

تحلیل پایداری و ارزیابی ریزش سنگین مجدد در دیواره معدن روباز انگوران

ابراهیم یعقوبی^۱، مسعود شمس‌الدین سعید^{۲*}، پرویز معارف‌وند^۳

۱- کارشناس ارشد استخراج، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی معدن، بخش معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

(دریافت: اسفند ۱۳۹۳، پذیرش: دی ۱۳۹۵)

چکیده

پایداری شیب یکی از پارامترهای اصلی و تعیین کننده در اقتصاد و ایمنی در معادن روباز است. شکست و به تبع آن گسیختگی شیب سبب زیان‌های جبران‌ناپذیر اقتصادی و جانی می‌شود. عوامل زیادی در ناپایداری شیب در معادن اثرگذارند. آنچه که در این تحقیق از آن با نام ریزش سنگین یاد می‌شود، ریزش‌های بالای ۵ الی ۶ میلیون تن است که چندین پله از معدن را شامل شده و روند استخراج در معدن را با مشکل مواجه می‌سازد. نمونه‌ای از این ریزش‌های بزرگ در معدن سرب و روی انگوران رخ داده است که به سبب آن حدود ۴۰ میلیون تن باطله به درون پیت لغزید و خسارات سنگینی به اقتصاد معدن وارد کرد. لذا ارزیابی احتمال ریزش مجدد در این معدن برای جلوگیری از خسارات و هزینه‌های احتمالی ضروری است. برای بررسی و مطالعه دقیقتر خواص ژئومکانیکی معدن انگوران، درزه‌های اصلی و گسل‌های موجود در معدن از نزدیک مورد مطالعه قرار گرفت و تعدادی نمونه از بخش آهکی معدن برای انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی جهت تعیین خصوصیات ژئومکانیکی برداشت شد. پس از انجام آزمایشات مکانیک سنگی، با استفاده از نرم‌افزار 3DEC مدل سه بعدی معدن ساخته شد و ارزیابی‌های اولیه بر روی آن انجام گرفت. با توجه به جابجایی‌های اولیه به دست آمده از نرم‌افزار و خواص ژئومکانیکی دیواره شرقی و شکل مقعر معدن در دیواره شمالی، این دیواره‌ها پایدار در نظر گرفته شد و در ادامه به ارزیابی احتمال ریزش در دیواره غربی پرداخته شده است. برای بررسی پایداری دیواره غربی، مدل با مقادیر مختلف چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای شیبست و گسل موجود در این دیواره اجرا شد و ملاحظه شد که میزان جابجایی‌ها در پای دیواره بیشتر است. لذا بر روی جابجایی‌های صورت گرفته در پای دیواره تحلیل آماری صورت گرفت و احتمال ریزش سنگین مجدد در معدن بر اساس جابجایی‌های حاصل، ۳۵/۲ درصد به دست آمد.

کلید واژه‌ها

پایداری شیب، ریزش سنگین، معدن روباز انگوران، 3DEC

ارجاع به این مقاله:

یعقوبی، الف، شمس‌الدین سعید، م، معارف‌وند، پ، (۱۳۹۵)، تحلیل پایداری و ارزیابی ریزش سنگین مجدد در دیواره معدن روباز انگوران، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۶(۱۲)، ۳۳-۴۵.

۱- مقدمه

به کارهای صورت گرفته در این زمینه در معدن انگوران اشاره می‌شود. روش‌های متداول تحلیل پایداری شیب عبارتند از:

- روش‌های تجربی
- بررسی‌های سینماتیکی
- روش‌های تعادل حدی
- روش‌های احتمالاتی و
- روش تحلیل عددی

در خصوص پروژه حاضر نیز مطالعاتی قبلاً صورت گرفته است. لازم به ذکر است که اکثر کارهای صورت گرفته قبلی، بر روی ریزش سنگین معدن انگوران که در سال ۱۳۸۵ به وقوع پیوست، تمرکز دارند. از جمله این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

سلطانی (۱۳۷۸) مطالعه‌ای تحت عنوان تخمین پارامترهای ژئوتکنیکی توده‌سنگ و طراحی شیب بهینه در معدن انگوران، انجام داد. در این مطالعه خواص ژئومکانیکی توده‌سنگ از طریق برداشته‌ها و انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی تخمین زده شد و با استفاده از نتایج به دست آمده، یک شیب بهینه برای معدن طراحی شد که در آن به امکان افزایش قابل ملاحظه شیب اشاره شد [۴].

روشن‌قلب (۱۳۸۶) مطالعه‌ای با عنوان بررسی رفتار شکستگی ایجاد شده در پشت دیواره پیت معدن سرب و روی انگوران و ارائه راهکار جهت رفع مشکل، انجام داد. در مطالعه مذکور بیشتر بر روی دلایل اصلی در وقوع ترک و پایش جابجایی‌ها پرداخته شده است [۵].

معارف‌وند و احمدی (۱۳۸۸) مطالعه‌ای تحت عنوان گزارش وضعیت توده نابرجای معدن انگوران پس از ریزش، با همکاری شرکت معدن زمین انجام دادند. همچنین آنها گزارشی با عنوان برنامه‌ریزی معدن انگوران و ساخت مدل آنالیز ریسک ارائه کردند که طی آن برای برآورد ریسک معدنکاری چهار معیار در نظر گرفته شد. برای برآورد ریسک کلی، ریسک به دست آمده از سه معیار با وزن‌های مختلف با هم جمع شده و با ضریب ایمنی (معیار چهارم) تصحیح شد. با توجه به این تحلیل ریسک، سناریوهای سبک‌سازی برای توده ریزشی انتخاب می‌شود [۶]. معارف‌وند و احمدی (۱۳۸۹) گزارش محاسبات ایمنی در حال کار برای معدن انگوران را ارائه کردند [۶].

ناپایداری شیب در معدن روباز یکی از مشکلات جدی به شمار می‌رود و همواره یکی از موارد خطرآفرین در معدن به حساب می‌آید، علاوه بر آن برنامه تولید معدن نیز دچار اختلال می‌شود. برای بالا بردن ایمنی در معدن روباز ضروری به نظر می‌رسد که رفتار و تغییر شکل‌های خطرناک شیب‌ها، تحت کنترل باشند. ارزیابی پایداری در شیب‌های سنگی نیازمند استفاده صحیح از داده‌های زمین‌شناسی، وضعیت آب‌های زیرزمینی، وضعیت آب و هوایی منطقه، مقاومت و شکل پذیری توده سنگ، لرزه خیزی منطقه و شرایط تنش‌های برجا است. لذا پارامترهای مختلفی در پایداری یک شیب تاثیر دارند. در اثر عملیات استخراج حجم زیادی از سنگ جابجا می‌شود و این باعث رهاسازی تنش در محدوده معدن می‌شود. رهاسازی تنش در اثر فعالیت‌های معدن‌کاری باعث واکنش الاستیک و جابجایی‌های رهایی زمین خواهد شد و این رفتار تحت عنوان رفتار وابسته به زمان شناخته می‌شود [۱]. با ادامه حفاری، جابجایی‌های شیب به صورت شتابدار افزایش یا کاهش می‌یابد [۲]. با افزایش سطح کرنش‌ها، پدیده کرنش نرمی باعث ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک و رشد جابجایی‌های منجر به شکست می‌شود. نرخ یا سرعت جابجایی‌ها به عنوان بهترین نشانگر فرآیند شکست در شیب‌ها شناخته شده است [۳].

