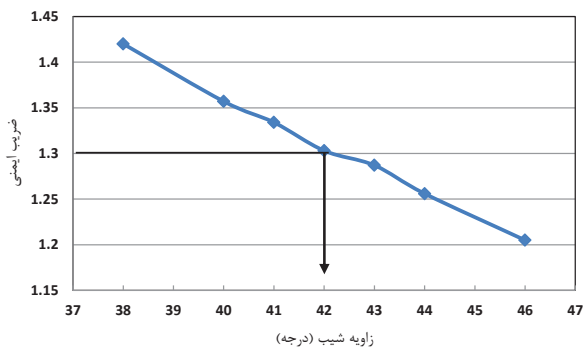
پارامتر ناپیوستگی	دسته‌درزه ۱		دسته‌درزه ۲		دسته‌درزه ۳	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
شیب	۷۲/۵۸۳	۳/۳۵۴	۸۴/۷۵	۱/۹۸۲	۸۵/۵۴۵	۲/۶۲۲
جهت شیب	۳۲۲/۶۵	۱۰/۱۳	۱۶۳/۷۵	۳/۵۴	۱۲۳/۷۳	۶/۵۹
فاصله‌داری (متر)	۰/۹۹	۰/۴۶	۰/۷۲	۰/۳۲	۰/۷۷	۰/۴۱

جدول ۴: پارامترهای توده‌سنگ مورد استفاده در مدلسازی عددی

عمق (متر)	مقاومت کششی (مگا پاسکال)		مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)		زاویه اصطکاک داخلی (درجه)		چسبندگی (مگا پاسکال)
	سازند سنگستان	سازند تفت	سازند سنگستان	سازند تفت	سازند سنگستان	سازند تفت	
۱۰۰	۰/۰۵۳	۰/۰۷۱	۳/۹	۴/۳	۳۲/۶۵	۳۲/۵۲	سازند سنگستان
۲۰۰					۲۷/۶	۲۷/۵۰	سازند سنگستان
۳۰۰					۲۴/۷۶	۲۴/۶۸	سازند سنگستان
۴۰۰					۲۲/۸۳	۲۲/۷۵	سازند سنگستان
۵۰۰					۲۱/۳۹	۲۱/۳۱	سازند سنگستان
۶۰۰					۲۰/۲۴	۲۰/۱۷	سازند سنگستان



شکل ۴: نسبت‌های پیشنهادی برای ابعاد مدل



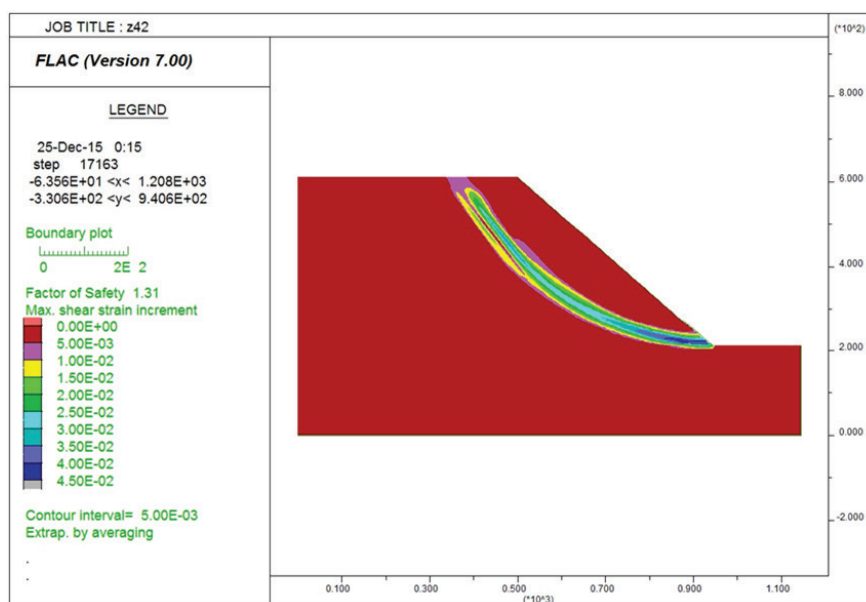
شکل ۵: نمودار ضرایب ایمنی برای زوایای مختلف شیروانی بدون شمع

نظر گرفته شده است [۲۸]. پس از انتخاب ضریب ایمنی مجاز، برای شیب‌های مختلف دیواره ضریب ایمنی محاسبه شده است که نتایج آن در شکل ۵ و دایره سطح ریزش در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵ می‌توان دریافت که با توجه به ضریب ایمنی (۱٫۳)، شیب ۴۲ درجه به عنوان شیب دیواره نهایی مناسب به نظر می‌رسد. علاوه بر این روشن است که ریزش در دیواره از نوع قاشقی است.

۳-۲- تحلیل پایداری دیواره با اجرای شمع

از آن‌جا که هدف اصلی این تحقیق تحلیل پایداری دیواره معدن سرب و روی مهدی‌آباد با شمع کوبی است، بدین منظور در ابتدا اثر شمع بر روی دیواره شیب ۴۲ درجه مدلسازی شده و تغییرات ضریب ایمنی محاسبه شده است. بر اساس موارد بیان شده در مورد مشخصات شمع‌ها، در این تحقیق برای انجام مدلسازی از شمع با مشخصات بیان شده در جدول ۵ استفاده شده است. فرض شده است دیواره سنگی دارای رفتار موهر کولمب است. همچنین فرض شده است شمع دارای رفتار الاستیک است و اندرکنش شمع با دیواره به وسیله فنرهای نرمال و برشی در المان Pile که با برنامه FLAC مشخص است، تعریف شده است.

