

شبیه‌سازی تخریب توده‌سنگ مبتنی بر تغییرات ناحیه‌ای حاصل از تخمین زمین‌آمارى

مقاله پژوهشی

علیرضا جبین پور^۱؛ علیرضا یاراحمدی بافقی^{۲*}؛ جواد غلام نژاد^۳؛ حجت الله ذاکرزاده فروشانی^۴
۱- دکتری استخراج معدن؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، alirezajabin@gmail.com
۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ayarahmadi@yazd.ac.ir
۳- استاد؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، j.gholamnejad@yazd.ac.ir
۴- دانشیار؛ دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه یزد، hzaker@yazd.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۰۷/۲۷؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴

شماره صفحات: ۱۶۷ تا ۱۸۷

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2025.15186.1493

| واژگان کلیدی | چکیده |
|---|--|
| معدنکاری زیرزمینی قابلیت تخریب شبیه‌سازی قابلیت اعتماد تخمین زمین‌آمارى | پروژه‌های مرتبط با زمین اعم از معدنی و عمرانی با توجه به شرایط زمین و ویژگی‌هایی که دارد، همواره با عدم قطعیت همراه است و تغییرات دائمی در شرایط زمین این مساله را پر رنگ‌تر می‌کند. معدنکاری تخریبی زیرزمینی به عنوان یک روش معدنکاری عمیق و بزرگ مقیاس، با چالش‌های عدم قطعیت در فرایند تخریب مواجه است. قابلیت تخریب توده‌سنگ یکی از مهم‌ترین عواملی است که در مطالعات امکانسنجی این روش‌ها باید به دقت مورد بررسی قرار گیرد. در این مطالعه، ارزیابی قابلیت تخریب توده‌سنگ در آنومالی ۱۲ سه‌چاهون با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمین و به صورت احتمالاتی و با استفاده از روش‌های عددی و شبیه‌سازی مونت کارلو انجام شده است. همچنین با توجه به تغییرپذیری زمین، ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ به صورت زمین‌آمارى و در بلوک‌های با ابعاد ۵۰ متر تخمین زده شد و مدلسازی بر اساس ویژگی‌های متغیر توده‌سنگ انجام شد. نتایج مدلسازی عددی و شبیه‌سازی مونت کارلو قابلیت تخریب نشان از آن دارد که مدل قطعی دارای ضریب اطمینان ۰/۷۲ بوده و تخریب رخ می‌دهد. همچنین در شبیه‌سازی مونت کارلو با بیش از ۱۰۰۰ مرتبه مدلسازی، ضریب ایمنی در محدوده ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ قرار دارد. نتایج مدلسازی در شرایط تغییرپذیری مکانی نیز از شرایط زمین تبعیت کرده و با افزایش کیفیت توده‌سنگ، افزایش زاویه تخریب به دست آمده است. |

نحوی که مهندسان این حوزه در هر پروژه، با چالش‌های جدیدی روبرو شده و بر اساس آن، تصمیم‌هایی متفاوت از تجارب قبلی اخذ می‌کنند (Baecher & Christian, 2005). برای مثال، تونل‌های متعددی در سراسر جهان حفر شده است یا در حال حفر است. هر کدام از تونل‌ها بر اساس

۱- مقدمه

وجود عدم قطعیت در پروژه‌های مرتبط با زمین، یکی از وجه تمایزهای اصلی بین مهندسی ژئوتکنیک، معدن و حوزه زمین‌شناسی مهندسی با سایر رشته‌های مهندسی است، به

* یزد، بلوار دانشگاه، چهارراه پژوهش، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی؛ کدپستی: ۸۹۱۵۸۱۸۴۱۱؛ شماره تلفن: ۳۱۶-۳۱۲۳۲۵۹۴-۰۳۵

تجربی انجام شده است. همان‌طور که از نام آن برمی‌آید، مطالعات اولیه مبتنی بر تجربه افراد مختلف در معادن تخریبی بوده است که می‌توان به روش کینگ (Mahtab & Dixon, 1976)، راهکار مک‌ماهون و کندریک (McMahon & Kendrick, 1969)، اوبرت و همکاران (Obert et al., 1976)، لابسچر (Laubscher, 1981)، ماتئوس (Mathews et al., 1981) (به منظور توسعه این روش و استفاده از ظرفیت‌های ارائه شده، مطالعات مختلفی برای توسعه روش ماتئوس توسط محققان مختلف ارائه شده است که با عنوان روش تعدیل شده ماتئوس ارائه شده است (Mawdesley et al., 2001; Potvin, 1988; Stewart & Forsyth, 1995; Trueman et al., 2000)) اشاره کرد. علاوه بر این روش‌ها، استفاده از مدلسازی اعم از فیزیکی و عددی نیز در این زمینه بسیار مرسوم است. پالما و آگاروال (Palma & Agarwal, 1973) با استفاده از مدل دوبعدی الاستیک، رفتار گسترش تخریب را برای معدن آل‌تنینت شیلی ارائه کردند. رک و لوریگ (Rech & Lorig, 1992) وضعیت تخریب در معدن هندرسون واقع در ایالات متحده آمریکا را با استفاده از مدل دوبعدی بررسی کردند. برای ارزیابی قابلیت تخریب توده‌سنگ، مدلسازی با روش‌های مختلف پیوستار و ناپیوستار انجام شده است. مطالعات هاسن و همکاران (Hassen et al., 1993) به منظور ارزیابی قابلیت تخریب در سه مرحله و با استفاده از دو روش پیوستار و ناپیوستار انجام شده است. جیان‌زین (Jianxin, 1995) قابلیت تخریب ماده معدنی در تخریب بلوکی را مورد پژوهش قرار داد. داپلانسیس و بردی (Duplancic & Brady, 1999) مکانیزم‌های تخریب توده‌سنگ را با تحلیل تنش سنگ و لرزه مورد بررسی قرار دادند. فنگ و همکاران (FENG et al., 2008) با فناوری شبیه‌سازی سه‌بعدی، قابلیت تخریب توده‌سنگ را بررسی کردند. ساینزبری (Sainsbury et al., 2009) با استفاده از مدلی به نام توده‌سنگ کامل درزه‌دار، مدلی برای تحلیل تخریب توده‌سنگ ارائه کرده است. علاوه بر این، با استفاده از روش‌های عددی پیوستار، تحلیل حساسیت تخریب توده‌سنگ انجام شده است (Sainsbury, 2010). کارکال و همکاران (Karekal et al., 2011) با استفاده از روش مدلسازی عددی بدون مش، فرایند تخریب سنگ را بررسی کردند. جبین‌پور (Jabinpour, 2011) در پژوهشی با استفاده از مدلسازی ناپیوسته، قابلیت تخریب توده‌سنگ و تاثیر عوامل مختلف بر

(Luo & Bathurst, 2014)، (Kasama & Whittle, 2014)، (Liu et al., 2017)، (Huang & Xiong, 2017)، (Ma et al., 2017)، (Li & Low, 2010)، (Wang et al., 2013)، (Zhao et al., 2014)، (Li et al., 2016)، (Liu & Low, 2017) و سد سازی (Li et al., 2009)، (Kartal et al., 2012)، (Li et al., 2010)، (Zhenyu et al., 2015)) است.

روش‌های تخریبی زیرزمینی نیز با توجه به قرارگرفتن در عمق زمین و توده‌سنگ، با چالش عدم قطعیت همراه است. از این رو با هدف بررسی عدم قطعیت و قابلیت اعتماد در عملیات معدنکاری تخریبی، این پژوهش انجام شده است.

۲- قابلیت تخریب توده‌سنگ

به کارگیری روش‌های استخراج تخریبی زیرزمینی مستلزم بررسی‌های امکان‌سنجی متعددی است. این بررسی‌ها شامل قابلیت تخریب توده‌سنگ (در روش تخریب بزرگ شامل ماده‌معدنی و سنگ فراگیر، در تخریب طبقات فرعی تنها سنگ فراگیر و در جبهه‌کار طولانی بسته به گوناگونی روش، تنها سنگ فراگیر یا ماده‌معدنی و سنگ فراگیر به صورت توام)، قابلیت جریان (همانند موارد موردی بررسی در قابلیت تخریب)، قابلیت انفجار (به صورت عمومی به ماده‌معدنی در روش تخریب طبقات فرعی) و نشست سطح زمین (در هر سه روش تخریبی زیرزمینی تخریب بزرگ، تخریب طبقات فرعی و جبهه‌کار بلند قابل توجه است).

قابلیت تخریب به معنای تخریب خودبه‌خودی توده‌سنگ بر اثر ایجاد یک فضای آزاد در زیر آن است. تخریب‌پذیری به معنای امکان بازشدگی توده‌سنگ برجا پس از حفر فضای زیربرش و ایجاد تخریب اولیه، گسترش تخریب و تخریب پیوسته است (Mawdesley, 2002). قابلیت تخریب توده‌سنگ در هر سه روش تخریبی زیرزمینی گفته شده پارامتری اثرگذار در امکان‌سنجی روش محسوب می‌شود به نحوی که اگر یکی از موارد گفته شده دارای قابلیت تخریب خودبه‌خودی نباشند، به کارگیری روش تخریبی زیرزمینی با چالش یا عدم امکان به کارگیری مواجه می‌شود.