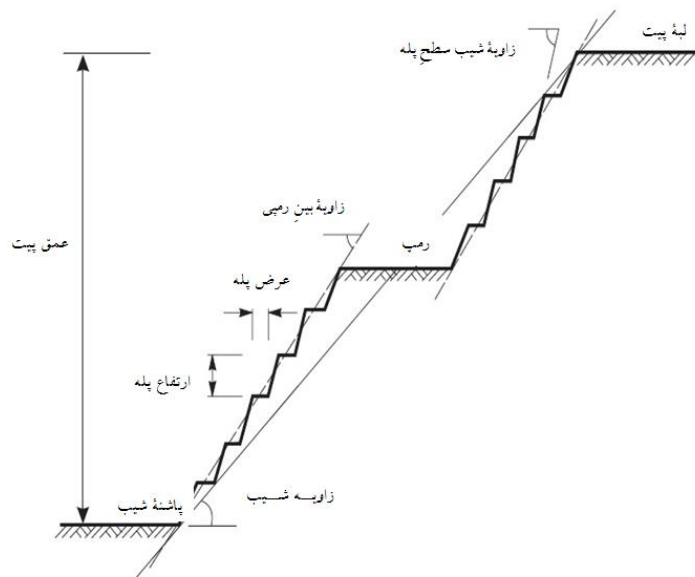
در این تحقیق، به بررسی پایداری شیب و ارزیابی ریزش سنگین مجدد در معدن انگوران پرداخته شده است. با توجه به آزمایش‌های مکانیک‌سنگی انجام شده و خواص ژئومکانیکی موجود برای دیواره‌های معدن، ریزش پیشین صورت گرفته در معدن و نظر کارشناسان و متخصصین در این زمینه، در دیواره غربی این معدن احتمال ناپایداری وجود دارد. لذا علاوه بر تحلیل جابجایی‌ها برای کل معدن، بیشتر به بررسی و تحلیل دیواره غربی در شرایط معدنکاری فعلی پرداخته شده است.

۲- کارهای انجام شده پیشین در معدن انگوران

تا به امروز مطالعات زیادی در عرصه پایداری شیب در معدن روباز توسط محققین انجام شده است. در این بخش به روش‌های متداول در تحلیل پایداری شیب اشاره شده و

همین اساس، ناپیوستگی‌های ساختاری موجود در سنگ و به ویژه سنگ درون‌گیر مانند گسل‌ها، درزه‌ها، صفحات لایه‌بندی نیز در پایداری شیب‌ها بسیار موثر هستند. ارتفاع و زاویه شیب نیز از عوامل اصلی تعیین کننده پایداری شیب هستند و آب نیز یکی از فاکتورهای مؤثر در پایداری محسوب می‌شود. هدف اصلی از تحلیل پایداری شیب‌ها، تخمین میزان فاکتور ایمنی است [۸].

شکست انواع مختلفی دارد که از این میان شکست صفحه‌ای، گوه‌ای، واژگونی و قاشقی نسبت به سایر انواع آن اهمیت بیشتری دارند. سه جزء اصلی طراحی شیب یک معدن روباز در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: هندسه معمول شیب معدن روباز بیانگر رابطه بین شیب کلی معدن، شیب داخل رمپ و هندسه پله [۹]

واقعی، چندین نوع ساختار زمین‌شناسی ممکن است وجود داشته باشد و موجب افزایش انواع دیگری از شکست شود. تمرکز قطب‌های مهم ناپیوستگی در تصویر داده‌های ساختمانی یک مطالعه صحرایی بر روی استریونت، ممکن است به شناسایی صفحات شکست بالقوه و حذف ساختارهای غیر محتمل برای شکست شیب کمک کند. معیارهایی برای شناسایی تمرکز قطب‌های مهم توسط مارکلند (۱۹۷۲) و هاکنینگ (۱۹۷۶) ایجاد شده است. این معیارها امکان شکست گوه‌ای را برقرار می‌کند و در آن، لغزش در طول خط محل تقاطع دو ناپیوستگی، اتفاق می‌افتد (شکل ۲-ب). شکست صفحه‌ای که در شکل (۲-الف) نشان داده شده است نیز با این معیار قابل بررسی

بهبهانی (۱۳۹۰) مطالعه‌ای با عنوان مدل سبک‌سازی توده در حال لغزش معدن انگوران انجام داد. در بررسی مذکور به مدلسازی توده ریزشی پرداخته شده و پس از آن میزان حداکثر سرعت جابجایی‌ها بر اساس پنج مرحله سبک‌سازی تعیین شده است [۶].

۳- پایداری شیب در معدنکاری روباز

عمق معادن روباز معمولاً بیش از ۳۰۰ متر است و در معادن مس پورفیری مانند چوکیکاماتا و بینگهام کانیون^۱، ارتفاع دیواره بیش از ۶۰۰ متر و در قسمت‌هایی به ۱۲۰۰ متر می‌رسد [۷]. در این حالت میزان تمرکز تنش در کف پیت معدن تقریباً برابر با میزان مقاومت سنگ است. بر

۳-۱- حالت‌های ناپایداری شیب

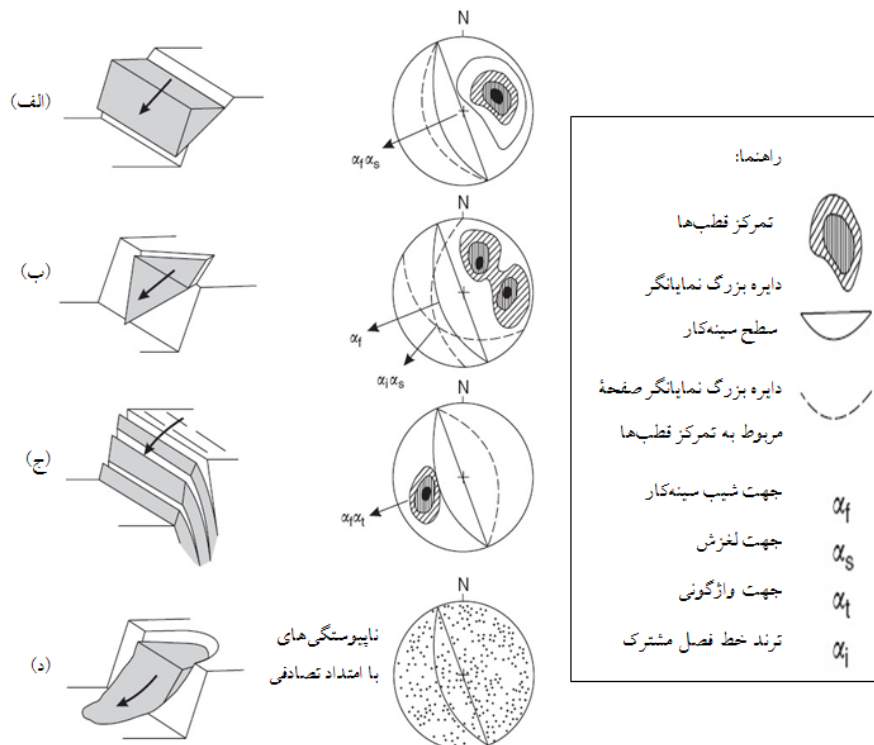
شکل ۲ چهار نوع شکست مهم را نشان می‌دهد. در این شکل، تصاویر قطب ناپیوستگی‌های عامل شکست‌ها نیز نشان داده شده است. نکته مهم در ارزیابی پایداری، لحاظ کردن شیب سینه‌کار در تصاویر استریونت است. زیرا، وقوع لغزش تنها در صورت حرکت بلوک به سمت سینه‌کار آزاد است که با برش ایجاد شده است. تشخیص بین این چهار نوع شکست شیب از آن جهت اهمیت دارد که انواع خاصی از تحلیل پایداری برای هر یک از این موارد وجود دارد. دیاگرام‌هایی که در شکل ۲ آورده شده است، برای وضوح بیشتر، ساده شده‌اند در حالی که در یک شیب سنگی

از سطح دریا واقع شده‌است. راه دسترسی به معدن، جاده آسفالت زنجان-دندی در مسیر تکاب به طول ۹۵ کیلومتر و در ادامه جاده آسفالت دندی به معدن به مسافت ۳۰ کیلومتر است. این معدن از نظر مختصات جغرافیایی در طول ۴۷ درجه و ۳۴ دقیقه شرقی و عرض ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه شمالی قرار دارد (شکل ۳).