نکته قابل توجه در مدلسازی شمع‌ها این است که به دلیل مشخص نبودن موقعیت اولین شمع، مدلسازی به گونه‌ای انجام



شکل ۶: سطح بحرانی ریزش در دیواره نهایی با شیب ۴۲ درجه

افقی شمع‌ها از یکدیگر ۵۰ متر در نظر گرفته شده است. نکته قابل توجه در این مورد این است که چه مقدار از طول شمع از سطح بحرانی ریزش عبور کند، از این رو برای بررسی اثر طول شمع عبوری از سطح بحرانی ریزش، ۴ طول مختلف از هر شمع تحلیل شده است. مقایسه نتایج به دست آمده در شکل ۸ نشان داده شده است که مرزهای مدل در شکل قابل مشاهده است.

با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که بهترین ضریب ایمنی برای شمع شماره P۴ و در فاصله ۵۵۰ متری از مرز چپ مدل به دست آمده است. بررسی این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش طول شمع عبوری از سطح لغزش در مکان‌های مختلف تا طول ۳۰ متر، منجر به افزایش ضریب ایمنی می‌شود، اما طول ۴۰ متر و ۳۰ اختلاف چندانی ندارند. بنابراین اولین شمع در مکان P۴ و با طول ۳۰ متر عبوری از سطح لغزش به عنوان بهترین شمع ردیف اول انتخاب شده است. در مراحل بعدی طول شمع‌ها به نحوی در نظر گرفته شده است که ۳۰ متر از سطح لغزش عبور کند.

از آن‌جا که شمع P۴ سبب افزایش پایداری شیب می‌شود، می‌توان شیب نهایی دیواره را افزایش داد که نتایج حاصل از افزایش شیب معدن در اثر اعمال شمع P۴ در شکل ۹ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۹ مشخص است که استفاده از یک ردیف

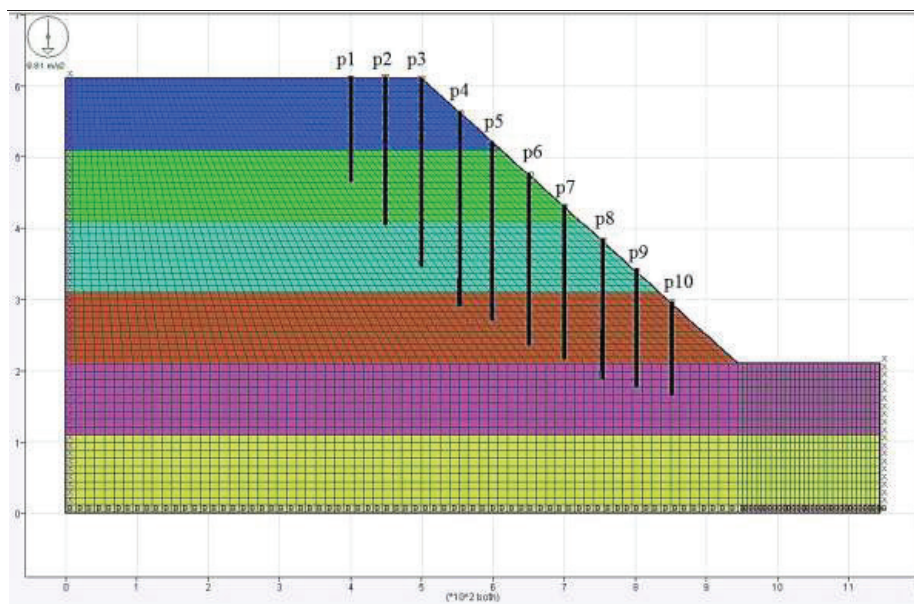
شده است که تا جایی که شمع هنوز اجرا نشده است عملیات حفاری کاواک انجام شود و سپس مدل به تعادل برسد و شمع اجرا و قسمت باقی‌مانده کاواک حفاری و مدل به تعادل برسد. به عبارتی دیگر بعد از نصب شمع‌ها فعال می‌شوند.

جدول ۵: خصوصیات شمع مورد استفاده در مدلسازی [۲۴،۱۹،۵]

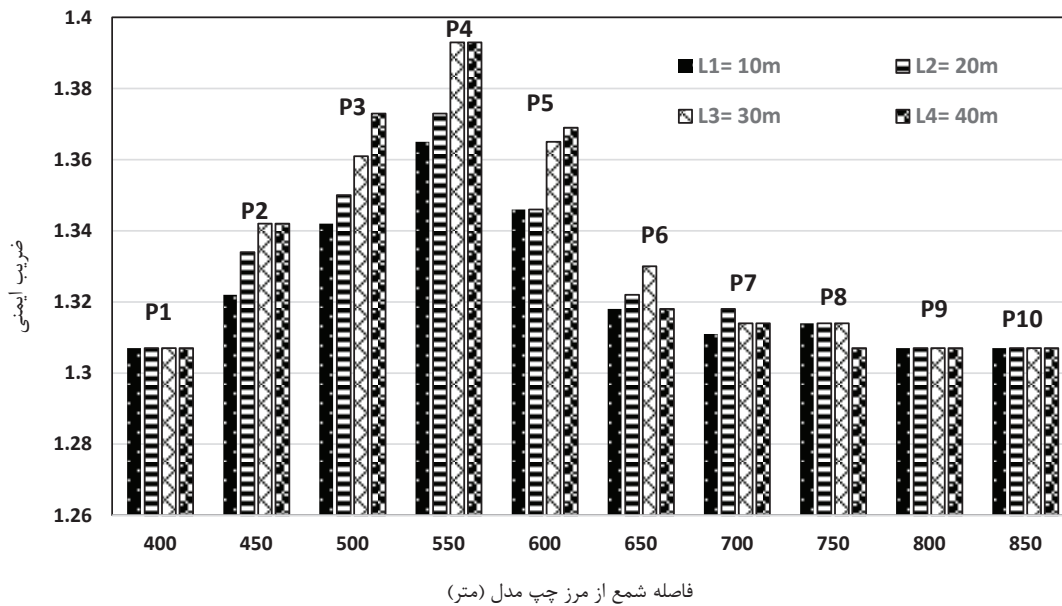
پارامتر	مقدار	واحد
قطر	۱	متر
نسبت (فاصله به قطر) S/D	۲	—
مدول یانگ (E)	۲۱	گیگاپاسکال
سختی برشی و نرمال	۱۶/۱	گیگاپاسکال
چسبندگی	۰/۵	مگاپاسکال
زاویه اصطکاک داخلی	۳۵	درجه

