

ارزیابی جامع پایداری شیب در معدن روباز طلای آق‌دره (تکاب) با رویکرد تلفیقی تجربی، سینماتیکی و تعادل حدی

علی نقی دهقان^{۱*}

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۴ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۲

(*) نویسنده مسئول: a.dehghan@srbiau.ac.ir

چکیده

طراحی پایدار شیب در معادن روباز، یکی از چالش‌های اساسی در مهندسی معدن است که تأثیر مستقیمی بر ایمنی، بهره‌وری و اقتصاد پروژه دارد. هدف این پژوهش، ارزیابی جامع پایداری دیواره‌های پیت در معدن طلای آق‌دره (تکاب) با استفاده از ترکیب روش‌های تجربی، سینماتیکی و تعادل حدی است. مطالعه بر روی سه پیت اصلی (شماره‌های ۱، ۲ و ۶) و پنج لاین (دیواره) کلیدی انجام شد. ابتدا، ۲۵۹ سری ناپیوستگی برداشت و ۵۰ نمونه مغزه تحت آزمون‌های استاندارد مکانیک سنگ (شامل مقاومت فشاری تک‌محوری و سه‌محوری، برش مستقیم، سرعت موج و خواص فیزیکی) قرار گرفتند. سپس پایداری با سه دسته روش ارزیابی شد: (۱) روش‌های تجربی (SMR ، $MRMR$ ، RMR و GSI)، (۲) تحلیل سینماتیکی (بررسی گسیختگی‌های صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی) و (۳) تحلیل تعادل حدی در حالت‌های استاتیکی و شبه‌استاتیکی (با شتاب افقی $0.16g$). طبقه‌بندی‌های تجربی نشان داد کیفیت توده‌سنگ در رده "خوب" تا "متوسط تا خوب" قرار دارد ($MRMR=50-53$ ، $RMR=61-65$). تحلیل سینماتیکی مشخص کرد پتانسیل گسیختگی گوه‌ای بیشتر از دو مود دیگر است و با افزایش شیب تک‌پله از ۴۰ به ۷۰ درجه، احتمال وقوع هر سه نوع گسیختگی ساختاری افزایش می‌یابد. تحلیل تعادل حدی نشان داد تمامی لاین‌ها در هر دو حالت استاتیک و شبه‌استاتیک دارای فاکتور ایمنی بالاتر از حد قابل قبول بوده و در شرایط پایدار قرار دارند (حداقل $FOS=1.56$ برای لاین ۴ در حالت شبه‌استاتیک). طراحی هندسی فعلی دیواره‌های پیت معدن آق‌دره از نظر پایداری در شرایط استاتیکی و لرزه‌ای (با شتاب $0.16g$) ایمن است. رویکرد تلفیقی به‌کاررفته، قابلیت بالایی در اعتمادسازی به نتایج دارد. استقرار سیستم پایش (مانیتورینگ) و به‌روزرسانی تحلیل‌ها با شروع عملیات استخراج توصیه می‌شود.

پایداری شیب، معدن طلای آق‌دره، روش تعادل حدی، تحلیل سینماتیکی، طبقه‌بندی توده‌سنگ، گسیختگی‌های ساختاری

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

امروزه با گسترش معادن روباز بزرگ مقیاس و کاهش عیار کانی‌ها، طراحی بهینه و ایمن شیب‌های نهایی پیت (*Pit*) از اهمیت حیاتی برخوردار شده است. یک شیب تندتر، نسبت باطله‌برداری را کاهش داده و ارزش اقتصادی پروژه را افزایش می‌دهد، در حالی که یک شیب با ضریب اطمینان پایین، خطر ریزش، توقف عملیات و تلفات جانی و مالی را به همراه دارد [۱، ۲]. پایداری طولانی‌مدت شیب‌های مهندسی‌شده نیز به عنوان یک مسئله حیاتی در آستانه تعطیلی معادن روباز مطرح شده است؛ چراکه خواص توده سنگ ثابت نبوده و شیب‌هایی که امروز پایدار هستند ممکن است در آینده پایدار نمانند [۳]. پایداری توده سنگ در محیط‌های درزه‌دار، عمدتاً توسط ناپیوستگی‌ها کنترل می‌شود. هندسه، جهت‌گیری، فاصله‌داری، تداوم، زبری و پرکنندگی درزه‌ها، عوامل کلیدی در تعیین موده‌های احتمالی گسیختگی (صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی) هستند [۴، ۵]. پیچیدگی ذاتی توده سنگ‌های ناپیوسته و ناهمسان، دستیابی به تحلیل‌های دقیق و قابل اعتماد را با چالش مواجه می‌سازد [۶]. روش‌های متعددی برای تحلیل پایداری شیب وجود دارد که هر یک نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارند. در دهه اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در روش‌های پایش (همچون تلفیق اسکنر لیزری زمینی و پهپادها)، مدل‌سازی عددی پیشرفته، الگوریتم‌های بهینه‌سازی و هوش مصنوعی در مهندسی شیب رخ داده است [۷، ۸، ۹]. روش‌های تجربی مانند طبقه‌بندی ژئومکانیکی (*RMR*) [۱۰]، سیستم اصلاح شده معدنی (*MRMR*) [۱۱]، امتیاز توده شیروانی (*SMR*) [۱۲] و شاخص مقاومت زمین‌شناسی (*GSI*) [۱۳] ارزیابی سریعی از کیفیت توده سنگ ارائه می‌دهند. سیستم *Q-Slope* که در سال‌های اخیر با پایگاه داده‌ای از بیش از ۶۰۰ مطالعه موردی در ۳۶ نوع سنگ و ۵ قاره به‌روزرسانی شده، رویکردی تجربی برای انتخاب زاویه شیب پایدار در شرایط مختلف زمین‌شناسی فراهم

می‌آورد [۱۴]. تحلیل سینماتیکی با استفاده از استریوگرافی، به‌طور خاص به بررسی پتانسیل لغزش بر روی ناپیوستگی‌ها می‌پردازد و موده‌های گسیختگی بالقوه را شناسایی می‌کند [۴، ۱۵]. پژوهش‌های اخیر نشان داده است که تناوب لایه‌های سخت و ضعیف همراه با ناپیوستگی‌های متعدد، نقش تعیین‌کننده‌ای در ایجاد ریزش‌های سنگی دارد و تحلیل سینماتیکی می‌تواند تقاطع‌های بحرانی منجر به گسیختگی گوه‌ای را به خوبی شناسایی کند [۱۶]. نهایتاً، روش تعادل حدی (*LEM*) با محاسبه فاکتور ایمنی بر اساس معیارهای مقاومتی، یک معیار کمی برای قضاوت در مورد پایداری شیب فراهم می‌آورد [۱۷]. معیار شکست غیرخطی هوک-براون (*HB*) به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای تخمین مقاومت توده سنگ‌های درزه‌دار، در تحلیل‌های پایداری به کار گرفته می‌شود. روش‌های خطی‌سازی مانند روش پارامترهای مقاومتی معادل مور-کولمب [۱۸] و روش مماس عمومی [۱۹] امکان استفاده از این معیار را در روش‌های تعادل حدی و آنالیز حدی فراهم کرده‌اند. تحقیقات جدید نشان می‌دهد که در نظر گرفتن مقاومت کششی توده سنگ در تحلیل‌های سه بعدی، تأثیر قابل توجهی بر فاکتور ایمنی و شکل سطح گسیختگی دارد [۲۰، ۲۱، ۲۲]. همچنین، استراتژی‌های کاهش مقاومت مبتنی بر اصل تغییرات، امکان تحلیل پایداری شیب‌های سنگی را بدون نیاز به مفروضات اولیه در مورد سطح لغزش فراهم می‌آورد [۲۳]. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در روش‌های عددی مانند روش المان مجزا (*DEM*) و مدل‌سازی شبکه شکستگی گسسته (*DFN*)، کاربرد عملی این روش‌ها در مقیاس پروژه‌های مهندسی همچنان با محدودیت‌هایی مواجه است. پژوهش‌های جدید رویکردهای تلفیقی را پیشنهاد کرده‌اند که با ترکیب تئوری بلوک با شبیه‌سازی‌های *DFN-DEM*، ضمن افزایش کارایی محاسباتی، تحلیل جامع‌تری از پایداری ارائه می‌دهند [۶]. در همین راستا، روش‌های یادگیری ماشین نیز با دقت بالای ۹۰ درصد

پایداری برای اولویت‌بندی مناطق بحرانی است که آن را از مطالعات پیشین که عمدتاً از یک یا دو روش با داده‌های محدود استفاده کرده‌اند، متمایز می‌سازد. این پژوهش ضمن پر کردن خلأ موجود در ادبیات فنی منطقه، چارچوبی عملیاتی برای ارزیابی پایداری در معادن مشابه فراهم می‌آورد.

۲- مشخصات معدن طلای آق‌دره

۲-۱- معرفی معدن

کانسار طلای آق‌دره در جنوب استان آذربایجان غربی و در فاصله ۳۵ کیلومتری شمال غربی شهرستان تکاب واقع شده است (شکل ۱). این کانسار در چهار ضلعی مربعی شکل با مساحت ۳۹/۸۸ کیلومترمربع در غرب نقشه زمین‌شناسی (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) تخت سلیمان قرار دارد. روستاهای آق‌دره علیا و آق‌دره وسطی نزدیک‌ترین آبادی‌های اطراف معدن می‌باشند. به طوری که روستای آق‌دره علیا در فاصله ۲ کیلومتری شمال و روستای آق‌دره وسطی در فاصله تقریبی ۲/۲ کیلومتری شرق معدن واقع شده‌اند. محدوده مورد مطالعه در فاصله تقریبی ۳۵ کیلومتری شمال غربی شهرستان تکاب واقع شده است که دسترسی به آن از طریق دو مسیر امکان پذیر است: مسیر اول، استفاده از جاده تکاب - تخت سلیمان است. مسیر دوم دسترسی به محدوده استفاده از جاده آسفalte زنجان - دندی - تخت سلیمان است.

۲-۲- ویژگی‌های زمین‌شناسی و ساختاری معدن

کانسار طلای آق‌دره از نظر تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین‌ساختی ایران، این محدوده در پهنه البرز-آذربایجان و در محل تلاقی آن با زون‌های سهندج-سیرجان و ایران مرکزی قرار دارد (شکل ۲) [۲۷، ۲۸، ۲۹]. منطقه مورد بررسی از دیدگاه ساختمانی دارای سه پهنه متفاوت قاره‌ای، دگرگونی و اقیانوسی است که با مرزهای گسله در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. ناحیه تکاب-انگوران که

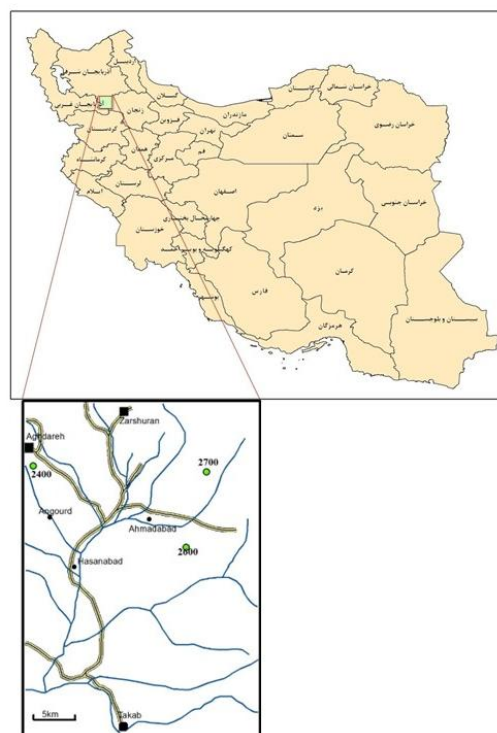
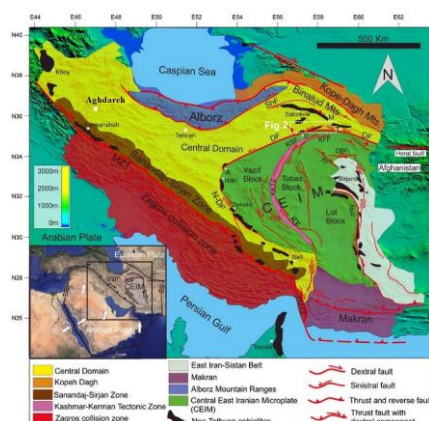
در پیش‌بینی فاکتور ایمنی شیب‌ها و ارائه سرعت محاسباتی تا ۱۸ برابر سریع‌تر از روش‌های تعادل حدی، به‌عنوان ابزاری کارآمد در تحلیل پایداری شیب معرفی شده‌اند [۲۴، ۲۵، ۲۶].

