

(پژوهشی)

ارزیابی ریسک خطر سقوط سنگ از دیواره‌های دولومیتی معدن گلبینی ۷، مجموعه معادن بوکسیت جاجرم

حسینعلی لازمی^{۱*}، ابوالفضل کهنه^۲

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بافق، بافق، ایران

۲- کارشناسی ارشد مهندس معدن، شرکت معدن زمین، معادن بوکسیت جاجرم

(دریافت: مرداد ۱۴۰۰، پذیرش: بهمن ۱۴۰۰)

چکیده

شکل گسیختگی‌ها در شیب‌های سنگی به شرایط مقاومتی لایه‌ها، شیب لایه‌ها، جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، شرایط ناپیوستگی‌ها (پرش‌دگی، زبری، فاصله‌داری و هوازدگی)، هندسه پله و شرایط آب و هوایی منطقه بستگی دارد. شیب‌ها را می‌توان از لحاظ ساختاری به دو دسته کلی همگن و ناهمگن تقسیم‌بندی کرد. در شیب‌های همگن غالباً شکست‌های قاشقی رخ می‌دهد و در شیب‌های ناهمگن معمولاً شکست به صورت صفحه‌ای، گوه‌ای، واژگونی یا ترکیبی از چند نوع شکست است. این مطالعه باهدف بررسی پایداری دیواره دولومیتی معدن گلبینی ۷ انجام شد. دیواره کمرباطین این معدن به شدت گسل خورده است، امتداد عمده گسل‌های معدن گلبینی ۷ تقریباً عمود بر جهت لایه‌بندی و جهت شیب عمده آنها به جز چند گسل معکوس امتدادی، خلاف جهت شیب لایه‌بندی است و پتانسیل ریزش‌های واژگونی وجود دارد. یکی از روش‌های اساسی جهت تحلیل پایداری دیواره دولومیتی به‌خصوص در شیب‌های سنگی، روش ارزیابی خطر سقوط سنگ است. در این ارزیابی، با استفاده از روش مشاهده‌ای بلوک‌های ناپایدار تشخیص داده شده و ریسک خطر ناپایداری آنها در سه سطح کم، متوسط و زیاد ارزیابی شد. در بررسی انجام‌شده، دیواره دولومیتی به ۱۳ زون مختلف تقسیم‌بندی و در هر زون، بلوک‌های مستعد ناپایداری مشخص شد. مجموع بلوک‌های ارزیابی‌شده، ۴۶ مورد است. با توجه به نتایج، بلوک‌های مربوط به زون ۸ دارای سطح خطر متوسط تا زیاد بوده و بلوک‌های مربوط به زون ۱۳ تماماً دارای سطح خطر زیاد هستند. هیچ بلوکی در سطح خطر کم قرار ندارد و تنها ۲ درصد بلوک‌های ارزیابی‌شده در سطح خطر کم تا متوسط هستند. ۹ درصد در سطح خطر متوسط، ۵۰ درصد در سطح خطر متوسط تا زیاد و ۳۹ درصد در سطح خطر زیاد قرار دارند. فاصله سقوط از پای دیواره با روش ارزیابی خطر سقوط سنگ تعیین و نتایج آن با نتایج مدل‌سازی توسط نرم‌افزار Rocfall مقایسه شد و حداکثر اختلاف بین نتایج ۲۵ درصد است. به همین دلیل این روش می‌تواند برای تعیین وضعیت خطر دیواره‌ها روش مناسبی بوده و در افزایش ایمنی محیط کار و نیروها در معدن مؤثر باشد.

کلمات کلیدی

گسیختگی، دیواره‌های دولومیتی، خطر سقوط سنگ، شیب‌های سنگی، ارزیابی خطر

*عهده‌دار مکاتبات: hlazemi54@gmail.com

۱- مقدمه

با بررسی‌های انجام‌شده در تحقیقات مختلف می‌توان گفت که عوامل مختلف ساختاری و غیر ساختاری در ناپایداری شیب‌های معادن نقش دارند و همواره در معدنکاری روباز سعی می‌شود که باطله کمتری از معادن استخراج شود و نسبت باطله برداری به حداقل برسد. در همین راستا می‌توان گفت که معدنکاری روباز با شیب پله‌های معدن مرتبط است. در صورتی که بتوان پله‌ها را با شیب حداکثری ایجاد کرد نسبت باطله برداری کاهش می‌یابد [۲،۱]. اقتصاد در معدنکاری موضوع مهمی است و هدف این است که بیشترین سود حاصل شود و این موضوع با افزایش شیب دیواره و کاهش باطله برداری محقق می‌شود از طرفی این موضوع سبب می‌شود که ایمنی کاهش یابد و احتمال ریزش دیواره‌ها افزایش یابد، بنابراین در معدنکاری روباز طراحی دیواره‌های پایدار، موضوع بسیار مهمی است و در اکثر معادن روباز که دیواره‌های بلند دارند این موضوع بررسی می‌شود [۳،۲]. در برخی از موارد این ناپایداری به‌واسطه حرکت سنگ‌ها و سقوط از دیواره‌های معدن صورت می‌گیرد [۴]. به جدایش مواد از قسمت‌های پر شیب دامنه طبیعی یا مصنوعی و حرکت آن با سرعت زیاد تا بسیار زیاد به طرف پایین شیب، سقوط یا ریزش سنگ گفته می‌شود. عوامل مؤثر در ایجاد پدیده‌ی سقوط سنگ شامل عوامل مکانیکی (شیب تند دامنه، وجود ناپیوستگی، تنش‌های تکتونیکی، تنش‌های حاصل از انجماد آب‌های نفوذی به درون سیستم ناپیوستگی، تنش کششی حاصل از انفجارهای غیراستاندارد و ارتعاشات ناشی از زمین‌لرزه)، عوامل هیدرولوژیکی و آب و هوایی (بارندگی‌های سنگین، ذوب سریع برف و تغییرات دما)، عوامل زیستی و عوامل انسانی است. در شیب‌های سنگی تعیین مکانیسم گسیختگی‌های بالقوه‌ای که شرایط ساختاری کنترل‌کننده آنها است، باید در دستور کار قرار گیرد.