۳-۲-۱- تحلیل پایداری دیواره معدن با یک ردیف شمع

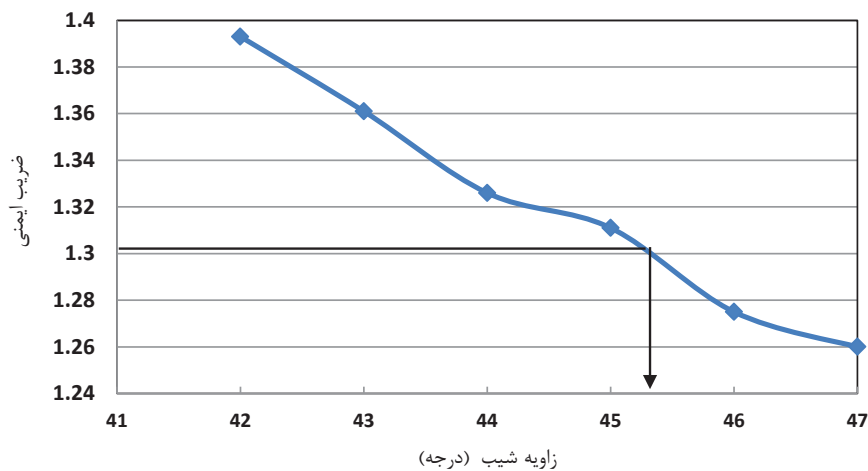
برای تحلیل پایداری شیروانی با یک ردیف شمع، یک شمع در دیواره مدل شده است. نکته قابل توجه در این زمینه موقعیت اولین ردیف شمع است. به این منظور محل‌های مختلف یک شمع در دیواره انتخاب و ضریب ایمنی دیواره برای هر موقعیت محاسبه شده است. محل‌های انتخاب شده برای قرارگیری شمع‌ها در شکل ۷ و به صورت کدگذاری نشان داده شده است. شمع‌ها از سطح شیروانی شروع شده و فاصله



شکل ۷: محل‌های انتخاب شده برای قرارگیری شمع‌های ردیف اول



شکل ۸: نمودار ضرایب ایمنی برای ۴ طول مختلف شمع در مکان‌های P1 تا P10



شکل ۹: ضرایب ایمنی دیواره پایدارسازی شده با یک ردیف شمع به ازای زوایای مختلف شیب

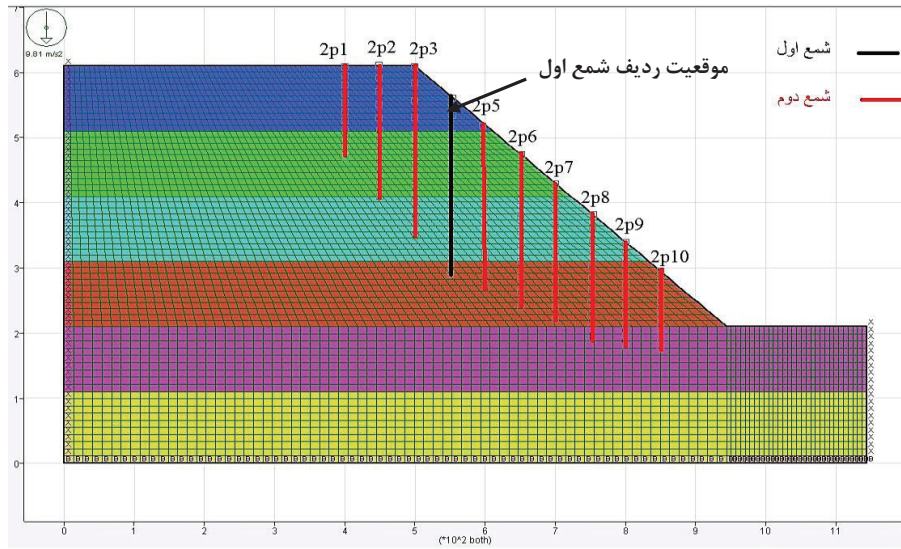
در شکل ۱۰ محل شمع‌ها در ردیف دوم و در شکل ۱۱ مقدار ضریب ایمنی محاسبه شده نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۱ می‌توان بیان کرد که بهترین ضریب ایمنی به ازای دو شمع با کد P۶ و در فاصله ۶۵۰ متری از مرز چپ مدل (۱۰۰ متری ردیف اول شمع)، به دست آمده است، بنابراین با اعمال دو شمع در این مکان‌ها، زاویه شیب افزایش داده شده است تا دوباره ضریب ایمنی ۱٫۳ حاصل شود (شکل ۱۲).

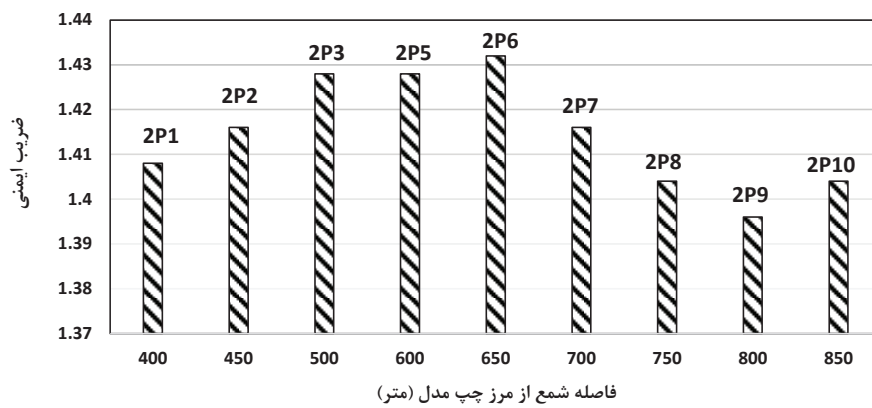
شمع در محل P۴ می‌تواند زاویه نهایی دیواره را از ۴۲ درجه به ۴۵٫۳ درجه برساند.