بررسی قابلیت تخریب توده‌سنگ از زمان معرفی روش‌های تخریبی زیرزمینی مورد توجه بوده است به نحوی که در پروژه‌های مختلف در این زمینه مطالعاتی به صورت

آن را بررسی کرد. جبین پور و همکاران (*Jabinpour et al.*, 2025) با استفاده از مدلسازی عددی ناپیوستار به صورت سه‌بعدی ارتباط عوامل ژئومکانیکی را با قابلیت تخریب توده‌سنگ مورد بررسی قرار داد. آزاد مهر و جلالی (*Azadmehr & Jalali*, 2017) قابلیت تخریب توده‌سنگ در روش تخریب توده‌ای را با استفاده از سیستم مهندسی سنگ برآورد کردند. امامی‌مبیدی (*Emami Meybodi*, 2015; *Emami Meybodi & Jalali*, 2015) به تحلیل تخریب‌پذیری و خردشوندگی توده‌سنگ درزه‌دار در روش تخریب توده‌ای پرداخت. وی در پژوهشی دیگر، خردشدگی برجای توده‌سنگ در روش تخریب بزرگ را با استفاده از مدلسازی شبکه شکستگی مجزا شبیه‌سازی نمود (*Emami Rafiee et al.*, 2016). رفیعی و همکاران (*Meibodi et al.*, 2018) با استفاده از مدل SRM و روش عددی ناپیوستار، تاثیر پارامترهای مختلف را بر قابلیت تخریب توده‌سنگ مورد مطالعه قرار دادند. علی‌پنهانی و همکاران (*Alipenhani et al.*, 2018) با استفاده از مدلسازی عددی و فیزیکی، قابلیت تخریب توده‌سنگ در روش تخریب بزرگ را بررسی کردند. همانطور که مشخص شده است، مطالعات مربوط به قابلیت تخریب توده سنگ به صورت گسترده ای در سال های اخیر و با استفاده از روش های مختلف انجام شده است. این مساله نشان از اهمیت ارزیابی این پارامتر دارد.

در پروژه‌های ژئوتکنیکی، منابع ابهامات را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد (*Malkawi et al.*, 2000):

- فرآیندهای تصادفی و طبیعی ذاتی
 - بازتاب ناتوانی مدل شبیه‌سازی مانند عدم قابلیت شبیه‌سازی، تکنیک طراحی و یا فرمول تجربی برای نمایش رفتار صحیح فیزیکی و مکانیکی.
 - عدم قطعیت‌ها در معرفی پارامترهای مدل در نتیجه ناتوانی در کمی‌کردن و یا به حساب آوردن پارامترهای ورودی مدل.
 - عدم قطعیت‌های داده‌های ورودی شامل خطاهای اندازه‌گیری، ناهمگن بودن و ثابت نبودن داده‌ها و دستکاری داده‌ها.
- روش‌های شناخته شده برای تفسیر فرمولی ابهامات در تصمیم‌های مهندسی در تجربه و عمل هنوز محدود هستند. به هر حال روش‌های شناخته شده و استفاده شده در مدلسازی ژئومکانیکی عبارتند از:
- تحلیل‌های احتمالاتی با وجود ابهامات تصادفی
 - تحلیل‌های منطق فازی، در صورت وجود

آن را بررسی کرد. جبین پور و همکاران (*Jabinpour et al.*, 2025) با استفاده از مدلسازی عددی ناپیوستار به صورت سه‌بعدی ارتباط عوامل ژئومکانیکی را با قابلیت تخریب توده‌سنگ مورد بررسی قرار داد. آزاد مهر و جلالی (*Azadmehr & Jalali*, 2017) قابلیت تخریب توده‌سنگ در روش تخریب توده‌ای را با استفاده از سیستم مهندسی سنگ برآورد کردند. امامی‌مبیدی (*Emami Meybodi*, 2015; *Emami Meybodi & Jalali*, 2015) به تحلیل تخریب‌پذیری و خردشوندگی توده‌سنگ درزه‌دار در روش تخریب توده‌ای پرداخت. وی در پژوهشی دیگر، خردشدگی برجای توده‌سنگ در روش تخریب بزرگ را با استفاده از مدلسازی شبکه شکستگی مجزا شبیه‌سازی نمود (*Emami Rafiee et al.*, 2016). رفیعی و همکاران (*Meibodi et al.*, 2018) با استفاده از مدل SRM و روش عددی ناپیوستار، تاثیر پارامترهای مختلف را بر قابلیت تخریب توده‌سنگ مورد مطالعه قرار دادند. علی‌پنهانی و همکاران (*Alipenhani et al.*, 2018) با استفاده از مدلسازی عددی و فیزیکی، قابلیت تخریب توده‌سنگ در روش تخریب بزرگ را بررسی کردند. همانطور که مشخص شده است، مطالعات مربوط به قابلیت تخریب توده سنگ به صورت گسترده ای در سال های اخیر و با استفاده از روش های مختلف انجام شده است. این مساله نشان از اهمیت ارزیابی این پارامتر دارد.

۳- قابلیت اعتماد در تخریب‌پذیری توده‌سنگ

در پروژه‌هایی که با توده‌سنگ ارتباط دارد، تغییرپذیری، ابهام و عدم قطعیت به عنوان ویژگی ذاتی توده‌سنگ با آن همراه است و به دو دسته عدم قطعیت پارامتری (آنچه که می‌دانیم از آن آگاهی نداریم) و عدم قطعیت مفهومی (آنچه که نمی‌دانیم از آن آگاهی نداریم) تقسیم می‌شود.

در زمینه مدلسازی احتمالاتی توده‌سنگ درزه‌دار می‌توان به ارزیابی سیستم نگهداری تونل با تئوری بلوکی توسط چان (*Chan*, 1987) اشاره کرد. وی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، واکنش سیستم نگهداری به تغییرپذیری را بررسی کرد. تانن و همکاران (*Tonon et al.*, 2000) با استفاده از تئوری تصادفی، عدم قطعیت در مکانیک سنگ را تعیین کرده و برای انتخاب سیستم نگهداری در یک تونل عمیق در ایتالیا به کار بردند. وانگ و همکاران (*Wang*

- ابهامات ناشی از عدم دقت
- تحلیل‌های ترکیبی منطق فازی و احتمالاتی، وقتی هر دو ابهام در مدل موجود باشند.
- هدف از مدل‌سازی احتمالاتی به عنوان یکی از ابزارهای مدیریتی تلفیق شده با مدل ژئوتکنیکی، شناخت ابهامات و بررسی راه‌های کاهش آنها است. این مدل امکان برآورد ریسک‌های کمی و اقتصادی را نیز فراهم می‌کند. در معدنکاری زیرزمینی تخریبی منابع متعدد ریسک وجود دارد. این منابع عبارتند از (Brown, 2007):
- کیفیت و صحت داده‌های زمین‌شناسی مورد استفاده در تخمین ساختارها، شکل، اندازه و عیار ماده معدنی
- کیفیت داده‌های ژئوتکنیکی موجود در مورد کانسار و توده‌سنگ در برگیرنده شامل ساختارهای اصلی، ناپیوستگی‌ها، ویژگی‌های سنگ، تنش برجا و آبشناسی آب‌های زیرزمینی. این داده‌ها برای ارزیابی قابلیت تخریب، آغاز توسعه تخریب، خردایش، کارایی تخریب، پایداری فضاها و اختلاط مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- ارزیابی قابلیت تخریب که معمولاً به صورت تخمینی از شعاع هیدرولیکی زیربرشی است که در آن تخریب برای توده‌سنگ داده شده یا ویژگی‌های ژئوتکنیکی تخمینی آغاز می‌شود.
- توسعه تخریب به عنوان توانایی تخریب به ادامه یافتن برای گسترش تخریب آغاز شده تعریف می‌شود. توسعه تخریب وابسته به عواملی همچون طراحی زیربرش، نرخ زیربرش، تنش‌های القایی، ساختارها، ویژگی‌های ژئوتکنیکی ساختارها و استراتژی به کار گرفته شده برای تخلیه است. با توجه به طبیعت غیر انتخابی و نسبتاً انعطاف‌ناپذیر روش‌های تخریبی، ناتوانی در آغاز یا ادامه تخریب یکی از بزرگ‌ترین ریسک‌های موجود در این روش‌ها محسوب می‌شود.
- میزان خردشدگی ماده معدنی به عنوان یک نتیجه از فرایند تخریب است. این عامل بر فاصله‌داری دهانه‌های تخلیه، طراحی و انتخاب تجهیزات، وقوع توقف‌ها، نیاز به خردایش ثانویه، نیاز به سنگ‌شکن زیرزمینی و میزان تولید اثر گذار است.
- کارایی تخریب که نشان‌دهنده پایداری عمر طراحی و نیاز به نگهداری یا تقویت فضاهای معدنی مانند تونل زیربرش، فضاهای طبقه تخلیه، قیف‌ها و زیرساخت‌های معدن است. پایداری فضاها نه تنها به ویژگی‌های ژئوتکنیکی توده‌سنگ و تنش‌های برجا وابسته است، بلکه به عواملی همچون شبکه سه‌بعدی معدن، زمان نسبی آماده‌سازی و فعالیت‌های معدنکاری و نرخ زیربرش نیز وابسته است.
- خطرات عملیاتی اصلی شامل ریزش فضاهای اصلی، طغیان گل، انفجار سنگ، انفجار هوا و نفوذ و ورود آب و دوغاب است.
- ریسک‌های زیست‌محیطی همچون اثرات معادن بر آب سطحی و زیرزمینی، نحوه انباشت باطله، اثرات ایجاد شده بر پوشش گیاهی و جانوری، اثرات نشست سطح زمین و موضوعات باستان‌شناسی.
- ریسک سودآوری که در عواملی همچون هزینه ساختمان‌ها، روابط صنعتی، تغییرات در قیمت فلز و نرخ ارز و ثبات سیاسی محلی خلاصه می‌شود.
- اساس روش‌های طراحی احتمالاتی برای تعیین پایداری و عدم شکست سیستم‌ها، شناخت و تشخیص آن دسته از فاکتورهایی است که در پایداری سیستم نقش دارند. همه این پارامترها مقداری تغییرات طبیعی را از خود نشان می‌دهند (صد در صد ثابت نیستند). به طور ایده‌آل این تغییرات (انحرافات) باید در روش طراحی در نظر گرفته شود. تحلیل کامل احتمالاتی یک توده‌سنگ در زده‌دار همیشه شامل یک مدل ترکیبی متشکل از یک مدل احتمالاتی هندسی و یک مدل احتمالاتی مکانیکی است که پدیده‌های مکانیکی

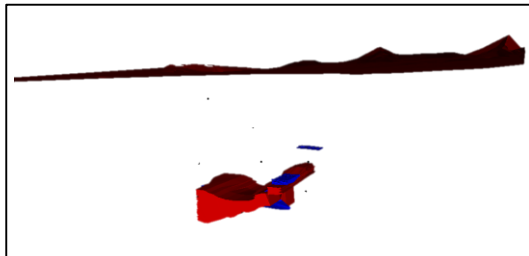
مثل حرکت بلوک را شرح می‌دهند.