زمانی و همکاران در سال ۲۰۱۱، دلایل سقوط سنگ شامل عوامل فیزیکی، مکانیکی و محیطی را در محدوده روستایی در استان خراسان شمالی مشخص کردند. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده نشان دادند که تغییرات دامنه شیب و ضریب ارتجاعی مواد سازنده آن بیشترین نقش را در تعیین مسیر حرکت، ارتفاع جهش و میزان انرژی

جنبشی بلوک‌های سقوط کرده دارند. به‌طوری‌که در نقاط با شیب زیاد یا بخش‌هایی از دامنه که از آهک با ضریب ارتجاعی زیاد تشکیل شده است انرژی جنبشی و ارتفاع جهش بیشتر از نقاطی است که از شیل یا واریزه با ضریب ارتجاعی کمتر و شیب ملایم‌تر تشکیل شده است [۵]. فراری و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۷ روش ارزیابی خطر سقوط سنگ^۲ (ERHA) را برای دیواره‌های بزرگ معدنی پیشنهاد کردند. این روش به‌عنوان یک روش ارزیابی کیفی خطر سقوط سنگ برای دیواره‌های استخراجی یک معدن روباز زغال‌سنگ در استرالیا معرفی شد. این روش قصد دارد ابزاری ساده برای شناسایی سریع خطرناک‌ترین بخش‌های یک دیوار بلند باشد و عمدتاً به مشاهدات برجا متکی است. سطح خطر سقوط سنگ (کم، متوسط و زیاد) به‌عنوان تابعی از شدت ریزش و احتمال ریزش سنگ تعریف شده است. شدت ریزش با استفاده از مفهوم انرژی جنبشی سنگ در حال سقوط در پای دیوار بزرگ معدنی محاسبه می‌گردد. روش پیشنهادی امکان شناسایی سریع بخش‌هایی با سطح خطر بالا را فراهم می‌کند. همچنین بر اساس احتمال سقوط سنگ و شدت سقوط سنگ، فاصله سنگ سقوط کرده از پای پله محاسبه می‌گردد؛ بنابراین این روش جهت شناسایی نقاط ایمن برای پرسنل، ماشین‌آلات و تجهیزات مستقر در پای پله مؤثر است [۶].

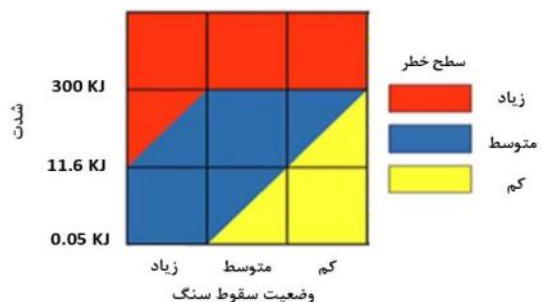
لانا و سابینا^۳ در سال ۲۰۱۴ با تکنیک‌های فتوگرامتری هوایی با استفاده از پهپاد به بررسی سایت، توسعه مدل‌های ژئوتکنیکی و ارزیابی پایداری شیب پرداختند. در نتیجه، برداشت‌ها سریع‌تر و با جزئیات بیشتر و بدون قرار گرفتن در معرض خطرات شیب در پای دیواره‌های معدن انجام شد [۷]. همچنین نیل‌بار و همکاران^۴ در سال ۲۰۲۰ از روش‌های فتوگرامتری و نیز مدل‌سازی‌های سه‌بعدی به‌منظور تحلیل پایداری در یک معدن در استرالیا استفاده کردند و نتایج خوبی حاصل شده است [۸]. به‌طور کلی می‌توان روش‌های مختلف تحلیلی، تجربی و عددی را برای مدل‌سازی پدیده سقوط سنگ از دیواره معدن بکار برد [۹].

آنالیز سقوط سنگ نیازمند دانستن فاکتورهایی از قبیل نقطه جدایش بلوک سنگی، شکل و ژئومتری آن، توپوگرافی شیب، میزان انرژی کاهش‌یافته در هنگام برخورد و غلطش، خواص مکانیکی بلوک سنگی و دامنه و سرعت بلوک‌ها در هر نقطه از طول مسیر است. یکی از راهکارهای مناسب

۲- روش ارزیابی خطر سقوط سنگ

۲-۱- اصول روش

روش ارزیابی خطر سقوط سنگ برگرفته از یک روش سوئیسی به‌عنوان دستورالعمل سوئیسی^۵ است که یکی از گسترده‌ترین روش‌های پذیرفته شده برای ارزیابی خطر سقوط سنگ است. روش سوئیسی از یک ماتریس شامل سه سطح خطر (کم، متوسط و زیاد) و به‌صورت احتمال سقوط سنگ و شدت (انرژی) ریزش سنگ در امتداد دامنه‌های کوه تشکیل شده است. در روش ERHA، مرزهای ماتریس سوئیسی متناسب با شرایط دیواره‌های بلند معدنی تغییر کرده‌اند و سطوح خطر روی گراف را بر اساس مشاهدات برجا ایجاد می‌کنند (شکل ۱). پس از تعیین شدت و وضعیت سقوط سنگ، سطح خطر که با رنگ‌های زرد و آبی و قرمز مشخص شده است، تعیین می‌گردد. رنگ زرد بیانگر سطح خطر کم بلوک، رنگ آبی بیانگر سطح خطر متوسط و رنگ قرمز بیانگر سطح خطر زیاد است [۶].



شکل ۱: تعیین سطح خطر سقوط سنگ با روش ERHA [۶].

۲-۱-۱- وضعیت سقوط سنگ

وضعیت (احتمال) سقوط سنگ نشان‌دهنده درجه مستعد ریزش بودن بلوک سنگی مورد بررسی است. امتیاز این پارامتر بر اساس ساختار زمین‌شناسی توده سنگ (درجه شکستگی توده سنگ شامل توده‌ای، بلوکی و خیلی بلوکی)، پتانسیل ناپایداری توده سنگ (احتمال ایجاد زیربرش بر اساس درجه هوازدگی توده سنگ، احتمال لغزش بلوک و احتمال واژگونی بلوک) و وضعیت اجرایی شیب (مطلوب یا نامطلوب) تعیین می‌شود (جدول ۱). در صورتی که مجموع امتیاز بین ۰ تا ۳ باشد احتمال سقوط سنگ کم است، اگر مجموع امتیاز بین ۴ تا ۷ باشد احتمال سقوط متوسط است و اگر مجموع امتیاز بین ۸ تا ۱۱ باشد

جهت شناسایی پتانسیل سقوط سنگ استفاده از روش‌های مشاهده‌ای است.

عمدتاً سقوط سنگ بسیار سریع انجام می‌شود و گاهی قطعه سنگ‌ها علیرغم حجم کم به دلیل فاصله زیاد تا پای پله ممکن است با سرعت بسیار زیاد سقوط کنند که برای پرسنل پای پله خسارت قابل توجه و حتی احتمال مرگ را دارد. هنگامی که یک رویداد ریزش سنگ اتفاق می‌افتد، فرد معمولاً قادر به فرار نیست. در معادن روباز، ریزش سنگ نه تنها زندگی انسان‌ها را تهدید می‌کند بلکه ماشین‌آلات و تجهیزات واقع در پای دیواره‌های بزرگ معادن را نیز تهدید می‌کند. از این رو ریزش سنگ یکی از مهم‌ترین خطرهای در معادن روباز است. این خطر در صورت فعال بودن معدن می‌تواند عواقب مالی قابل توجهی داشته باشد و به‌طور موقت برای مسائل ایمنی، تولید متوقف شود. با این وجود شناسایی و رویکرد دقیق و مؤثر برای مدیریت خطر سقوط سنگ در فضای باز معادن می‌تواند خطرات را در مناطق بالقوه به حداقل برساند.

