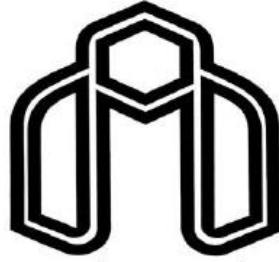


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته مهندسی معدن گرایش استخراج

رساله دکتری

تحلیل تخریب پذیری و خردشوندگی توده سنگ درزه دار در روش تخریب

توده‌ای (مطالعه موردی: معدن مس کهنک)

نگارنده: عنایت الله امامی میبیدی

استاد راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

استاد مشاور

دکتر علیرضا یاراحمدی بافقی

شهریور ۱۳۹۵



شماره: ۹۹۵/۱۱۲۶  
تاریخ: ۴۵/۱/۲۵  
ویرایش:

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)  
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای عنایت الله امامی میبدی دانشجوی دکتری رشته مهندسی استخراج معدن به شماره دانشجویی ۹۰۲۴۰۴۵ ورودی مهرماه سال ۱۳۹۰ در تاریخ ۱۳۹۵/۰۶/۱۸ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: تحلیل تخریب پذیری و خردشوندگی توده سنگ درزه دار در روش تخریب توده های (مورد مطالعاتی: معدن مس کهنک) دفاع و با اخذ نمره ... به درجه: ...

|  |  |
|--|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ | <input type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷          |
| <input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵            | <input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد |
| <input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد         |  |

| ردیف | هیئت داوران                 | نام و نام خانوادگی                         | مرتبه علمی | امضاء |
|------|-----------------------------|--|------------|-------|
| ۱    | دکتر سید محمد اسماعیل جلالی | استاد راهنما                               | دانشیار    |       |
| ۲    | دکتر علیرضا یاراحمدی بافقی  | استاد مشاور                                | استادیار   |       |
| ۳    | دکتر حسین میرزائی نصیرآباد  | استاد مدعو خارجی                           | استادیار   |       |
| ۴    | دکتر شکراله زارع            | استاد مدعو داخلی                           | دانشیار    |       |
| ۵    | دکتر احمد رمضان زاده        | استاد مدعو داخلی                           | استادیار   |       |
| ۶    | دکتر محمد کارآموزیان        | سرپرست (نماینده)<br>تحصیلات تکمیلی دانشکده | دانشیار    |       |

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای عنایت الله امامی میبدی بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری  
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۴۵/۱/۲۵



# تقدیم بہ

ہمسر مہربانم کہ جمع ہمہ می خوبی ہاست

او کہ سایہ مہربانیش سایہ سار زندگیم و پناہگاہ مستقیم بودہ است.

و دختر کو حکم زہرا کہ جمع خوبی و ملاحظت است.

## سپاس گذاری

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمون مان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. اکنون که به یاری پروردگار مهربان مراحل انجام این تحقیق به پایان رسیده است بر خود لازم می دانم تا مراتب سپاس را از بزرگوارانی به جا آورم که اگر دست یاریگرشان نبود، هرگز این پایان نامه به انجام نمی رسید:

جناب آقای دکتر علیرضا یاراحمدی بافقی، استاد محترم مشاور، که همواره با سعه صدر و از خودگذشتگی مثال زدنی، دلسوزانه و با حسن خلق از هیچ کمکی در عرصه علم و دانش بر من دریغ ننمودند. ایشان سرمنشا تحولات بزرگ در زندگی بنده بوده اند و اینجانب همواره قدردان حمایت ها و راهنمایی های ایشان خواهم بود.

جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی، استاد محترم راهنما، که در طول دوره همواره چراغ راه بنده و سکاندار شایسته ای در هدایت این پایان نامه بودند.

از زحمات داوران محترم جناب آقایان دکتر حسین میرزایی نصیرآباد، دکتر شکرالله زارع و دکتر احمد رمضانزاده که نظرات و پیشنهادهای ارزنده ای برای بهتر شدن این تحقیق داشته اند، قدردانی می شود. از کلیه اساتید و کارمندان محترم دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود که در طول دوره تحصیلی، زحمات و تلاش های دلسوزانه شان هموارکننده مسیر علم و دانش برای بنده بوده است، کمال تشکر را دارم.

از همسر مهربانم به خاطر گذشت و فداکاری همیشگی، همراهی در تمامی شرایط سخت، قبول شرایط زندگی دانشجویی بنده و به عنوان مشوقی خیرخواه، کمال سپاسگذاری را دارم.

و در پایان از کلیه دوستانم به خصوص آقایان مهندس امیر آزادمهر، دکتر سید مرتضی حسینی، مهندس علیرضا طالب نژاد، مهندس عین الله عامری و مهندس مجتبی دهقانی تفتی که در طی دوران دانشگاهی با مساعدت های بی دریغشان محیطی دوستانه، گرم و صمیمی برای بنده فراهم نمودند، سپاسگذاری می کنم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات این عزیزان را سپاس گوید.

## تعهدنامه

اینجانب عنایت الله امامی میبیدی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله "تحلیل تخریب پذیری و خردشوندگی توده سنگ درزه‌دار در روش تخریب توده‌ای (مطالعه موردی: معدن مس کهنک)" متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارایه نشده است.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تاثیرگذار بوده‌اند رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضاء  
تاریخ: ۹۵/۰۷/۱

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

همواره در روش تخریب توده‌ای به ویژه برای کانسارهایی با سنگ مقاوم چالش تخریب‌پذیری و خردشوندگی مطرح است. یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر میزان تخریب‌پذیری و خردشوندگی در کانسارهایی با سنگ مقاوم، سیستم ناپیوستگی‌های آنها است. در اکثر موارد به‌منظور محافظه‌کارانه عمل کردن در تحلیل‌های پایداری، گسترش ناپیوستگی‌ها به‌صورت نامحدود در نظر گرفته می‌شود، اما در واقع در مورد بیشتر ناپیوستگی‌ها گسترش نامحدود نیست. براین اساس، در این تحقیق برآورد تخریب‌پذیری و خردشوندگی توده‌سنگ درزه‌دار دارای ناپیوستگی‌های ناپایا (محدود) با استفاده از مدل‌سازی هندسی تصادفی مدنظر قرار گرفته است. در این مسیر برای اجتناب از ساده‌سازی‌های مرسوم و شناخت بهتر سازوکارهای خردشوندگی از مفاهیم آماری، تجربی، مبانی احتمالاتی و مطالعات آزمایشگاهی ابداعی برای در نظر گرفتن تاثیر رگچه‌ها و سطوح ضعف موجود در ماده سنگ، استفاده شده است.

تخریب توده‌سنگ در روش‌های استخراج تخریبی دارای سه مرحله خردشدگی برجا، خردشوندگی اولیه و خردشوندگی ثانویه است. خردشدگی برجا ناشی از درزه‌های موجود در توده سنگ با مقاومت کششی صفر است که در این تحقیق به عنوان درزه‌های بالفعل معرفی می‌شود. اما خردشوندگی اولیه و ثانویه، ناشی از خردشدن بلوک‌های سنگی به‌ظاهر بدون درزه است. اما در واقع اکثراً از روی سطوح ضعف موجود در بلوک‌ها است. در این تحقیق برای تشخیص و تفکیک سطوح وضعی که منجر به بروز پدیده‌های مذکور می‌شود، یک روش آزمایشگاهی طراحی و اجرا شده است. بر این اساس، سطوح ضعف موجود در یک بلوک سنگی به درزه‌های بالقوه‌ی نوع ۱، ۲ و ۳ تقسیم‌بندی و کمی‌سازی شده است. برای بررسی توده سنگ در عمق لازم است مغزه‌های ژئوتکنیکی وجود داشته باشد. در مورد مطالعاتی با توجه به نبود دسترسی به مغزه‌های سالم و ژئوتکنیکی، از تصاویر مغزه‌های حفاری با هدف ثبت نگاره‌های موجود مانند (RQD) و تعداد درزه‌ها در واحد طول ( $P_{10}$ ) برنامه‌ی کامپیوتری به نام DCP (Digital Core Processing) در محیط نرم افزاری Mathematica نوشته

شده است. مقادیر نگاره‌ها با دقت خوبی توسط این برنامه از پردازش تصاویر مغزه‌ها برآورد شده است. در مرحله بعد با کاربرد روش‌های آماری، مولفه‌های RQD و  $P_{10}$  در فضای سه بعدی مدل بلوکی تخمین زده شده است

برای مدل‌سازی هندسی به روش مدل شبکه درزه‌های مجزا (DFN: Discrete Fracture Network) کد  $CAV-DFN^{2D}$  با استفاده از نرم‌افزار Mathematica تهیه شده است. قابلیت نمونه‌گیری تصادفی با تعداد و اندازه‌های مختلف از درزه‌ها از ویژگی‌های منحصر به فرد این برنامه‌ی کامپیوتری است. امکان تشکیل بلوک‌های کامل از تقاطع درزه‌ها و محاسبه‌ی ابعاد آنها به همراه ترسیم توابع توزیع آماری ابعاد بلوک‌ها از قابلیت‌های تعبیه شده به منظور تعیین میزان خردشدگی برجای توده سنگ است. با استفاده از برداشت‌های سطحی انجام شده از معدن مس کهنک و برآورد ویژگی‌های آماری دسته درزه‌های موجود در این منطقه، مدل هندسی - تصادفی دو بعدی شبکه درزه‌ها با تطابق خوبی با توده‌سنگ منطقه توسط  $CAV-DFN^{2D}$  ساخته شده است. سپس اندازه بلوک معرف (REV: Representative Elementary Volume) به منظور تعیین خردشدگی برجا محاسبه شده است که در نهایت مدل  $15 \times 15$  متر مربع مناسب تشخیص داده شده است. سپس درزه‌های بالقوه براساس داده‌های حاصل از پردازش تصویر و برداشت سطحی با  $CAV-DFN^{2D}$  مدل‌سازی شده است. برای برآورد خردشوندگی اولیه و ثانویه برنامه کامپیوتری به نام (PSF (Primary & Secondary Fragmentation، نوشته شده است. در این برنامه میزان خردشوندگی اولیه و ثانویه در حین فرآیند تخریب براساس شاخص‌های تعریف شده در رساله و با فرض این‌که جدایش صرفاً از روی سطوح ضعف باشد، برآورد شده است. پس از تحلیل با فرض‌های موجود ارایه شده در رساله، ارتفاع ستون تخلیه  $150$  متر با عرض فعال  $30$  متر، برای رسیدن به خردشوندگی مناسب، مقداری خوب قلمداد شده است.

**واژه‌های کلیدی:** تخریب توده‌ای، تخریب‌پذیری، خردشوندگی، ناپیوستگی ناپایا، ناپیوستگی بالفعل، ناپیوستگی بالقوه، شبکه درزه گسسته



## لیست مقالات مستخرج از رساله

۱- عنایت الله امامی میبیدی، سیدمحمداسماعیل جلالی، (۱۳۹۴)، برآورد خردشوندگی سنگ از دیدگاه هندسی، نشریه علمی پژوهشی روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، شماره ۹، سال پنجم: صفحه ۵۱.

۲- عنایت الله امامی میبیدی، سیدمحمد اسماعیل جلالی، (۱۳۹۵)، مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی گسسته به منظور برآورد خردشوندگی برجای توده سنگ در روش‌های استخراج تخریبی، نشریه علمی پژوهشی روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن (پذیرفته شده).

## مقالات کنفرانسی

۱- عنایت الله امامی میبیدی، سیدمحمد اسماعیل جلالی، علیرضا یاراحمدی بافقی، اسماء کریمی نژاد (۱۳۹۴)، تعیین شدت درزه‌داری حجمی به روش زمین آمار با استفاده از تصاویر گمانه‌های اکتشافی (مطالعه موردی معدن سنگ آهن ندوشن)، اولین کنفرانس بین‌المللی مهندسی معدن، فلزات و مواد، تهران.

۲- عنایت الله امامی میبیدی، علیرضا یاراحمدی بافقی، سیدمحمد اسماعیل جلالی (۱۳۹۴)، تهیه نگاره‌های مغزه‌های حفاری با استفاده از روش پردازش تصویر (مطالعه موردی معدن سنگ آهن ندوشن)، اولین کنفرانس بین‌المللی مهندسی معدن، فلزات و مواد، تهران.

## فهرست مطالب

| عنوان  | شماره صفحه |
|--|------------|
| فصل اول: کلیات.....  | ۱          |
| ۱-۱- مقدمه .....   | ۲          |
| ۱-۲- روش استخراج تخریب توده‌های.....                                 | ۳          |
| ۱-۳- تعاریف و مفاهیم اصلی تخریب پذیری.....                           | ۴          |
| ۱-۴- طرح مساله و ضرورت انجام تحقیق.....                              | ۵          |
| ۱-۵- اهداف و روش تحقیق.....  | ۸          |
| ۱-۶- فرضیات تحقیق.....   | ۹          |
| ۱-۷- جنبه‌های نوآوری تحقیق.....                                      | ۱۰         |
| ۱-۸- ساختار رساله.....   | ۱۱         |
| فصل دوم: تعاریف، مفاهیم و عوامل موثر بر تخریب پذیری و خردشوندگی..... | ۱۵         |
| ۲-۱- مقدمه .....   | ۱۶         |
| ۲-۲- عوامل مؤثر بر عملیات تخریب در کانسارهای توده ای.....            | ۱۶         |
| ۲-۳- خردشوندگی سنگ.....  | ۱۸         |
| ۲-۳-۱- خردشوندگی اولیه.....  | ۱۹         |
| ۲-۳-۲- ویژگی‌های توده سنگ.....                                       | ۱۹         |
| ۲-۳-۲- مقاومت سنگ سالم.....  | ۲۰         |
| ۲-۳-۲- ساختارهای زمین‌شناسی و نواحی درزه‌دار.....                    | ۲۰         |
| ۲-۳-۲-۱- تعداد و فاصله‌داری دسته درزه‌ها.....                        | ۲۱         |
| ۲-۳-۲-۲- امتیاز شرایط درزه.....                                      | ۲۱         |
| ۲-۳-۲-۳- اثر تنش.....  | ۲۱         |
| ۲-۳-۲-۴- جهت و شیب جبهه تخریب.....                                   | ۲۲         |
| ۲-۳-۲-۵- نرخ تخلیه.....  | ۲۲         |

|    |  |
|----|--|
| ۲۲ | ..... خردشوندگی ثانویه   |
| ۲۳ | ..... مفاهیم و کمی سازی مولفه‌های موثر بر خردشوندگی ثانویه                     |
| ۲۳ | ..... شکل بلوک سنگی  |
| ۲۵ | ..... مقاومت بلوک  |
| ۲۵ | ..... فشار تخریب   |
| ۲۷ | ..... نرخ تخلیه  |
| ۲۸ | ..... پدیده‌ی تاق زدگی (پل زدگی)   |
| ۲۹ | ..... اثر بالشتکی مواد ریزدانه   |
| ۳۱ | ..... فصل سوم: مروری بر تحقیقات گذشته  |
| ۳۲ | ..... ۱-۱- مقدمه   |
| ۳۳ | ..... ۲-۲- روش های تجربی   |
| ۳۳ | ..... ۱-۲-۱- نمودار پایداری لابسچر   |
| ۳۷ | ..... ۲-۲-۲- نمودار پایداری ماتیوس   |
| ۴۲ | ..... ۳-۲-۳- نمودار پایداری توسعه یافته ماتیوس                                 |
| ۴۳ | ..... ۳-۳- تاریخچه ای از مدل سازی عددی تخریب                                   |
| ۴۳ | ..... ۱-۳-۱- مدل های پیوسته  |
| ۴۵ | ..... ۲-۳-۲- مدل های ناپیوسته  |
| ۴۶ | ..... ۳-۳-۳- مدل های ترکیبی  |
| ۴۸ | ..... ۴-۳- استفاده از اصول تحلیلی و تجربی برای برآورد خردشوندگی در تخریب بلوکی |
| ۵۱ | ..... ۵-۳- مدل های برآورد تخریب پذیری مبتنی بر DFN                             |
| ۵۳ | ..... ۶-۳- جمع بندی  |

|    |   |
|----|---|
| ۵۵ | فصل چهارم: ارزیابی ناپیوستگی‌های موجود و محتمل در توده سنگ      |
| ۵۶ | ۱-۴-مقدمه   |
| ۵۷ | ۲-۴-انتخاب گمانه‌های معرف                                       |
| ۶۰ | ۳-۴-پردازش تصویر  |
| ۶۱ | ۱-۳-۴-اصول کلی پردازش تصویر                                     |
| ۶۲ | ۱-۱-۳-۴-فیلتر کردن تصویر  |
| ۶۲ | ۲-۱-۳-۴-بخش بندی  |
| ۶۲ | ۳-۱-۳-۴-تشخیص لبه   |
| ۶۴ | ۲-۳-۴-تاریخچه استفاده از پردازش تصویر در معدن و مکانیک سنگ      |
| ۶۵ | ۳-۳-۴-کلیات برنامه پردازش تصاویر مغزه (Digital Core Processing) |
| ۶۶ | ۴-۳-۴-فرآیند انجام پردازش تصویر                                 |
| ۷۰ | ۴-۴-برداشت سطوح ضعف از روی مغزه‌ها                              |
| ۷۱ | ۱-۴-۴-گروه‌بندی انواع شکستگی‌ها                                 |
| ۷۱ | ۲-۴-۴-مراحل انجام عملیات ثبت نگاره‌های هر جعبه مغزه             |
| ۷۲ | ۳-۴-۴-تعیین امتداد ناپیوستگی‌های اولیه                          |
| ۷۳ | ۴-۴-۴-تعیین خصوصیات کیفی ناپیوستگی‌ها                           |
| ۷۳ | ۵-۴-۴-تحلیل آماری نتایج برداشت                                  |
| ۷۴ | ۱-۵-۴-۴-تحلیل تعداد و نوع ناپیوستگی‌ها                          |
| ۷۴ | ۲-۵-۴-۴-تحلیل ویژگی‌های پرشدگی و بازشدگی ناپیوستگی‌ها           |
| ۷۵ | ۵-۴-مقایسه میزان شکستگی‌ها قبل و بعد از برش مغزه                |
| ۷۷ | ۶-۴-تقسیم بندی انواع ناپیوستگی‌ها                               |
| ۷۸ | ۱-۶-۴-ناپیوستگی‌های جدا نشده <sup>۶</sup> (کامل)                |
| ۷۸ | ۲-۶-۴-ناپیوستگی‌های مکانیکی                                     |
| ۸۰ | ۷-۴-شرح روش کمی سازی ناپیوستگی‌ها                               |
| ۸۰ | ۱-۷-۴-نمونه برداری و تولید نمونه‌های مورد نیاز                  |

|     |  |
|-----|--|
| ۸۱  | ..... ۲-۷-۴-دستورالعمل آزمایش شکست   |
| ۸۳  | ..... ۳-۷-۴-محاسبه انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها                             |
| ۸۵  | ..... ۴-۷-۴-تحلیل آماری فرآیند خردشوندگی                                     |
| ۹۱  | ..... ۸-۴-جمع بندی   |
| ۹۳  | ..... فصل پنجم:مدل سازی شبکه ناپیوستگی های گسسته                             |
| ۹۴  | ..... ۱-۵-مقدمه  |
| ۹۵  | ..... ۲-۵-مطالعات سطحی   |
| ۹۷  | ..... ۱-۲-۵-برداشت درزه  |
| ۹۹  | ..... ۲-۲-۵-بررسی ویژگی های آماری ناپیوستگی ها                               |
| ۹۹  | ..... ۱-۲-۲-۵-جهت داری (جهت شیب و شیب) ناپیوستگی ها                          |
| ۱۰۰ | ..... ۲-۲-۲-۵-فاصله داری ناپیوستگی ها  |
| ۱۰۱ | ..... ۳-۲-۲-۵-چگالی و شدت درزه داری  |
| ۱۰۴ | ..... ۴-۲-۲-۵-موقعیت مکانی ناپیوستگی (جانمایی)                               |
| ۱۰۵ | ..... ۵-۲-۲-۵-طول اثر درزه   |
| ۱۰۶ | ..... ۳-۵-مدل سازی هندسه ناپیوستگی   |
| ۱۰۷ | ..... ۱-۳-۵-انواع روش های مدل سازی هندسی ناپیوستگی ها                        |
| ۱۰۷ | ..... ۱-۱-۳-۵-مدل هندسی با درزه های پایا (نامحدود)                           |
| ۱۰۸ | ..... ۲-۱-۳-۵-مدل هندسی با درزه های ناپایا (محدود)                           |
| ۱۰۸ | ..... ۲-۳-۵-کاربرد مدل های ناپیوستگی های پایا و ناپایا                       |
| ۱۰۹ | ..... ۴-۵-پیشینه مدل سازی تصادفی ناپیوستگی ها                                |
| ۱۱۰ | ..... ۵-۵-تهیه نرم افزار تولید شبکه ناپیوستگی گسسته (CAV-DFN <sup>2D</sup> ) |
| ۱۱۳ | ..... ۱-۵-۵-ورودی برنامه   |
| ۱۱۴ | ..... ۲-۵-۵-خروجی های برنامه   |
| ۱۱۹ | ..... ۳-۵-۵-ابزارهای اعتبارسنجی نرم افزار                                    |

|     |  |
|-----|--|
| ۱۱۹ | .....۵-۶-جمع بندی  |
| ۱۲۱ | ..... فصل ششم: تحلیل تخریب پذیری و خردشوندگی توده سنگ درزه دار                     |
| ۱۲۲ | ..... ۱-۶-مقدمه  |
| ۱۲۴ | ..... ۲-۶-عملیات درزه نگاری در محدوده معدن کهنک                                    |
| ۱۲۴ | ..... ۱-۲-۶-عملیات برداشت صحرایی   |
| ۱۲۸ | ..... ۲-۲-۶-ترسیم و تفکیک دسته درزه ها   |
| ۱۲۹ | ..... ۳-۲-۶-تحلیل های آماری ویژگیهای هندسی شبکه ناپیوستگی ها                       |
| ۱۳۱ | ..... ۱-۳-۲-۶-توزیع جهت داری   |
| ۱۳۲ | ..... ۲-۳-۲-۶-توزیع طول اثر (پایایی)   |
| ۱۳۴ | ..... ۳-۳-۲-۶-چگالی درزه داری  |
| ۱۳۵ | ..... ۳-۶-ساخت مدل سه بعدی شدت درزه داری و شاخص کیفیت توده سنگ به روش زمین آمار    |
| ۱۳۶ | ..... ۱-۳-۶-مراحل ساخت مدل   |
| ۱۳۷ | ..... ۲-۳-۶-ایجاد بانک اطلاعاتی گمانه ها   |
| ۱۳۸ | ..... ۳-۳-۶-منظم سازی و تهیه پروندههای ترکیبی                                      |
| ۱۴۰ | ..... ۱-۳-۳-۶-تفکیک و تعیین مناطق همگون  |
| ۱۴۱ | ..... ۴-۳-۶-ترسیم و تحلیل پراشما (پراش نگاری)                                      |
| ۱۴۵ | ..... ۵-۳-۶-ساخت مدل بلوکی تخمین   |
| ۱۴۶ | ..... ۴-۶-برآورد قابلیت تخریب بر اساس مقدار شدت درزه داری حجمی                     |
| ۱۴۹ | ..... ۵-۶-تحلیل خردشدگی برجا   |
| ۱۴۹ | ..... ۱-۵-۶-ساخت مدل شبکه ناپیوستگی گسسته  |
| ۱۵۵ | ..... ۶-۶-مدل سازی هندسی سطوح ضعف (ناپیوستگی های بالقوه)                           |
| ۱۵۵ | ..... ۱-۶-۶-برآورد توزیع آماری شیب سطوح ضعف  |
| ۱۵۶ | ..... ۲-۶-۶-برآورد پایایی (طول اثر) سطوح ضعف بر اساس همبستگی پایایی و بازشدگی درزه |
| ۱۵۹ | ..... ۳-۶-۶-برآورد چگالی درزه داری   |

|     |  |
|-----|--|
| ۱۶۱ | ..... ۷-۶- شاخص خردشوندگی اولیه              |
| ۱۶۳ | ..... ۸-۶- شاخصهای خردشوندگی ثانویه          |
| ۱۶۵ | ..... ۹-۶- برنامه کامپیوتری PSF              |
| ۱۶۷ | ..... ۱-۹-۶- ورودی و خروجی برنامه PSF        |
| ۱۶۷ | ..... ۱-۱-۹-۶- ورودی و خروجی بخش اول         |
| ۱۶۷ | ..... ۲-۱-۹-۶- ورودی و خروجی بخش دوم         |
| ۱۶۸ | ..... ۳-۱-۹-۶- ورودی و خروجی بخش سوم         |
| ۱۶۹ | ..... ۱۰-۶- تحلیل خردشوندگی با نرم افزار PSF |
| ۱۶۹ | ..... ۱-۱۰-۶- داده های ورودی و فرضیات مدل    |
| ۱۷۳ | ..... ۲-۱۰-۶- تحلیل خردشوندگی اولیه          |
| ۱۷۶ | ..... ۳-۱۰-۶- تحلیل خردشوندگی ثانویه         |
| ۱۷۹ | ..... ۱۱-۶- اعتبارسنجی برنامه PSF            |
| ۱۸۰ | ..... ۱۲-۶- جمع بندی                         |
| ۱۸۳ | ..... فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات       |
| ۱۸۴ | ..... ۱-۷- نتیجه گیری                        |
| ۱۸۸ | ..... ۲-۷- پیشنهادات                         |
| ۱۹۰ | ..... منابع                                  |
| ۱۹۷ | ..... پیوست                                  |

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: نمایی از روش تخریب بلوکی در معدن ایال تنینتا، شیلی ..... ۴
- شکل ۲-۱: روندنمای مباحث رساله ..... ۱۴
- شکل ۱-۲: مفهوم نرخ تناسب ظاهری در سه بعد (Esterhuizen G. S, 2005) ..... ۲۴
- شکل ۲-۲: تغییرات احتمال شکست بلوک نسبت به نرخ تناسب ظاهری ..... ۲۴
- شکل ۳-۲: نمودار تعیین ضریب تعدیل مقاومت ماده سنگ (IRS) ..... ۲۵
- شکل ۴-۲: نمایی از مفاهیم ارتفاع تخلیه و ارتفاع تخریب ..... ۲۶
- شکل ۵-۲: تغییرات فشار وارد بر کف ستون تخلیه براساس تغییرات نسبت عرض به ارتفاع ..... ۲۸
- شکل ۶-۲: تغییرات ضریب نرخ تخلیه نسبت به تغییرات نرخ تخلیه ..... ۲۸
- شکل ۷-۲: نمودار تغییرات احتمال شکست بلوک سنگی برحسب درصد ذرات ریزدانه ..... ۳۰
- شکل ۱-۳: نحوه تعیین MRMR (Laubscher, Jakubec, 2001) ..... ۳۵
- شکل ۲-۳: سطح مورد نظر برای محاسبه ی شعاع هیدرولیکی ..... ۳۶
- شکل ۳-۳: ارتباط بین شعاع هیدرولیکی و دهانه حداقل (Laubscher, 2000) ..... ۳۶
- شکل ۴-۳: نمودار تخریب لابسچر (Brown, 2003) ..... ۳۷
- شکل ۵-۳: نمودار پایداری اصلاح شده ماتیوس توسط استیوارت و فورسیس ..... ۳۹
- شکل ۶-۳: نمودار محاسبه ی ضریب تنش (A) (Suorineni, F. T., 2010) ..... ۴۰
- شکل ۷-۳: نحوه ی محاسبه ی ضریب تعدیل جهت درزه (B) ..... ۴۰
- شکل ۸-۳: نحوه ی محاسبه ی فاکتور B ..... ۴۱
- شکل ۹-۳: محاسبه ی ضریب ثقلی (C) ..... ۴۱
- شکل ۱۰-۳: نمودار تعمیم یافته ی پایداری با استفاده از رگرسیون آماری ..... ۴۲
- شکل ۱۱-۳: سازوکار شکست دیواره نهایی پیت معدن پالابورا ..... ۴۴
- شکل ۱۲-۳: شبیه سازی اثر تخریب توده ای بر نشست سطحی زمین ..... ۴۷



- شکل ۳-۱۳: نمونه ای از مدل سازی SRM -DEM با استفاده از نرم افزار ..... ۴۸
- شکل ۳-۱۴: مثالی از ابعاد بلوک‌ها در خردشوندگی اولیه، محاسبه شده بوسیله BCF ..... ۵۰
- شکل ۳-۱۵: نمونه ای از نمودارهای توزیع ابعاد خردشدگی اولیه و ثانویه ..... ۵۰
- شکل ۴-۱: ساخت مدل سه بعدی گمانه‌ها در نرم افزار Datamine ..... ۵۸
- شکل ۴-۲: نقشه کل گمانه‌ها و گمانه‌های انتخاب شده ..... ۵۹
- شکل ۴-۳: نمای سه بعدی از کل گمانه‌ها و گمانه‌های انتخاب شده ..... ۶۰
- شکل ۴-۴: روند نمای پردازش تصویر ..... ۶۱
- شکل ۴-۵: منوی ورودی برنامه کامپیوتری تهیه شده با عنوان DCP ..... ۶۶
- شکل ۴-۶: انتخاب و آماده سازی تصویر ..... ۶۷
- شکل ۴-۷: اجرای برنامه کامپیوتری و بارگیری تصویر ..... ۶۸
- شکل ۴-۸: تعیین ترتیب و حدود پیاده سازی خطوط اسکن برای هر مغزه ..... ۶۸
- شکل ۴-۹: تفکیک خروجی حاصل از مراحل فیلتر و آشکارسازی لبه‌ها ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۰: خروجی RQD و تعداد درزه‌های موجود در واحد طول مغزه ( $P_{10}$ ) ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۱: تصویر پردازش شده به همراه خطوط اسکن و طولهای بزرگتر از ۱۰ سانتیمتر ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۲: شماره گذاری ناپیوستگی‌ها (جعبه مغزه ۳۸ از گمانه ۷) ..... ۷۲
- شکل ۴-۱۳: نمونه فرم برداشت تکمیل شده ..... ۷۲
- شکل ۴-۱۴: برداشت امتداد ناپیوستگی‌های اولیه نسبت به جهت شمال ..... ۷۳
- شکل ۴-۱۵: نمودار انواع ناپیوستگی‌های شناسایی شده ..... ۷۴
- شکل ۴-۱۶: تابع توزیع فراوانی میزان ضخامت مواد پرکننده سطوح ناپیوستگی ..... ۷۵
- شکل ۴-۱۷: تصویر جعبه مغزه ۸۸ از گمانه ۶۶ قبل از برش مغزه ..... ۷۶
- شکل ۴-۱۸: تصویر جعبه مغزه ۸۸ از گمانه ۶۶ بعد از برش مغزه ..... ۷۶
- شکل ۴-۱۹: شکست ایجاد شده از روی سطح رگچه ..... ۷۷

- شکل ۴-۲۰: ضخامت رگچه پس از شکست نمونه از محل جوش خوردگی ..... ۷۷
- شکل ۴-۲۱: نمونه‌ای از علامت گذاری سطوح ضعف با رنگ قبل از آزمایش شکست ..... ۸۱
- شکل ۴-۲۲: سطح ماسه بادامی تسطیح شده به ضخامت ۱۰ سانتیمتر ..... ۸۱
- شکل ۴-۲۳: نمونه شماره ۸ ..... ۸۲
- شکل ۴-۲۴: نمونه شماره ۱۴ ..... ۸۲
- شکل ۴-۲۵: مشخص کردن سطوح ضعف روی سطح نمونه قبل از شکست ..... ۸۳
- شکل ۴-۲۶: تعیین سطح شکست و مشخص نمودن ارتفاع رها سازی روی سطح شکست ..... ۸۴
- شکل ۴-۲۷: تکرار آزمایش برای تکه کوچک ۴ کیلوگرمی ..... ۸۴
- شکل ۴-۲۸: تکرار آزمایش برای تکه بزرگ ۱۰ کیلوگرمی ..... ۸۴
- شکل ۴-۲۹: تکرار آزمایش برای نمونه ۴.۵ کیلوگرمی (ارتفاع شکست ۱۸۰ سانتیمتر) ..... ۸۵
- شکل ۴-۳۰: هیستوگرام فراوانی انرژی های لازم برای شکست ..... ۸۶
- شکل ۴-۳۱: نمودار تابع توزیع احتمال انرژی به صورت درصد ..... ۸۷
- شکل ۴-۳۲: نمودار تابع توزیع احتمال انرژی ..... ۸۸
- شکل ۴-۳۳: نمودار توزیع احتمال انرژی شکست در سطوح ضعف ..... ۸۹
- شکل ۴-۳۴: نمودار توزیع احتمال انرژی شکست ..... ۸۹
- شکل ۵-۱: نمایی شماتیک از پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها ..... ۹۷
- شکل ۵-۲: نمایش انحراف زاویه‌ای بردار نرمال ناپیوستگی‌ها از مقدار میانگین فیشر ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۳: ضرایب a, b و c برای تعیین ضریب تبدیل  $1/C_{13}$  ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۴: روند نمای مدل سازی برای یک دسته درزه ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۵: خروجی یکی از مدل‌های ساخت شبکه درزه‌ها به تفکیک هر دسته درزه ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۶: خروجی کلی یکی از مدل‌های ساخت شبکه درزه‌ها با چهار دسته درزه ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۷: نمایی از یک مدل با چهار دسته درزه به همراه خطوط برداشت افقی ..... ۱۱۶

- شکل ۵-۸: خروجی یکی از مدل‌های ساخت شبکه درزه‌ها برحسب درصد..... ۱۱۷
- شکل ۵-۹: نمونه‌ای از تهیه مدل درزه‌ها براساس ترتیب زایش به صورت سلسله‌مراتبی..... ۱۱۷
- شکل ۵-۱۰: توابع توزیع طول اثر درزه‌های کوچکتر از ۰/۸ متر در دسته درزه شماره یک..... ۱۱۸
- شکل ۵-۱۱: رأیند منظم‌سازی، تشکیل و محاسبه‌ی مساحت بلوکها..... ۱۱۸
- شکل ۶-۱: بخشی از یک نمونه فرم برداشت تکمیل شده..... ۱۲۵
- شکل ۶-۲: نمودار و جدول استاندارد مشخصات زبری سطح ناپیوستگی..... ۱۲۶
- شکل ۶-۳: نمایی از خط برداشت شماره ۳..... ۱۲۷
- شکل ۶-۴: کنتور تمرکز درزه‌ها و تفکیک آنها در منطقه برداشت..... ۱۲۸
- شکل ۶-۵: نتایج مقایسه‌ی آزمون بهترین برازش بر طول اثر..... ۱۳۳
- شکل ۶-۶: تابع توزیع لاگ نرمال برازش شده بر طول اثر دسته درزه ۱..... ۱۳۴
- شکل ۶-۷: اندازه‌گیری چگالی درزه ( $P_{20}$ )..... ۱۳۵
- شکل ۶-۸: نمودار دیسکی تغییرات مقادیر  $P_{10}$ ..... ۱۳۹
- شکل ۶-۹: هیستوگرام داده‌های  $P_{10}$ ..... ۱۴۰
- شکل ۶-۱۰: تغییرات مولفه  $p_{10}$  نسبت به تغییرات عرض جغرافیایی..... ۱۴۰
- شکل ۶-۱۱: پراش نمای مولفه  $P_{10}$  در جهت‌های مختلف..... ۱۴۱
- شکل ۶-۱۲: پراش نمای مولفه  $P_{10}$  در راستای محور اصلی، نیمه اصلی و کوچک..... ۱۴۲
- شکل ۶-۱۳: بیضوی ناهمسانگردی ارتباط فضایی مولفه  $P_{10}$ ..... ۱۴۲
- شکل ۶-۱۴: مقایسه مقادیر تخمین زده شده با داده‌های واقعی..... ۱۴۴
- شکل ۶-۱۵: نتایج تخمین زمین آماری در حجم توده سنگ..... ۱۴۵
- شکل ۶-۱۶: پتانسیل تشکیل بلوک در یک توده سنگ به عنوان تابعی از  $P_{32}$ ..... ۱۴۸
- شکل ۶-۱۷: تابع توزیع برازش شده بر طول دسته درزه ۳ به همراه آماره‌های آن..... ۱۵۲
- شکل ۶-۱۸: خروجی مدل CAV-DFN2D..... ۱۵۳

- شکل ۶-۱۹: خروجی مدل CAV-DFN2D ..... ۱۵۴
- شکل ۶-۲۰: بلوک های کامل حاصل از خردشدگی برج ..... ۱۵۵
- شکل ۶-۲۱: تابع توزیع شیب سطوح ضعف و رگچه های موجود در توده سنگ ..... ۱۵۶
- شکل ۶-۲۲: تابع توزیع برآزش شده بر طول کل درزه ها ..... ۱۵۸
- شکل ۶-۲۳: تابع توزیع برآزش شده بر بازشدگی کل درزه ها ..... ۱۵۹
- شکل ۶-۲۴: ناپیوستگی های بالقوه مدل سازی شده ..... ۱۶۰
- شکل ۶-۲۵: مدل هندسی کلی از ناپیوستگی های بالقوه ..... ۱۶۰
- شکل ۶-۲۶: نمودار تغییرات مقدار  $F_p$  نسبت به فشار وارد بر کف ستون تخلیه ..... ۱۶۵
- شکل ۶-۲۷: هندسه ی سطوح زیربرش مدلسازی شده به همراه ابعاد ..... ۱۷۱
- شکل ۶-۲۸: مولفه های تنش های القایی روی سطح زیربرش به صورت شماتیک ..... ۱۷۱
- شکل ۶-۲۹: تغییرات مولفه های تنش های القایی روی سطح بالایی ..... ۱۷۱
- شکل ۶-۳۰: مدل خردشدگی برج به همراه ناپیوستگی های بالقوه ..... ۱۷۳
- شکل ۶-۳۱: نمودار نیمه لگاریتمی توزیع ابعادی بلوک ها در حالت خردشدگی برج ..... ۱۷۳
- شکل ۶-۳۲: نمایی از خردشوندگی اولیه بلوک ها در شرایط تنش القایی متفاوت ..... ۱۷۴
- شکل ۶-۳۳: نمودارهای توزیع ابعادی بلوک ها پس از خردشوندگی اولیه ..... ۱۷۴
- شکل ۶-۳۴: نمودارهای توزیع ابعادی بلوکها در حالت برج و پس از خردشوندگی اولیه ..... ۱۷۵
- شکل ۶-۳۵: بلوک های کامل با ابعاد بزرگتر از ۱ متر مربع ..... ۱۷۶
- شکل ۶-۳۶: نمودارهای توزیع ابعادی بلوکها در حالت برج و پس از خردشوندگی ثانویه ..... ۱۷۷
- شکل ۶-۳۷: نمودارهای توزیع ابعادی بلوکها در حالت برج و پس از خردشوندگی اولیه ..... ۱۷۷
- شکل ۶-۳۸: نمودارهای توزیع ابعادی بلوکها در حالت خردشوندگی اولیه ..... ۱۷۸
- شکل ۶-۳۹: بلوک های کامل با ابعاد بزرگتر از ۱ متر مربع ..... ۱۷۹

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲: مولفه‌های اصلی و عوامل موثر بر آنها در برآورد تخریب‌پذیری ..... ۱۷
- جدول ۲-۲: تغییرات فشار وارد بر کف ستون تخلیه براساس تغییرات نسبت عرض به ارتفاع ۲۷
- جدول ۳-۲: نرخ کاهش احتمال شکست برحسب درصد ذرات ریزدانه ..... ۳۰
- جدول ۱-۴: مشخصات گمانه‌های انتخاب شده ..... ۵۹
- جدول ۲-۴: نمونه‌ای از داده‌های ثبت شده از آزمایش ..... ۸۵
- جدول ۳-۴: نتایج تفکیک شده‌ی حالات شکست بر مبنای سطح انرژی ..... ۹۱
- جدول ۴-۴: نتایج کلی تفکیک بر مبنای سطح انرژی و نحوه شکست ..... ۹۱
- جدول ۱-۵: سطح آگاهی و شناخت ممکن از درزه‌ها (Goodman, 1979) ..... ۹۶
- جدول ۲-۵: پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها (Villaescusa, 1993) ..... ۹۶
- جدول ۳-۵: شدت و چگالی درزه سنگ به عنوان تابعی از مقیاس برداشت ..... ۱۰۲
- جدول ۴-۵: مولفه‌های آماری ویژگی‌های هندسی چهار دسته درزه ..... ۱۱۴
- جدول ۵-۵: نمونه‌ای از گزارش خروجی نرمافزار CAV-DFN<sup>2D</sup> ..... ۱۱۵
- جدول ۱-۶: خلاصه وضعیت پایان‌یابی درزه‌های برداشت شده ..... ۱۲۷
- جدول ۲-۶: خلاصه تحلیل آماری پارامترهای هندسی دسته درزه‌های برداشت شده ..... ۱۳۱
- جدول ۳-۶: ساختار پرونده‌های ایجاد شده در بانک اطلاعاتی ..... ۱۳۸
- جدول ۴-۶: مشخصات پراش نما و بیضوی ناهمسانگردی  $P_{10}$  ..... ۱۴۳
- جدول ۵-۶: مشخصات هندسی مدل بلوکی خام معدن ..... ۱۴۵
- جدول ۶-۶: مقادیر میانگین شدت درزه داری خطی و شدت درزه داری حجمی ..... ۱۴۷
- جدول ۷-۶: تعیین میزان انطباق چگالی درزه داری سطحی برداشت شده و مدل‌سازی ..... ۱۵۲
- جدول ۸-۶: مولفه‌های آماری شیب دسته درزه‌های شماره ۱ و ۲ ..... ۱۵۲
- جدول ۹-۶: مولفه‌های آماری طول دسته درزه‌ی شماره ۳ ..... ۱۵۳

جدول ۶-۱۰: تخمین گسترش طول اثر درزه براساس نرخ های مختلف تنش - مقاومت ..... ۱۶۲

جدول ۶-۱۱: ورودی های مورد نیاز مدل تحلیلی خردشوندگی اولیه و ثانویه ..... ۱۷۲

## فصل اول

### ۱- کلیات

## ۱-۱- مقدمه

روش استخراج تخریب توده‌ای، استخراج ذخایر عظیم با عیار پایین در عمق را امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین این روش پایین‌ترین هزینه و بالاترین نرخ تولید نسبت به سایر روش‌های زیرزمینی را دارد. به هر حال تجارب اخیر در برخی از معادن که با این روش استخراج می‌شوند، مانند معدن نورث پارکس<sup>۱</sup> در استرالیا و پالابورا<sup>۲</sup> در آفریقای جنوبی، عدم شناخت کافی از فرآیندهای ژئوتکنیکی تخریب را نمایان می‌سازد (Tollenarr, 2008). برآورد ضعیف تخریب‌پذیری و خردشوندگی در این روش استخراج، می‌تواند منجر به بروز مشکلاتی در فرآیند تولید شود و یا در بدترین حالت به شکست پروژه بیانجامد.