است (رنگ قرمز نشان دهنده بخش پرعیار و رنگ آبی نشان دهنده بخش کم عیار ذخیره است).

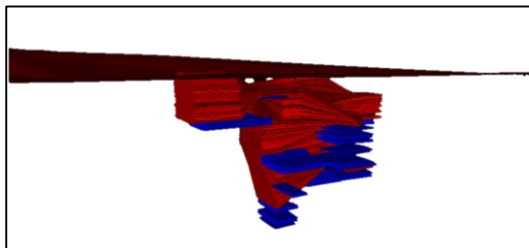
میزان ذخیره آنومالی ۱۲ سه چاهون به همراه درصد عیار آهن و اکسید های همراه در جدول ۱ و جدول ۲، قابل مشاهده است.

بنابراین بر اساس داده های موجود در جدول های بالا، ذخیره کلی قابل برداشت در آنومالی شماره ۱۲ برابر با ۲۴ میلیون تن در بخش عمیق و ۲/۴ میلیون تن در سطح با عیار متوسط ۶۰ درصد آهن است. علاوه بر این در این ذخیره ۱/۲۸ درصد اکسید تیتانیوم و ۰/۳۹ درصد اکسید وانادیوم نیز وجود دارد.

به منظور بررسی ویژگی‌های توده‌سنگ، برداشت‌های سطحی و درزه‌نگاری در دیواره‌های نزدیک به آنومالی مورد مطالعه انجام گرفت. همچنین وضعیت شکستگی‌ها و چگالی درزه‌داری و *RQD* سنگ فراگیر با مطالعه جعبه مغزه‌های نمونه‌گیری حاصل از اکتشاف تفضیلی این آنومالی مورد مطالعه قرار گرفت. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ فراگیر نیز با استفاده از نمونه‌های اخذ شده از جعبه مغزه‌ها در آزمایشگاه مکانیک‌سنگ شامل ویژگی‌های مقاومتی، الاستیک و دینامیکی به تفکیک جنس سنگ‌های موجود به دست آمد (جدول ۳).



شکل ۳- مدل سه‌بعدی تهیه شده برای بخش عمقی آنومالی ۱۲ (Jabinpoor et al., 2015)

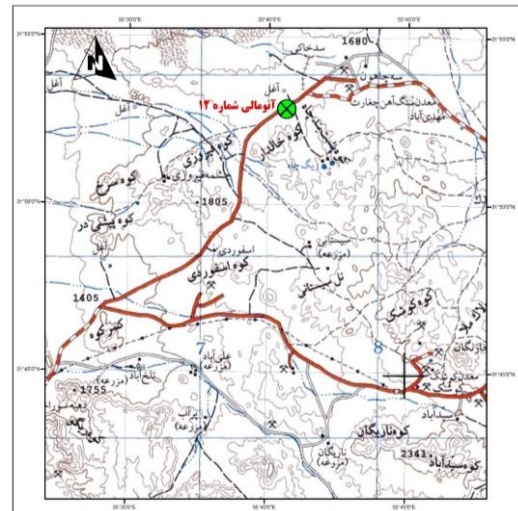


شکل ۴- مدل سه‌بعدی تهیه شده برای بخش شمال شرقی آنومالی ۱۲ (Jabinpoor et al., 2015)

۴- آنومالی ۱۲ سه چاهون

آنومالی شماره ۱۲ در استان یزد در فاصله ۱۴۲ کیلومتری شرق شهر یزد و ۳۲ کیلومتری شمال شرق شهرستان بافق قرار دارد. همچنین این آنومالی در ۲۳ کیلومتری شمال شرقی معدن سنگ آهن چغارت و ۵ کیلومتری جنوب غربی معدن سنگ آهن سه‌چاهون (آنومالی شماره ۱۱) قرار دارد. محل قرار گیری آنومالی شماره ۱۲ در شکل ۲، نشان داده شده است.

ذخیره آهن آنومالی شماره ۱۲ در بخش جنوب غربی معدن سنگ آهن سه‌چاهون (آنومالی شماره ۱۱) و در مرز غربی آنومالی سنگ آهن شماره ۱۰ قرار دارد. این ذخیره به صورت دو بخش جدا از هم که بخش اصلی آن در عمق تقریبی ۳۵۰ تا ۴۹۰ متری از سطح زمین و در شمال غربی منطقه قرار دارد، تشکیل شده است. سطح آنومالی شماره ۱۲ به وسیله سنگ‌های رسوبی کواترنری پوشیده شده که در منطقه‌ای به مساحت حدود ۲۶۰ هکتاری قرار دارد. ذخیره این معدن به وسیله بررسی‌های ژئومکانیکی و حفاری‌های گسترده کشف شده است.



شکل ۲- محل قرارگیری آنومالی ۱۲ سه‌چاهون (Jabinpoor et al., 2015)

مدل سه بعدی کانسار با استفاده از داده‌های حاصل از گمانه‌های اکتشافی ایجاد با استفاده از نرم افزار *Datamine studio* ایجاد شده است که در شکل ۳ و شکل ۴، برای بخش عمقی و شمال شرقی آنومالی ۱۲ سه چاهون قابل مشاهده

تخمین زده شده، ارائه شده است (شکل ۵ و شکل ۶، جدول ۴ و جدول ۵). جزئیات مربوط به پارامترهای تخمین زده شده در مطالعه (Jabinpour et al., 2018) برای تمام پارامترها ارائه شده است.

به منظور ارزیابی قابلیت تخریب، نیاز به تخمین ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئومکانیکی توده سنگ مورد مطالعه است. به این منظور برای پارامترهای مورد نیاز با استفاده از روش‌های آماری، تخمین انجام گرفته است که برای نمونه تخمین مربوط به چگالی درزه داری و مدل

جدول ۱- کلاس‌بندی عیاری ذخیره در بخش عمقی آنومالی ۱۲ (Jabinpour et al., 2015)

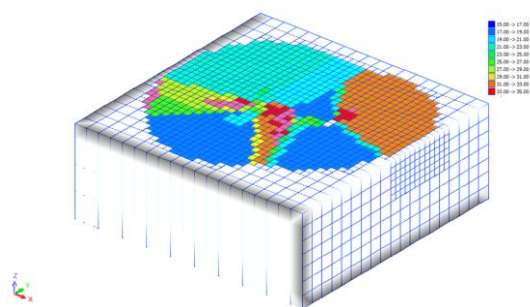
| دسته | V ₂ O ₅ % | TiO ₂ % | FeO% | Fe% | تناژ |
|---------|---------------------------------|--------------------|-------|-------|----------|
| کم عیار | ۰/۲۲ | ۱/۱۵ | ۱۶/۶۹ | ۳۴/۲۳ | ۱۳۴۷۵۴۹ |
| پرعیار | ۰/۳۳ | ۱/۲۵ | ۲۶/۷۷ | ۶۲/۱۲ | ۲۲۸۸۱۸۴۰ |
| کل | ۰/۳۲ | ۱/۲۴ | ۲۶/۲۱ | ۶۰/۵۷ | ۲۴۲۲۹۳۸۹ |

جدول ۲- کلاس‌بندی عیاری ذخیره در بخش شمال شرقی آنومالی ۱۲ (Jabinpour et al., 2015)

| دسته | V ₂ O ₅ % | TiO ₂ % | FeO% | Fe% | تناژ |
|---------|---------------------------------|--------------------|-------|-------|---------|
| کم عیار | ۰/۱۸ | ۱/۰۶ | ۱۴/۴۸ | ۳۳/۹۸ | ۴۰۱۱۱۷ |
| پرعیار | ۰/۴۲ | ۱/۳۲ | ۱۹/۲۶ | ۶۱/۳۵ | ۲۴۶۳۴۴۵ |
| کل | ۰/۳۹ | ۱/۲۸ | ۱۸/۵۹ | ۵۷/۵۲ | ۲۸۶۴۵۶۲ |

جدول ۳- نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی (Jabinpour et al., 2015)

| ردیف | جنس سنگ | چگالی (kg/m ³) | مقاومت فشاری تک محوری (Mpa) | مقاومت کششی برزیلی (Mpa) | سرعت موج طولی (m/s) |
|------|-------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|
| ۱ | برش | ۲۷۷۸/۳۸ | ۴۴/۷۸ | ۳/۴۸۴۳ | ۵۲۹۷/۱۴ |
| ۲ | دیوریت | ۲۹۱۱/۸۱ | ۴۸ | ۸/۸۹۰۱ | ۵۲۹۵/۳۲ |
| ۳ | سنگ آهک | ۲۷۷۶/۵۳ | ۴۳/۸۲ | ۵/۰۳۹۳ | ۵۴۹۱/۳۶ |
| ۴ | متاسوماتیت | ۲۶۹۳/۱۶ | ۵۸/۳۵ | ۳/۱۵۰۹ | ۴۶۲۸/۱۵ |
| ۵ | کوارتزیت | ۲۶۷۱/۴۷ | ۶۳/۱۴ | ۷/۲۲۰۳ | ۵۳۶۴/۶۱ |
| ۶ | شیسیت | ۲۷۴۶/۷۹ | ۸۸/۷۹ | ۵/۹۰۲ | ۵۴۹۳/۹۸ |
| ۷ | اسلیت | ۲۶۹۱/۶۵ | ۲۲/۹۱ | ۲/۰۱۴ | ۵۱۶۹/۸۵ |
| ۸ | تونالیت | ۲۷۰۹/۵۸ | ۵۰/۳ | ۲/۹۶۸۲ | ۴۷۸۵/۸۲ |
| ۹ | توف | ۲۷۳۴/۷۸ | ۳۵/۵۶ | ۵/۱۹۲۹ | ۴۹۷۷/۳۳ |
| ۱۰ | رسوبات جوان | ۲۵۰۷/۹۹ | ۲۳/۲ | ۱/۸۲۳۶ | ۳۸۸۶/۹۹ |



