

## برآورد خردشوندگی سنگ از دیدگاه هندسی

عنایت الله امامی میبیدی<sup>۱</sup>، سید محمد اسماعیل جلالی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود

(دریافت: بهمن ۱۳۹۳، پذیرش: مهر ۱۳۹۴)

### چکیده

تخریب پذیری و خردشوندگی توده سنگ در روش‌های تخریبی دارای سه مرحله خردشوندگی برجا، اولیه و ثانویه است. خردشوندگی برجا ناشی از درزه‌های بالفعل موجود در توده سنگ با مقاومت کششی صفر است. اما خردشوندگی اولیه و ثانویه، ناشی از خردشدن بلوک‌های سنگی به ظاهر بدون درزه است. در این بلوک‌ها سطوح ضعف از جمله پل‌های سنگی، رگچه‌ها، سطوح تورق و غیره گزینه‌های اصلی برای جدایش و شکست در اثر تنش‌های القایی ایجاد شده، هستند. بنابراین لازم است فراوانی و پراکندگی این سطوح در توده سنگ با استفاده از روش‌هایی شبیه برداشت ناپیوستگی‌های بالفعل، قابل برداشت باشد. هدف، طراحی روشی است تا میزان دقت تشخیص درزه‌های بالقوه به صورت چشمی مشخص شود و در مرحله بعد بر مبنای انرژی لازم برای شکست، این ناپیوستگی‌ها تفکیک و دسته‌بندی شود. با طراحی و اجرای یک روش جدید، درزه‌های موجود در یک بلوک سنگی از دیدگاه هندسی تقسیم‌بندی و کمی‌سازی شد، نمونه‌های موزاییکی به ابعاد تقریبی ۶۰×۶۰ و ضخامت تقریبی ۳/۵ سانتی‌متری از تعدادی بلوک سنگی از یک نوع تهیه شد. سپس به صورت چشمی براساس یک سری از شاخص‌ها از قبیل گسترش، بازشدگی و جهت غالب، سطوح ضعف بالقوه بر روی نمونه‌ها قبل از شکست مشخص و علامت‌گذاری شد. پس از شکست نمونه میزان درستی تشخیص درزه‌های بالقوه، کنترل شده و براساس سطح انرژی مورد نیاز برای شکست تقسیم‌بندی صورت گرفت. آن بخش از درزه‌ها که پتانسیل بودن به صورت ناپیوستگی را دارند اما به صورت برجا ناپیوستگی به شمار نمی‌آیند، به عنوان ناپیوستگی نوع ۲ در نظر گرفته شد و درزه‌هایی که پس از جابجایی بزرگ مقیاس به وجود می‌آیند، نوع ۳ دسته‌بندی شد.

### واژگان کلیدی

خردشوندگی، روش‌های استخراج تخریبی، درزه‌های بالقوه، درزه‌های بالفعل، درزه‌های نوع ۲ و ۳

### ارجاع به این مقاله:

امامی میبیدی، ع.، جلالی، م.، (۱۳۹۴)، برآورد خردشوندگی سنگ از دیدگاه هندسی، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، (۹)، ۵۱-۶۱.  
[http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565\(15\)940915-X](http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565(15)940915-X)

## ۱- مقدمه

به طور کلی سه سطح خردشوندگی در روش های تخریبی تعریف شده است که عبارتند از: خردشوندگی برجا، اولیه و ثانویه [۷، ۸].

الف) خردشوندگی برجا<sup>۱</sup>: بلوک هایی که به طور طبیعی قبل از شروع عملیات معدنکاری در توده سنگ وجود دارند. این خردشوندگی بوسیله درزه هایی که از قبل موجود بودند، شکل می گیرد.

ب) خردشوندگی اولیه<sup>۲</sup>: به محض ایجاد زیربرش و شروع عملیات تخریب بلوک های همسایگی فضای تخریب که از فضا جدا شده اند، خردایش اولیه شکل می گیرد.

ج) خردشوندگی ثانویه<sup>۳</sup>: این خردایش در طول مسیر از زمان جدا شدن سنگ از سطح تخریب و عبور از ستون تخلیه تا خروج از دهانه تخلیه رخ می دهد.

خردشوندگی برجا ناشی از درزه های بالفعل موجود در توده سنگ با مقاومت کششی صفر است. اما خردشوندگی اولیه و ثانویه، ناشی از خرد شدن بلوک های سنگی بظاهر بدون درزه است. در این بلوک ها سطوح ضعف از جمله پل های سنگی، رگچه ها، سطوح تورق و غیره گزینه های اصلی برای جدایش و شکست در اثر تنش های القایی ایجاد شده پس از ایجاد زیربرش و ضربه و تنش ناشی از سقوط و انتقال در طول ستون تخلیه هستند.

با توجه به این که توده سنگ محیطی غیرهمگن<sup>۴</sup> و ناهمسانگرد<sup>۵</sup> است، ویژگی های هندسی درزه ها در دو نقطه مختلف ممکن است مقادیر متفاوتی را نشان دهند. بنابراین ویژگی های درزه ها باید با ماهیت تصادفی تعریف شوند [۹]. پارامترهای تصادفی درزه ها از اندازه گیری های میدانی و تحلیل های آماری به دست می آیند. پیشرفت های چشم گیر در جمع آوری و روش های پردازش اطلاعات در سال های اخیر این امکان را فراهم نموده که بتوان حجم زیادی از اطلاعات با کیفیت بالا را از رخنمون های توده سنگ به دست آورد. لذا این امکان فراهم می شود که بر اساس اطلاعات آماری جمع آوری شده، ویژگی های توده سنگ با کیفیت بهتری تعیین شوند.

در مقیاس توده سنگ روش های مختلفی برای تعیین توزیع درزه ها (از لحاظ ابعاد، جهت داری، شدت و ..) و مدلسازی آنها وجود دارد. که این بخش رامی توان بیشتر در ارتباط با خردشوندگی برجای توده سنگ در نظر گرفت.