برآورد توزیع احتمالی خردشوندگی توده‌سنگ در مورد یک عملیات تخریب، بسیار حایز اهمیت است. یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر میزان تخریب‌پذیری و خردشوندگی در کانسارهای با سنگ مقاوم، سیستم ناپیوستگی‌های آنها است. این ناپیوستگی‌ها اعم از ناپیوستگی‌های موجود با مقاومت کششی ناچیز و یا سطوح ضعیفی مانند رگچه‌ها، پل‌های سنگی و غیره است، که در ظاهر ناپیوستگی محسوب نمی‌شوند. یکی از ویژگیهای هندسی ناپیوستگی‌ها که بر میزان تخریب‌پذیری و خردشوندگی تاثیر بسیار زیادی دارد، پایایی آنها است. لذا آنچه مدنظر قرار گرفته است ارایه مدل هندسی از درزه-های موجود در یک توده سنگ که ناپیوستگی غالب محسوب می‌شوند، تا حد ممکن نزدیک به واقعیت، با شرایط ناپایا و پایان‌یابی مشخص، است. همچنین لازم است تاثیر سطوح ضعف موجود در بلوک‌های سنگی که به‌عنوان سطوح ناپیوسته‌ی بالقوه محسوب خواهند شد، در خردشوندگی لحاظ شود.

---

1 - Northparkes  
2 - Palabora

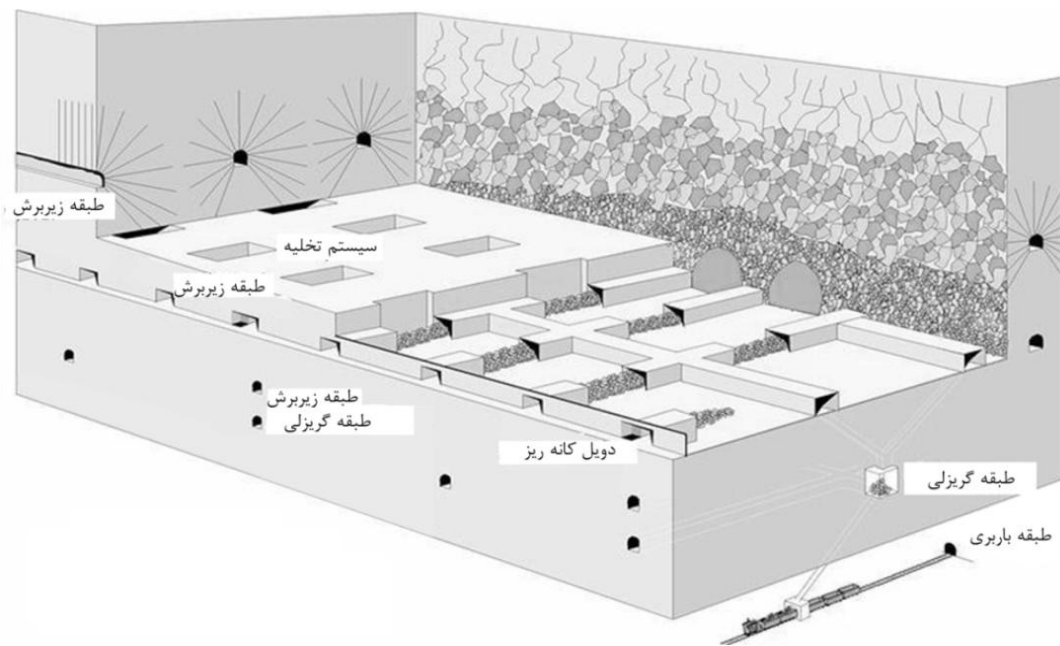


## ۱-۲- روش استخراج تخریب توده‌ای

روش استخراج تخریب توده‌ای بیشتر برای استخراج کانسارهای بزرگ توده‌ای به کار برده می‌شود. این روش، روش استخراج با تولید انبوه در معادن زیرزمینی است که بالقوه قابلیت رسیدن به سطح تولید و هزینه‌های استخراج روباز را دارد. در این روش هم کانسنگ و هم باطله تخریب می‌شوند، لذا کانسنگ و باطله باید قابلیت تخریب داشته باشند. این روش به منظور استخراج کانسارهای مس پرفیری کم عیار و توده‌ای جنوب غرب آمریکا توسعه یافت و تکمیل شد و به سرعت در خارج از آمریکا گسترش یافت و در حال حاضر در بیشتر کشورها و برای بسیاری از کانسنگ‌ها به کار می‌رود. از نمونه کاربرد این روش در معادن مس می‌توان به معادن مس آندینا<sup>۱</sup>، چوکوی کاماتا<sup>۲</sup>، ای‌ال تنینتا<sup>۳</sup> در شیلی، گراسبرگ<sup>۴</sup> در اندونزی، معدن نورث پارکس<sup>۵</sup> در استرالیا، معدن رزولوشن<sup>۶</sup> در آمریکا اشاره نمود. علاوه بر موارد بیان شده نمونه‌های زیاد دیگری نیز در دنیا وجود دارد.

برای وادار کردن بلوک‌ها به تخریب، در زیر بلوک‌ها برشی ایجاد می‌شود تا این امکان فراهم شود که کانسنگ شکسته و خردشده، تحت تاثیر نیروی وزن خود به سمت پایین حرکت کند. به محض این که زیربرش با سطح مقطع بحرانی تکمیل شد، تخریب در بلوک شروع می‌شود. هنگامی که ماده معدنی استخراجی از زیر کشیده می‌شود، گسترش شکستگی‌ها به طرف بالا ادامه پیدا می‌کند. پس از این مرحله تنها عامل موثر، کنترل تخلیه است. در شکل ۱-۱ نمایی از روش تخریب بلوکی در معدن مس ای‌ال تنینتا در شیلی نشان داده شده است (Hamrin, 2001).

- 
- 1- Andina
  - 2 - Chuquicamata
  - 3 - El Teniente
  - 4 - Grasberg
  - 5 - North parkes
  - 6 - Resolution



شکل ۱-۱: نمایی از روش تخریب بلوکی در معدن ایال تنینتا، شیلی (Hamrin, 2001)

### ۳-۱- تعاریف و مفاهیم اصلی تخریب پذیری

در مباحث معدنکاری، تخریب‌پذیری یک مقیاس یا واحدی برای نشان دادن قابلیت تخریب شدن یک کانسار تحت شرایط محیطی خاص است. در کاربردهای معدنی معمولاً مساله اصلی در برآورد تخریب‌پذیری وابسته به تخمین ابعاد مورد نیاز زیربرش - که با شعاع هیدرولیکی بیان می‌شود - به‌منظور شروع تخریب در یک توده سنگ با خواص مکانیکی معلوم است.

اگر چه ابعاد زیربرش یکی از عوامل اثرگذار بر تخریب‌پذیری به‌شمار می‌رود، ولی این مولفه به تنهایی بیان‌کننده‌ی چگونگی تخریب و انواع خردشوندگی‌ها نیست.

تخریب‌پذیری کانسار یک عامل بحرانی در مطالعات امکان‌سنجی روش‌های تخریبی است.

تخریب‌پذیری نه تنها از نظر قابلیت معدن‌کاری، بلکه از نظر تاثیر در هزینه‌های آتش‌کاری، بارگیری، حمل و نقل، سنگ‌شکنی و درصد بازیابی ماده معدنی نیز مهم است. قابلیت تخریب کانسار به عوامل زیادی بستگی دارد که آگاهی در مورد این عوامل برای پیش‌بینی قابلیت تخریب توده سنگ، ضروری است. در یک نگاه کلی، مولفه‌های اصلی موثر بر تخریب‌پذیری را می‌توان به‌صورت زیر

تقسیم‌بندی نمود (Brown, E.T. 2003):

- مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها شامل: شیب، جهت شیب، فاصله داری و پایایی
- ساختارهای اصلی زمین شناسی (از قبیل گسل‌ها، دایک‌ها و ...)
- تنش‌های برجا و تنش‌های القایی اطراف فضای تخریب
- مقاومت ناپیوستگی‌ها و ماده سنگ
- هندسه و ابعاد زیربرش
- رها سازی تنش، سست کردن مرزها و یا شرایط پیش آماده‌سازی توده سنگ

#### ۱-۴- طرح مساله و ضرورت انجام تحقیق

مهمترین مولفه‌ها در تخریب، تخریب‌پذیری و خردشوندگی هستند. برآورد ضعیف این دو عامل می‌تواند منجر به بروز مشکلاتی در فرآیند تولید شود و یا در بدترین حالت به شکست پروژه بیانجامد.

در مباحث معدنکاری، تخریب‌پذیری یک مقیاس یا واحد برای نشان دادن قابلیت تخریب شدن توده سنگ تحت شرایط خاص است. تخریب‌پذیری یک توده سنگ یا کانسار یک عامل بحرانی در مطالعات امکان‌سنجی روش‌های تخریبی است. با توجه به تاثیر بسزای چگونگی خردشوندگی توده سنگ بر روی نتیجه‌ی عملیات تخریب، برآورد توزیع احتمالی خردشوندگی توده سنگ پیش از تخریب بسیار حایز اهمیت است.

به‌طور کلی در اغلب منابع قابل استناد، سه سطح خردشوندگی تعریف شده است که عبارتند از:

خردشدگی برجا، خردشوندگی اولیه و خردشوندگی ثانویه (Laubscher, 2000; Brown, 2003).

الف) خردشدگی برجا<sup>۱</sup>: نمایانگر بلوک‌هایی است که به‌طور طبیعی قبل از شروع عملیات معدنکاری در توده سنگ وجود دارند. این خردشدگی بوسیله درزه‌هایی شکل می‌گیرد که از قبل در توده سنگ وجود دارند.

---

1 - In-situe Fragmentation.

ب) خردشوندگی اولیه<sup>۱</sup>: به محض ایجاد زیربرش و شروع عملیات تخریب، بلوک‌های همسایه‌ی فضای تخریب، جدا شده و بدین ترتیب خردشوندگی اولیه شکل می‌گیرد.

ج) خردشوندگی ثانویه<sup>۲</sup>: این خردشوندگی در طول مسیر از زمان جدا شدن سنگ از سطح تخریب و عبور از ستون تخلیه تا خروج از دهانه تخلیه رخ می‌دهد.

ناپیوستگی‌ها از جمله عوامل مهم تاثیرگذار بر فرآیند تخریب‌پذیری و خردشوندگی محسوب می‌شوند.

محیط‌های سنگی عموماً مشتمل بر ناپیوستگی‌های متعددی بوده و در اکثر موارد این ناپیوستگی‌ها کنترل‌کننده‌ی رفتار مکانیکی توده‌سنگ هستند. در واقع ویژگی‌های هندسی صفحات ناپیوستگی بشدت بر مقاومت توده‌سنگ اثر می‌گذارد. یک درزه، یک صفحه گسل، یک سطح لایه-بندی، یک لایه نازک شیل و یا یک صفحه نازک هوازده را می‌توان یک ناپیوستگی در یک توده‌سنگ تلقی کرد. درزه‌ها متداول‌ترین نوع ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ‌ها به شمار می‌روند، لذا در کل این تحقیق از میان انواع ناپیوستگی‌های توده‌سنگ، فقط درزه‌ها در نظر گرفته می‌شوند و واژه‌های «درزه» و «ناپیوستگی» در این نوشتار به‌جز در مواردی که مشخصاً ذکر خواهد شد، معادل هم بکار می‌روند.

در سال‌های اخیر ناپیوستگی‌ها به عنوان عامل اصلی خردشدگی برجا با استفاده از روش‌های جدید، امکان شبیه‌سازی دقیق‌تری یافته‌اند. گسترش و ابعاد ناپیوستگی‌ها به عنوان یکی از پارامترهای هندسی آنها در اکثر سیستم‌های شبیه‌سازی، نامحدود(پایا) در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که در واقعیت بسیاری از درزه‌ها محدود(ناپایا) هستند. ناپایایی گسترش ناپیوستگی‌ها تاثیر زیادی بر میزان تخریب‌پذیری کانسار در روش‌های استخراج تخریبی، به‌ویژه روش تخریب توده‌ای دارد. در روش‌های مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌های مجزا (DFN)، ناپیوستگی‌ها به‌صورت ناپایا در نظر گرفته می‌شود که این امر از افزایش چگالی درزه‌داری جلوگیری کرده و با واقعیت تطابق بیشتری دارد. استفاده از شبکه

---

1 - Primary Fragmentation  
2 - Secondary Fragmentation

ناپیوستگی‌های مجزا می‌تواند به‌طور عمده برای توصیف بهتری از توزیع خردشدگی برجا قبل از عملیات تخریب، در بررسی خردشدگی کمک نماید. همچنین تا به امروز برآورد خردشوندگی اولیه و ثانویه به‌طور گسترده‌ای توسط روش‌های تجربی و عددی مختلف انجام شده است. به هر حال بحثی که وجود دارد این است که هیچ‌یک از این روش‌ها به‌طور کامل نتوانستند ناهمگنی وسیع توده سنگ را در نظر بگیرند (Rogers et al. 2007).

خردشدگی برجا ناشی از درزه‌های بالفعل موجود در توده سنگ با مقاومت کششی صفر است. اما خردشوندگی اولیه و ثانویه، ناشی از خردشدن بلوک‌های سنگی به‌ظاهر 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 و تنش‌های وزنی ناشی از انتقال مواد در طول ستون تخلیه هستند. برای در نظر گرفتن تاثیر سطوح ضعف لازم است، نخست این سطوح با روش‌های مختلف از روی گمانه‌ها و سطح نمایان برداشت شده و سپس میزان مقاومت آنها برآورد شود. به‌طور کلی انتظار می‌رود چگونگی ایجاد خردشوندگی ثانویه به‌صورت یک بخش یا تمامی موارد زیر باشد (Brown, 2003) :

- گسترش و انتشار ناپیوستگی‌های موجود
- بازشدن ناپیوستگی‌های پرشده و جوش خرده
- بازشدگی در امتداد صفحات لایه‌بندی یا شیب‌توزیته
- خردشدن تحت وزن توده خردشده‌ی بالایی
- شکست فشاری (برشی) بلوک‌ها تحت تاثیر تنش‌های ایجاد شده در پدیده‌ی تاق زدگی<sup>1</sup> در حین تخریب
- شکست بلوک‌ها بر اثر تنش‌های ناشی از بار نقطه‌ای یا خطی در محل‌های تماس بلوک‌ها در توده خرد شده.

- شکست خمشی بلوک‌های باریک

- سایش گوشه‌های بلوک‌ها و در نتیجه کاهش ابعاد آنها و تولید نرمه.

از موارد مطرح شده می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری نمود که خردشوندگی ثانویه در دو حالت کلی شامل خردشدن ماده سنگ و یا در اثر گسترش ناپیوستگی‌های بالفعل و یا باز شدن ناپیوستگی‌های بالقوه تحت تنش‌های برجا و القایی به‌وجود می‌آید.

لذا آنچه اهمیت به‌سزایی در پیش‌بینی تخریب‌پذیری و خردشوندگی خواهد داشت، در نظر گرفتن هم‌زمان ماده سنگ، ناپیوستگی‌های بالفعل و بالقوه، تنش‌ها و تغییرات آنها در حین عملیات تخریب و خردشوندگی است. در این بین سطوح ضعف بالقوه موجود در ماده سنگ در خردشوندگی اولیه و ثانویه نقش مهمی را دارند.

با توجه به موارد بیان شده، نیاز به برآورد تخریب‌پذیری و خردشوندگی توده‌سنگ اعم از برجا، اولیه و ثانویه با استفاده از مدلی دقیق‌تر و واقعی‌تر که نمایانگر توده‌سنگ واقعی و فرآیندهای درست تخریب‌پذیری و خردشوندگی باشد احساس می‌شود.

## ۱-۵- اهداف و روش تحقیق

هدف اصلی در این تحقیق برآورد تخریب‌پذیری و خردشوندگی توده‌سنگ درزه‌دار دارای ناپیوستگی‌های ناپایا با استفاده از مدل‌سازی هندسی تصادفی است. برای این منظور و اجتناب از ساده‌سازی‌های مرسوم و شناخت بهتر سازوکارهای خردشوندگی از مفاهیم آماری، تجربی، مبانی احتمالاتی و مطالعات آزمایشگاهی ابداعی برای در نظر گرفتن تاثیر رگچه‌ها، پل‌های سنگی و سطوح ضعف موجود در ماده سنگ، استفاده شده است.

هدف کلی از انتخاب موضوع تحقیق، ایجاد ابزاری برای برآورد خردشوندگی‌های سه‌گانه‌ی مورد بحث است. استفاده از مفاهیم، تجربی، تحلیلی، احتمالاتی و آماری با توجه به ماهیت توده سنگ و بلوک‌های سنگی برای برآورد هرچه بهتر تخریب‌پذیری و خردشوندگی ضروری است. از این ابزار در مراحل پیش امکان‌سنجی و امکان‌سنجی تخریب‌پذیری و خردشوندگی می‌توان بخوبی استفاده کرد.

برای تحقق موارد پیش گفته، ابتدا منابع مختلف و تحقیقات گذشته به طور کامل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در مورد مدل سازی هندسی ویژگی های آماری، توابع توزیع و روابط موجود در خصوص ویژگی های هندسی درزه ها و همچنین سایر پارامترهای مدل DFN بررسی و در نهایت مدل دو بعدی شبکه ناپیوستگی مجزا که به بهترین وجه قادر به شبیه سازی ویژگی های توده سنگ مورد نظر است، ساخته شده است.

پس از آن چگونگی فرآیند خردشوندگی و تخریب بر مبنای پتانسیل خردشوندگی بلوک ها به صورت روابط تجربی، تحلیلی و احتمالاتی مشخص شده است. در این تحقیق ناپیوستگی های دارای مقاومت کششی ناچیز و یا نزدیک به صفر، به عنوان ناپیوستگی های بالفعل معرفی شده است. این ناپیوستگی ها پس از برداشت از طریق پردازش تصاویر مغزه ها و برداشت مستقیم از سطح و تعیین مولفه های آماری آنها در مرحله مدل سازی هندسی اولیه، توسط مدل DFN ایجاد شده است.

از عوامل اصلی موثر در ایجاد خردشوندگی اولیه و ثانویه، وجود سطوح ضعف در داخل بلوک - هاست که ناپیوستگی بالقوه نامیده می شود. این سطوح باید در مرحله اول برداشت شود - برداشت این عوارض معمولاً از روی گمانه های ژئوتکنیکی میسر است - پس از آن مدل سازی هندسی آنها با توجه به توزیع آماری، همانند سطوح ناپیوستگی اصلی انجام شده است.

تحلیل خردشوندگی اولیه و ثانویه، با استفاده از مدل های آماری بر اساس مفاهیم تجربی و تحلیلی با توجه به پتانسیل های بلوک سنگ برای خرد شدن به اجزای کوچکتر، انجام شده است.

## ۱-۶- فرضیات تحقیق

- در راستای انجام تحقیق فرضیات زیر در نظر گرفته شده است.
- از انواع ناپیوستگی های توده سنگ فقط درزه ها در نظر گرفته می شود.
- برای تهیه مدل هندسی توده سنگ، پارامترهای جهت، جهت شیب، فاصله داری، پایایی و بازشدگی از میان پارامترهای هندسی درزه، در نظر گرفته می شوند.
- رخداد ناپیوستگی در یک، دو یا سه بعد تصادفی فرض می شود.

- ناپیوستگی‌ها در دو بعد، خطوط اثر<sup>۱</sup>، از نظر طول دارای توزیع‌های آماری خاصی هستند که می‌توانند توسط توابع پیوسته‌ای مانند توزیع‌های یکنواخت، نمایی منفی، نرمال و لاگ‌نرمال مشخص شوند.
- برای توصیف آماری ویژگی‌های درزه توابع توزیع موجود استفاده می‌شود.
- جنس ماده‌سنگ در توده‌سنگ ثابت در نظر گرفته خواهد شد.
- ناپیوستگی‌ها مسطح (بدون انحنا) فرض می‌شوند.
- سطوح ضعف در داخل ماده سنگ مفروض است و دلیل اصلی برای خرد شدن بلوک‌ها به ابعاد کوچکتر، فرض می‌شود.
- میدان تنش‌ها ناشی از تنش‌های برجا و تنش‌های القایی بعد از ایجاد زیربرش در نظر گرفته می‌شود.
- پس از ایجاد خردشوندگی اولیه، بعد از حرکت کلی توده سنگ وضعیت تنش شامل تنش افقی صفر و تنش قائم برابر با تنش ثقلی خواهد بود.
- در مرحله حرکت آهسته مواد، تنش‌های افقی صفر فرض خواهد شد و تنها مواد تحت تنش ثقلی جابجا می‌شود.
- اثرات مستقیم آب زیرزمینی (به ویژه فشار منفذی) در حل مساله منظور نمی‌شود.

## ۷-۱- جنبه‌های نوآوری تحقیق

تا به امروز کاربردهای نسبتاً محدودی از روش‌های شبیه سازی ناپیوستگی‌های گسسته برای مسایل مهندسی سنگ در ارتباط با توده‌سنگ‌های درزه‌دار وجود داشته است. اکثر مدل‌های تولید شبکه درزه به‌طور کافی برای کاربردهای مهندسی گوناگون تطبیق داده نشده‌اند. همچنین به موضوع سطوح ضعف و تاثیر زیاد آنها در میزان خردشوندگی اولیه و ثانویه در فرآیند تخریب بلوکی به صورت



مشخص و با کمی سازی این نوع از ناپیوستگی‌ها پرداخته نشده است. بنابراین مهمترین جنبه‌های نوآوری تحقیق در این رساله عبارت است از:

- معرفی مفهوم ناپیوستگی‌های بالقوه و ابداع روشی برای کمی‌سازی مقادیر مقاومت آن به صورت نسبتی از مقاومت ماده سنگ
- در نظر گرفتن ناپیوستگی‌های بالفعل و بالقوه در مدل‌سازی هندسی به منظور تحلیل هرچه بهتر شرایط تخریب و خردشوندگی
- تهیه برنامه کامپیوتری کاربردی برای پردازش تصاویر مغزه‌های حفاری با هدف ثبت نگاره‌های موجود در مغزه‌های حفاری از جمله تعیین میزان شدت درزه‌داری خطی ( $P_{10}$ ) و شاخص کیفیت سنگ (RQD)
- تعیین میزان خردشدگی برجا با استفاده از تهیه برنامه‌ی کامپیوتری برای مدل کردن ناپیوستگی‌ها به روش شبکه ناپیوستگی گسسته و محاسبات مربوط به توزیع ابعاد بلوک‌های برجا
- استفاده از شاخص‌های تجربی و تحلیلی موجود و پذیرفته شده مانند نظرات و تجربیات لابسچر برای تهیه برنامه‌ی کامپیوتری تحلیل خردشوندگی اولیه و ثانویه.

## ۱-۸- ساختار رساله

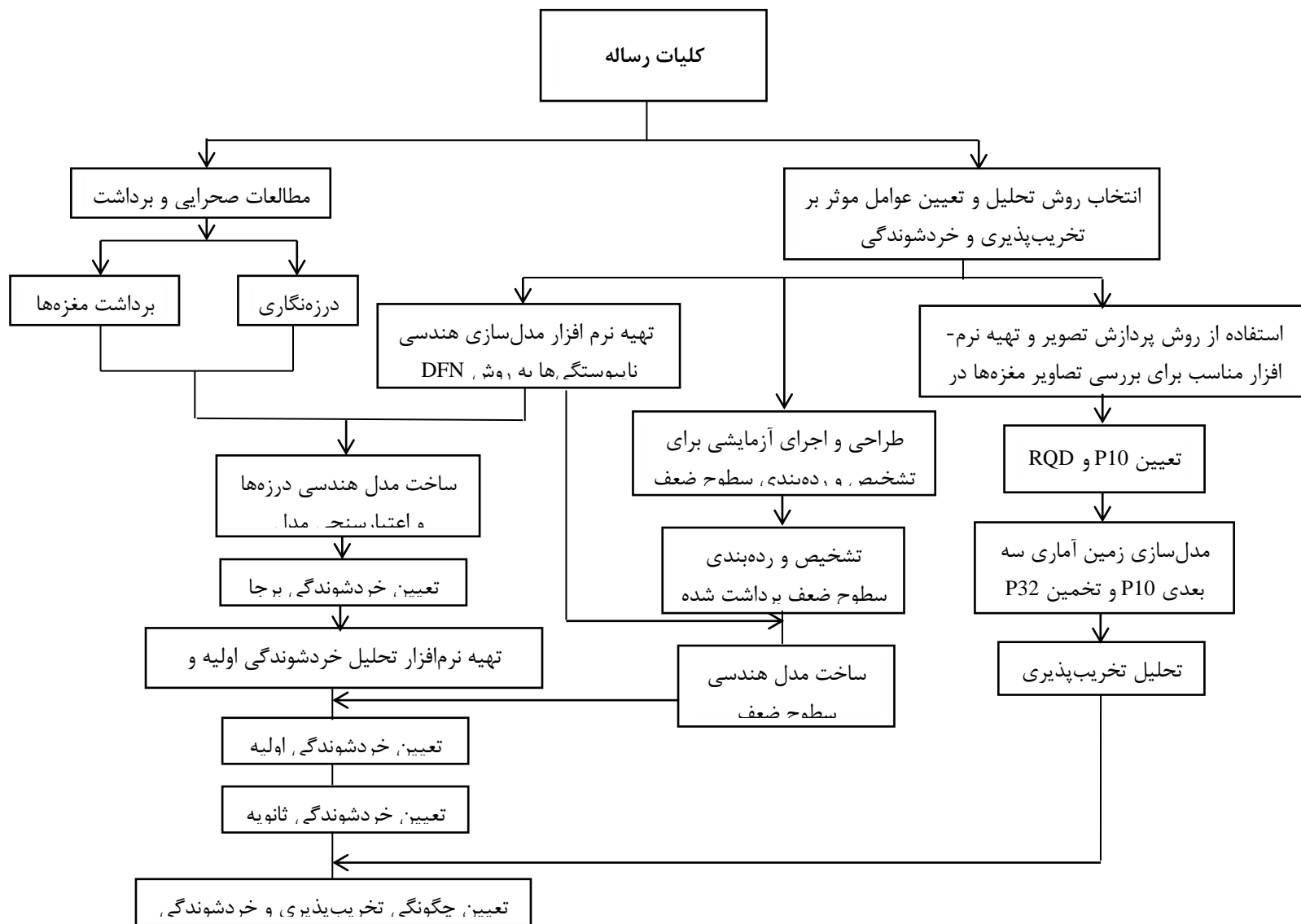
همانطور که مشاهده شد در فصل اول، نخست روش استخراج تخریب توده‌ای معرفی شده است، و تعاریف و مفاهیم اصلی تخریب پذیری ارائه شده است. سپس به ترتیب به طرح مسئله و ضرورت انجام تحقیق، اهداف و روش تحقیق، فرضیات تحقیق، جنبه‌های نوآوری تحقیق و در نهایت ساختار رساله پرداخته شد. در فصل دوم به تعاریف، مفاهیم و عوامل موثر بر تخریب‌پذیری و خردشوندگی پرداخته شده است. در ادامه از دیدگاه برخی از محققان نحوه‌ی کمی‌سازی برخی از

عوامل موثر بر خردشوندگی ثانویه ارایه شده است. در فصل سوم پیشینه‌ی تحقیقات و مطالعات تخریب‌پذیری و خردشوندگی، به تفکیک دو روش عمده‌ی تجربی و عددی مرور شده است. فصل چهارم شامل مباحث تشخیص ناپیوستگی‌های بالفعل و سطوح ضعف با استفاده از روش پردازش تصاویر مغزه و برداشت آنها و ارایه روشی برای کمی‌سازی سطوح ضعف و دسته‌بندی آنها به عنوان ناپیوستگی‌های بالقوه است. در این فصل در ابتدا به مباحث مربوط به پردازش تصویر، تعاریف و مفاهیم آن پرداخته شده است، سپس برنامه کامپیوتری کاربردی نوشته شده به منظور پردازش تصاویر مغزه‌های حفاری، معرفی شده است. در ادامه برداشت‌های انجام شده از مغزه‌های حفاری اکتشافی مورد مطالعاتی برای تعیین سطوح ضعف (ناپیوستگی‌های بالقوه) به اختصار ارایه شده است و در نهایت به شرح روشی ابداعی برای کمی‌سازی و دسته‌بندی سطوح ضعف موجود در بلوک‌های سنگی پرداخته شده است.

در فصل پنجم به مبحث مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌های گسسته پرداخته شده است، در بخش اول این فصل، مولفه‌های هندسی مورد نظر برای ساخت مدل هندسی تصادفی دسته درزه‌ها معرفی و روش‌های اصلی برداشت و تجزیه و تحلیل آنها بیان شده است. در بخش بعدی پیشینه و انواع اصلی مدل‌های هندسی ناپیوستگی‌ها و همچنین جایگاه مدل‌سازی تصادفی ناپیوستگی‌های ناپایا، بصورت مختصر مرور شده است. سپس الگوریتم تهیه مدل شبکه ناپیوستگی گسسته و برنامه‌ی کامپیوتری تهیه شده به نام CAV-DFN<sup>2D</sup> معرفی شده است، در نهایت قابلیت‌ها و توانایی‌های این نرم‌افزار به عنوان ابزاری برای تهیه‌ی مدل‌های پایه‌ی خردشدگی برجا و مدل‌سازی سطوح ضعف به منظور استفاده در تحلیل‌های خردشوندگی اولیه و ثانویه معرفی شده است.

در فصل ششم به موضوع تحلیل تخریب‌پذیری و خردشوندگی توده سنگ پرداخته شده است. این فصل در واقع شامل خروجی تمامی برداشت‌ها از ابزارهای نرم‌افزاری تهیه شده برای تحلیل تخریب‌پذیری و خردشوندگی است. در بخش اول، تخریب‌پذیری توده سنگ معدن مس کهننگ برمبنای شدت درزه‌داری حجمی برآورد شده است در این بخش خروجی پردازش تصاویر مغزه‌ها

شامل (RQD و  $P_{10}$ ) با استفاده از روش زمین آمار در حجم توده به صورت سه بعدی تخمین زده شده است. بخش بعد شامل برآورد خردشدگی برجای توده سنگ منطقه براساس برداشت‌های ناپیوستگی انجام شده و مدل‌سازی هندسی آن‌ها با نرم‌افزار  $CAV-DFN^{2D}$  است. همچنین مولفه‌های هندسی برداشت شده از سطوح ضعف در مغزه‌ها نیز ارایه شده و مدل هندسی آن تهیه شده است. از خروجی‌های هندسی این بخش در تحلیل خردشوندگی اولیه و ثانویه استفاده شده است. بخش بعدی شامل معرفی و کمی‌سازی شاخص‌های در نظر گرفته شده برای تحلیل خردشوندگی اولیه و ثانویه است که در آن برنامه‌ی تهیه شده برای تحلیل خردشوندگی اولیه و ثانویه به نام PSF معرفی شده است. نتایج یک مدل ساخته شده براساس مشخصات و فرضیات در نظر گرفته شده برای توده سنگ معدن کهنک به عنوان یک مورد عملی کار با این نرم‌افزار ارایه شده است. در آخرین فصل نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادات مطرح شده است. براساس آنچه گفته شد، روندنمای مباحث پایان نامه بصورت زیر است:



شکل ۱-۲: روندنمای مباحث رساله

## فصل دوم

۲- تعاریف، مفاهیم و عوامل موثر بر تخریب پذیری و خردشوندگی

## ۱-۲ - مقدمه

توسعه‌ی معدن روباز برای استخراج کانسارهای توده‌ای در عمق به دلایل متعدد ممکن نیست زیرا افزایش هزینه‌های توسعه‌ی کاواک، معدن‌کاری را غیراقتصادی خواهد کرد. به همین دلیل بسیاری از شرکت‌ها برای افزایش عمر بهره‌برداری از معادنشان تصمیم گرفته‌اند که استخراج ذخایر باقی‌مانده توده‌ای را با روش تخریب توده‌ای ادامه دهند. نخستین گام در امکان‌سنجی استفاده از روش‌های تخریبی، پس از در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به ابعاد، شکل و عمق کانسار، تعیین قابلیت تخریب یا همان تخریب‌پذیری توده‌سنگ و سنگ‌های فراگیر آن است. به عبارت دیگر عوامل مؤثر بر تخریب و خردشوندگی مناسب باید مشخص و بررسی شود. این عوامل توسط محققان مختلف دسته‌بندی و بیان شده‌اند.

تخریب‌پذیری کانسار به عوامل زیادی هم چون طبیعت یا زمین‌شناسی کانسار بستگی دارد. عواملی مانند مقاومت سنگ بکر، فراوانی درزه‌داری و ناپیوستگی‌ها، شرایط آب زیرزمینی، تنش‌ها و ... در موفقیت عملیات تخریب سهمیم هستند و برای تعیین قابلیت تخریب، آگاهی در مورد این عوامل ضروری است.

## ۲-۲ - عوامل مؤثر بر عملیات تخریب در کانسارهای توده‌ای

برای داشتن عملیات تخریب مناسب و موفق، نیاز به شناخت و فهم صحیح از ماده‌ی معدنی و سنگ فراگیر آن است. لابسچر<sup>۱</sup> (۱۹۹۴) ۲۵ پارامتر را به‌عنوان مولفه‌های اصلی مؤثر بر تخریب‌پذیری و خردشوندگی که قبل از اجرای معدن‌کاری به روش تخریب توده‌ای باید بررسی شوند، معرفی کرده است. این پارامترها در جدول ۱-۲ ارائه شده است.

---

1 - Laubscher

جدول ۱-۲: مولفه‌های اصلی و عوامل موثر بر آنها در برآورد تخریب پذیری (Laubscher, 1994)

|   |  |  |
|---|--|--|
| قابلیت تخریب  | خردشوندگی اولیه  | فاصله‌داری دهانه‌های تخلیه   |
| مقاومت توده‌سنگ (RMR و یا MRMR)   | مقاومت توده‌سنگ (RMR و یا MRMR)<br>ساختارهای زمین‌شناسی<br>فاصله‌داری درزه/خردشوندگی<br>امتیازات شرایط درزه<br>تخریب حاصل از تنش یا نشست<br>تنش‌های القایی | خردشوندگی<br>بار و جهت روباره<br>زاویه‌ی اصطکاک قطعات تخریبی<br>اندازه‌ی حفاری تجربی<br>پایداری توده‌سنگ میزبان و یا MRMR آن<br>تنش‌های القایی |
| ارتفاع تخلیه  | جانمایی  | قابلیت ترکیدن سنگ  |
| راس<br>هندسه‌ی کانسار<br>پایداری حفریات   | خردشدگی<br>اندازه و فاصله‌داری نقاط تخلیه<br>روش تخلیه   | تنش‌های منطقه و القایی<br>مقاومت/مدول توده‌سنگ<br>ساختارها<br>توالی معدنکاری   |
| توالی (انتخاب محل استخراج)  | توالی زیربری   | تنش‌های القایی تخریب   |
| قابلیت تخریب<br>هندسه‌ی کانسار<br>تنش‌های القایی<br>محیط زمین‌شناسی<br>قابلیت ترکیدن سنگ<br>ملزومات تولید<br>تاثیر عملیات مجاور<br>شدت جریان ورودی آب | تنش‌های منطقه<br>مقاومت توده‌سنگ<br>قابلیت ترکیدن سنگ<br>سرعت پیشروی<br>ملزومات ماده‌ی معدنی   | تنش‌های منطقه<br>سطح زیربرش<br>شکل زیربرش<br>سرعت زیربری<br>سرعت تخلیه   |
| چالزنی و آتشباری  | آماده‌سازی   | پایداری حفاری  |
| مقاومت توده سنگ<br>خرج ویژه<br>پایداری توده سنگ<br>خردشوندگی مورد نیاز<br>ارتفاع زیربرش   | جانمایی<br>توالی<br>تولید<br>چالزنی و آتشباری  | مقاومت توده سنگ<br>تنش‌های منطقه و القایی<br>قابلیت ترکیدن سنگ<br>اندازه‌ی حفاری<br>ارتفاع تخلیه<br>توالی معدنکاری                             |
| نگهداری اولیه   | اندازه‌ی عملی حفریات   | روش تخلیه  |
| پایداری حفاری<br>قابلیت ترکیدن سنگ<br>پایداری پیشانی  | مقاومت توده‌سنگ<br>تنش‌های برجا<br>تنش‌های القایی<br>تنش‌های تخریبی<br>آتشباری ثانویه  | خردشوندگی<br>فاصله‌داری عملی نقاط تخلیه<br>اندازه‌ی عملی حفریات  |
| سرعت تخلیه  | اندرکنش نقاط تخلیه   | تنش‌های ستون تخلیه   |

|  |  |  |
|--|--|--|
| <p>ارتفاع ستون تخلیه<br/>خردشوندگی<br/>همگنی خردشوندگی ماده‌ی معدنی<br/>کنترل تخلیه<br/>اندرکنش تخلیه- ارتفاع<br/>نسبت ارتفاع به عرض<br/>جهت تخلیه</p>   | <p>فاصله‌داری نقاط تخلیه<br/>خردشوندگی<br/>زمان کاری نقاط تخلیه</p>                                      | <p>خردشدگی<br/>روش تخلیه<br/>درصد گیرکردن مواد<br/>ملزومات شکستن ثانویه</p>  |
| اختلاط   | آتشباری ثانویه   | خردشوندگی ثانویه   |
| <p>هندسه‌ی کانسار<br/>توزیع دانه‌بندی<br/>محدوده‌ی دانه‌بندی مورد انتظار خردشدگی<br/>در باطله و ماده‌ی معدنی<br/>توزیع عیار قبل و بعد از اختلاط<br/>توزیع کانی در ماده‌ی معدنی<br/>اندرکنش دهانه‌های تخلیه<br/>شکستگی ثانویه<br/>کنترل تخلیه</p> | <p>خردشوندگی ثانویه<br/>روش تخلیه<br/>اندازه‌ی دهانه‌های تخلیه<br/>اندازه‌ی تجهیزات و فاصله‌ی گریزلی</p> | <p>شکل بلوک- سنگ<br/>ارتفاع تخلیه<br/>سرعت تخلیه- گسیختگی وابسته به زمان<br/>قابلیت کار بلوک- سنگ<br/>محدوده‌ی اندازه‌ی خردشوندگی<br/>برنامه‌ی کنترل تخلیه</p> |
| استحصال عیار و یا کانسنگ   | اصلاح نگهداری  | حجم تخلیه  |
| <p>توزیع کانی<br/>روش تخلیه<br/>نرخ تخلیه<br/>درصد اختلاط<br/>افت ماده‌ی معدنی</p>   | <p>تناژ تخلیه<br/>ستون و نقطه‌ی بارگذاری<br/>فرسایش پیشانی<br/>تعمیر کف<br/>آتشباری ثانویه</p>           | <p>فاصله‌داری دهانه‌های تخلیه<br/>فاصله‌ی طبقات<br/>درصد اختلاط</p>  |
|  |  | نشست   |
|  |  | <p>ساختارهای اصلی زمین‌شناسی<br/>مقاومت توده‌سنگ<br/>تنش‌های القایی<br/>عمق معدنکاری</p>   |

## ۲-۳- خردشوندگی سنگ

تخمین خردشوندگی سنگ در تخریب، نیازمند درک صحیح از خردشوندگی طبیعی توده‌سنگ و فرآیند خردشوندگی است که در طول ستون تخلیه اتفاق می‌افتد. همانگونه که در فصل اول اشاره شد، به‌طور کلی سه سطح خردشوندگی تعریف شده است که عبارتند از: خردشدگی برجا، خردشوندگی

اولیه و خردشوندگی ثانویه. (Laubscher, 2000; Brown, 2003)



با توجه به تعاریف ارائه شده خردشدگی برجا در زمان مدل‌سازی هندسی ناپیوستگی‌ها در توده سنگ همان‌گونه که در فصل اول بیان شد، در نظر گرفته خواهد شد. بنابراین در گام بعدی تحلیل خردشوندگی اولیه و ثانویه مدنظر است.