۳-۲-۲- تحلیل پایداری دیواره معدن با دو ردیف شمع

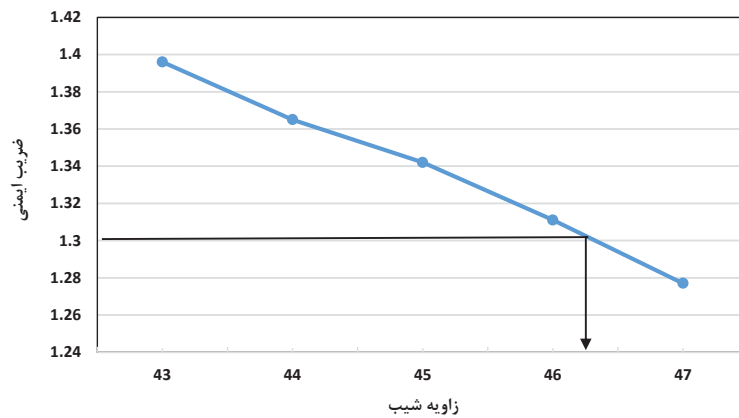
نکته قابل توجهی که در جانمایی ردیف دوم شمع اهمیت دارد، فاصله ردیف دوم شمع، از ردیف اول است. برای این منظور در این تحقیق ردیف اول شمع را در محل P۴ ثابت نگه داشته و فقط شمع دوم جابه‌جا شده و ضرایب ایمنی محاسبه شده است.



شکل ۱۰: محل قرارگیری شمع‌های ردیف دوم نسبت به ردیف اول



شکل ۱۱: نمودار ضرایب ایمنی دیواره پایدارسازی شده با شیب ۴۲ درجه با دو ردیف شمع



شکل ۱۲: نمودار ضرایب ایمنی دیواره پایدارسازی شده با دو ردیف شمع به ازای زوایای مختلف شیب

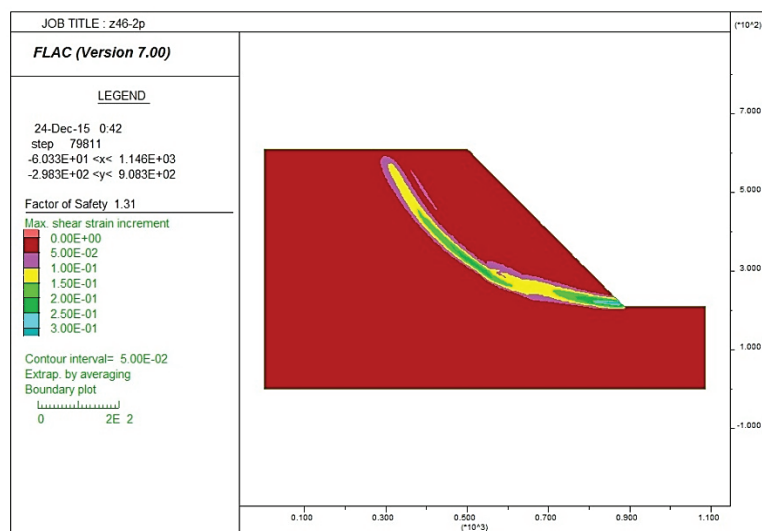
را در جای خود ثابت نگه داشته و تنها شمع سوم در مکان‌های نشان داده شده در شکل ۱۴ جابه‌جا شده است. برای هر حالت ضریب ایمنی محاسبه شده و نتایج آن در شکل ۱۵ بیان شده است. با توجه به شکل ۱۵ می‌توان بیان کرد که با جانمایی شمع سوم با

کد ۳P۵ و در فاصله ۶۰۰ متری از مرز چپ مدل، بهترین ضریب ایمنی به دست آمده است. با اعمال شمع سوم، زاویه شیب را افزایش داده تا بار دیگر ضریب ایمنی دیواره نهایی به مقدار ۱٫۳ برسد. نتایج تحلیل‌های انجام شده در شکل ۱۶

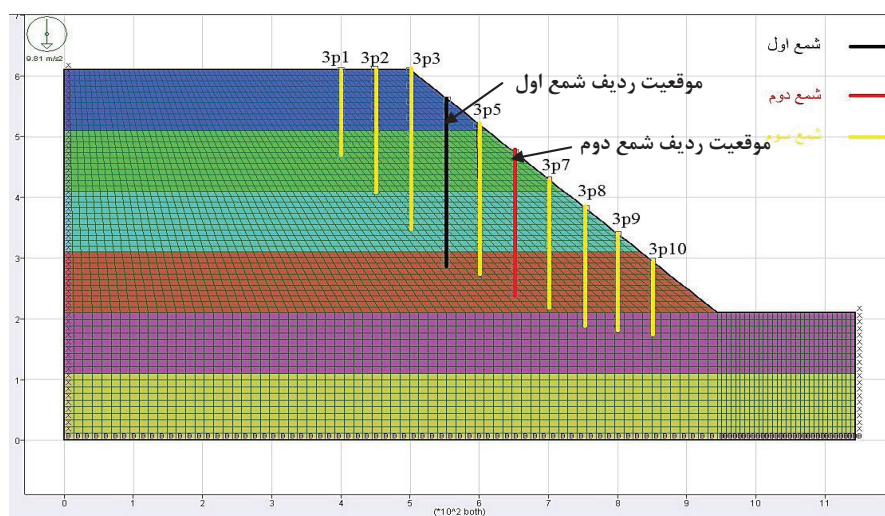
همانطور که مشخص است زاویه شیروانی پایدارسازی شده با دو ردیف شمع از ۴۵٫۳ درجه به ۴۶٫۳ درجه رسیده است. میزان اختلاف زاویه شیروانی در حالت یک ردیف شمع با حالت دو ردیف شمع تنها ۱ درجه است. در شکل ۱۳ می‌توان منحنی ریزش در دیواره نهایی پایدارسازی شده با دو ردیف شمع را مشاهده کرد.