توده سنگ از دو جزء سنگ سالم و ناپیوستگی تشکیل شده که هر کدام اثری متفاوت بر مقاومت آن می گذارند. در اکثر موارد ویژگی های ناپیوستگی ها رفتار کلی توده سنگ را کنترل می کنند. تعریف دقیق ساختار توده سنگ نقطه شروع بهتری را برای مدلسازی و تعیین مقاومت توده سنگ فراهم می کند [۱]. در بسیاری از شیوه های مدلسازی توده سنگ، درزه ها با استفاده از بعضی فرض های غیرواقعی ساده سازی می شوند. برای مثال فرض درزه های بی نهایت که معمولاً در مدلسازی ها بکار می رود، ویژگی ای است که با شرایط واقعی و طبیعی توده سنگ تطابق ندارد [۲]. همچنین معمولاً پیش فرض هایی در مورد قطعی بودن ویژگی های درزه، تعداد بسیار کم درزه ها، استقلال درزه ها، احتمال رخداد یکسان و یکنواخت در توده سنگ و غیره در نظر گرفته می شوند.

اهمیت خصوصیات هندسی ناپیوستگی های توده سنگ در برآورد پارامترهای مقاومتی آن از دهه های هفتاد میلادی در میان محققان شناخته شده است [۳، ۴]. درزه ها متداول ترین نوع ناپیوستگی ها در میان ناپیوستگی های توده سنگ هستند. لذا ارزیابی ویژگی های درزه ها بخش مهمی از مهندسی توده سنگ را تشکیل می دهد [۵].

به دلیل اینکه هزینه های تولید در معادن بزرگ - از قبیل کانسارهای آهن توده ای و مس پرفیری با ذخایر قابل توجه - به شیوه روباز با عمیق تر شدن آنها به شدت افزایش می یابد، لذا ضرورت کم کردن این هزینه ها با تغییر در شیوه استخراج آنها از دیرباز مورد توجه بوده است. از جمله شیوه های موجود می توان، شیوه های تخریب بلوکی و تخریب طبقات فرعی را نام برد. هم اکنون در کشورهای پیشرفته ای صنعتی تمایل برای استفاده از روش تخریبی در کانسارهای سخت تر از آنچه در گذشته با این روش مورد استخراج قرار می گرفته، وجود دارد. همواره در این روش به خصوص برای کانسارهای سخت تر، چالش تخریب پذیری مطرح بوده است و یکی از مهم ترین عوامل تأثیرگذار بر میزان تخریب پذیری در کانسارهای سخت، سیستم ناپیوستگی های آن است [۶].

ب- درزه‌ها: در اثر تغییر شکل‌های تکتونیکی ایجاد شده و اغلب از الگوی خاصی پیروی می‌کنند و می‌توان براساس جهت یافتگی آنها را دسته‌بندی کرد.

ج- ترک‌ها: در اثر تغییر شکل‌های ایجاد شده توسط انسان مانند انفجار و یا در اثر تغییر شکل‌های ژئومورفولوژیکی مانند وقوع زمین‌لغزش‌ها یا خزش، به‌وجود آمده و عموماً از الگوی خاص و قابل تعریفی پیروی نمی‌کنند.

د- گسل‌ها و مناطق برشی: در اثر تغییر شکل‌های ناشی از تکتونیک، ژئومورفولوژی و یا عوامل انسانی به‌وجود آمده‌اند و دارای حرکات برشی در دو سمت صفحات برشی هستند. لایه‌بندی، شیستوزیته، صفحات تورق و درزه‌ها به‌طور طبیعی از ویژگی‌های بوقوع پیوسته‌ای هستند که در فواصل منظمی رخ داده‌اند و دارای جهت‌ها و ویژگی‌های مشابه هستند.

درزه‌های دارای مقاومت کششی ناچیز و یا نزدیک به صفر، به‌عنوان ناپیوستگی‌های بالفعل یا نوع ۱ معرفی خواهند شد. سطوح پل سنگی، ناپیوستگی‌های پرشده و جوش خورده و سطوح ضعف سنگ از جمله شیستوزیته و تورق (و به‌طور کلی سطوح ضعف دارای مقاومت کششی) به‌عنوان ناپیوستگی‌های بالقوه در نظر گرفته می‌شوند که از این دسته آن بخش از درزه‌ها که پتانسیل بودن به صورت یک ناپیوستگی را دارند اما به صورت برجا ناپیوستگی به شمار نمی‌آیند، به عنوان ناپیوستگی نوع ۲ در نظر گرفته خواهد شد و درزه‌هایی که پس از جابجایی بزرگ مقیاس بوجود می‌آیند نوع ۳ خواهد بود. بخش عمده‌ای از اطلاعات ناپیوستگی‌های بالقوه از طریق مشاهدات عینی در هنگام برداشت میدانی و از طریق گمانه‌های ژئوتکنیکی به دست خواهد آمد.

### ۳- شرح روش کمی سازی درزه‌ها

به طور کلی نوع شکست به دو عامل سطح بارگذاری و سطح شکست برمی‌گردد. در روش کمی سازی سعی شده تا سطح و شیوه بارگذاری برای نمونه‌ها یکسان باشد. پس از تهیه نمونه‌ها که به تفصیل توضیح داده شده است، براساس یکسری از شاخص‌ها سطوح ضعف بر روی نمونه‌ها قبل از شکست مشخص شده و علامت‌گذاری می‌شود. این شاخص‌ها عبارتند از: ۱- گسترش ۲- بازشدگی ۳- جهت غالب سطوح ضعف مشاهده شده، پس از شکست نمونه

آنچه در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است، ارائه روشی برای تعیین پتانسیل‌های خردشوندگی اولیه و ثانویه در توده‌سنگ و یا یک بلوک سنگی مجزاست. با این فرض که یک سری از سطوح ضعف بالقوه از جمله، جوش‌خورگی‌ها، رگچه‌ها و ... در درون ماده سنگ وجود دارد که اغلب در نگاه اول قابل مشاهده نیستند و بطور مستقیم برداشت نخواهند شد ولی بیشترین تاثیر را در تخریب‌پذیری و خردشوندگی اولیه و ثانویه توده‌سنگ در روش‌های استخراج تخریبی خواهند داشت.