### ۲-۳-۱- خردشوندگی اولیه

نتایج تخریب در خردشوندگی اولیه به صورت اندازه بلوک‌هایی که از توده‌سنگ جدا شده و وارد ستون تخلیه می‌شوند، تعریف می‌شود.

در عملیات تخریب، چگونگی خردشوندگی بر موارد ذیل تاثیر می‌گذارد (Laubscher, 2000):

- فاصله‌داری نقاط تخلیه
  - اختلاط ماده معدنی و باطله در ستون تخلیه
  - چگونگی کنترل تخلیه
  - تولید در نقاط تخلیه
  - هزینه‌های آتشکاری ثانویه
- پارامترهایی که به منظور تحلیل خردشوندگی اولیه مورد نیاز است شامل موارد ذیل است (Laubscher, 2000):

### ۲-۳-۱-۱- ویژگی‌های توده سنگ

- برای انجام یک تحلیل موفقیت‌آمیز خردشوندگی نکات ذیل باید مورد توجه قرار گیرد:
- لزوم مشخص شدن مقادیر<sup>۱</sup> IRMR کانسنگ و کمربالا حداقل تا دو برابر ارتفاع کانسنگ
  - لزوم ناحیه‌بندی مناطقی دارای مقادیر IRMR با دامنه تغییرات بزرگتر از ۱۰
  - لزوم لحاظ کردن این نکته که نواحی دارای امتیاز پایین در داخل ناحیه دارای امتیاز بالا می‌تواند منجر به شکست بهتری در ترازهای تنش پایین‌تر شود.

- لزوم شناخت و تفسیر درست اطلاعات زمین‌شناسی برای ورود به تحلیل
- حایز اهمیت بودن اطلاع از مقادیر IRMR<sup>۱</sup> و RMS<sup>۱</sup> که مقاومت کلی توده سنگ را تعریف می‌کند و مقدار RBS<sup>۲</sup> که بیان‌کننده مقاومت بلوک سنگی است.
- لزوم شناخت شرایط درزه که در واقع مقدار مشخصات اصطکاکی درزه را نشان می‌دهد.
- لزوم تشخیص میان لایه‌های نازک که اثر چشم‌گیری بر مقاومت سنگ دارد، به عنوان مثال ترک‌های آزبستی<sup>۳</sup> و سرپانتینی<sup>۴</sup> در دونیت<sup>۵</sup> مقاومت آن را از ۱۲۰ MPa به ۳۰ MPa کاهش می‌دهد.

### ۲-۱-۳-۲- مقاومت سنگ سالم

مقدار مقاومت سنگ سالم، باید به صورت مقداری میانگین محاسبه شود و از نمونه‌هایی که ارایه‌دهنده قوی‌ترین بخش‌های سنگ است، نباید استفاده شود.

همچنین بخش‌هایی از بلوک سنگی که دارای اجزای ضعیف هستند، معمولاً برای تعیین مقاومت سنگ سالم بکار نمی‌روند.

### ۳-۱-۳-۲- ساختارهای زمین‌شناسی و نواحی درزه‌دار

وجود اطلاعات مناسب از ساختارهای اصلی و فرعی ضروری است. ساختارهای اصلی محدودیت‌ها را تعریف می‌کنند و بر خردشوندگی اولیه تاثیر می‌گذارند. اطلاعات درزه نقش مهمی در تحلیل خردشوندگی دارند. فاصله‌داری کمینه و بیشینه درزه‌ها نیز همچنین پارامترهایی بحرانی هستند و ابعاد نهایی را مشخص می‌کنند. برای مثال، فاصله‌داری متوسط ۱ متر با کمینه ۰/۵ متر و بیشینه ۱/۵ متر بدین معنی است که بزرگ‌ترین بلوک احتمالاً کمتر از ۳ مترمکعب است، درحالی‌که اگر بیشینه ۳ متر باشد، آنگاه بزرگ‌ترین بلوک می‌تواند ۲۴ مترمکعب باشد.

---

1- Rock Mass Strength  
 2- Rock Block Strength  
 3- Asbestos  
 4- Serpentine  
 5- Donite

## ۲-۳-۱-۴- تعداد و فاصله‌داری دسته درزه‌ها

فاصله‌داری درزه‌ها در داخل کانسنگ به صورت نواحی مختلف باید تعریف شود. با تعریف نواحی مختلف، تحلیل خردشوندگی دقیق‌تر می‌شود. در صورت در نظر گرفتن مقدار متوسط فاصله‌داری درزه برای تمام کانسنگ، ارزیابی خردشوندگی کلی ممکن است به دور از واقعیت تخمین زده شود.

## ۲-۳-۱-۵- امتیاز شرایط درزه

امتیاز شرایط درزه باید برای هر دسته درزه به‌طور جداگانه تعیین شود. یک دسته درزه با امتیاز پایین‌تر همیشه قبل از مابقی دسته درزه‌ها تمایل به شکست دارد و مرزهای بلوک اولیه را تشکیل خواهد داد.

## ۲-۳-۱-۶- اثر تنش

تنش القایی در ناحیه باریکی پشت جبهه تخریب ایجاد می‌شود. این تنش که مقدار آن  $0/5$  تا  $2$  مگاپاسکال است، فقط در صورتی که جبهه تخریب در جهت ثقل باشد، دارای اهمیت خواهد بود. خردشوندگی اولیه ناشی از گسترش عمودی تخریب به‌طور کلی بهتر از خردشوندگی ناشی از گسترش جانبی تخریب است، زیرا در این حالت شکست نه تنها در طول درزه‌ها اتفاق می‌افتد بلکه اغلب بلوک‌های سنگی نیز تحت اثر تنش بالا قرار خواهند گرفت. گسترش جانبی تخریب در محیط دارای تنش پایین و یا در ناحیه مجاور عملیات تخریب ممکن است منجر به شکست در طول درزه‌های با فاصله‌داری زیاد و تشکیل بلوک‌های بزرگ شود.

ممکن است تغییراتی در خردشوندگی اولیه در پشت ناحیه تخریب در نتیجه اختلافات در تنش و یا تغییرات در ویژگی‌های توده‌سنگ بوجود آید. این موضوع همچنین برای ناحیه کمربالا نیز صادق است. دسترسی دقیق به بزرگی تنش‌های تعریف شده بسیار مهم است. مدل‌سازی عددی می‌تواند برای تحلیل وضعیت پشت ناحیه تخریب بکار رود.

## ۲-۳-۱-۷- جهت و شیب جبهه تخریب

جهت جبهه تخریب، نحوه گسترش تخریب را تغییر نخواهد داد. جهت جبهه تخریب که درزه‌ها و تنش‌ها بر آن اثر می‌گذارند، تاثیر مهمی بر خردشوندگی اولیه دارد. شیب جبهه تخریب می‌تواند از یک مقدار کم در شروع فرآیند تخریب تا مراحل آخر آن که تخریب تا سطح می‌رسد، تغییر کند. پیشروی زیربرش در جهت تنش‌های اصلی منجر به تنش‌های پایه‌ای<sup>۱</sup> قابل توجه می‌شود که در نهایت بر تخریب تاثیر گذاشته و خردشوندگی اولیه را بهبود می‌بخشد، اما در عین حال ممکن است منجر به تخریب سطوح تولید و زیر برش شود. با احداث زیربرش‌های پیشرونده می‌توان از بروز برخی از این مشکلات جلوگیری کرد.

## ۲-۳-۱-۸- نرخ تخلیه<sup>۲</sup>

نرخ تخلیه عامل مهمی است که فضای لازم را برای تخریب فراهم می‌کند. نرخ تخلیه نباید به قدری سریع باشد که ایجاد فضای خالی<sup>۳</sup> و انفجار هوا نماید. نرخ تخلیه کم، خردشوندگی را بهبود می‌بخشد.

## ۲-۳-۲- خردشوندگی ثانویه

خردشوندگی ثانویه به عنوان کاهش در اندازه ذرات حاصل از خردشوندگی اولیه در نتیجه حرکت به سمت پایین آنها از طریق ستون تخلیه تعریف می‌شود. فرآیندهایی که بلوک سنگی در معرض آن قرار می‌گیرد، توزیع اندازه ذرات را در نقاط تخلیه تعیین می‌کنند. توده سنگ دارای درزه‌داری خوب و مقاومت بلوک سنگی بالا می‌تواند در ارتفاع تخلیه کم به شکل ذرات پایدار منجر شود. تغییرات گسترده در فراوانی درزه منجر به تغییرات گسترده در اندازه خردشوندگی خواهد شد. مواد ریز تولید شده به صورت یک بالشتک برای بلوک‌های بزرگتر عمل می‌کنند و از ساییدگی<sup>۴</sup>

---

1 - Abutment stresses  
2 - Draw Rate  
3- air gap  
4 - attrition

بیشتر این بلوک‌ها جلوگیری می‌کنند. از آنجا که تنش‌های تخریبی (تنش تخریبی به صورت بار  
تحمیلی بر روی ذرات پایدار<sup>۱</sup> توسط بارگذاری مستقیم یا تاقی شکل مواد تخریب شده، تعریف  
می‌شود) بر ذرات در ستون تخلیه اعمال می‌شود، نرخ تخلیه کم، احتمال شکست بیشتر وابسته به  
زمان را افزایش می‌دهد. خردشوندگی ثانویه عامل اصلی تعیین قابلیت تولید نقاط تخلیه است.

شناسایی و برآورد عوامل ذیل برای تعیین خردشوندگی ثانویه ضروری است ( Laubscher, )

:2000

- شکل بلوک سنگی
- مقاومت بلوک سنگ-RBS<sup>۲</sup>
- ارتفاع ستون تخلیه<sup>۳</sup> و فشار تخریب<sup>۴</sup>
- نرخ تخلیه<sup>۵</sup>
- ایجاد تنش‌های اضافی بدلیل بروز پدیده تاق زدگی<sup>۶</sup>
- عملکرد بالشتکی<sup>۷</sup> ذرات ریز<sup>۸</sup>

### ۲-۳-۳- مفاهیم و کمی‌سازی مولفه‌های موثر بر خردشوندگی ثانویه

در ادامه مفاهیم مولفه‌های موثر بر خردشوندگی به همراه روابط کمی‌سازی آنها که توسط  
لابسچر و استرهویزن ارائه شده، بیان شده است.

### ۲-۳-۳-۱- شکل بلوک سنگی

این مفهوم به منظور تعیین میزان راحتی شکست یک بلوک تحت تاثیر فشارهای وارد بر آن در  
طول ستون تخلیه، تعیین شده است.

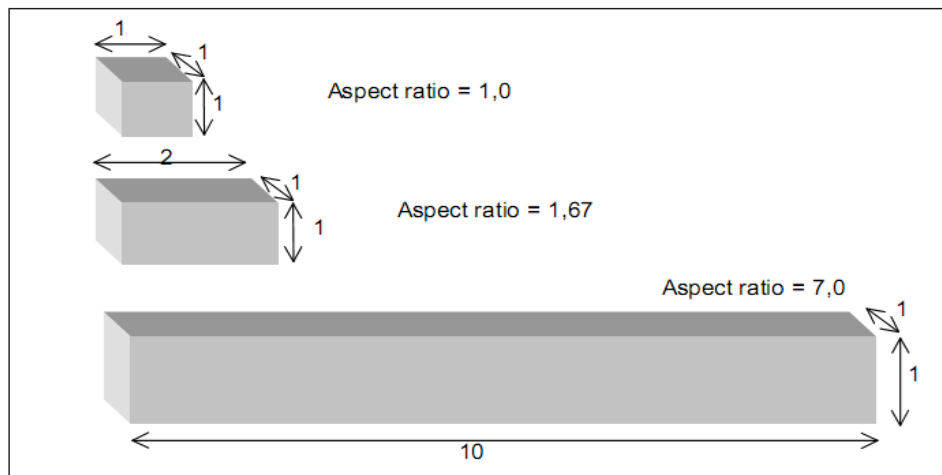
---

1 -Stationary  
2 -Rock Block Strength  
3 -Draw Height  
4 -Cave Pressure  
5 -Draw Rate.  
6 -Arching  
7 -Effect of cushioning  
8 -Fines

نرخ تناسب ظاهری یک بلوک در سه بعد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$W = (A/6V) \times l \quad (1-2)$$

در این رابطه  $A$  مساحت جانبی بلوک،  $V$  حجم بلوک و  $l$  طول بزرگترین یال بلوک است. این مفهوم در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است.



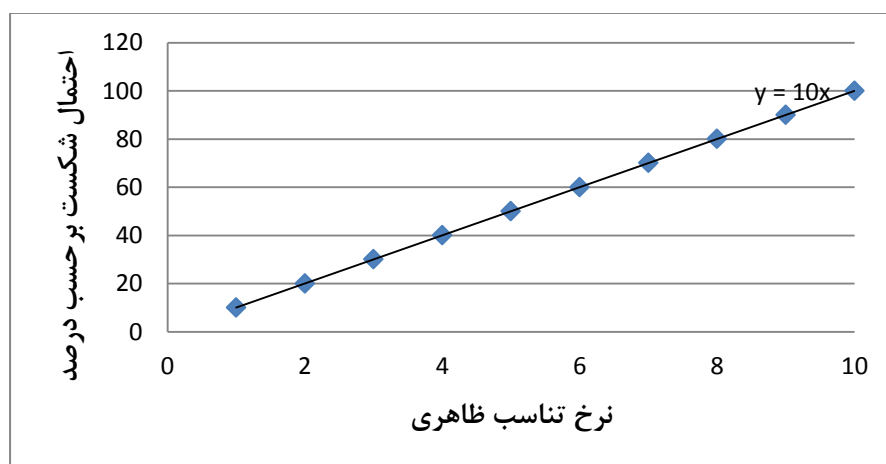
شکل ۱-۲ مفهوم نرخ تناسب ظاهری در سه بعد (Esterhuizen G. S, 2005)

تأثیر میزان تغییرات نرخ تناسب ظاهری بر احتمال شکست یک بلوک در یک ارتفاع چرخه در

نمودار شکل ۲-۲ نشان داده شده است (Esterhuizen G. S, 2005).

همان‌گونه که در این شکل ۲-۲ نشان داده شده است هر چه نرخ تناسب ظاهری به ۱۰ نزدیک

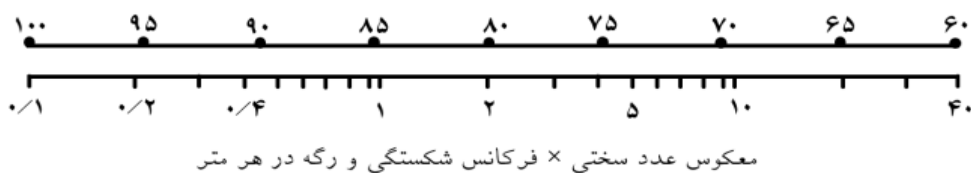
شود احتمال شکست در یک ارتفاع چرخه به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر خواهد شد.



شکل ۲-۲: تغییرات احتمال شکست بلوک نسبت به نرخ تناسب ظاهری

## ۲-۳-۳-۲- مقاومت بلوک

طبق نظر لابسچر در صورتی که بلوک سنگی دارای رگه و ناپیوستگی نبوده و همگن باشد مقدار مقاومت بلوک سنگی<sup>۱</sup> (RBS) برابر با ۸۰ درصد مقاومت سنگ بکر<sup>۲</sup> (IRS) در نظر گرفته خواهد شد. همچنین لابسچر فرض کرد اگر رگه و ناپیوستگی پر شده در سنگ موجود باشد، در این حالت مشخصات اصطکاکی نقش اساسی در مقاومت بلوک ایفا خواهد کرد. ماده پرکننده‌ی رگه و ناپیوستگی دارای یک عدد سختی در مقیاس موس است. بازه‌ی این مقیاس از یک تا ده تعریف شده است. اما مقادیر بزرگتر از پنج در محاسبات بی‌معنا است. برای ناپیوستگی‌ها و رگه‌های باز مقدار یک اختصاص می‌یابد. از ضرب عکس عدد سختی در فرکانس ناپیوستگی بر متر برای اصلاح مقاومت ماده سنگ استفاده شده است (Laubscher and Jakubec, 2001). نمودار ضریب تعدیل در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: نمودار تعیین ضریب تعدیل مقاومت ماده سنگ (IRS) (Laubscher and Jakubec, 2001)

## ۲-۳-۳-۳- فشار تخریب

این فشار بر مبنای ارتفاع وزن بار مرده‌ی حاصل از مواد تخریب شده در بالای نقطه‌ی تخلیه مواد از ستون تخلیه محاسبه می‌شود. این ارتفاع، ارتفاع تخریب<sup>۳</sup> نامیده شده است. ارتفاع تخریب، ارتفاعی است که اگر توده سنگ، تخریب شده و متورم گردد بتواند حجم خودش و حجم ستون تخلیه شده را پر کند. ارتفاع تخریب با استفاده از ارتفاع تخلیه<sup>۴</sup> و ضریب تورم<sup>۱</sup> توده سنگ طبق رابطه‌ی (۲-۲) قابل محاسبه است.

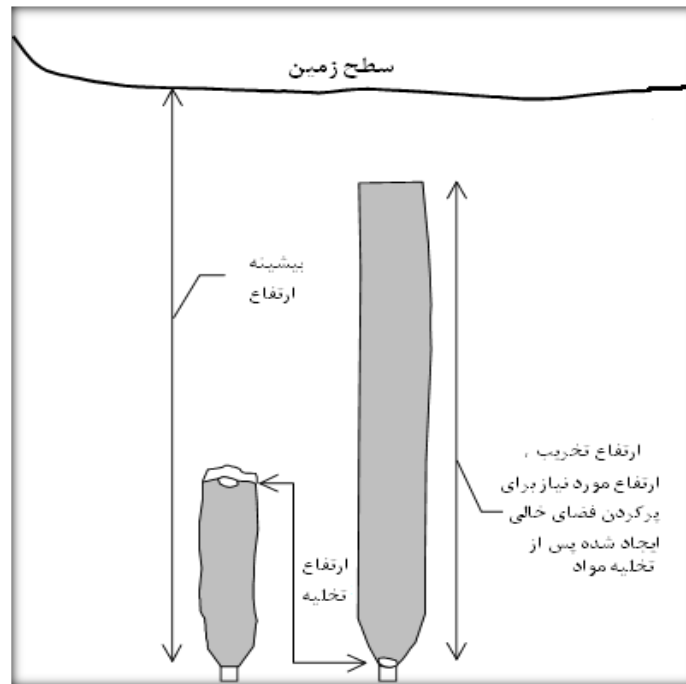
1 -Rock Block Strength.  
2 -Intact Rock Strength.  
3 -Cave Height  
4 -Draw Height

$$H_c = H_d / (1 - S_f)$$

(۲-۲)

در این رابطه  $H_c$  ارتفاع تخریب،  $H_d$  ارتفاع تخلیه و  $S_f$  ضریب تورم توده سنگ است.

میزان ضریب تورم، نسبت حجم سنگ پس از شکسته و جدا شدن به حجم سنگ برجا است. این عدد بزرگتر از واحد است. مفاهیم ارتفاع تخلیه و ارتفاع تخریب در شکل ۲-۴ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۲-۴ نمایی از مفاهیم ارتفاع تخلیه و ارتفاع تخریب

این فشار وابسته به نسبت عرض به ارتفاع فضای فعال تخلیه است. فضای فعال تخلیه عبارتست از تمام عرض بالای نقطه‌ی تخلیه مواد که در حال جابجایی و پایین آمدن است. با افزایش این عرض، فشار وارد بر کف ستون تخلیه افزایش خواهد یافت چراکه همواره بخشی از فشار ناشی از وزن مواد تخریب شده به دیواره‌های ستون تخلیه منتقل خواهد شد. بنابراین فشار در کف یک ستون تخلیه‌ی باریک کمتر از میزان فشار در کف یک ستون تخلیه‌ی عریض با همان مشخصات خواهد بود.



این مقادیر توسط لابسچر و برمبنای مدل‌های عددی ساخته شده توسط کرانزا<sup>۱</sup> برای شکل کف ستون تخلیه‌ی مربع مستطیل در جدول ۱-۲ ارایه شده است (Carranza-Torres, 1998).

براساس نظر این محققان میزان فشار وارد بر کف ستون تخلیه برای نسبت‌های عرض به ارتفاع بالای ۵ تقریباً ثابت و برابر ۱۸ درصد وزن بار مرده مواد تخریب شده خواهد بود.

نتایج ارایه شده در جدول ۱-۲ به صورت نمودار برازش داده شده و رابطه‌ی آن در شکل ۵-۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲-۲: تغییرات فشار وارد بر کف ستون تخلیه براساس تغییرات نسبت عرض به ارتفاع

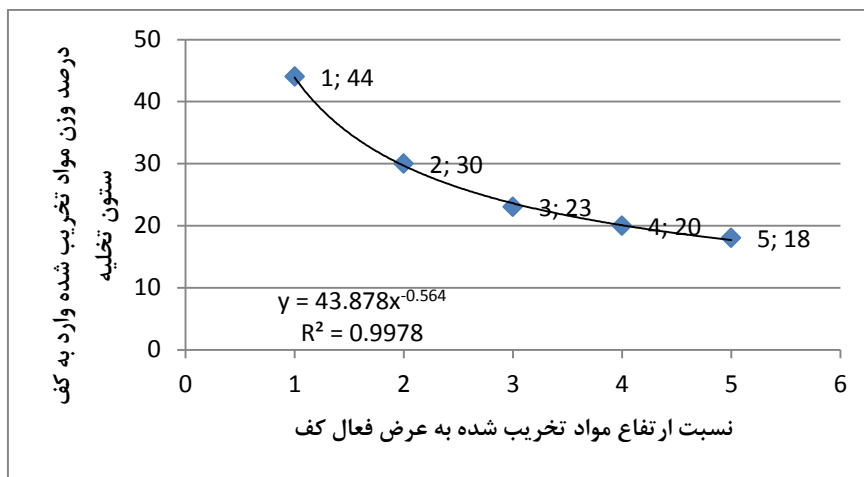
| درصد فشار وارد به کف ستون | نسبت ارتفاع مواد تخریب شده به عرض فعال کف |
|---------------------------|---|
| ۴۴                        | ۱   |
| ۳۰                        | ۲   |
| ۲۳                        | ۳   |
| ۲۰                        | ۴   |
| ۱۸                        | ۵   |

#### ۲-۳-۳-۴- نرخ تخلیه

نرخ تخلیه‌ی مواد خردشده، زمان ماند مواد در داخل ستون تخلیه را مشخص می‌نماید. نرخ تخلیه‌ی سریعتر بلوک‌های سنگی با ابعاد بزرگتر و خردشدگی کمتر را در پی خواهد داشت. برای در نظر گرفتن تاثیر نرخ تخلیه بر میزان خردشوندگی همانگونه قبلاً اشاره شد ضریب نرخ تخلیه (Fr) توسط استرهویزن در رابطه‌ی محاسبه‌ی ارتفاع لازم که باید یک بلوک در طول ستون تخلیه طی کند تا بشکند، لحاظ شده است. این ضریب طبق رابطه‌ی (۳-۲) تعریف شده است:

$$Fr = 0.66e^{0.023d} \quad (3-2)$$

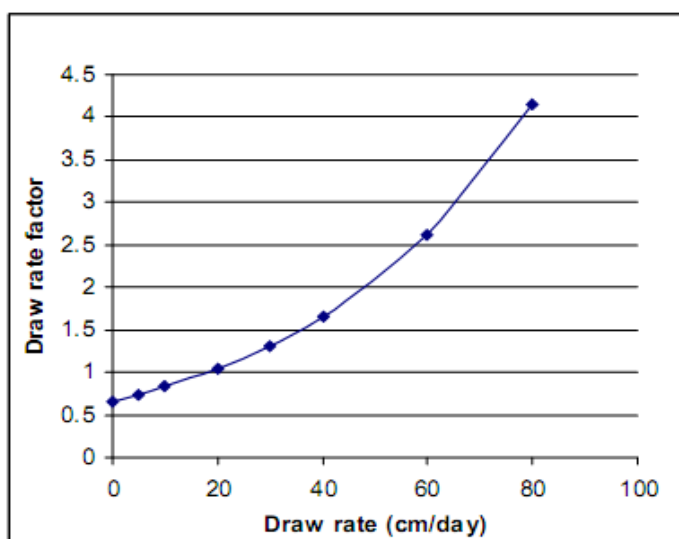
در این رابطه d مقدار سرعت نرخ تخلیه برحسب سانتیمتر بر روز (cm/day) است. طبق رابطه-۳-۲ هر چه نرخ تخلیه کندتر (زمان ماند بیشتر در ستون تخلیه)، ارتفاع لازم برای شکست بلوک سنگی کمتر خواهد بود. نمودار رابطه‌ی نرخ تخلیه و ضریب نرخ تخلیه در شکل ۶-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۵: تغییرات فشار وارد بر کف ستون تخلیه براساس تغییرات نسبت عرض به ارتفاع

به عنوان مثال نرخ تخلیه‌ی ۳۰ سانتیمتر در روز نسبت به نرخ تخلیه‌ی ۲۰ سانتیمتر در روز،

ارتفاع لازم را ۳۰ درصد افزایش خواهد داد.



شکل ۲-۶: تغییرات ضریب نرخ تخلیه نسبت به تغییرات نرخ تخلیه

### ۲-۳-۳-۵- پدیده‌ی تاق زدگی (پل زدگی)

اگر سرعت تخلیه کمتر از سرعت پایین آمدن مواد باشد، مواد تخریب شده بر روی هم انباشته شده، دوباره حالت فشرده پیدا می‌کنند. به این منطقه‌ی جدید فشرده که شامل سنگ‌های خردشده‌ی در هم قفل شده است، تاق می‌گویند. پل‌ها در صورتی که مقاومت سنگ کافی باشد پایدار خواهند شد.

در هر صورت در اکثر مواقع تاق‌های موقت در طول ستون تخلیه تشکیل خواهند شد. این تاق-ها زمانیکه یکی از بلوک‌های واقع در آن‌ها در اثر انباشته شدن مواد خردشده پشت آن و بالارفتن تنش در تاق شکسته شده و یا بلغزد، از بین خواهند رفت. برای این‌که شکست بلوک در این منطقه اتفاق بیافتد می‌بایست فشار موجود در محل تاق بیشتر از مقاومت بلوک سنگی باشد. در این حالت فرض می‌شود که تنش‌های موجود در بخش تاق بیشتر از فشار مواد تخریب شده‌ی پشت آن باشد زیرا در این منطقه بخشی تماس بین بلوک‌ها به صورت نقطه‌ای است (Esterhuizen, 2005).

طبق نظر لابسچر و استرهویزن حداکثر ۱۲ درصد از بلوک‌های سنگی موجود در ستون تخلیه بر اثر این پدیده شکسته و خرد خواهند شد.

### ۲-۳-۳-۶- اثر بالشتکی مواد ریزدانه

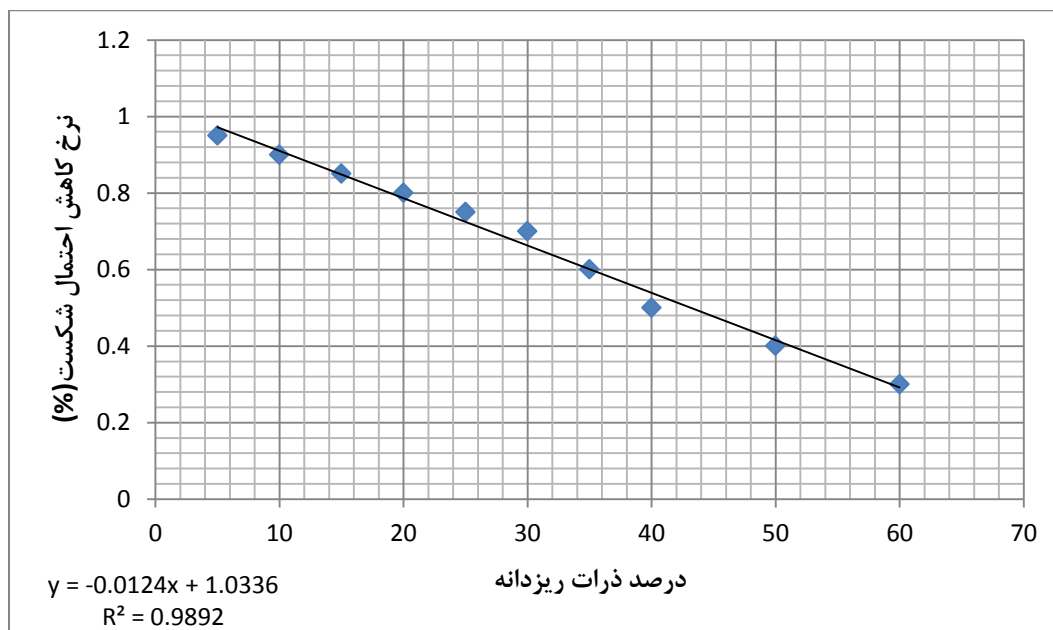
همانگونه که قبلاً توضیح داده شد مواد ریزدانه در طول ستون تخلیه بین بلوک‌های بزرگتر قرار گرفته و نقش بالشتک‌هایی را برای جلوگیری از خرد شدن ایفا می‌کنند. در این حالت احتمال شکست یک بلوک سنگی کمتر خواهد شد.

نکته‌ی حایز اهمیت در تحلیل‌ها این است که ذرات ریزدانه‌ای که در فاز خردشوندگی اولیه ایجاد شده است، در خردشوندگی ثانویه در نظر گرفته خواهد شد و ذراتی که در فاز خردشوندگی ثانویه ایجاد خواهد شد تنها در میزان جریان مواد تاثیرگذار خواهند بود. برای این منظور باید مقداری برای حد ذرات ریزدانه در نظر گرفته شود. که معمولاً این مقدار در طراحی‌های تخریب‌پذیری، بلوک-های با حجم کوچکتر از یک متر مکعب فرض می‌شود (Brown, E.T, 2003).

اثر بالشتکی به صورت نرخ کاهش احتمال شکست بلوک‌های بزرگ در نظر گرفته می‌شود. به این صورت که هرچه درصد ذرات ریزدانه نسبت به کل مواد خردشده بیشتر باشد، احتمال خردشدن بلوک‌ها کمتر خواهد شد. این مقادیر در جدول ۲-۳ نشان داده شده است. این نرخ برای زمانیکه درصد ذرات ریزدانه بیشتر از ۶۰ درصد باشد ثابت و برابر ۰/۳ در نظر گرفته می‌شود (Esterhuizen, 2005). نتایج به صورت نمودار برازش داده شده و رابطه‌ی آن در شکل ۲-۷ نمایش داده شده است.

جدول ۲-۳: نرخ کاهش احتمال شکست برحسب درصد ذرات ریزدانه

| درصد ذرات ریزدانه | نرخ کاهش احتمال شکست |
|-------------------|----------------------|
| ۵                 | ۰/۹۵                 |
| ۱۰                | ۰/۹                  |
| ۱۵                | ۰/۸۵                 |
| ۲۰                | ۰/۸                  |
| ۲۵                | ۰/۷۵                 |
| ۳۰                | ۰/۷                  |
| ۳۵                | ۰/۶                  |
| ۴۰                | ۰/۵                  |
| ۵۰                | ۰/۴                  |
| ۶۰                | ۰/۳                  |



شکل ۲-۷: نمودار تغییرات احتمال شکست بلوک سنگی برحسب درصد ذرات ریزدانه

# فصل سوم

۳- مروری بر تحقیقات گذشته

### ۳-۱- مقدمه

تاکنون دو شیوهی اصلی برای برآورد تخریب‌پذیری وجود داشته است، روش‌های تجربی و روش‌های عددی. استفاده از روش‌های تجربی به منظور برآورد قابلیت تخریب توده‌سنگ مورد نظر براساس تعیین ابعاد زیربرش مناسب است. به‌طور معمول در همه‌ی روش‌های تجربی از طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ، به عنوان نقطه‌ی شروع شناخت سنگ استفاده می‌شود. طبقه‌بندی در هریک از روش‌های تجربی یا براساس طبقه‌بندی‌های مرسوم توده سنگ و با اعمال ضرایب تصحیح به آنها انجام می‌شود و یا طبقه‌بندی بر مبنای جدیدی انجام شده است. در نهایت عدد مربوط به امتیاز طبقه‌بندی وارد نمودار تجربی بدست آمده از موردهای مطالعاتی انجام شده‌ی قبلی خواهد شد و ابعاد زیربرش لازم برای رسیدن به تخریب مناسب تعیین می‌گردد. روش اصلی دیگر روش‌های عددی است. روش‌های عددی از توابع ریاضی و روابط ترکیبی برای مدل کردن رفتار توده سنگ یا دیگر مواد استفاده می‌کنند. هرکدام از این روش‌ها دارای تعریف‌های مشخصی است. دسته‌بندی روش‌های عددی متفاوت بوده و افراد مختلف دسته‌بندی‌های متفاوتی ارائه کرده‌اند. سودمندی آنها در محاسبه‌ی محدوده‌ی وسیعی از رفتار ژئومکانیکی، برای خواص ناهمگن در چارچوب مساله و نیز ترکیب معیارهای شکست مختلف است.

در حال حاضر با توجه به محدودیت‌ها و کمبودهای هر یک از روش‌های تجربی و عددی موجود برای برآورد تخریب‌پذیری و خردشوندگی، روش‌های عددی بر مبنای اصول تجربی و آماری با در نظر گرفتن ساز و کارهای خردشوندگی به وجود آمده است. این روش در قالب معرفی یک نرم‌افزار شاخص معرفی شده است.

در نهایت مدل‌های مختلف ساخته شده در مورد تخریب‌پذیری و خردشوندگی که مبتنی بر مدل‌سازی DFN است، بصورت کلی توضیح داده شده است.

## ۳-۲- روش‌های تجربی

اصول حاکم بر این دسته از روش‌ها بر اساس تجربه افراد و بررسی‌های انجام گرفته در معادن مختلف و پروژه‌های تحقیقاتی است. در ابتدا روش‌ها عموماً به صورت کلی و به عنوان انتخاب شیوه‌ی معدن‌کاری ارایه می‌شده است و پس از آن به علت اهمیت موضوع، قابلیت تخریب به صورت موضوعی مستقل مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه به معرفی دو روش تجربی پرکاربرد پرداخته شده است.

### ۳-۲-۱- نمودار پایداری لابسچر<sup>۱</sup>

برای تعیین قابلیت تخریب توده‌سنگ، لابسچر از سال ۱۹۷۷ یک روش طبقه‌بندی برای توده-سنگ درزه‌دار ارایه کرد و بر اساس پارامترهای مقاومتی و ژئومکانیکی توده‌سنگ، آن‌را به پنج دسته با امتیازهای مساوی ۲۰ تقسیم کرد. پارامترهای مورد نظر در این روش شامل RQD، مقاومت سنگ بکر، فاصله‌داری درزه‌ها و شرایط درزه‌های شامل آب زیرزمینی بودند. تفاوت فاحش این روش با روش RMR در بررسی سیستم درزه‌های چندگانه است (Laubscher, 1977).

در سال ۱۹۸۱ لابسچر روشی برای انتخاب روش استخراج زیرزمینی توده‌ای ارایه کرد. او درزه و شکاف‌ها، شکستگی‌های کانسار و خصوصیات این شکستگی‌ها از قبیل شرایط سطح درزه و ... را برای تعیین قابلیت تخریب کانسار مورد مطالعه قرار داد و این‌گونه عنوان کرد که برای هر نوع کانسار، اگر عرض زیربرش به حد کافی بزرگ باشد، تخریب امکان‌پذیر خواهد بود.

از نظر لابسچر دو عامل ذیل تعیین‌کننده‌ی استفاده از سیستم تخریب است:

الف- درجه شکستگی‌های توده سنگی است که قرار است تخریب شود؛ که این عامل با توجه به

مقدار RQD بررسی می‌شود.

ب- امتیاز درزه<sup>۱</sup>؛ که توسط عواملی مانند فاصله درزه‌ها، شرایط سطح درزه (زبری و...)، پرشدگی درزه‌ها، شرایط آب و ... تعیین می‌شود. در واقع امتیاز درزه خصوصیات درزه را توصیف می‌کند.

لابسچر در سال ۱۹۹۰ یک سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ به نام MRMR<sup>۲</sup> ارائه کرد که در این سیستم طبقه‌بندی، امتیاز توده‌سنگ از ضرب RMR در ضرایب تعدیل به دست می‌آید.

در شکل ۲-۲ نحوه تعیین MRMR بازنگری شده در سال ۲۰۰۰ توسط لابسچر و ژاکوبک<sup>۳</sup> نشان داده شده است. اصلاحات جدید موجب حذف RQD از محاسبات شد. در راهکار ارائه شده RMR محاسبه نمی‌شود و به عبارتی مبنا تغییر کرده است و با معرفی رده‌بندی برجای توده سنگ<sup>۴</sup> (IRMR) کار آغاز می‌شود. آنچه سبب حذف مولفه‌ی RQD در طبقه‌بندی جدید شده عدم امکان ارزیابی صحیح توده‌سنگ براساس این مولفه اعلام شده است. برای مثال، در صورت وجود درزه‌هایی با فاصله‌داری ۵۰ سانتی‌متر در یک توده‌سنگ، مقدار RQD حاصله مناسب خواهد بود و نتیجه می‌شود که توده‌سنگ مستحکم بوده و قابلیت تخریب آن ضعیف است در حالی که این توده‌سنگ با چنین دسته‌درزه‌ای از نظر قابلیت تخریب مناسب خواهد بود (Laubscher, Jakubec, 2001).

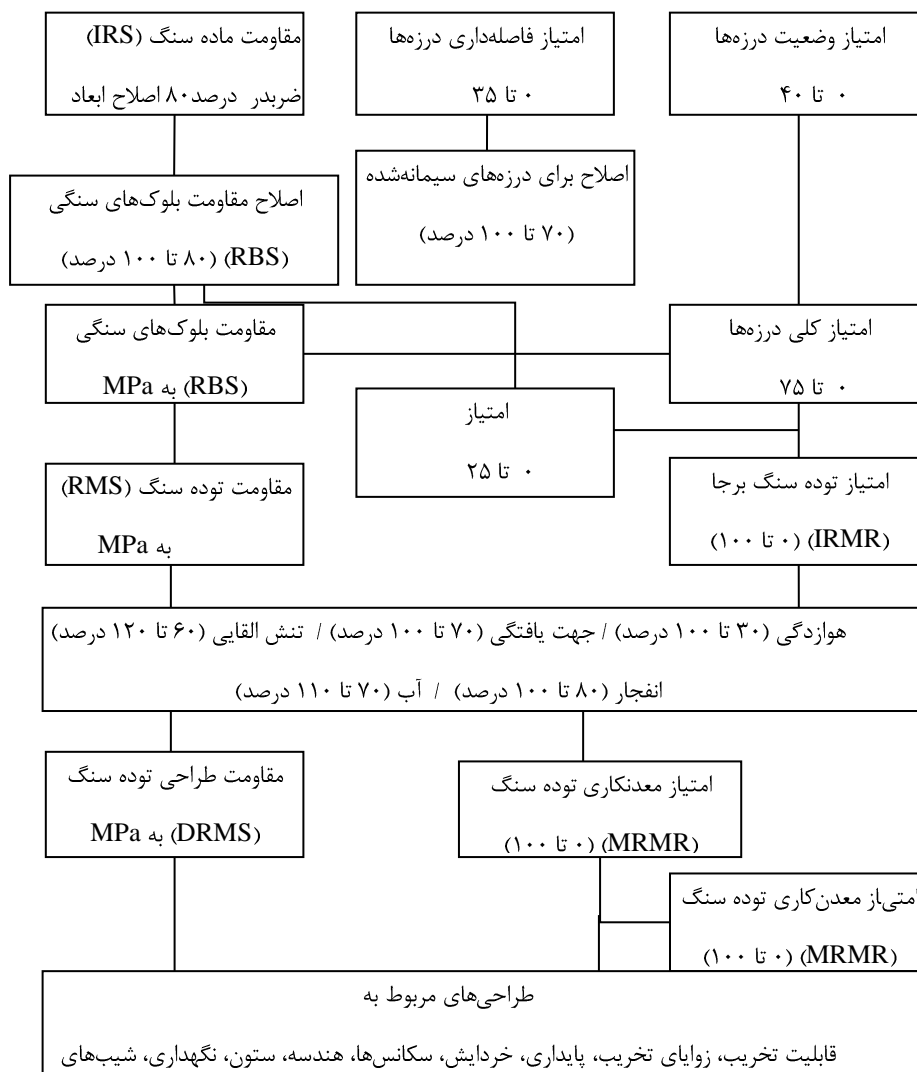
طبق این سیستم طبقه‌بندی، توده‌سنگ به پنج رده تقسیم شده است که رده اول، قوی‌ترین (بالاترین امتیاز) و رده پنجم، ضعیف‌ترین (کمترین امتیاز) توده سنگ را در بر می‌گیرد.