۳-۲-۳- تحلیل پایداری شیروانی با سه ردیف شمع

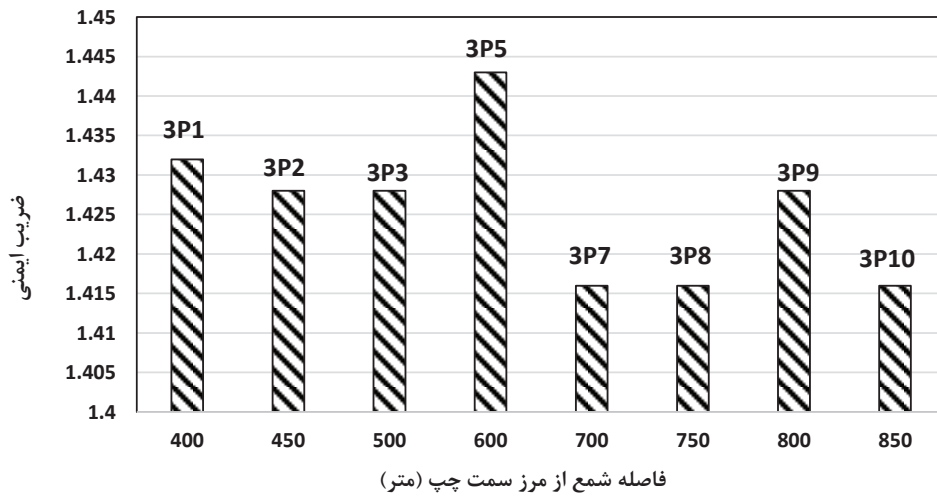
برای جانمایی ردیف سوم شمع، دو ردیف اول و دوم شمع



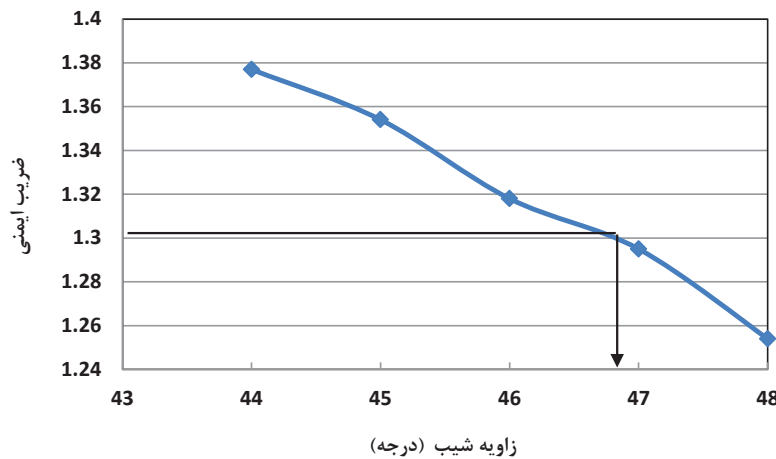
شکل ۱۳: دایره سطح ریزش در دیواره پایدارسازی شده با دو ردیف شمع



شکل ۱۴: محل قرارگیری شمع‌های ردیف سوم نسبت به ردیف اول و دوم



شکل ۱۵: نمودار ضرایب ایمنی دیواره با زاویه ۴۲ درجه و ۳ ردیف شمع



شکل ۱۶: نمودار ضرایب ایمنی دیواره در زاویه‌های مختلف با ۳ ردیف شمع

۳-۳- بررسی اثر فاصله‌داری شمع

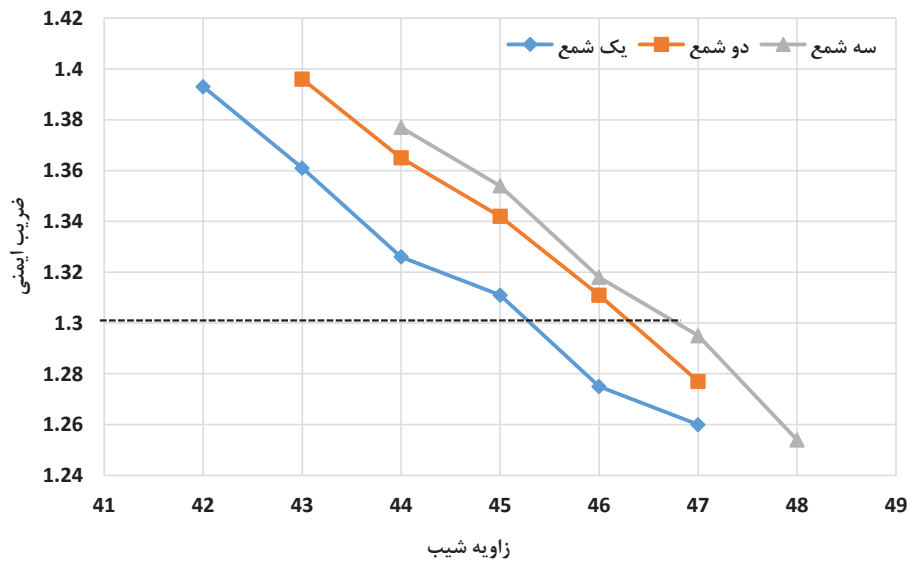
یکی از عوامل موثر در تحلیل پایداری شیروانی با شمع، نسبت S/D است. برای بررسی اثر فاصله‌داری شمع، برای حالت یک ردیف شمع، فاصله‌داری شمع‌ها را در زوایای مختلف شیب دیواره تغییر داده و اثر آن بر روی ضریب ایمنی دیواره بررسی شده است. نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