کانسار طلای آق‌دره در جنوب استان آذربایجان غربی واقع شده و یکی از ذخایر مهم طلای نوع کارلین (ذخایر طلای دگرسان‌شونده در سنگ‌های کربناته با ساختار پیچیده درزه‌داری) در ایران محسوب می‌شود [۲۷]. با توجه به گسترش عملیات استخراج در این معدن، ارزیابی پایداری دیواره‌های پیت برای اطمینان از ایمنی عملیات و بهینه‌سازی طراحی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف اصلی این تحقیق، پاسخ به این سوال است که آیا طراحی هندسی فعلی دیواره‌های پیت در سه زون (*Zone*) اصلی معدن آق‌دره، در شرایط استاتیکی و لرزه‌ای (شبه‌استاتیکی) پایدار است یا خیر. بدین منظور، با تلفیق سه روش تجربی (شامل سیستم‌های *RMR*، *SMR*، *MRMR* و *GSI*)، تحلیل سینماتیکی و تحلیل تعادل حدی (با استفاده از معیار هوک-براون) و با تکیه بر داده‌های غنی میدانی و آزمایشگاهی، پایداری معدن روباز طلای آق‌دره مورد ارزیابی جامع قرار گرفته است تا ضمن اطمینان از ایمنی عملیات، راهکارهای بهینه‌سازی نیز ارائه گردد.

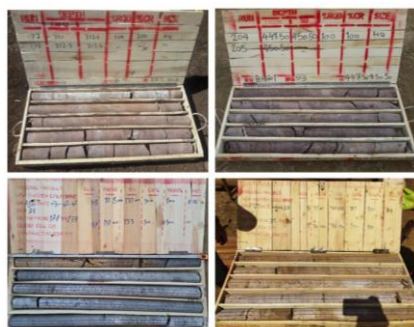
با وجود پژوهش‌های متعدد در زمینه پایداری شیب در معادن روباز [۷-۱]، خلأ علمی مشخصی در مورد کاربرد رویکردهای تلفیقی چندمعیاره در معدن طلای نوع کارلین ایران وجود دارد. پژوهش‌های پیشین در این منطقه عمدتاً بر روی زمین‌شناسی و کانی‌سازی متمرکز بوده [۲۷، ۲۸] و هیچ مطالعه جامعی با استفاده از داده‌های غنی آزمایشگاهی و صحرایی انجام نشده است. نوآوری این پژوهش در (۱) ارائه اولین مطالعه تلفیقی پایداری شیب در این نوع کانسارها با استفاده از همزمان شش روش تجربی و تحلیلی، (۲) یکپارچه‌سازی داده‌های آزمایشگاهی (۵۰ نمونه) و صحرایی (۲۵۹ ناپیوستگی) در یک پایگاه داده واحد، و (۳) ارائه مدل مفهومی

میزبان ذخایر طلای زرشوران و آق دره است، در شمال غرب ایران بین کمربند آتشفشانی ارومیه-دختر و زون دگرگونی-نفوذی سنج-سیرجان واقع شده است [۳۰].

روندهای شرقی-غربی نیز مشاهده می شود. جابه جایی قائم در امتداد این گسل ها بیشتر از جابه جایی افقی است که به دلیل یکسان بودن جنس لایه ها در دو طرف صفحه گسل، تنها از طریق اختلاف ارتفاع و ایجاد پرتگاه قابل تشخیص است [۲۷].



شکل ۲- زون های ساختاری ایران و موقعیت کانسار طلای آق دره بر روی پهنه ی مرکزی [۲۷]



شکل ۳- تصاویری از جعبه مغزه های حاصل از حفاری اکتشافی در محدوده معدن.

۳- مطالعات آزمایشگاهی و ویژگی های ژئومکانیکی

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و ژئومکانیکی سنگ میزبان و ارائه پارامترهای ورودی برای تحلیل پایداری، مجموعه ای از آزمون های استاندارد آزمایشگاهی بر روی مغزه های حاصل از حفاری اکتشافی در بخش های مختلف معدن انجام گرفت (شکل ۴). کلیه آزمون ها مطابق با استانداردهای انجمن بین المللی مکانیک سنگ (*ISRM*) و انجمن آزمایش و مواد آمریکا (*ASTM*) و

شکل ۱- نمایی از موقعیت جغرافیایی و راه های دسترسی به محدوده معدنی طلای آق دره.

بر اساس بررسی های صحرایی و حفاری های اکتشافی (شکل ۳)، واحدهای سنگ آهک توده ای و ریفی (سنگ میزبان اصلی)، ماسه سنگ و کنگلومرا (سازند قم)، مارن های رنگارنگ (در ادامه رسوبات ماسه سنگ و کنگلومرا) و تراورتن (جوانترین واحد سنگی) در محدوده معدن شناسایی شده اند [۲۷].

از دیدگاه تکتونیکی، گسل ها در محدوده معدن اغلب دارای حالت کششی بوده و شیبی نزدیک به قائم دارند. در زون مادر بزرگ (بخش غربی محدوده)، گسل ها عمدتاً دارای امتداد شمال غربی-جنوب شرقی (*NW-SE*) هستند. در زون پدر بزرگ (بخش شرقی محدوده)، روند غالب گسل ها شمالی-جنوبی (*N-S*) بوده و گاهی

موج برشی (V_s) در نمونه‌های خشک بین ۲۰۴۰ تا ۲۶۶۳ متر بر ثانیه و در نمونه‌های اشباع بین ۲۳۴۴ تا ۲۹۲۳ متر بر ثانیه متغیر بود (جدول ۱).

د) آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلین - *ISRM*): این آزمون بر روی ۳۰ نمونه با دستگاه *Controls 50-D* (ظرفیت ۶۰۰ کیلونیوتن) انجام شد. نمونه استوانه‌ای بین دو صفحه بارگذاری قوسی شکل قرار گرفته و بار فشاری با نرخ ۰.۲ کیلونیوتن بر ثانیه اعمال گردید. مقاومت کششی از رابطه $\sigma_t = 0.636 (D \times t) / (P \times \mu)$ محاسبه شد. دامنه تغییرات مقاومت کششی بین ۱.۶ تا ۱۰.۱ مگاپاسکال متغیر بود (جدول ۱).

ه) آزمون شاخص بار نقطه‌ای (*ISRM - ASTM D5731*): این آزمایش بر روی ۳۰ نمونه با دستگاه بار نقطه‌ای ساخت شرکت *ELE* (ظرفیت ۵۰ کیلونیوتن) انجام شد. شاخص بار نقطه‌ای اصلاح‌شده (*Is(50)*) از رابطه $Is(50) = \sqrt{(D/50) \times P/De^2}$ محاسبه گردید. دامنه تغییرات بین ۰.۷ تا ۵.۵ مگاپاسکال متغیر بود (جدول ۱).

و) آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری (*ISRM - UCS*): این آزمایش بر روی ۵۰ نمونه استوانه‌ای با نسبت طول به قطر ۲ تا ۲.۵ و قطر ۶۳.۵ میلی‌متر (*HQ*) با دستگاه سروو هیدرولیک *Instron 1346* (ظرفیت ۶۰۰ کیلونیوتن، دقت ۰.۵٪) انجام شد. هم‌زمان با بارگذاری، تغییر شکل‌های محوری و جانبی با استفاده از سه عدد مبدل *LVDT* ثبت شدند تا منحنی تنش-کرنش رسم و مدول الاستیسیته و نسبت پواسون محاسبه گردند. دامنه تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری از ۴.۲ تا ۱۵.۱۱ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته از ۰.۸۳ تا ۱۵.۱۱ گیگاپاسکال و نسبت پواسون از ۰.۲۳ تا ۰.۳۹ متغیر بود (جدول ۱).

ز) آزمون مقاومت فشاری سه‌محوری (*ISRM*): این آزمایش بر روی ۳۰ نمونه با دستگاه *Instron 1346* مجهز به سلول سه‌محوری هوک (*Hoek Cell*) با

در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه علوم و تحقیقات تهران به شرح زیر اجرا شدند (خلاصه نتایج آزمون‌های مکانیک سنگ در جدول ۱ ارائه شده است):

الف) آماده‌سازی نمونه‌ها: پس از انتقال جعبه‌های مغزه به آزمایشگاه، ابتدا مغزه‌های شاخص از گمانه‌های مختلف (شامل *A133*, *A129*, *A110*, *A127* و *A135* (غیره) انتخاب و بر اساس استاندارد *ISRM* آماده‌سازی شدند. عملیات آماده‌سازی شامل برش نمونه‌ها با دستگاه برش مجهز به الماسه، صاف‌سازی سطوح انتهایی با دستگاه ساینده (*Grinding Machine*)، صاف‌سازی سطح جانبی و کدگذاری نمونه‌ها بود.

ب) آزمون‌های تعیین خواص فیزیکی (چگالی، تخلخل و درصد جذب آب - *ISRM*): این آزمایش با هدف تعیین چگالی سنگ در حالت خشک و اشباع، تخلخل و درصد جذب آب بر روی ۳۰ نمونه انجام گرفت. نمونه‌ها ابتدا به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شده و سپس به مدت ۴۸ ساعت در آب مقطر غوطه‌ور شدند. وزن‌ها با استفاده از ترازوی هیدرواستاتیک با دقت ۰.۰۱ گرم اندازه‌گیری شدند. دامنه تغییرات چگالی خشک و اشباع به ترتیب از ۱.۸۳ تا ۲.۶۷ و از ۲.۲ تا ۲.۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب، تخلخل از ۱.۴ تا ۳۷.۱ درصد و جذب آب از ۰.۵ تا ۲۰.۱ درصد متغیر بوده است (جدول ۱).

ج) آزمون‌های تعیین خواص الاستیک (سرعت سیر موج - *ASTM D2845*): این آزمایش غیرمخرب به منظور اندازه‌گیری سرعت امواج تراکمی (V_p) و برشی (V_s) بر روی ۳۰ نمونه در حالت خشک و اشباع انجام شد. دستگاه مورد استفاده، اولتراسونیک ساخت شرکت *Proceq* (مدل *Pundit Lab*) با دو مبدل ۵۴ کیلوهرتز و دقت اندازه‌گیری زمان ۰.۱ میکروثانیه بود. سرعت موج تراکمی (V_p) در نمونه‌های خشک بین ۳۸۹۹ تا ۴۷۵۶ متر بر ثانیه و در نمونه‌های اشباع بین ۴۳۷۵ تا ۵۲۸۷ متر بر ثانیه متغیر بود. همچنین سرعت

Farrance 2510 (نیروی قائم و برشی تا ۵ کیلونیوتن) انجام شد. با تکرار آزمایش در تنش‌های عمودی مختلف، پوش مقاومت برشی موهر-کولمب ترسیم و مقادیر چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) سطح برش محاسبه شد. دامنه تغییرات چسبندگی از ۰.۴۳ تا ۲.۶۸ مگاپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی از ۲۸.۱ تا ۴۸.۸ درجه متغیر بود (جدول ۱).

قابلیت اعمال فشار جانبی تا ۷۰ مگاپاسکال انجام شد. با رسم دایره‌های مور در لحظه گسیختگی، پوش مقاومت برشی موهر-کولمب ترسیم و مقادیر چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) استخراج گردید. دامنه تغییرات چسبندگی از ۰.۳۴ تا ۸.۷ مگاپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی از ۳۷.۷ تا ۴۹.۳ درجه متغیر بود (جدول ۱).

ح) آزمون برش مستقیم (*ISRM*): این آزمایش بر روی ۵۰ نمونه با دستگاه برش مستقیم *Wykeham*

جدول ۱- خلاصه نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگ.