لابسچر و همکارانش برای تعیین قابلیت تخریب توده‌سنگ، از شعاع هیدرولیکی<sup>۵</sup> (نسبت مساحت به محیط سطح مورد نظر) استفاده کردند براین مبنا، هر چه توده‌سنگ امتیاز بالاتر و شعاع هیدرولیکی کمتری داشته باشد، پایدارتر بوده و قابلیت تخریب کمتری دارد.

- 
- 1- Joint Rating
  - 2- Modified Rock Mass Rating
  - 3 - Jakubec
  - 4 -Intact Rock Mass Rating
  - 5- Hydrolic radius

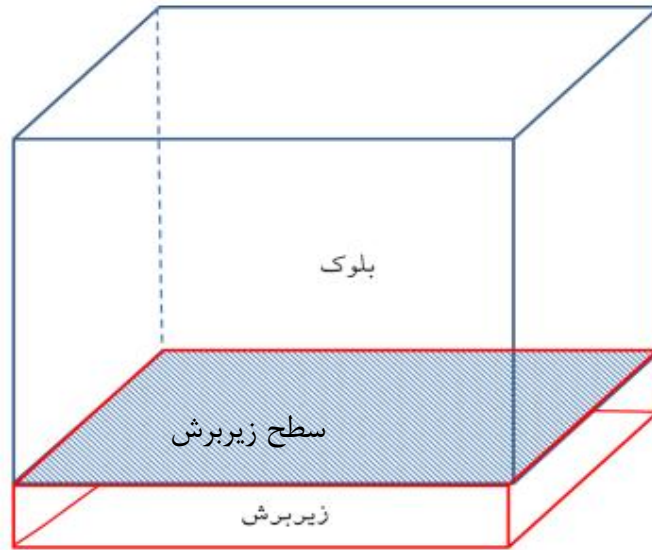


شعاع هیدرولیکی یک اصطلاح در علم هیدرولیک و مقدار عددی آن حاصل تقسیم سطح بر محیط است. طبق نظر لابسچر، پارامتر شعاع هیدرولیکی به منظور اطمینان از گسترش تخریب سطح بدون نگهداری منطقه تخریب مورد نیاز است. شعاع هیدرولیکی به سطح وابسته نیست بلکه به دهانه حداقل وابسته بوده و با افزایش دهانه حداقل، مقدار آن افزایش خواهد یافت. در شکل ۱-۳ سطح مورد نظر برای محاسبه‌ی شعاع هیدرولیکی نمایش داده شده است.

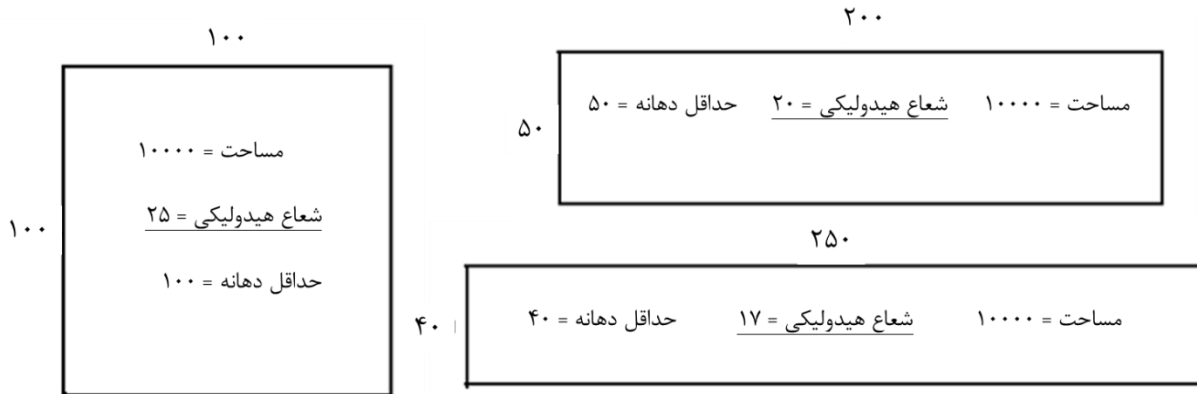


شکل ۱-۳: نحوه تعیین MRMR (Laubscher and Jakubec, 2001)

دهانه حداقل عبارت از بُعد بحرانی برای توسعه‌ی تخریب است. در مواردی که شعاع هیدرولیکی به صورت مرزی و نسبت دهانه حداکثر به دهانه حداقل، بزرگ است، اندک افزایش در دهانه حداقل، تأثیر زیادی بر شعاع هیدرولیکی دارد. در شکل ۲-۳ این ارتباط نشان داده شده است.



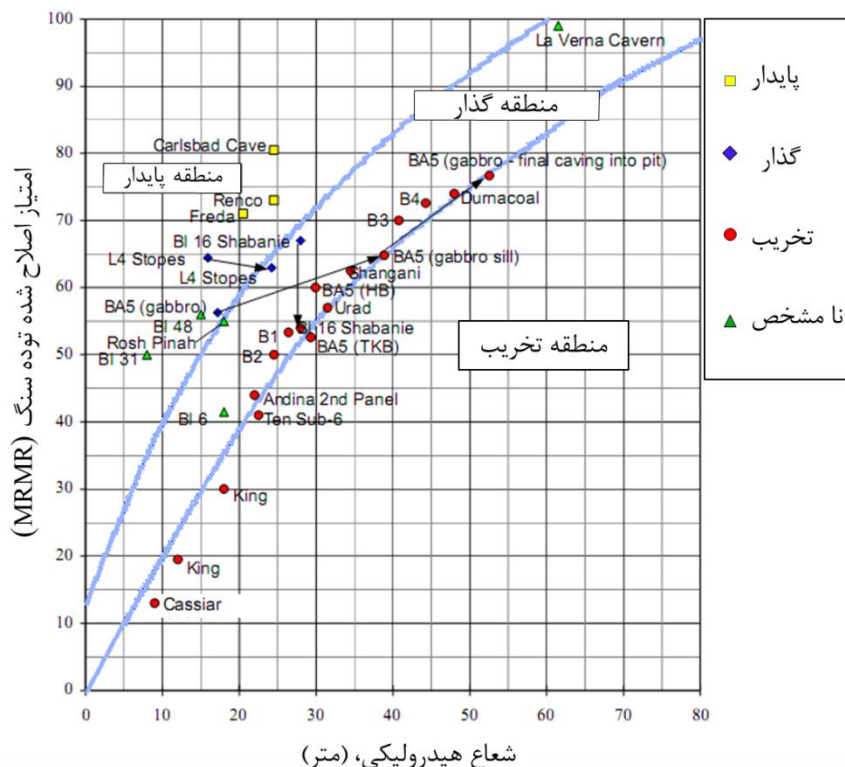
شکل ۳-۲ سطح مورد نظر برای محاسبه‌ی شعاع هیدرولیکی



شکل ۳-۳: ارتباط بین شعاع هیدرولیکی و دهانه حداقل (Laubscher, 2000)

لذا برای داشتن قابلیت تخریب خوب، به شعاع هیدرولیکی زیاد و توده سنگ ضعیف نیاز است در شکل نمودار تخریب لابسچر نشان داده شده است.

این روش برای تخمین تخریب‌پذیری در سنگ‌های ضعیف با کانسارهای بزرگ کاملاً مناسب است اما محدودیت‌هایی را برای کاربرد در مورد کانسارهای قوی‌تر و کوچک‌تر دارا است.



شکل ۳-۴: نمودار تخریب لابسچر (Brown, 2003)

### ۳-۲-۲- نمودار پایداری ماتیوس<sup>۱</sup>

این روش با استفاده از پارامتر شعاع هیدرولیکی به نحوی پایداری را به دهانه حداقل مرتبط می‌کند. این نمودار در ابتدا از مطالعات اندکی حاصل شد و استفاده از آن برای کارگاه‌های استخراج باز<sup>۲</sup> بوده است اما با گذشت زمان و انجام مطالعات بیشتر توسط محققان متعدد، داده‌های مربوط به معادن بیشتری به آن افزوده شده و نتایج آن نشان از صحت نتایج اولیه داشته‌اند (Suorineni, F. T., 2010). این تغییرها بیشتر مربوط به توصیف مناطق پایداری بودند. در روش ماتیوس نیاز به محاسبه‌ی دو عامل عدد پایداری (N) و ضریب شکل (S) برای نمودار پایداری است. عدد پایداری بیانگر توانایی توده‌سنگ برای مقاومت در برابر شرایط تنش موجود است. ضریب شکل یا شعاع هیدرولیکی نیز برای توصیف هندسه‌ی سطح در نظر گرفته می‌شود. مفهوم اصلی این روش این است که ابعاد یک جبهه کار استخراجی می‌تواند به مقاومت توده‌سنگ به عنوان نشانگر پایداری یا ناپایداری بستگی داشته

1- Mathews  
2 -Open Stope

باشد. نمودار پایداری، تعداد زیادی از جبهه‌کارها را نشان می‌دهد که دارای شرایط پایداری مشخصی هستند. عدد پایداری در محور عمودی قرار می‌گیرد و برآوردی از کیفیت توده‌سنگ اطراف کارگاه را نشان می‌دهد. برای در نظر گرفتن تنش‌های القایی و جهت استخراج باید از ضرایب تعدیل استفاده شود. نمودار اولیه‌ی پایداری دارای ۵۰ مطالعه‌ی موردی بوده است. نواحی پایدار با استفاده از داده‌های پراکنده و واقعی معدن کاری تعیین شده‌اند. این نواحی برای پیش‌بینی پایداری کارگاه‌های طراحی شده بکار برده می‌شدند. پاتوین<sup>۱</sup> و همکارانش با اصلاح عدد پایداری، سه ناحیه را به دو ناحیه‌ی پایدار و تخریبی کاهش دادند. تغییراتی که توسط پاتوین و همکارانش (۱۹۸۹) در این روش داده شده مربوط به محاسبه‌ی عامل‌های تعدیل است اما این تغییرات، تفاوت محسوسی در نتایج این روش ایجاد نکرده است (Brown E. T., 2003).

نمودار ماتیوس<sup>۲</sup> توسط استیوارت<sup>۳</sup> و فورسیس<sup>۴</sup> به روز شده و به چهار منطقه شامل مناطق بالقوه پایدار، بالقوه ناپایدار، بالقوه با گسیختگی قابل توجه و بالقوه تخریبی است (شکل ۳-۵). در این روش منطقه‌ی تخریب با استفاده از نمودار تخریب لابسچر<sup>۵</sup> تعیین و اعتبارسنجی شده است (Brown 2003).

روش نمودار پایداری، از سیستم طبقه‌بندی Q' برای برآورد کیفیت توده‌سنگ استفاده می‌نماید (رابطه ۳-۱).

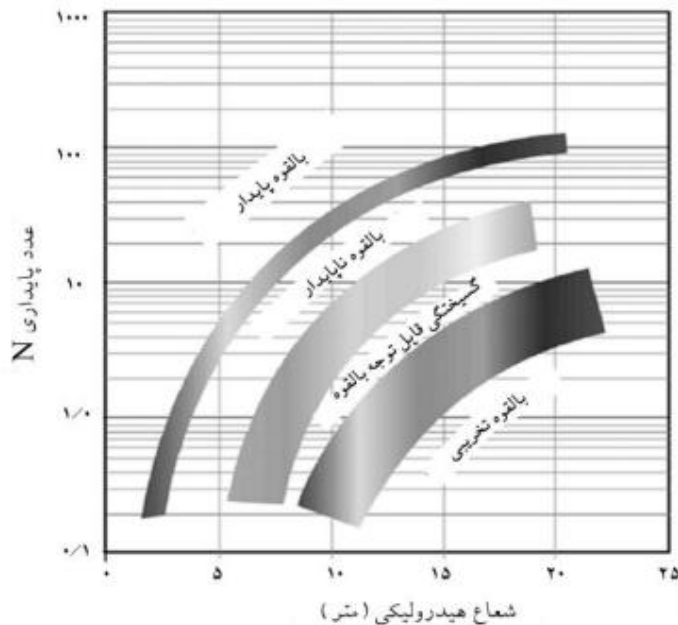
$$Q' = \frac{RQD}{j_n} \times \frac{j_r}{j_a}$$

(۳-۱)  
که در آن:

|                |                      |
|----------------|----------------------|
| RQD            | اندیس کیفیت توده‌سنگ |
| J <sub>n</sub> | عدد دسته درزه        |

- 1 - Potvin
- 2 - Mathews
- 3 - Stewart
- 4 - Forsyth
- 5 - Laubscher

|                 |       |
|-----------------|-------|
| عدد زبری درزه   | $J_r$ |
| عدد هوازگی درزه | $J_a$ |



شکل ۳-۵: نمودار پایداری اصلاح شده ماتیوس توسط استیوارت و فورسیس (Suorineni, F. T., 2010).

عدد پایداری با تعدیل  $Q'$  برای تنش‌های القایی، جهت ناپیوستگی و جهت جبهه کار بدست می‌آید (رابطه ۲-۳).

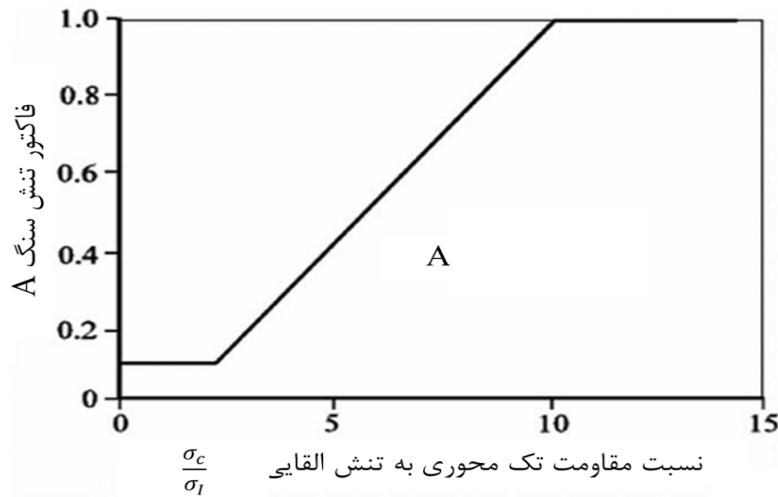
$$N = Q' \times A \times B \times C \quad (2-3)$$

که در آن  $Q'$  نشان دهنده‌ی عدد کیفیت توده‌سنگ اصلاح شده است.

هندسه‌ی کارگاه استخراج با محاسبه‌ی ضریب شکل در نظر گرفته می‌شود. این ضریب نسبت مساحت جبهه کار به محیط آن است.

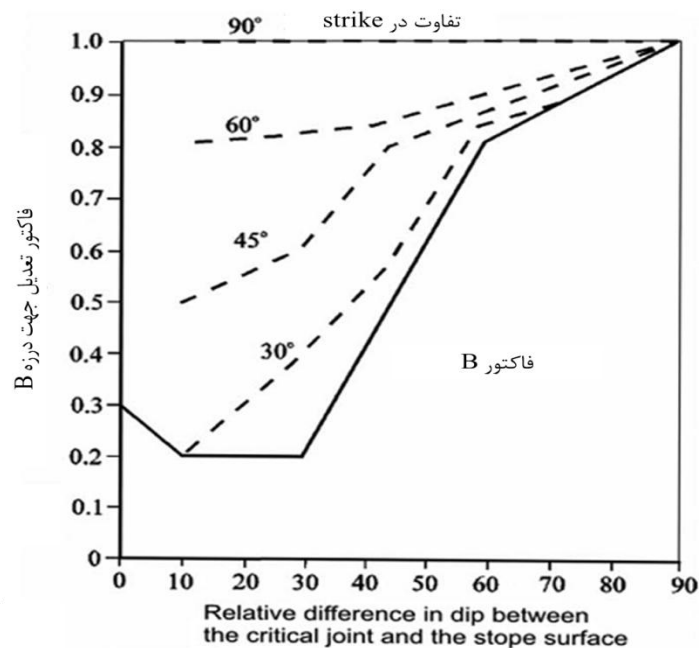
ضریب تنش سنگ A از نسبت مقاومت فشاری غیرمحصور سنگ سالم به تنش فشاری القایی در خط مرکزی جبهه‌ی کارگاه به دست می‌آید. تنش القایی با استفاده از روش حل بسته<sup>۱</sup> تنش الاستیک یا از توزیع‌های تنش منتشر شده تخمین زده می‌شود. ضریب A برای نشان دادن تأثیر تنش

القایی بوده و بین ۰/۱ برای تنش فشاری بالا و ۱ برای شرایط آزاد (شامل کشش) بصورت خطی تغییر می‌کند. نمودار تغییرات این ضریب در شکل ۳-۶ نشان داده شده است. (Suorineni, F. T., 2010).

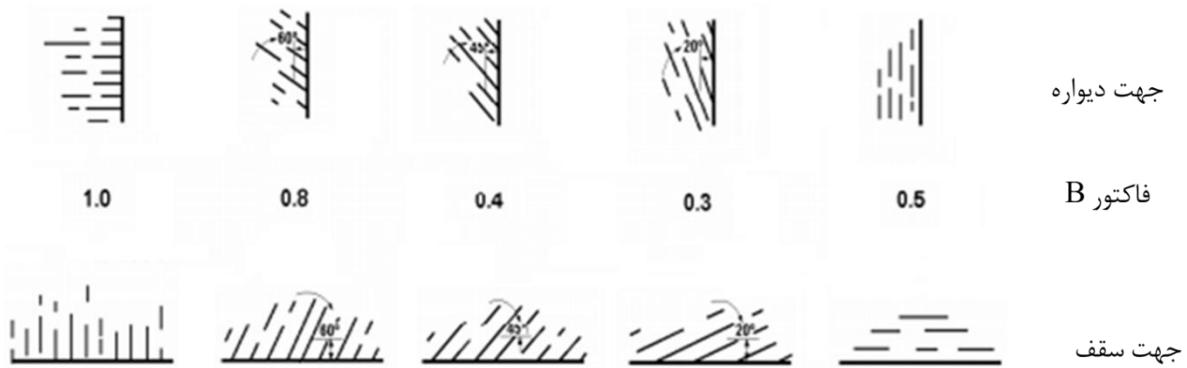


شکل ۳-۶: نمودار محاسبه‌ی ضریب تنش (A) (Suorineni, F. T., 2010)

ضریب تعدیل جهت‌یافتگی درزه B که یک مقدار تفاضل نسبی بین شیب جبهه کارها و دسته درزه‌ی بحرانی است، این ضریب با استفاده از شکل ۳-۷ به دست می‌آید. برای ضریب B از شکل ۳-۸ نیز می‌توان استفاده کرد.

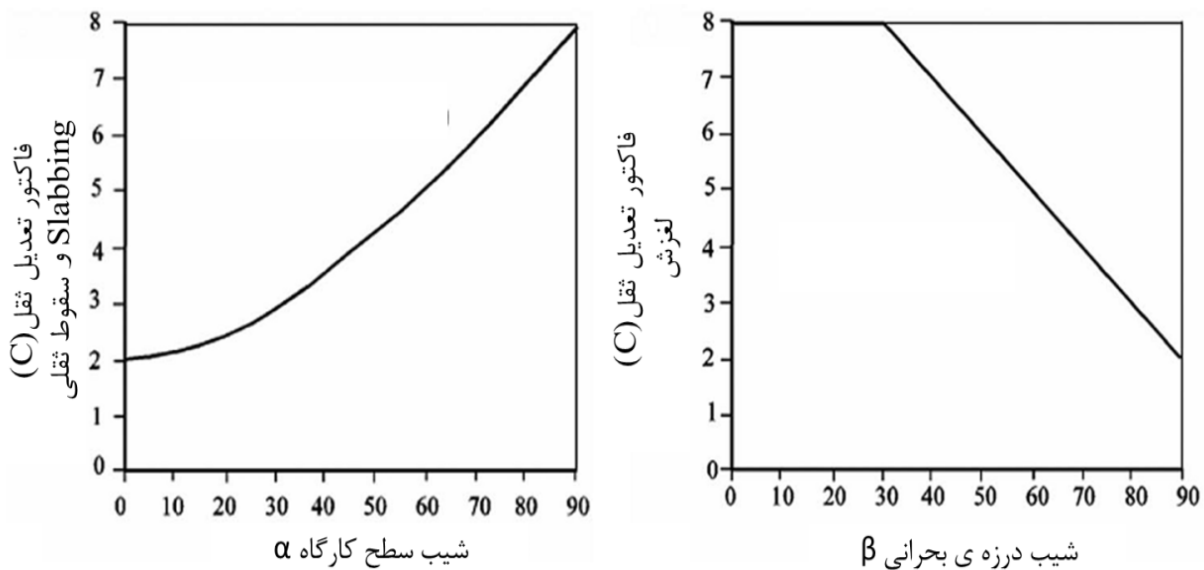


شکل ۳-۷: نحوه‌ی محاسبه‌ی ضریب تعدیل جهت درزه (B) (Suorineni, F. T., 2010).



شکل ۳-۸: نحوه‌ی محاسبه‌ی فاکتور B (Brown E. T., 2003)

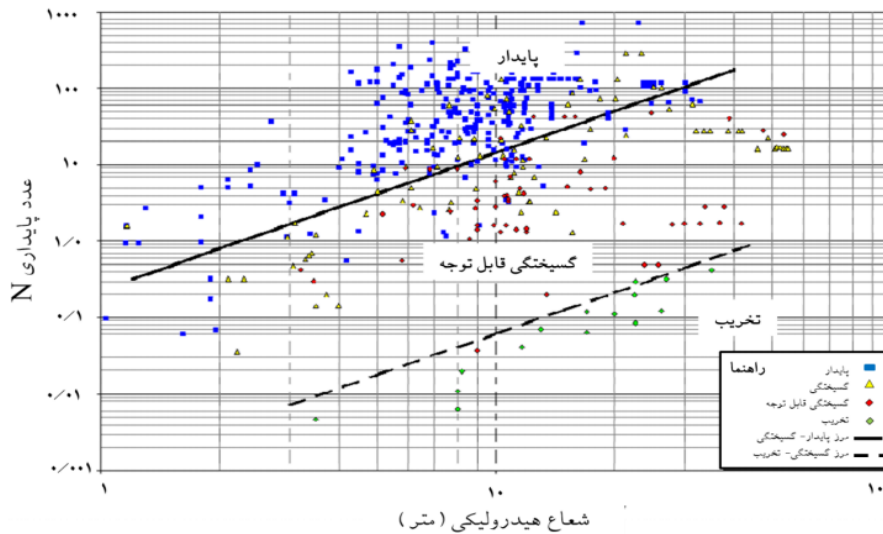
ضریب تعدیل ثقل C این واقعیت را منعکس می‌کند که جهت سطح جبهه کار بر پایداری‌اش موثر است (Brown E. T., 2003). این ضریب حالت گسیختگی را تعیین می‌کند و شامل سقوط، لغزش یا ورقه شدن است و از شکل ۳-۹ بدست می‌آید (Suorineni, F. T., 2010).



شکل ۳-۹: محاسبه‌ی ضریب ثقلی (C) (Brown E. T., 2003)

### ۳-۲-۳ - نمودار پایداری توسعه یافته ماتیوس<sup>۱</sup>

تحلیل برگشتی ۱۸۰ کارگاه باز در امتی چارلوت<sup>۲</sup> با استفاده از نمودار پایداری، اعتبار این روش را برای پیش‌بینی قابلیت تخریب اثبات نمود. این داده‌ها در سال ۱۹۹۸ توسط ماوداسلی<sup>۳</sup> و همکاران با داده‌هایی از سایر معادن استرالیا ترکیب شدند و پایگاه داده‌ای متشکل از ۴۰۰ نمونه را به وجود آوردند. داده‌های جدید شامل کارگاه‌های بسیار بزرگ‌تر بودند و سبب شدند که شعاع هیدرولیکی نمودار پایداری از ۲۳ متر به ۵۵ متر افزایش یابد. پایگاه داده‌ی جدید بازه‌ی گسترده‌تری از توده‌سنگ و تنش برجا را با عدد پایداری بین ۰٫۰۵ تا ۷۰۰ در بر می‌گیرد. برای ترسیم نواحی پایدار به صورت آماری و خطوط تراز هم‌احتمال موارد پایدار، شکست کوچک و شکست بزرگ از تحلیل رگرسیونی استفاده شده است. نمودار تعمیم‌یافته‌ی لگاریتمی ماتیوس<sup>۴</sup> شامل داده‌های جدید و نواحی پایدار ترسیم شده به روش آماری است که در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰: نمودار تعمیم‌یافته‌ی پایداری با استفاده از رگرسیون آماری (Mawdsley, et al, 2001)

- 1 - Mathews
- 2 - Mt. Charolte
- 3 - Mawdsley
- 4 - Mathews



### ۳-۳- تاریخچه‌ای از مدل سازی عددی تخریب

روش‌هایی که هم‌اکنون برای مدل سازی استفاده می‌شود را می‌توان به سه دسته کلی شامل

روش‌های ذیل تقسیم‌بندی نمود:

- مدل‌های پیوسته

- مدل‌های ناپیوسته

- مدل‌های ترکیبی

#### ۳-۳-۱- مدل‌های پیوسته

این مدل‌ها توده سنگ را به عنوان محیطی پیوسته در نظر می‌گیرند، با این فرض که رفتار سنگ به گونه‌ای است که بوسیله سری‌های ناپیوستگی‌های خاص کنترل نمی‌شود. خواص توده سنگ بصورت معادل (ترکیبی از ناپیوستگی‌ها و ماده سنگ) تعریف می‌شود. پاسخ مواد در این مدل‌ها براساس تئوری‌های الاستیسیته و یا پلاستیسیته توصیف می‌شود که باعث تغییر شکل خمیری و یا تسلیم پلاستیک خواهد شد (Brown, 2003). برخی از مهمترین برنامه‌های کامپیوتری مدل‌های پیوسته را می‌توان بصورت زیر نام برد: برنامه‌های المان تفاضلی FLAC (Itasca, 2005) و FLAC<sup>3D</sup> (Itasca, 2004c); برنامه‌های المان محدود Phase<sup>2</sup> (Rocscience, 2004) و Abaqus (Simulia, 2007) و برنامه‌ی المان مرزی Map3D (Mine Modeling, 2006).

معمول‌ترین کدهای مدل‌سازی پیوسته استفاده شده برای بحث تخریب‌پذیری و نشست ناشی

از آن FLAC، FLAC<sup>3D</sup> و Abaqus هستند.

نرم‌افزارهای FLAC و FLAC<sup>3D</sup> توسط ساین<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۳) برای معادن راجپوراداریبا<sup>۲</sup> و

کایرونا<sup>۳</sup>، توسط کارزولوویک<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۹۹) برای معدن ای‌ال تنینت<sup>۱</sup> و توسط فلوریس<sup>۲</sup> و

---

1 -Singh

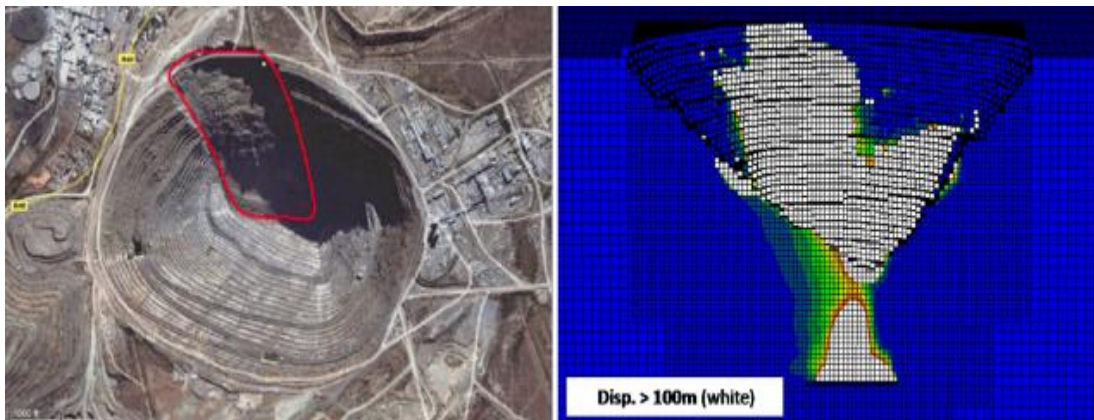
2 - Rajpura Dariba

3 - Kiruna

4 -Karzulovic

کارزولوویک (۲۰۰۳) برای مطالعه مدل‌های مفهومی بین‌المللی تخریب‌پذیری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطالعات با استفاده از نرم‌افزار Abaqus برای بخش نیکل‌وست و دایموند<sup>۳</sup> بوسیله بک<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۶) انجام شده است.

همچنین از نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> برای مطالعات پیش‌امکان سنجی و امکان سنجی تخریب‌پذیری در معادن نورث‌پارکس<sup>۵</sup> استرالیا و پالابورا<sup>۶</sup> در آفریقای جنوبی استفاده شده است. نرم‌افزار Abaqus برای بررسی تخریب‌پذیری در معدن آرژیل‌دایموندس<sup>۷</sup> در استرالیا بکار برده شده است. ساینسبوری<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸ تکنیک مدل‌سازی درزه‌های همه جا حاضر در توده-سنگ درزه‌دار (UJRM<sup>۹</sup>) را براساس توده‌سنگ ترکیبی (SRM) برای بررسی تغییرات مقاومتی توده-سنگ و اثرات مقیاس در مدل‌های بزرگ مقیاس FLAC<sup>3D</sup> (Itasca, 2006) توسعه دادند. روش SRM-UJRM به طور موفق برای بررسی شکست شیروانی و اثر آن بر کارگاه تخریب بخش زیرزمینی در معدن پالابورا در آفریقای جنوبی بکار برده شده است شکل ۳-۱۱ دید از بالا و مدل ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۱: سازوکار شکست دیواره نهایی پیت معدن پالابورا و اثر آن بر کارگاه تخریب بخش زیرزمینی در مدل ایجاد شده به روش SRM-UJRM (Sainsbury et al., 2008)

- 1 - El Teniente
- 2 - Flores
- 3 - BHP's Nickel West and Diamond
- 4 - Beck
- 5 - Northparkes
- 6 - Palabora
- 7 - Argyle Diamonds
- 8 - Sainsbury
- 9 - ubiquitous jointed rock mass

### ۲-۳-۲ - مدل‌های ناپیوسته

سنگ‌ها به صورت ذاتی محیطی ناپیوسته هستند، بنابراین روش‌هایی که به صورت واضح ناپیوستگی‌ها در آنها حضور دارند گزینه‌ای جذاب برای بررسی و تخمین تخریب‌پذیری و خردشوندگی محسوب می‌شوند. روش‌های المان گسسته (DEM) به دلیل پیچیدگی‌های زیاد و حجم محاسبات بالایی که دارند برای مدل‌سازی فضاهای سه بعدی بزرگ مقیاس نامناسب هستند (Brown, 2003). با این وجود به کارگیری این روش‌ها به درک فرآیند تخریب کمک خواهد کرد.

در برنامه‌های کامپیوتری DEM توده سنگ‌ها به دو صورت مدل‌سازی می‌شوند: یک حالت به صورت به هم پیوستن بلوک‌های صلب و یا تغییرشکل‌پذیر که در معرض حرکت بلوک‌ها و یا تغییرشکل بلوک‌ها قرار می‌گیرند (مانند UDEC و 3DEC). و یا به صورت به هم پیوستن ذرات صلب دایروی و کروی تحت تاثیر جدایش و یا حرکت ذرات (مانند PFC2D و PFC3D). UDEC و 3DEC برای بررسی و تخمین تخریب‌پذیری در معدن پالابورا استفاده شده است. اما معمولاً برای بررسی‌های نشست‌های سطحی و پایداری پایه‌ها نظیر آنچه در معدن پالابورا بوسیله لی و برومیر<sup>۱</sup> (۲۰۰۵) بکار گرفته شده، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مطالعات تخریب‌پذیری با استفاده از کدهای DEM به طور معمول با نرم‌افزارهای PFC2D و PFC3D انجام می‌شود. به عنوان نمونه تحقیقات انجام شده بوسیله پییرس<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۷) و ریروز-مونتر<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۷) در مورد تحلیل برگشتی تخریب معدن نورث پارکس<sup>۴</sup> در استرالیا و ماس ایوارس<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۸) در مورد بررسی منحنی پاسخ تنش - کرنش آزمایش‌های مقاومت فشاری توده سنگ ترکیبی بر روی مواد کربناتی معدن پالابورا<sup>۶</sup> با این نرم‌افزارها انجام شده‌اند.

---

1 - Li and Brummer  
2 - Pierce  
3 - Reyes-Montes  
4 - Northparkes  
5 - Mas Ivars  
6 - Palabora

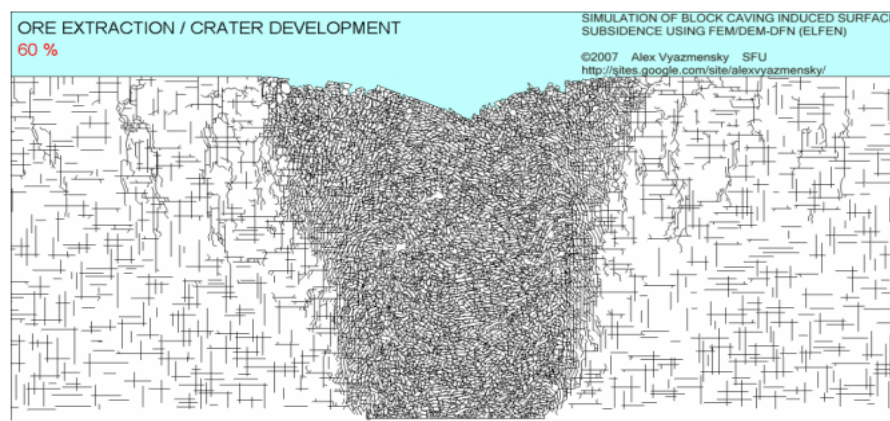
همچنین گیلبراید<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۵) از PFC3D برای برآورد نشست ناشی از تخریب در معدن کوستا<sup>۲</sup> استفاده کردند.

### ۳-۳-۳ - مدل‌های ترکیبی

این نوع از مدل‌ها با ترکیب شیوه‌های پیوسته و ناپیوسته بستری را برای تحلیل‌های مسایل مهندسی پیچیده فراهم می‌کند. یکی از این نوع کدها ELFEN (Rockfield, 2006) است. این کد در اصل برنامه‌ای دوبعدی توسعه داده شده برای مدل‌سازی دینامیکی بار ضربه‌ای بر روی مواد ترد است که شیوه‌های تحلیل المان‌های محدود و گسسته را با هم تلفیق نموده است (Elmo et al., 2007a). کد دارای دو ابزار مدل رفتاری انتشار ترک است: یکی مدل درزه چرخشی رانکین و دیگری مدل موهرکلمب با برش رانکین (Vyazmensky et al., 2007). ELFEN بوسیله ایسکی و داکوتا<sup>۳</sup> (۲۰۰۳) و پاین<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۶) برای مدسازی تخریب بلوکی بکار رفته که نتایج امید بخشی را نشان داده است. پس از آن الموه<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۷ و ویازمنسکی<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸ از این برنامه به منظور توصیف نشست سطحی ناشی از اندرکنش پیت روباز/ تخریب بلوکی استفاده نمودند در شکل ۳-۱۲ این مدل نشان داده شده است. همچنین رانس<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۷) آنرا برای تخمین خردشوندگی‌ها بکار برده‌اند. پیشرفت‌های اخیر در روش‌های عددی شامل روش‌های جدید شبیه‌سازی تخریب و نشست سطحی با تلفیق با سیستم درزه‌های اولیه موجود در توده سنگ است.

---

1 - Gilbride  
2 - Questa  
3 - Esci and Dutko  
4 - Pine  
5 - Elmo  
6 - Vyazmensky  
7 - Rance



شکل ۳-۱۲: شبیه سازی اثر تخریب توده‌ای بر نشست سطحی زمین توسط برنامه ELFEN (Vyazmensky et al., 2008)

چند مورد از شیوه‌های شبیه سازی توده‌سنگ ترکیبی شامل DEM-(SRM)<sup>۱</sup> توسط ماس ایوارس و همکاران در سال ۲۰۰۸ (Mas Ivars et al., 2008)، FDM-SRM<sup>۲</sup> ساینبری و همکاران در سال ۲۰۰۸ (Sainsbury et al., 2008) و روش FEM/DEM-DFN<sup>۳</sup> است.

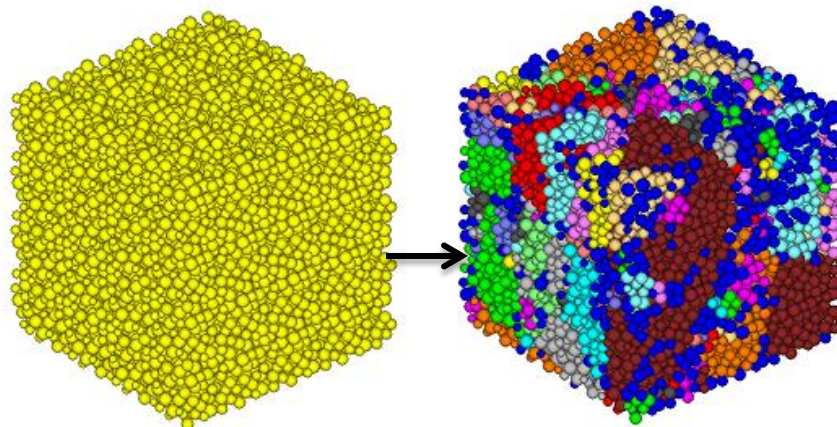
روش SRM-DEM شامل شبیه‌سازی توده سنگ به صورت ترکیبی از گوی‌های کروی متصل با شبکه ناپیوستگی‌های گسسته دیسکی شکل در داخل آن است. سه مولفه لازم برای ساختن مدل SRM شامل خواص ماده سنگ، شبکه ناپیوستگی‌های گسسته و خواص درزه‌هاست (Pierce et al., 2007). همه‌ی نمونه‌ها در نرم‌افزار PFC3D برای شبیه سازی شرایط تنش معمول در کانسارهای تخریب بلوکی عمیق ایجاد شده‌اند. نمونه‌ای از مدل‌سازی SRM-DEM در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است.

روش FEM/DEM-DFN نیز از مدل ترکیبی توده سنگ (SRM) استفاده می‌کند، که از طریق توسعه دادن مدل‌های DFN مرتبط با شبیه‌سازی FEM/DEM برای بدست آوردن خواص توده سنگ بکار می‌رود. این روش برخلاف استفاده از روش‌های طبقه‌بندی توده سنگ به تنهایی، ارتباطی را بین سیستم‌های درزه برداشت شده و مقاومت توده سنگ ایجاد می‌کند (Elmo et al., 2008a).

---

1 - Distinc Elemant Method  
 2 - Finite Difference Method  
 3 - Finite Element Method

سنگ ترکیبی (SRM) برای مدل سازی اثرات تخریب روی سطح و یا اندرکنش بین سطح و زیرزمین مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل ۳-۱۳: نمونه‌ای از مدل سازی SRM -DEM با استفاده از نرم افزار PFC3D (Mas Ivars, 2008)

المو<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸ گزارش دادند که این روش به طور واقعی اثرات تخریب بلوکی روی نشست سطح را مشخص می کند.

کارهای بیشتری برای تلفیق متغیرهای دیگر، شامل تنش بر جای سنگ، هندسه های سطوح متفاوت و توالی ایجاد زیربرش در حال انجام است (Tollenaar R. N., 2008).

### ۳-۴- استفاده از اصول تحلیلی و تجربی برای برآورد خردشوندگی در

#### تخریب بلوکی

با توجه به محدودیتها و کمبودهای هر یک از روش های تجربی و عددی موجود برای برآورد تخریب پذیری و خردشوندگی، روش سومی بر مبنای اصول تجربی و آماری با در نظر گرفتن ساز و کارهای خردشوندگی به وجود آمده است.

از نرم افزارهای شاخصی که برای برآورد خردشوندگی مورد استفاده قرار می گیرد BCF است.

BCF<sup>1</sup> برنامه‌ای براساس سیستم خبره<sup>2</sup> است که ترکیبی از قوانین تحلیلی و تجربی فرآیندها و مولفه‌های موثر در خردشوندگی سنگ را شامل می‌شود.

بیشتر قوانین تجربی مورد استفاده در آن براساس تجربه دکتر لابسچر است ( Brown E. T., 2003).

این برنامه از سه بخش اصلی تشکیل شده است.

- بخش اول خردشوندگی اولیه را بر مبنای مقاومت سنگ، هندسه درزه، فاصله‌داری‌ها و تنش‌های منطقه، محاسبه می‌کند.