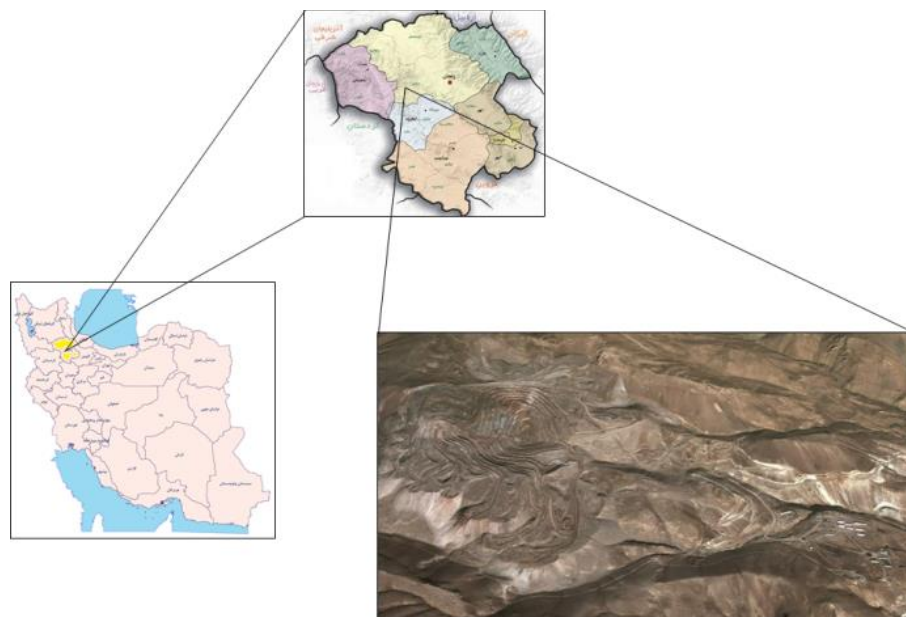
است، به طوری که موردی خاص از شکست گوهی محسوب می‌شود [۹].

۴- معدن روباز سرب و روی انگوران

معدن سرب و روی انگوران در ۱۲۵ کیلومتری جنوب غرب زنجان در منطقه‌ای با ارتفاع متوسط ۲۹۵۰ متر



شکل ۲: انواع اصلی شکست بلوکی در شیب‌ها و شرایط زمین‌شناسی ساختاری مساعد برای وقوع این شکست‌ها [۹]



شکل ۳: موقعیت جغرافیایی معدن انگوران

۴-۲- مشخصات هندسی کانسار

بنابر گزارش‌های ارائه شده و مقاطع ترسیم شده، کانسار انگوران در بخش مرکزی یک طاق‌دیس، بین دو بخش دگرگونی شیستی و آهکی واقع شده است. در کمر بالای کانسار، طبقات آهکی قرار دارند و شیب کلی آنها حدود ۲۰ تا ۲۵ درجه در جهت جنوب‌شرق است. در کمر پایین، شیست‌های کلریتی قرار دارند که شیب کلی آنها ۱۰ تا ۲۵ درجه و در همان جهت جنوب‌شرق است. به طور کلی کانسار انگوران از کمر بالا به کمر پایین دارای این نوع تقسیم‌بندی سنگ‌شناسی است:

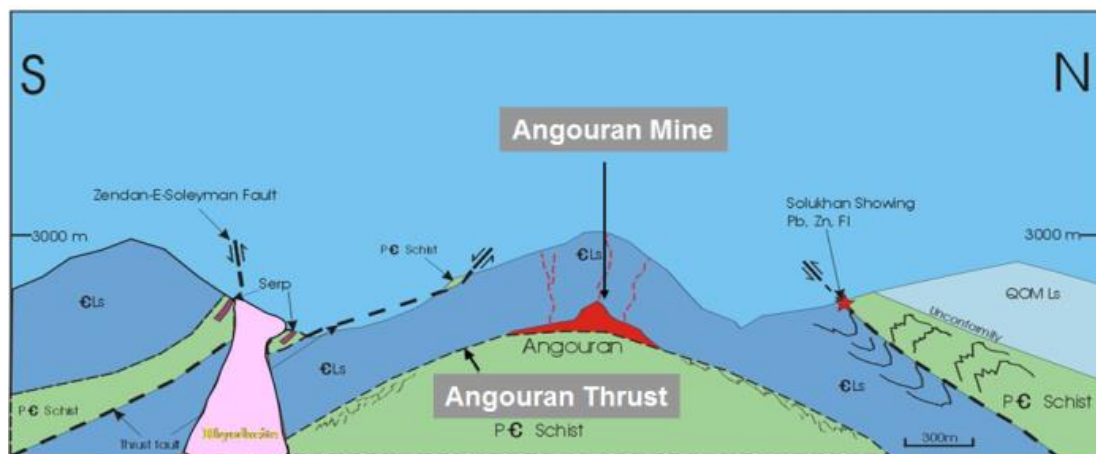
- سنگ آهک خاکستری متبلور و نیمه متامورف
- ماده‌ی معدنی اکسیده
- ماده‌ی معدنی مخلوط
- ماده‌ی معدنی سولفور
- شیست‌های کلریتی

شکل هندسی کانسار انگوران بر اساس اطلاعات حاصل از گمانه‌های اکتشافی و با کمک مدلسازی توسط نرم‌افزارهای کامپیوتری تقریباً مشابه یک گلابی با شیبی در حدود ۲۰ تا ۳۰ درجه در جهت جنوب‌شرقی گزارش شده است. در مقاطع افقی، بزرگترین طول کانسار در جهت شمال‌شرق-جنوب‌غرب و بزرگترین عرض آن شمال‌غرب-جنوب‌شرق است (شکل ۴).

معدن سرب و روی انگوران با ظرفیت تولید ۸۰۰ هزار تن در سال و میزان ذخیره باقیمانده‌ای بالغ بر ۱۲ میلیون تن سرب و روی با عیار متوسط ۲۵ تا ۳۰ درصد روی و ۳ تا ۶ سرب، جزء معادن فلزی برگ کشور محسوب می‌شود. بر اساس طراحی‌های صورت گرفته، معدن انگوران بصورت روباز استخراج می‌شود. شیب نهایی معدن در سنگ باطله ۴۵ درجه و در ماده معدنی ۳۵ درجه در نظر گرفته شده است. ارتفاع پله‌ها ۱۰ متر (به استثنای بالاترین افق که ۱۵ متر ارتفاع دارد) و با شیب ۷۴ درجه در باطله و ۶۰ درجه در ماده معدنی است.

۴-۱- زمین‌شناسی عمومی منطقه انگوران

بر اساس اظهارات کارشناسان زمین‌شناس معدن، سازند زمین‌شناسی در بر گیرنده معدن سرب و روی انگوران، سازند سنندج - سیرجان است. این سازند در اصل جزئی از ایران مرکزی بوده ولی با اختصاصات ویژه‌ای متمایز شده و به صورت نوار طویل دگرگون شده‌ای در امتداد و به موازات روران‌دگی زاگرس قرار دارد. از این سازند تحت عناوین مختلف مانند زون ارومیه - اسفندقه، زاگرس داخلی و بالاخره زون سنندج - سیرجان یاد شده است. ادامه این زون از سمت شمال‌غربی وارد کشور ترکیه می‌شود که آن نیز دگرگون شده است. مرز شمالی این زون با ایران مرکزی از دشت‌های آبرفتی کوآترن و فرورفتگی‌های طویل به موازات روران‌دگی زاگرس نظیر فرورفتگی سیرجان - گاوخونی و فرورفتگی اراک عبور می‌نماید [۱۰].