ردیف	پارامتر	محدوده تغییرات	میانگین
۱	چگالی خشک (gr/cm^3)	۱.۸۳-۲.۶۷	۲.۴۵
۲	چگالی اشباع (gr/cm^3)	۲.۲-۲.۶۹	۲.۵۵
۳	تخلخل (%)	۱.۴-۳۷.۱	۱۲.۳
۴	جذب آب (%)	۰.۵-۲۰.۱	۵.۲
۵	سرعت موج تراکمی-خشک (m/s)	۳۸۹۹-۴۷۵۶	۴۲۱۵
۶	سرعت موج تراکمی-اشباع (m/s)	۴۳۷۵-۵۲۸۷	۴۷۸۲
۷	سرعت موج برشی-خشک (m/s)	۲۰۴۰-۲۶۶۳	۲۲۸۰
۸	سرعت موج برشی-اشباع (m/s)	۲۳۴۴-۲۹۲۳	۲۵۷۰
۹	مقاومت کششی برزیلین (MPa)	۱.۶-۱۰.۱	۴.۸
۱۰	شاخص بار نقطه‌ای $Is(50)$ (MPa)	۰.۷-۵.۵	۲.۸
۱۱	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	۴.۲-۱۰۷.۹	۴۲.۵
۱۲	مدول الاستیسیته E (GPa)	۰.۸۳-۱۵.۱۱	۶.۷
۱۳	نسبت پواسون (ν)	۰.۲۳-۰.۳۹	۰.۳۱
۱۴	چسبندگی (MPa) - آزمون سه محوری	۰.۳۴-۸.۷	۲.۱
۱۵	زاویه اصطکاک داخلی (درجه) - آزمون سه محوری	۳۷.۷-۴۹.۳	۴۳.۵
۱۶	چسبندگی (MPa) - آزمون برش مستقیم	۰.۴۳-۲.۶۸	۱.۳
۱۷	زاویه اصطکاک داخلی (درجه) - آزمون برش مستقیم	۲۸.۱-۴۸.۸	۳۹.۷



شکل ۴- انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های مختلف؛ (الف) آماده‌سازی نمونه، (ب) تعیین خواص فیزیکی، (ج) اندازه‌گیری سرعت موج، (د) آزمون برش مستقیم، (ه) آزمون تک‌محوری، (و) آزمون برزیلین، (ز) آزمون بار نقطه‌ای و (ح) آزمون سه‌محوری.

سنگ ضرورت دارد.

ویژگی‌های سطح ناپیوستگی‌ها نقش مهمی در وضعیت پایداری شیب ایفا می‌کند. گسیختگی‌ها در سطوح شیب‌دار در طول ناپیوستگی‌ها رخ می‌دهد که متأثر از خصوصیات سطح درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها می‌باشد. همچنین خصوصیات سطح ناپیوستگی‌ها در بسیاری از طبقه‌بندی‌های مهندسی توده سنگ از جمله $MRMR$ ، GSI و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. خصوصیات مهم ناپیوستگی‌ها عبارتند از: شیب و جهت شیب، شکل و زبری سطح، فاصله‌داری، تداوم، پرشدگی و نظایر آن.

با توجه به اینکه لاین‌های (Line) مورد نظر (لاین‌های ۱ تا ۵) در محدوده مورد مطالعه در سه بخش مجزا (پیت‌های ۱، ۲ و ۶) قرار دارد (شکل ۵)، برداشت صحرائی و تحلیل

۴- بررسی وضعیت زمین ساختاری معدن

در این بخش، به برداشت ناپیوستگی‌های موجود (از جمله درزه و گسل) در محدوده مورد مطالعه پرداخته می‌شود و در ادامه وضعیت سیستم ناپیوستگی در دیواره‌های مختلف معدن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

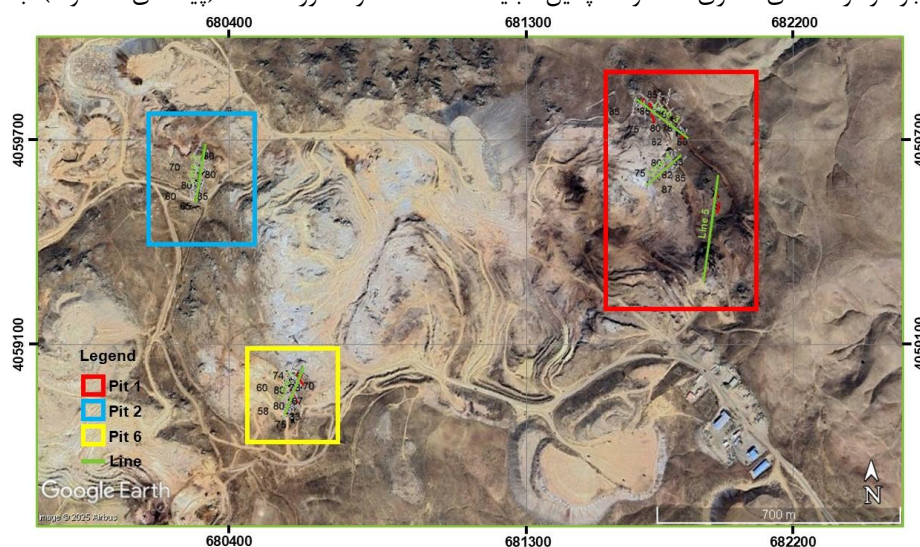
۴-۱- برداشت صحرائی ناپیوستگی‌ها

ساختار توده سنگ در یک دیواره به‌طور کلی شامل ناپیوستگی‌های متعددی است. درزه‌ها و سایر ناپیوستگی‌ها، هر یک به‌تنهایی یا در ترکیب با یکدیگر، می‌توانند نقش اساسی در ناپایداری دیواره ایفا کنند. برداشت و تعیین سیستم درزه‌داری و ناپیوستگی‌ها و خصوصیات سطح آنها به منظور طراحی بهینه در مسائل مهندسی سنگ و رفتار مکانیکی توده

دسترسی به آنها، در محدوده پیت‌های مورد مطالعه، جمعاً تعداد ۱۷ ایستگاه مطابق جدول ۲ انتخاب گردید. در هر ایستگاه پارامترهای ثبت شده در خصوص برداشت ناپیوستگی‌ها، مطابق پیشنهاد *ISRM* انجام شد. در مجموع تعداد ۲۵۹ ناپیوستگی در تمامی ایستگاه‌های موجود در محدوده مورد مطالعه (پیت‌های ۱، ۲ و ۶) ثبت گردیده است.

سینماتیکی در هر سه پیت به تفکیک هر لاین انجام شده است. در شکل ۵ موقعیت هر سه زون برای برداشت صحرایی ناپیوستگی‌ها و تحلیل سینماتیکی لاین‌های مختلف نشان داده شده است.

به منظور مطالعه سیستم ناپیوستگی، با توجه به رخنمون‌های سنگی موجود و ترانشه‌های حفاری شده و همچنین قابلیت



شکل ۵- موقعیت محدوده پیت‌های مختلف و ایستگاه‌های برداشت ناپیوستگی‌ها در محدوده مورد مطالعه معدن.

جدول ۲- مختصات ایستگاه‌های برداشت ناپیوستگی در محدوده مورد مطالعه معدن.

پیت	لاین	ایستگاه	مختصات جغرافیایی (متر)	
			طول X	عرض Y
	۳	۱	681674	4059873
		۲	681669	4059855
		۳	681723	4059842
		۴	681797	4059795
۱	۴	۱	681775	4059691
		۲	681750	4059665
		۳	681727	4059642
		۱	681911	4059611
	۵	۲	681887	4059498
		۳	681862	4059386
۲	۲	۱	680351	4059672
		۲	680347	4059625
		۳	680339	4059574
		۱	680669	4059035
۶	۱	۲	680656	4059001
		۳	680641	4058962
		۴	680629	4058932

۴-۲- تعیین سیستم ناپیوستگی

به منظور شناسایی سیستم‌های درزه‌داری و ناپیوستگی‌های مؤثر بر پایداری دیواره‌های پیت، تعداد ۱۷ ایستگاه برداشت صحرایی در سه پیت اصلی معدن (شماره‌های ۱، ۲ و ۶) انتخاب شد. در مجموع ۲۵۹ ناپیوستگی شامل درزه‌ها، شکستگی‌ها و زون‌های گسلی برداشت گردید. برداشت ناپیوستگی‌ها مطابق با استاندارد *ISRM* انجام شد و پارامترهای جهت‌گیری (شیب و جهت شیب)، فاصله‌داری، تداوم، بازشدگی، زبری و پرکنندگی برای هر ناپیوستگی ثبت گردید. تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار *Dips* نسخه ۷ انجام شد و برای هر لاین، استریوگرام قطب و صفحات دسته درزه‌ها و دیاگرام گل سرخی ناپیوستگی‌ها ترسیم گردید.

۴-۲-۱- سیستم ناپیوستگی در پیت شماره ۱ (لاین‌های ۳، ۴ و ۵)

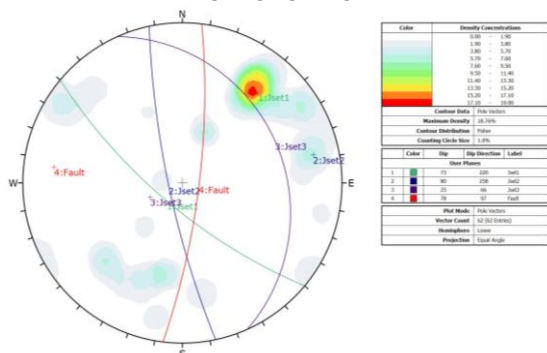
در محدوده پیت شماره ۱، سه لاین با راستاهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت:

لاین شماره ۳ (راستای شمال‌غربی-جنوب‌شرقی): در این لاین، ۴ ایستگاه و مجموعاً ۶۲ ناپیوستگی ثبت شد. استریوگرام قطب و صفحات و دیاگرام گل سرخی ناپیوستگی‌ها در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. روند غالب ناپیوستگی‌ها در امتداد جنوب‌شرقی-شمال‌غربی است و یک روند فرعی در امتداد شمال‌شرقی-جنوب‌غربی نیز مشاهده می‌شود. دسته درزه‌های اصلی (*JSet1*) با مشخصات (جهت شیب/شیب) ۷۳/۲۲۰ درجه و دسته درزه‌های فرعی (*JSet2*) با مشخصات ۸۰/۲۵۸ درجه شناسایی شدند. یک زون گسلی اصلی با مشخصات ۷۸/۹۷ درجه در این لاین ثبت شده است.

لاین شماره ۴ (راستای شمال‌شرقی-جنوب‌غربی): در این لاین، ۳ ایستگاه و مجموعاً ۷۶ ناپیوستگی ثبت شد. استریوگرام قطب و صفحات و دیاگرام گل سرخی ناپیوستگی‌ها در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. روند غالب ناپیوستگی‌ها در دو امتداد تقریباً شمالی-جنوبی و شمال‌شرقی-جنوب‌غربی قرار دارد. دو دسته درزه اصلی با مشخصات (جهت شیب/شیب) ۸۷/۸۱ درجه و ۷۵/۳۱۷ درجه شناسایی شدند. یک زون گسلی اصلی با مشخصات ۶۴/۱۲۲ درجه در این لاین مشاهده شده است.

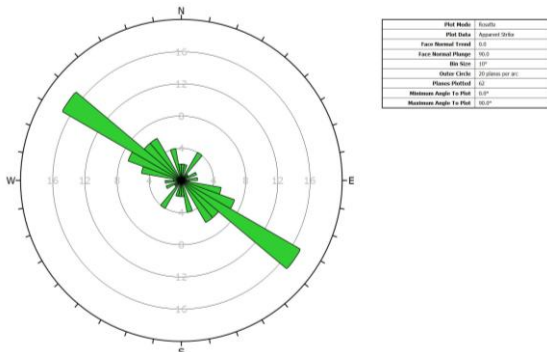
لاین شماره ۵ (راستای شمالی-جنوبی): در این لاین، ۳

ایستگاه و مجموعاً ۲۵ ناپیوستگی ثبت شد. استریوگرام قطب و صفحات و دیاگرام گل سرخی ناپیوستگی‌ها در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. روند غالب ناپیوستگی‌ها در امتداد شمال‌شرقی-جنوب‌غربی است. سه دسته درزه با مشخصات (جهت شیب/شیب) ۱۳/۱۲۴ درجه، ۵۰/۲۹۵ درجه و ۷۸/۵۵ درجه شناسایی شدند. یک زون گسلی اصلی با مشخصات ۴۰/۱۰۷ درجه در این لاین ثبت شده است.