- بخش دوم خردشوندگی ثانویه را بر مبنای بررسی نرخ وضعیت بلوک‌ها<sup>3</sup>، مقاومت بلوک، فشار تخریب، تنش‌های القایی ناشی از پدیده تاق‌زدگی، نرخ تخلیه و ارتفاع ستون تخلیه محاسبه می‌نماید.

- بخش سوم پتانسیل رخداد گیرافتادگی (قفل‌شدگی) در قیف‌های تخلیه را بر مبنای خردشوندگی ثانویه به عنوان ورودی این بخش، بررسی می‌کند.

خروجی این برنامه یک سری از نمودارهایی است که توزیع اندازه و دیگر آمارهای بلوک‌های سنگی در هر مرحله از تخلیه مواد را نشان می‌دهد.

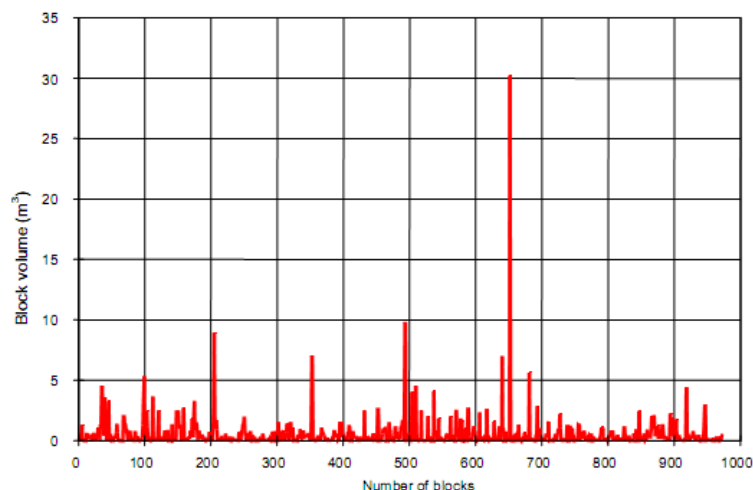
دو نمونه از خروجی‌های برنامه در شکل‌های ۳-۱۴ و ۳-۱۵ نشان داده شده است

استرھویزن<sup>4</sup> برخی از اصلاحات را بر روی نسخه اصلی برنامه BCF انجام داد که برخی از محدودیت‌های این برنامه را حذف کرد و کارایی آنرا بهبود بخشید. از مهمترین اصلاحات صورت گرفته می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Brown E. T., 2003):

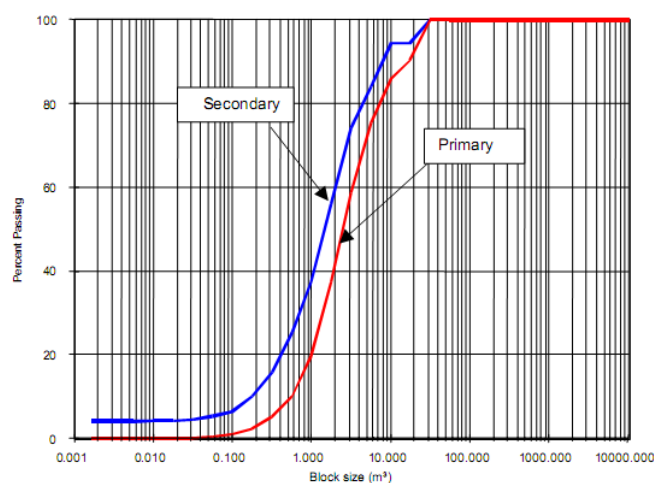
- سطوح بلوک‌های اولیه به جای تعریف شدن با سه دسته درزه موازی در حالت قبل با شش دسته درزه متفاوت قابل تعریف است که به واقعیت نزدیکتر است

---

1 - Block Cave Fragmentation  
2 - Expert system  
3 - Aspect Ratio  
4 - Esterhuizen



شکل ۳-۱۴: مثالی از ابعاد بلوکها در خردشوندگی اولیه، محاسبه شده بوسیله BCF (Brown, 2003)



شکل ۳-۱۵: نمونه‌ای از نمودارهای توزیع ابعاد خردشدگی اولیه و ثانویه محاسبه شده بوسیله BCF (Brown, 2003)

- فاصله داری درزه‌ها بوسیله الگوریتم‌های جدیدتر بصورت واقعی‌تر شبیه‌سازی می‌شود.
- تغییرات در خواص مقاومتی درزه‌ها در نظر گرفته شده اما در حالت قبلی تنها یک مقدار استفاده می‌شد.
- ترکهای ناشی از تنش در حالتی که برش در طول دو یا تعداد بیشتری دسته درزه اتفاق می‌افتد محدود می‌شود. در حالیکه قبلا ترکهای ناشی از تنش حتی اگر برش رخ می‌داد بوجود می‌آمد.



- رابطه‌ی مقاومت و نرخ وضعیت بلوک تغییر داده شده تا منجر به ارایه نتیجه بهتری از خردشوندگی ثانویه در طول ستون تخریب شود.
  - فشار تخریب اکنون بر مبنای نتایج مدل‌های عددی تعیین می‌شود.
  - فشار تخریب با پایین آمدن بلوکها در ستون تخریب به روز می‌شود.
- نتایج خردشوندگی حاصل از برنامه BCF (که برای تعیین خردشوندگی اولیه و ثانویه توسعه داده شده است) می‌تواند برای تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب بهترین جهت برای پیشروی زیربرش و دستیابی به خردشوندگی اولیه بهینه و تخریب منتهی از آن بکار برده شود (Brown E. T., 2003).
- نرم‌افزارهای دیگر از این نوع می‌توان JKFrage را نام برد (Eadie 2002). این برنامه برای برآورد خردشوندگی برجا و اولیه استفاده می‌شود که براساس مدل درزه سلسله مراتبی هاریس<sup>1</sup> تهیه شده است (Brown E. T., 2003).

### ۳-۵- مدل‌های برآورد تخریب‌پذیری مبتنی بر DFN

فرض درزه‌های نامحدود و بینهایت (پایا) بدلیل اینکه اندازه‌گیری مستقیم مقدار پایایی غیرممکن است روشی محافظه‌کارانه است و منجر به ارائه مدلی به دور از واقعیت از توده‌سنگ طبیعی می‌شود زیرا ناپیوستگی‌هایی با گسترش بینهایت واقعاً در طبیعت مشاهده نمی‌شود (Rogers et al., 2007). همچنین اعمال این فرض در تحلیل‌ها موجب رسیدن به احتمال بسیار بالای تشکیل بلوک می‌شود، در حالی که امکان تشکیل بلوک‌های کامل در طبیعت کمتر است (Elmo, 2006).

همانگونه که پیشتر اشاره شد DFN روش مدل‌سازی هندسی تصادفی درزه‌ها است که امکان شبیه‌سازی احتمالاتی درزه‌ها را فراهم می‌کند. با استفاده از این روش می‌توان مدل‌های تصادفی تا حد امکان نزدیک به واقعیت را از داده‌های منطقه برداشت شده، ارایه نمود.

اکثر مدل‌های تصادفی تولید سیستم درزه بصورت لازم و کافی برای کاربردهای گوناگون مهندسی سنگ تطبیق داده نشده‌اند (Grenon and Hadjigeorgiou 2008) به همین دلیل با وجود قابلیت‌های DFN، تا به امروز کاربردهای نسبتاً محدودی از آن برای مدل‌سازی مسایل مهندسی سنگ در توده سنگ‌های درزه‌دار ارائه شده است.

این روش از زمان ارایه توسط دراشویتز<sup>۱</sup> (۱۹۸۰) بطور مداوم پیشرفت داشته و به عنوان روشی پرکاربرد در مهندسی عمران، محیط زیست و مخازن مورد استفاده قرار گرفته است (Jing, 2003). از سال ۲۰۰۲ میلادی به عنوان ابزاری مفید برای استفاده در مسایل مختلف ژئومکانیکی موجود در توده سنگ شناخته شده است (Tollenaar, 2008). از موارد اولیه استفاده از آن می‌توان به کارهای استارزک<sup>۲</sup> و تی‌سانگ<sup>۳</sup> در مورد پایداری تونل‌ها در سال ۲۰۰۲ اشاره کرد (Starzec et al., 2002). راجرز<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۷ (Rogers et al., 2007) و المو<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸ (Elmo, et al., 2008a)، خردشدگی توده سنگ‌های درزه‌دار را با این روش بررسی کردند. ویازمنسکی<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸ از الگوریتم DFN به عنوان ورودی مدل‌های شکست ترد ترکیبی استفاده کردند (Vyazmensky et al., 2008)، که در آن ریزش‌های پیشرونده‌ی شیب دیواره‌های معدن روباز در اثر ادامه‌ی معدن‌کاری به روش تخریب توده‌ای مدل‌سازی شده است. تولنار<sup>۷</sup> در سال ۲۰۰۸ به تاثیر مدل‌سازی به روش DFN بر تخریب‌پذیری و خردشدگی برجا را بررسی کرده است (Tollenaar, 2008). هادجیجوریو<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸ تحلیل پایداری فضا‌های قائم حفر

---

1 - Dershowitz

2 - Starzec

3 - Tsang

4 - Rogers

5 - Elmo

6 - Vyazmensky

7 - Tollenaar

8 - Hadjigeorgiou

شده در سنگ سخت را براساس ترکیب مدل DFN با نرم‌افزار PFC انجام دادند (Hadjigeorgiou et al., 2008). المو و همکاران در سال ۲۰۱۰ با ساخت مدل توده سنگ ترکیبی با استفاده از روش DFN از معدن کادیا<sup>۱</sup>، نشست سطحی زمین ناشی از تخریب بلوکی را مدل‌سازی کردند (Elmo et al., 2010). از جدیدترین کارهای انجام شده در این زمینه می‌توان به کار راجرز و همکاران در سال ۲۰۱۴ اشاره نمود که در آن به بررسی اثر مقدار شدت درزه‌داری حجمی در مدل DFN برای ارتقای تعیین شاخص تخریب‌پذیری توده‌سنگ در روش تخریب بلوکی پرداخته شده است (Rogers et al., 2014).

### ۳-۶- جمع‌بندی

همانگونه که پیشتر اشاره شد روش‌های تجربی برآورد تخریب‌پذیری، فرآیندهای تخریب و خردشوندگی توده‌سنگ و بلوک‌های سنگی را شامل نمی‌شود. به عبارت دیگر هیچ یک از روش‌های تجربی فرآیندهای خردشوندگی را در نظر نمی‌گیرند و صرفاً قابلیت تخریب را بر مبنای ابعاد زیربرش از این جهت که در شرایط مفروض، توده تخریب‌پذیر، پایدار و یا در مرحله‌ی گذار است، مشخص خواهند نمود.

از طرفی روش‌های عددی استفاده شده تاکنون بیشتر به بررسی تخلیه مواد خردشده از ستون تخلیه، نشست سطحی زمین در اثر تخریب و یا اندرکنش پیت روباز و فضای تخریب پرداخته‌اند. و می‌توان این‌گونه بیان نمود که روش‌های عددی در مدل‌سازی فرآیندهای ذکر شده در بالا قابلیت خوبی را از خود نشان داده‌اند. تنها در یک مورد فرآیند تخریب بلوکی به همراه خردشوندگی توسط برنامه‌ی ELFEN شبیه‌سازی شده است. این برنامه به صورت دو بعدی طراحی شده است. از محدودیت‌های این کد قابلیت مدل‌سازی تنها دو دسته درزه به صورت تقریباً عمود برهم و زمان بسیار زیاد اجرای مدل است. همچنین بلوک‌های جداشده و خرد شده همگی بصورت مربع مستطیل با ابعادی تقریباً یکسان در نظر گرفته شده‌اند.

با پیشرفت مداوم قدرت محاسبات و بهبود یافتن و پالایش الگوریتم‌ها و مدل‌ها، مدل‌های عددی نوید زیادی را برای شبیه‌سازی هرچه واقعی‌تر فرآیندهای تخریب و بررسی‌های تخریب‌پذیری در آینده می‌دهند. با این وجود، کار زیادی باید انجام شود تا مدل‌های ژئومکانیکی واقعی توسعه یابند.

## فصل چهارم

۴- ارزیابی ناپیوستگی‌های موجود و محتمل در توده سنگ با استفاده از روش

پردازش تصاویر و رده‌بندی سطوح ضعف

#### ۴-۱- مقدمه

خردشدگی برجا ناشی از درزه‌های بالفعل موجود در توده سنگ با مقاومت کششی صفر است. اما خردشوندگی اولیه و ثانویه، ناشی از خردشدن بلوک‌های سنگی به‌ظاهر بدون درزه است. در این بلوک‌ها سطوح ضعف از جمله رگچه‌ها، سطوح تورق و غیره گزینه‌های اصلی برای جدایش و شکست در اثر تنش‌های القایی ایجاد شده در طول فرآیند تخریب هستند. بنابراین لازم است فراوانی و پراکندگی این سطوح در توده سنگ با استفاده از روش‌هایی شبیه برداشت ناپیوستگی‌های بالفعل قابل برداشت باشد.

استفاده از شیوه‌ی پردازش تصویر به منظور تسهیل ثبت نگاره‌های حاصل از مغزه‌های حفاری اعم از اکتشافی و ژئوتکنیکی برای شناخت هرچه بهتر توده سنگ واقع در عمق، می‌تواند ابداع مهمی در راستای کم کردن هزینه‌ها و زمان لازم برای برداشت باشد. همچنین عاملی کنترل‌کننده برای کم کردن هرچه بیشتر خطای انسانی در ثبت نگاره‌ها محسوب می‌شود. در مورد گمانه‌های معدنی به‌ویژه مغزه‌گیری اکتشافی، از آنجاکه اکثر گمانه‌ها برای شناسایی ابعاد و عیار کانسار مورد نظر حفر می‌شوند، لذا در مدت زمان کوتاهی پس از حفاری و مغزه‌گیری، بخش‌های زیادی از مغزه‌ها برای عیارسنجی برش خورده و نمونه‌گیری خواهد شد و همین امر دسترسی مجدد برای ثبت نگاره‌های لازم و کنترل نگاره‌های ثبت شده را مشکل و گاهی غیرممکن خواهد کرد.

در صورتی‌که تصاویر مغزه‌ها از حداقل کیفیت لازم برخوردار باشند، نگاره‌های مختلفی اعم از ثبت شده مانند کیفیت مغزه حفاری (RQD) و ثبت نشده مانند چگالی خطی درزه‌داری یا همان تعداد ناپیوستگی‌ها در واحد طول مغزه ( $P_{10}$ ) و غیره، قابل برداشت و اندازه‌گیری خواهد بود. روش‌های پردازش تصویر بهترین شیوه برای تشخیص ناپیوستگی‌های موجود اعم از بالفعل و بالقوه در مغزه‌های حفاری و در مواردی تفکیک رنگ و جنس سنگ‌های مختلف موجود در توده سنگ از روی تصاویر موجود از جعبه مغزه‌ها است. پس از برداشت ناپیوستگی‌های بالفعل و همچنین سطوح ضعف با استفاده از روش‌های برداشت سطحی (خط برداشت یا پنجره برداشت)، عکس برداری از سطح، بازدید

و برداشت از مغزه‌های حفاری سالم و استفاده از تصاویر مغزه‌ها، اطلاعات بدست آمده باید تحلیل و دسته‌بندی شوند. یکی از این بخش‌ها تفکیک اطلاعات ناپیوستگی‌های بالقوه و کمی‌سازی میزان مقاومت و یا انرژی موردنیاز برای رخداد شکست از روی این سطوح است. لذا در این بخش، هدف، طراحی روشی است که میزان دقت تشخیص درزه‌های بالقوه به‌صورت چشمی مشخص شود و بر مبنای انرژی لازم برای شکست آن‌ها، این سطوح تفکیک و دسته‌بندی گردد.

#### ۴-۲- انتخاب گمانه‌های معرف

همانگونه که پیشتر اشاره شد، از داده‌های معدن مس کهنک به‌عنوان مطالعه موردی استفاده شده است. با توجه به اینکه بخش زیادی از مغزه‌های اکتشافی برش خورده است، لذا داده‌های مورد استفاده که در اختیار قرار گرفته است، شامل موارد زیر است:

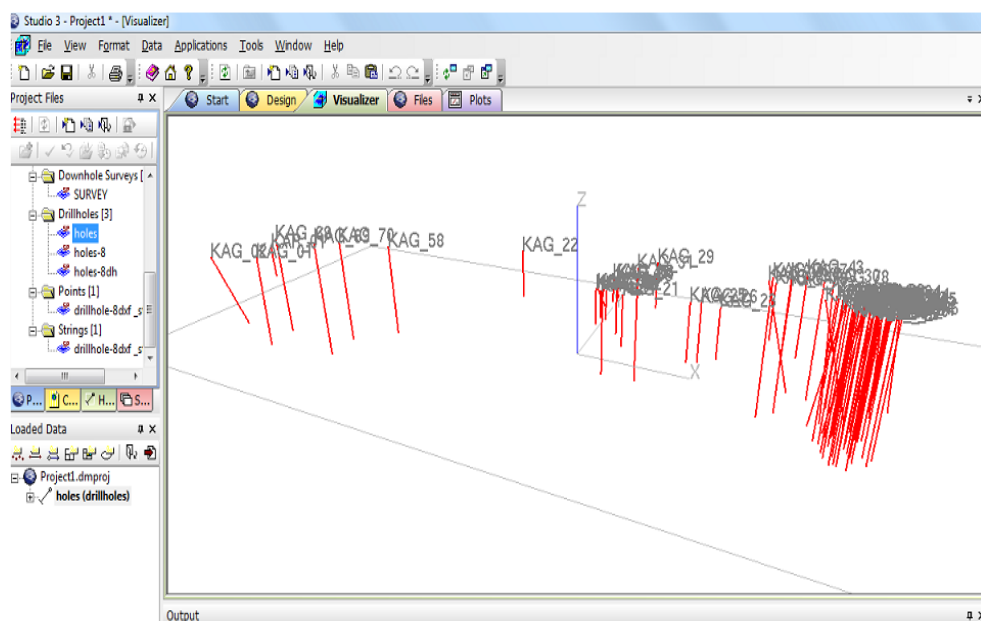
- عکس‌های مغزه‌های حفاری (در قالب ۴ عدد DVD)
- اطلاعات مربوط به مختصات سر گمانه‌های اکتشافی، شیب، آزیموت و عمق این گمانه‌ها (به صورت فایل Excel)

از آنجا که تعداد گمانه‌ها و اطلاعات آن‌ها بسیار زیاد است، به منظور ساخت مدل شدت درزه‌داری باید مدل زمین‌شناسی آن ساخته و تعدادی از گمانه‌ها که معرف کل مدل هستند، انتخاب شوند.

برای تهیه مدل زمین‌شناسی کانسارهایی که دارای پیکره هندسی مشخص ولی توزیع عیار پیچیده هستند، می‌توان از نرم‌افزارهایی مانند Datamine و Surpac استفاده کرد. بدیهی است، به دلیل وجود عوارض ساختمانی مانند بهم ریختگی هندسی و گسستگی‌های ساختاری، ساخت مدل هندسی با این نرم‌افزارها با اعمال قضاوت‌های مهندسی همراه خواهد بود. نرم‌افزار Datamine یکی از بهترین نرم‌افزارهای معدنی برای ساخت مدل زمین‌شناسی در حوزه مدل‌سازی هندسی عیاری کانسار

است. برای استفاده از این نرم‌افزار، داده‌های ورودی به چهار دسته اصلی تحت عنوان پرونده ۱ که عبارتند از surveys, collars, assays, geology تفکیک می‌شوند. این پرونده‌ها به ترتیب شامل داده مختصات، محل دهانه گمانه‌ها، آزیموت و شیب گمانه‌ها، عیار ماده معدنی و در نهایت سنگ‌شناسی گمانه‌ها هستند. بدین ترتیب چهار بخش بانک اطلاعاتی با نام‌های ذکر شده در داخل نرم‌افزار ایجاد می‌شود. از این چهار بخش سه بخش اول (collars, surveys و assays) برای ایجاد بانک اطلاعاتی ضروری است.

در پروژه حاضر براساس اطلاعات دریافتی از ۷۶ گمانه اکتشافی، پرونده‌های پایه لازم شامل Assay, Collar و Survey ساخته شده است در نهایت مدل سه بعدی گمانه‌ها در نرم افزار Datamine ساخته شده که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: ساخت مدل سه بعدی گمانه‌ها در نرم افزار Datamine

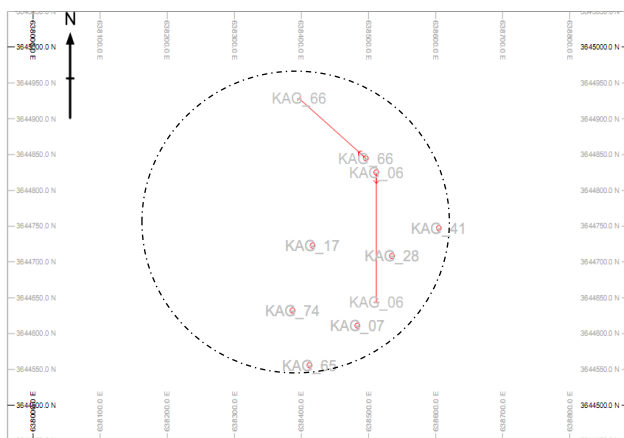
پس از ساخت مدل سه بعدی گمانه‌ها و با مشخص شدن محل تمرکز کانسار، تعداد ۵۰ گمانه که از لحاظ تمرکز و عمق دسترسی وضعیت مناسبی دارند، بررسی و از میان آن‌ها ۸ گمانه برای انجام مطالعات پردازش تصویر انتخاب شده است. عمق متوسط گمانه‌های انتخابی حدود ۶۳۰ متر است و



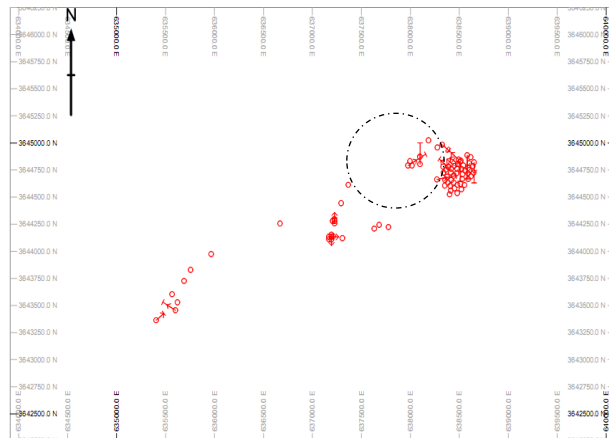
عمیق‌ترین گمانه ۷۴۹ متر عمق دارد. مشخصات گمانه‌های انتخاب شده در جدول ۴-۱ آورده شده است. در شکل ۴-۲ محل قرارگیری و شماره گمانه‌ها و در شکل ۴-۳ نمای سه بعدی از کل گمانه‌ها و گمانه‌های انتخابی نشان داده شده است.

جدول ۴-۱: مشخصات گمانه‌های انتخاب شده

| شماره  | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | ارتفاع سر | شیب | آزیموت | عمق (m) |
|--------|---------------|---------------|-----------|-----|--------|---------|
| KAG_06 | ۶۳۸۵۱۲٫۰۲     | ۳۶۴۴۸۲۴٫۵     | ۲۳۳۴٫۸۳   | ۶۵  | ۱۸۰    | ۴۲۸٫۷   |
| KAG_07 | ۶۳۸۴۸۳٫۷۴     | ۳۶۴۴۶۱۰٫۹     | ۲۳۴۰٫۲    | ۹۰  | ۰      | ۵۹۳٫۲   |
| KAG_17 | ۶۳۸۴۱۶٫۹۲     | ۳۶۴۴۷۲۲٫۴     | ۲۳۴۹٫۰۳   | ۹۰  | ۰      | ۴۲۸٫۴   |
| KAG_28 | ۶۳۸۵۳۵٫۵۲     | ۳۶۴۴۷۰۷٫۸     | ۲۳۳۲٫۸۸   | ۹۰  | ۰      | ۷۰۱٫۴۵  |
| KAG_41 | ۶۳۸۶۰۵٫۱۸     | ۳۶۴۴۷۴۶٫۸     | ۲۳۳۴٫۳۷   | ۹۰  | ۰      | ۷۱۰٫۱   |
| KAG_65 | ۶۳۸۴۱۲٫۵۵     | ۳۶۴۴۵۵۵٫۱     | ۲۳۴۹٫۳۷   | ۹۰  | ۰      | ۶۹۸٫۱۵  |
| KAG_66 | ۶۳۸۴۹۶٫۳۲     | ۳۶۴۴۸۴۴٫۵     | ۲۳۳۶٫۹۶   | ۸۰  | ۳۱۰    | ۷۴۸٫۸   |
| KAG_74 | ۶۳۸۳۸۷٫۰۲     | ۳۶۴۴۶۳۱٫۵     | ۲۳۴۵٫۵۹   | ۹۰  | ۰      | ۷۰۵٫۴   |

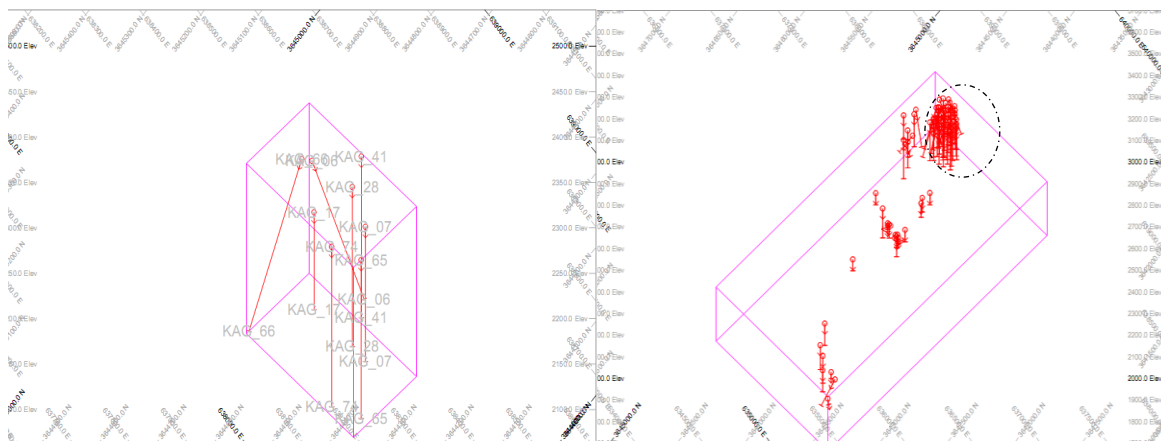


ب- گمانه‌های اکتشافی انتخاب شده



الف- کل گمانه‌های اکتشافی موجود

شکل ۴-۲: نقشه کل گمانه‌ها و گمانه‌های انتخاب شده



ب-نمای سه بعدی گمانه‌های اکتشافی انتخاب شده

الف-نمای سه بعدی کل گمانه‌های اکتشافی

شکل ۴-۳: نمای سه بعدی از کل گمانه‌ها و گمانه‌های انتخاب شده

### ۴-۳- پردازش تصویر

تصویر یک تابع دو بعدی،  $f(x,y)$ ، است که در آن  $x$  و  $y$  مختصات مکانی آن هستند و مقدار  $f$  در هر نقطه از مختصات  $(x,y)$  شدت تصویر در آن نقطه است. وقتی  $(x,y)$  و مقادیر شدت  $f$  متناهی و گسسته باشند، تصویر را تصویر دیجیتال گویند. هر تصویر دیجیتال مرکب از تعداد متناهی از عناصر است که هر کدام دارای مکان و مقدار خاصی است. این عناصر را پیکسل گویند (جعفرنژاد قمی، ۱۳۸۷). دو عامل مهم در تعیین مقدار  $f$  اهمیت دارند، میزان روشنایی منبع که به سطح تابیده شده (i) و ضریب انعکاس اشیای موجود (r). این دو مولفه به ترتیب مولفه‌های روشنایی و انعکاسی نامیده می‌شوند. رابطه‌ی این دو مولفه با شدت تصویر به صورت زیر تعریف می‌شود.

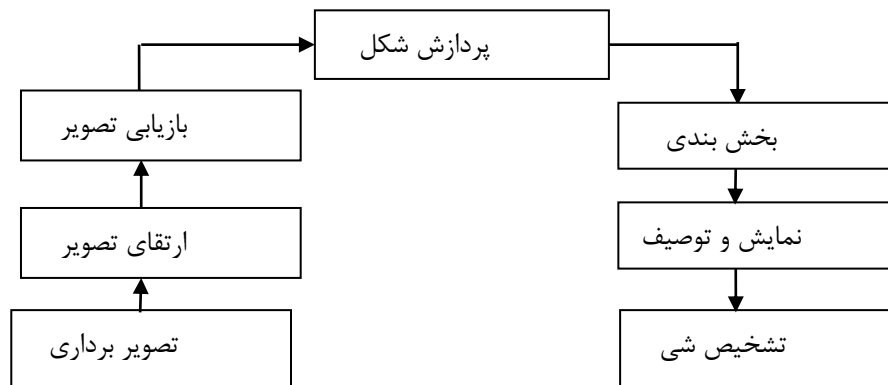
$$f(x,y) = i(x,y) \times r(x,y) \quad (4-1)$$

که در آن،  $i(x,y)$  مولفه‌ی روشنایی و تابع ویژگی‌های منبع است و  $r(x,y)$  مولفه‌ی انعکاسی (بدون بعد) است (Gonzalez and Woods, 2001). هر تصویر دیجیتالی توسط یک ماتریس نشان داده می‌شود که هر یک از درایه‌های این ماتریس را پیکسل‌های تصویر گویند. مقادیر پیکسل‌ها نشانگر میزان شدت سطح رنگ است.

تصاویر دیجیتال شامل اطلاعاتی هستند که می‌توانند به صورت ریاضی پردازش شوند. این داده‌ها کمی بوده و می‌توان با استفاده از نرم افزارهایی نظیر MATLAB و Mathematica این داده‌ها را آنالیز نمود. بنابراین احتمال داشتن یک روش خودکار برای تعیین موقعیت و هندسه ناپیوستگی‌ها وجود دارد (کاک‌ممی، س، ۱۳۹۰)،

### ۴-۳-۱- اصول کلی پردازش تصویر

مراحل اصلی در پردازش تصویر دیجیتالی در روند نمای شکل ۴-۴ خلاصه شده است، در این روند نما به ترتیب مراحل پردازش مشخص شده است. ممکن است در یک فرآیند پردازش تصویر، یک یا چند بخش از این روند نما مورد نیاز نباشد و یا نقش کمتری داشته باشد. در ادامه بخش‌های مختلف این روند نما به صورت مختصر تشریح شده است.



شکل ۴-۴: روند نمای پردازش تصویر (کاک‌ممی، ۱۳۹۰)

در پردازش تصویر مغزه‌ها مراحل ارتقا و بازیابی تصویر با استفاده از اعمال انواع فیلترها جهت حذف نویز یا برجسته کردن اطلاعات انجام می‌شود، سپس بخش‌بندی تصویر بخصوص بخش‌بندی مرزی جهت آشکارسازی شکستگی‌های موجود در سنگ انجام خواهد شد و در نهایت آستانه‌گیری که بخشی از نمایش و توصیف شکل بدست آمده است، جهت حذف پیکسل‌هایی که مقدار آنها از یک حدی کمتر است، انجام خواهد شد. در زیر به صورت خلاصه به شرح این موارد پرداخته شده است:

#### ۴-۳-۱-۱- فیلتر کردن تصویر

هدف از اعمال فیلترها، ارتقای تصویر است به طوری که تصویر ثانویه نسبت به تصویر اولیه برای کاربرد خاصی مناسب‌تر باشد. اعمال فیلترها در دو حوزه مکان و زمان صورت می‌گیرد و در هر حوزه نیز فیلترهای متفاوتی برای بهسازی و بازسازی تصویر به کار می‌رود. یکی از فیلترهای اصلی استفاده شده در حوزه‌ی مکانی، فیلتر بالاگذر یا فیلتر تیزکننده است. هدف اصلی این نوع فیلترها بر جسته نمودن لبه‌ها است (سی. گونزالس رافائل - ای. وودز ریچارد، ۱۳۸۷). در این نوع فیلترها از مشتق اول و مشتق دوم (گرادیان) برای تیز کردن تصویر استفاده می‌شود.

#### ۴-۳-۱-۲- بخش‌بندی

بخش‌بندی تصاویر عموماً به دو صورت انجام می‌شود. در حالت اول، تصویر بر مبنای تغییرات ناگهانی سطح شدت بخش‌بندی می‌شود. در حالت دوم، عملیات تقسیم‌بندی تصویر به نواحی مشابه با یک مجموعه‌ی پیش تعریف شده از معیارها انجام می‌شود (سی. گونزالس رافائل - ای. وودز ریچارد، ۱۳۸۷).

در مجموع دو نوع بخش‌بندی عمده وجود دارد: بخش‌بندی ناحیه‌ای و بخش‌بندی مرزی. در بخش‌بندی ناحیه‌ای مشخص می‌شود که هر تصویر شامل چند ناحیه با شدت‌های متفاوت است. ولی هدف از بخش‌بندی مرزی آشکار کردن لبه است. بخش‌بندی ناحیه‌ای مبتنی بر تقسیم‌بندی تصویر به ناحیه‌هایی است که بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای از پیش تعریف شده، تعیین شده‌اند (Chen et al., 2004). در بخش‌بندی مرزی فرض بر این است که مرز ناحیه‌ها کاملاً متفاوت از هم و متفاوت از پس‌زمینه هستند. در نرم افزار تهیه شده از بخش‌بندی مرزی برای آشکارسازی لبه استفاده شده است.

#### ۴-۳-۱-۳- تشخیص لبه

روش‌های تشخیص لبه دارای سه مرحله‌ی هموارسازی، مشتق‌گیری و برچسب‌گذاری است. عمل برچسب‌گذاری، نقاط لبه و غیرلبه را از هم مجزا می‌کند و عمل هموارسازی برای کاهش نویز انجام می‌شود (Oskoei and Hu, 2010). یک آشکارساز لبه، تصویر دیجیتال را به عنوان ورودی دریافت می‌کند و سپس نقشه‌ی لبه را به عنوان خروجی تولید می‌کند (Kang and Wang, 2007) (Canny, 1986). خصوصیات اصلی آشکارسازهای لبه به شرح ذیل است:

- لبه‌های آشکارشده باید تا حد ممکن نازک باشند.
  - تمامی لبه‌های موجود در تصویر شناسایی شده و تاجایی که امکان دارد لبه‌های اضافی تولید نشود.
  - فاصله‌ی بین نقاطی که به عنوان لبه علامت‌گذاری شده‌اند از لبه‌های واقعی در کمترین حد ممکن باشند.
- تشخیص تغییرات در شدت به منظور یافتن لبه‌ها می‌تواند با استفاده از مشتق‌های اول و دوم انجام گیرد. باید توجه داشت که مشتق‌های مرتبه اول لبه‌های ضخیم و مشتق‌های مرتبه دوم لبه‌های ریزتری را تولید می‌کنند (کاک‌ممی، ۱۳۹۰).

از روش‌های آشکارسازی لبه می‌توان به روش‌های کلاسیک، روش‌های مبتنی بر فیلتر گوسی، روش‌های چند مقیاسی، روش‌های وابسته به قراین و ... اشاره نمود. از مهمترین الگوریتم‌های معروف و کاربردی تشخیص لبه می‌توان از دو الگوریتم سوبل<sup>۱</sup> و کنی<sup>۲</sup> نام برد. الگوریتم کنی حالتی از روش‌های مبتنی بر فیلتر گوسی است.

#### - حدآستانه لبه

آستانه‌گیری (حد آستانه) تکنیک‌هایی را بر اساس مقادیر شدت برای تقسیم بندی مستقیم تصاویر فراهم می‌آورد. بدین معنی که اگر شدت پیکسل در نقطه  $(x, y)$  از یک مقدار مشخص  $T$  (که

---

1 - Sobel  
2 - Canny

آستانه نامیده می‌شود) بیشتر باشد آنگاه این نقطه متعلق به شی است در غیر این صورت متعلق به پس‌زمینه است. به عبارت دیگر بخش‌بندی تصویر  $g(x, y)$  به صورت زیر مشخص می‌شود.

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x, y) > T \\ 0 & \text{if } f(x, y) < T \end{cases} \quad (3-4)$$

مقدار  $T$  را در بالا، آستانه سراسری گویند. اگر مقدار  $T$  متغیر باشد آن‌گاه از واژه آستانه متغیر استفاده می‌شود (سی. گونزالس رافائل - ای. وودز ریچارد، ۱۳۸۸).

#### ۴-۳-۲ - تاریخچه استفاده از پردازش تصویر در معدن و مکانیک سنگ

تاریخچه استفاده از تصاویر دیجیتالی در معدن به حدود ۴۰ سال قبل برمی‌گردد. در سال ۱۹۷۶ مک کارتر<sup>۱</sup> از عکس‌های تهیه شده از یک شیروانی سنگی در یک معدن روباز به منظور تعیین موقعیت ساختارهای زمین‌شناسی استفاده کرد (Chen et al., 2004). پردازش تصویر دیجیتالی به طور موفقیت‌آمیزی در مکانیک سنگ نیز به کار گرفته شده است. برای مثال هریسن و رید<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۰ از یک سری روش‌های پردازش تصویر برای تعیین هندسه ناپیوستگی در سطح سنگ استفاده کردند (Reid and Harrison, 2000). کمنی و پست<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۳ شیب و جهت شیب درزه‌ها را با استفاده از روابط ریاضی بین خصوصیات هندسی دره‌ها و اثرات درزه‌ها در عکس‌های دیجیتالی دوبعدی بدست آوردند (Kemeny and Post, 2003). لمو و حادجی جورجیو<sup>۴</sup> در سال ۲۰۰۳ طرح خطوط اثر ناپیوستگی‌های سطح سنگ را با استفاده از تصاویر تهیه کردند (Lemu and Hadjigeorgiou, 2003). چن<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۴ از تصاویر دیجیتال به منظور برآورد ناهمگنی شکست در سنگ‌گرانیات استفاده کردند و مراحل شکست و رفتار ترک خوردگی نمونه‌های گرانیات را تحت فشار یک محوره نشان دادند (Chen et al., 2004). دب<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸

---

1 - McCarter

2 - Reid and Harrison

3 - Kemeny and Post

4 - Lemu and Hadjigeorgiou

5 - Chen

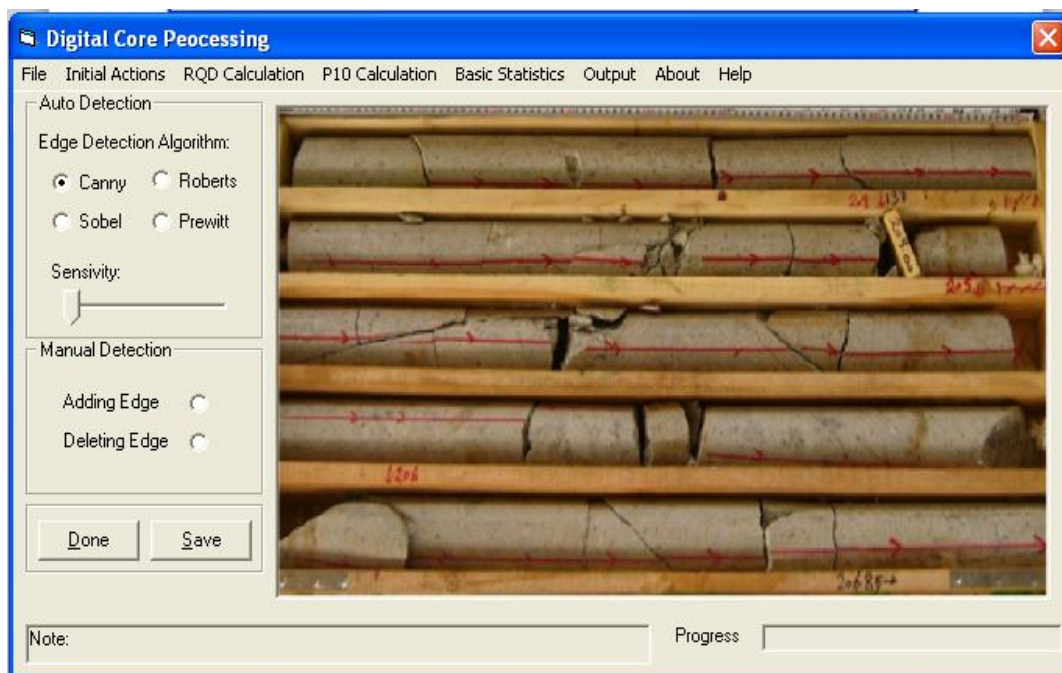
6 - Deb

روش‌هایی را به منظور شناسایی و تحلیل خودکار ناپیوستگی‌های توده سنگ با استفاده از تصاویر دیجیتال ارائه دادند (Deb et al., 2008). مبینی در سال ۱۳۹۰ در مورد بهبود فرآیند درزه‌نگاری در توده‌سنگ‌های درزه‌دار با بکارگیری تکنیک‌های پردازش تصویر کار کرده است (مبینی، ۱۳۹۰). همچنین این روش توسط کاک‌ممی و یاراحمدی در سال ۱۳۹۰ برای مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها در معدن چاه‌گز استفاده شده است (کاک‌ممی، ۱۳۹۰).