### ۲- تقسیم‌بندی انواع ناپیوستگی‌ها

اکثر سنگ‌ها اساساً موادی شکسته هستند ناپیوستگی عبارت است از سطح وضعی در توده‌سنگ که ساختار مواد در طول آن دچار جدایش شده است. یا به عبارت دیگر بطور کلی اصطلاح ناپیوستگی به هرگونه جدایش در ماده سنگ اطلاق می‌شود که دارای مقاومت کششی صفر بوده و این اصطلاح بدون توجه به چگونگی ایجاد آن، استفاده می‌شود. ناپیوستگی‌ها از نظر اندازه از یک ریز ترک شروع شده و به یک گسل بزرگ ختم می‌شوند. از انواع دیگر ناپیوستگی‌ها می‌توان سطوح تورق در سنگ‌های دگرگونی و سطوح لایه‌بندی در سنگ‌های رسوبی نام برد. ناپیوستگی‌ها براساس نوع و چگونگی تشکیل به دو گروه عمده طبقه‌بندی می‌شوند [۱۰]:

#### ۲-۱- ناپیوستگی‌های جدا نشده (کامل)

آن دسته از ناپیوستگی‌هایی که در اثر حرکت و هوازدگی، هنوز در حال باز شدن هستند. این ناپیوستگی‌ها هنوز مقدار کمی مقاومت کششی و چسبندگی دارند. از این نوع ناپیوستگی‌ها می‌توان صفحات لایه‌بندی بکر، صفحات تورق و ناپیوستگی‌های شدیداً سیمانی شده را نام برد.

#### ۲-۲- ناپیوستگی‌های مکانیکی

ناپیوستگی‌هایی که در اثر تنش‌ها و هوازدگی باز شده‌اند و دارای مقاومت کششی ناچیز هستند و تولید مقاومت برشی نمی‌کنند. این نوع به دسته‌های زیر تقسیم بندی می‌شوند:

الف- لایه‌بندی: شیستوزیته و یا صفحات تورق: از طریق تغییر در نوع آرایش مواد یا کانی‌ها در سنگ ایجاد می‌شود.



شکل ۲: سطح ماسه بادامی تسطیح شده به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر

با توجه به وزن نمونه و ارتفاع رها شدن آن، میزان انرژی وارد شده به نمونه محاسبه شد. این عمل برای تکه‌های هر نمونه تا ارتفاع ۲۰۰ و یا ۲۲۰ سانتیمتری تکرار گردید (شکل ۴).

در هر مرحله از آزمایش با ثبت ارتفاع شکست روی نمونه‌ها عکس تهیه گردید تا امکان تحلیل نتایج به دست آمده فراهم شود.

#### ۴- محاسبه انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها

با داشتن ارتفاع شکست و وزن نمونه مورد نظر می‌توان از رابطه (۱) انرژی لازم برای شکست نمونه را محاسبه نمود.

$$E = mgh \quad (1)$$

بطوریکه  $m$  جرم نمونه،  $g$  شتاب ثقل و  $h$  ارتفاع شکست نمونه و  $E$  مقدار انرژی مورد نیاز برحسب نیوتن متر است. به عنوان مثال اطلاعات و توضیحات مربوط به نمونه شماره ۶ از بین چهارده نمونه آماده شده در ذیل ارائه شده است:

نخست جرم نمونه اندازه‌گیری و سطوح ضعف بر مبنای روی آن مشخص شده است (شکل ۵).

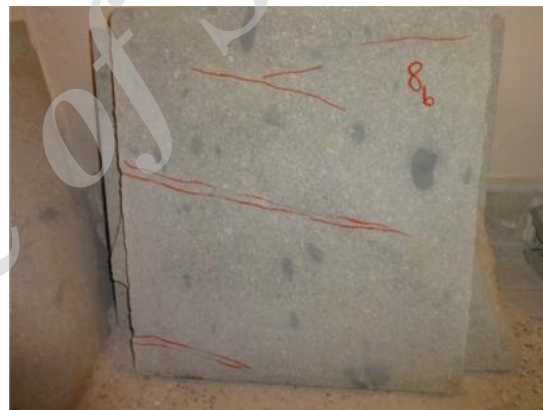
مرحله اول: جرم نمونه ۱۴ کیلوگرم و اولین ارتفاع شکست ۱۰۰ سانتیمتر است. سنگ به دو قسمت تقسیم شده است. چنانچه مشاهده می‌شود سطح شکست به موازات سطح ضعف پیش‌بینی شده بوده است (شکل ۶).

میزان درستی تشخیص درزه‌های بالقوه کنترل شده و براساس سطح انرژی مورد نیاز برای شکست تقسیم‌بندی خواهد شد.

#### ۳-۱- نمونه برداری و تولید نمونه‌های مورد نیاز

تعدادی بلوک سنگی از یک نوع سنگ به ابعاد کمینه  $60 \times 60 \times 60$  سانتیمتر تهیه گردید. سپس با استفاده از دستگاه‌های سنگ‌بری حداقل ۱۴ موزاییک به ابعاد تقریبی  $60 \times 60$  و ضخامت تقریبی  $3/5$  سانتی‌متری ایجاد شد.

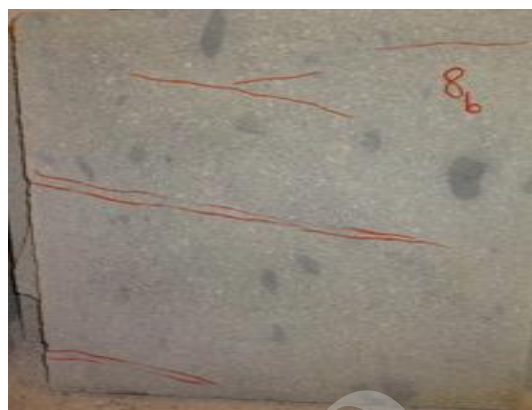
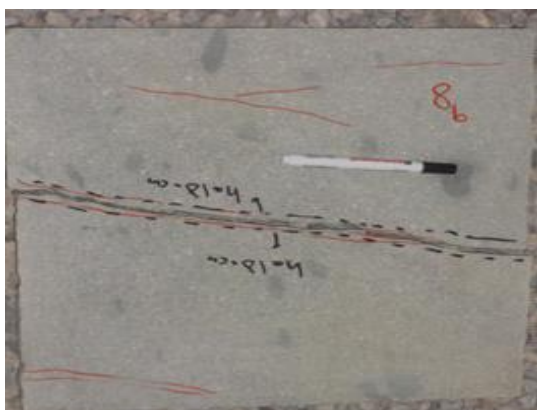
پس از اتمام مرحله نمونه‌گیری و تهیه نمونه‌های موزاییکی روی هر نمونه به صورت چشمی براساس شاخص‌های ذکر شده، سطوح ضعف بوسیله رنگ علامت‌گذاری شد (شکل ۱)، تا پس از شکسته شدن نمونه‌ها میزان درستی برآورد سطوح ضعف و امتداد آن مشخص گردد.