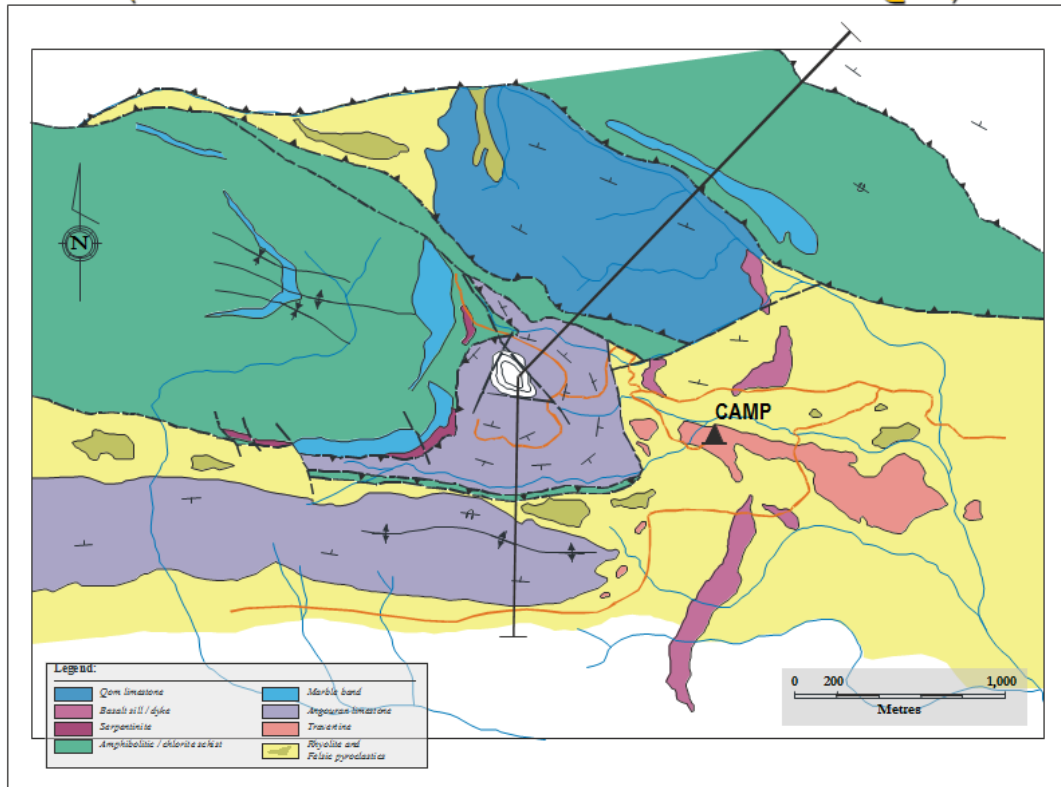
شکل ۴: مقطع عرضی جنوب-شمال، موقعیت ماده معدنی [۱۰]

۲۹۸۰ بزرگترین طول و عرض کانسار به ترتیب ۳۴۰ و ۱۶۰ متر است. استخراج معدن با روش روباز از سطح زمین

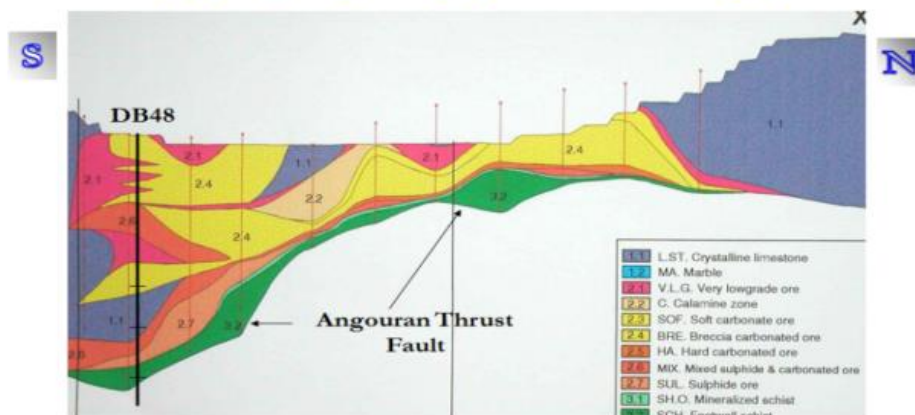
کانسار در غرب معدن از افق ۲۹۸۰ و در شرق معدن از افق ۲۹۶۰ شروع شده و تا افق ۲۷۰۰ ادامه دارد. در تراز

آغاز شده و در حال حاضر کف پیت در تراز ۲۸۵۰ قرار دارد. شکل ۵ نقشه زمین‌شناسی محلی انگوران و کانسنگ‌های موجود را نشان می‌دهد.

زمین‌شناسی محلی (منبع: نقشه ۱:۱۰/۰۰۰ زمین‌شناسی معدن انگوران)



مقطع عرضی جنوب - شمال معدن انگوران و کانسنگ‌های موجود (منبع: نقشه ۱:۱۰/۰۰۰ زمین‌شناسی معدن انگوران)



شکل ۵: نقشه زمین‌شناسی محلی و کانسنگ‌های موجود منطقه انگوران

اولین مرحله در ساخت مدل تصمیم‌گیری برای انجام تحلیل‌های دو بُعدی یا سه بُعدی است. با بهبود رایانه‌های شخصی، تحلیل‌های سه بُعدی به صورت متداولتری رواج

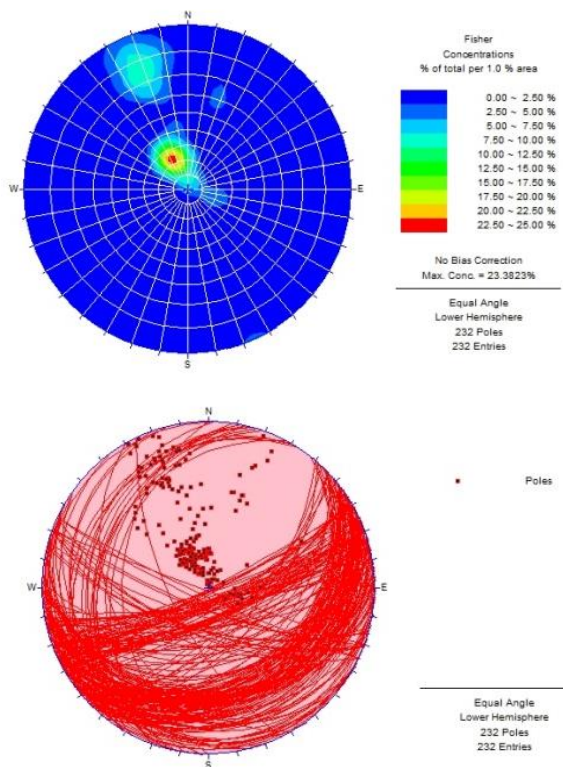
۵- تحلیل پایداری و ارزیابی ریزش سنگین مجدد در معدن انگوران

۵-۱- تحلیل سه بُعدی در مقابل تحلیل دو بُعدی

علاوه بر داده‌های پیشین، طی بازدیدهای صورت گرفته از نقاط مختلف معدن نمونه‌گیری و در کنار آن برداشت درزه‌ها و ناپیوستگی‌های اصلی صورت گرفت. به دلیل خرد و شکسته بودن بیش از حد شیست‌ها، نمونه‌های آهکی برای آزمایش‌های مقاومتی انتخاب و برای شیست از نتایج کارهای انجام گرفته پیشین استفاده شد.

با ترکیب مشخصات درزه‌های برداشت شده و مشخصات درزه‌های دریافت شده از شرکت مشاور، نمودار کنتوری و قطب تمام درزه‌ها در محدوده معدن به صورت شکل ۶ ارائه می‌شود.