#### ۳-۳-۴ - کلیات برنامه پردازش تصاویر مغزه (Digital Core Processing)

برنامه تهیه شده بر مبنای تشخیص و تفکیک لبه‌ها و مرزهای شکستگی‌ها بر روی تصاویر سطح خاکستری عمل می‌کند. ناپیوستگی‌ها در یک تصویر به صورت مرز بین دو ناحیه با سطح خاکستری متفاوت توصیف می‌شوند. استفاده از تصاویر سطح خاکستری به منظور تعیین مشخصات گسستگی‌ها به دو دلیل ارجحیت دارد، نخست اینکه هنگامی که سطح سنگ روشن می‌شود این درزه‌ها به صورت سایه‌های خاکستری تیره دیده خواهند شد. همچنین پردازش و تحلیل تصاویر خاکستری (سیاه و سفید) بطور معمول ساده‌تر از تحلیل و پردازش تصاویر رنگی است.

بررسی چگونگی تغییرات سطح خاکستری در تصویر، اساس آشکارسازهای لبه در پردازش تصویر به شمار می‌رود (Reid and Harrison, 2000). در این برنامه از الگوریتم‌های مختلف تشخیص و آشکارسازی لبه و مرز تصویر از جمله کنی و سوبل استفاده شده است، این الگوریتم‌ها در نرم-افزارهای Matlab و Mathematica وجود دارد و می‌توان از آنها براحتی استفاده کرد. قابلیت تغییر در میزان حساسیت و تفکیک‌پذیری لبه‌ها نیز در آن تعبیه شده است. کاربر می‌تواند با انتخاب هر کدام از روش‌های تشخیص مرز و تغییر در میزان تفکیک‌پذیری، تصویر مشخص شده از لبه‌ها که با تصویر اصلی انطباق داده می‌شود را ملاحظه نماید و بهترین برازش تصویری را انتخاب نماید. امکان حذف یا اضافه کردن لبه‌ها به صورت دستی نیز وجود دارد. در شکل (۴-۵) منوی ورودی برنامه کامپیوتری تهیه شده با عنوان DCP نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: منوی ورودی برنامه کامپیوتری تهیه شده با عنوان DCP

در ادامه بخش‌های اصلی این برنامه معرفی شده است:

- **تعداد مغزه:** بسته به این که عکس مورد مطالعه شامل چند ردیف مغزه باشد، عدد مربوطه تنظیم خواهد شد.
- **طول مغزه:** طول مغزه به طور پیش‌فرض یک متر در نظر گرفته می‌شود. اما زمانی که طول محدوده بالا و پایین مغزه‌های موجود در جعبه مشخص شده باشد، بر اساس آن می‌توان طول مغزه را تغییر داد.
- **حد آستانه لبه:** با تغییر دادن حد آستانه‌ی لبه، RQD و به تبع آن چگالی خطی درزه‌داری ( $P_{10}$ ) متفاوتی بدست می‌آید و به عبارت دیگر هر چه عدد حد آستانه افزایش یابد، تعداد خطوطی که به عنوان درزه شناسایی و نشان داده می‌شود کمتر شده و در نتیجه RQD بیشتر می‌شود.

#### ۴-۳-۴ - فرآیند انجام پردازش تصویر

پس از انتخاب تصاویر و برش و آماده‌سازی در نرم افزار DCP بارگذاری شده است. مراحل

آماده سازی، تنظیمات و گرفتن خروجی‌ها به ترتیب در ذیل نشان داده شده است:



در مجموع ۱۱۰۱ تصویر به صورت شکل (۴-۶ ب)، برش خورده تا امکان بارگیری آن در برنامه نوشته شده وجود داشته باشد. پس از بارگیری تصویر و مشخص کردن تنظیمات (شامل تعداد مغزه، تفکیک پذیری رنگی، آستانه لبه تصویر برای تشخیص ناپیوستگی، حداقل طول مبنا (براساس رابطه RQD این مقدار ۱۰ سانتیمتر است) و همچنین طول مغزه در هر بخش از جعبه مغزه) که در شکل (۴-۷) نشان داده شده، برنامه اجرا شده است.



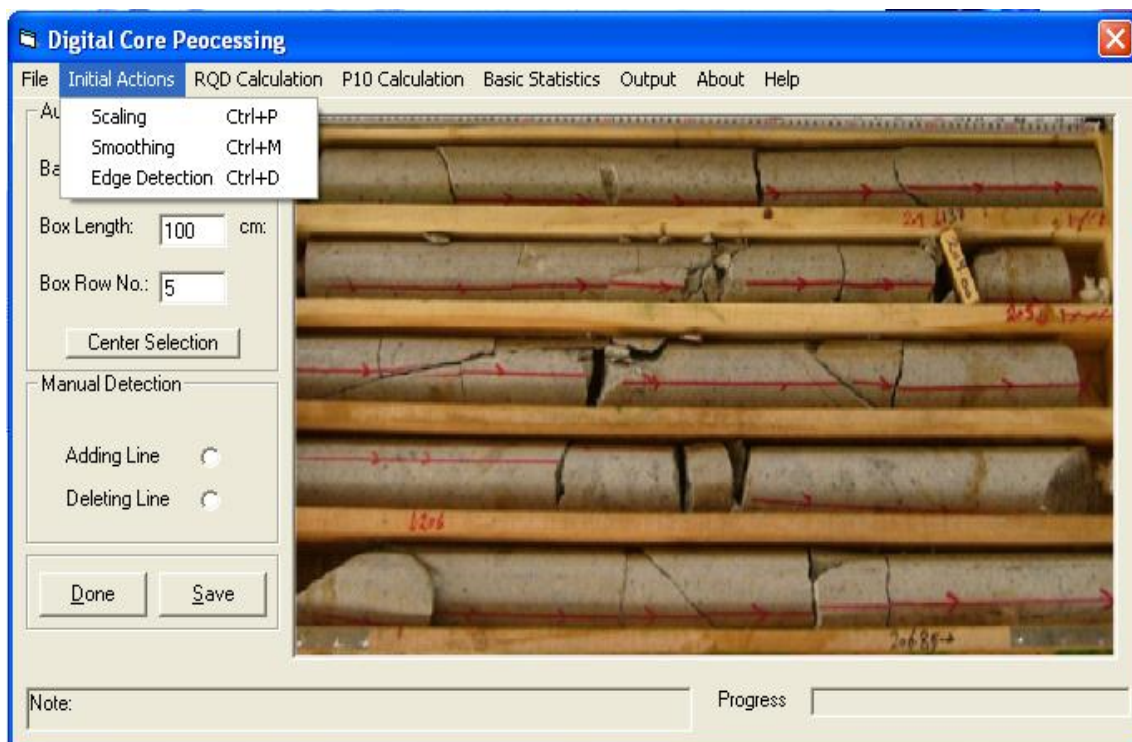
ب) برش و تنظیم تصویر برای ورود به نرم افزار



الف) انتخاب تصویر

شکل ۴-۶: انتخاب و آماده سازی تصویر

در تصویر بارگیری شده مطابق شکل (۴-۸) ابتدای مغزه‌ها برای تعیین حدود خطوط اسکن، مشخص شده است، (این کار با کلیک کردن در محل‌های مورد نظر در ابتدای مغزه انجام می‌شود). به عنوان نمونه در شکل ۴-۸ نخست گوشه سمت چپ و بالای تصویر (نقطه شماره یک) کلیک می‌شود و به ترتیب نشان داده شده در شکل، نقطه دوم (سمت چپ و ابتدای ردیف دوم) کلیک خواهد شد. و این روند به ترتیب تا انتهای آخرین ردیف مغزه ادامه می‌یابد.

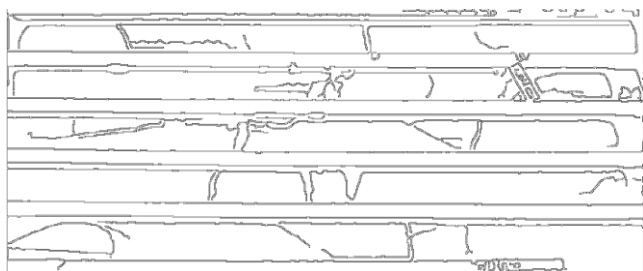


شکل ۴-۷: اجرای برنامه کامپیوتری و بارگیری تصویر



شکل ۴-۸: تعیین ترتیب و حدود پیاده‌سازی خطوط اسکن برای هر مغزه

پس از مشخص کردن حدود خطوط اسکن مغزه‌ها، عملیات هموارسازی تصویر برای کم کردن نویزها، فیلتر رنگ برای حذف رنگ قرمز کشیده شده روی مغزه مورد نظر و ایجاد سطح خاکستری و تشخیص لبه‌ها با الگوریتم کنی برروی تصویر بارگیری شده انجام می‌شود. خروجی هریک از مراحل یاد شده را می‌توان به صورت جداگانه و یا منطبق برروی یکدیگر برای تعیین درستی عملیات انجام شده، نمایش داد. شکل (۴-۹) نمونه‌ای از خروجی بدست آمده را نشان می‌دهد.



(ب) مرحله‌ی بخش‌بندی و آشکارسازی لبه با حد آستانه‌ی ۰.۵.

(الف) مرحله‌ی هموارسازی، فیلتر رنگ قرمز و ایجاد سطح خاکستری

شکل ۴-۹: تفکیک خروجی حاصل از مراحل فیلتر و آشکارسازی لبه‌ها

نتایج خروجی نرم افزار شامل موارد زیر است:

(الف) جدول با قواره Excell که حاوی RQD و چگالی درزه‌داری ( $P_{10}$ ) بوده که در شکل (۴-۴)

(۱۰) نشان داده شده است.

|   | A        | B       | C   | D   |
|---|----------|---------|-----|-----|
| 1 | Hole num | Box num | P10 | RQD |
| 2 | 41       | 53      | 4   | 100 |
| 3 | 41       | 53      | 3   | 100 |
| 4 | 41       | 53      | 6   | 50  |
| 5 | 41       | 53      | 5   | 90  |
| 6 | 41       | 53      | 6   | 95  |

شکل ۴-۱۰: خروجی RQD و تعداد درزه‌های موجود در واحد طول مغزه ( $P_{10}$ ) برای پنج ردیف مغزه

(ب) تصویر پردازش شده به همراه لبه‌ها و ناپیوستگی‌ها به رنگ قرمز و طول‌های بزرگتر از ۱۰

سانتیمتر به رنگ سبز که در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۱: تصویر پردازش شده به همراه خطوط اسکن و طول‌های بزرگتر از ۱۰ سانتیمتر

این مراحل برای هر جعبه مغزه انتخاب شده تکرار خواهد شد و پس از تعیین مولفه‌های خردشدگی (عدد RQD) و شدت درزه‌داری خطی ( $P_{10}$ ) و در صورت نیاز تکرار هر مرحله با تغییر مولفه‌های تاثیرگذار مانند آستانه لبه و غیره، در نهایت بهترین و واقعی‌ترین خروجی‌های حاصل ثبت خواهد شد.

برای اطمینان از خروجی‌های حاصل از برنامه نوشته شده، مولفه RQD که در لاگ گمانه‌ها به صورت مستقیم اندازه‌گیری شده بود، با داده‌های حاصل از برآورد پردازش تصویر در مثال فوق مقایسه شده است. میانگین مقادیر شاخص کیفیت توده سنگ محاسبه شده توسط نرم‌افزار عدد ۳۲ و عدد حاصل از میانگین لاگ گمانه‌ها ۳۳ است که دارای انطباق بسیار خوب است.

#### ۴-۴- برداشت سطوح ضعف از روی مغزه‌ها

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 مشخص گردد، تا در مراحل مدل‌سازی هندسی و سپس تحلیل رفتار توده بتوان آن‌ها را لحاظ نمود.

با توجه به نبود گمانه‌های ژئوتکنیکی جهت‌دار در معدن کهنک به ناچار برای بررسی وضعیت ناپیوستگی‌ها در عمق از مغزه‌های گمانه‌های اکتشافی موجود استفاده شده است. در این حالت با استفاده از روش پردازش تصویر و به صورت چشمی (مشاهده‌ای) از روی عکس‌های موجود، ناپیوستگی‌های قابل تشخیص، تعیین شده است. آنچه که حایز اهمیت است تعیین میزان درستی نگاره‌های مشاهده‌ای ثبت شده با استفاده از پردازش تصویر از روی عکس‌ها است. هدف مهم دیگر، بررسی کیفی و کمی‌سازی سطوح ناپیوستگی‌های بالقوه موجود به منظور مدل‌سازی هندسی آنها است. از این‌رو بازدید از جعبه مغزه‌ها صورت گرفته تا بتوان از نزدیک نوع ناپیوستگی موجود و مولفه‌های هندسی آنها را تعیین نمود. از آن‌جا که در عمل بازدید از کلیه جعبه مغزه‌ها غیرممکن

است، لذا چهار گمانه از هشت گمانه‌ای که نگاره‌های لازم از طریق عکس در آن‌ها تعیین شده، انتخاب شده‌اند و بخش‌هایی که در آن مغزه با کمترین میزان خردشدگی وجود دارد مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. گفتنی است که تمامی مغزه‌های موجود در انبار جهت تهیه نمونه برای عیارسنجی به صورت عرضی برش داده شده‌اند. این مساله نیز موجب ایجاد ناپیوستگی‌های ثانویه جدید در مغزه‌ها شده است.

#### ۴-۴-۱- گروه‌بندی انواع شکستگی‌ها

در بررسی‌های انجام شده بر روی انواع سطوح ناپیوسته در مغزه‌های معدن کهنک، سه گروه شکستگی تشخیص داده شده است. این گروه‌ها شامل شکستگی‌های اولیه، ثانویه و خردشدگی به شرح زیر است.

شکستگی اولیه: سطوح ناپیوسته ناشی از درزه‌ها و لایه‌بندی

شکستگی ثانویه: سطوح ناپیوسته ناشی از تغییر شکل‌های ایجاد شده توسط انسان، حاصل

جدایش از روی رگچه‌ها و سطوح پرشده‌ی مشخص و یا شکست ماده سنگ

خردشدگی: سطوحی کاملاً خردشده در اثر تغییر شکل‌های ناشی از تکتونیک و یا عوامل انسانی

#### ۴-۴-۲- مراحل انجام عملیات ثبت نگاره‌های هر جعبه مغزه

انجام عملیات ثبت نگاره‌های هر جعبه مغزه شامل مراحل زیر است:

۱- شماره‌گذاری ناپیوستگی‌ها به ترتیب از ابتدای مغزه واقع در جعبه و تهیه عکس

۲- گروه‌بندی شکستگی‌ها با بررسی تک‌تک سطوح ناپیوستگی بر مبنای علل بروز آن‌ها به

صورت ناپیوستگی اولیه، ثانویه (جدایش از روی سطوح ضعف یا ماده سنگ) و خردشدگی

۳- تعیین امتداد ناپیوستگی‌های اولیه نسبت به جهت شمال

۴- تعیین خصوصیات کیفی ناپیوستگی از جمله سطح پرشدگی و نوع آن و ضریب زبری سطح

در شکل ۴-۱۲ نمونه‌ای از شماره‌گذاری انجام شده نمایش داده شده است. پس از مرحله

شماره‌گذاری، نوع هر ناپیوستگی بر مبنای گروه‌بندی ذکر شده، مشخص و تفکیک شده است.

این موارد در فرم‌های مخصوص برداشت ناپیوستگی ثبت می‌شود. نمونه‌ای از فرم تکمیل شده

در شکل ۴-۱۳ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۲: شماره‌گذاری ناپیوستگی‌ها (جعبه مغزه ۳۸ از گمانه ۷)

#### ۴-۴-۳- تعیین امتداد ناپیوستگی‌های اولیه

با بررسی تک‌تک سطوح ناپیوستگی‌ها، در صورتی که سطح جدایش به صورت اولیه در

اثر درزه‌های واقعی سنگ تشخیص داده شود و یا سطح ضعف و رگچه باشد، میزان امتداد

آن نسبت به شمال توسط کمپاس برداشت می‌شود. نمونه‌ای از نحوه برداشت در شکل ۴-

۱۴ نشان داده شده است. این مولفه در ستون مربوط به جهت شیب در فرم برداشت گردیده

است.

KAB-66 / Box 88 / Sheet 2

DISCONTINUITY SURVEY DATA SHEET

GENERAL INFORMATION

Location: \_\_\_\_\_ Date: Day: 19, Month: 6, Year: 79

Discontinuity data sheet No: \_\_\_\_\_

| No. | Type | Dip | Dip direction | Persistence (m) | Spacing (Cm) | Aperture (mm) | Gring | Formation | Weathering | JRC (raw) | JRC (smooth) | Roughness | Water loss | Remarks (Sketches, etc.) |
|-----|------|-----|---------------|-----------------|--------------|---------------|-------|-----------|------------|-----------|--------------|-----------|------------|--------------------------|
| 28  | ش    | 35  |               |                 | 12           | 5             | ش     |           |            | 6.8       | 6.8          | 3b        |            |                          |
| 29  | ش    | 85  |               |                 | 16           | 2             | ش     |           |            | 6.8       | 6.8          | 3b        |            |                          |
| 30  | ش    | 55  |               |                 | 5            |               |       |           |            |           |              |           |            |                          |
| 31  | ش    | 85  |               |                 | 3            | 1             | ش     |           |            | 4.6       | 4.6          | 3b        |            |                          |
| 32  | ش    | 45  |               |                 | 8            | 1.5           | ش     |           |            | 6.8       | 7.0          | 3c        |            |                          |

شکل ۴-۱۳: نمونه فرم برداشت تکمیل شده



شکل ۴-۱۴: برداشت امتداد ناپیوستگی‌های اولیه نسبت به جهت شمال

#### ۴-۴-۴- تعیین خصوصیات کیفی ناپیوستگی‌ها

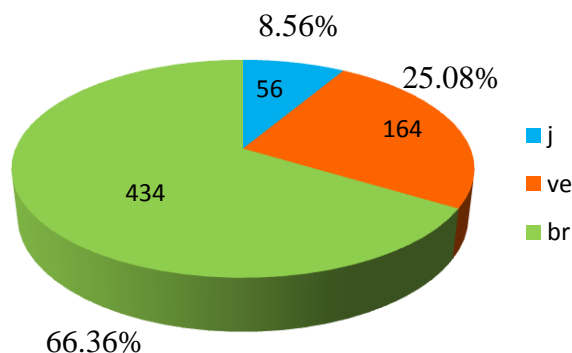
تمامی خصوصیات کیفی ناپیوستگی‌ها از جمله سطح پرشدگی و نوع آن، ضریب زبری سطح و نوع زبری هر یک از ناپیوستگی‌ها بر اساس نمودارها و جداول استاندارد مربوطه تا حد ممکن کمی‌سازی شده است. موارد مربوط به این مولفه‌ها در ستون‌های JRC، filling و Roughness در فرم برداشت یادداشت شده است.

#### ۴-۴-۵- تحلیل آماری نتایج برداشت

در این مرحله پس از تکمیل فرم‌های تهیه شده‌ی برداشت بر اساس مشاهدات عینی و اندازه‌گیری‌ها و کمی‌سازی مولفه‌ها طبق جداول و نمودارهای استاندارد، داده‌های ثبت شده به منظور تفکیک و دسته‌بندی صحیح مشاهدات و استنتاج دقیق، مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفته است که تنها توضیحات کلی بخش‌هایی از آن ارائه شده است. از مولفه‌های هندسی بدست آمده در ساخت مدل هندسی استفاده خواهد شد.

#### ۴-۵-۱- تحلیل تعداد و نوع ناپیوستگی‌ها

نمودار تعداد ناپیوستگی‌ها به تفکیک نوع آن‌ها در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. در این نمودار z نماد درزه و یا ناپیوستگی اولیه موجود است، ve نماد شکست از روی رگچه‌ها و یا سطوح جوش خورده که اغلب به صورت ثانویه رخ داده است و br نماد شکست توسط عوامل انسانی، دستگاه حفاری، مغزه‌گیر و یا دستگاه برش که همگی به صورت ثانویه رخ داده است.



شکل ۴-۱۵: نمودار انواع ناپیوستگی‌های شناسایی شده به همراه تعداد و درصد هر نوع ناپیوستگی

همان گونه که در شکل ۴-۱۵ مشاهده می‌شود، درصد سطوح ضعف و یا ناپیوستگی‌های ایجاد شده از روی این سطوح، به‌طور کلی در حدود ۲۵ درصد است.

#### ۴-۵-۲- تحلیل ویژگی‌های پرشدگی و بازشدگی ناپیوستگی‌ها

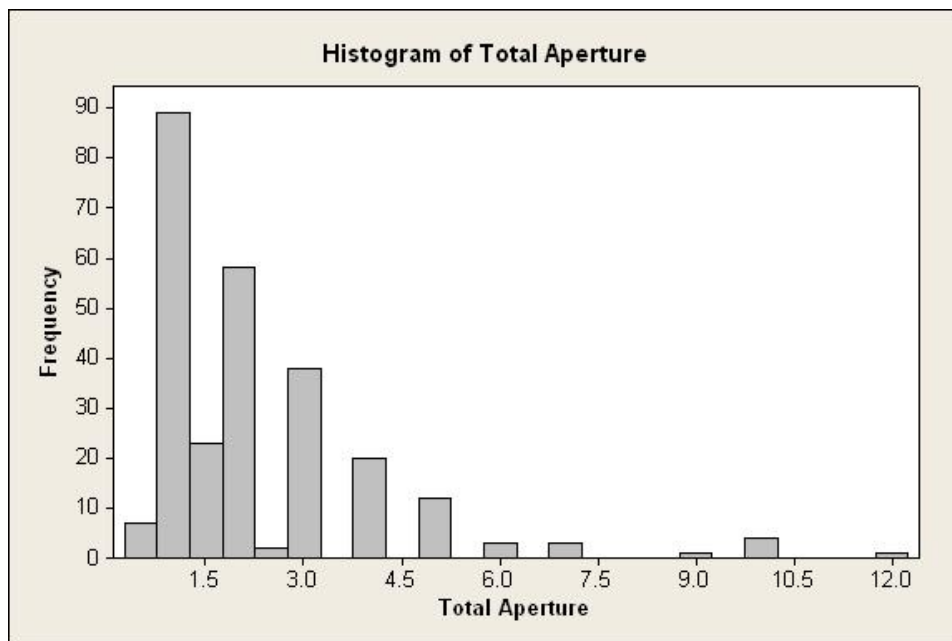
در عمل، تعیین دقیق میزان بازشدگی و پرشدگی ناپیوستگی‌های موجود در عمق از روی گمانه‌های اکتشافی امکان‌پذیر نیست، زیرا این مقادیر به ویژه بازشدگی در مورد درزه‌ها در حین نمونه‌گیری یا خارج کردن مغزه از لوله مغزه‌گیری، قرار دادن در جعبه مغزه، حمل و نقل و ... تغییر می‌یابد. لذا با توجه به برداشت‌های صورت گرفته از جعبه مغزه‌ها و توجه به این نکته که رگچه‌ها و سطوح ضعف فراوان در نمونه سنگ‌ها به خصوص در اعماق بین ۳۰۰ تا ۳۵۰ متر وجود دارد، اندازه‌گیری میزان بازشدگی بر اساس ضخامت مواد پرکننده این سطوح ضعف - چه به صورت جداشده و یا سطوح به هم چسبیده - در دستور کار قرار گرفته است.

بعد از بازدید از گمانه‌های انتخاب شده، از آن‌جا که مغزه‌های گمانه‌ی شماره ۷۴ کاملاً خرد شده است، اندازه‌گیری میزان بازشدگی فقط در گمانه شماره ۶۶ انجام شده است.



برای بررسی میزان پرشدگی و بازشدگی ناپیوستگی‌ها، به ترتیب از سمت چپ و بالای جعبه‌های مورد نظر تا انتهای جعبه مغزه، تک تک ناپیوستگی‌ها مورد بررسی قرار گرفته و سطوح ضعف جدا شده که میزان مواد پرکننده آن‌ها غالباً مشخص است، تفکیک و ضخامت مواد پرکننده اندازه‌گیری شده است. سپس سطوح ضعف موجود ولی جدا نشده، به همین ترتیب برداشت شده است. داده‌های حاصل از برداشت به صورت سه ستون شامل شماره، میزان بازشدگی و توضیحات یادداشت شده است. در مرحله بعد با تجزیه و تحلیل آماری داده‌های موجود، میانگین و انحراف معیار مولفه بازشدگی به صورت کلی و به تفکیک نوع جداشدگی تعیین گردیده است.

در مجموع ۱۶۴ مورد سطوح ضعف اعم از ناپیوستگی و یا جوش خورده برداشت شد که دارای تابع توزیع نمایی منفی با میانگین ضخامت مواد پرکننده ۲٫۳ میلی‌متر و انحراف معیار ۱٫۷۹ میلی‌متر است ( شکل ۴-۱۶)



شکل ۴-۱۶: تابع توزیع فراوانی میزان ضخامت مواد پرکننده سطوح ناپیوستگی اعم از باز شده و باز نشده

#### ۴-۵- مقایسه میزان شکستگی‌ها قبل و بعد از برش مغزه

تصاویر قبل و بعد از برش جعبه مغزه ۸۸ از گمانه ۶۶ در شکل ۴-۱۷ و شکل ۴-۱۸ نشان داده

شده است.



شکل ۴-۱۷: تصویر جعبه مغزه ۸۸ از گمانه ۶۶ قبل از برش مغزه



شکل ۴-۱۸: تصویر جعبه مغزه ۸۸ از گمانه ۶۶ بعد از برش مغزه

در این مورد تعداد ناپیوستگی‌های ثانویه ایجاد شده حدود ۳ برابر ناپیوستگی‌های موجود قبل از برش مغزه است. همچنین فرم‌های تهیه شده در حین برداشت نشان می‌دهند که حدود ۸۰ درصد از ناپیوستگی‌های ثانویه ناشی از جدایش روی سطوح رگچه‌های موجود و ۲۰ درصد به صورت شکستگی از روی ماده سنگ بوده است.

به منظور دید بهتر از نحوه جدایش صورت گرفته از روی سطوح جوش خورده و رگچه‌ها تصاویر مربوط به جدایش از روی سطوح رگچه‌ها در شکل ۴-۱۹ و شکل ۴-۲۰ و به صورت نمای نزدیک نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۹: شکست ایجاد شده از روی سطح رگچه



شکل ۴-۲۰: ضخامت رگچه پس از شکست نمونه از محل جوش خوردگی

#### ۴-۶- تقسیم‌بندی انواع ناپیوستگی‌ها

اکثر سنگ‌ها اساساً موادی شکسته هستند ناپیوستگی عبارت است از سطح وضعی در توده سنگ که ساختار مواد در طول آن دچار جدایش شده است. یا به عبارت دیگر به‌طور کلی اصطلاح ناپیوستگی به هرگونه جدایش در ماده سنگ اطلاق می‌شود که دارای مقاومت کششی صفر باشد. این اصطلاح بدون توجه به چگونگی ایجاد آن، به کار می‌رود. ناپیوستگی‌ها از نظر اندازه از یک ریز ترک شروع شده و به یک گسل بزرگ ختم می‌شوند. از انواع دیگر ناپیوستگی‌ها می‌توان از 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 (Price,

2009).

#### ۴-۶-۱ - ناپیوستگی‌های جدا نشده<sup>۶</sup> (کامل)

آن دسته از ناپیوستگی‌هایی که در اثر حرکت و هوازدهی، هنوز در حال باز شدن هستند ناپیوستگی‌های جدا نشده نامیده می‌شوند. 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.

#### ۴-۶-۲ - ناپیوستگی‌های مکانیکی

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

**الف - لایه‌بندی:** شامل صفحات لایه‌بندی یا صفحات تورق: که از طریق تغییر در نوع آرایش مواد یا کانی‌ها در سنگ ایجاد می‌شود.

**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.

**پ - 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.

**ت - 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 به‌وقوع پیوسته‌ای هستند که در فواصل منظمی رخ داده‌اند و دارای جهت‌ها و ویژگی‌های مشابه هستند.

با وجود تقسیم‌بندی‌های پذیرفته شده‌ی فوق، در این گزارش ناپیوستگی‌ها بر اساس نیاز پروژه، به انواع ذیل تقسیم‌بندی شده‌اند:

**الف: ناپیوستگی‌های نوع صفر (بالفعل):** درزه‌های دارای مقاومت کششی ناچیز و یا نزدیک به صفر، به‌عنوان ناپیوستگی‌های بالفعل یا نوع صفر نام‌گذاری شده‌اند.

**ب- ناپیوستگی‌های بالقوه (سطوح ضعف):** ناپیوستگی‌های پرشده و جوش خورده و سطوح ضعف سنگ از جمله شیستوزیته و تورق (و به طور کلی سطوح ضعف دارای مقاومت کششی) به‌عنوان ناپیوستگی‌های بالقوه در نظر گرفته می‌شوند. براساس میزان انرژی مورد نیاز برای جدایش، سطوح ضعف در این تحقیق به سه دسته‌ی مجزای نوع ۱، ۲ و ۳ تفکیک شده‌اند. براساس تفکیک سطح انرژی مورد نیاز برای شکست، درزه‌های نوع ۱، تنها ۳۰ درصد انرژی لازم برای شکست ماده سنگ و درزه‌های نوع ۲ و ۳ به ترتیب ۶۰ و ۹۰ درصد انرژی شکست ماده سنگ را برای تبدیل شدن به درزه‌های بالفعل نیاز دارند.

چگونگی این تقسیم‌بندی در بخش ۴-۷ بیان شده است.

- **ناپیوستگی‌های نوع ۱:** براساس تفکیک سطح انرژی مورد نیاز برای شکست، نوع ۱، تنها ۳۰ درصد انرژی لازم برای شکست سنگ سالم (بدون سطوح ضعف) را برای تبدیل شدن به درزه‌های بالفعل نیاز دارند.

- **ناپیوستگی‌های نوع ۲:** در این نوع انرژی لازم برای شکست و جدایش سطح ضعف، ۶۰ درصد انرژی لازم برای شکست از روی سطح زمینه‌ی سنگ است.

- **ناپیوستگی‌های نوع ۳:** انرژی لازم برای جدایش این نوع از سطوح ضعف که به سختی به‌صورت چشمی قابل تشخیص هستند، ۹۰ درصد انرژی لازم برای شکست سنگ سالم مورد آزمایش است.

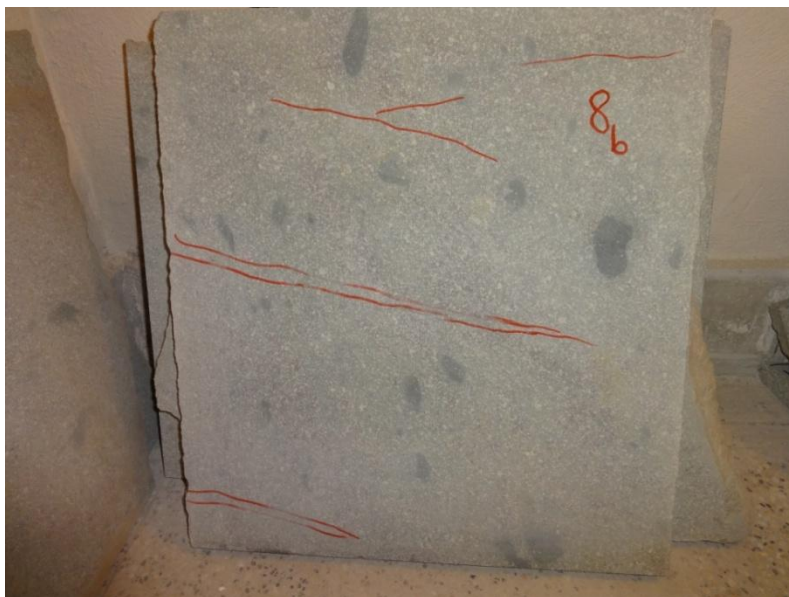
#### ۷-۴- شرح روش کمی سازی ناپیوستگی‌ها

به‌طور 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. برای این منظور نمونه‌های موزاییکی با ضخامت کم نسبت به سطح آنها، تهیه شده است. پس از تهیه نمونه‌ها که به تفصیل در بخش ۷-۴-۱ توضیح داده شده است، براساس یک‌سری از شاخص‌ها سطوح ضعف بر روی نمونه‌ها قبل از شکست مشخص و علامت‌گذاری شده است. این شاخص‌ها عبارتند از: ۱- گسترش ۲- بازشدگی (ضخامت پرشوندگی) و ۳- جهت غالب سطوح ضعف مشاهده شده. پس از شکست نمونه میزان درستی تشخیص درزه‌های بالقوه کنترل شده و براساس سطح انرژی مورد نیاز برای شکست تقسیم‌بندی و تفکیک انجام شده است.

#### ۷-۴-۱- نمونه‌برداری و تولید نمونه‌های مورد نیاز

تهیه نمونه‌های موزاییکی از تعدادی بلوک سنگی از سنگ گرانیت پرفیری که به لحاظ ساختاری بسیار شبیه به سنگ معدن کهنک است، به ابعاد حداقل  $60 \times 60 \times 60$  سانتیمتر انجام شده است. سپس با استفاده از دستگاه‌های سنگ‌بری موزاییک‌هایی 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 سطوح ضعف به صورت چشمی براساس شاخص‌های ذکر شده، به‌وسیله رنگ علامت‌گذاری شده است (شکل ۴-۲۱)، تا پس از شکسته شدن نمونه‌ها میزان درستی برآورد سطوح ضعف و امتداد آن مشخص گردد.



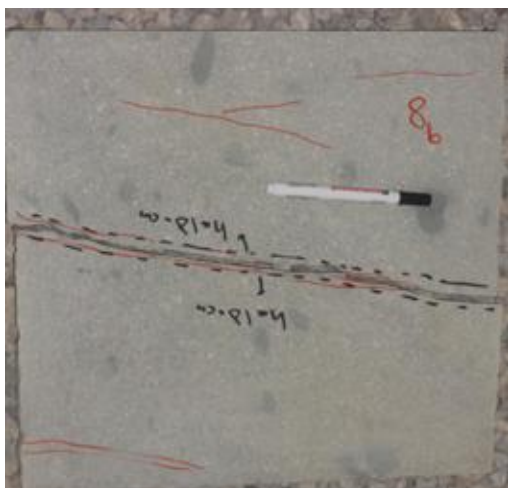
شکل ۴-۲۱: نمونه‌ای از علامت‌گذاری سطوح ضعف با رنگ قبل از آزمایش شکست

#### ۴-۷-۲- دستورالعمل آزمایش شکست

برای انجام آزمایش سطح زمین با ماسه بادامی به ضخامت ۱۰ سانتیمتر کاملاً تسطیح شده است (شکل ۴-۲۲). 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 وضعی که از قبل تشخیص داده شده بود، مقایسه شده است (شکل ۴-۲۳). نمونه‌های شکسته نشده از ارتفاع بالاتری رها خواهد شد تا شکسته شود. ارتفاع رها شدن نمونه به صورت دستی قابل تنظیم و افزایش است.



شکل ۴-۲۲: سطح ماسه بادامی تسطیح شده به ضخامت ۱۰ سانتیمتر

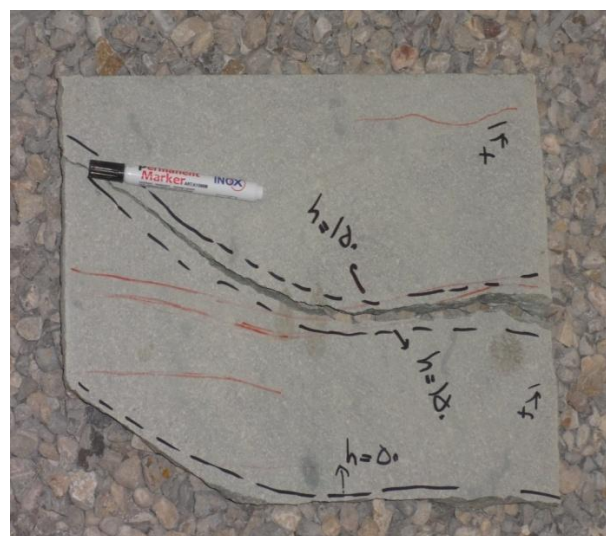
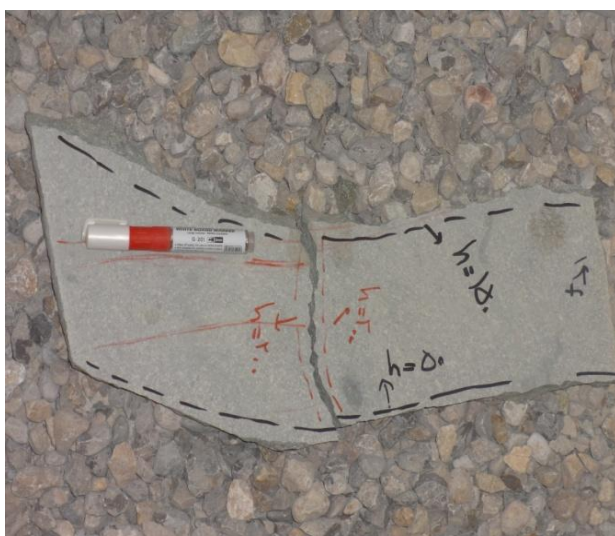


ب) و سطح ایجاد شده پس از سقوط از ارتفاع ۱۵۰ سانتیمتری

الف) سطح ضعف مشخص شده

شکل ۴-۲۳: نمونه شماره ۸

با توجه به وزن نمونه و ارتفاع رها شدن آن، میزان انرژی وارد شده به نمونه محاسبه می‌شود. این عمل برای تکه‌های هر نمونه تا ارتفاع ۲۰۰ و یا ۲۲۰ سانتیمتری تکرار می‌شود. شکل ۴-۲۴ یک نمونه از این تکرار را نشان می‌دهد.



ب) سطح شکست نمونه‌ی رها شده از ارتفاع ۲۰۰ سانتیمتری

الف) سطوح شکست نمونه‌ی رها شده از ارتفاع ۱۵۰ سانتیمتری

شکل ۴-۲۴: نمونه شماره ۱۴

در هر مرحله از آزمایش با ثبت ارتفاع شکست روی نمونه‌ها عکس تهیه شد، تا امکان تحلیل نتایج بدست آمده فراهم شود.



#### ۴-۷-۳ - محاسبه انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها

با داشتن ارتفاع شکست و وزن نمونه مورد نظر می‌توان از رابطه (۴-۴) انرژی لازم برای شکست نمونه را محاسبه نمود.

$$E = mgh \quad (4-4)$$

بطوریکه  $m$ ، جرم نمونه،  $g$ ، شتاب ثقل و  $h$ ، ارتفاع شکست نمونه و  $E$ ، مقدار انرژی مورد نیاز بر حسب نیوتن متر است.

به عنوان مثال اطلاعات و توضیحات مربوط به نمونه شماره ۶ در ذیل ارائه شده است:

نخست نمونه وزن شده و سطوح ضعف آن مشخص شده است شکل (۴-۲۵) یک نمونه با سطوح ضعف مشخص شده را نشان می‌دهد.



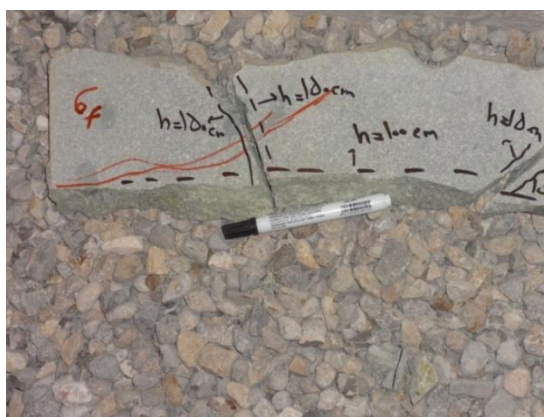
شکل ۴-۲۵: مشخص کردن سطوح ضعف روی سطح نمونه قبل از شکست

مرحله اول: وزن نمونه ۱۴ کیلوگرم و اولین ارتفاع شکست ۱۰۰ سانتیمتر است. سنگ به دو قسمت تقسیم شده است. چنانچه در شکل (۴-۲۶) مشاهده می‌شود سطح شکست به موازات سطح ضعف پیش بینی شده است.

مرحله دوم: در ارتفاع ۱۵۰ سانتیمتری قسمت اول که حدود ۴ کیلوگرم وزن دارد مطابق شکل ۴-۲۷ از روی ماده سنگ و عمود بر سطح ضعف شکسته شده که دلیل آن نسبت طول به عرض تقریباً چهار برابری است.