هدف از این مطالعه ارزیابی ریسک خطر سقوط سنگ در دیواره کم‌پایین معادن بوکسیت جاجرم است. محل مورد مطالعه، معدن گلبینی ۷ یکی از پیت‌های بزرگ مجموعه معدن بوکسیت جاجرم است که در فاصله ۱۵ کیلومتری شهر جاجرم واقع در خراسان شمالی قرار گرفته است و به روش روباز استخراج می‌شود. شیب و ارتفاع دیواره کم‌پایین این معدن وابسته به جهت‌داری و تغییرات ماده معدنی است؛ بنابراین باگذشت چندین سال از شروع فعالیت معدن دیواره کم‌پایین با شیب بسیار تند (گاهی شیب منفی) و ارتفاع زیاد (بیش از ۱۰۰ متر) شکل گرفته است. دیواره کم‌پایین معدن از سنگ دولومیت تشکیل شده است. با توجه به خواص مقاومتی بالای سنگ دولومیت، دیواره کم‌پایین معدن تاکنون ناپایداری و ریزش کلی نداشته است اما با در نظر گرفتن شیب و ارتفاع دیواره و با توجه به اینکه این دیواره به‌شدت غسل خورده و تکتونیزه است، بسته به شرایط سنگ و ناپیوستگی‌ها و سایر عوامل مؤثر خارجی، ریزش‌ها می‌تواند به‌صورت سقوط یک تکه سنگ کوچک تا بلوک‌های بزرگ باشد؛ بنابراین یکی از روش‌های اساسی جهت بررسی وضعیت پایداری دیواره دولومیتی در معدن گلبینی ۷، روش ارزیابی خطر سقوط سنگ است.

بوده است، احتمال سقوط بلوک مورد بررسی یک ردیف افزایش می‌یابد [۱۰, ۶].

احتمال سقوط سنگ زیاد است. در صورتی که در محدوده مورد بررسی از دیواره معدنی اثرات سقوط سنگ از قبل مشخص باشد، به دلیل اینکه محدوده از قبل مستعد ریزش

جدول ۱: تعیین احتمال سقوط سنگ

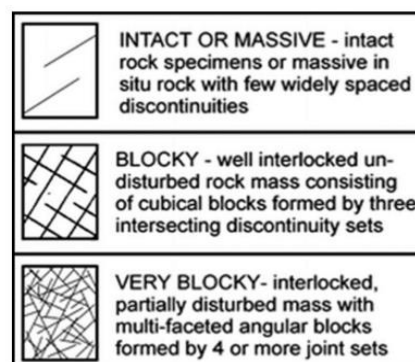
امتیاز	وزن	ضریب	وضعیت موجود	توصیف	
درجه شکستگی	۳	۰	۰	توده سنگ با ساختار توده ای	□
			۱	توده سنگ با ساختار بلوکی یا خیلی بلوکی	
زیر برش	۲	۰	۰	توده سنگ با هوازدگی همگن	□
			۱	توده سنگ با هوازدگی ناحیه ای	
لغزش بلوک	۲	۰	۰	احتمال لغزش بلوک وجود ندارد	□
			۱	احتمال لغزش بلوک وجود دارد	
واژگونی بلوک	۱	۰	۰	احتمال واژگونی بلوک وجود ندارد	□
			۱	احتمال واژگونی بلوک وجود دارد	
وضعیت اجرایی	۳	۰	۰	وضعیت اجرایی شیب مطلوب است	□
			۱	وضعیت اجرایی شیب نامطلوب است	
			اثر سقوط سنگ از قبل وجود ندارد □		
			اثر سقوط سنگ از قبل وجود دارد □		

در مورد پارامتر وضعیت اجرایی شیب، باید دامنه شیب ایجاد شده بررسی شود. در صورتی که دامنه ایجاد شده دارای یک شیب پیوسته بوده و اثرات آتشیاری بر روی توده سنگ تشکیل دهنده شیب ناچیز است، می‌توان شرایط را مطلوب دانست و در صورتی که به واسطه آتشیاری، وضعیت دامنه شیب از شرایط طبیعی خارج شده و در نقاطی باعث به وجود آمدن شیب‌های منفی گردیده است، شرایط نامطلوب فرض می‌شود [۱۰, ۶].

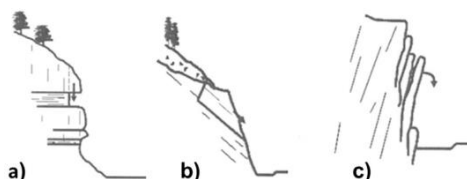
۲-۱-۲- شدت سقوط سنگ

در استخراج روباز، عناصر در معرض خطر (پرسنل و ماشین‌آلات) عمدتاً در قسمت پایین دیواره‌های بزرگ قرار دارند؛ بنابراین شدت ریزش سنگ به صورت انرژی جنبشی یک بلوک ناپایدار بالقوه در پای پله تعریف می‌شود که به وزن بلوک، موقعیت اولیه بلوک و اتلاف انرژی که در طول مسیر اتفاق می‌افتد، بستگی دارد. شدت سقوط سنگ به صورت $E = m h$ و بر حسب ژول محاسبه می‌گردد. منظور از m وزن بلوک، h ارتفاع بلوک ناپایدار و E ، ضریب رگرسیون انرژی است که وابسته به رده بی‌نظمی سطح دیواره و شیب پله می‌باشد. جهت تعیین رده بی‌نظمی سطح از شکل ۴ و جهت تعیین مقادیر متوسط و حداکثر ضریب ERC از جدول ۲ استفاده می‌شود. در

درجه شکستگی توده سنگ با توجه به میزان ناپیوستگی‌ها سنگ مطابق شکل ۲ تعیین می‌شود. ناپایداری‌ها ممکن است به دلیل هوازدگی سریع در سنگ‌های ضعیف‌تر و یا به دلیل جهت‌گیری نامطلوب ناپیوستگی‌ها ایجاد شود. مورد اول منجر به سقوط آزاد بلوک‌ها می‌شود و مورد دوم منجر به ریزش واژگونی یا لغزش صفحه‌ای بلوک می‌شود (شکل ۳).

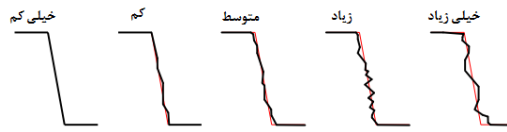


شکل ۲: تعیین درجه شکستگی سنگ [۶].



شکل ۳: انواع شکست بلوک‌های سنگ (a) زیربرش (b) لغزش صفحه‌ای (c) ریزش واژگونی [۶].

جدول ۲ منظور از شیب پله، شیب سطح پله از پای پله تا تراز بلوک ناپایدار می‌باشد.



شکل ۴: تعیین رده بی‌نظمی سطح پله با روش مشاهده‌ای [۶].

جدول ۲: مقادیر ERC به ازای شیب دیواره و رده بی‌نظمی سطح دیواره پله [۶].