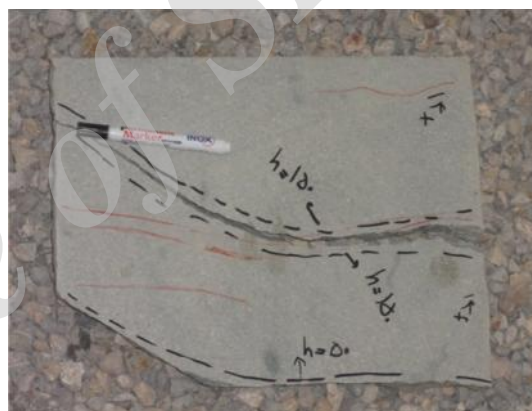
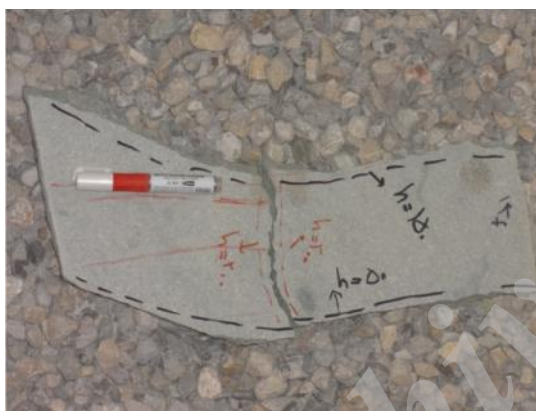
شکل ۱: نمونه‌ای از علامت‌گذاری سطوح ضعف با رنگ قبل از آزمایش شکست

#### ۳-۲- طراحی روش آزمایش

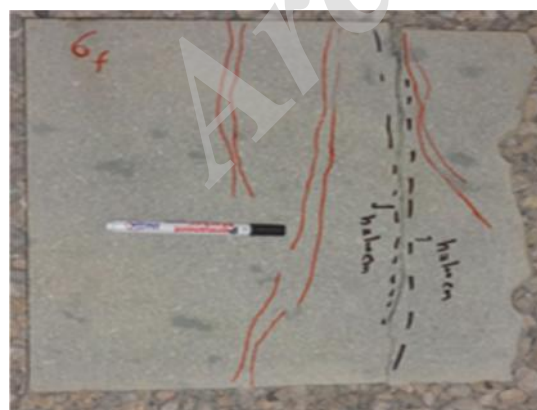
سطح زمین با ماسه بادامی به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر کاملاً تسطیح شده است (شکل ۲). سپس نمونه‌های موزاییکی از روی یک پایه قابل تنظیم در ارتفاع‌های مختلف به صورت کاملاً افقی تحت نیروی جاذبه رها شده و پس از برخورد با سطح ماسه‌ای و شکسته شدن، آن سطوح با سطوح ضعیفی که از قبل تشخیص داده شده بود مقایسه شد (شکل ۳). نمونه‌های شکسته نشده از ارتفاع بالاتری رها شد تا بشکند. ارتفاع رها شدن نمونه به صورت دستی قابل تنظیم و افزایش است.



شکل ۳: نمونه شماره ۸ و سطح ضعف مشخص شده در شکل سمت راست و سطح ایجاد شده پس از سقوط از ارتفاع ۱۵۰ سانتی‌متری شکل سمت چپ

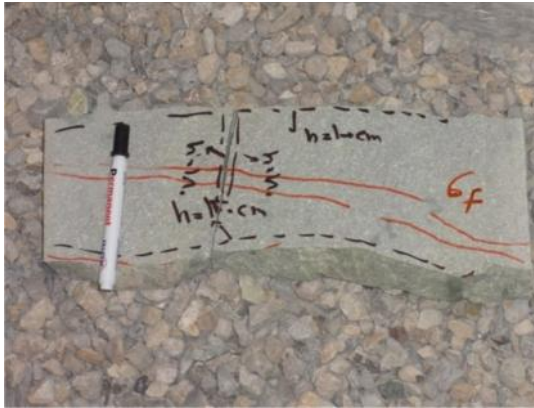


شکل ۴: نمونه شماره ۱۴ و سطوح شکست ایجاد شده در ارتفاع ۱۵۰ سانتی‌متری شکل سمت راست و ارتفاع ۲۰۰ سانتی‌متری شکل سمت چپ



شکل ۶: تعیین سطح شکست و مشخص نمودن ارتفاع رها سازی روی سطح شکست

شکل ۵: مشخص کردن سطوح ضعف روی سطح نمونه قبل از شکست



شکل ۹: تکرار آزمایش برای نمونه ۴/۵ کیلوگرمی (ارتفاع شکست ۱۸۰ سانتی‌متر)

محاسبات مربوط به انرژی شکست در جدول ۱ ارائه شده است، از مجموع چهار نمونه تست شده ردیف‌های ۱ و ۳ قابل قبول هستند، چراکه طبق بررسی‌های انجام شده در مورد دوم و چهارم همان‌گونه که قبلاً ذکر شد به علت نسبت طول به عرض زیاد نمونه‌ها، شکست از روی ماده سنگ و عمود بر سطوح ضعف پیش‌بینی شده بوده است.

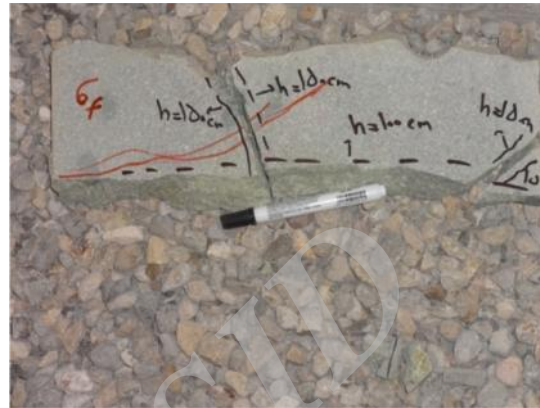
جدول ۱: نمونه‌ای از داده‌های ثبت شده از آزمایش

جرم (کیلوگرم)	ارتفاع (متر)	انرژی شکست (E) (نیوتن متر)
۱۴	۱	۱۴۰
۴	۱/۵	۶۰
۱۰	۱/۴	۱۴۰
۴/۵	۱/۸	۸۱