با توجه به نمودار شکل ۶ دو دسته درزه جهت وارد کردن به مدل هندسی برای معدن در نظر گرفته شد. همچنین طبق مشاهدات به عمل آمده و نظر کارشناسان معدن، سه گسل اصلی در معدن انگوران وجود دارد که می‌توان از روی زون گسلی به وجود آنها پی برد و مشخصات آنها را ثبت کرد. تمامی مشخصات ناپیوستگی‌ها و خواص ژئومکانیکی توده‌سنگ محل جهت تحلیل با نرم‌افزار المان مجزا 3DEC طی جدول‌های ۱ تا ۴ آورده شده‌است.



شکل ۶: نمودار کنتوری و قطب تمام درزه‌های معدن

یافت. اصولاً تحلیل‌های سه‌بعدی در موارد زیر پیشنهاد می‌شود [۱۱]:

- جهت قطع ساختارهای زمین‌شناسی اصلی در محدوده ۲۰-۳۰ درجه از مقطع شیب نباشد.
- محور قطع انیزوتروپی مواد در محدوده ۲۰-۳۰ درجه از مقطع شیب نباشد.
- هیچکدام از جهت‌های تنش‌های اصلی موازی یا عمود بر شیب نباشند.
- توزیع واحدهای ژئومکانیکی در طول قطع کردن شیب تغییر کند.
- هندسه شیب در صفحه، نمی‌تواند با فرض تقارن محوری یا کرنش صفحه‌ای، با تحلیل دو بعدی نمایش داده شود.

در بیشتر تحلیل‌های طراحی شیب، یک هندسه دوبعدی متشکل از یک برش واحد به عنوان یک شیب طولانی به صورت نامحدود، تحت شرایط کرنش صفحه‌ای فرض می‌شود. به عبارت دیگر شعاع‌های پاشنه و لبه، نامحدود فرض می‌شود. در معادن روباز که شعاع‌های انحنا می‌تواند تأثیر مهمی بر زوایای شیب ایمن داشته باشد، چنین شرایطی حاکم نیست. شیب‌های مقعر پایداری بیشتر نسبت به شیب‌های کرنش صفحه‌ای ایجاد می‌کنند که به واسطه ممانعت جانبی است که با مواد اطراف یک شکست بالقوه در یک شیب مقعر فراهم می‌شود. علی‌رغم اهمیت بالقوه آن در پایداری شیب برای ارزش‌گذاری این اثر، کار کمی انجام شده است. یک علت اینکه طراحان بی‌میل به استفاده از مزیت تأثیرهای سودمند انحنای شیب مقعر هستند، این است که حضور ناپیوستگی‌ها اغلب می‌تواند این تأثیرها را خنثی کند. به هر حال برای شیب‌های سنگی توده‌ای یا شیب‌های با درزه‌های با طول اثر نسبتاً کوتاه، تأثیرهای سودمند انحنای شیب نباید نادیده گرفته شود، به خصوص در معادن روباز که سود اقتصادی شیب‌های با شیب بیشتر می‌تواند مهم باشد [۱۱].

۵-۲- پارامترهای ژئومکانیکی لازم در تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار 3DEC

از آنجا که تحلیل پایداری شیب معدن انگوران با نرم‌افزار 3DEC، منوط به داشتن خواص مقاومتی دیواره، مشخصات گسل‌ها و ناپیوستگی‌های موجود در معدن است،

جدول ۱: مشخصات دسته درزه‌ها و گسل‌های محدوده معدن

ناپیوستگی	شیب (درجه)	جهت شیب (درجه)	C (kPa)	Φ (deg)	Ks (GPa/m)
J1	۷۸	۱۶۰	۲۰۳	۲۶/۷	۰/۷۹۸
J2	۲۰	۱۵۰	۲۰۳	۲۶/۷	۰/۷۹۸
گسل شرقی - غربی	۷۷	۲۱۹	۳۰	۴۹	
گسل شمالی - جنوبی	۷۹	۱۷۷	۴۰	۴۷	
گسل غربی - شمالی	۸۲	۱۰۲	۳۰	۴۹	

جدول ۲: پارامترهای مقاومتی سنگ بکر به دست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی برای سنگ آهک

E (MPa)	ν	K (GPa)	G (GPa)	C (MPa)	Φ (deg)	ρ (kg/m ³)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)
۳۱۰۸/۴	۰/۲۵	۲/۰۷	۱/۲۴	۱۴	۴۵	۲۵۹۱	۴۲/۲۶	۴/۰۸

جدول ۳: پارامترهای مقاومتی شیست [۱۰]

E (MPa)	ν	K (GPa)	G (GPa)	C (kPa)	Φ (deg)	ρ (kg/m ³)
۴۰۸۵	۰/۲۸	۳/۰۹	۱/۶	۷۰۵	۲۷/۵	۲۵۰۰

جدول ۴: خواص ژئومکانیکی در نظر گرفته شده برای ماده معدنی

K (MPa)	G (MPa)	γ (kg/m ³)	C (MPa)	Φ	σ_t (MPa)
۲۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰۰۰	۱	۳۰	۳

۶- نتایج

در قسمت غرب معدن در زیر توده آهکی قرار گرفته است. ماده معدنی نیز در مرکز پیت در نظر گرفته شده است.

✓ مرحله سوم: وارد کردن ناپیوستگی‌ها و گسل‌ها می‌رسد.

✓ مرحله چهارم: مش‌بندی صورت گرفت و در مرحله بعدی اطراف مدل در بازه‌های معین ثابت شده تا مدل تحت نیروی وزن خود به تعادل برسد. در مرحله اول مدل به تعادل استاتیکی در حالت الاستیک رسانده شد.

✓ مرحله پنجم: مدل تحت شرایط پلاستیک نیز به تعادل استاتیکی رسانده شد.

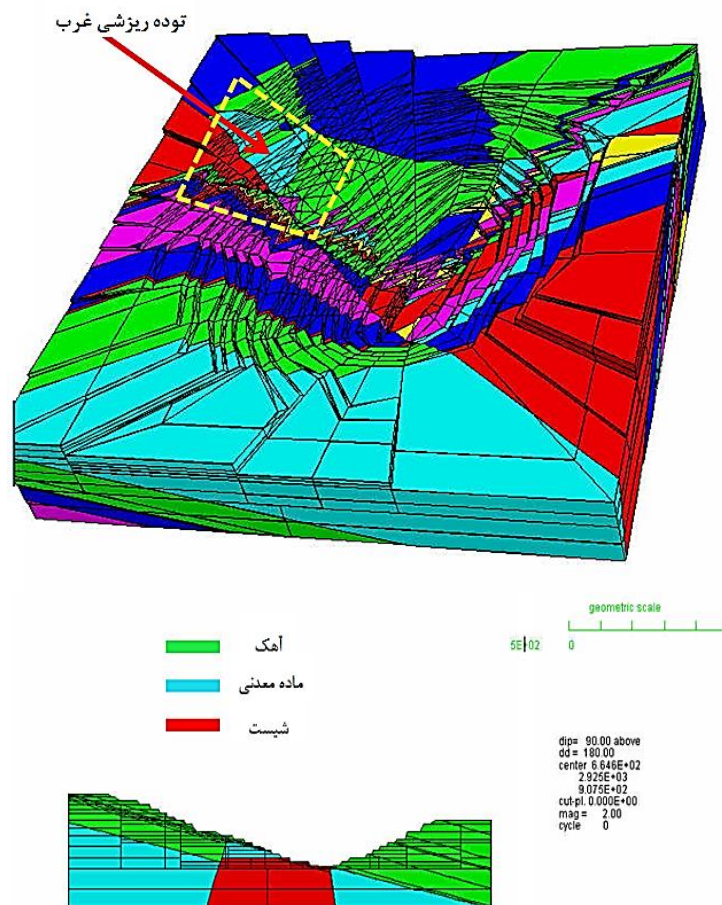
شکل ۷ نمای از پیت معدن و مدل هندسی ساخته شده توسط نرم‌افزار 3DEC را نشان می‌دهد. وجود رنگ‌های متفاوت در مدل به منظور جداسازی ناپیوستگی‌ها و عارضه‌های زمین‌شناسی از همدیگر است.