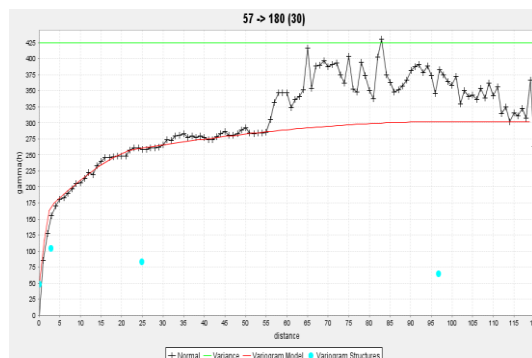
شکل ۶- مدل تخمین زده شده چگالی درزه‌داری

۵- شبیه‌سازی عددی قابلیت تخریب

وضعیت تخریب‌پذیری توده‌سنگ در آنومالی ۱۲ سه چاهون به صورت تجربی-زمین آماری در مطالعات گذشته انجام شده است و بر اساس آن، شرایط تخریب‌پذیری توده‌سنگ مورد مطالعه مساعد ارزیابی شد (Jabinpour et al., 2018). با توجه به این که در روش‌های تجربی، امکان خطا به دلیل شرایط خاص هر منطقه وجود دارد، نیاز به ارزیابی قابلیت تخریب به روش دیگری نیز وجود دارد تا صحت نتایج تأیید شود. روش‌های عددی و مدل‌سازی عددی یکی از این روش‌ها با کاربرد گسترده است و کارایی آنها تا کنون به اثبات رسیده است.

با توجه به شرایط توده‌سنگ در منطقه مورد مطالعه، ویژگی‌های معادل توده‌سنگ به منظور مدل‌سازی عددی به دست آمده است (Jabinpour et al., 2020). بنابراین با استفاده از روش‌های عددی پیوستار می‌توان منطقه را از نظر تخریب‌پذیری مورد ارزیابی قرار داد. در این مطالعه با استفاده از روش عددی پیوستار تفاضل محدود، تخریب‌پذیری منطقه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

روش تفاضل محدود از قدیمی‌ترین روش‌های حل دسته معادلات دیفرانسیل با مقادیر اولیه و مقادیر مرزی است. در روش تفاضل محدود هر مشتق در معادله‌های حاکم مستقیماً در عبارت جبری که تابع متغیرهای میدان تنش یا تغییر مکان در فضا است، جایگزین می‌شود. در این روش از روش پیشرفت زمانی مستقیم برای حل معادله‌های جبری استفاده می‌شود. برتری روش تفاضل محدود نسبت به سایر روش‌ها این است که نیاز به توان محاسباتی بالا برای حل مسائل ندارد، زیرا در آن ماتریس تشکیل نشده و قابلیت نسبی برای تولید مجدد معادله‌های تفاضل محدود در هر گام وجود دارد. از این رو



شکل ۵- مدل واریوگرام تجربی برازش شده چگالی درزه‌داری با گام یک متر

جدول ۴- مشخصات مدل واریوگرام چگالی درزه‌داری

| Model Type | Spherical | |
|------------|-----------|-------|
| Nugget | 48.3687 | |
| Structure | Sill | Range |
| 1 | 104.673 | 3 |
| 2 | 83.559 | 25 |
| 3 | 64.791 | 97 |

جدول ۵- نتایج اعتبار سنجی واریوگرام چگالی درزه‌داری

| مقدار | معیار |
|----------|--------------------|
| -۰/۰۳۳۸ | میانگین خطاها |
| ۱۳۵/۴۸۲۳ | واریانس خطاها |
| ۱۱/۶۳۹۷ | انحراف معیار خطاها |

ادامه جدول ۵- نتایج اعتبار سنجی واریوگرام چگالی درزه‌داری

| مقدار | معیار |
|----------|---|
| ۱۳۵/۴۶۳۱ | میانگین توان ۲ خطاها |
| ۱۳۵/۱۷۵۵ | میانگین وزن دار توان ۲ خطاها |
| -۱/۲۰۱۹ | چولگی هیستوگرام خطاها |
| ۱۰/۳۱۵۳ | کشیدگی هیستوگرام خطاها |
| ۶۶۶۲ | تعداد نمونه‌ها |
| ۱۳۰/۷۴۰۳ | توسط واریانس تخمین |
| ۳/۵ | درصد اختلاف واریانس خطاها و متوسط واریانس تخمین |
| ۹۴/۰۹ | درصد خطاها که بین به اضافه و منهای دو برابر انحراف معیار قرار گرفته است |

زمین بوده و عملاً شرایط مرزی خاصی برای آن در نظر گرفته نمی‌شود. مدل برای رسیدن به تعادل اولیه، اجرا می‌شود. تعادل اولیه مدل بر اساس رسیدن نیروهای نامتعادل کننده به صفر تعریف می‌شود (شکل ۸).

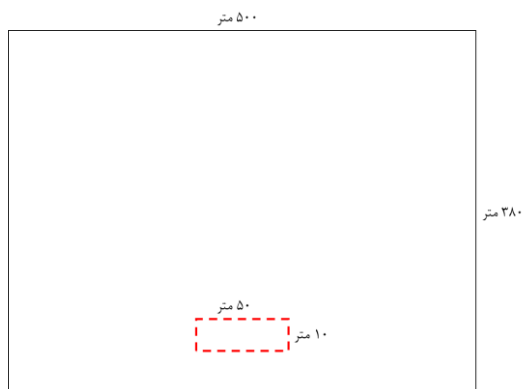
در شکل ۸، تعادل اولیه در بخش اول منحنی قرار دارد که مدل به سرعت به تعادل مورد نظر می‌رسد. به منظور مدلسازی تخریب، زیربرش گفته شده حفاری می‌شود. در این مرحله مواد شروع به حرکت می‌کند. با توجه به این که در این مدل با توجه به مقادیر ویژگی‌های توده‌سنگ، تخریب قطعاً رخ می‌دهد، جریان مواد تخریبی متوقف نشده و همان طور که در قسمت پایانی منحنی شکل ۴، مشخص است، مدل به تعادل نهایی نرسیده و تا بی‌نهایت جریان ادامه می‌یابد. با توجه به این موضوع لازم است تا برای توقف عملیات چاره‌ای اندیشیده شود. برای توقف عملیات تابع توقف نوشته شده است. در این تابع، شرط پایان تخریب، رسیدن سقف فضای زیربرش به کف زیربرش، یعنی بیشینه جابجایی برابر با ۱۰ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۹).

تخریب‌پذیری توده‌سنگ مستلزم گسترش ناحیه تخریب برای فراهم شدن یک جریان دائم از مواد است. برای تعیین ناحیه تخریب، تابع محاسبه حجم نوشته شده است. در این تابع، امکان لحاظ کردن کمینه جابجایی و جریان مواد که معرف ناحیه تخریب است، فراهم شده است. در این مطالعه مقدار کمینه برابر با ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. بسته به شرایط و خواص منطقه، ناحیه تخریب می‌تواند بزرگ یا کوچک بشود. در شکل ۱۰، می‌توان نحوه تغییرات ناحیه تخریب را بر اثر تغییر ویژگی‌های توده‌سنگ مشاهده کرد.

برای محاسبه ضریب ایمنی در مدل مورد مطالعه از روش کاهش مقاومت استفاده شده است. در این روش محاسبه ضریب ایمنی با کاهش متوالی مقاومت برشی مواد انجام می‌شود تا مدل به حالت تعادل حدی برسد. این روش به صورت معمول با معیار شکست مور-کولمب اعمال می‌شود. روند محاسبه به این صورت است که یک سری از شبیه‌سازی‌ها با کاهش چسبندگی و زاویه اصطکاک انجام می‌شود تا شکست اتفاق افتد (ضریب ایمنی برابر با یک شود). در صورتی که مدل در ابتدا ناپایدار باشد، مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک افزایش می‌یابد تا مدل به حد پایداری یعنی ضریب ایمنی برابر با یک برسد. پس از آن با استفاده از روش

مساله با محدودیت کمتری مواجه می‌شود. همچنین امکان تحلیل جابجایی‌های بزرگ در این روش وجود دارد.

ساخت مدل قطعی آنومالی ۱۲ سه‌چاهون بر اساس شرایط واقعی منطقه انجام گرفته است. بر اساس آنچه گفته شد، ماده معدنی در عمق ۳۵۰ تا ۴۹۰ متری سطح زمین واقع شده است. از آنجایی که بحث تخریب‌پذیری سنگ کمربالا در این مطالعه مد نظر است، مدلی با ارتفاع ۳۸۰ متر ساخته شد که بر اساس آن، فضای استخراجی در ابتدای ماده معدنی واقع شده است. همچنین بر اساس مطالعات تجربی انجام شده، زیربرشی با عرض ۵۰ متر و ارتفاع ۱۰ متر برای مدلسازی عددی به کار گرفته شد. عرض مدل نیز با توجه به تجارب و توصیه‌های موجود ۱۰ برابر عرض زیربرش در نظر گرفته شد. هندسه کلی مدل در شکل ۷، نشان داده شده است.