با توجه به شکل یاد شده روشن است که کاهش نسبت S/D موجب افزایش پایداری شیب دیواره می‌شود. به عنوان نمونه افزایش نسبت S/D از ۲ به ۴ باعث می‌شود که شیب

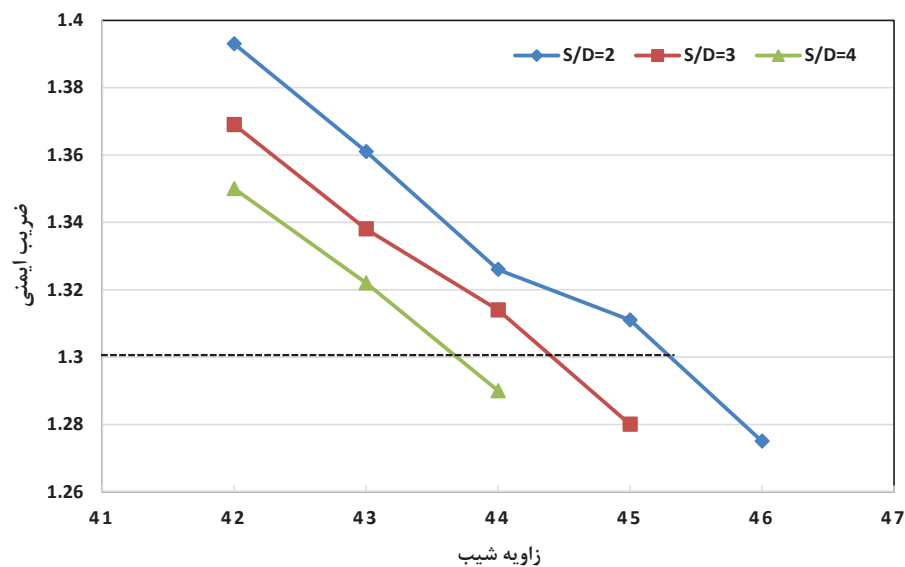
نشان داده شده است. با توجه به شکل یاد شده روشن است که در این حالت زاویه شیب نهایی به $۴۶/۸$ می‌رسد.

برای فهم بهتر از تاثیر تعداد ردیف‌های شمع بر ضریب ایمنی، نتایج حاصل از تحلیل شیروانی با ۱، ۲ و ۳ ردیف شمع در شکل ۱۷ مقایسه شده است.

با مقایسه نتایج به دست‌آمده از ۱، ۲ و ۳ ردیف شمع می‌توان به این نتیجه رسید که اجرای ردیف اول شمع بیشترین تاثیر را روی ضریب ایمنی دارد. با توجه به شکل ۱۷، ردیف سوم شمع علی‌رغم افزایش ضریب ایمنی دیواره نسبت به دو ردیف شمع، نمی‌تواند تاثیر زیادی بر زاویه شیب داشته باشد.



شکل ۱۷: مقایسه ضرایب ایمنی حاصل از ۱، ۲ و ۳ ردیف شمع



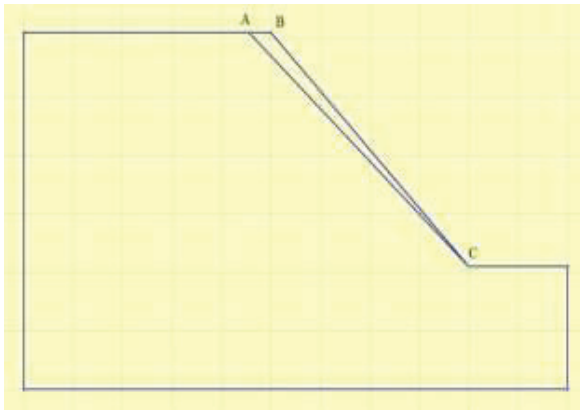
شکل ۱۸: اثر فاصله‌داری شمع بر میزان ضریب ایمنی

(کاهش شیب دیواره یا استفاده از شمع) از نظر اقتصادی قابل قبول است. بدین منظور باید هزینه تمام شده اجرای شمع، با میزان کاهش باطله‌برداری در اثر شمع‌کوبی مقایسه شود. با توجه به این که اجرای ردیف دوم و سوم شمع تاثیر چندانی در پایداری شیروانی نداشته‌اند، میزان کاهش باطله‌برداری به ازای یک ردیف شمع محاسبه می‌شود. در تحلیل فنی دیده شد که اجرای یک ردیف شمع موجب افزایش شیب دیواره شده است. همان‌طور که در شکل ۱۹ دیده می‌شود، میزان کاهش

نهایی از ۴۵٫۵ به ۴۳٫۶ درجه کاهش یابد. به هر حال در این حالت ($S/D=4$) در مقایسه با حالت بدون اجرای شمع فقط ۱٫۳ درجه تفاوت در شیب نهایی مشاهده می‌شود.

۴- بررسی اقتصادی

بررسی فنی و اقتصادی یکی از مواردی است که در عملیات طراحی معادن باید مورد توجه قرار گیرد. به همین دلیل لازم است مشخص شود که کدام یک از روش‌های پایدارسازی



شکل ۱۹: میزان افزایش شیب دیواره به ازای یک ردیف شمع

باطله برداری را می توان از حاصل ضرب مساحت مثلث ABC در فاصله داری شمع ها به دست آورد. بنابراین میزان کاهش باطله برداری به ازای یک شمع و برای نسبت های مختلف محاسبه می شود که نتایج آن در جدول ۶ آمده است.