رده بی‌نظمی سطح پله					شیب پله α (درجه)
خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	
۶۱۰-۸۸۷	۵۷۰-۸۴۹	۵۵۴-۸۳۸	۵۲۹-۸۰۲	۵۰۷-۷۴۸	۵۰
۶۷۳-۹۰۵	۶۳۶-۸۷۷	۶۲۰-۸۵۰	۵۹۸-۸۲۴	۵۷۹-۷۷۵	۵۵
۷۲۹-۹۱۸	۶۹۴-۸۸۵	۶۷۹-۸۷۰	۶۵۹-۸۴۴	۶۳۹-۷۹۴	۶۰
۷۸۱-۹۳۲	۷۴۹-۹۱۱	۷۳۴-۸۹۰	۷۱۴-۸۶۲	۶۹۶-۸۲۰	۶۵
۸۲۹-۹۴۲	۸۰۲-۹۲۶	۷۸۷-۹۰۹	۷۶۸-۸۹۰	۷۴۸-۸۴۳	۷۰
۸۷۲-۹۵۲	۹۴۹-۹۴۰	۸۳۸-۹۳۱	۸۱۸-۹۱۱	۸۰۱-۸۷۳	۷۵
۹۰۹-۹۵۸	۸۹۳-۹۵۲	۸۸۵-۹۴۶	۸۷۰-۹۳۱	۸۵۵-۹۱۷	۸۰
۹۵۴-۹۸۰	۹۴۲-۹۷۹	۹۳۵-۹۷۳	۹۲۲-۹۶۰	۹۰۶-۹۴۶	۸۵

۲-۲- تعیین محل برخورد سنگ

فاصله افقی اولین برخورد بلوک در حال سقوط تا پای پله را می‌توان با این روش تخمین زد. پس از تحلیل حساسیت و آزمایش‌های متعدد جهت طراحی اقدامات حفاظتی لازم و مناسب، فاصله d_{95} به‌عنوان فاصله اولین برخورد تا پای پله تعیین می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مکان‌های برخورد عمدتاً توسط ارتفاع شیب، درجه زبری و زاویه شیب کنترل می‌شود. به منظور بررسی همه موارد ممکن ترکیبی از مقادیر متوسط و حداکثر d_{95} در نظر گرفته شد. دامنه مورد انتظار d_{95} را می‌توان با استفاده از این رابطه تخمین زد: $d_{95} = h DRC$ که h ارتفاع سقوط سنگ و DRC ضریب رگرسیون فاصله است که با توجه به رده بی‌نظمی سطح و شیب سطح پله از پای پله تا تراز بلوک ناپایدار و مطابق جدول ۴ محاسبه می‌شود.

پس از تعیین شدت سقوط سنگ، بر اساس حالات کاری (نحوه قرارگیری پرسنل و ماشین آلات در پای پله) شرایط ایمن متناسب با حداکثر سطح انرژی سقوط سنگ در پای پله تعیین می‌شود (جدول ۳).

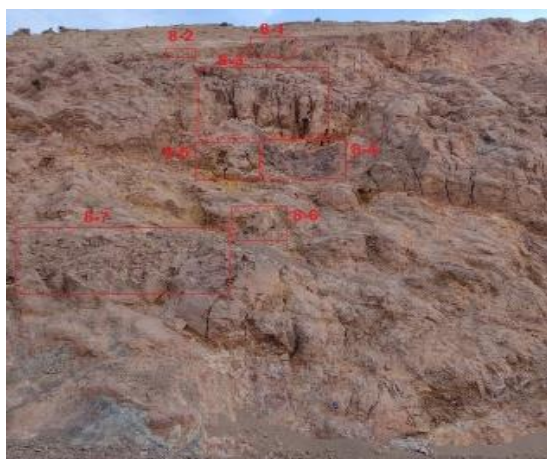
جدول ۳: شرایط ایمن برای فعالیت پرسنل و تجهیزات در حالات کاری مختلف [۶].

شرایط ایمن (متناسب با حداکثر انرژی سقوط سنگ)	حالات کاری (نحوه قرارگیری پرسنل و ماشین آلات در پای پله)
۰٫۰۵ kJ	پرسنل با تجهیزات حفاظت فردی در پای پله مشغول به کار می‌باشند
۱۱٫۶ kJ	پرسنل در داخل ماشین آلات متحرک در پای پله مشغول به کار می‌باشند
۳۰۰ kJ	پرسنل با تجهیزات حفاظت فردی در پای پله زیر سکوی حفاظتی قرار گرفته‌اند

جدول ۴: مقادیر DRC به ازای شیب دیواره و رده بی‌نظمی سطح دیواره پله [۶].

شیب پله α (درجه)	رده بی‌نظمی سطح پله			
	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد
۵۰	-۰,۱۳۴	۰,۰۷۲-۰,۲۳۸	۰,۱۲۰-۰,۳۴۶	۰,۱۵۴-۰,۴۲۴
۵۵	-۰,۱۳۵	۰,۰۷۵-۰,۲۱۴	۰,۱۲۲-۰,۳۱۸	۰,۱۵۷-۰,۳۸۹
۶۰	-۰,۱۲۲	۰,۰۸۰-۰,۲۰۶	۰,۱۲۸-۰,۳۰۷	۰,۱۶۱-۰,۳۸۱
۶۵	-۰,۱۲۳	۰,۰۸۸-۰,۲۱۳	۰,۱۳۶-۰,۳۰۶	۰,۱۶۸-۰,۳۹۷
۷۰	-۰,۱۳۳	۰,۰۹۵-۰,۲۱۱	۰,۱۴۰-۰,۲۷۵	۰,۱۷۲-۰,۳۴۷
۷۵	-۰,۱۳۵	۰,۱۰۴-۰,۲۱۵	۰,۱۵۰-۰,۳۰۶	۰,۱۷۸-۰,۳۱۸
۸۰	-۰,۱۴۲	۰,۱۱۶-۰,۲۱۲	۰,۱۵۸-۰,۲۹۵	۰,۱۸۶-۰,۳۴۷
۸۵	-۰,۱۶۰	۰,۱۲۵-۰,۲۱۶	۰,۱۶۲-۰,۲۸۴	۰,۱۸۸-۰,۳۱۲

در هریک از زون‌ها، بلوک‌های ناپایدار مشخص شد و در مجموع تعداد بلوک‌های برداشت‌شده ۴۶ مورد است. با توجه به تعداد زیاد بلوک‌ها، فقط اطلاعات مربوط به زون‌های ۸ و ۱۳ که تعداد بلوک بیشتری با سطح خطر زیاد دارند در ادامه آورده شده است. شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب وضعیت زون‌های ۸ و ۱۳ را نشان می‌دهد.



شکل ۶: زون ۸ جهت بررسی سطح خطر سقوط بلوک‌های مشخص‌شده.



شکل ۷: زون ۱۳ جهت بررسی سطح خطر سقوط بلوک‌های مشخص‌شده.

نکته: یکی از مشکلات تعیین فاصله اولین برخورد سنگ از پای پله با روش ERHA، عدم تأثیر پارامتر وزن بلوک سنگ در رابطه تعیین d_{95} است. به طوری که طبق این روش فاصله اولین برخورد سنگ فقط به ارتفاع سقوط و شرایط سطح شیب دیواره وابسته می‌باشد.