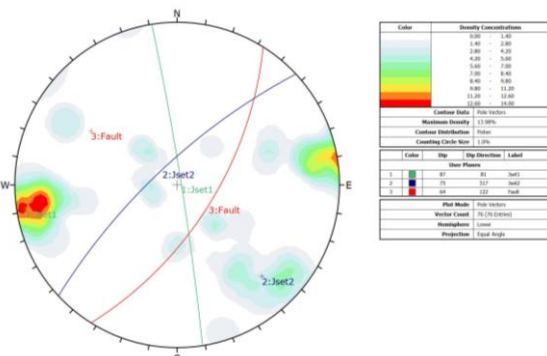
شکل ۶- استریوگرام قطب و صفحات دسته درزه‌ها در

محدوده لاین شماره ۳ (پیت ۱)



شکل ۷- دیاگرام گل سرخی ناپیوستگی‌های برداشت شده

در محدوده لاین شماره ۳ (پیت ۱)



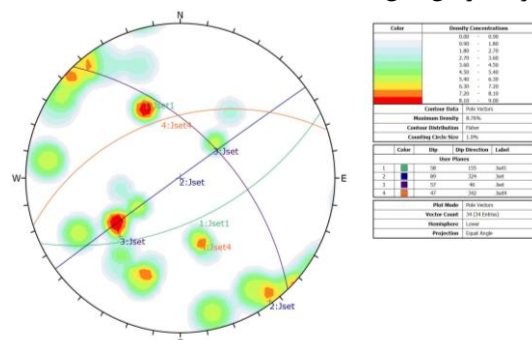
شکل ۸- استریوگرام قطب و صفحات دسته درزه‌ها در

محدوده لاین شماره ۴ (پیت ۱)

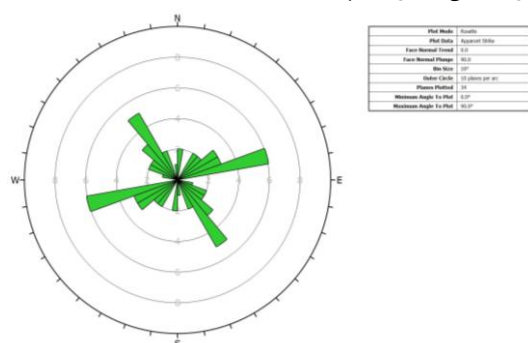
و ۱۳ نشان داده شده است. روند غالب ناپیوستگی‌ها در دو امتداد شمال شرقی-جنوب غربی و شمال غربی-جنوب شرقی قرار دارد. چهار دسته درزه اصلی با مشخصات (جهت شیب/شیب) ۵۸/۱۵۵ درجه، ۸۹/۳۲۴ درجه، ۵۷/۴۶ درجه و ۴۷/۳۴۲ درجه شناسایی شدند.

۴-۲-۳- سیستم ناپیوستگی در پیت شماره ۶ (لاین ۱)

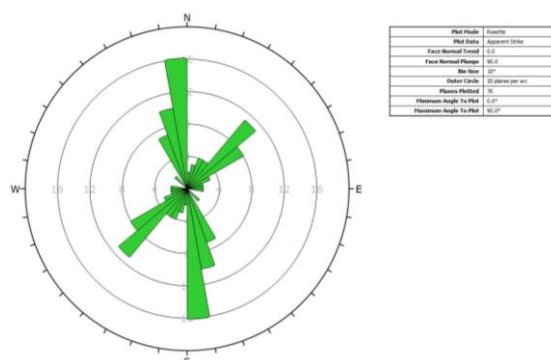
در محدوده پیت شماره ۶، تنها یک لاین با راستای شمال شرقی-جنوب غربی مورد بررسی قرار گرفت. در لاین شماره ۱، ۴ ایستگاه و مجموعاً ۶۲ ناپیوستگی ثبت شد. استریوگرام قطب و صفحات و دیاگرام گل سرخی ناپیوستگی‌ها در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. روند غالب ناپیوستگی‌ها تقریباً در دو امتداد شرقی-غربی و شمالی-جنوبی قرار دارد. سه دسته درزه با مشخصات (جهت شیب/شیب) ۶۷/۱۵۱ درجه، ۶۴/۸۶ درجه و ۵۱/۲۵۹ درجه شناسایی شدند. یک زون گسلی اصلی با مشخصات ۸۲/۲۴۱ درجه در این لاین ثبت شده است.



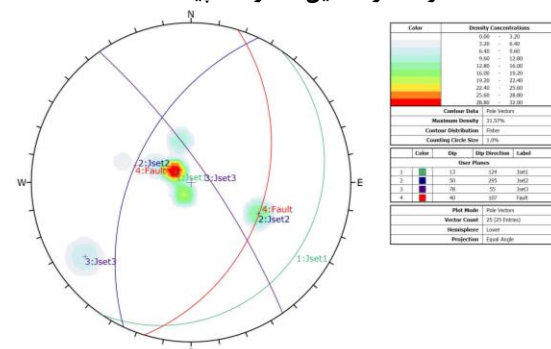
شکل ۱۲- استریوگرام قطب و صفحات دسته درزه‌ها در محدوده لاین شماره ۲ (پیت ۲)



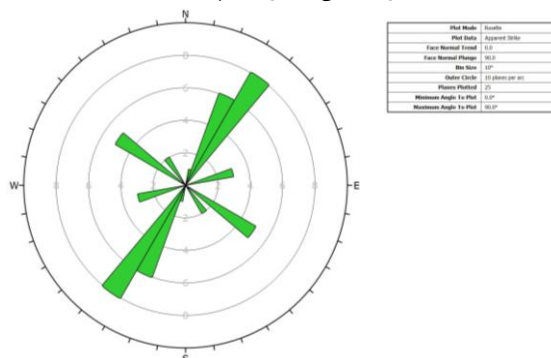
شکل ۱۳- دیاگرام گل سرخی ناپیوستگی‌های برداشت شده در محدوده لاین شماره ۲ (پیت ۲)



شکل ۹- دیاگرام گل سرخی ناپیوستگی‌های برداشت شده در محدوده لاین شماره ۴ (پیت ۱)



شکل ۱۰- استریوگرام قطب و صفحات دسته درزه‌ها در محدوده لاین شماره ۵ (پیت ۱)

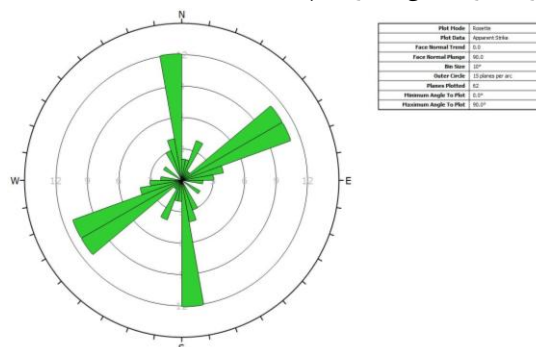


شکل ۱۱- دیاگرام گل سرخی ناپیوستگی‌های برداشت شده در محدوده لاین شماره ۵ (پیت ۱)

۴-۲-۲- سیستم ناپیوستگی در پیت شماره ۲ (لاین ۲)

در محدوده پیت شماره ۲، تنها یک لاین با راستای شمالی-جنوبی مورد بررسی قرار گرفت. در لاین شماره ۲، ۳ ایستگاه و مجموعاً ۳۴ ناپیوستگی ثبت شد. استریوگرام قطب و صفحات و دیاگرام گل سرخی ناپیوستگی‌ها در شکل‌های ۱۲

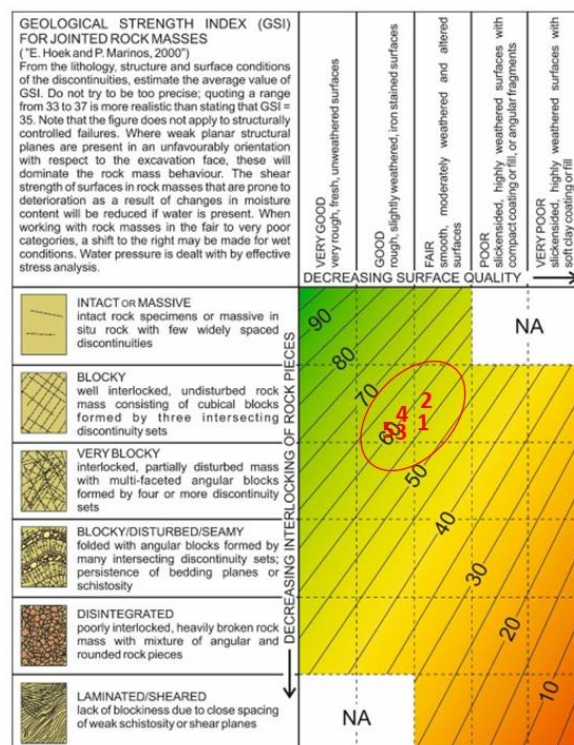
در محدوده لاین شماره ۱ (بیت ۶)



در محدوده لاین شماره ۱ (بیت ۶)

۵-۱- روش تجربی

در این روش، از طبقه‌بندی‌های $RMR [10]$ ، $MRMR$ [11]، $SMR [12]$ و شاخص $GSI [13]$ برای هر یک از هوازدگی، دگرسانی و مواد پرکننده درزه‌ها، در محدوده ۵۰ تا ۶۵ قرار گرفته است که معرف توده‌سنگ بلوکی با شرایط سطح ناپیوستگی متوسط تا خوب می‌باشد (شکل ۱۶) [۱۳].



شکل ۱۶- شاخص GSI و محل لاین‌های مورد مطالعه در معدن [۱۳]

مورد ارزیابی قرار گرفت [۴]. احتمال وقوع هر گسیختگی به صورت درصدی از تعداد کل ناپیوستگی‌های واقع در ناحیه بحرانی محاسبه شد و مقدار آستانه ۲۵ درصد به عنوان مرز بحرانی در نظر گرفته شد [۳۲].

نتایج نشان داد که در تمامی لاین‌ها در پیت‌های مختلف، پتانسیل گسیختگی گوه‌ای بیشتر از دو مود دیگر است و با افزایش شیب تک‌پله از ۴۰ به ۷۰ درجه، احتمال وقوع هر سه نوع گسیختگی افزایش می‌یابد. بحرانی‌ترین حالت‌ها در شیب‌های ۷۰ درجه و جهت‌های شیب خاص مشاهده شد. به عنوان مثال، در لاین شماره ۲ (پیت ۲) با شیب ۷۰ درجه (جدول ۴)، احتمال گسیختگی گوه‌ای برای جهت‌های شیب ۳۰ تا ۹۰ درجه به بیش از ۲۵ درصد می‌رسد. در لاین شماره ۱ (پیت ۶) (جدول ۵)، گسیختگی گوه‌ای در شیب ۷۰ درجه و جهت‌های ۹۰ تا ۱۵۰ درجه و ۲۷۰ تا ۳۰۰ درجه بیش از ۲۶ درصد را نشان می‌دهد. در مقابل، لاین شماره ۵ (پیت ۱) کمترین پتانسیل گسیختگی را در تمامی جهات نشان داد.

خلاصه نتایج تحلیل سینماتیکی برای تمامی لاین‌ها در بحرانی‌ترین حالت (شیب ۷۰ درجه) در جدول ۶ ارائه شده

جدول ۳- نتایج طبقه‌بندی تجربی برای لاین‌های مختلف

ردیف	لاین (پیت)	RMR	MRMR	SMR	GSI
۱	لاین ۳ (پیت ۱)	۶۴	۵۲	۷۴	۵۰-۶۵
۲	لاین ۴ (پیت ۱)	۶۵	۵۳	۷۵	۵۰-۶۵
۳	لاین ۵ (پیت ۱)	۶۵	۵۳	۷۵	۵۰-۶۵
۴	لاین ۲ (پیت ۲)	۶۳	۵۱	۷۳	۵۰-۶۰
۵	لاین ۱ (پیت ۶)	۶۱	۵۰	۷۱	۵۰-۶۰

۵-۲- تحلیل سینماتیکی/ساختاری

به منظور بررسی پتانسیل وقوع گسیختگی‌های ساختاری در دیواره‌های پیت (شماره‌های ۱، ۲ و ۶)، تحلیل سینماتیکی با استفاده از نرم‌افزار *Dips* نسخه ۷ [۳۱] بر روی داده‌های ۲۵۹ ناپیوستگی برداشت شده از ۱۷ ایستگاه صحرایی انجام شد. سه مود گسیختگی اصلی شامل گسیختگی صفحه‌ای (*Planar*)، گوه‌ای (*Wedge*) و واژگونی (*Toppling*) برای شیب‌های تک‌پله با زوایای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه و جهت‌های شیب مختلف (با فواصل ۳۰ درجه)

واژگونی نیز در لاین شماره ۱ با ۳۷.۱۰ درصد بیشترین مقدار را نشان می‌دهد (شکل ۱۹). گسیختگی صفحه‌ای در تمامی لاین‌ها کمترین پتانسیل را داشته و تنها در لاین شماره ۱ به ۲۷.۴۲ درصد می‌رسد (شکل ۲۰).

است. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، بیشینه احتمال گسیختگی گوه‌ای مربوط به لاین شماره ۲ (پیت ۲) با مقدار ۴۰.۸۹ درصد و جهت شیب ۶۰ درجه می‌باشد (شکل ۱۷). پس از آن، لاین شماره ۱ (پیت ۶) با ۳۷.۲۱ درصد در جهت شیب ۱۵۰ درجه قرار دارد (شکل ۱۸). گسیختگی

جدول ۴- نتایج تحلیل سینماتیکی گسیختگی گوه‌ای (لاین ۲- پیت ۲)

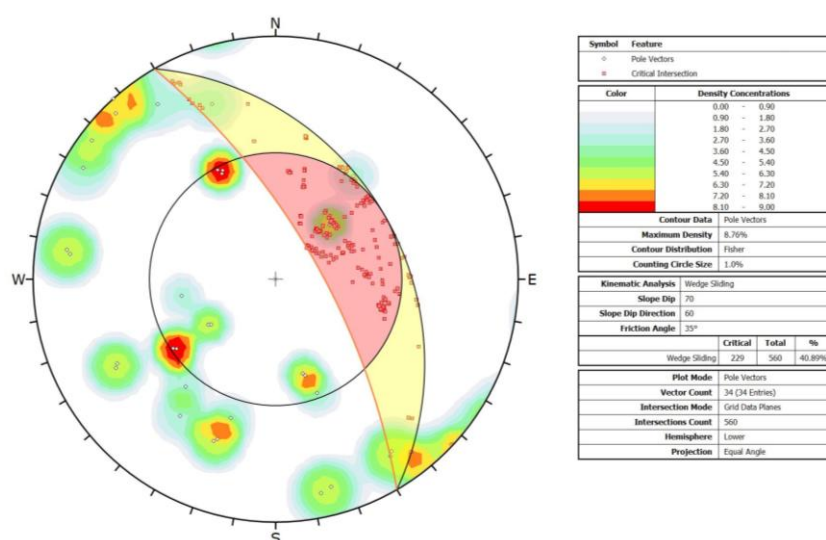
ردیف	جهت شیب (درجه)	شیب ۴۰ درجه	شیب ۵۰ درجه	شیب ۶۰ درجه	شیب ۷۰ درجه
۱	۰	۰.۰۰٪	۹.۸۲٪	۱۶.۷۹٪	۲۵.۱۸٪
۲	۳۰	۳.۲۱٪	۱۰.۳۶٪	۲۲.۳۲٪	۳۸.۹۳٪
۳	۶۰	۷.۶۸٪	۱۳.۳۹٪	۳۲.۳۲٪	۴۰.۸۹٪
۴	۹۰	۱.۹۶٪	۱۵.۳۶٪	۲۲.۳۲٪	۳۰.۵۴٪
۵	۱۲۰	۰.۸۹٪	۷.۱۴٪	۱۳.۹۳٪	۲۱.۹۶٪
۶	۱۵۰	۰.۰۰٪	۱.۴۳٪	۱۶.۹۶٪	۲۲.۶۸٪
۷	۱۸۰	۰.۵۴٪	۴.۶۴٪	۷.۶۸٪	۱۰.۷۱٪
۸	۲۱۰	۳.۳۹٪	۵.۷۱٪	۱۱.۰۷٪	۱۲.۵۰٪
۹	۲۴۰	۳.۰۴٪	۵.۰۰٪	۷.۱۴٪	۱۰.۵۴٪
۱۰	۲۷۰	۰.۱۸٪	۳.۷۵٪	۴.۲۹٪	۸.۷۵٪
۱۱	۳۰۰	۰.۷۱٪	۱.۶۱٪	۴.۸۲٪	۸.۳۹٪
۱۲	۳۳۰	۰.۳۶٪	۴.۶۴٪	۱۱.۰۷٪	۱۴.۸۲٪

جدول ۵- نتایج تحلیل سینماتیکی گسیختگی گوه‌ای (لاین ۱- پیت ۶)

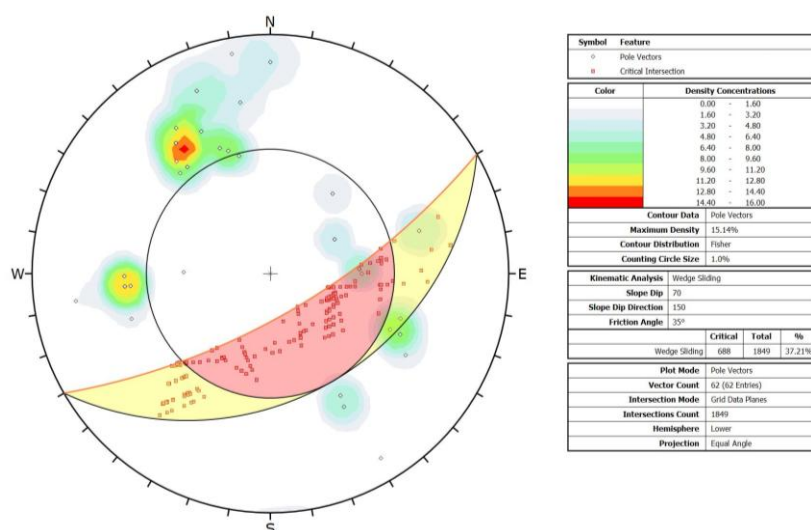
ردیف	جهت شیب (درجه)	شیب ۴۰ درجه	شیب ۵۰ درجه	شیب ۶۰ درجه	شیب ۷۰ درجه
۱	۰	۰.۲۲٪	۱.۱۹٪	۲.۹۲٪	۴.۳۸٪
۲	۳۰	۰.۱۱٪	۲.۶۰٪	۵.۵۲٪	۷.۹۰٪
۳	۶۰	۰.۴۹٪	۴.۰۶٪	۷.۸۴٪	۱۹.۳۶٪
۴	۹۰	۱.۶۲٪	۵.۴۱٪	۹.۵۷٪	۳۰.۹۹٪
۵	۱۲۰	۰.۳۲٪	۲.۹۷٪	۱۲.۰۱٪	۲۶.۲۳٪
۶	۱۵۰	۰.۰۰٪	۰.۵۴٪	۱۲.۳۹٪	۳۷.۲۱٪
۷	۱۸۰	۰.۰۰٪	۶.۱۱٪	۱۶.۲۲٪	۲۶.۹۹٪
۸	۲۱۰	۲.۴۳٪	۱۳.۳۶٪	۲۰.۸۸٪	۲۴.۰۷٪
۹	۲۴۰	۴.۳۸٪	۱۳.۰۹٪	۱۸.۴۴٪	۲۲.۵۰٪
۱۰	۲۷۰	۰.۹۷٪	۱۶.۱۲٪	۲۰.۱۷٪	۳۲.۱۸٪
۱۱	۳۰۰	۰.۰۰٪	۲.۶۵٪	۸.۳۳٪	۲۷.۶۹٪
۱۲	۳۳۰	۰.۰۰٪	۰.۲۷٪	۰.۷۶٪	۱۴.۴۹٪

جدول ۶- خلاصه نتایج تحلیل سینماتیکی برای لاین‌های مختلف (در شیب ۷۰ درجه)

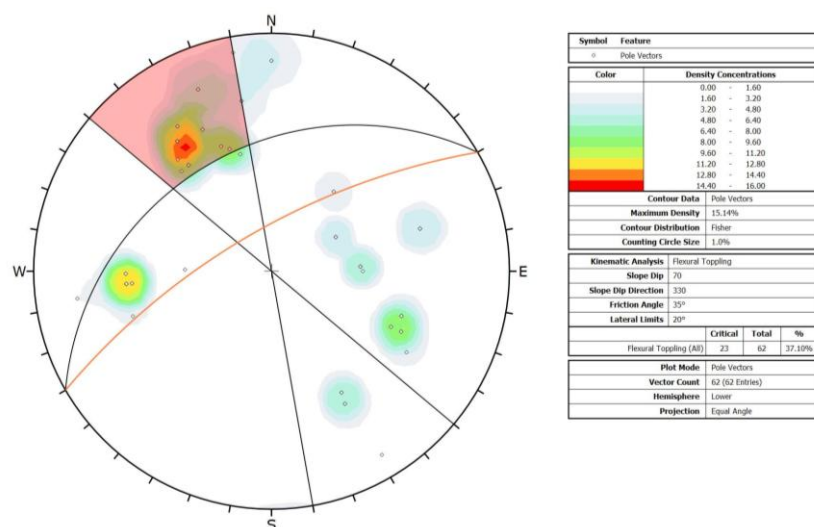
لاین-پیت	بیشینه احتمال گسیختگی صفحه‌ای (%)	بیشینه احتمال گسیختگی واژگونی (%)	بیشینه احتمال گسیختگی گوه‌ای (%)	جهت شیب بحرانی (درجه)	مود غالب
۱-۳	۱۷.۷۴	۲۹.۰۳	۲۵.۴۸	۳۰-۲۱۰	T
۱-۴	۱۱.۸۴	۲۳.۶۸	۲۴.۹۲	۰-۳۳۰	W
۱-۵	۱۶.۰۰	۸.۰۰	۱۵.۹۴	۳۰۰	P
۲-۲	۲۰.۵۹	۱۴.۷۱	۴۰.۸۹	۶۰	W
۶-۱	۲۷.۴۲	۳۷.۱۰	۳۷.۲۱	۱۵۰	W



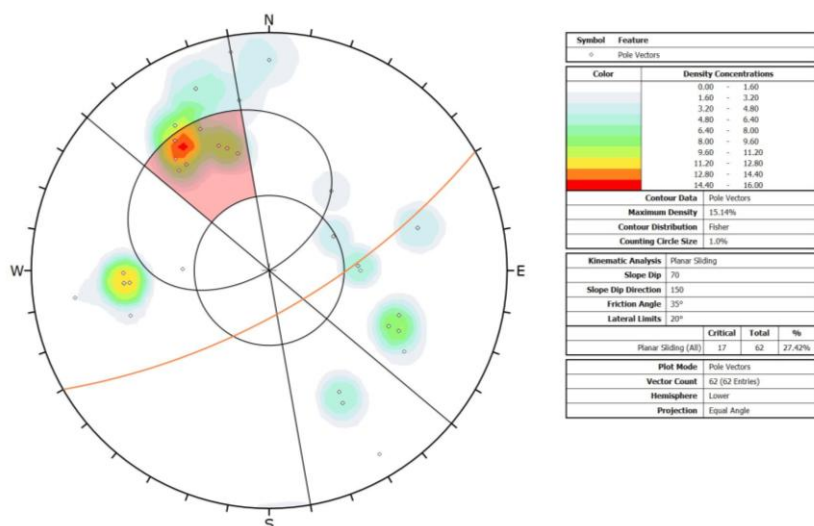
شکل ۱۷- ارزیابی گسیختگی گوه‌ای در لاین شماره ۲ با شیب ۷۰ درجه و جهت شیب ۶۰ درجه



شکل ۱۸- ارزیابی گسیختگی گوه‌ای در لاین شماره ۱ با شیب ۷۰ درجه و جهت شیب ۱۵۰ درجه



شکل ۱۹- ارزیابی گسیختگی واژگونی در لاین شماره ۱ با شیب ۷۰ درجه و جهت شیب ۳۳۰ درجه



شکل ۲۰- ارزیابی گسیختگی صفحه‌ای در لاین شماره ۱ با شیب ۷۰ درجه و جهت شیب ۱۵۰ درجه

به‌عنوان یک ساده‌سازی رایج در مرحله طراحی اولیه، توده‌سنگ میزبان به‌صورت همگن و ایزوتروپ در نظر گرفته شده است [۲].