## ۵- تحلیل آماری فرآیند خردشوندگی

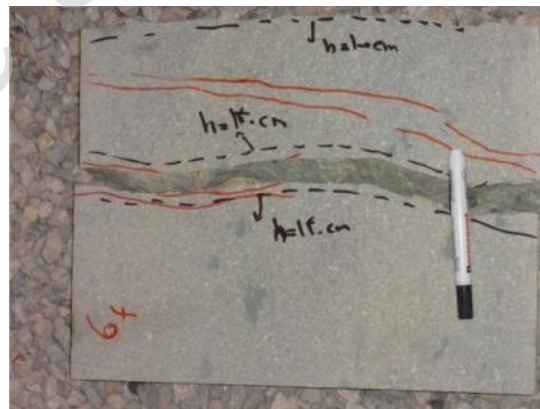
مشابه فرآیند بالا برای ۱۴ نمونه آماده شده از یک نوع گرانیت پرفیری، آزمایش تکرار شد و پس از تعیین شکست صحیح از روی سطوح ضعف، داده‌های مربوطه بوسیله نرم افزار آماری Minitab [۱۱] مورد تحلیل آماری قرار گرفت. در این نمونه‌ها از ۳۲ حالت شکست، ۲۴ حالت صحیح و از روی سطوح ضعف بوده است. با استفاده از داده‌های این ۲۴ حالت نمودار فراوانی انرژی‌های لازم برای شکست رسم شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در این مورد

مرحله دوم: در ارتفاع ۱۵۰ سانتیمتری قسمت اول که جرمی در حدود ۴ کیلوگرم داشت از روی ماده سنگ و عمود بر سطح ضعف شکسته شده که دلیل آن نسبت طول به عرض تقریباً چهار برابری بوده است (شکل ۷).



شکل ۷: تکرار آزمایش برای تکه کوچک ۴ کیلوگرمی

مرحله سوم: قسمت دوم نمونه شماره ۶ که حدود ۱۰ کیلوگرم بود در ارتفاع ۱۴۰ سانتیمتری از روی سطح ضعف پیش‌بینی شده به دو قسمت تقسیم شده است (شکل ۸).

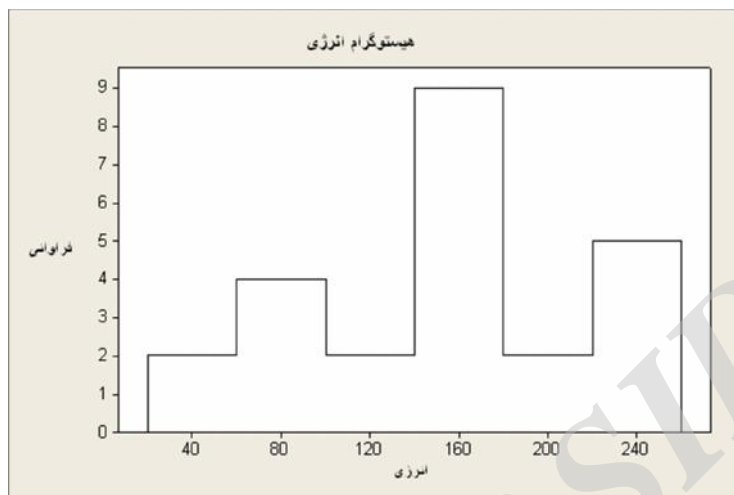


شکل ۸: تکرار آزمایش برای تکه بزرگ ۱۰ کیلوگرمی

مرحله چهارم: دو تکه ایجاد شده در مرحله سوم تا ارتفاع ۲۰۰ سانتی‌متری تست شدند که یکی از آنها به جرم ۴/۵ کیلوگرم در ارتفاع ۱۸۰ سانتی‌متری از روی ماده سنگ و عمود بر سطح ضعف شکسته شد (شکل ۹). که دلیل آن را می‌توان نسبت طول به عرض زیاد این بخش دانست.

شکل ۱۰ هیستوگرام فراوانی انرژی‌های لازم برای شکست و خردشوندگی از روی سطوح ضعف را نشان می‌دهد.

۷۵٪ از شکست‌های ایجاد شده از روی سطوح ضعف پیش‌بینی شده و یا به موازات آنها بوده است.



شکل ۱۰: هیستوگرام فراوانی انرژی‌های لازم برای شکست

این نمودار در ۹۵ درصد سطح اطمینان ترسیم شده و با استفاده از آزمون اندرسون دارلینگ ( $AD$ ) نرمال بودن آن تایید شده است، طبق این آزمون هرگاه مقدار  $P-p$  ( $Value$ ) از  $0/005$  بزرگتر باشد تابع توزیع داده‌ها نرمال است. نمودار دیگری در سطح اطمینان  $60\%$  نیز ترسیم شد برای مقایسه هر دو نمودار در شکل ۱۲ ارائه شده است.

از مقایسه دو نمودار می‌توان به این نتیجه رسید که مولفه‌های بخش میانی نمودار (انرژی  $109$  تا  $184$  نیوتن-متر) در سطح اطمینان  $60\%$  نیز تفاوت چندانی با سطح اطمینان  $95\%$  ندارد و تقریباً تمامی داده‌های سطوح ضعف در این بازه از انرژی، در سطح اطمینان پایین‌تر نیز وجود دارند و پراکندگی بسیار کمی دارند. در شکل ۱۳ انرژی لازم برای ایجاد سطح شکست در بخش‌های مختلف نشان داده شده است.

بخش صفر نمودار تقریباً درزه‌های نوع یک هستند به این علت که جوش خوردگی آنها بسیار ضعیف و دارای مقاومت کششی نزدیک به صفر بود که با کوچک‌ترین تنش یا جابجایی سطوح درزه کاملاً از یکدیگر جدا می‌شد.

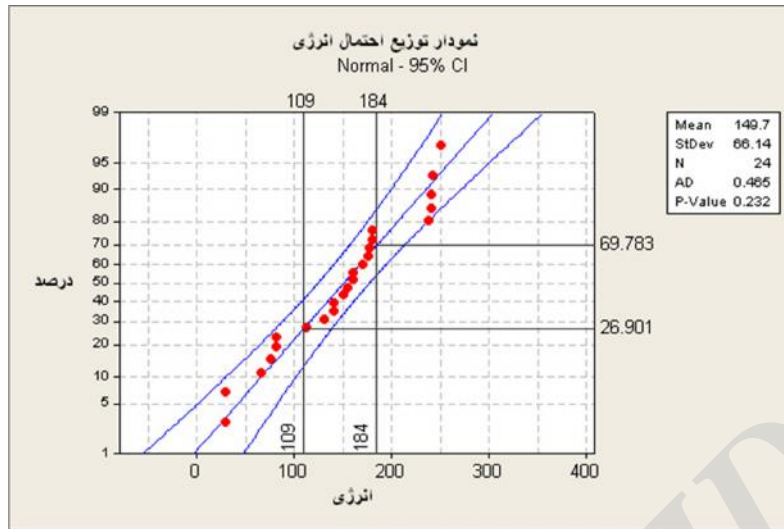
بخش یک شامل اطلاعات مربوط به سطوح ضعف ممتد و قابل رویت و با بازشدگی بسیار کم (کمتر از یک میلی‌متر) است.

همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، سه بخش مجزا با فراوانی نسبی بالاتر مشخص است. اولین پیک فراوانی با متوسط انرژی  $80$  نیوتن متر مربوط به سطوح ضعف مشخص با بازشدگی تا یک میلی‌متر و با گسترش سرتاسری روی نمونه‌ها است. این بخش حدود  $16\%$  از کل مجموعه شکست از روی سطوح ضعف را به خود اختصاص می‌دهد.

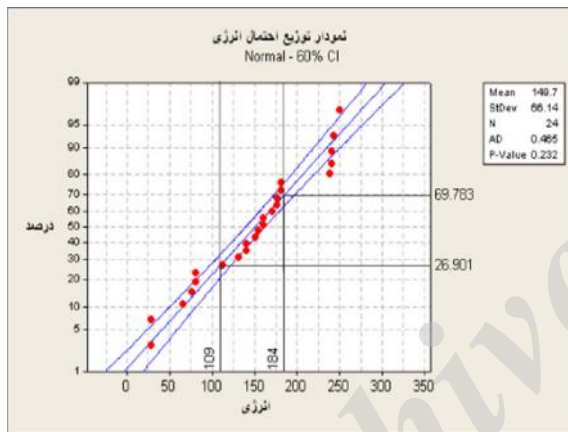
بخش دوم دارای بیشترین درصد فراوانی در حدود  $36\%$  از کل است. میانگین انرژی مصرفی برای تولید شکست از روی این نوع سطوح ضعف حدود  $160$  نیوتن متر است. مشخصه اصلی این نوع ناپیوستگی‌ها بازشدگی بسیار کم و یا بدون بازشدگی بودن آنهاست، همچنین گسترش آنها به صورت منقطع است.

بخش سوم دارای  $20\%$  فراوانی است، متوسط انرژی لازم در این بخش حدود  $240$  نیوتن متر است. این نوع از ناپیوستگی‌ها تقریباً غیرقابل تشخیص هستند فقط سطوح شکست به موازات سطوح شکست قابل تشخیص در مراحل قبلی هستند.

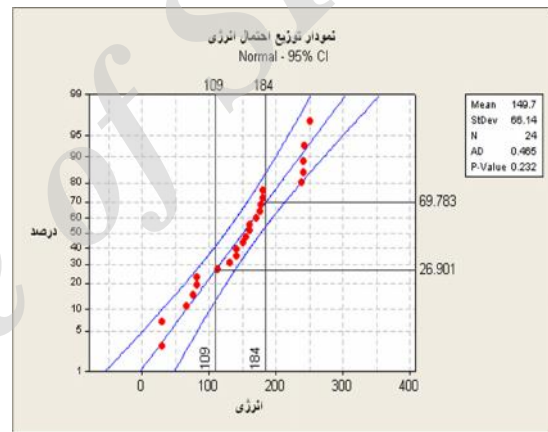
بیشترین تجمع داده‌ها در محدوده انرژی  $109$  تا  $184$  نیوتن متر واقع شده که همان‌گونه که در شکل ۱۱ در سطح اطمینان  $95$  درصد مشخص شده است حدود  $43\%$  است.



شکل ۱۱: نمودار تابع توزیع احتمال انرژی به صورت درصد

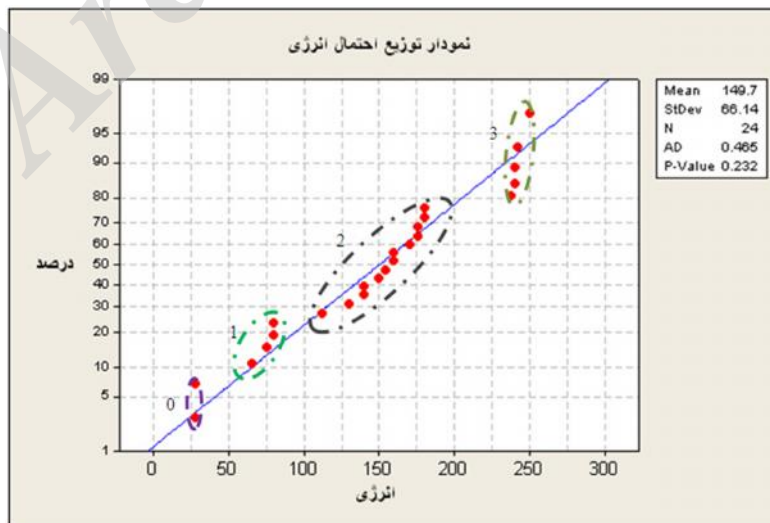


ب



الف

شکل ۱۲: الف) نمودار توزیع احتمال انرژی در سطح اطمینان ۹۵٪، ب) نمودار توزیع احتمال انرژی در سطح اطمینان ۶۰٪

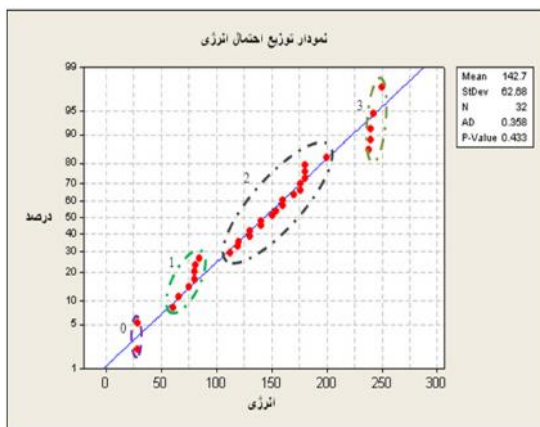


شکل ۱۳: نمودار توزیع احتمال انرژی شکست در سطوح ضعف با تعیین مناطق با بیشترین فراوانی



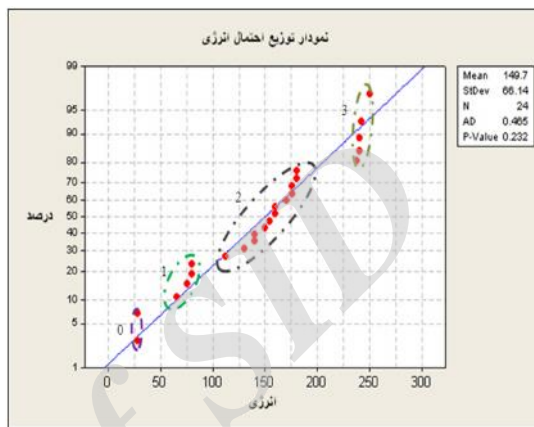
باریک در نمونه مشاهده می‌شد. در اکثر موارد پس از شکست، سطوح تشکیل شده به موازات سطوح ضعف مشخص شده از قبل بود.