۳- ارزیابی خطر سقوط سنگ در دیواره‌های دولومیتی معدن گل‌بینی ۷

با توجه به ارتفاع زیاد دیواره، گسل‌خوردگی زیاد و تنش‌های کششی حاصل از انفجار زون بوکسیت در کف پیت، همچنین شیب تند و ناخواسته دیواره، بی‌نظمی سطح شیب، هوازدگی و ایجاد زون خرد شده در سطح شیب، ضروری است تا احتمال سقوط سنگ در دیواره‌های دولومیت معدن گل‌بینی ۷ بررسی شود. به همین دلیل جهت برداشت مشاهده‌ای دیواره دولومیت به ۱۳ زون تقسیم شد و بلوک‌های مستعد هر زون شناسایی و برداشت شد (شکل ۵). تقسیم بندی زون‌ها صرفاً جهت تقسیم دیواره کمر پایین معدن به چند ناحیه کوچکتر و بررسی جزئی تر انجام شد و منظور زون بندی ژئوتکنیکی نمی‌باشد.



شکل ۵: زون بندی دیواره دولومیت و نقاط برداشت مشاهده‌ای بلوک‌های مستعد ریزش ۷ گل‌بینی.

بلوک‌ها تعیین گردید. پارامترهای تأثیرگذار در محاسبه شدت سقوط و نتایج ارزیابی در جدول ۵ آمده است. پس از محاسبه پارامترهای احتمال سقوط و شدت سقوط برای بلوک‌های موردنظر، در نهایت سطح خطر هر بلوک مشخص گردید.

پس از برداشت مشاهده‌ای بلوک‌های بالقوه ناپایدار در زون‌های مذکور، مقادیر احتمال سقوط برای هر کدام از بلوک‌ها محاسبه گردید. با توجه به امتیازات محاسبه‌شده، در تمام موارد امتیازات بین ۸ تا ۱۱ قرار گرفته و احتمال سقوط برای این بلوک‌ها، زیاد ارزیابی شده است. با استفاده از روش تجربی بیان‌شده، شدت سقوط نیز برای این

جدول ۵: ارزیابی شدت سقوط سنگ در بلوک‌های مستعد ناپایداری دیواره دولومیتی در زون‌های ۸ و ۱۳

ارزیابی شدت سقوط	E=m h ERC (Kj)	ERC	رده بی‌نظمی	شیب بلوک از پای پله	ارتفاع بلوک از پای پله (m)	وزن بلوک (kg)	حجم بلوک (m ³)	شماره بلوک
زیاد	۱۵۷۵-۱۰۸۳	۶,۱۰-۸,۸۷	خیلی زیاد	۵۰	۴۷	۳۷۸۰	۱,۴	۱-۸
زیاد	۵۶۵-۴۴۸	۷,۲۹-۹,۱۸	خیلی زیاد	۶۰	۵۷	۱۰۸۰	۰,۴	۲-۸
زیاد	۱۰۹۲-۸۹۷	۷,۴۹-۹,۱۱	زیاد	۶۵	۳۷	۳۲۴۰	۱,۲	۳-۸
زیاد	۳۰۵۳-۲۳۸۳	۶,۷۹-۸,۷۰	متوسط	۶۰	۲۶	۱۳۵۰۰	۵	۴-۸
متوسط تا زیاد	۱۷۹-۱۳۱	۶,۲۰-۸,۵۰	متوسط	۵۵	۲۵	۸۴۶	۰,۳۲	۵-۸
متوسط تا زیاد	۲۸۹-۱۹۱	۵,۵۴-۸,۳۸	متوسط	۵۰	۱۶	۲۱۶۰	۰,۸	۶-۸
کم تا متوسط	۱۳-۱۱	۷,۶۸-۸,۹۰	کم	۷۰	۱۱	۱۳۵	۰,۰۵	۷-۸
زیاد	۵۵۵۰-۴۸۰۷	۸,۰۲-۹,۲۶	زیاد	۷۰	۳۷	۱۶۲۰۰	۶	۱۳-۱
زیاد	۱۷۳۰-۱۴۲۶	۷,۳۴-۸,۹۰	متوسط	۶۵	۱۸	۱۰۸۰۰	۴	۱۳-۲
زیاد	۷۳۶-۴۸۵	۵,۲۹-۸,۰۲	کم	۵۰	۱۷	۵۴۰۰	۲	۱۳-۳

تعداد ۳ بلوک مشخص و ارزیابی گردیده است که هر ۳ بلوک در سطح خطر زیاد می‌باشد.

نتایج کلی ارزیابی سطح خطر بلوک‌های مشخص شده در زون‌های ۱ تا ۱۳ در جدول ۷ نشان داده شده است. در این جدول سطح خطر همراه با تعداد بلوک‌ها در هر زون تعیین گردیده است.

ارزیابی سطح خطر برای دیگر بلوک‌ها هم تعیین گردید ولی فقط نتایج ارزیابی سطح خطر سقوط سنگ در زون‌های ۸ و ۱۳ در جدول ۶ آورده شده است. در زون ۸، تعداد ۷ بلوک به روش مشاهده‌ای مشخص شد که پس از ارزیابی سطح خطر، مطابق با جدول ۶ تعداد ۴ بلوک با سطح خطر زیاد، ۲ بلوک با سطح خطر متوسط تا زیاد و ۱ بلوک با سطح خطر متوسط تشخیص داده شد. در زون ۱۳

جدول ۶: ارزیابی سطح خطر سقوط سنگ در زون‌های ۸ و ۱۳، دیواره دولومیتی معدن گلپینی ۷

زمان برداشت: بهمن ۹۹		نوع برداشت: مشاهده‌ای			
شماره بلوک	ارزیابی خطر سقوط سنگ			فاصله اولین برخورد از پای پله (m)	
	احتمال سقوط	شدت سقوط	سطح خطر		
۱-۸	زیاد	زیاد	زیاد	۲۹,۴۲	
۲-۸	زیاد	زیاد	زیاد	۳۰,۱۵	
۳-۸	زیاد	زیاد	زیاد	۱۴,۶۹	
۴-۸	زیاد	زیاد	زیاد	۷,۹۸	
۵-۸	زیاد	متوسط تا زیاد	متوسط تا زیاد	۷,۹۵	
۶-۸	زیاد	متوسط تا زیاد	متوسط تا زیاد	۵,۵۴	
۷-۸	زیاد	کم تا متوسط	متوسط	۲,۳۲	
۱۳-۱	زیاد	زیاد	زیاد	۱۲,۸۴	
۱۳-۲	زیاد	زیاد	زیاد	۵,۵۱	
۱۳-۳	زیاد	زیاد	زیاد	۴,۰۴	

نرم‌افزار مذکور توانایی محاسبه ارتفاع جهش، انرژی جنبشی، سرعت و نقطه توقف بلوک‌ها در طول مسیر حرکت را نیز دارد.