پارامترهای ژئومکانیکی مورد استفاده در روش تعادل حدی بر اساس میانگین داده‌های آزمون‌های آزمایشگاهی (جدول ۱) و طبقه‌بندی مهندسی سنگ (جدول ۳) و با استفاده از نرم‌افزار *RocLab* و معیار شکست غیرخطی هوک-براون (*Hoek-Brown*) برآورد شده است (جدول ۷). با استفاده از روش خطی‌سازی معادل، پارامترهای چسبندگی (*c*) و زاویه اصطکاک داخلی (*phi*) معادل توده‌سنگ، از برازش

۵-۳- تحلیل تعادل حدی (LEM)

در این بخش، تحلیل پایداری دیواره‌های معدن به روش تعادل حدی به منظور محاسبه فاکتور ایمنی (*Factor of Safety - FOS*) برای پنج لاین اصلی در سه پیت معدن انجام شده است. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی و لاگ گمانه‌های حفاری اکتشافی، دو لایه سنگ‌شناسی اصلی شامل آهک توده‌ای (در پیت‌های ۲ و ۶) و آهک اکسیدی (در پیت ۱) در محدوده معدن شناسایی شده‌اند. با وجود ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ، در روش تعادل حدی و

معیار خطی موهر-کولمب (*Mohr-Coulomb*) بر منحنی غیرخطی هوک-براون، برای استفاده در تحلیل تعادل حدی استخراج گردید. فاکتور آشفتگی (*Disturbance Factor*) (D) برابر ۰.۷ بر اساس جدول راهنمای تخمین فاکتور آشفتگی ارائه شده در مرجع هوک و همکاران (۲۰۰۲) [۱۹] و با توجه به شرایط استخراجی معدن آق‌دره (آشباری متعارف با کیفیت خوب، چال‌های به قطر ۷۶ میلی‌متر، خرج‌گذاری با *ANFO*) و کیفیت متوسط توده سنگ ($GSI=50-65$) انتخاب شده است. بر اساس این جدول، برای آشباری با کیفیت خوب در شیب‌های مهندسی، مقدار $D=0.7$ توصیه شده است [۱۹]. همچنین ضریب شبه‌استاتیکی $0.16g$ بر اساس شتاب مبنای طرح منطقه تکاب انتخاب شده است. با توجه به قرارگیری منطقه مورد مطالعه در پهنه با خطر نسبی بالا، شتاب مبنای

طراحی این منطقه برابر $0.20g$ در نظر گرفته شده و با استناد به توصیه‌های مرجع معتبر (رید و استیسی [۲]) مبنی بر استفاده از ۸۰ درصد شتاب حداکثر زمین (*PGA*) برای تحلیل شبه‌استاتیکی دیواره‌های معادن روباز، مقدار $0.16g$ (معادل ۸۰ درصد شتاب مبنای طرح) به‌عنوان ضریب شبه‌استاتیکی افقی در این پژوهش در نظر گرفته شده است. تحلیل پایداری در دو حالت استاتیکی (بارهای ثقیل) و شبه‌استاتیکی (با اعمال ضریب زلزله افقی معادل $PGA = 0.16g$) با استفاده از نرم‌افزار *Slide* (نسخه ۸) انجام شده است. فاکتورهای ایمنی قابل قبول بر اساس مراجع معتبر [۲] برای دیواره‌های کلی در حالت استاتیکی و شبه‌استاتیکی به‌ترتیب ۱.۳ و ۱.۰۵ در نظر گرفته شده است (جدول ۸).

جدول ۷- مشخصات ژئومکانیکی توده سنگ در محدوده معدن

پارامتر / لایه	مقاومت فشاری (<i>MPa</i>)	مدول تغییر شکل پذیری (<i>GPa</i>)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (<i>MPa</i>)	وزن مخصوص (<i>gr/cm³</i>)
آهک توده‌ای	۹.۳	۳.۴	۳۵	۰.۲۵	۲.۴۵
آهک اکسیدی	۴.۶	۱.۷	۳۲	۰.۱۸	۲.۲۰

جدول ۸- فاکتور ایمنی قابل قبول برای هندسه پیت و پله‌های استخراجی [۲]

فاکتور ایمنی (FOS)		زاویه پله
در حالت استاتیکی	در حالت شبه‌استاتیکی	
۱.۱	حد مشخصی تعریف نشده	
۱.۲	۱.۰	اینتر-رمپ
۱.۳	۱.۰۵	کلی

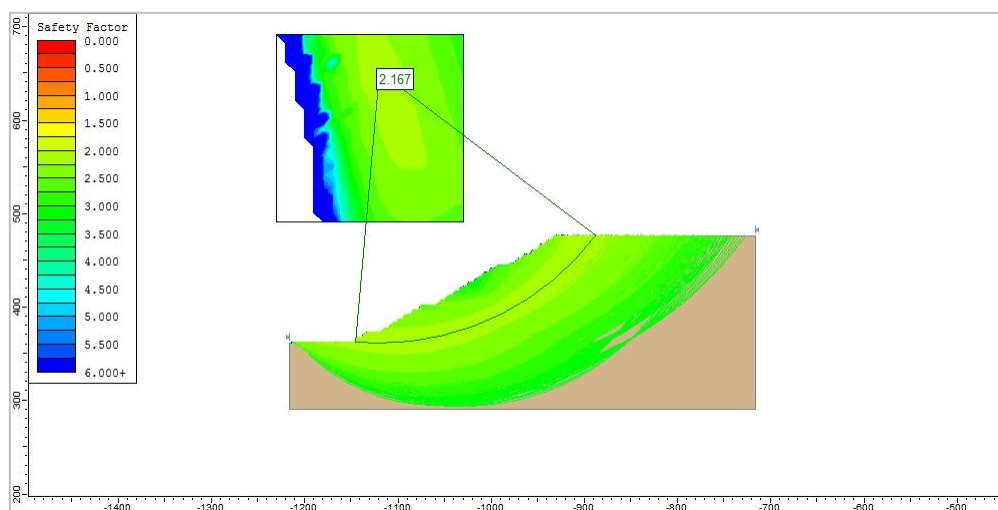
نتایج تحلیل تعادل حدی برای هر پنج لاین به‌تفکیک در جدول ۹ ارائه شده است. همچنین به‌عنوان نمونه، پلات‌های مربوط به محاسبه فاکتور ایمنی برای لاین شماره ۴ (به‌عنوان بحرانی‌ترین حالت) در شکل ۲۱ (حالت استاتیکی) و شکل ۲۲ (حالت شبه‌استاتیکی) نشان داده شده است. مقادیر فاکتور ایمنی برای لاین شماره ۴ در حالت استاتیکی و شبه‌استاتیکی به ترتیب ۲.۱۶ و ۱.۵۶ می‌باشد.

شبه‌استاتیکی دارای فاکتور ایمنی بالاتر از حد قابل قبول می‌باشند. کمترین فاکتور ایمنی مربوط به لاین ۴ (پیت ۱) با ترکیب لیتولوژی آهک اکسیدی و ارتفاع دیواره ۱۱۵ متر است که در حالت شبه‌استاتیکی به مقدار ۱.۵۶ می‌رسد (شکل ۲۲). این مقدار همچنان از حد آستانه ۱.۰۵ [۲] بالاتر بوده و نشان‌دهنده پایداری دیواره تحت بارهای لرزه‌ای با شتاب $0.16g$ می‌باشد. بیشترین فاکتور ایمنی مربوط به لاین ۱ (پیت ۶) با لیتولوژی آهک توده‌ای و ارتفاع ۶۰ متر است که در حالت استاتیکی به ۳.۱۳ می‌رسد (شکل ۲۳).

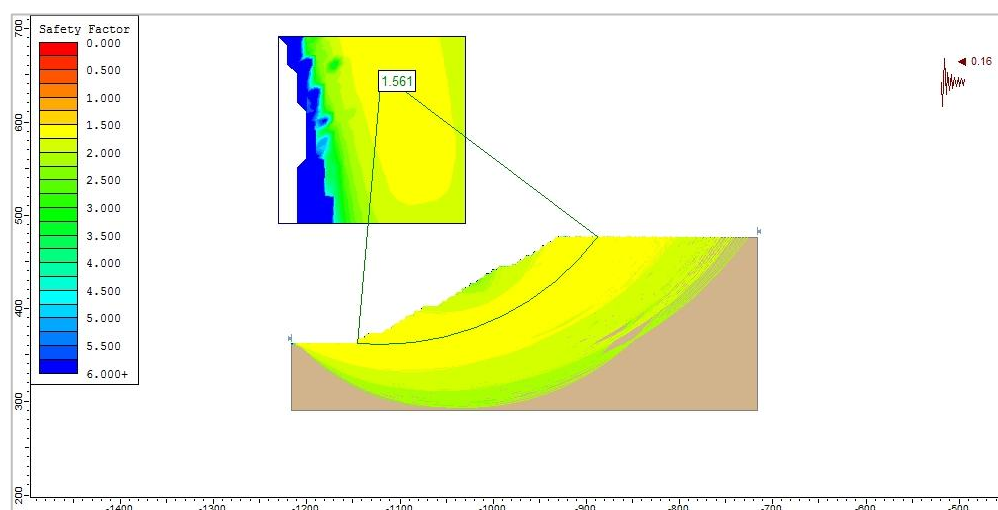
نتایج تحلیل تعادل حدی در جدول ۹ نشان می‌دهد که تمامی لاین‌های مورد مطالعه در هر دو حالت استاتیکی و

جدول ۹- نتایج تحلیل تعادل حدی برای لاین‌های مختلف معدن

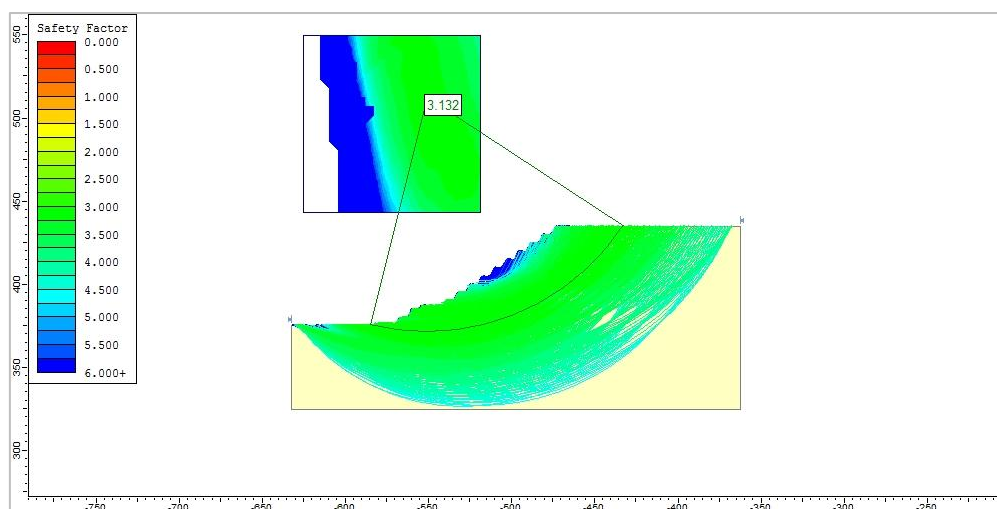
وضعیت نهایی	FOS (شبه‌استاتیک)	FOS (استاتیک)	شیب دیواره (متر)	عرض دیواره (متر)	ارتفاع دیواره (متر)	لیتولوژی	لاین (پیت)
پایدار	۱.۷۳	۲.۴۱	۲۶	۱۸۱	۹۰	آهک اکسیدی	لاین ۳ (پیت ۱)
پایدار	۱.۵۶	۲.۱۶	۲۸	۲۱۴.۱۵	۱۱۴.۹۸	آهک اکسیدی	لاین ۴ (پیت ۱)
پایدار	۲.۱۳	۲.۳۶	۲۰	۲۳۱	۸۴.۹۰	آهک اکسیدی	لاین ۵ (پیت ۱)
پایدار	۲.۱۵	۲.۹۳	۲۹	۶۷	۱۲۰.۸۷	آهک توده‌ای	لاین ۲ (پیت ۲)
پایدار	۲.۲۷	۳.۱۳	۲۹	۱۰۹.۵۴	۶۰	آهک توده‌ای	لاین ۱ (پیت ۶)



شکل ۲۱- محاسبه فاکتور ایمنی حاصل از تحلیل استاتیکی برای دیواره لاین شماره ۴



شکل ۲۲- محاسبه فاکتور ایمنی حاصل از تحلیل شبه‌استاتیکی برای دیواره لاین شماره ۴



شکل ۲۳- محاسبه فاکتور ایمنی حاصل از تحلیل استاتیکی برای دیواره لاین شماره ۱

۶- بحث

در این پژوهش، پایداری دیواره‌های معدن روباز طلای آقدرد با یک رویکرد تلفیقی شامل سه دسته روش تجربی، سینماتیکی و تعادل حدی مورد ارزیابی قرار گرفت. استفاده همزمان از این سه روش، یک تحلیل جامع و چندبعدی از وضعیت پایداری فراهم کرد که در آن روش‌های تجربی دیدگاه کلی از کیفیت توده سنگ، تحلیل سینماتیکی نقاط ضعف ساختاری و روش تعادل حدی معیار نهایی تصمیم‌گیری را ارائه نمودند. هم‌خوانی نتایج این سه روش (همگی تأییدکننده پایداری کلی) اعتماد به یافته‌ها را افزایش می‌دهد و با پژوهش‌های جدید که رویکردهای چندمعیاره را برای افزایش دقت تحلیل‌های پایداری توصیه می‌کنند [۶، ۷]، همخوانی دارد.