✓ مرحله اول: ساخت هندسه مدل است. برای ساخت هندسه، از نقشه اتوکد پیت معدن استفاده شد. در مدل ساخته شده بالاترین تراز لبه پله ۳۱۱۰ و پایین‌ترین تراز پاشنه پله ۲۸۵۰ در نظر گرفته شد. از آنجایی که در ساخت هندسه مدل از نقشه اجرایی معدن استفاده شد، مدل ساخته شده همخوانی بسیار بالایی با شرایط واقعی معدن دارد. ابعاد نهایی مدل ساخته شده ۲۶۰×۶۰۰×۱۱۰۰ متر است.

✓ مرحله دوم: باید خواص ژئومکانیکی و ناپیوستگی‌ها به مدل اضافه شود. در حالت کلی برای معدن سه زون تعریف شد که عبارتند از: منطقه آهکی، شیستی و زون ماده معدنی. بخش آهکی در قسمت شرق معدن بوده و توده شیستی با شیب ۱۷ درجه در جهت جنوب‌شرقی،



↑N



شکل ۷: بالای نمایی از پیت معدن (دید به سمت جنوب)، وسط) مدل ساخته شده توسط نرم‌افزار 3DEC، پایین) مقطع شرقی-غربی مدل ساخته شده در نرم‌افزار 3DEC

مسئله در جهت پایداری این دیواره است. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مکانیک سنگی، سنگ آهک دیواره شرقی نسبت به سایر دیواره‌ها از مقاومت بیشتری برخوردار است. مشاهدات سر زمین و نتایج به دست آمده از نرم‌افزار 3DEC گواه این امر است که این

شیب لایه‌بندی سنگ‌های آهکی در دیواره شرقی حدود ۲۱ درجه و جهت شیب به سمت شرق (N112E) و بیشترین شیب دیواره معدن در این دیواره در جهت غرب (N120W) است. مشاهده می‌شود که شیب لایه‌بندی در دیواره شرقی در جهت مخالف شیب معدن است و این

برای تعیین احتمال ریزش، چندین مقدار C (چسبندگی) و ϕ (زاویه اصطکاک داخلی) برای گسل و شیست در نظر گرفته شد که در جدول ۵ آورده شده است. در سه حالت از مقادیر این جدول استفاده شد و مقدار جابجایی‌ها در جهت X (به طرف داخل معدن) در سه نقطه از دیواره ثبت شد. این سه نقطه به ترتیب در بالاترین نقطه دیواره، میانه دیواره و پاشنه دیواره انتخاب شده است (شکل ۸). پس از انجام تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار *Minitab* احتمال ریزش برای دیواره غربی معدن محاسبه شده است.

جدول ۵: مقادیر در نظر گرفته شده برای C و ϕ (گسل و شیست)

چسبندگی C	زاویه اصطکاک داخلی ϕ (درجه)
شیست ۰٫۴ ۰٫۶ ۰٫۸ ۱ ۱٫۲ ۷٫۵ ۱۷٫۵ ۲۷٫۵ ۳۷٫۵ ۴۷٫۵	گسل ۲۰ ۳۰ ۴۰ ۵۰ ۶۰ ۲۷ ۳۷ ۴۷ ۵۷ ۶۷

*مقدار C برای شیست براساس مگاپاسکال و برای گسل براساس کیلوپاسکال است

حالت اول: در این حالت مدل تنها با تغییر دادن یکی از پارامترها (استفاده از مقادیر جدول ۵) و ثابت نگه داشتن مقادیر واقعی دیواره به اجرا درآمد. شکل ۹ نمونه‌ای از جابجایی‌ها را برای دیواره با مقدار چسبندگی ۶۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد (جابجایی‌ها به متر است).

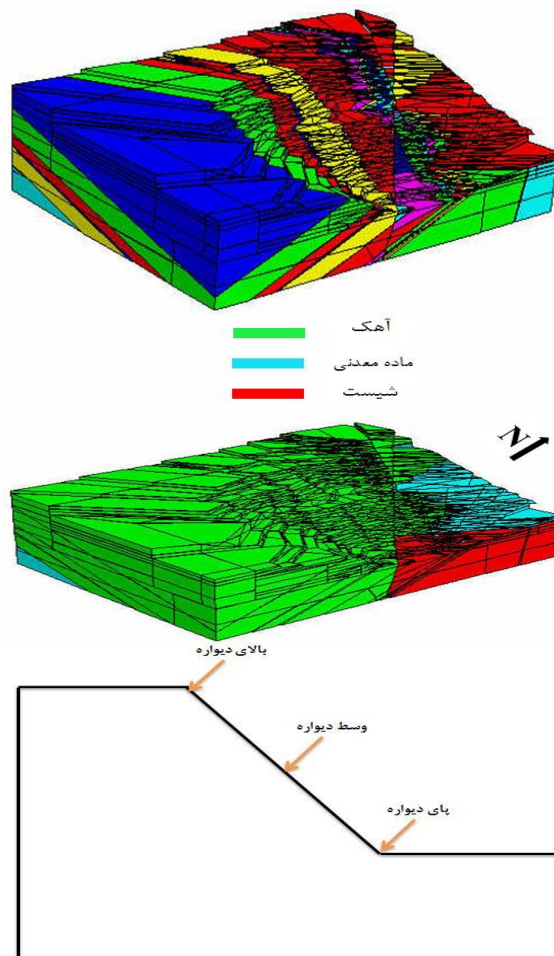
حالت دوم: در این حالت چسبندگی و زاویه اصطکاک در ابتدا برای گسل ثابت و چسبندگی و زاویه اصطکاک شیست تغییر کرد و در مرحله دوم برعکس عمل شد و جابجایی‌ها پس از اجرای مدل ثبت شد. شکل ۱۰ نمودار حالتی که چسبندگی و زاویه اصطکاک برای گسل ثابت نگه داشته شده و چسبندگی و زاویه اصطکاک شیست تغییر کرده است و نیز عکس این حالت را نشان می‌دهد.

حالت سوم: در این حالت با استفاده از نرم‌افزار *Minitab* و روش تاقوچی، مدل ساخته شده براساس ۲۵ حالت اصلی اجرا و جابجایی‌ها ثبت شد. برای نمونه شکل ۱۱ کنتور سرعت جابجایی در پاشنه دیواره غربی با شرایط ردیف ۱ جدول ۵ را نشان می‌دهد.