شکل ۱۴ نمودارهای احتمال انرژی شکست برای دو حالت شکست از روی سطح ضعف و شکست از روی سطح ضعف و ماده سنگ را نشان می‌دهد.



بخش دوم که اکثریت سطوح ضعف داخل نمونه‌ها را تشکیل می‌دهد شامل سطوح ضعف غیر ممتد با بازشدگی صفر و به صورت جوش خورده با رنگی متفاوت در داخل نمونه قبل از شکست به چشم می‌خورد.

سطوح شکست مربوط به بخش سوم نمودار تقریباً غیرقابل تشخیص بود و گاهی به صورت رگچه‌های بسیار



شکل ۱۴: نمودار توزیع احتمال انرژی شکست الف) در سطوح ضعف (۲۴ حالت) ب) در سطوح ضعف و ماده سنگ (۳۲ حالت)

تعداد سطوح شکست در بخش‌های ۱ و ۲ برای حالتی که شکست از روی ماده سنگ نیز منظور شده است، بیشتر شده است. این افزایش حدود ۳۰٪ بوده. به عبارت دیگر می‌توان گفت در مجموع در بخش‌های ۱ و ۲، حدود ۷۰٪ شکست از روی سطوح ضعف پیش‌بینی شده و ۳۰٪ از روی ماده سنگ بوده است.

دلیل این امر را با بررسی‌های انجام شده می‌توان اینگونه شرح داد: پس از ایجاد شکست از روی سطوح ضعف پیش‌بینی شده، در حدود ۳۰٪ از موارد، قطعات نواری شکلی با نسبت طول به عرض بالا (بیشتر از ۲/۵) تشکیل می‌شود که با تکرار آزمایش با این قطعات در سطوح با ارتفاع بالاتر - همان‌گونه که قبلاً در مورد نحوه روش توضیح داده شد - دلیل خمش ایجاد شده در این قطعات، نمونه‌ها تقریباً از وسط، از روی ماده سنگ شکسته خواهند شد. و به دلیل وزن نسبتاً کم در بازه انرژی متوسط قرار می‌گیرند.

نتایج درصد سطوح شکست از روی سطح ضعف و یا ماده سنگ به تفکیک هر سطح از انرژی در جدول ۲ ارائه شده است.

ملاحظه می‌شود که بخش‌های صفر و سه ایجاد شده در دو حالت بدون تغییر هستند. واضح است که در بخش صفر به دلیل وجود درزه‌های مشخص و انرژی پایین برای جدایش هیچ تغییری حاصل نشود.

در بخش سوم نیز در دو حالت تغییری ایجاد نشده به این دلیل که سطوح شکست در بخش ۳ منطبق یا تقریباً موازی با سطوح ضعف پیش‌بینی شده بوده است و هیچ کدام را بطور مشخص نمی‌توان شکستگی از روی ماده سنگ دانست. اغلب این شکست‌ها در اولین مرحله آزمایش و در ارتفاع زیاد رخ داده، به این معنی که در رها سازی از ارتفاع‌های کم نمونه دچار هیچ‌گونه شکستگی نشده و اولین شکست منطبق یا موازی با سطوح ضعف بوده است که به دلیل وزن زیادتر نمونه‌ها در این مرحله و ارتفاع بالاتر، انرژی بیشتری باعث ایجاد این نوع شکستگی‌ها شده است.

در این مورد با مراجعه به تصاویر سطوح شکست و سطوح ضعف پیش‌بینی شده، مشخص می‌شود که از ۸ سطح ایجاد شده در این بخش سه سطح شکست با سطوح پیش‌بینی شده مغایرت دارد و می‌توان آنها را شکست از روی ماده سنگ به حساب آورد. بنابراین حدود ۳۷٪ از سطوح شکست از روی ماده سنگ بوده است.

جدول ۲: نتایج تفکیک شده‌ی حالات شکست بر مبنای سطح انرژی

سطح انرژی	درصد حالات شکست از روی سطح ضعف پیش‌بینی شده	درصد حالات شکست از روی ماده سنگ
۰	٪۱۰۰	۰
۱	٪۵۷	٪۴۳
۲	٪۷۲	٪۲۸
۳	٪۶۲/۵	٪۳۷/۵

در مجموع، به این علت که سطوح شکست از روی ماده سنگ برای بخش‌های انرژی ۱ و ۲ مشابه یکدیگر و به دلیل نسبت طول به عرض زیاد نمونه‌های ایجاد شده است، با ادغام نتایج این دو بخش جدول ۳ حاصل می‌شود.

جدول ۳: نتایج کلی تفکیک بر مبنای سطح انرژی و نحوه شکست

سطح انرژی	درصد حالات شکست از روی سطح ضعف پیش‌بینی شده	درصد حالات شکست از روی ماده سنگ
۰	٪۱۰۰	۰
۲ و ۱	٪۶۸	٪۳۲
۳	٪۶۲/۵	٪۳۷/۵

#### ۶- نتیجه‌گیری

۲- نوع سنگ انتخاب شده به گونه‌ای بوده که مشخص کردن عوارض به صورت چشمی روی سطح آن دشوار بود، اما با این وجود این عوارض تا حد زیادی قابل تشخیص بود. همچنین مشخص کردن این نوع عوارض به صورت مشاهده‌ای از روی گمانه‌های ژئوتکنیکی و اکتشافی ساده‌تر خواهد بود.

۳- با توجه به نتایج نهایی به دست آمده از آزمایش طراحی شده (جدول ۳) می‌توان مشاهدات عینی و تعیین سطوح ضعف نوع ۲ و ۳ قبل از رخداد شکست و خردشدگی را تقریبی خوب برآورد نمود.