نوآوری اصلی این پژوهش در مقایسه با مطالعات مشابه [۳۲، ۳۳] را می‌توان در چند محور خلاصه کرد: اولاً، این پژوهش برای اولین بار در یک معدن طلای نوع کارلین در ایران، از یک رویکرد تلفیقی شامل روش تجربی و تحلیلی بهره گرفته است، در حالی که مطالعات پیشین در این منطقه صرفاً به زمین‌شناسی و کانی‌سازی پرداخته‌اند [۲۷، ۲۸]. ثانیاً، حجم داده‌های آزمایشگاهی (۵۰ نمونه مغزه با آزمون‌های جامع مکانیک سنگ) و صحرایی (۲۵۹ ناپیوستگی برداشت‌شده از ۱۷ ایستگاه) در این پژوهش، به مراتب فراتر از مطالعات مشابه

در معادن ایران و حتی برخی مطالعات بین‌المللی است [۳۳]. ثالثاً، ارائه یک مدل مفهومی پایداری که بر اساس ترکیب نتایج تحلیل سینماتیکی و تعادل حدی، جهت‌گیری‌های بحرانی و اولویت‌بندی مناطق نیازمند پایش را مشخص می‌کند، جنبه کاربردی و عملیاتی این پژوهش را نسبت به بسیاری از مطالعات صرفاً آکادمیک متمایز می‌سازد. این رویکرد تلفیقی، ضمن افزایش اعتمادپذیری نتایج، امکان تصمیم‌گیری دقیق‌تر در مدیریت ریسک پایداری دیواره‌های پیت را برای طراحان و بهره‌برداران معدن فراهم می‌آورد.

نتایج طبقه‌بندی‌های تجربی نشان‌دهنده تطابق خوبی بین روش‌های مختلف است. امتیاز RMR در محدوده ۶۱ تا ۶۵ نشان‌دهنده کیفیت "خوب" توده سنگ میزبان است. امتیاز $MRMR$ پس از اعمال ضرایب تعدیل آتشیاری (۰.۹)، تنش (۱.۰) و گسل‌ها (۰.۹)، در محدوده ۵۰ تا ۵۳ قرار گرفته که معرف کیفیت "متوسط تا خوب" برای کاربردهای معدنی می‌باشد. این امتیاز بر اساس نمودارهای تجربی رید و استیسی [۲]، شیب گروه پله قابل قبول را برای ارتفاع دیواره‌های ۶۰ تا ۱۲۰ متر، بین ۴۵ تا ۵۵ درجه پیشنهاد می‌کند که با شیب‌های طراحی فعلی (۲۰ تا ۲۹ درجه) تطابق داشته و حاشیه ایمنی مناسبی را فراهم می‌آورد. همچنین شاخص GSI در محدوده ۵۰ تا ۶۵ نشان‌دهنده توده سنگ بلوکی با شرایط سطح ناپیوستگی متوسط تا خوب می‌باشد [۱۳، ۳۴].

ایمنی در همه لاین‌ها شد (به‌طور متوسط حدود ۲۵ درصد). با این حال، حتی در بحرانی‌ترین حالت (لاین ۴)، مقدار FOS (۱.۵۶) همچنان به‌طور قابل‌توجهی از حد مجاز (۱.۰۵) بالاتر است که نشان‌دهنده طراحی مقاوم در برابر زلزله با شتاب $0.16g$ است. این نتیجه نشان می‌دهد که فاکتور آشفستگی ($D=0.7$) و پارامترهای مقاومتی محافظه‌کارانه در نظر گرفته شده، منجر به تحلیل ایمن و قابل اعتمادی شده است. بر اساس نتایج تحلیل سینماتیکی و تعادل حدی، می‌توان یک مدل مفهومی برای پایداری لاین‌های مختلف ارائه داد. لاین‌هایی با جهت‌گیری شمالی-جنوبی (مانند لاین ۵ با راستای $N-S$) کمترین پتانسیل گسیختگی و لاین‌هایی با جهت‌گیری شمال‌شرقی-جنوب‌غربی (مانند لاین ۴ با راستای $NE-SW$) در برخی جهات شیب، پتانسیل بالاتری برای تشکیل گوه‌های ناپایدار دارند. تأثیر مستقیم افزایش شیب بر افزایش احتمال گسیختگی نیز در تمامی لاین‌ها مشهود است. با توجه به آستانه بحرانی ۲۵ درصد [۳۲]، لاین‌های ۲ (پیت ۲) و ۱ (پیت ۶) نیازمند پایش دقیق‌تر در حین عملیات استخراج می‌باشند. این مدل می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای اولویت‌بندی مناطق نیازمند پایش دقیق‌تر در حین عملیات استخراج مورد استفاده قرار گیرد.

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات مشابه در معدن طلا [۳۲] و معدن سنگ‌آهک [۳۳] نشان‌دهنده هماهنگی کامل است. در بسیاری از این معادن، گسیختگی گوه‌ای به‌عنوان مود غالب معرفی شده است و استفاده از روش تعادل حدی برای محاسبه FOS ، یک رویه استاندارد و قابل قبول در طراحی نهایی پیت محسوب می‌شود [۲]. نوآوری پژوهش حاضر در تلفیق داده‌های غنی آزمایشگاهی با چهار روش تجربی (RMR ، $MRMR$ ، SMR و GSI) و دو روش تحلیلی (سینماتیکی و تعادل حدی) در یک معدن طلای ایرانی است که می‌تواند به‌عنوان یک مطالعه مرجع برای پروژه‌های مشابه در منطقه مورد استفاده قرار گیرد. به‌طور کلی، طراحی هندسی فعلی دیواره‌های پیت معدن طلای آق‌دره از نظر پایداری در شرایط استاتیکی و لرزه‌ای (با شتاب $0.16g$) ایمن است و عملیات استخراج می‌تواند با اطمینان از پایداری دیواره‌ها آغاز شود. با این حال، استقرار سیستم پایش (رفتارنگاری) به‌ویژه در لاین‌های ۲ و ۴ که بحرانی‌ترین شرایط را نشان دادند، برای مدیریت بهینه ریسک و اطمینان از

یافته‌های تحلیل سینماتیکی به‌وضوح نشان می‌دهد که اگرچه توده‌سنگ از کیفیت خوبی برخوردار است (RMR بالا، $MRMR$ متوسط تا خوب)، اما ساختار ناپیوستگی‌ها (به‌ویژه تقاطع درزه‌ها) نقش اصلی را در پتانسیل ناپایداری ایفا می‌کنند. نتایج نشان داد که در همه لاین‌ها، پتانسیل گسیختگی گوه‌ای از دو مود دیگر بیشتر است و با افزایش شیب تک‌پله از ۴۰ به ۷۰ درجه، احتمال وقوع هر سه نوع گسیختگی افزایش می‌یابد. بر اساس جدول ۶، بحرانی‌ترین وضعیت مربوط به لاین ۲ (پیت ۲) با بیشینه احتمال گسیختگی گوه‌ای برابر ۴۰.۸۹ درصد در جهت شیب ۶۰ درجه می‌باشد. همچنین لاین ۱ (پیت ۶) با بیشینه احتمال گسیختگی گوه‌ای و واژگونی به‌ترتیب برابر ۳۷.۲۱ و ۳۷.۱۰ درصد در جهت‌های شیب ۱۵۰ و ۳۳۰ درجه، در رتبه دوم بحرانی‌ترین حالت‌ها قرار دارد. در مقابل، لاین ۵ (پیت ۱) با بیشینه احتمال گسیختگی ۱۶.۰۰ درصد برای مود صفحه‌ای، کمترین پتانسیل گسیختگی را در بین تمام لاین‌ها نشان می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که حتی در یک توده‌سنگ با RMR خوب، وجود چند دسته درزه با جهت‌گیری نامناسب می‌تواند تشکیل گوه‌های ناپایدار را تسهیل کند [۴، ۱۸]. در لاین شماره ۴، که بحرانی‌ترین حالت از نظر فاکتور ایمنی را نشان داد، سیستم درزه‌داری با دو دسته درزه اصلی با شیب تند (۸۷ و ۷۵ درجه) و یک زون گسلی، شرایط را برای تشکیل گوه‌های بالقوه ناپایدار فراهم کرده است.

نتایج تحلیل تعادل حدی در جدول ۹ نشان می‌دهد که تمامی لاین‌های مورد مطالعه در هر دو حالت استاتیکی و شبه‌استاتیکی دارای فاکتور ایمنی بالاتر از حد قابل قبول می‌باشند. کمترین فاکتور ایمنی مربوط به لاین ۴ (پیت ۱) با ترکیب لیتولوژی آهک اکسیدی و ارتفاع دیواره ۱۱۵ متر است که در حالت شبه‌استاتیکی به مقدار ۱.۵۶ می‌رسد. این مقدار همچنان از حد آستانه ۱.۰۵ [۲] بالاتر بوده و نشان‌دهنده پایداری دیواره تحت بارهای لرزه‌ای با شتاب $0.16g$ می‌باشد. بیشترین فاکتور ایمنی مربوط به لاین ۱ (پیت ۶) با لیتولوژی آهک توده‌ای و ارتفاع ۶۰ متر است که در حالت استاتیکی به ۳.۱۳ می‌رسد. به‌عنوان نمونه، شکل‌های ۲۱ و ۲۲ به‌ترتیب پلات‌های تحلیل استاتیکی و شبه‌استاتیکی را برای لاین ۴ (به‌عنوان بحرانی‌ترین حالت) نشان می‌دهند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، اعمال بار شبه‌استاتیکی منجر به کاهش فاکتور

پایداری طولانی مدت توصیه می‌شود.

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

این پژوهش به‌عنوان اولین مطالعه جامع و تلفیقی پایداری شیب در معادن طلای نوع کارلین ایران، با بهره‌گیری از داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی و یکپارچه‌سازی شش روش تجربی و تحلیلی، چارچوبی عملیاتی برای ارزیابی پایداری دیواره‌های پیت معدن آق‌دره ارائه نموده است. مهمترین یافته‌های کلیدی این پژوهش به‌همراه توصیه‌های عملیاتی و پژوهشی برای آینده در ادامه ارائه شده است.

۷-۱- نتیجه‌گیری

۱- بر اساس طبقه‌بندی‌های تجربی، توده‌سنگ میزبان از کیفیت "خوب" تا "متوسط تا خوب" برخوردار است. امتیاز *RMR* در محدوده ۶۱ تا ۶۵ (کیفیت خوب)، امتیاز *MRMR* بین ۵۰ تا ۵۳ (کیفیت متوسط تا خوب برای کاربردهای معدنی) و امتیاز *SMR* بین ۷۱ تا ۷۵ (وضعیت پایدار، کلاس II) به‌دست آمد. شاخص *GSI* نیز در محدوده ۵۰ تا ۶۵ (توده‌سنگ بلوکی با شرایط سطح ناپیوستگی متوسط تا خوب) قرار گرفت که همگی مبین پایداری مناسب توده‌سنگ میزبان می‌باشند.