شکل ۴-۲۶: تعیین سطح شکست و مشخص نمودن ارتفاع رها سازی روی سطح شکست

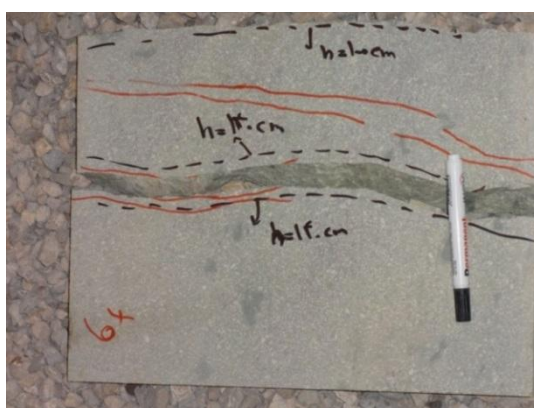


شکل ۴-۲۷: تکرار آزمایش برای تکه کوچک ۴ کیلوگرمی

مرحله سوم: قسمت دوم نمونه شماره ۶ که حدود ۱۰ کیلوگرم وزن دارد از ارتفاع ۱۴۰

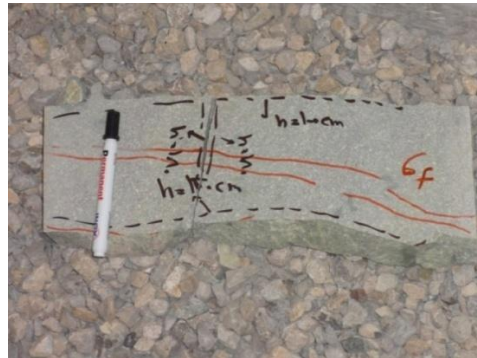
سانتیمتری رها شده و از روی سطح ضعف پیش بینی شده به دو قسمت تقسیم شده است (شکل ۴-

۲۸).



شکل ۴-۲۸: تکرار آزمایش برای تکه بزرگ ۱۰ کیلوگرمی

مرحله چهارم: دو تکه ایجاد شده در مرحله سوم تا ارتفاع ۲۰۰ سانتیمتری آزمایش شده‌اند 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 ۴-۲۹). که دلیل آن را می‌توان نسبت طول به عرض زیاد این بخش دانست.



شکل ۴-۲۹: تکرار آزمایش برای نمونه ۴.۵ کیلوگرمی (ارتفاع شکست ۱۸۰ سانتیمتر)

محاسبات مربوط به انرژی شکست در جدول (۴-۲) ارائه شده است، از مجموع چهار نمونه آزمایش 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 است.

جدول ۴-۲: نمونه‌ای از داده‌های ثبت شده از آزمایش

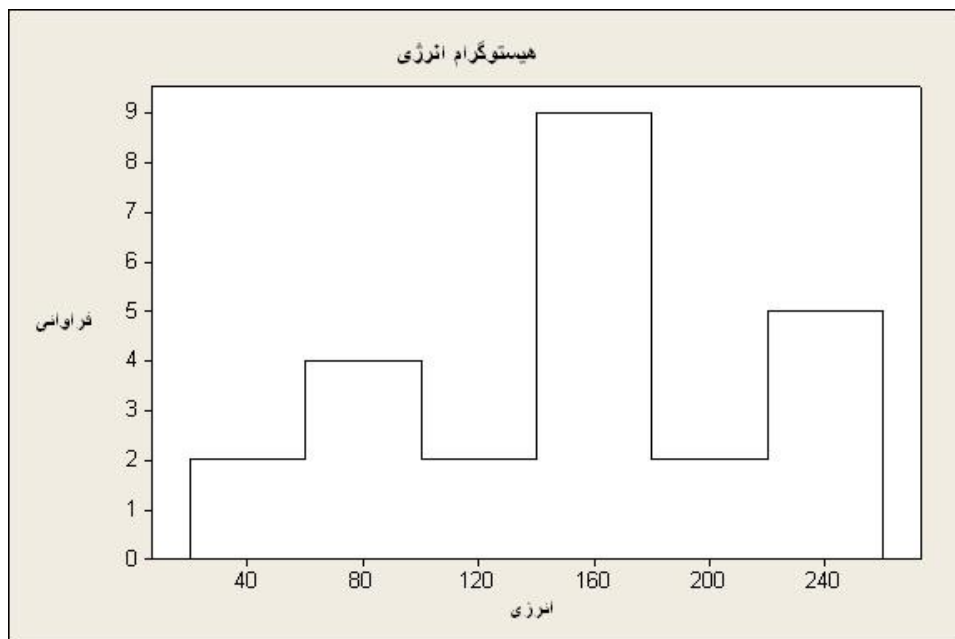
| ردیف | جرم (کیلوگرم) | ارتفاع (متر) | انرژی شکست (E) نیوتن متر |
|------|---------------|--------------|--------------------------|
| ۱    | ۱۴            | ۱            | ۱۴۰                      |
| ۲    | ۴             | ۱/۵          | ۶۰                       |
| ۳    | ۱۰            | ۱/۴          | ۱۴۰                      |
| ۴    | ۴/۵           | ۱/۸          | ۸۱                       |

#### ۴-۷-۴ - تحلیل آماری فرآیند خردشوندگی

مشابه بخش ۴-۷-۳ آزمایش برای نمونه‌های آماده شده تکرار شده است و پس از تعیین شکست صحیح از روی سطوح ضعف، داده‌های مربوطه به وسیله نرم افزار آماری Minitab مورد تحلیل آماری قرار گرفته است.

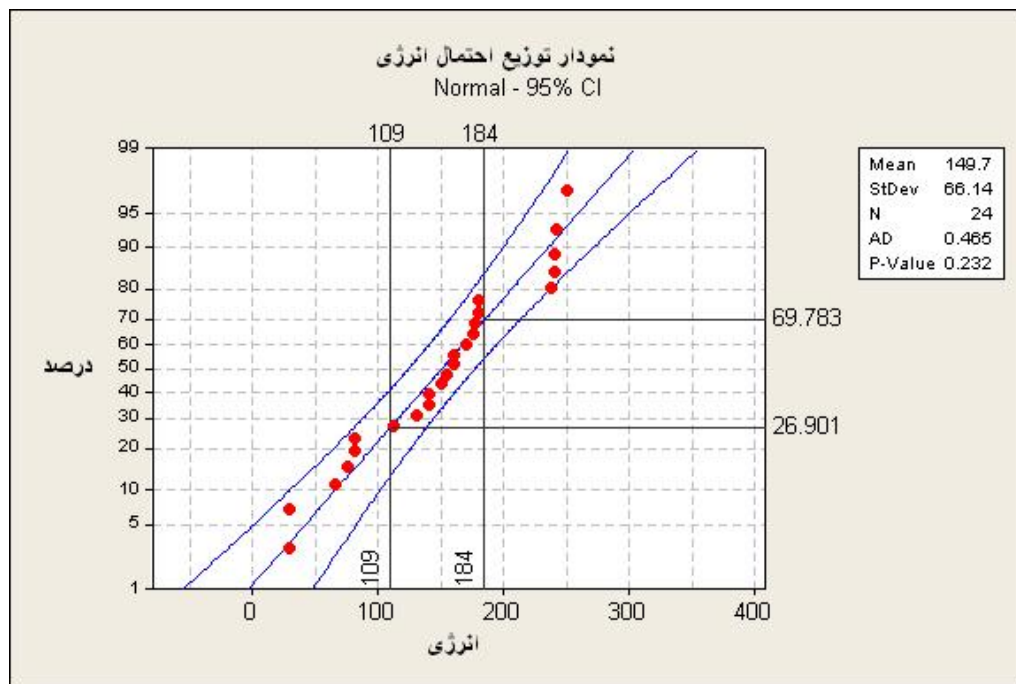
در این نمونه‌ها از ۳۲ حالت شکست، ۲۴ حالت صحیح و از روی سطوح ضعف بوده است. با استفاده از داده‌های این ۲۴ حالت نمودار فراوانی انرژی‌های لازم برای شکست رسم شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در این مورد ۷۵٪ از شکست‌های ایجاد شده از روی سطوح ضعف پیش‌بینی شده و یا به موازات آنها بوده است.

شکل ۴-۳۰ هیستوگرام فراوانی انرژی‌های لازم برای شکست و خردشوندگی از روی سطوح ضعف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، سه بخش مجزا با فراوانی نسبی بالاتر مشخص است. اولین پیک فراوانی با متوسط انرژی ۸۰ نیوتن متر مربوط به سطوح ضعف مشخص با بازشدگی تا یک میلی‌متر و با گسترش سرتاسری روی نمونه‌ها است. این بخش حدود ۱۶ درصد از کل مجموعه شکست از روی سطوح ضعف را به خود اختصاص می‌دهد. بخش دوم دارای بیشترین درصد فراوانی در حدود ۳۶ درصد از کل است. میانگین انرژی مصرفی برای تولید شکست از روی این نوع سطوح ضعف حدود ۱۶۰ نیوتن متر است. مشخصه اصلی این نوع ناپیوستگی‌ها بازشدگی بسیار کم و یا بدون بازشدگی بودن آنهاست، همچنین گسترش آنها به صورت منقطع است.



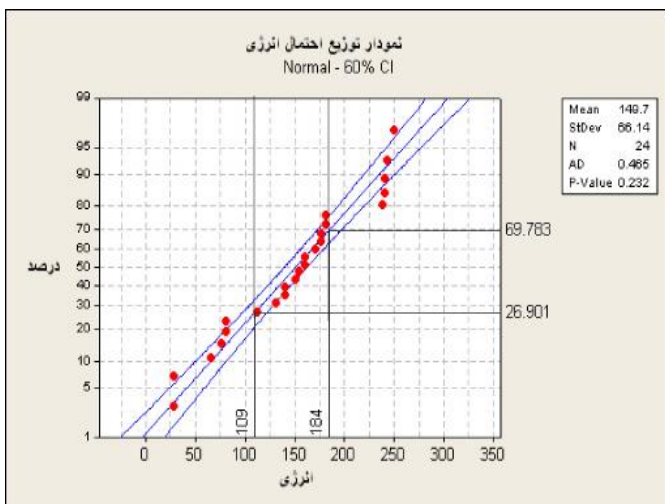
شکل ۴-۳۰: هیستوگرام فراوانی انرژی‌های لازم برای شکست

بخش سوم دارای ۲۰ درصد فراوانی است، متوسط انرژی لازم در این بخش حدود ۲۴۰ نیوتن متر است. این نوع از ناپیوستگی‌ها تقریباً غیرقابل تشخیص هستند اما سطوح شکست به موازات سطوح شکست قابل تشخیص در مراحل قبلی هستند. بیشترین تجمع داده‌ها در محدوده انرژی ۱۰۹ تا ۱۸۴ نیوتن متر واقع شده که همانگونه که در شکل (۴-۳۱) در سطح اطمینان ۹۵ درصد مشخص شده است، حدود ۴۳ درصد است.

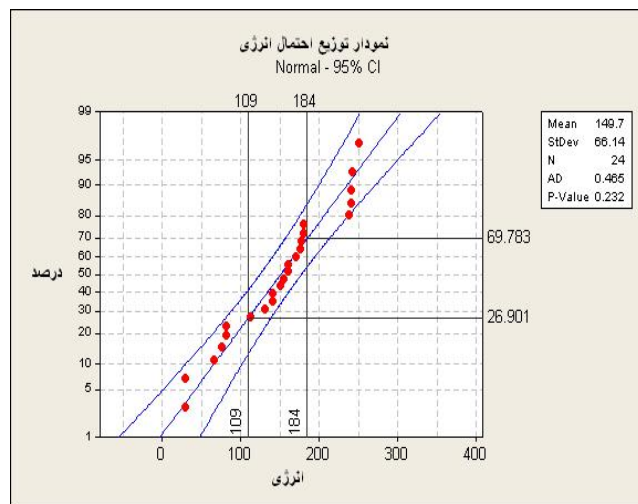


شکل ۴-۳۱: نمودار تابع توزیع احتمال انرژی به صورت درصد

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  $0.05$  بزرگتر باشد تابع توزیع داده‌ها نرمال است. نمودار دیگری در سطح اطمینان ۶۰ درصد نیز ترسیم شد برای مقایسه هر دو نمودار در شکل (۴-۳۲) ارائه شده است.



ب) در سطح اطمینان ۶۰ درصد



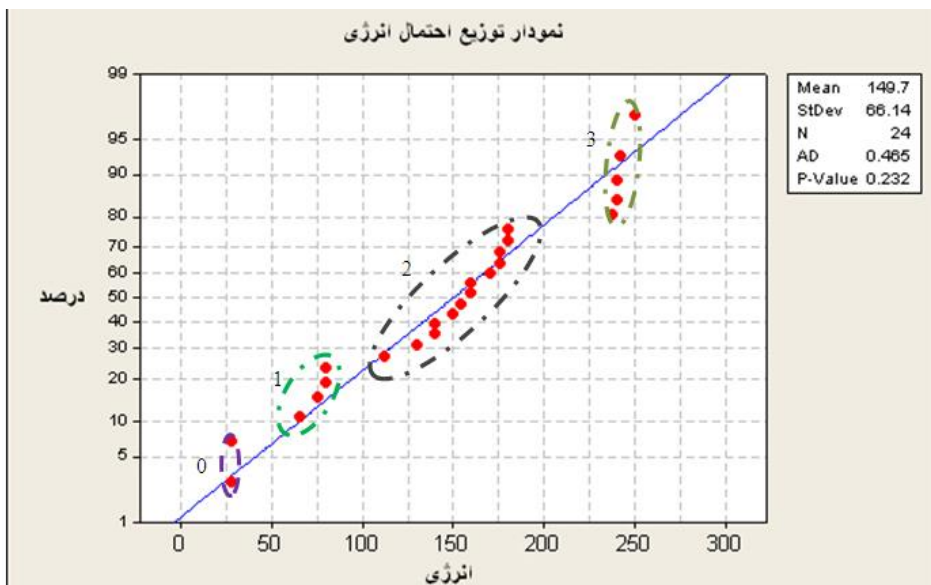
الف) در سطح اطمینان ۹۵ درصد

شکل ۴-۳۲: نمودار تابع توزیع احتمال انرژی

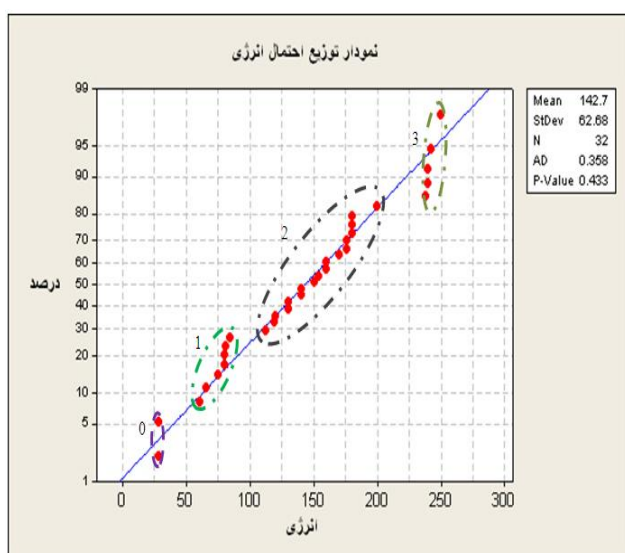
از مقایسه دو نمودار می‌توان به این نتیجه رسید که مولفه‌های بخش میانی نمودار (انرژی ۱۰۹ تا ۱۸۴ نیوتن - متر) در سطح اطمینان ۶۰ درصد نیز تفاوت چندانی با سطح اطمینان ۹۵ درصد ندارد و تقریباً تمامی داده‌های سطوح ضعف در این بازه از انرژی، در سطح اطمینان پایین‌تر نیز وجود دارند و پراکندگی بسیار کمی دارند. در شکل (۴-۳۳) 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 می‌شود.

بخش یک شامل اطلاعات مربوط به سطوح ضعف ممتد و قابل رویت و با بازشدگی کم (حدود یک میلیمتر) و بدون هیچگونه پرکننده است.

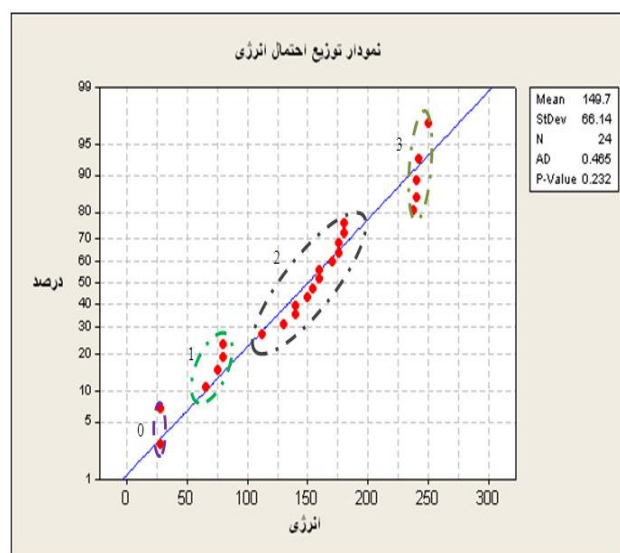
بخش دوم که اکثر سطوح ضعف داخل نمونه‌ها را تشکیل می‌دهد شامل سطوح ضعف با تداوم یافتگی کمتر و به صورت جوش خورده با رنگی متفاوت در داخل نمونه قبل از شکست به چشم می‌خورد. ضخامت مواد پرکننده در این حالت حدود یک میلیمتر است



شکل ۴-۳: نمودار توزیع احتمال انرژی شکست در سطوح ضعف با تعیین مناطق با بیشترین فراوانی سطوح شکست مربوط به بخش سوم نمودار تقریباً غیرقابل تشخیص بود و گاهی به صورت رگچه‌های بسیار باریک (در حدود دهم میلیمتر تا ۱ میلیمتر) در نمونه مشاهده شده است. در اکثر موارد پس از شکست، سطوح تشکیل شده به موازات سطوح ضعف مشخص شده از قبل است. شکل (۴-۳) نمودارهای احتمال انرژی شکست برای دو حالت شکست از روی سطح ضعف و شکست از روی سطح ضعف و ماده سنگ را نشان می‌دهد.



(ب) در سطوح ضعف و ماده سنگ (حالت ۳۲)



(الف) در سطوح ضعف (حالت ۲۴)

شکل ۴-۳: نمودار توزیع احتمال انرژی شکست

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. در این مرحله به دلیل وزن زیادتر نمونه‌ها و ارتفاع بیشتر، 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 درصد از سطوح شکست از روی ماده سنگ بوده است.

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 درصد است. به عبارت دیگر می‌توان گفت در مجموع در بخش‌های ۱ و ۲، حدود ۷۰ درصد شکست از روی سطوح ضعف پیش‌بینی شده و ۳۰ درصد از روی ماده سنگ بوده است. در این مورد می‌توان گفت، پس از ایجاد شکست از روی سطوح ضعف پیش‌بینی شده، در حدود ۳۰ درصد 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- به 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 (۳-۴) ارائه شده است. در مجموع به این علت که سطوح شکست از روی ماده سنگ برای بخش‌های انرژی ۱ و ۲ مشابه یکدیگر و بدلیل نسبت طول به عرض زیاد نمونه‌های ایجاد شده است، با ادغام نتایج این دو بخش جدول ۴-۴ حاصل شده است.

جدول ۳-۴ 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                           |

جدول ۴-۴: 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                           |

#### ۴-۸- جمع‌بندی

آنچه در این بخش مورد توجه قرار گرفته است، توضیحات مربوط به برنامه‌ی کامپیوتری پردازش تصویر تهیه شده به منظور تعیین ناپیوستگی‌ها و سطوح ضعف موجود در تصاویر مغزه‌های حفاری به همراه ارائه روشی آزمایشی برای تعیین سطوح ضعف به عنوان عوامل اصلی خردشوندگی اولیه و ثانویه در توده سنگ و یا یک بلوک سنگی مجزا است. با این فرض که یک‌سری از سطوح ضعف بالقوه از جمله، جوش‌خورگی‌ها، رگچه‌ها و ... در درون ماده سنگ وجود دارد که اغلب در نگاه اول قابل مشاهده نیستند و به‌طور مستقیم برداشت نخواهند شد ولی بیشترین تاثیر را در تخریب-پذیری و خردشوندگی اولیه و ثانویه توده‌سنگ در روش‌های استخراج تخریبی خواهند داشت. در این بخش هدف، طراحی روشی است که 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 گردد.

- عمده‌ترین نتایج بدست آمده از برنامه‌ی کامپیوتری پردازش تصویر (DCP) و طراحی و اجرای روش آزمایش پیشنهاد شده در چند بخش به صورت ذیل ارایه شده است:
- به منظور صحت‌سنجی نتایج روش پردازش تصویر با استفاده از برنامه‌ی نوشته شده، موارد کنترلی از جمله مقایسه با نتایج تعیین چشمی مولفه‌ها از روی تصاویر و همچنین مقایسه مولفه RQD با مقادیر واقعی لاگ ثبت شده در جعبه‌مغزه‌ها، بکار گرفته شد، در نهایت دقت قابل قبول برنامه‌ی تهیه شده و قابل اطمینان بودن مولفه‌های  $P_{10}$  و RQD حاصل از آن مورد تایید قرار گرفت.
  - با توجه به نتایج نهایی بدست آمده از آزمایش طراحی شده در مورد انرژی شکست (جدول ۳-۴) می‌توان مشاهدات عینی و تعیین سطوح ضعف قبل از رخداد شکست و خردشدگی را با تقریبی خوب برآورد نمود.
  - در آزمایش طراحی شده، سطح انرژی ۱ و ۲ سطوح انرژی لازم برای تبدیل درزه‌های نوع ۲ به درزه‌های نوع صفر (بالفعل) تعیین شده است. و سطح انرژی ۳ برای تبدیل درزه‌های نوع ۳ به نوع صفر منظور شده است.
  - از لحاظ آماری فراوانی درزه‌های نوع ۲ در سنگ مورد آزمایش بیشتر بوده که در مشاهدات عینی قبل از شکست نیز اینگونه برآورد شده است.
  - درصد خطای تعیین نوع سطح شکست برای درزه‌های نوع ۲ در این آزمایش ۳۲ درصد و برای درزه‌های نوع ۳، ۳۷.۵ درصد بدست آمده است.
  - براساس تفکیک سطح انرژی مورد نیاز برای شکست، درزه‌های نوع ۱، تنها ۳۰ درصد انرژی لازم برای شکست ماده سنگ و درزه‌های نوع ۲ و ۳ به ترتیب ۶۰ و ۹۰ درصد انرژی شکست ماده سنگ را برای تبدیل شدن به درزه‌های بالفعل نیاز دارند.

## فصل پنجم

۵- مدل سازی شبکه ناپیوستگی های گسسته

اهمیت خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌های ساختاری توده‌سنگ در برآورد پارامترهای مقاومتی آن از سال‌ها پیش در میان محققان شناخته شده است. درزه‌ها متداول‌ترین نوع ناپیوستگی‌ها در میان ناپیوستگی‌های توده‌سنگ شامل صفحات لایه‌بندی، گسل‌ها، صفحات شیستوزیته و غیره هستند. لذا ارزیابی ویژگی‌های درزه‌ها بخش مهمی از مهندسی توده‌سنگ را تشکیل می‌دهد. از طرف دیگر، از آنجا که توده‌سنگ از مواد طبیعی تشکیل شده، ویژگی‌های هندسی درزه‌ها در دو نقطه مختلف ممکن است مقادیر متفاوتی را نشان دهند؛ لذا ضروری است ویژگی‌های مورد نظر با ماهیت تصادفی تعریف شوند. ماهیت تصادفی هر ویژگی هندسی درزه اثر مهمی بر رفتار توده‌سنگ دارد.

از بهترین روش‌های دارای توانایی شبیه‌سازی ماهیت تصادفی ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها، مدل‌سازی تصادفی شبکه ناپیوستگی‌های گسسته<sup>۱</sup> است. توسعه مدل‌سازی تصادفی، پیشرفت چشم‌گیری در زمینه مدل‌سازی توده‌سنگ و بررسی رفتار آن محسوب می‌شود (Rogers et al., 2014). با تعریف ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها به صورت آماری و تصادفی، مدل‌ها با استفاده از مدل‌سازهای تولید سیستم درزه مانند مدل سلسله مراتبی پیشرفته دوبعدی و سه بعدی، مدل وزن‌یانو، مدل بیچر یا سایر مدل‌های مشابه با کاربرد سری‌های متوالی فرآیندهای تصادفی (خطی پواسونی، صفحه‌ای پواسونی و ...) ایجاد می‌شوند.

در این تحقیق با توجه به تاثیر شدید پایایی درزه بر خردشوندگی برجای توده سنگ، مدل تصادفی شبکه درزه با در نظر گرفتن ویژگی آماری اندازه طول درزه براساس مدل وزن‌یانو و مدل‌های سلسله مراتبی ساخته شده است. به این منظور برنامه‌ی کامپیوتری دوبعدی با استفاده از زبان برنامه نویسی نرم افزار Mathematica به نام CAV-DFN<sup>2D</sup> تهیه شده که قادر است براساس داده‌های برداشت شده، خروجی رقومی، نمایه‌های بصری، در نظر گرفتن ژنز و تسلسل درزه‌داری، ساخت مدل درزه‌های

پایا و ناپایا، تعیین بلوک‌های کامل حاصل از برخورد درزه‌ها با محاسبه مساحت آن‌ها، ایجاد خروجی مناسب برای استفاده در نرم‌افزارهای تحلیل عددی UDEC و PFC2D و خروجی آماری هر یک از مشخصه‌های هندسی ساخت مدل را ارائه دهد.

## ۵-۲- مطالعات سطحی

ساختار اصلی توده سنگ‌های درزه‌دار با جانمایی ناپیوستگی‌ها (گسل، درزه، لایه بندی و ...) تعیین می‌شود و بررسی خصوصیات پارامترهای هندسی آن، اساس تحلیل‌های بعدی است. این پارامترها در سه سطح مختلف و به ترتیب ذیل مورد توجه قرار می‌گیرند:

- ناپیوستگی‌های منفرد
- شبکه ناپیوستگی
- میدان ناپیوستگی (سیستم ناپیوستگی)

### الف- ناپیوستگی‌های منفرد

از نظر هندسی ناپیوستگی به عنوان یک جدایش در سنگ دست نخورده محسوب می‌شود که در دو بعد از سه بعد توسعه بیشتری یافته است. ناپیوستگی‌ها با یک سری پارامترهای هندسی و ظاهری تعریف می‌شوند.

به عنوان مثال جدول ۵-۱ ارائه شده توسط گودمن<sup>۱</sup> سطح آگاهی و شناخت از این پارامترها بر اساس امکان برداشت برجای آن‌ها را مشخص می‌کند (Goodman, 1979). ویلاسکوزا<sup>۲</sup> خصوصیات اصلی قابل برداشت ناپیوستگی‌ها را به صورت جدول ۵-۲ معرفی می‌کند. در شکل ۵-۱ نیز این خصوصیات معرفی شده است.

---

1 - Goodman  
2 - Villaescusa

جدول ۵-۱: سطح آگاهی و شناخت ممکن از درزه ها (Goodman, 1979)

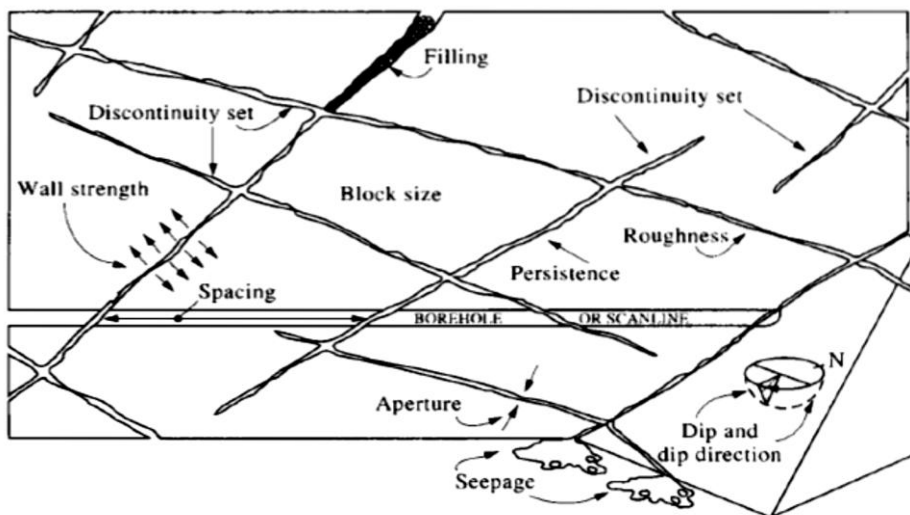
| ردیف | پارامترهای معرف درزه | سطح شناخت ممکن     |
|------|----------------------|--------------------|
| ۱    | جهت داری             | رضایت بخش          |
| ۲    | فاصله داری           | رضایت بخش با نواقص |
| ۳    | ابعاد (گسترش)        | ضعیف               |
| ۴    | جانمایی              | تقریباً صفر        |

جدول ۵-۲: پارامترهای هندسی ناپیوستگی ها (Villaescusa, 1993)

| پارامتر ناپیوستگی         | شرح  |
|---------------------------|--|
| شکل (Form)                | شکل نشان دهنده مرزهای ناپیوستگی است که می تواند مسطح یا غیر مسطح و دارای شکل چند گوشه، گرد، بیضوی یا بدون شکل باشد.                                |
| چگالی (Density)           | چگالی به طور معمول تعداد درزه ها بر واحد حجم است و گاهی به صورت شدت درزه یا جمع طول درزه ها بر واحد سطح یا سطح کل درزه ها در واحد حجم بیان می شود. |
| گسترش و ابعاد (Extention) | گسترش درزه ها به طور عمومی توسط طول رخنمون یا سطح درزه معرفی می شود.   |
| جانمایی (Emplacement)     | جانمایی، معرف وضعیت درزه در فضا است و تنها توسط موقعیت نسبی درزه ها یعنی فاصله داری قابل تعیین است.  |
| جهت داری (Orientation)    | جهت داری سطح درزه در فضا با آزیموت و شیب درزه مشخص می شود.   |
| هم صفحه گی (Coplanarity)  | معرف درزه هایی است که می توانند بر روی یک سطح مشترک قرار گیرند.  |
| پیوستگی (Continuity)      | کمیتی است که نسبت طول یا سطح درزه های مشترک را به کل طول یا سطح مشترک بیان می نماید.   |
| زبری (Roughness)          | زبری وضعیت سطح درزه نسبت به یک سطح ایده آل است که توسط میزان انحراف سطح اندازه گیری می شود.  |
| بازشدگی (Opening)         | بازشدگی فاصله قایم بین سطوح درزه را نشان می دهد.   |

### ب- شبکه ناپیوستگی

یک شبکه ناپیوستگی شامل حداقل دو دسته درزه یا ناپیوستگی است، به طوری که علاوه بر وجود یک همگنی آماری در هر دسته درزه امکان تفکیک این مجموعه از ناپیوستگی ها از دیگر مجموعه ها وجود داشته باشد. تفکیک شبکه های ناپیوستگی معمولاً به منظور ایجاد مناطق همگن آماری در مدل سازی های هندسی و مکانیکی الزامی است. در این صورت علاوه بر کاهش واریانس اطلاعات این مناطق، مدل سازی ها به واقعیت طبیعت مورد مدل سازی نزدیک تر خواهند شد. اصلی ترین پدیده های جدا کننده این شبکه ها عوامل ساختاری اصلی در منطقه هستند.



شکل ۱-۵: نمایی شماتیک از پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌های یک توده سنگ (Villaescusa, 1993)

### پ-میدان ناپیوستگی یا سیستم ناپیوستگی

میدان‌های ناپیوستگی به مناطق وسیعی گفته می‌شوند که دارای چندین شبکه ناپیوستگی هستند. بررسی پارامترهای یک میدان منوط به تفکیک شبکه‌های مختلف و سپس دسته درزه‌های موجود است.

### ۵-۲-۱- برداشت درزه‌ها

روش‌های برداشت درزه‌ها را می‌توان در یک طبقه‌بندی کلی به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی نمود. به طور مرسوم برداشت درزه‌ها با پیمایش زمین و مشاهده مستقیم ناپیوستگی‌های توده سنگ انجام می‌شود. از جمله مهمترین این روش‌ها می‌توان به روش برداشت خطی و روش برداشت پنجره‌ای اشاره کرد.

برداشت مشخصات هندسی درزه‌ها در رخنمون‌های سنگی دارای مزایای قابل توجهی است. در این نوع اندازه‌گیری از سویی ارتباط و همبستگی زمین‌شناختی بین دسته درزه‌های مختلف، قابل مشاهده است و از سوی دیگر از مهم‌ترین ویژگی‌های این روش کم‌هزینه بودن و سهولت دسترسی آن به اطلاعات است. ویژگی عدم پایایی ناپیوستگی با اندازه‌گیری فقط ناپیوستگی‌هایی که با خط برداشت تقاطع می‌کنند، در نظر گرفته می‌شود.

پیمایش کامل توده‌سنگ شامل تعیین ساختار آن از طریق اندازه‌گیری جهت، جهت شیب، پایایی، فاصله‌داری و فراوانی ناپیوستگی‌ها است. به منظور فراهم نمودن تعریفی سه‌بعدی از توده‌سنگ، لازم است برداشت‌های انجام شده در یک (چال‌ها) یا دو بعد (پنجره‌های نقشه‌برداری بر روی رخنمون‌ها)، برون‌یابی شوند (Flynn and Pine, 2007).

مولدن<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۱ روش برداشتی با کاربرد برداشت دایره‌ای برای اندازه‌گیری طول اثر متوسط و شدت درزه‌ها ارائه نمودند. این روش قابل کاربرد بر روی سطوح دو بعدی به منظور توصیف جمعیت آماری خط اثرهای درزه است و دارای مزیت تصحیح خودکار خطاهای کلی ایجاد شده در نتیجه خطای<sup>۲</sup> جهت و فراوانده<sup>۳</sup> در فضای دو بعدی است (Mauldon et al., 2001). در این روش تعداد اثرهای درزه کامل و قطع شده، در داخل دایره‌ای با شعاع مشخص شمارش می‌شود و برای برآورد طول اثر درزه بکار می‌رود. این روش خطای جهت را حذف می‌کند و بنابراین می‌تواند بر روی تصویرهای حاصل از عکس‌برداری نیز اجرا شود.

پیمایش به صورت خط برداشت از آنجا که نیازمند دسترسی مستقیم به توده‌سنگ است، در مواردی خاص ممکن است مشکل و یا خطرناک باشد.

پیشرفت‌های بزرگی در جمع‌آوری و پردازش اطلاعات در سال‌های اخیر بدست آمده است که به طور چشم‌گیری توانایی توصیف دقیق ساختار سنگ را بهبود بخشیده است. از جمله این موارد می‌توان به کاربرد نسبتاً گسترده ابزارهای ژئوفیزیکی با تفکیک بالا، پایش<sup>۴</sup> چال، دوربین‌های نوری چال، عکس‌برداری با تفکیک بالا، اسکن لیزری و عکس‌برداری ماهواره‌ای اشاره نمود (Moffitt & Rogers, 2007). با افزایش توانایی تصویربرداری و کمی نمودن ساختار توده‌سنگ، می‌توان مدل‌های دقیق‌تری از توده‌سنگ واقعی برای اهداف طراحی مهندسی سازه‌ها در سنگ، به دست آورد (Rogers et al., 2007).

---

1-Mauldon  
2-Bias  
3- censoring  
4- Monitoring



## ۵-۲-۲- بررسی ویژگی‌های آماری ناپیوستگی‌ها

همان طور که ذکر شد، برای شبیه‌سازی ناپیوستگی‌ها از شیوه‌های آماری استفاده می‌شود و متغیر مورد نظر، تصادفی در نظر گرفته می‌شود. به همین منظور در ذیل به شناخت رفتارهای آماری هر یک از ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها پرداخته شده و در ادامه ویژگی‌های برداشت شده از ناپیوستگی‌های منطقه کهنک تجزیه و تحلیل آماری خواهد شد.

### ۵-۲-۲-۱- جهت‌داری (جهت شیب و شیب) ناپیوستگی‌ها

جهت‌داری عاملی است که چگونگی جانمایی درزه‌ها در فضا را نشان می‌دهد و با امتداد یا جهت شیب (آزیموت) و شیب خط بزرگ‌ترین شیب در صفحه درزه تعریف می‌شود. شیب نسبت به افق و جهت شیب در جهت عقربه‌های ساعت، نسبت به شمال واقعی اندازه‌گیری می‌شود. پس از دسته‌بندی جهت‌داری درزه‌های برداشت شده، تابع چگالی احتمال مناسب برای توزیع شیب و جهت شیب درزه تعیین می‌شود.

توابع توزیع آماری متعددی برای مطالعه یک جامعه عددی تعریف شده در سه بعد وجود دارد. سه دسته تابع توزیع برای مطالعه جهت‌داری دسته درزه‌ها مورد توجه است، که عبارتند از:

الف- تابع توزیع نرمال (با دو متغیر غیر وابسته)

ب- تابع توزیع فیشر

ج- تابع توزیع بینگهام

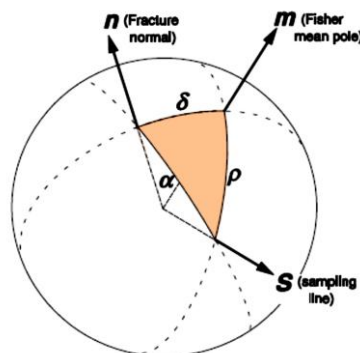
از میان این سه تابع توزیع، تابع توزیع فیشر کاربرد بیشتری را در مطالعات درزه‌داری دارد. این توزیع در سال ۱۹۵۳ توسط فیشر پیشنهاد شد و رایج‌ترین و مناسب‌ترین روش برای مدل کردن بردار نرمال ناپیوستگی‌ها در فضا است. این روش، توزیع زاویه‌ای جهت‌داری را بر اساس سه پارامتر  $\delta$ ،  $\phi$  و  $k$  که به ترتیب نشانگر میانگین شیب، جهت شیب و ضریب فیشر هستند، توصیف می‌کند. تابع چگالی احتمال این توزیع به صورت زیر است (Fisher, 1953):

$$f(\delta) = \frac{k \sin \delta e^{k \cos \delta}}{e^k - e^{-k}} \quad 0 \leq \delta \leq \pi \quad (1-5)$$

در این رابطه  $\delta$  مقدار انحراف زاویه‌ای از مقدار میانگین قطب فیشر است که در شکل ۲-۵ نشان داده شده است و  $k$  ضریب ثابت فیشر که عددی مثبت است و درجه پراکندگی توزیع را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که زاویه  $\delta$  برای کل درزه‌ها یکسان در نظر گرفته نمی‌شود.

هر چه مقدار  $k$  بزرگ‌تر باشد، تجمع داده‌ها بیشتر و در نتیجه پراکندگی داده‌ها کمتر خواهد بود. در کل این ضریب، عددی بین ۰ تا ۷۰۰ بوده، اما در علم مکانیک سنگ و تحلیل جهت‌داری دسته درزه‌ها معمولاً بین ۲۰ تا ۳۰۰ قرار می‌گیرد.

با توجه به شکل عمومی تابع توزیع فیشر روش‌های تحلیلی و عددی متعددی برای تعیین مقدار  $k$  (ضریب ثابت فیشر) وجود دارد.



ن شکل ۲-۵: مایش انحراف زاویه‌ای بردار نرمال ناپیوستگی‌ها از مقدار میانگین فیشر ( $\delta$ )

## ۲-۲-۲-۵- فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها

فاصله‌داری به صورت فاصله عمودی بین دو ناپیوستگی مجاور (متعلق به یک سری ناپیوستگی) تعریف می‌شود. فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها از عوامل مهم تعیین‌کننده اندازه تک بلوک سنگ سالم است. قابلیت حفاری، خواص خردشوندگی و نفوذپذیری توده‌سنگ به فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها وابسته است. با اندازه‌گیری فاصله‌داری برای خطوط نمونه‌برداری مختلف، می‌توان تابع توزیع آماری فاصله‌داری را برای هر دسته درزه به دست آورد.

بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی، پریست و هادسون (۱۹۷۶) بیان نمودند که توزیع فاصله‌داری ناپیوستگی برای انواع گوناگون سنگ‌های رسوبی می‌تواند با تابع توزیع احتمال نمایی منفی منطبق شود. این توزیع فاصله‌داری به صورت زیر است:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (2-5)$$

که در آن  $f(x)$  فراوانی فاصله‌داری ناپیوستگی  $(x)$  و  $\lambda$  متوسط تعداد ناپیوستگی‌ها در هر متر طول است. همچنین پریست در سال ۱۹۹۳ اثبات نمود در صورتی که موقعیت‌های درزه تصادفی باشد، آنگاه تابع توزیع احتمال فاصله‌داری درزه، نمایی منفی با فاصله‌داری متوسط  $1/\lambda$  است (Priest, 1993).

### ۵-۲-۲-۳- چگالی و شدت درزه‌داری

چگالی ناپیوستگی‌ها معرف تعداد ناپیوستگی‌ها بر واحد بعد توده‌سنگ است که آن واحد، می‌تواند حجم، مساحت و یا طول باشد (Baecher, 1972). شدت درزه‌داری نیز نشان دهنده متوسط طول خط اثر یا مساحت ناپیوستگی به ترتیب در واحد سطح یا حجم توده سنگ است. عدم دسترسی سه بعدی به یک توده سنگ باعث خواهد شد اندازه‌گیری حجمی این پارامترها به صورت مستقیم، مشکل و غیرممکن باشد. این در حالی است که اندازه‌گیری میدانی (مستقیم) این پارامترها به صورت یک بعدی (در طول خط برداشت و یا گمانه) و دو بعدی (در سطح دیواره‌ها، تونل‌ها و غیره) به سادگی میسر است.