هندس شیب و جنس مواد تشکیل‌دهنده دامنه، مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده مسیر و نوع حرکت بلوک‌های در حال سقوط و فاصله نهایی آن‌ها از پای پله هستند. از دو پارامتر ضریب ارتجاعی و ضریب اصطکاک برای نشان دادن خواص مکانیکی مواد تشکیل‌دهنده دامنه استفاده می‌شود. ضریب ارتجاعی نشان‌دهنده کاهش انرژی قطعات در هنگام برخورد با سطح شیب است و رفتار قطعه سقوط کرده را پس از برخورد با شیب نشان می‌دهد. ضریب اصطکاک برای نشان دادن کاهش انرژی در هنگام غلطش یا لغزش به کار برده می‌شود. کاهش انرژی قطعات بر اثر تصادم یا غلطش تابعی از هندسه و خصوصیات ژئوتکنیکی شیب، ویژگی‌های مکانیکی، ژئومتری و دینامیک قطعات (سرعت انتقال، دوران و زاویه تصادم) و پوشش گیاهی می‌باشد. سطوح پوشیده از سنگ‌ریزه (خرده‌سنگ‌ها) مقدار چشم‌گیری از انرژی قطعه‌سنگ سقوط کرده را جذب می‌کند و در بسیاری از موارد موجب توقف آن می‌شوند؛ درحالی‌که سطوح تمیز سنگ‌های غیر هوازده مقدار کمتری از انرژی قطعه را جذب می‌کنند. قابلیت جذب انرژی قطعه‌سنگ توسط مواد سطح شیب به‌وسیله ضریب ارتجاعی بیان می‌شود که شامل دو مؤلفه مماسی R_t و نرمال R_n می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده توسط محققان نشان می‌دهد که دامنه تغییرات ضریب ارتجاعی نرمال برای بیشتر سنگ‌ها معمولاً بین ۰.۳ تا ۰.۵ و برای ضریب ارتجاعی مماسی بین ۰.۸ تا ۰.۹۵ است.

$$R_t = \frac{V_{rn}}{V_{in}} \quad \text{و} \quad R_n = \frac{V_{rt}}{V_{it}}$$

V_{rn} و V_{in} : مؤلفه‌های نرمال سرعت به ترتیب قبل و بعد از برخورد

V_{rt} و V_{it} : مؤلفه‌های مماسی سرعت به ترتیب قبل و بعد از برخورد

خصوصیات بلوک در حال سقوط شامل شرایط ابتدایی آن از قبیل نقطه جدایش، تعداد و جرم قطعات و سرعت اولیه است. قطعات سنگ در هنگام جدایش از توده اصلی دارای سرعت کمی هستند. پس از جدایش سرعت حرکت آن‌ها به‌طور ناگهانی افزایش چشم‌گیری می‌یابد. قطعاتی که

جدول ۷: وضعیت سطح خطر سقوط سنگ در زون‌های ۱ تا ۱۳، دیواره دولومیتی معدن گلبنی ۷

شماره زون	سطح خطر سقوط سنگ			
	کم	کم تا متوسط	متوسط تا زیاد	زیاد
تعداد بلوک				
۱	-	-	۲	-
۲	-	-	۱	۱
۳	-	-	۱	۱
۴	-	۱	۱	۱
۵	-	-	۲	۲
۶	-	-	۳	-
۷	-	-	۲	۱
۸	-	-	۲	۴
۹	-	-	۲	۲
۱۰	-	-	۱	-
۱۱	-	-	۳	۲
۱۲	-	-	۳	۱
۱۳	-	-	-	۳
جمع	۰	۱	۴	۱۸
مجموع بلوک‌های ارزیابی‌شده = ۴۶				
درصد	۰	۲	۹	۳۹

تغییر شرایط از قبیل افزایش ارتفاع سقوط سنگ با افزایش عمق معدن، شرایط هوازدهگی بلوک‌ها و تأثیر انفجار موجب تحریک بلوک‌های مستعد ریزش می‌شوند؛ بنابراین بایستی ارزیابی خطر سقوط سنگ به‌طور مداوم و با فواصل زمانی مشخص انجام گردد.

بیشتر بلوک‌های مستعد ناپایداری با افزایش عمق معدن در محدوده‌ی سطح خطر زیاد قرار گرفته و ناپایدار می‌شوند. لذا با توجه به شیب تند دیواره دولومیتی، افزایش ارتفاع دیواره، تأثیرات انفجار و هوازدهگی ناپیوستگی‌ها به‌مرورزمان، بایستی شناسایی و حذف بلوک‌های مستعد ناپایداری به‌صورت دوره‌ای و منظم انجام گردد.

۴- مدل‌سازی عددی سقوط سنگ با نرم‌افزار Rocfall و مقایسه نتایج آن با روش ERHA

از جمله نرم‌افزارهای دوبعدی که جهت مدل‌سازی سقوط سنگ استفاده می‌شود نرم‌افزار Rocfall است. Rocfall برنامه‌ای کامپیوتری مفیدی برای بررسی سقوط سنگ و تعیین مسیر حرکت بلوک‌ها است. علاوه بر این،

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به شرایط زمین‌شناسی دیواره کمرباطین (دولومیت) از جمله شیب و جهت شیب لایه‌بندی و جهت‌داری گسل‌ها، هندسه دیوار بلند از قبیل ارتفاع و شیب دیواره، ترک‌های کششی حاصل از انفجار و...، دیواره کمرباطین مستعد سقوط بلوک‌های سنگی می‌باشد. لذا جهت تحلیل پایداری کمرباطین از روش ارزیابی مشاهده‌ای خطر سقوط سنگ استفاده گردید. جهت ارزیابی خطر سقوط سنگ دیواره دولومیتی به ۱۳ زون برای بررسی مشاهده‌ای و برداشت داده تقسیم شد. پس از تحلیل نتایج، بلوک‌های ناپایدار با سطح خطر بالا شناسایی گردیدند.

مطابق نتایج به دست آمده هیچ بلوکی در سطح خطر کم قرار ندارد و تنها ۲ درصد بلوک‌های ارزیابی شده در سطح خطر کم تا متوسط هستند. ۹ درصد در سطح خطر متوسط، ۵۰ درصد در سطح خطر متوسط تا زیاد و ۳۹ درصد در سطح خطر زیاد قرار دارند.

بر اساس بررسی انجام‌شده، زون‌های ۱، ۶ و ۱۰ هیچ بلوکی با سطح خطر بالا ندارند. زون‌های ۲، ۳، ۴، ۷ و ۱۲ هرکدام تنها یک بلوک با سطح خطر زیاد و زون‌های ۵، ۹ و ۱۱ هرکدام دو بلوک با سطح خطر زیاد دارند. زون‌های ۸ و ۱۳ به ترتیب هرکدام چهار و سه بلوک با سطح خطر بالا دارند.

بر اساس روش تجربی ERHA، فاصله اولین برخورد بلوک از پای پله مربوط به بلوک‌های تشخیص داده‌شده در زون‌های ۸ و ۱۳ تعیین گردید

نتایج حاصل از مدل‌سازی مسیر سقوط سنگ توسط نرم‌افزار Rocfall مشابه روش تجربی ERHA می‌باشد. به‌طوری طبق نتایج حاصل از نرم‌افزار Rocfall در زون شماره ۸، فاصله سقوط بیشتر بلوک‌ها از پای پله تا حدود ۱۷ متر می‌باشد و طبق نتایج تجربی هم تا حدود ۱۵ متر و در دو مورد تا ۳۰ حدود متر می‌رسد که در مدل Rocfall هم مشاهده می‌شود. همچنین در زون شماره ۱۳، طبق مدل Rocfall بیشتر سقوط‌ها در فاصله ۱۰ متر و در روش تجربی تا حدود ۱۳ متر به دست آمده است. با توجه به مقایسه نتایج، روش تجربی می‌تواند یک روش سریع برای ارزیابی خطر سقوط سنگ مورد استفاده قرار گیرد.