۲- تحلیل سینماتیکی نشان داد که مود گسیختگی گوه‌ای، پتانسیل وقوع بیشتری نسبت به دو مود صفحه‌ای و واژگونی دارد و این پتانسیل با افزایش شیب تک‌پله از ۴۰ به ۷۰ درجه، به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. بحرانی‌ترین حالت‌ها در شیب‌های ۷۰ درجه و جهت‌های شیب خاص مشاهده شد. بر اساس جدول ۶، لاین ۲ (پیت ۲) با بیشینه احتمال گسیختگی گوه‌ای برابر ۴۰.۸۹ درصد در جهت شیب ۶۰ درجه، بحرانی‌ترین حالت و لاین ۵ (پیت ۱) با حداکثر ۱۶.۰۰ درصد، کمترین پتانسیل گسیختگی را نشان دادند. ۳- تحلیل تعادل حدی در هر دو حالت استاتیکی و شبه‌استاتیکی (با شتاب افقی $0.16g$) نشان داد که فاکتور ایمنی تمامی پنج لاین اصلی از حد آستانه قابل قبول (۱.۳) در حالت استاتیک و ۱.۰۵ در حالت شبه‌استاتیک) بالاتر است. کمترین فاکتور ایمنی مربوط به لاین ۴ (پیت ۱) با ۱.۵۶ در حالت شبه‌استاتیک و بیشترین آن مربوط به لاین ۱ (پیت ۶) با ۳.۱۳ در حالت استاتیک ثبت شد. اعمال بار شبه‌استاتیکی به‌طور متوسط حدود ۲۵ درصد کاهش فاکتور ایمنی را در پی

داشت که همچنان در محدوده قابل قبول قرار دارد.

۴- طراحی هندسی فعلی دیواره‌های پیت معدن آق‌دره از نظر پایداری در شرایط استاتیکی و لرزه‌ای (با شتاب $0.16g$) ایمن است و عملیات استخراج می‌تواند با اطمینان از پایداری دیواره‌ها آغاز شود. رویکرد تلفیقی به‌کاررفته در این پژوهش، قابلیت بالایی در اعتمادسازی به نتایج دارد و می‌تواند به‌عنوان یک مطالعه مرجع برای پروژه‌های مشابه در منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

۷-۲- پیشنهادات

۱- با شروع عملیات استخراج، نصب ابزارهای دقیق (مانند اکستنسومتر، پیزومتر و پرتابل‌های ژئودزی) برای مانیتورینگ جابه‌جایی‌ها و فشار آب حفره‌ای در دیواره‌ها، به‌ویژه در مناطقی که تحلیل سینماتیکی پتانسیل بالاتری برای گسیختگی گوه‌ای نشان داده است (لاین‌های ۲ و ۴)، الزامی است. استفاده از روش‌های نوین پایش مانند تداخل‌سنجی راداری (*InSAR*) و اسکنر لیزری زمینی (*TLS*) نیز توصیه می‌شود [۷].

۲- انجام مدل‌سازی عددی با استفاده از روش‌های المان محدود (مانند *Phase2*) یا المان مجزا (مانند *DEC3*) برای صحت‌سنجی نتایج تعادل حدی و بررسی دقیق‌تر توزیع تنش و تغییرشکل‌ها در اطراف پیت توصیه می‌شود. رویکردهای تلفیقی *DFN-DEM* [۶] می‌تواند تحلیل واقع‌بینانه‌تری از رفتار توده‌سنگ درزه‌دار ارائه دهد.

۳- با پیشرفت عملیات معدنکاری و دسترسی به مغزه‌های جدید و داده‌های صحرایی بیشتر، تحلیل پایداری به‌ویژه در برخورد با زون‌های برشی یا گسله‌های پیش‌بینی‌نشده، باید به‌روزرسانی شود. استفاده از روش‌های یادگیری ماشین [۲۴، ۲۵، ۲۶] برای پیش‌بینی سریع فاکتور ایمنی در سناریوهای مختلف طراحی نیز می‌تواند مفید باشد.

۴- با توجه به فاکتورهای ایمنی نسبتاً بالا (به‌ویژه در لاین‌های ۱، ۲ و ۵)، امکان بررسی افزایش شیب دیواره‌ها (با حفظ حداقل *FOS*) جهت کاهش باطله‌برداری و افزایش بازده اقتصادی، در یک مطالعه تکمیلی با دقت بیشتری ارزیابی شود.

سپاس‌گزاری

نویسنده این مقاله از شرکت پویا زرکان آق‌دره به‌خاطر تأمین

بودجه و داده‌های مورد نیاز این پژوهش، و همچنین از آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه علوم و تحقیقات تهران (SRBIAU) برای همکاری در انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، تشکر و قدردانی می‌نماید.

منبع‌ها

- [1] Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, London.
- [2] Read, J., & Stacey, P. (2010). *Guidelines for Open Pit Slope Design*. CSIRO Publishing.
- [3] Eberhardt, E. (2024). Towards Mine Closure: Assessing the Long-Term Stability of Open Pit Mine Slopes. 58th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, ARMA-2024-1234.
- [4] Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining (4th ed.)*. Spon Press, London.
- [5] Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. Wiley.
- [6] نقی‌پور الف، دهقان ع ن، آهنگری ک (۱۳۹۹). ارزیابی پارامترهای هندسی موثر بر طراحی شیب بهینه دیواره نهایی معدن طلا-مس شادان. نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۱۵، شماره ۴۸، پاییز ۹۹، صفحه ۴۴-۲۱.
- [7] فدایی پ، دهقان ع ن، آهنگری ک (۱۴۰۰). مدل‌سازی سه‌بعدی به روش تفاضل محدود برای تعیین اثر پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی توده‌سنگ بر پایداری شیب دیواره نهایی معدن طلا-مس شادان. نشریه علمی-پژوهشی مکانیک سنگ ایران، دوره ۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰، صفحه ۸۱-۶۷.
- [8] Chen, Q., Yang, Y. C., Zhu, Q. Y., Li, H. B., Yang, X. G., & Zhou, J. W. (2025). Three-dimensional jointed rock slope stability analysis using integrated block theory and DFN-DEM modeling. *Computers and Geotechnics*, 188, 107549.
- [9] Meng, J., et al. (2024). Editorial for advances in slope deformation and failure analysis methods. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(3), 745-748.
- [10] Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons, New York.
- [11] Laubscher, D. H. (1990). A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 90(10), 257-273.
- [12] Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *International Symposium on the Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works*, 49-53.
- [13] Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 34(8), 1165-1186.
- [14] (2024). Q-Slope: Rock Slope Engineering 10 Years on. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(8), 5891-5912.
- [15] Atkinson, L. C. (2000). The role and mitigation of groundwater in slope stability. *Slope Stability in Surface Mining*, 427-434.
- [16] Torabi-Kaveh, M., Mehrnabad, H., Mohammadi, S., & Moosavizadeh, S. M. A. (2023). Application of kinematic and distinct element methods to investigate instability mechanism of rock slopes containing weak and hard layers. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(2), 2757-2770.
- [17] Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, 1, 267-273.
- [18] Hoek, E., & Karzulovic, A. (2000). Rock mass properties for surface mines. *Slope Stability in Surface Mining*, 59-70.
- [19] Sun, Z., Wang, B., Li, Y., Xu, J., & Ji, J. (2023). 3D limit analysis of rock slopes based on equivalent linear failure criterion with tension cut-off. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(12), 3118-3130.
- [21] Dehghan, A. N., & Khodaei, M. (2022). Stability analysis and optimal design of ultimate slope of an open pit mine: a case study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(4), 1789-1808.
- [22] Dehghan, A. N., & Yazdi, A. (2023). A geomechanical investigation for optimizing the ultimate slope design of shadan open pit mine, Iran. *Indian Geotechnical Journal*, 53(4), 859-873.

- [23] Hu, S., Li, L., Zhao, L., Zuo, S., & Huang, D. (2023). Strength reduction strategy for rock slope stability using the variation principle based on the Hoek–Brown failure criterion. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(8), 297.
- [24] Li, H., Gao, J., Wang, Q., & Zhang, H. (2026). Multi-factor coupling analysis of the stability of coal geological slopes in open-pit mines. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 7(1), 12.
- [25] Yadav, A., et al. (2025). Ensemble Machine Learning for Slope Stability Prediction. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(2), 1123-1145.
- [26] Arif, A., Zhang, C., Sajib, M. H., Uddin, M. N., Habibullah, M., Feng, R., ... & Zhang, Y. (2025). Rock slope stability prediction: a review of machine learning techniques. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43(3), 124.
- [۲۷] شرکت پویا زرکان آقدره (۱۴۰۳). گزارش زمین‌شناسی محدوده معدن طلای آقدره.
- [28] Daliran, F. (2008). The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agh-Darreh, Takab, NW Iran. *Mineralium Deposita*, 43(4), 383-404.
- [29] Mehrabi, B., et al. (1999). Mineralogy, geochemistry and fluid inclusion studies of the Agh-Darreh gold deposit, Takab, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 66(3), 409-423.
- [30] Daeijavad, H.A., Asadi, H.H., & Mokhtari, A.R. (2020). Identification and application of a Carlin-type gold mineral system for exploration targeting in the Takab geothermal basin, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 121, 103494. doi:10.1016/j.oregeorev.2020.103494
- [31] Rocscience Inc. (2019). Dips Ver 7.0. Toronto, Ontario, Canada.
- [32] SRK Consulting. (2018). Slope Stability Report for Gold Mine Project. Internal Report.
- [33] Holt, D., et al. (2020). Slope stability assessment in limestone quarries. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 135, 104-116.
- [34] Hoek, E., Carter, T. G., & Diederichs, M. S. (2013). Quantification of the geological strength index chart. In 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.



Comprehensive Slope Stability Assessment of Agh-Darreh Open-Pit Gold Mine (Takab, NW Iran) Using an Integrated Empirical, Kinematic, and Limit Equilibrium Approach

Ali Naghi Dehghan^{1*}

1- Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: 05 July 2026 Accepted: 24 August 2026

(*Corresponding author: a.dehghan@srbiau.ac.ir)

Keywords

Slope Stability
Open-Pit Mine
Kinematic Analysis
Limit Equilibrium Method
Rock Mass Classification
Agh-Darreh Gold Mine
Structural Failures

Final English Extended Abstract

Summary

The stability of slopes in open-pit mines is a critical challenge in mining engineering, directly influencing safety, productivity, and economic viability. This study presents a comprehensive slope stability assessment of the Agh-Darreh open-pit gold mine, located in Takab, northwestern Iran, using an integrated approach combining empirical, kinematic, and limit equilibrium methods.

Introduction

Open-pit mining operations increasingly require steep and stable slopes to minimize waste-to-ore ratios while ensuring operational safety. The

mechanical behavior of rock masses in such environments is primarily controlled by discontinuities (joints, fractures, and faults), rather than the intact rock material itself. The Agh-Darreh gold deposit, a Carlin-type gold occurrence, is hosted mainly by massive and reef limestone units with interbedded sandstone, conglomerate, and marl layers. Despite extensive geological and mineralization studies in the region, no comprehensive slope stability analysis has been conducted using modern integrated approaches.

Methodology and Approaches

The study was conducted on three main pits (Nos. 1, 2, and 6) and five key wall lines (Lines 1 to 5). A total of 259 discontinuities were surveyed across 17 stations according to ISRM standards, and 50 core samples were subjected to standard rock mechanics tests, including uniaxial and triaxial compressive strength, direct shear, wave velocity, and physical properties determination. Stability was assessed using three complementary approaches: (1) empirical classifications including RMR, MRMR, SMR, and GSI; (2) kinematic analysis using Dips software (Version 7) to evaluate planar, wedge, and toppling failure modes for bench slopes of 40°, 50°, 60°, and 70°; and (3) limit equilibrium analysis using Slide software (Version 8) in both static and pseudo-static conditions (with a horizontal seismic coefficient of 0.16g). Rock mass strength parameters were estimated using the Hoek-Brown failure criterion via RocLab software, with a disturbance factor of $D = 0.7$.

Results and Conclusions

The current geometric design of the Agh-Darreh mine pit walls is safe under both static and seismic conditions (0.16g acceleration). The integrated approach demonstrated high reliability and consistency in the results. However, continuous monitoring using advanced methods such as InSAR and TLS [9] is strongly recommended, particularly for Lines 2 and 4 which exhibited the highest failure potential. Numerical modeling (DEM/DFN) and regular updates of stability analyses using machine learning approaches are also suggested for optimizing slope angles and reducing waste-to-ore ratios in future mining phases.