۴- در آزمایش طراحی شده سطح انرژی ۱ و ۲ سطح انرژی لازم برای تبدیل درزه‌های نوع ۲ به درزه‌های نوع ۱ (بالفعل) تعیین شد. و سطح انرژی ۳ برای تبدیل درزه‌های نوع ۳ به نوع ۱ مشخص شد.

۵- از لحاظ آماری فراوانی درزه‌های نوع ۲ در سنگ مورد آزمایش بیشتر بوده که در مشاهدات عینی قبل از شکست نیز اینگونه برآورد شده بود.

۶- درصد خطای تعیین نوع سطح شکست برای درزه‌های نوع ۲ در این آزمایش ٪۳۲ و برای درزه‌های نوع ۳، ٪۳۷/۵ به دست آمد.

۷- نتایج برای استفاده در توده‌سنگ باید از حالت دو بعدی به سه‌بعدی تعمیم داده شود.

آنچه در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است، ارائه روشی برای تعیین پتانسیل‌های خردشوندگی اولیه و ثانویه در توده‌سنگ و یا یک بلوک سنگی مجزاست. با این فرض که یک سری از سطوح ضعف بالقوه از جمله، جوش‌خورگی‌ها، رگچه‌ها و ... در درون ماده سنگ وجود دارد که اغلب در نگاه اول قابل مشاهده نیستند و بطور مستقیم برداشت نخواهند شد، ولی بیشترین تاثیر را در تخریب‌پذیری و خردشوندگی اولیه و ثانویه توده‌سنگ در روش‌های استخراج تخریبی خواهند داشت. هدف طراحی روشی بود تا میزان دقت تشخیص درزه‌های بالقوه به صورت چشمی مشخص شود و در مرحله بعد بر مبنای انرژی لازم برای شکست، این ناپیوستگی‌ها تفکیک و دسته‌بندی شود. عمده‌ترین نتایج به دست آمده از طراحی و اجرای روش پیشنهاد شده در چند بخش به صورت زیر ارائه شده است:

۱- علاوه بر خود سطح، شکست به نوع بارگذاری نیز بستگی دارد. بنابراین سعی شده آزمایش به گونه‌ای طراحی و اجرا شود که بارگذاری به صورت یکنواخت و روی سطح وسیع و تقریباً روی صفحه‌ای عمود بر صفحه سطح درزه بالقوه باشد.

## ۸- مراجع

- [1] Pine R.J., Coggan, J. S., Flynn, Z., & Elmo, D. (2006). The development of a comprehensive numerical modelling approach for pre-fractured rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 39. 5: 395- 419.
- [2] Rogers, S. F., Kennard, D. K., Dershowitz, W. S., & vanas, A. (2007). Characterising the in situ fragmentation of a fractured rock mass using a discrete fracture network approach, *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands - Eberhardt, Stead & Morrison (eds) Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44401-9*.
- [3] Piteau, D. R. (1972). Engineering geology considerations and approach in assessing the stability of rock slopes. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists IX*, 301-320.
- [4] Piteau, D. R., & Martin, D. C. (1977). Slope stability analysis and design based on probability techniques at Cassiar Mine. *CIM Bulletin*, pp.139-150.
- [5] Wanga, C., Tannant, D. D., & Lilly, P. A. (2003). Numerical analysis of the stability of heavily jointed Rock slopes using PFC2D. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* (40), 415-424.
- [6] Tollenaar R. N. (2008). Characterization of discrete fracture networks and their influence on caveability and fragmentation. (Master of Applied Science) The University of British Columbia.
- [7] Brown, E.T. (2003). Block Caving Geomechanics, The International Caving Study Stage I 1997-2000, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Brisbane, Australia.
- [8] Laubscher, D.H. (2003). *Cave Mining Handbook*, De Beers, p. 138.
- [9] El-Ramly, H., Morgenstern, N. R., & Cruden, D. M. (2002). Probabilistic slope stability analysis for practice. *Can. Geotech. J.* 39, 665-683.
- [10] Price D.G. (2009). *Engineering Geology: Principles and Practice*, Edited and compiled: M.H.de Freitas, Springer,.
- [11] MINITAB QUALITY COMPANION™, (2009), <http://www.minitab.com>

- 
- 1- In situ Fragmentation
  - 2- Primary Fragmentation
  - 3- Secondary Fragmentation
  - 4- Heterogeneous
  - 5- anisotropic
  - 6- Integral discontinuity

## Estimation of Fragmentation on Geometrical Viewpoint

E. Emami Meybodi<sup>1\*</sup>, S. M. E. Jalali<sup>2</sup>

1- PhD Student of Mining, Dept. of Mining, Geophysics and Petroleum, Shahrood University, Iran

2- Associate Professor, Dept. of Mining, Geophysics and Petroleum, Shahrood University, Iran

\* Corresponding Author: [enayatemami@gmail.com](mailto:enayatemami@gmail.com)

(Received: February 2015, Accepted: October 2015)

### Abstract

Good estimation of fragmentation potential is very important topic before selection of caving extraction methods. In-situ fragmentation is result of discontinuities with zero tension strength but primary and secondary fragmentations happen in rock blocks that seem intact and without any discontinuity. In reality in these blocks when induced stresses (due to under cutting) or shock and stress (due to transition of rock mass) affect the blocks, weak surfaces such as rock bridges, veinlet and schistose surfaces (surfaces with tension strength) are first candidates for breakage and slice. Thus it is necessary to quantify these discontinuities in a rock mass. The purpose is to construct a way for prediction of potential discontinuities. In the next step based on necessary energy for breakage, potential discontinuities are classified. We try to design and construct a new method for quantifying and classifying discontinuities in rock mass. This method helps us to have an initial estimate of fragmentation when induced stress and large scale displacement affect rock blocks. Rock bridges, veinlet and weak surfaces in rock like as schistose surfaces (surfaces with tension strength) are potential discontinuity. Those joints that have potential of being counted as discontinuities but are not considered discontinuity in in-situ form are put in class No,2 versus in situ fractures (surfaces without tension strength) are classified No,1. fractures which are created after large scale displacements are known class No, 3.

### Keywords

Fragmentation, caving extraction methods, Potential fractures, In situ fracture, fracture Class No, 2&3

### Cite This Paper:

Emami Meybodi, E. and Jalali, S. M. E. (2015). "Estimation of Fragmentation on Geometrical Viewpoint." Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering 5(9): 51-61. [http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565\(15\)940915-X](http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565(15)940915-X)