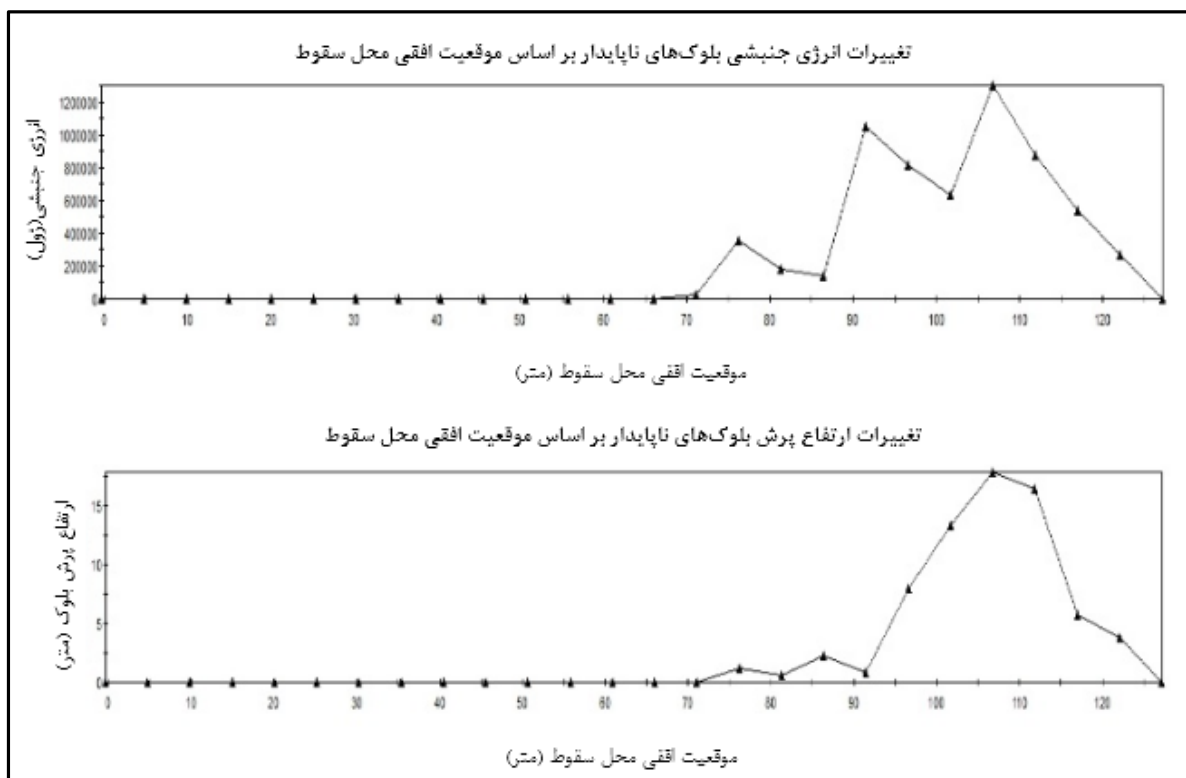
سطوح خطر محاسبه‌شده برای بلوک‌های مستعد ناپایداری، مختص این سطح از تراز ارتفاعی کف پیت معدن می‌باشد؛ بنابراین با پیشروی کف پیت معدن به عمق و افزایش ارتفاع دیواره بلند دولومیتی اکثر بلوک‌های مورد مطالعه در سطح خطر بالا قرار می‌گیرند. لذا ضروری است با مطالعه دوره‌ای وضعیت پایداری بلوک‌ها نسبت به کف نهایی پیت معدن ۷، اقدام به حذف بلوک‌های ناپایدار و پایداری‌سازی دیواره دولومیت معدن گلپینی ۷ گردد.

بر اثر زمین‌لرزه حرکت می‌کنند سرعت اولیه بیشتری دارند. در مدل‌های کامپیوتری سرعت اولیه بین ۰/۵ تا ۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. جهت بررسی مکانیزم سقوط سنگ و دستیابی به اطلاعات مورد نیاز از نحوه سقوط بلوک سنگ و طراحی راه‌کارهای مناسب برای کنترل خطر از مدل کامپیوتری Rocfall استفاده شد. این برنامه مدل دوبعدی است که تغییرات توپوگرافی و جنس مصالح تشکیل‌دهنده دامنه بسیار حساس است. به خاطر مقاومت بالای سنگ دولومیت، ضریب ارتجاعی نرمال و مماسی دیواره دولومیتی با استفاده از پیش‌فرض نرم‌افزار Rocfall و معادل سنگ سخت با سطح صاف در نظر گرفته شد. همچنین برای تعیین ضریب ارتجاعی سطوح شیلی، بوکسیت کف معدن و واحد شمشک از تحقیقات گذشته استفاده گردید (جدول ۸).

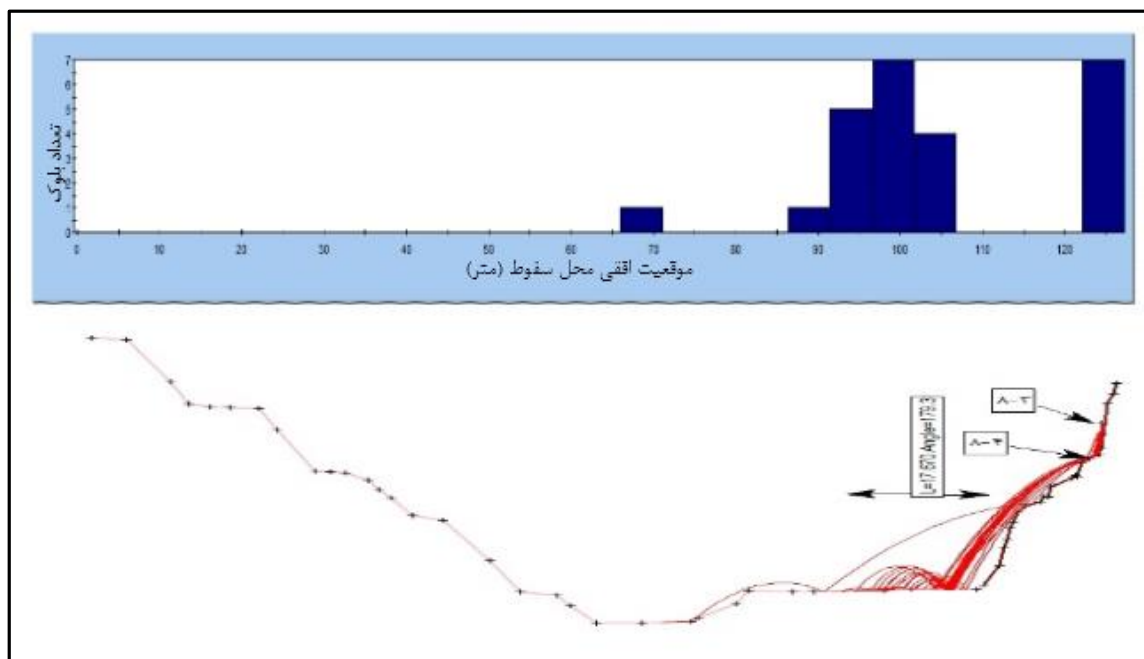
جدول ۸: ضرایب ارتجاعی نرمال و مماسی دیواره دولومیت و کف معدن شامل شیل و بوکسیت و واحد شمشک