بر اساس میزان باطله برداری محاسبه شده در جدول ۶ هزینه باطله برداری برای نسبت های مختلف در جدول ۷ محاسبه شده است.

هزینه شمع کوبی شامل هزینه حفاری و هزینه اجرای شمع می شود که در جدول ۸ قیمت واحد تقریبی و هزینه هر یک از مراحل آمده است.

با مقایسه هزینه باطله برداری و هزینه شمع کوبی می توان بیان کرد که اجرای یک ردیف شمع در مقایسه با باطله برداری غیراقتصادی است. با توجه به این که بیشتر هزینه شمع مربوط به بخش حفاری عمیق آن است، می توان گفت که شمع تنها در طول کم و محدود می تواند توجیه اقتصادی داشته باشد و به دلیل هزینه زیاد در طول های بلند برای پایداری دیواره های بلند به ویژه معادن عمیق توصیه نمی شود. در بررسی انجام شده هزینه زمان در نظر گرفته نشده است و زمان باطله برداری به مراتب بیشتر از اجرای شمع کوبی است.

جدول ۶: محاسبه میزان باطله برداری

ردیف	نسبت $\frac{S}{D}$	میزان افزایش زاویه شیب	مساحت مثلث ABC	میزان باطله برداری (ton)
۱	۲	۳	۸۸۰۰	۴۷۵۲۰
۲	۳	۲	۶۰۰۰	۴۸۶۰۰
۳	۴	۱	۳۰۰۰	۳۲۴۰۰

جدول ۷: محاسبه هزینه باطله برداری

ردیف	شرح عملیات	نسبت $\frac{S}{D}$	واحد	بهای واحد (ریال)	مقدار	بهای کل (ریال)
۱	باطله برداری	۲	تن	۳۸,۰۰۰	۴۷۵۲۰	۱,۸۰۵,۷۶۰,۰۰۰
۲	باطله برداری	۳	تن	۳۸,۰۰۰	۴۸۶۰۰	۱,۸۴۶,۸۰۰,۰۰۰
۳	باطله برداری	۴	تن	۳۸,۰۰۰	۳۲۴۰۰	۱,۲۳۱,۲۰۰,۰۰۰

جدول ۸: محاسبه تقریبی هزینه شمع کوبی

ردیف	شرح عملیات	واحد	بهای واحد (ریال)	طول شمع	بهای کل (ریال)
۱	حفاری عمیق و اجرای آن	متر	۸,۰۰۰,۰۰۰	۲۹۰	۲,۳۲۰,۰۰۰,۰۰۰
جمع کل:					۲,۳۲۰,۰۰۰,۰۰۰

۵- نتیجه‌گیری

بررسی اقتصادی انجام شده مشخص شد که هزینه‌های اجرای شمع با طول‌های زیاد بسیار بالاست و این خود عاملی در عدم استفاده از شمع و غیراقتصادی بودن آن است. در صورتی که زمان عملیات نصب شمع و نیز زمان عملیات باطله‌برداری به صورت فاکتورهای هزینه در نظر گرفته شود شاید بتوان بهتر در مورد اقتصادی بودن شمع‌ها تصمیم‌گیری کرد. هر چند که این موضوع نیاز به بررسی‌های گسترده‌تر دارد و برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

۶- مراجع

- [1] Fukuoka, M. (1977). "The effects of horizontal load on piles due to landslide". In Proceedings of the Specialty Session 10, the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Specialty Session 10, Tokyo, 77-80.
- [2] وزارت صنایع و معادن؛ ۱۳۹۰؛ "دستورالعمل تحلیل پایداری و پایدارسازی شیب در معادن روباز". نشریه معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهوری، شماره ۵۳۸، ص ۳۵.
- [3] قزوینیان، ع؛ ۱۳۸۲؛ "تعالیل حدی روش مناسب جهت تحلیل پایداری سطوح شیبدار". دوره آموزشی تحلیل و پایدارسازی شیب‌ها، ص ۹۹-۱۳۰.
- [4] اصانلو، م؛ ۱۳۸۹؛ "روش‌های استخراج معادن سطحی". انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، چاپ اول، جلد دوم، ص ۶۰۰.
- [5] Ho, I. (2009). "Optimization of pile reinforced slopes using finite element analyses". Graduate Theses and Dissertations, 11130: 297.
- [6] Lee, C. Y., Hull, T. S., and Poulos, H. G. (1995). "Simplified pile-slope stability analysis". Computers and Geotechnics, 17(1): 1-16.
- [7] Hassiotis, S., Chameau, J. L., and Gunaratne, M. (1997). "Design method for stabilization of slopes with piles". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(4): 314-23.
- [8] Cai, F., and Ugai, K. (2000). "Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles". Soils Found, Japan Geotech Society, 40(1): 73-84.
- [9] Ausilio, E., Conte, E., and Dente, G. (2001). "Stability analysis of slopes reinforced with piles". Computers and Geotechnics, 28(8): 591-611.
- [10] Poulos, H. G. (1995). "Design of reinforcing piles

شمع به‌طور گسترده برای پایدارسازی شیروانی‌ها استفاده شده و کارآمدی آن اثبات شده است. شمع می‌تواند به عنوان عضوی موثر در پایدارسازی شیروانی‌ها استفاده شود. انتخاب بهترین مکان برای قرار دادن شمع موضوع مهمی است که پایدار ماندن یا پایدار نماندن شیروانی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این تحقیق به دلیل اهمیت بالای پایداری دیواره نهایی معادن روباز، با بررسی دیواره غربی معدن سرب، روی و باریت مهدی‌آباد و برداشت درزه‌های منطقه، تحلیل پایداری با نرم‌افزار FLAC2D برای پایدارسازی دیواره آن با روش شمع برجا مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل شده به شرح زیر است:

- شیب پایدار دیواره نهایی معدن بدون اجرای شمع کوبی ۴۲ درجه است.
- با اجرای شمع در ۴ طول مختلف در ۱۰ مکان متفاوت در دیواره، طول بحرانی شمع، ۳۰ متر پایین‌تر از سطح لغزش و محل آن در میانه دیواره تعیین شد. شمع انتخاب شده زاویه دیواره معدن را از ۴۲ درجه به ۴۵٫۳ درجه افزایش می‌دهد.
- برای مکان‌یابی ردیف دوم شمع، شمع اول ثابت نگه داشته شده و شمع دوم در دیواره جابه‌جا شد تا بهترین ضریب ایمنی حاصل شود. زاویه نهایی دیواره پایدار شده با ۲ ردیف شمع تا ۴۶٫۳ درجه افزایش یافت.
- اجرای ردیف سوم شمع تاثیری زیادی بر افزایش شیب نهایی ندارد و در این حالت باعث شده است که شیب نهایی به ۴۶٫۸ درجه برسد.
- اجرای شمع در نیمه بالایی دیواره بیشترین تاثیر بر ضریب ایمنی را دارد.
- با افزایش طول شمع تا رسیدن به طول بحرانی (طول عبوری از سطح ریزش)، ضریب ایمنی افزایش می‌یابد اما پس از رسیدن به طول بحرانی، افزایش طول شمع تاثیری بر ضریب ایمنی ندارد.
- اجرای ردیف اول شمع بیشترین تاثیر بر ضریب ایمنی را دارد. اجرای ردیف دوم و سوم تاثیر چندانی ندارد.
- با کاهش نسبت فاصله شمع‌ها به قطر آن (S/D) پایداری شیب افزایش می‌یابد.
- هر چند بر اساس مدل‌سازی عددی نقش شمع‌ها در پایداری دیواره معدن روباز عمیق به خوبی روشن شد ولی بر اساس

- پایدارسازی شیب‌های خاکی". مدرس عمران، دوره چهارده، شماره ۳، ص ۶۹-۶۱.
- [۲۲] مصطفوی مقدم، ا؛ آشتیانی، م؛ ۱۳۹۱؛ "بررسی و مقایسه روش‌های نوین پایدارسازی شیروانی‌های خاکی در شرایط گوناگون". مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، ص ۳۹.
- [۲۳] عبدالهی، ا؛ ۱۳۸۸؛ "نکاتی در خصوص اجرای شمع درجا ریز". انتشارات قرارگاه خاتم‌الانبیاء (ص)، قرب نوح (ع)، چاپ اول، ص ۲۰-۱۰.
- [24] Itasca Consulting Group Inc, "FLAC User Guide". version 7.0.
- [25] <http://www.mehdiabadmine.com>.
- [26] BRGM, (2014). "Mehdiabad lead-zinc deposit pre-feasibility study Geological assessment report N1392". May ,BRGM Department Exploration BP 600945060 Orleans Cedex, France.
- [27] Palmström, A. (1995). "Characterizing rock burst and squeezing by the rock mass index". International conference in design and construction of underground structures. 10: 10.
- [28] Duncan, C. W., and Christopher, W. M. (2005). "Rock Slope Engineering". Civil and Mining- 4th edition, pp. 431.
- to increase slope stability". Canadian Geotechnical Journal, 32: 808-818.
- [11] Li, X., Pei, X., Gutierrez, M., and He, S. (2012). "Optimal location of piles in slope stabilization by limit analysis". Acta Geotechnica, 7(3): 253-259.
- [12] Chow, Y. K. (1996). "Analysis of piles used for slope stabilization". International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 20: 635-646.
- [13] Nian, T. K., Chen, G. Q., Luan, M. T., and Zheng, D. F. (2008). "Limit analysis of the stability of slopes reinforced with piles against landslide in non-homogeneous and anisotropic soils". Canadian Geotechnics Journal, 45: 1092-1103.
- [14] Yang, S., Ren, X., and Zhang, J. (2011). "Study on embedded length of piles for slope reinforced with one row of piles". Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 3(2): 167-178.
- [15] Ashour, M., and Ardalan, H. (2012). "Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction". Computers and Geotechnics, 39: 85-97.
- [16] Salem, T. N., Mashhour, M., and Hassan, R. (2012). "Stabilizing Piles of Soft Cohesive Slopes: A Case History". Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 17: 3803-3820.
- [17] Gullu, H. (2013). "A numerical study on pile application for slope stability". In 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE, Epoka University, Tirana, Albania, 810-816.
- [18] Shooshpasha, I., and Amirdehi, H. A. (2014). "Evaluating the stability of slope reinforced with one row of free head piles". Arabian Journal of Geosciences, 8(4): 2131-2141.
- [19] Ho, I. H. (2014). "Numerical Study of Slope-Stabilizing Piles in Undrained Clayey Slopes with a Weak Thin Layer". International Journal of Geomechanics, 15(5): 06014025.
- [۲۰] خواجه‌پور، پ؛ حسام مقدم، ع؛ ۱۳۸۶؛ "تحلیل پایداری دیواره شمال غربی معدن سرب و روی انگوران با استفاده از نرم‌افزار FLAC". سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ص ۳.
- [۲۱] حاجی عزیز، م؛ باولی، م؛ ۱۳۹۳؛ "بهینه‌یابی مکان شمع در

^۱ Continues

^۲ Hybrid Methods

^۳ Ito

^۴ Lee

^۵ Hassiotis

^۶ cai

^۷ Ugai

^۸ Ausilio

^۹ Xinpo Li

^{۱۰} Point bearing pile

^{۱۱} Friction pile

^{۱۲} Compaction pile

^{۱۳} Palmstrom