شکل ۷- هندسه مدل عددی ارزیابی قابلیت تخریب

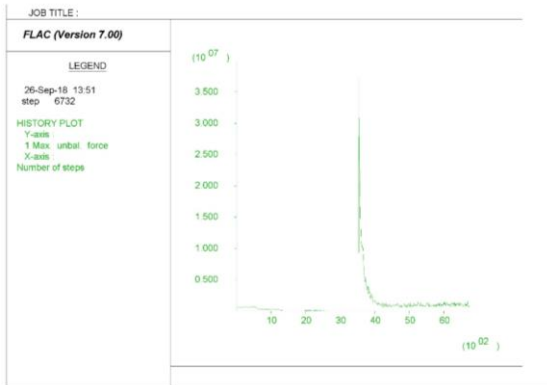
جنس مواد در مدل مورد نظر بر اساس مقادیر میانگین حاصل از مطالعه REV انتخاب (جدول ۶) و از مدل رفتاری مور-کولمب تبعیت می‌کند.

جدول ۶- داده‌های ورودی برای مدلسازی عددی قابلیت تخریب

| مقدار | داده ورودی |
|-------|----------------------------------|
| ۲۷۲۲ | چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب) |
| ۲/۵۸۳ | مدول تغییرشکل‌پذیری (گیگاپاسکال) |
| ۰/۳۰ | ضریب پواسون |
| ۰/۴۸۴ | چسبندگی (مگاپاسکال) |
| ۳۱/۰۰ | زاویه اصطکاک (درجه) |

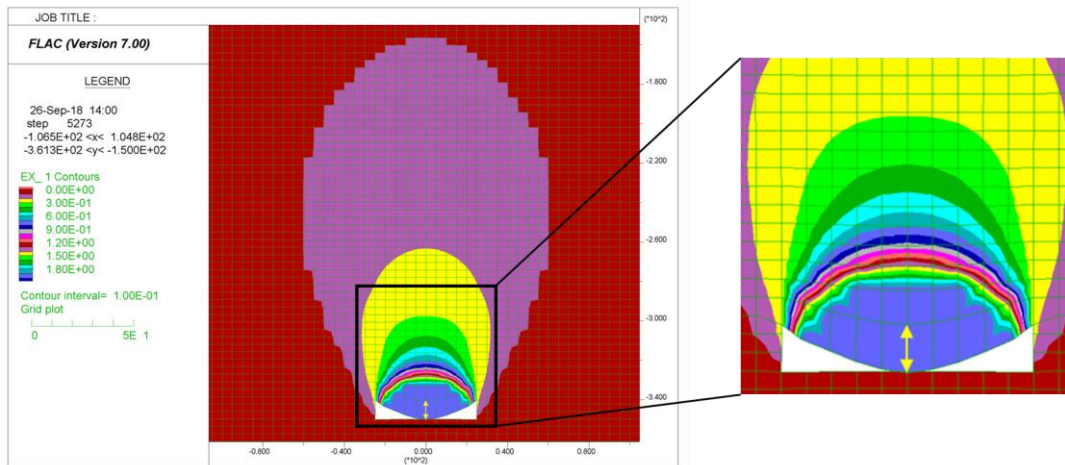
شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای این مدل ثابت بودن مرزهای جانبی و مرز پایینی مدل است. مرز بالا نیز سطح

شبهه‌سازی تخریب توده‌سنگ مبتنی بر تغییرات ناحیه ای حاصل از ...، علیرضا جبین پور و ...، ص ۱۶۷-۱۸۷

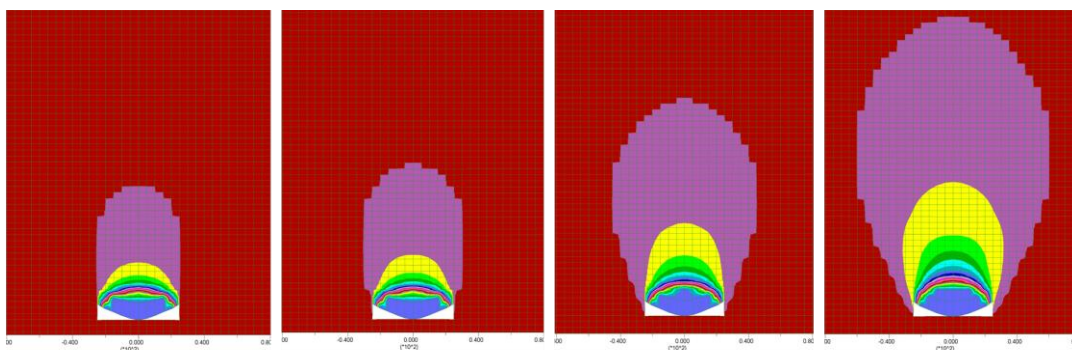


براکتینگ فرایند محاسبه انجام می‌شود. با این روش، ابتدا حالت پایدار یا ناپایدار یافت می‌شود و سپس حل پرنترز بین حل پایدار و ناپایدار به صورت پیش رونده تا زمانی که اختلاف بین حل‌های پایدار و ناپایدار کمتر از تلووانس مشخص شده باشد، ادامه پیدا می‌کند. برای مثال ضریب ایمنی در مدل قطعی برابر با ۰/۷۲ بوده است.

شکل ۸- منحنی نیروهای نامتعادل کننده مدل عددی- قطعی



شکل ۹- مدل تخریب پذیری و شرط توقف عملیات



→
کاهش کیفیت توده سنگ

شکل ۱۰- تغییر ناحیه تخریب با تغییر ویژگی‌های توده‌سنگ

۶- شبیه‌سازی مونت کارلو قابلیت تخریب توده‌سنگ

مدلسازی احتمالاتی در مطالعات ژئومکانیکی با توجه به وجود تغییرپذیری در ویژگی‌های توده‌سنگ بسیار حائز اهمیت است. یکی از روش‌های مرسوم در مدلسازی احتمالاتی توده‌سنگ، استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو است. شبیه‌سازی مونت کارلو یک واژه بسیار عمومی است. به صورت معمول، روش‌هایی که با این نام خوانده می‌شوند، از تکنیک‌های آماری و احتمالاتی استفاده می‌کنند. این روش‌ها در همه علوم از فیزیک هسته‌ای تا علم ژنتیک و اقتصاد و علوم مهندسی کاربردهای فراوانی پیدا کرده است. البته باید توجه کرد که نحوه و شیوه به کارگیری روش مونت کارلو در هر یک از زمینه‌های ذکر شده، متفاوت است. وجه تشابه همه کاربردها، استفاده از اعداد تصادفی برای آزمون و شبیه‌سازی یک پدیده طبیعی و حقیقی است. بنابراین، برای اینکه یک شبیه‌سازی، شبیه‌سازی مونت کارلو محسوب شود، کافی است کاربرد تولید اعداد تصادفی در آن مورد بررسی قرار گیرد و در صورت مثبت بودن استفاده، آن روش مونت کارلو خواهد بود (Husein Malkawi et al., 2000; Najafi & Jalali, 2011).

روش مونت کارلو نیازمند یک الگوی ریاضی-آماری با دو جزء کلی تعیین‌پذیر و تصادفی، برای متغیر تحت بررسی است. برای روشن شدن مطلب، توضیحات با ذکر مثال آورده می‌شود. فرض کنید کشف یک ویژگی آماری متغیر Y که دارای توزیع احتمالاتی ناشناخته است و امکان نمونه‌گیری از آن به دلایلی امکان‌پذیر نیست (برای مثال، ضریب اطمینان در پایداری یا قابلیت تخریب توده‌سنگ در معادن زیرزمینی تخریبی)، موضوع پژوهش باشد. همچنین بر اساس مطالعات، مشخص شده است که Y با متغیرهای تصادفی X در ارتباط بوده و X دارای توزیع شناخته شده‌ای است. ارتباط بین Y و متغیرهای X در قالب اصول، قوانین و نظریه‌های قابل قبول پژوهشگران و صاحب‌نظران به اثبات رسیده است. حال می‌توان از روش مونت کارلو برای تخمین ویژگی‌های توزیع Y بهره گرفت.

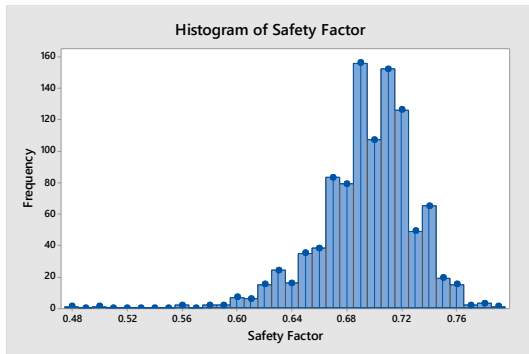
به این منظور، طی مراحل زیر برای روش مونت کارلو لازم است:

۱. تولید سری اعداد تصادفی از یک توزیع

۱. احتمال یکنواخت با مقدار اولیه (G).
۲. تبدیل سری اعداد تصادفی مرحله ۱ به سری اعداد با توزیع احتمال یکنواخت بین صفر و یک (U).
۳. ایجاد سری اعداد تصادفی با هر نوع توزیع احتمال شناخته شده‌ای با استفاده از سری اعداد مرحله ۲ (X).
۴. استفاده از سری اعداد تصادفی مرحله ۳ (X) به عنوان ورودی برای تولید متغیر هدف (Y).
۵. تخمین پارامترهای مربوط به ویژگی‌های توزیع Y

در هر شبیه‌سازی، تعداد T عدد تصادفی تولید می‌شود که در نهایت منتج به همین تعداد داده خروجی می‌شود. مساله مهم این است که برای دستیابی به مقدار دقیق پارامترهای توزیع احتمال هدف، به بیش از یک دور شبیه‌سازی نیاز است. محاسبات مونت کارلو ساده است و با هر دور تکرار، صحت و دقت آن بیشتر می‌شود. روش مونت کارلو همانند سایر روش‌ها با نقایصی همراه است. در مطالعات مختلف، برای این روش نقص‌هایی آورده شده است. مهم‌ترین ایرادی که به این روش وارد است به خصوص در شبیه‌سازی‌های ژئوتکنیکی، هزینه‌های محاسباتی بالای این روش است.