پارامتر	دولومیت	کف معدن
ضریب ارتجاعی نرمال	۰/۵	۰/۳۱۵
انحراف معیار	۰	۰/۰۶۴
ضریب ارتجاعی مماسی	۰/۹۵	۰/۷۱۲
انحراف معیار	۰	۰/۱۱۶
زاویه اصطکاک داخلی	۶۲	۳۵

مدل‌سازی سقوط سنگ با نرم‌افزار Rocfall برای برخی از بلوک‌های با سطح خطر بالا که در زون‌های ۸ و ۱۳ قرار گرفته‌اند، انجام شد. سپس نتایج آن با روش ERHA مقایسه شد. شکل‌های ۸ تا ۱۱ بیانگر نتایج حاصل از مدل‌سازی بلوک‌های ناپایدار شناسایی‌شده در زون‌های ۸ و ۱۳ می‌باشند که شامل مسیر سقوط بلوک، ارتفاع جهش، فاصله نهایی آن از پای دامنه و انرژی جنبشی است و به‌صورت گراف‌هایی ارائه می‌شوند. نتایج حاصل از مدل‌سازی مسیر سقوط سنگ توسط نرم‌افزار Rocfall مشابه روش تجربی ERHA می‌باشد. به‌طوری طبق نتایج حاصل از نرم‌افزار Rocfall در زون شماره ۸، فاصله سقوط بیشتر بلوک‌ها از پای پله تا حدود ۱۷ متر می‌باشد و طبق نتایج تجربی هم از یک متر تا حدود ۱۵ متر و در دو مورد تا ۳۰ حدود متر می‌رسد که در مدل Rocfall هم مشاهده می‌شود. همچنین در زون شماره ۱۳، طبق مدل Rocfall بیشتر سقوط‌ها در فاصله ۱۰ متر و در روش تجربی از یک متر تا حدود ۱۳ متر به دست آمده است.

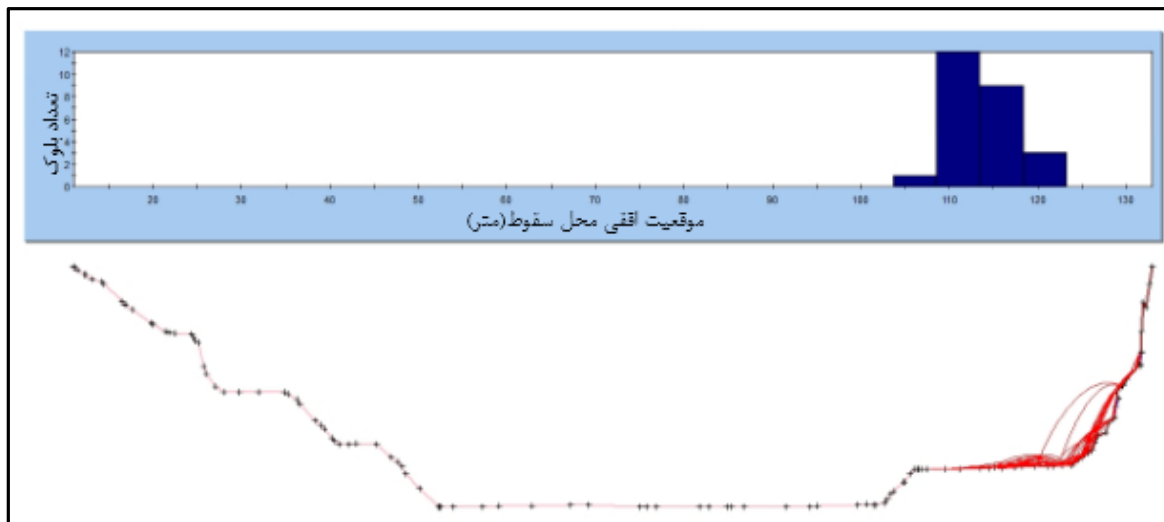


شکل ۸: شبیه‌سازی مقادیر انرژی جنبشی و ارتفاع پرش بلوک‌های ناپایدار زون ۸ بر اساس موقعیت افقی محل سقوط





شکل ۱۰: شبیه‌سازی مقادیر انرژی جنبشی و ارتفاع پرش بلوک‌های ناپایدار زون ۱۳ بر اساس موقعیت افقی محل سقوط



شکل ۱۱: شبیه‌سازی مسیر سقوط بلوک‌های ناپایدار شناسایی‌شده در زون ۱۳ توسط نرم‌افزار Rocfall

مراجع

Methods in Open Pit Mining Activities", International journal of scientific & technology research, Vol. 10, Issue 02, 2021.

[4] A. Volkwein¹, K. Schellenberg, V. Labiouse, F. Agliardi, F. Berger, F. Bourrier, L. K. A. Dorren, W. Gerber¹, and M. Jaboyedoff, "Rockfall characterisation and structural protection – a review", Natural Hazards and Earth System Sciences, 2011.

[1] B. H. G. Brady, E. T. Brown, "Rock Mechanics for underground mining", KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, Third edition, 2004.

[2] Duncan C. Wyllie, Christopher W. Mah, "Rock Slope Engineering ", Spon Press, First published, 1974.

[3] Mohammed Mnzool Mohammed, "A Review on Slope Monitoring and Application

- [8] Lana Milene Sabino, "Numerical modeling of failure mechanisms in phyllite mine slopes in Brazil", International Journal of Mining Science and Technology, 2014.
- [9] Tatiana Barreto dos Santos, Milene Sabino Lana, Tiago Martins Pereira, Ismet Canbulat, "Quantitative hazard assessment system (Has-Q) for open pit mine slopes", International Journal of Mining Science and Technology, 2019.
- [10] Paolo Budetta, "Application of the Swiss Federal guidelines on rock fall hazard: a case study in the Cilento region (Southern Italy)", Landslides, 2011.
- [5] S. zamani, M. Ghafari, GH. Lashkaripur, "Rockfall mechanism, map of hazard zone and Necessary solutions in Yadak village", Journal of Engineering Geology, 2011, (In Persian)
- [6] F. Ferrari, A. Giacomini, K. Thoeni, C. Lambert, "Qualitative evolving rockfall hazard assessment for highwalls", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2017.
- [7] Neil Bar, Michael Kostadinovski, Michael Tucker, Glen Byng, Rully Rachmatullah, Arturo Maldonado, Markus Pötsch, Andreas Gaich, Alison McQuillan, Thamer Yacou, "Rapid and robust slope failure appraisal using aerial photogrammetry and 3D slope stability models", International Journal of Mining Science and Technology, 2020.

¹ Ferrari et al

² Evolving Rockfall Hazard Assessment

³ Lana & Milene Sabino

⁴ Neil Bar et al

⁵ Swiss Federal Guidelines

⁶ Energy regression coefficient

⁷ Distance regression Coefficient