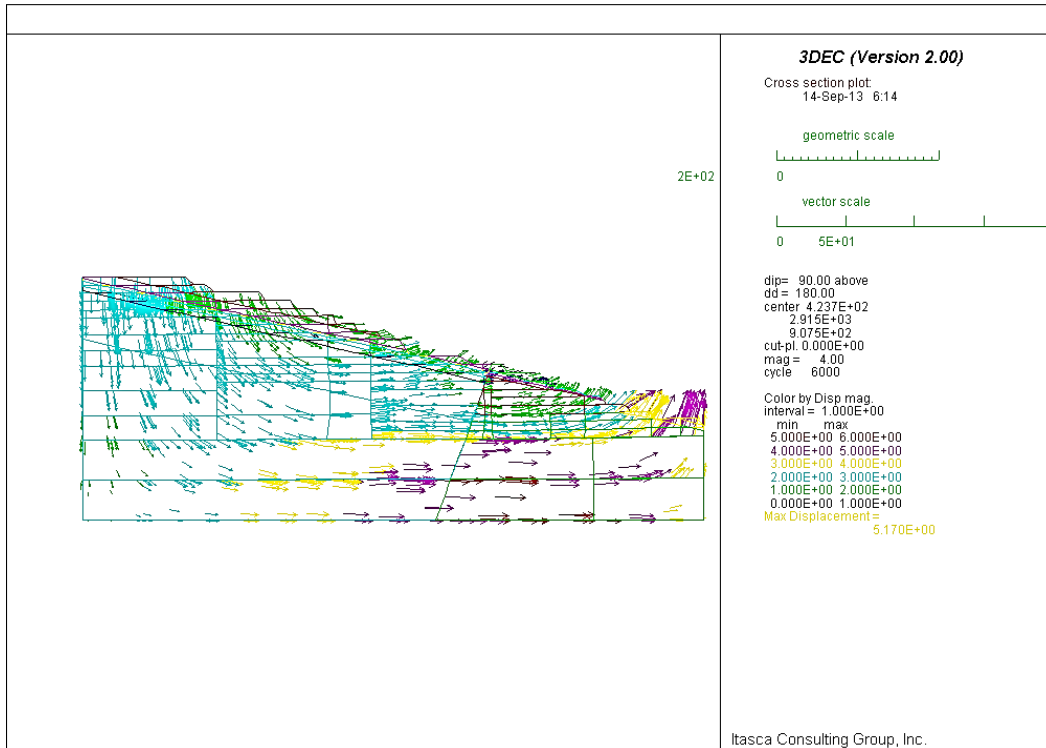
دیواره به نسبت سایر دیواره‌ها پایدارتر بوده و در واقع پایدارترین دیواره معدن در شرایط کنونی است. برای دیواره شمالی نیز با توجه به مقعر بودن دیواره در آن قسمت، احتمال ریزش در این دیواره کمتر است. اما نتایج به دست آمده برای دیواره غربی جابجایی قابل توجهی نشان می‌دهد بنابراین ارزیابی ریزش در قسمت غربی معدن امری ضروری است.

۶-۱- دیواره غربی و ارزیابی ریزش سنگین مجدد

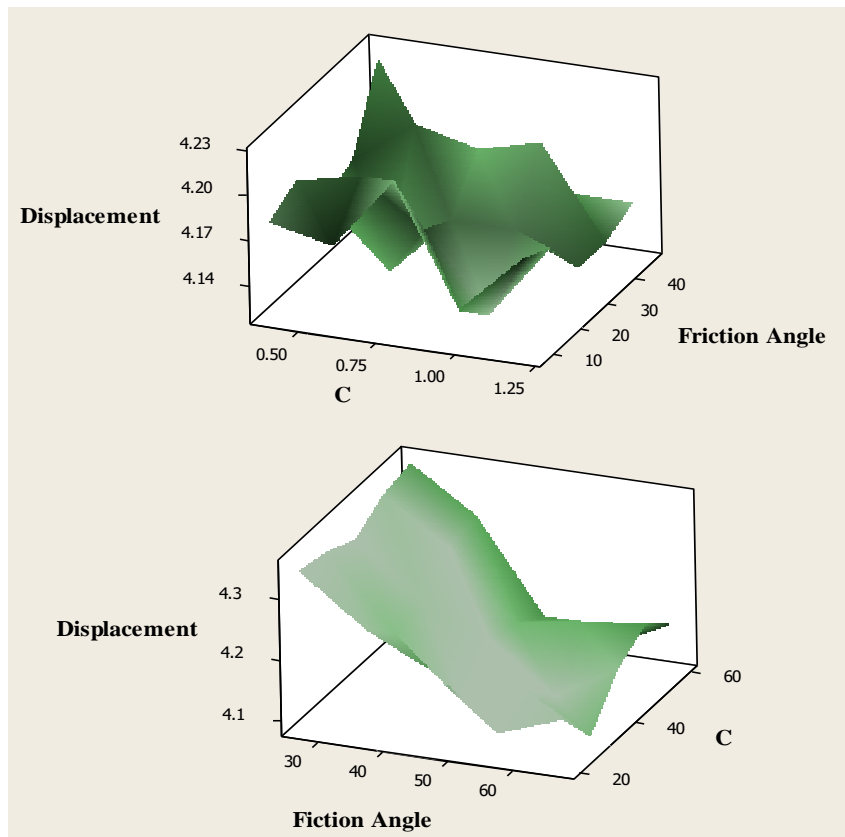
از آنجایی که در دیواره غربی لایه ضخیم شیست در زیر لایه آهکی قرار گرفته است و همچنین یک گسل در امتداد شمالی-غربی در این دیواره وجود دارد، این دو عامل به عنوان پارامترهای کلیدی که می‌توانند در وقوع ریزش احتمالی دخیل باشند، در نظر گرفته شدند. در مرحله اول دیواره غربی معدن، از مدل ساخته شده جدا شد تا جداگانه تحلیل شود (شکل ۸).



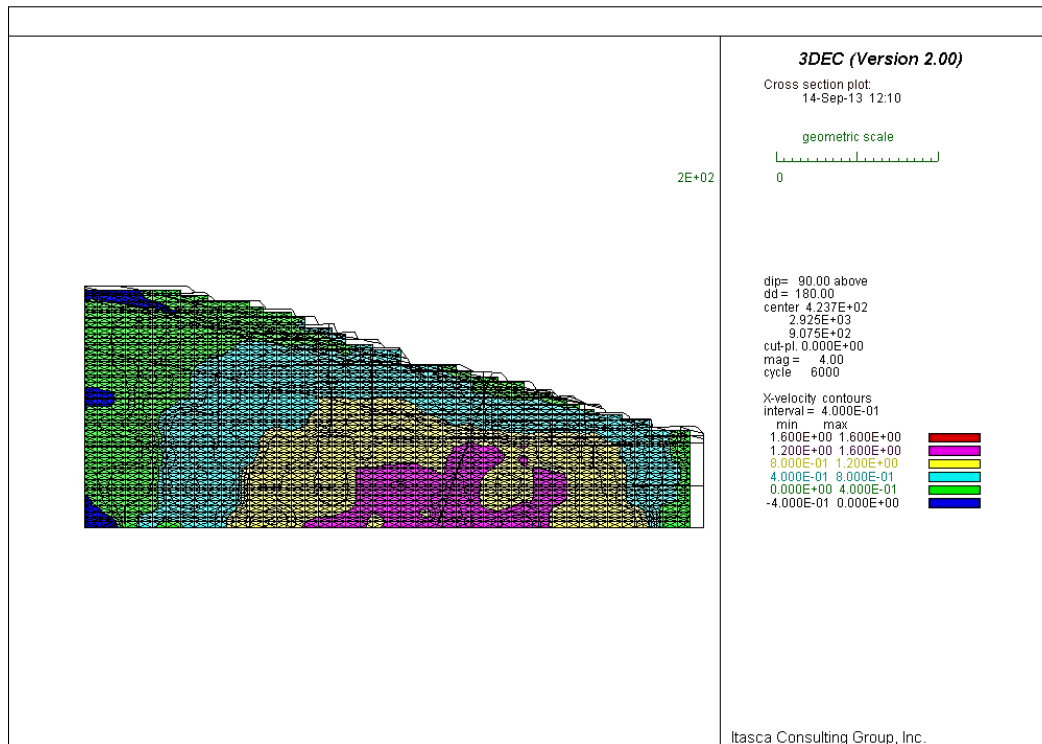
شکل ۸: دیواره غربی معدن (موقعیت گسل، لیتولوژی و محل ثبت نقاط جابجایی)



شکل ۹: جابجایی رخ داده در مقطعی از دیواره با مقدار چسبندگی ۶۰ کیلوپاسکال برای گسل



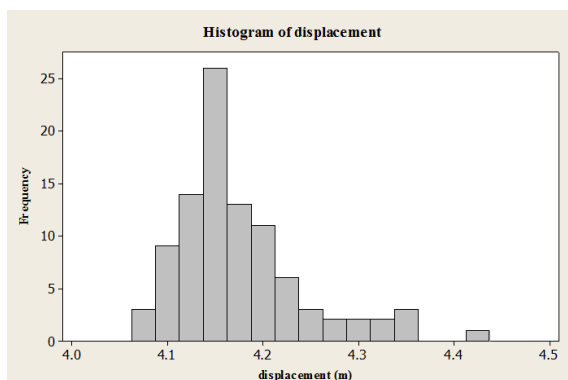
شکل ۱۰: بالا) نمودار جابجایی برای پای دیواره با ثابت نگهداشتن C و ϕ گسل و تغییر دادن C و ϕ شیبست، پایین) نمودار جابجایی برای پای دیواره با ثابت نگهداشتن C و ϕ شیبست و تغییر دادن C و ϕ گسل