به این منظور، در فرایند مدلسازی تابع فرایند شبیه‌سازی مونت کارلو نوشته شد. در این تابع، در هر مرحله، چند فرایند انجام می‌شود. مرحله اول، تابع تولید داده‌های تصادفی بر اساس توابع توزیع متغیرهای ورودی است. مرحله دوم، تابع مدلینگ است. این تابع مدل اولیه را ایجاد و آماده اجرا می‌کند. مرحله سوم، حل مدل و محاسبه پارامترهای مورد نظر در مدلسازی با استفاده از تابع تخریب است. در پایان این مرحله، با استفاده از تابع ذخیره‌ساز، داده‌های تصادفی مورد استفاده در مدل و خروجی‌های متناظر با آن ذخیره می‌شود. پس از پایان تلاش اول، در ابتدای تلاش دوم، لازم است تا شرایط مدل به شرایط پیش فرض بازگردد. این تغییر ویژگی‌ها و شرایط مدل با استفاده از تابع دی‌مدلینگ انجام می‌شود. فرایند مذکور در روندنمای شکل ۱۱، نشان داده شده است.

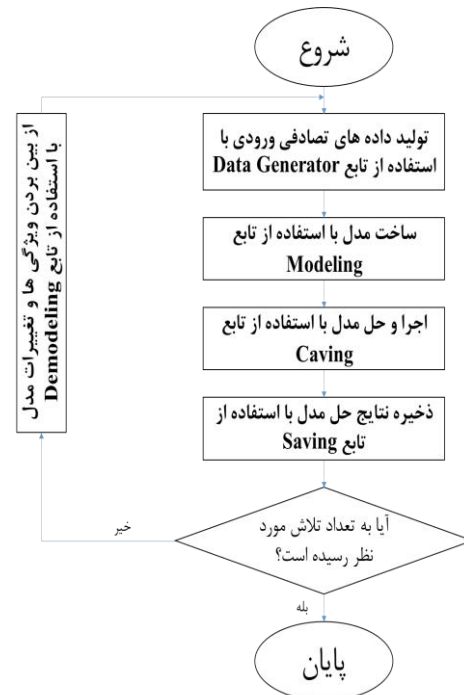


شکل ۱۳- هیستوگرام نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو ضریب ایمنی

۷- تعیین قابلیت تخریب بر اساس تغییرپذیری مکانی

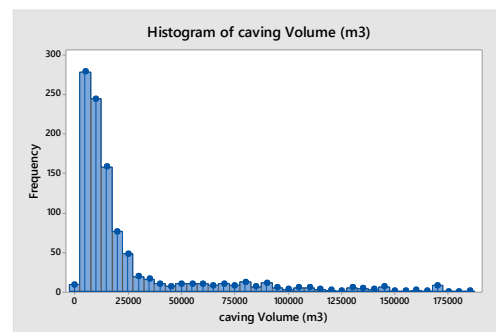
بر اساس برداشت‌های ژئومکانیکی و تخمین‌های زمین‌آماری انجام شده، هر بلوک ۵۰ متر در ۵۰ متر دارای ویژگی‌های هندسی و مکانیکی متفاوت است. این ویژگی‌ها به صورت برجا به صورت چگالی درزه‌داری و جنس متفاوت سنگ آن بلوک خود را نمایان می‌کنند. برای بررسی قابلیت تخریب بر اساس تغییرپذیری مکانی ویژگی‌ها، ابتدا برای تغییرپذیری ویژگی‌ها کلاس بندی انجام گرفت. از آنجایی که برای بررسی قابلیت تخریب با تغییرپذیری مکانی نیاز به ویژگی‌های معادل است، فرایند معادل‌سازی ویژگی‌های توده‌سنگ با روش REV برای کلاس‌های مختلف در مطالعات گذشته به تفصیل شرح داده شده است (Jabinpour et al., 2020). مقطع مورد مطالعه به صورت دو بعدی و به صورتی که در شکل ۱۴، نشان داده شده، است.

مدل مورد بررسی با تغییرپذیری مکانی با توجه به ابعاد مساله دارای ۸۰ بلوک (مطابق با مدل قطعی) است. به این منظور بر اساس مقادیر چگالی درزه‌داری، بلوک‌ها به سه کلاس تقسیم شده و برای هر کلاس، ابتدا مدل هندسی REV ساخته شد. این بلوک‌ها از نظر ویژگی‌های تخمینی و بر اساس موقعیت قرارگیری، دارای شش جنس سنگی متفاوت بر اساس جدول ۳، است. بنابراین برای تعیین ویژگی‌های معادل آنها لازم بود ۱۰ دسته ویژگی برای این مرحله از مدل‌سازی تعیین شود. مشابه با روند پیش‌گفته در بخش معادل‌سازی ویژگی‌ها، آزمایش تک‌محوره و سه‌محوره برای همه این ۱۰ دسته انجام گرفت و در نتیجه، ویژگی‌های معادل هر بلوک به صورت



شکل ۱۱- فرایند انجام شبیه‌سازی مونت کارلو

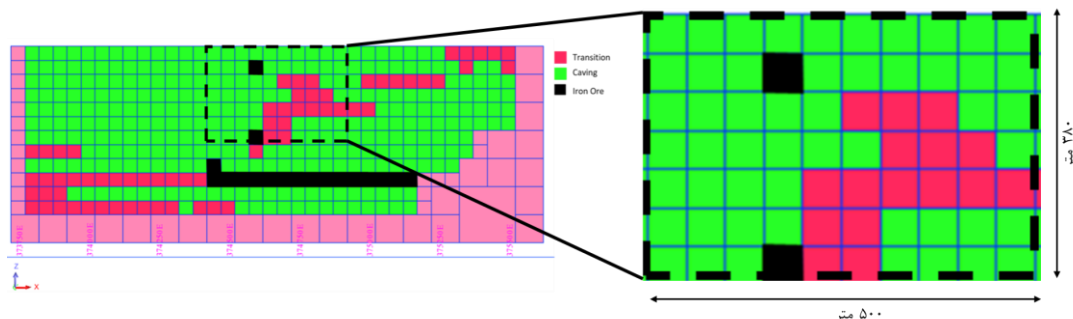
مدلسازی احتمالاتی با بیش از ۱۰۰۰ مرتبه مدلسازی بر اساس داده‌های ورودی با توزیع تعیین شده انجام شد. با توجه به تعاریف انجام شده، در این مرحله، خروجی‌های مدل شامل حجم تخریب و ضریب ایمنی است. در شکل ۱۲ و شکل ۱۳، به ترتیب توزیع فراوانی نتایج مدلسازی احتمالاتی حجم تخریب و ضریب ایمنی را می‌توان مشاهده کرد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر حجم تخریب عمدتاً متمرکز در محدوده تا ۲۵۰۰۰ مترمکعب است و ضریب ایمنی مدلسازی در محدوده ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ متمرکز است.



شکل ۱۲- هیستوگرام نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو حجم تخریب

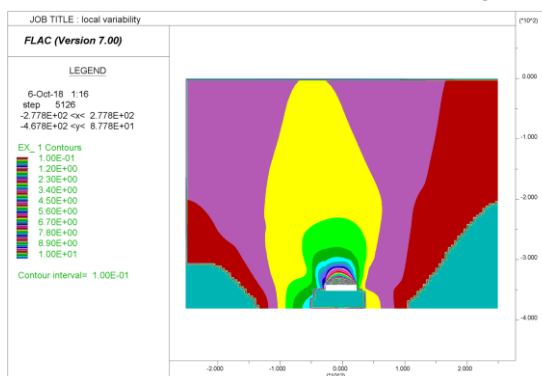
درزه‌داری فارغ از جنس ماده‌سنگ بوده است.

مکانی تعیین شد. از جمله نکاتی که در این بخش حاصل شد، کاهش مقدار مدول تغییرشکل‌پذیری با افزایش چگالی



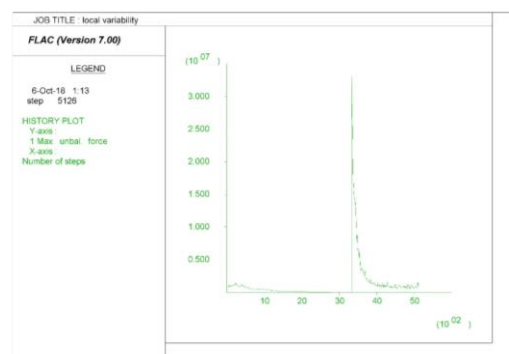
شکل ۱۴- مقطع مورد بررسی در مدلسازی با تغییرپذیری مکانی

همانطور که در شکل ۱۶، دیده می‌شود، میزان جابجایی حاصل از اجرای مدل به صورت نامنظم بوده و طرفین بخش زیربرش دارای جابجایی‌های متفاوت است. با مقایسه شکل ۱۶ و شکل ۱۴، مشخص است که نیمه سمت راست مدل دارای کیفیت توده‌سنگ بالاتری است. بر اساس روابط و پیشنهادهای موجود در مطالعات پیشین، با بهبود کیفیت توده‌سنگ، زاویه تخریب توده‌سنگ افزایش می‌یابد که این موضوع در آن نشان داده شده است.



شکل ۱۶- کنتور جابجایی برآیند در مدل عددی با تغییرپذیری مکانی

به منظور مدلسازی این بخش، داده‌های مکانی به صورت جدول‌های مجزا برای هر محدوده بلوک تخصیص یافته و بر اساس آن، مدل اجرا شده است. به صورت مشابه با مدلسازی قطعی، نیروهای نامتعادل کننده پس از حفاری به صفر نمی‌رسد (بخش دوم منحنی) و نشان از جریان مداوم مواد در صورت تخلیه دارد (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- منحنی نیروهای نامتعادل کننده در مدل عددی با تغییرپذیری مکانی

با اتمام مدلسازی عددی با تغییرپذیری مکانی، روند جابجایی‌ها را می‌توان مورد بررسی قرار داد. همانطور که در شکل ۱۶، نشان داده شده است، حجم منطقه جابجا شده با شرایط تخریب بسیار بزرگ است.

نتیجه مدلسازی با تغییرپذیری مکانی ویژگی‌ها نشان می‌دهد که حجم ناحیه گسترش تخریب تقریباً برابر با ۱۶۵۰۰۰ متر مکعب است. علاوه بر این مدل در ۵۱۲۶ گام زمانی به پایان رسیده است و دارای ضریب ایمنی برابر با ۰/۶۶ است.

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه بررسی قابلیت تخریب توده‌سنگ با در نظر گرفتن تغییرات توده‌سنگ و عدم قطعیت موجود در داده‌های مربوط به آن در آنومالی ۱۲ سه‌چاهون انجام شده است. در گام اول، مدل قطعی با استفاده از روش المان محدود و با

ناحیه‌ای در توده‌سنگ و بر اساس تخمین زمین‌آماری ویژگی‌های توده‌سنگ انجام شده است تا اثر این تغییرات در مدلسازی و ارزیابی قابلیت تخریب بررسی شود. نتایج بررسی در این شرایط برای یک مقطع از توده نشان از آن دارد که تغییرات ناحیه‌ای تاثیر قابل توجهی بر قابلیت تخریب دارد و تغییرات ویژگی‌های توده سنگ اثر خود را بر جابجایی‌های حاصل از عملیات معدنکاری به روش تخریبی نشان می‌دهد.

استفاده از ویژگی‌های معادل انجام گرفت و نتیجه آن، وجود قابلیت تخریب مناسب در منطقه مورد مطالعه بود. در گام دوم، با استفاده از روش مونت‌کارلو، شبیه‌سازی احتمالاتی مدل تخریب انجام گرفت که نتیجه آن نشان دهنده شرایط تخریب مناسب در توده‌سنگ بوده است. البته باید توجه داشت که در شرایط احتمالاتی، تغییرات قابلیت تخریب بر اساس ضریب اطمینان حاصل در محدوده ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ تغییر کرده است. در گام آخر، مدلسازی تخریب بر اساس تغییرپذیری

۹- مراجع

- Abbaszadeh, M., Shahriar, K., Sharifzadeh, M., & Heydari, M. (2011). Uncertainty and Reliability Analysis Applied to Slope Stability: A Case Study From Sungun Copper Mine [journal article]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(4), 581-596.
- Ahmed, A. Y. (2013). Reliability analysis of settlement for shallow foundations in bridges The University of Nebraska-Lincoln].
- Al-Bittar, T., & Soubra, A.-H. (2017). Bearing capacity of spatially random rock masses obeying Hoek–Brown failure criterion. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 11(2), 215-229.
- Alawneh, A. S., Nusier, O. K., & Al-Muftly, A. A.-E. (2006). Reliability based assessment of shallow foundations using mathcad. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24(3), 637-660.
- Alipenhani, B., Yavari, M., & Jafari, A. (2018). Investigation of effective factors on rock mass cavability in block caving method using numerical modeling. *Journal of Mining Engineering*, 13(38), 37-60.
- Au, S., Wang, Y., & Cao, Z. (2009). Reliability analysis of slope stability by advanced simulation with spreadsheet. *Proceedings of the second international symposium on geotechnical safety and risk*,
- Azadmehr, A., & Jalali, M. (2017). Estimation of rock mass cavability in block cave mining with rock engineering systems. *Tunneling & Underground Space Engineering*, 6(1), 57-78.
- Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2005). Reliability and statistics in geotechnical engineering. John Wiley & Sons.
- Brown, E. T. (2007). Block Caving Geomechanics: International Caving Study 1997-2004. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland.
- Chan, L.-Y. (1987). Application of block theory and simulation techniques to optimum design of rock excavations. University of California, Berkeley.
- Cherubini, C. (2000). Reliability evaluation of shallow foundation bearing capacity on $c'\phi'$ soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(1), 264-269.
- Cherubini, C., & Vessia, G. (2009). Reliability analyses of rock slope stability. *Geotechnical Risk and Safety: Proceedings of the 2nd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (IS-*

- Gifu 2009) 11-12 June, 2009, Gifu, Japan-IS-Gifu2009,
- Dodagoudar, G., & Shyamala, B. (2015). Finite element reliability analysis of shallow foundation settlements. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 9(3), 316-326.
- Duplancic, P., & Brady, B. H. (1999, 1999/1/1/). Characterisation of Caving Mechanisms By Analysis of Seismicity And Rock Stress 9th ISRM Congress, Paris, France.
- Emami Meibodi, E., Jalali, S. M. E., & Yarahmadi Bafghi, A. (2016). Discrete fracture network modeling for estimation of rock mass in-situ fragmentation in caving extraction methods. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 9(1 & 2), 27-44.
- Emami Meybodi, E. (2015). Analysis of jointed rock mass cavability and fragmentation in block cave mining in Kahang copper mine Shahrood University of Technology.
- Emami Meybodi, E., & Jalali, S. M. E. (2015). Estimation of fragmentation on geometrical viewpoint. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 5(9), 51-61.
- Fattahi, H., Shojaee, S., Farsangi, M. A. E., & Mansouri, H. (2013). Hybrid Monte Carlo simulation and ANFIS-subtractive clustering method for reliability analysis of the excavation damaged zone in underground spaces. *Computers and Geotechnics*, 54, 210-221.
- FENG, X.-l., WANG, L.-g., BI, L., SHANG, X.-m., & GONG, Y.-x. (2008). Cavability of rock mass based on 3D simulation technology [J]. *Journal of China Coal Society*, 9, 003.
- Goh, A. T. C., & Zhang, W. (2012). Reliability assessment of stability of underground rock caverns. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 55, 157-163.
- Hassen, H. F., Spinnler, F., & Fine, J. (1993). A new approach for rock mass cavability modeling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30(7), 1379-1385.
- Honjo, Y., Suzuki, M., & Matsuo, M. (2000). Reliability analysis of shallow foundations in reference to design codes development. *Computers and Geotechnics*, 26(3), 331-346.
- Huang, Y., & Xiong, M. (2017). Dynamic reliability analysis of slopes based on the probability density evolution method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 94, 1-6.
- Husein Malkawi, A. I., Hassan, W. F., & Abdulla, F. A. (2000). Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability. *Structural Safety*, 22(2), 161-187.
- Jabinpour, A., Yarahmadi Bafghi, A., & Gholamnejad, J. (2015). Cavability investigation of rock mass in Sechahoon mine, Iran Central Iron Ore Company.
- Jabinpour, A. (2011). Investigation of Rock Mass Cavability and Influencing Factor Using Numerical Methode University of Tehran].
- Jabinpour, A., Bafghi, A. Y., & Ahoeei, S. A. (2025). Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering. *Journal of Analytical and Numerical*, 14(41), 55-68.
- Jabinpour, A., Yarahmadi Bafghi, A., & Gholamnejad, J. (2018). Geostatistical modelling of rock mass cavability based on laubscher approach in Sechahoon Mine. *Journal of Mineral Resources*

- Engineering, 3(2), 53-69.
- Jabinpour, A., Yarahmadi Bafghi, A., Gholamnejad, J., & zakerzadeh, h. (2020). Estimation of REV size and Determination of geo-mechanical properties of the rock mass in Sechahoon Anomaly XII Mine. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 10(25), 13-22.
- Jianxin, Z. (1995). Research on the Cavability of Ore Body in Block Caving [J]. *JOURNAL OS SOUTHERN INSTITUTE OF METALLURGY*, 4.
- Jung, Y., Sunwoo, C., & Chung, S. (2007). Design And Reliability Analysis of Pillar Performance For Underground Limestone Mine In Korea. 11th ISRM Congress,
- Karekal, S., Das, R., Mosse, L., & Cleary, P. W. (2011). Application of a mesh-free continuum method for simulation of rock caving processes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(5), 703-711.
- Kartal, M. E., Bayraktar, A., & Başağa, H. B. (2012). Nonlinear finite element reliability analysis of Concrete-Faced Rockfill (CFR) dams under static effects. *Applied Mathematical Modelling*, 36(11), 5229-5248.
- Kasama, K., & Whittle, A. J. (2014). Slope reliability analysis using random field numerical limit analyses 14th International Conference of International Association for Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, Kyoto.
- Kinilakodi, H., & Grayson, R. L. (2011). Citation-related reliability analysis for a pilot sample of underground coal mines. *Accident Analysis & Prevention*, 43(3), 1015-1021.
- Laubscher, D. H. (1981). Selection of Mass Underground Mining Method. In *Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines*. AIME.
- Li, D., Liu, H., & Wu, S. (2009). Reliability analysis of embankment dams using Bayesian network. *Geotechnical Risk and Safety: Proceedings of the 2nd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (IS-Gifu 2009) 11-12 June, 2009, Gifu, Japan-IS-Gifu2009*,
- Li, H.-Z., & Low, B. K. (2010). Reliability analysis of circular tunnel under hydrostatic stress field. *Computers and Geotechnics*, 37(1), 50-58.
- Li, T.-c., Li, D.-d., & Wang, Z.-q. (2010). Tensile reliability analysis for gravity dam foundation surface based on FEM and response surface method. *Water Science and Engineering*, 3(2), 233-240.
- Liu, H., & Low, B. K. (2017). System reliability analysis of tunnels reinforced by rockbolts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 65, 155-166.
- Liu, L.-L., Cheng, Y.-M., & Zhang, S.-H. (2017). Conditional random field reliability analysis of a cohesion-frictional slope. *Computers and Geotechnics*, 82, 173-186.
- Low, B. K., & Einstein, H. H. (2013). Reliability analysis of roof wedges and rockbolt forces in tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 1-10.
- Luo, N., & Bathurst, R. J. (2017). Reliability bearing capacity analysis of footings on cohesive soil slopes using RFEM. *Computers and Geotechnics*, 89, 203-212.