شکل ۱۱: کنتور سرعت در دیواره غربی با شرایط چسبندگی ۱/۲ و زاویه اصطکاک داخلی ۷/۵ برای شیست

در این تحقیق به منظور دستیابی به اطلاعات دقیق در مورد معدن سرب و روی انگوران مطالعات میدانی و آزمایشگاهی انجام گرفت. براساس جابجایی‌های به دست آمده از مدل ساخته شده احتمال ریزش سنگین در معدن ارزیابی شد. نتایج کلی در زیر آورده شده است:

- نتایج حاصل نشان داد که سنگ آهک موجود در معدن از مقاومت بالایی برخوردار است و برای ارزیابی احتمال ریزش در معدن باید بر دیواره‌هایی که از شیست تشکیل شده‌اند، تمرکز کرد.



شکل ۱۲: هیستوگرام جابجایی‌های به دست آمده از تمامی حالات تحلیل

۲-۶- تحلیل نتایج

همانطور که مشاهده شد، جابجایی‌های مختلفی به ازای انواع C و ϕ به دست آمد. با توجه به مقادیر جابجایی در سه نقطه تعیین شده در دیواره، بیشترین جابجایی‌ها در پای دیواره رخ داد. لذا تحلیل آماری بر روی این جابجایی‌ها در کل سه حالت اشاره شده، انجام گرفت. در شکل ۱۲ هیستوگرام جابجایی‌ها رسم شده است.

با توجه به ۹۵ مورد جابجایی محاسبه شده و با در نظر گرفتن تمامی حالات ممکن چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای شیست و گسل موجود در دیواره غربی، میانگین جابجایی‌ها ۴/۱۷۵ متر به دست آمد. انحراف معیار جابجایی‌ها نیز برابر ۰/۰۶۶ محاسبه شد. با توجه به نمودار بالا و مقادیر آماری محاسبه شده، جابجایی بالاتر از ۴/۲ متر به عنوان ریزش بزرگ در معدن در نظر گرفته شد. احتمال ریزش مذکور با توجه به نمودار شکل ۱۳ برابر ۳۵/۲ درصد محاسبه شد. همچنین فاکتور ایمنی ۱/۳۸ برای وقوع ریزش با احتمال ۳۵/۲ محاسبه شد.

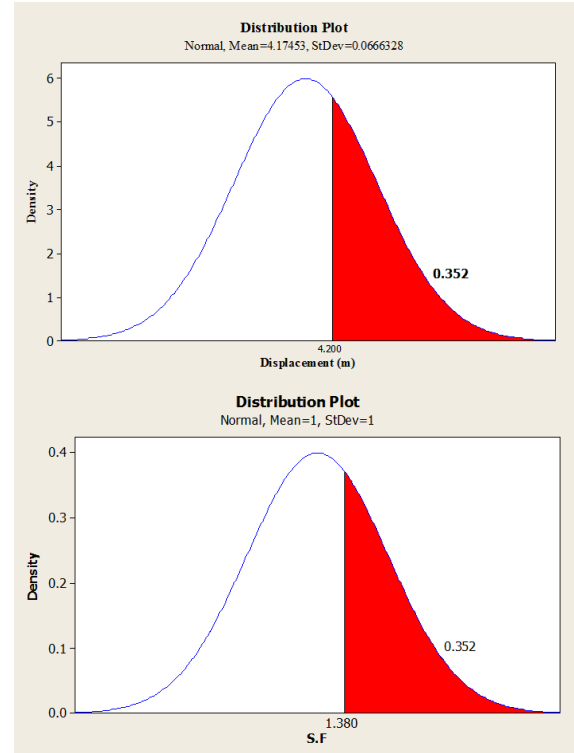
۷- نتیجه‌گیری

متر در پای دیواره، ۳۵/۲ درصد به دست آمد. همچنین مقدار فاکتور ایمنی برای وقوع ریزش با احتمال بیش از ۳۵/۲ درصد، ۱/۳۸ محاسبه شد.

مراجع

- [1] Zavodni ZM.; 2000; "Time-dependant movements in open pit slopes", In: Slope stability in surface mining, Hustrulid A., Carter MK. and Van Z.D, Littleton, Colorado, SME Inc., pp. 81-87.
- [2] Rose N.D. and Hunger O; 2007; "Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method", Int. J. of Rock Mechanics & Mining Science, vol. 44, pp. 308-320.
- [3] Crosta G.B. and Agiliardi F.; 2008; "Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements", Published on the National Research Council (NRC) Web site at: <http://cgj.nrc.ca> , Canadian Geotechnical Journal, Canada, pp. 176-191.
- [4] Soltani. A, (1999), Estimation of geotechnical parameters of rock mass and optimal slope design in Angooran mine. M.Sc thesis, Tarbiat Modarres University of Tehran, (in Persian).
- [5] Roshanghalb. M, (2007), Investigation of behavior of created failure in North wall of Angooran mine with offering solution, M.Sc thesis, Islamic Azad University of Tehran, (in Persian).
- [6] Behbehani. SS, (2011), Lighten Model of mass sliding of Angooran mine, M.Sc thesis, Islamic Azad University of Tehran, (in Persian).
- [7] Richard D.C., Paul F.C., Thomas M.R. and Ross C.B; 2000; "Managing and analyzing overall pit slopes", In: Slope stability in surface mining, Littleton, Colorado, SME Inc., pp. 39-46.
- [8] Pariseau W.G; 2006; "Design analysis in rock mechanic", Balkema; pp. 15-39.
- [9] Hoek, E., and Bray, J; 2004; "Rock slope engineering". 4th ed., London: Institution Mining and Metallurgy.
- [10] Technical office of Angooran mine, (2009), Geology report of Angooran mine, (in Persian).
- [11] Roger Hart & Yanhui Han., (2006), FLAC Training Course. Itasca Consulting Group Inc.

1- Chuquicamata Mine and Bingham Canyon Mine



شکل ۱۳: الف) توزیع نرمال جابجایی‌ها و احتمال وقوع ریزش در معدن. ب) فاکتور ایمنی برای وقوع ریزش سنگین با احتمال ۳۵/۲ درصد

- با توجه به خواص ژئومکانیکی به دست آمده از آزمایشگاه برای سنگ آهک و مقادیر جابجایی حاصل از نرم‌افزار 3DEC، دیواره شرقی معدن پایدار بوده و دیواره شمالی معدن نیز با توجه به مقعر بودن شکل آن پایدار است.
- وجود شیست و یک گسل اصلی در دیواره غربی، به عنوان دو عامل ناپایدارساز در این دیواره در نظر گرفته شد و بر اساس مقادیر مختلف چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مختلف برای این دو عامل (شیست و گسل) میزان جابجایی‌ها در سه نقطه از دیواره (بالای دیواره، وسط دیواره، پای دیواره) به دست آمد. مقادیر جابجایی برای سه نقطه در نظر گرفته شده نشان داد که بیشترین میزان جابجایی در پای دیواره است.
- با توجه به نتایج به دست آمده پایش کردن جابجایی‌های پای پله به منظور تأمین ایمنی حین کار ضروری است. بدین منظور می‌توان از ابزاربندی ژئوتکنیکی در محدوده ریزش بهره جست.
- با توجه به تحلیل‌های آماری صورت گرفته در نرم‌افزار Minitab، احتمال ریزش برای جابجایی بیشتر از ۴/۲

THIS PAGE IS INTENTIONALLY LEFT BLANK