- Ma, J. Z., Zhang, J., Huang, H. W., Zhang, L. L., & Huang, J. S. (2017). Identification of representative slip surfaces for reliability analysis of soil slopes based on shear strength reduction. *Computers and Geotechnics*, 85, 199-206.
- Mahtab, M., & Dixon, J. (1976). Influence of rock fractures and block boundary weakening on cavability. *Trans Soc Min Eng AIME*, 260, 6-12.
- Malkawi, H., Waleed, F. H., & Abdulla, F. A. (2000). Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability. *Structural Safety*, 22(2), 161-187.
- Mathews, K., Hoek, E., Wyllie, D., & Stewart, S. (1981). Prediction of stable excavation spans at depths below 1000m in hard rock mines. *CANMET Report, DSS Serial No. OSQ80-00081*.
- Mawdesley, C., Trueman, R., & Whiten, W. (2001). Extending the Mathews stability graph for open-stope design. *Mining Technology*, 110(1), 27-39.
- Mawdesley, C. A. (2002). Predicting rock mass cavability in block caving mines.
- McMahon, B., & Kendrick, R. (1969). Predicting the block caving behavior of orebodies. *SME-AIME preprint*.
- Merrien-Soukatchoff, V., Korini, T., & Thoraval, A. (2012). Use of an integrated discrete fracture network code for stochastic stability analyses of fractured rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(2), 159-181.
- Najafi, M., & Jalali, M. (2011). Evaluation of Reliability Analysis Methods in Stability Analysis of Hydrocarbon Caverns The first Iranian Virtual Conference on Underground Storage of Hydrocarbons, Shahrood, Iran.
- Napa-García, G. F., Beck, A. T., & Celestino, T. B. (2017). Reliability analyses of underground openings with the point estimate method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 64, 154-163.
- Napa-García, G. F., Beck, A. T., & Celestino, T. B. (2018). Risk analysis of fractured rock mass underground structures. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 12(2), 123-134.
- Obert, L., Brady, B., & Schmechel, F. W. (1976). The effect of normal stiffness on the shear resistance of rock. *Rock mechanics*, 8(2), 57-72.
- Onisiphorou, C. (2011). Reliability analysis of bearing capacity for shallow foundations based on Eurocode 7 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk, Munich, Germany.
- Palma, R., & Agarwal, R. (1973). A study of the cavability of primary ore at the El Teniente Mine.
- Potvin, Y. (1988). Empirical open stope design in Canada University of British Columbia].
- Rafiee, R., Ataei, M., KhalooKakaie, R., Jalali, S., Sereshki, F., & Noroozi, M. (2018). Numerical modeling of influence parameters in cavability of rock mass in block caving mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 105, 22-27.
- Ramezannia, S. R., ataei, m., & Mirzaei Nasirabad, h. (2015). Geological Risks Prioritization in mechanized tunneling using fuzzy multi-criteria decision making. *Journal of Analytical and Numerical*

- Methods in Mining Engineering, 5(10), 49-62.
- Reale, C., Gavin, K., Prendergast, L. J., & Xue, J. (2016). Multi-modal Reliability Analysis of Slope Stability. *Transportation Research Procedia*, 14, 2468-2476.
- Rech, W., & Lorig, L. (1992). Predictive numerical stress analysis of panel caving at the Henderson Mine. *Proc. of MASSMIN*, 92, 55-62.
- Sainsbury, B. (2010). Sensitivities in the numerical assessment of cave propagation.
- Sainsbury, B., Pierce, M., & Mas Ivars, D. (2009). Analysis of caving behaviour using a synthetic rock mass—ubiquitous joint rock mass modelling technique. 1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium (SHIRMS),
- Schweckendiek, T., van den Ham, G., de Groot, M., de Gijt, J., Brassinga, H., & Hudig, P. (2009). Reliability analysis of a hydraulic fill slope with respect to liquefaction and breaching. *Geotechnical Risk and Safety: Proceedings of the 2nd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (IS-Gifu 2009) 11-12 June, 2009, Gifu, Japan-IS-Gifu2009*,
- Shen, M. S. H. (2012). Non-deterministic analysis of slope stability based on numerical simulation *Technische Universität Bergakademie Freiberg*].
- Sivakumar Babu, G. L., & Srivastava, A. (2007). Reliability analysis of allowable pressure on shallow foundation using response surface method. *Computers and Geotechnics*, 34(3), 187-194.
- Song, L., Li, H.-Z., Chan, C. L., & Low, B. K. (2016). Reliability analysis of underground excavation in elastic-strain-softening rock mass. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 60, 66-79.
- Stewart, S., & Forsyth, W. (1995). The Mathew's method for open stope design. *CIM bulletin*, 88(992), 45-53.
- Sun, B., Zeng, S., & Ding, D. (2008). Study and application of reliability analysis method in open-pit rock slope project. *Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation*, 899-906.
- Tan, X.-h., Xie, Y., Hou, X.-l., Li, P., & Wang, X. (2017). Reliability Analysis of Shallow Foundations on Unsaturated Soils under Rainfall Infiltration. In *Geo-Risk 2017* (pp. 588-597).
- Tan, X., & Wang, J. (2008). Nonlinear finite element reliability analysis of slope stability. *Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation*, 565-571.
- Tonon, F., Bernardini, A., & Mammino, A. (2000). Determination of parameters range in rock engineering by means of random set theory. *Reliability Engineering & System Safety*, 70(3), 241-261.
- Trueman, R., Mikula, P., Mawdesley, C., & Harries, N. (2000). Experience in Australia with the application of the Mathews' method for open stope design. *CIM bulletin*, 93(1036), 162-167.
- Wang, Q., Fang, H., & Shen, L. (2016). Reliability analysis of tunnels using a metamodeling technique based on augmented radial basis functions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56, 45-53.
- Wang, S., Zhang, Y., Zhang, N., & Wang, S. (2008). 3-D stability analysis of tunnel structures based on geometric stochastic blocks theory. *Proceedings of the International Young Scholars Symposium*

on Rock Mechanics. Beijing:[sn],

- Zhang, W., & Goh, A. T. C. (2012). Reliability assessment on ultimate and serviceability limit states and determination of critical factor of safety for underground rock caverns. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32, 221-230.
- Zhao, H., Ru, Z., Chang, X., Yin, S., & Li, S. (2014). Reliability analysis of tunnel using least square support vector machine. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41, 14-23.
- Zhenyu, W., Jiankang, C., Yanling, L., & Liang, P. (2015). An algorithm in generalized coordinate system and its application to reliability analysis of seismic slope stability of high rockfill dams. *Engineering Geology*, 188, 88-96.

Rock mass caving simulation considering regional variations through geostatistical estimation

A. Jabinpour¹, A. Yarahmadi Bafghi^{2*}, J. gholamnejad³, H. Zakerzadeh⁴

1- PhD in Mining Exploitation; Department of Mining and Metallurgy, Yazd University, alirezajabin@gmail.com

2- Associate Professor; Department of Mining and Metallurgy, Yazd University, ayarahmadi@yazd.ac.ir

3- Professor; Department of Mining and Metallurgy, Yazd University, j.gholamnejad@yazd.ac.ir

4- Associate Professor; Department. of Mathematics, Yazd University, hzaker@yazd.ac.ir

Received: 18 Oct 2024; Accepted: 14 May 2025
DOI: 10.22044/tuse.2025.15186.1493

Keywords

Underground mining
Cavability
Simulation
Reliability
Geostatistical estimation

Extended Abstract

Summary

This study explores the critical factors surrounding rock mass cavability, particularly in the context of underground caving mining. Given the inherent uncertainties associated with geological conditions, this research evaluates the cavability of the Sechahoon XII Anomaly utilizing a probabilistic framework. By employing numerical methods alongside Monte Carlo simulations, the findings provide insight into the geomechanical properties of the rock mass and their variability, which are crucial for the feasibility analysis of mining operations.

Introduction

Mining projects, especially those involving underground operations, are fraught with uncertainties related to the geological characteristics of rock masses. These characteristics can change permanently, leading to challenges in assessing the stability and feasibility of mining methods. Underground caving mining, known for its suitability in deep and large-scale exploitation, faces significant obstacles during the caving process due to the complexities of the rock mass. The study of rock mass cavability is essential during feasibility studies, as it greatly influences the success and safety of mining operations. This research focuses on the Sechahoon XII Anomaly to understand how ground uncertainties affect cavability and ultimately guide mining-related decision-making.

Methodology and Approaches

To assess rock mass cavability probabilistically, this study utilized numerical methods complemented by Monte Carlo simulations, a statistical technique widely applied to model uncertainty. The foundation of the rock mass modeling involved estimating geomechanical properties through geostatistical methods, specifically within defined 50-meter blocks to capture the variability of the geological conditions accurately. A deterministic model initially provided a confidence coefficient of 0.72, indicating conditions favorable for caving. Following this, over 1,000 iterations of the Monte Carlo simulation were conducted, revealing that the computed safety factors ranged between 0.65 and 0.75. The simulations accounted for spatial variability and illuminated the relationship between the quality of the rock mass and the increasing cave angle as the geomechanical properties improved.

Results and Conclusions

The modeling undertaken in this study underscores the significant impact of ground uncertainty on rock mass cavability. The results demonstrate a promising correlation between the quality of the rock mass and caving behavior, suggesting that improved geomechanical properties lead to an increased cave angle.

Consequently, the probabilistic analysis conducted through numerical methods reveals vital information that can enhance the feasibility studies for underground caving mining operations. The insights gained from this research can serve as a reference for future mining endeavors, promoting safer and more effective mining practices.