شدت درزه در دو بعد،  $P_{21}$ ، به عنوان طول کلی درزه در واحد سطح برداشت تعریف می‌شود.  $P_{21}$  مستقل از مقیاس است اما با جهت صفحه‌ای که اندازه‌گیری بر روی آن انجام می‌شود، تغییر می‌کند. در  $P_{21}$ ، تعداد دسته درزه‌ها، پایایی درزه و تعداد درزه‌های موجود در نظر گرفته می‌شود. پارامتر سه بعدی شدت درزه،  $P_{32}$ ، به صورت مساحت کلی سطح درزه‌ها بر واحد حجم تعریف می‌شود.

روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری چگالی و شدت درزه‌داری به صورت یک بعدی و دو بعدی وجود دارد.

هلیوت<sup>۱</sup> سه روش را برای این منظور ذکر نموده است (Heliot, 1988):

اندازه گیری در یک خط برداشت، اندازه گیری از چاه‌های اکتشافی و اندازه گیری به روش عکس برداری.

درشوایتز و هردا<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۲ طبقه‌بندی کاملی را برای چگالی و شدت درزه سنگ به عنوان تابعی از مقیاس برداشت به صورت جدول (۳-۵) تعریف و ارایه نمودند (Dershowitz and Herd, 1992).

جدول ۳-۵: شدت و چگالی درزه سنگ به عنوان تابعی از مقیاس برداشت (Dershowitz and Herd, 1992)

| بعد ناپیوستگی  | ۱   | ۲  | ۳   |                     |
|--|---|--|---|---------------------|
| $P_{00} \text{ Length}^0$<br>تعداد ناپیوستگی‌های در<br>نقاط برداشت توده سنگ                      | ---   | ---  | ---   | اندازه‌گیری نقطه‌ای |
| $P_{10} \text{ Length}^{-1}$<br>تعداد ناپیوستگی‌ها در<br>واحد طول خط برداشت (شدت<br>خطی)         | $P_{11} \text{ Length}^0$<br>طول ناپیوستگی‌های در<br>واحد طول خط برداشت (تخلخل<br>خطی)      | ---  | ---   | اندازه‌گیری خطی     |
| $P_{20} \text{ Length}^{-2}$<br>تعداد مراکز ناپیوستگی‌ها<br>در واحد سطح برداشت (چگالی<br>سطحی)   | $P_{21} \text{ Length}^{-1}$<br>طول اثرهای<br>ناپیوستگی‌ها در واحد<br>سطح برداشت (شدت سطحی) | $P_{22} \text{ Length}^0$<br>مساحت سطح<br>ناپیوستگی‌ها در سطح برداشت<br>(تخلخل سطحی)         | ---   | اندازه‌گیری سطحی    |
| $P_{30} \text{ Length}^{-3}$<br>تعداد مراکز ناپیوستگی‌ها<br>در واحد حجم توده سنگ (چگالی<br>حجمی) | $P_{31} \text{ Length}^{-1}$<br>طول اثرهای<br>ناپیوستگی‌ها در واحد حجم<br>توده سنگ          | $P_{32} \text{ Length}^{-1}$<br>مساحت سطح<br>ناپیوستگی‌ها در واحد حجم<br>توده سنگ (شدت حجمی) | $P_{33}$<br>$\text{Length}^{-1}$<br>حجم<br>ناپیوستگی‌ها در واحد حجم<br>توده سنگ (تخلخل<br>حجمی) | اندازه‌گیری حجمی    |

چگالی
 
 شدت

1 - Heliot  
2 - Dershowitz and Herda

درشوئیتز<sup>۱</sup> (۱۹۹۲) و مولدن<sup>۲</sup> (۱۹۹۴)، ارتباط بین شدت درزه‌داری حجمی ( $P_{32}$ ) و شدت درزه‌داری خطی ( $P_{10}$ ) و سطحی ( $P_{21}$ ) را در حالت کلی به صورت زیر بیان نمودند (Dershowitz and Herd, 1992):

$$P_{21} = P_{32} \int_0^{\pi} \sin \beta f_B(\beta) d\beta \quad (۴-۵)$$

$$P_{10} = P_{32} \int_0^{\pi} |\cos \alpha| f_A(\alpha) d\alpha \quad (۵-۵)$$

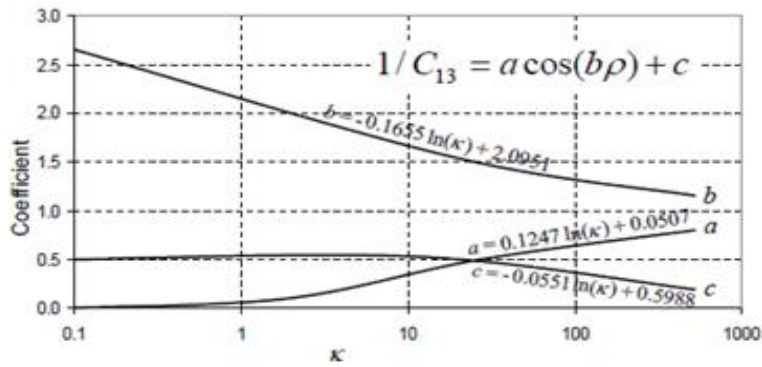
در این روابط  $\alpha$  زاویه بین خط برداشت و بردار نرمال ناپیوستگی،  $\beta$  زاویه بین بردار نرمال سطح برداشت و بردار نرمال ناپیوستگی،  $f_B(\beta)$  و  $f_A(\alpha)$  توابع چگالی احتمالی  $\beta$  و  $\alpha$  هستند. زوایای  $\alpha$  و  $\beta$  تابعی وابسته به مولفه‌های جهت‌داری ناپیوستگی‌ها از قبیل شیب، جهت شیب و جهت‌داری خط یا سطح برداشت هستند و می‌توان آنها را از روی جهت‌داری خط یا سطح برداشت و بردار نرمال ناپیوستگی‌ها بدست آورد. چنانچه مقادیر انتگرال‌های روابط (۴-۵) و (۵-۵) یک عدد در نظر گرفته شود روابط فوق به صورت معادلات خطی خواهند بود و مقادیر این انتگرال‌ها ضریب تبدیل این روابط

$$C_{13} = \left[ \int_0^{\pi} |\cos \alpha| f_A(\alpha) d\alpha \right]^{-1} \quad \text{خواهد بود.} \quad (۶-۵)$$

$$C_{23} = \left[ \int_0^{\pi} \sin \beta f_B(\beta) d\beta \right]^{-1} \quad (۷-۵)$$

چنانچه توزیع جهت‌داری ناپیوستگی‌ها به صورت توزیع فیشر<sup>۳</sup> باشد، وانگ<sup>۴</sup> با فرض اندازه نامحدود و یا اندازه ثابت ناپیوستگی‌ها با حل نیمه تحلیلی روابط (۶-۵) و (۷-۵) ضرایب تبدیل  $C_{13}$  و  $C_{23}$  را به صورت نمودار و جدول به صورت تابعی از ضریب ثابت فیشر  $k$  و زاویه  $\rho$  (زاویه بین امتداد خط برداشت و بردار نرمال سطح برداشت و بردار میانگین فیشر) ارائه نموده است (Wang, 2005). در شکل ۳-۵ نمودار تعیین ضریب تبدیل  $P_{10}$  به  $P_{32}$  ارائه شده است.

1- Dershowitz  
2 - Maulden  
3 - Fisher Distribution.  
4- Wang Xiaohai



شکل ۳-۵: ضرایب a، b و c برای تعیین ضریب تبدیل  $1/C_{13}$  به صورت تابعی از ضریب ثابت فیشر k (Wang, 2005)

### ۵-۲-۲-۴- موقعیت مکانی ناپیوستگی (جانمایی)

تعیین خصوصیات توزیع دوبعدی و سه بعدی نقاط مراکز ناپیوستگی‌ها بسیار دشوار است. برای تولید مدل درزه سنگ که برداشت‌های درزه‌نگاری را به خوبی منعکس کند، باید بر اساس شبیه‌سازی توزیع سه بعدی یا دوبعدی مراکز درزه بر اساس مشاهدات دو بعدی مراکز رخساره‌ی درزه‌ها باشد. یکی از روش‌های مدل‌سازی موقعیت درزه که بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از توزیع پواسون است.

روش توزیع پواسون، برای توصیف نقاطی که به صورت تصادفی و مستقل در فضا پراکنده شده‌اند کاربرد دارد. در یک چنین شرایطی هر حجم در داخل توده‌سنگ دارای احتمال یکسان برای در بر گرفتن مراکز درزه است. یک توزیع پواسون، توزیعی همگن و ایزوتروپیک، معادل با تعداد میانگین نقاط در واحد حجم یا سطح فضا است. در صورتی که  $R_1, R_2, \dots, R_K$  نواحی ثابت دلخواه که هیچ دو تایی از آن‌ها با یکدیگر هم‌پوشانی ندارند، در نظر گرفته شوند. آنگاه  $V_1, V_2, \dots, V_K$  حجم مربوط به هر ناحیه فرض می‌شود. در حالت پایه  $R_1$  در بردارنده  $N_1$  نقطه و  $R_2$  در بردارنده  $N_2$  نقطه و ... می‌باشند.

با هر  $N_i \geq 0$  برای این پیشامد، احتمال زیر به دست می‌آید:

$$P(N_1, N_2, \dots, N_K) = \prod_{i=1}^K \frac{(\lambda_i \cdot v_i)^{N_i} e^{-(\lambda_i \cdot v_i)}}{(N_i)!} \quad (۸-۵)$$

این معادله برای تمامی اعداد صحیح  $N_i > 0$ ، تمامی نواحی بدون هم‌پوشانی  $(R_1, R_2, \dots, R_K)$  و تمامی  $K \geq 1$  قابل کاربرد است. تعداد نقاط در نواحی متعدد مستقل از یکدیگر هستند به گونه‌ای که:

$$P(N_1, N_2, \dots, N_K) = P(N_1)P(N_2) \dots P(N_K) \quad (9-5)$$

توزیع تصادفی نقطه‌ای پواسونی برای مدل‌سازی موقعیت مرکز درزه به کار برده می‌شود. می‌توان از روش‌های زمین‌آمار برای این منظور استفاده نمود. در صورتی که ماهیت و گستره همبستگی فضایی درزه از اهمیت برخوردار باشد، روش ناحیه‌بندی منطقی‌تری همچون مدل هیستر<sup>۱</sup> و همکاران را می‌توان مورد استفاده قرار داد (Hister et al, 1987). در این حالت افزایش قابل توجه اطلاعات جمع‌آوری شده برای تعریف واریوگرام‌های مورد نیاز الزامی است.

### ۵-۲-۲-۵- طول اثر درزه

مشکل اصلی در برآورد اندازه ناپیوستگی عدم امکان مشاهده مستقیم گسترش سه‌بعدی آن است. در نتیجه، توزیع اندازه سه‌بعدی ناپیوستگی‌ها معمولاً با استفاده از اطلاعاتی درباره توزیع طول اثر آن‌ها در رخنمون‌های سنگی به دست می‌آید (Priest, 2004). بنابراین توصیف مناسب توزیع طول اثر ناپیوستگی‌ها مرحله‌ای ضروری در توصیف توزیع اندازه سه‌بعدی آن‌ها است.

برآورد صحیح توزیع طول اثر واقعی و همچنین طول اثر میانگین به دلیل خطاهای<sup>۲</sup> ایجاد شده در اندازه‌گیری‌های طول اثر، مشکل است. در این خصوص، به‌طور معمول ابتدا توزیع طول اثر اندازه‌گیری شده (که دارای خطا است) برآورد می‌شود، سپس، فرض می‌شود که توزیع طول اثر واقعی (که بدون خطا است) نیز دارای همان شکل توزیع است، بنابراین در این صورت فقط لازم است که پارامترهای توزیع (معمولاً میانگین و واریانس) بدست آید. ژانگ و انشتین در سال ۱۹۹۸ روش پنجره برداشت دایره‌ای را به عنوان روشی مناسب برای برآورد بدون خطای طول اثر میانگین درزه‌ها معرفی کرده‌اند (Zhang and Einstein, 1998).

1- Hister  
2- Bias errors

به طور معمول توزیع‌های نمایی منفی، لاگ‌نرمال و گاما برای توزیع طول اثر بکار برده می‌شوند (Zhang and Einstein, 2000). پرست و هادسون نشان دادند که توزیع چگالی احتمال مناسب‌تر برای طول اثر، توزیع نمایی منفی است. همچنین با توجه به اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده توسط والیز و کینگ در سال ۱۹۸۰ (Wallis and King, 1980)، کولاتیلاک<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۳ (Kulatilake et al., 2003)، توزیع چگالی احتمال نمایی منفی برای نمایش طول اثر ناپیوستگی، مناسب تشخیص داده شده است.

در عمل، فرض می‌شود اندازه‌های سه‌بعدی درزه‌ها دارای ویژگی‌های آماری مشابه با نتایج بدست آمده از پیمایش‌های دو بعدی هستند (Xu and Dowd, 2010). به طور معمول برای توزیع طول اثر واقعی درزه، سه تابع نمایی منفی (Kulatilake et al., 2003; Baecher, 1983; Zadhesh et al., 2013)، لاگ‌نرمال (Priest, 1993; Zhang & Einstein, 2000; Wu & Wang, 2002) و گاما (Priest, 1993; Zhang & Einstein, 2000) برای اطلاعات حاصل از پیمایش دو بعدی درزه‌ها بکار برده می‌شوند.

### ۵-۳- مدل سازی هندسه ناپیوستگی

در مکانیک جامدات محیط ایده آل محیطی پیوسته، همگن و همسانگرد است. شواهد نشان می‌دهد که در محیط‌های سنگی این شرایط وجود ندارد. ناپیوستگی‌ها مهمترین عامل در بی‌نظمی و عدم امکان دسترسی به شرایط ایده‌آل می‌باشند. ناپیوستگی‌ها همچنین منافذ و مسیری را برای ذخیره و نفوذ سیال به داخل توده سنگ فراهم می‌آورند. در واقع یک بخش مهم در ارزیابی خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی توده‌های سنگی، خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها از جمله تعداد دسته درزه‌ها، جهت‌داری، چگالی درزه‌داری، جانمایی و اندازه ناپیوستگی‌ها است.

---

1- Kulatilake



در مدل سازی هندسی توده سنگ، سعی بر این است که ساختارهای اصلی زمین شناسی توده سنگ، شناخته شده و مولفه‌های هندسی آن اندازه‌گیری و با توجه به ویژگی‌های آنها به بهترین وجه و با بیشترین تطابق با واقعیت، مکان‌یابی شوند، بنابراین با شبیه‌سازی ناپیوستگی‌ها و تطابق آنها با بلوک بزرگ توده، می‌توان یک مجموعه بلوکی را به تصویر کشید و در نهایت امکان مدل‌سازی‌های مکانیکی، هیدرولیکی، تحلیل‌های پایداری و تخریب‌پذیری را فراهم نمود. در ادامه به‌طور اختصار انواع اصلی و چند روش از هر نوع مدل سازی هندسه ناپیوستگی‌ها توضیح داده شده است.

### ۵-۳-۱- انواع روش‌های مدل‌سازی هندسی ناپیوستگی‌ها

طی سال‌های اخیر، تلاش‌های زیادی برای مدل‌سازی هندسی ناپیوستگی‌های توده سنگ، از طریق جمع‌آوری اطلاعات در مورد ناپیوستگی‌های منفرد و ترکیب مدلی از شبکه ناپیوستگی‌ها، صورت گرفته است. به‌علت کمبود داده‌های برداشت شده توزیع‌های بدست آمده پیوسته نیستند بنابراین برای افزایش تعداد داده‌ها و پیوسته بودن این توزیع‌ها از روش‌های آماری استفاده می‌شود بدین صورت که برای هر یک از خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها یک توزیع احتمالاتی بر اساس داده‌های برداشت شده بدست می‌آورند (گودرزی و یاراحمدی، ۱۳۹۲).

تا کنون مدل‌های زیادی در خصوص هندسه ناپیوستگی‌ها در دو و سه بعد ارائه شده‌اند. این مدل‌ها را می‌توان به دو گروه اصلی برمبنای درزه‌های پایا (نامحدود) و درزه‌های ناپایا (محدود) تقسیم‌بندی نمود.

### ۵-۳-۱-۱- مدل هندسی با درزه‌های پایا (نامحدود)

این روش خود به دو صورت کلی ترتیبی و غیرترتیبی تقسیم بندی می‌شود. در این روش ناپیوستگی‌ها نامحدود بوده و در صورت عدم وجود تسلسل و ترتیب ایجاد تا مرزهای مدل ادامه می‌یابند (غیرترتیبی) و اگر تسلسلی وجود داشت دسته درزه‌های غالب مرز مدل را قطع و دسته درزه‌های ثانویه به ناپیوستگی‌های اولیه محدود می‌شوند (ترتیبی). عدم در نظر گرفتن گسترش ابعاد

درزه‌ها از جمله معایب این سیستم بوده و باعث تولید تعداد غیر واقعی بلوک در مجموعه بلوکی منتج از شبیه سازی می‌شود.

این مدل بر اساس نحوه قرارگیری ناپیوستگی‌ها به انواع مختلف مانند مدل چند وجهی<sup>۱</sup> و مدل درزه-های تصادفی نامحدود تقسیم بندی می‌شود (امینی و یاراحمدی، ۱۳۸۶).

### ۵-۳-۱-۲- مدل هندسی با درزه‌های ناپایا (محدود)

در این مدل‌ها علاوه بر جهت‌داری و موقعیت درزه‌ها، اندازه (ابعاد) درزه‌ها محدود و ناپایا در نظر گرفته خواهد شد. از مهمترین مدل‌های این نوع می‌توان به مدل دیسک بیچر (Baecher et al., 1977)، مدل بلوک موزاییکی، مدل ونزیانو و مدل داراشوئیتز (Dershowitz, 1984) اشاره کرد.

### ۵-۳-۲- کاربرد مدل‌های ناپیوستگی‌های پایا و ناپایا

همانگونه که گفته شد روش‌های مدل سازی هندسه ناپیوستگی‌ها در دو دسته کلی سیستم ناپیوستگی‌های پایا و سیستم ناپیوستگی‌های ناپایا دسته‌بندی می‌شوند. تجربیات نشان می‌دهند که با در نظر گرفتن مدل‌های پایا برای ناپیوستگی‌ها، نتایج بدست آمده و تحلیل‌های صورت گرفته کاملاً متفاوت با واقعیت بوده و مدل‌های ناپایا برای مدل سازی توده سنگ‌های درزه‌دار مناسبتر هستند. یکی از بهترین مدل‌های پیشنهادی، شبکه ناپیوستگی‌های گسسته است. این مدل به دلیل سادگی آن در عملیات ریاضی، توسط چندین محقق مورد استفاده قرار گرفته و آزمایش شده است و در بین مدل‌های پیشنهادی، بهترین تطابق را با واقعیت دارد.

فرضیات اساسی در نظر گرفته شده در این مدل عبارتند از:

الف- تمامی ناپیوستگی‌ها صفحه‌ای و به شکل چندضلعی با ضخامت کم و در دو بعد به صورت خطی بدون انحنا می‌باشند.

ب- مراکز ناپیوستگی‌ها در داخل توده سنگ به صورت احتمالاتی و به‌طور مستقل توزیع شده‌اند. (توزیع پواسون)

پ- توزیع اندازه، مستقل از موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها است.

#### ۴-۵- پیشینه مدل‌سازی تصادفی ناپیوستگی‌ها

مدل‌های تصادفی شبکه درزه، طبیعت ناهمگن توده‌سنگ‌های درزه‌دار را با استفاده از ارایه شبکه درزه به صورت عناصری گسسته در فضا با خصوصیات هندسی و ویژگی‌هایی که به طور تصادفی تعریف شده‌اند، نمایش می‌دهد (Pine et al., 2006). مطالعات هادسون<sup>۱</sup> و لاپونته<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۰ (Hudson & La pointe, 1980) و رایینسون<sup>۳</sup> در سال ۱۹۸۳ در زمینه تراوایی و جریان سیال را می‌توان نقطه آغاز کاربرد مدل‌های تصادفی دانست (Robinson, 1983). دراشویتز<sup>۴</sup> و انیشتین<sup>۵</sup> در سال ۱۹۸۸ مدل تصادفی‌ای ارایه نمودند که با در نظر گرفتن تغییرات در جهت، فاصله‌داری و پایایی ناپیوستگی، شبکه درزه واقعی‌تری را ایجاد می‌کرد (Dershowitz & Einstein, 1988). پریست<sup>۶</sup> و سامانیگو<sup>۷</sup> در سال ۱۹۸۸ اقدام به توسعه این مفهوم در زمینه تحلیل پایداری بلوک نمودند (Priest & Samaniego, 1988). ارایه‌ی مدل هندسی سلسله مراتبی در ارتباط با فرآیندهای پایه‌ای ایجاد درزه توسط ریس<sup>۸</sup> و انیشتین در سال ۱۹۹۱ (Reyes & Einstein, 1991) و مدل هندسی - مکانیکی ارایه شده توسط مارتل<sup>۹</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۱ را می‌توان از دیگر نمونه‌های مدل‌های تصادفی توسعه داده شده دانست (Martel et al., 1991). محدودیت‌های این مدل‌ها، به ویژه توانایی مدل‌سازی فقط دو دسته درزه و مشکل در ارایه تغییرات گسترده توزیع دسته درزه‌ها، منجر به توسعه مدل دوبعدی سلسله مراتبی پیشرفته توسط یو<sup>۱۰</sup> در سال ۱۹۹۲ شد (Yu, 1992). پریست در سال ۱۹۹۳ مدل تصادفی سه بعدی را ارایه نمود که در آن درزه‌ها به صورت دیسک‌های دایره‌ای فرض شده‌اند. در این مدل

- 
- 1 - Hudson
  - 2 - Lapointe
  - 3 - Robinson
  - 4 - Dershowitz
  - 5 - Einstein
  - 6 - Priest
  - 7 - Samaniego
  - 8 - Reyes
  - 9 - Martel
  - 10 - Yu

مقادیر تصادفی برای قطر درزه نیز به وسیله الگوریتم‌های ارایه شده توسط پریست، از توزیع‌های مناسب تولید می‌شوند (Priest, 1993). ایوانووا<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۱۹۹۵ مدل دو بعدی سلسله مراتبی پیشرفته را به سه بعد توسعه دادند (Ivanova et al., 1995). کولاتیلاک<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۴ اقدام به تهیه‌ی مدل شبکه درزه تصادفی سه بعدی برای توده سنگی از جنس دیوریت و ارایه فرآیند جدیدی برای تخمین مقاومت و تغییر شکل پذیری بلوک سنگی در سه بعد نمودند (Kulatilake et al., 2004). در سال‌های اخیر نیز توسعه مدل تصادفی به منظور بررسی اثرات وابستگی بین توزیع بازشدگی و طول اثر درزه بر رفتار هیدرومکانیکی و مکانیکی توده سنگ درزه‌دار، براساس مدل‌های پیشین، انجام شده است. مدل دوبعدی ارایه شده توسط باغبانان و جینگ<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۸ (Baghbanan & Jing, 2008) و مدل سه‌بعدی ارایه شده توسط زو<sup>۴</sup> و دود<sup>۵</sup> در سال ۲۰۱۰ (Xu & Dowd, 2010) و همچنین بنگ<sup>۶</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۲ را می‌توان به‌عنوان نمونه‌هایی از این نوع برش‌مرد (Bang et al., 2012). گودرزی و یارحمادی در سال ۱۳۹۲ مدل سه بعدی هندسی درزه‌ها را به روش دیسک‌های تصادفی ارایه نمودند (گودرزی و یارحمادی، ۱۳۹۲). همچنین نوروزی در سال ۱۳۹۳ با شبیه‌سازی هندسی شبکه ناپیوستگی‌های سه بعدی تاثیر پایایی را بر مقاومت توده سنگ بررسی کرده است (نوروزی، ۱۳۹۳). جدیدترین کارهای انجام شده در مورد استفاده از مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌های گسسته و شدت درزه‌داری حجمی برای شناخت بیشتر توده سنگ در روش تخریب بلوکی مربوط به راجرز<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴ است (Rogers, et al 2014).

## ۵-۵- تهیه نرم‌افزار تولید شبکه ناپیوستگی گسسته (CAV-DFN<sup>2D</sup>)

- 
- 1 - Ivanova
  - 2 - Kulatilake
  - 3 -Jing
  - 4 - Xu
  - 5 - Dowd
  - 6 - Bang
  - 7 - Rogers

در مدل‌سازی‌های تصادفی، شیوه کلی شامل بررسی و استنتاج موقعیت، پایایی (اندازه)، جهت‌داری و دیگر ویژگی‌های هندسی درزه‌ها به عنوان متغیرهای تصادفی با توزیع‌های آماری است که مبنای تصادفی بودن مدل‌سازی‌ها خواهد بود. از جمله این روش‌های تصادفی شبکه ناپیوستگی‌های گسسته است، این روش مدل‌سازی سعی دارد سیستم ناپیوستگی‌های توده سنگ را به شیوه‌ی آماری ایجاد نماید. این کار توسط ساخت سری ناپیوستگی‌های مجزا بر مبنای مشاهده‌ها و برداشت‌های خواص هندسی ناپیوستگی‌های موجود در یک منطقه انجام می‌گیرد. این خواص شامل اندازه، امتداد و شدت درزه‌داری است.

روش مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی گسسته (DFN) از جدیدترین روش‌های مدل‌سازی تصادفی شبکه درزه‌ها با در نظر گرفتن ناپایایی ابعاد درزه است که دارای مزایای اصلی نسبت به دیگر روش‌های معمول مدل‌سازی است. این روش برای مسایلی با مقیاس محلی مناسب‌تر است زیرا توانایی آن برای توصیف خواص هندسی ناپیوستگی‌های مجزا و درزه‌ها بسیار دقیق‌تر از شیوه‌های پیوسته بزرگ مقیاس است. همچنین این روش ناهمگنی سیستم درزه‌ها را به صورت واضح و مشخصی ارائه می‌کند، این عمل با توصیف خواص کلیدی سیستم ناپیوستگی امکان‌پذیر است. مهم‌ترین ویژگی این روش این است که مسیر آشکار و تجدیدپذیری را برای مدل‌سازی داده‌های برداشت شده از منطقه فراهم می‌کند زیرا خواص هندسی واقعی درزه‌ها در هنگام مدل‌سازی دست نخورده باقی خواهند ماند (Rogers, et al 2014).

برای ساخت مدل شبکه ناپیوستگی گسسته از هر دسته درزه به چهار مولفه‌ی زیر نیاز است:

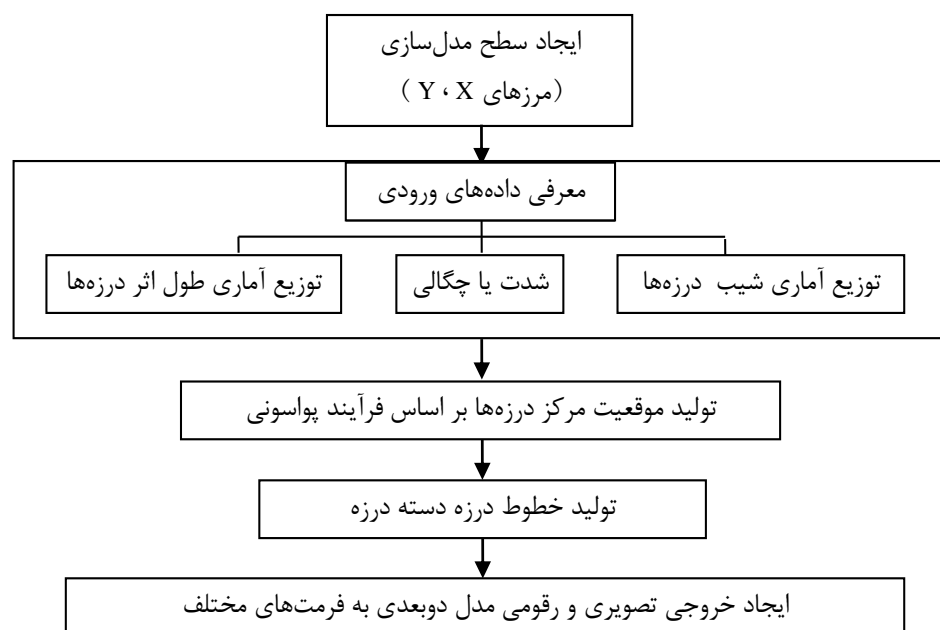
الف - تابع چگالی احتمال جهت‌داری درزه‌ها

ب - چگالی یا شدت درزه‌داری

پ - تابع چگالی احتمال تغییرات اندازه (پایایی) درزه‌ها

ت - موقعیت مراکز درزه‌ها

روندنمای مدل‌سازی برای یک دسته درزه در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: روند نمای مدل‌سازی برای یک دسته درزه

یک دسته درزه در فضای دوبعدی با کاربرد متوالی سه فرآیند تصادفی تولید می‌شود.

- فرآیند اول: شبکه پواسونی همگن برای تولید مرکز درزه براساس چگالی درزه‌داری

- فرآیند دوم: انتخاب تصادفی مقدار شیب درزه از تابع چگالی احتمال شیب

- فرآیند سوم: انتخاب تصادفی مقدار طول اثر درزه از تابع چگالی احتمال آن

در برنامه تهیه شده با عنوان  $CAV-DFN^{2D}$ ، که در محیط نرم‌افزاری Mathematica نوشته شده است، از یکسری الگوریتم‌ها و زیربرنامه‌ها استفاده شده که در پیوست ۲ به آنها اشاره شده است. در این برنامه بنا به استفاده مورد نظر قابلیت‌هایی تعبیه شده که برخی از آنها منحصر به فرد است، در ذیل به بخشی از مهمترین آنها اشاره شده است:

- امکان نمونه‌گیری تصادفی از درزه‌های تولید شده به تفکیک هر دسته درزه و یا به صورت کلی، به عنوان نمونه ۶۰ درصد از درزه‌های ساخته شده به صورت تصادفی انتخاب شوند.
- امکان ایجاد مدل‌های سلسله مراتبی با در نظر گرفتن ترتیب زایش هر دسته درزه به تعداد دلخواه براساس تعداد دسته‌درزه‌ها

- دارا بودن ابزارهای نمونه برداری برای تعیین چگالی خطی در راستاهای مختلف در مدل ساخته شده به دلخواه کاربر به تفکیک هر دسته درزه و یا به صورت کلی به منظور اعتبارسنجی مدل

- امکان ایجاد خروجی رقومی و گرافیکی به تفکیک هر دسته درزه و به صورت کلی دارا بودن ابزار نمونه گیری از درزه ها براساس مولفه های ورودی از جمله شیب و طول اثر، به عنوان نمونه تفکیک جامعه آماری درزه های با طول اثر (پایایی) در بازه ای بین دو عدد مشخص

- امکان تشکیل بلوک های کامل از تقاطع درزه ها و محاسبه ی مساحت آنها به همراه ترسیم توابع توزیع آماری مساحت بلوک ها

- امکان خروجی گرفتن تمامی توابع توزیع و آماره های آنها برای هر مولفه به عنوان نمونه شیب، طول اثر، مساحت بلوک های تشکیل شده

- امکان گرفتن خروجی از مدل ساخته شده به فرمت ورودی نرم افزارهای عددی UDEC و PFC2D با تفکیک نوع درزه ها براساس دسته درزه، طول اثر و ...

- امکان تکرار مدل سازی تصادفی به مقدار دلخواه، مقایسه ی مولفه های چگالی و شدت درزه-داری خطی و سطحی مدل ها با یکدیگر و ترسیم توابع توزیع آماری هریک از این مولفه ها.

### ۵-۵-۱ - ورودی برنامه

ورودی برنامه ی تهیه شده همانگونه که در شکل ۵-۴ نشان داده شده است. شامل ابعاد سطح مدل-سازی، تابع چگالی احتمال جهت داری درزه ها، چگالی یا شدت درزه داری و تابع چگالی احتمال تغییرات اندازه (پایایی) درزه ها برای هر دسته درزه است. در جدول ۵-۴ نمونه ای از مولفه های آماری دو دسته درزه به عنوان ورودی نرم افزار نشان داده شده است.

مجدول ۴-۵: مولفه‌های آماری ویژگی‌های هندسی چهار دسته‌درزه برای ورود به نرم افزار CAV-DFN<sup>2D</sup>

| طول اثر (متر)       |         |                 |                   | چگالی<br>سطحی<br>(P <sub>20</sub> ) | جهت‌داری            |         |               |                     |         |               | دسته<br>درزه |   |
|---------------------|---------|-----------------|-------------------|-------------------------------------|---------------------|---------|---------------|---------------------|---------|---------------|--------------|---|
|                     |         |                 |                   |                                     | شیب (درجه)          |         |               | شیب (درجه)          |         |               |              |   |
| انحراف<br>استاندارد | میانگین | پارامتر<br>تابع | پارامتر تابع      | تابع<br>توزیع                       | انحراف<br>استاندارد | میانگین | تابع<br>توزیع | انحراف<br>استاندارد | میانگین | تابع<br>توزیع |              |   |
| ۰/۵۷                | ۰/۷۲    | ----            | $\lambda = 1,386$ | نمایی<br>منفی                       | ۵/۱                 | ۱۸/۲۵   | ۱۷۳/۷         | نرمال               | ۶/۹۱    | ۷۹/۳          | نرمال        | ۱ |
| ۰/۶۳                | ۰/۵۴    | ----            | $\lambda = 1,583$ | نمایی<br>منفی                       | ۴/۴۴                | ۱۳/۹۲   | ۳۵۶/۴         | نرمال               | ۵/۶۶    | ۷۵/۵          | نرمال        | ۲ |
| ۰/۷۸                | ۰/۶۷    | S=۰/۹۶          | $\mu = -0,92$     | لاگ<br>نرمال                        | ۴/۲                 | ۱۷/۰۸   | ۲۱۸           | نرمال               | ۸/۳۷    | ۵۰/۸          | نرمال        | ۳ |
| ۰/۳۷                | ۰/۴۹    | S=۰/۶۸          | $\mu = -0,95$     | لاگ<br>نرمال                        | ۲/۶                 | ۱۰/۸    | ۳۱۲/۵         | نرمال               | ۱۱/۶    | ۵۵/۳          | نرمال        | ۴ |

لازم به توضیح است که برای ورودی‌هایی مانند طول اثر که در اکثر موارد از توابع توزیع گاما، لاگ نرمال و یا نمایی منفی تبعیت می‌کنند تنها مشخص کردن نوع تابع توزیع و مقادیر میانگین و انحراف استاندارد داده‌ها کفایت خواهد کرد، زیرا در نرم افزار تهیه شده توابع تبدیل دو مولفه‌ی میانگین و انحراف استاندارد به مولفه‌های مورد نیاز توابع توزیع غیرنرمال نوشته شده است و این تبدیل به صورت خودکار انجام خواهد شد.

#### ۵-۵-۲ - خروجی‌های برنامه

خروجی‌های برنامه شامل دو دسته‌ی کلی خروجی‌های متنی و نمایه‌های بصری است. خروجی‌های متنی شامل گزارش‌های مربوط به مدل و هرگونه گزارش مورد نظر کاربر از جمله درزه-ها به تفکیک هر دسته درزه، بلوک‌ها، اندازه‌ها و ابعاد محاسبه شده از درزه و بلوک به همراه آماره-های توابع توزیع مولفه‌های هندسی هریک از دسته‌درزه‌ها است. یک نمونه از گزارش خروجی نرم



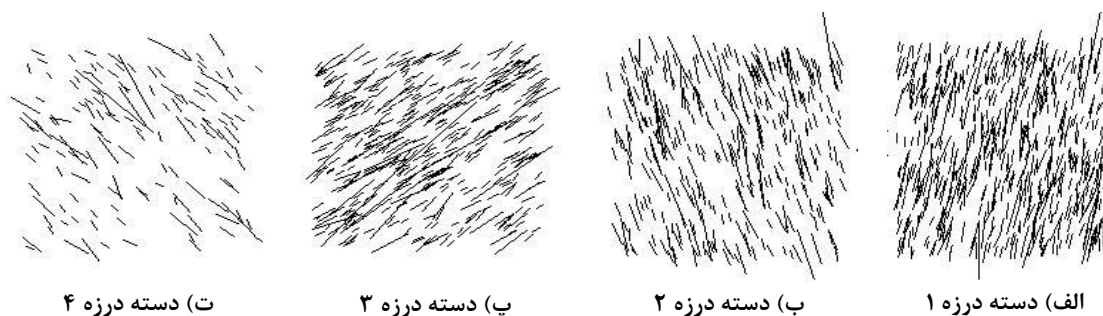
افزار در مورد شبیه‌سازی دو دسته درزه‌ی جدول ۴-۵ در جدول ۵-۵ نشان داده شده است. ابعاد مدل شبیه‌سازی شده  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  در نظر گرفته شده است.

جدول ۵-۵: نمونه‌ای از گزارش خروجی نرم‌افزار CAV-DFN<sup>2D</sup>

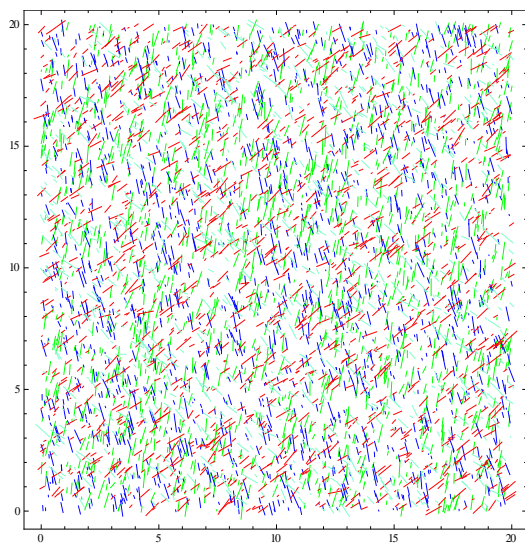
CAV-DFN<sup>2D</sup> Model Information

|        | jnum | P20  | P21   | Trace Length distribution | mean trace length | SD trace length | mean Dip | SD Dip |
|--------|------|------|-------|---------------------------|-------------------|-----------------|----------|--------|
| Jset 1 | 508  | 5.08 | 3.188 | lognormal                 | 0.74              | 0.56            | 79.69    | 6.97   |
| Jset 2 | 431  | 4.31 | 2.387 | lognormal                 | 0.52              | 0.62            | 75.54    | 5.48   |
| Jset 3 | 419  | 4.19 | 2.173 | lognormal                 | 0.65              | 0.72            | 51.23    | 8.39   |
| Jset 4 | 261  | 2.61 | 1.342 | lognormal                 | 0.47              | 0.36            | 55.32    | 11.73  |

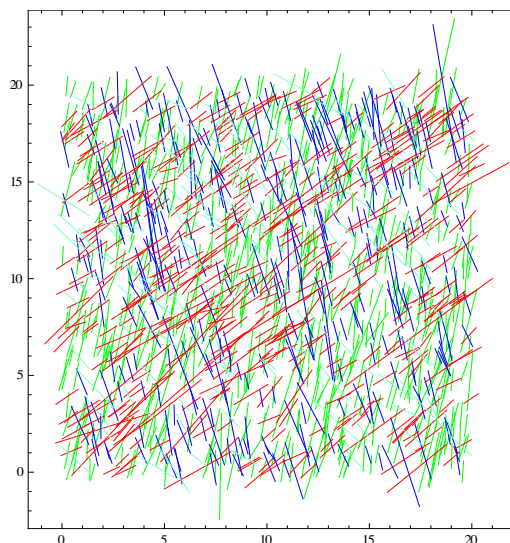
در جدول گزارش نرم‌افزار به ترتیب از چپ به راست، شماره‌ی دسته‌درزه، چگالی درزه‌داری سطحی، شدت درزه‌داری سطحی، تابع توزیع طول اثر ایجاد شده، میانگین و انحراف استاندارد طول اثر، میانگین و انحراف استاندارد شیب درزه‌ها نمایش داده می‌شود. خروجی‌های بصری نرم‌افزار شامل مدل درزه‌ها و توابع توزیع آماری مولفه‌های هندسی آنها است. در شکل‌های شماره‌ی ۵-۵ تا ۱۱-۵ برخی از این نمایه‌ها به همراه توضیح ارائه شده است. همچنین با تعریف تابعی در مدل در صورت داشتن تسلسل درزه‌داری، پس از ساخته شدن همگی دسته‌درزه‌ها با تعیین سلسله مراتب، درزه‌های دسته درزه‌ی مرتبه‌ی پایین‌تر به درزه‌های دسته درزه‌ی مرتبه‌ی بالاتر از خود محدود خواهند شد و قسمت‌های عبور کرده از دسته‌درزه‌های مرتبه‌ی بالاتر حذف خواهد شد.



شکل ۵-۵: خروجی یکی از مدل‌های ساخت شبکه درزه‌ها به تفکیک هر دسته درزه

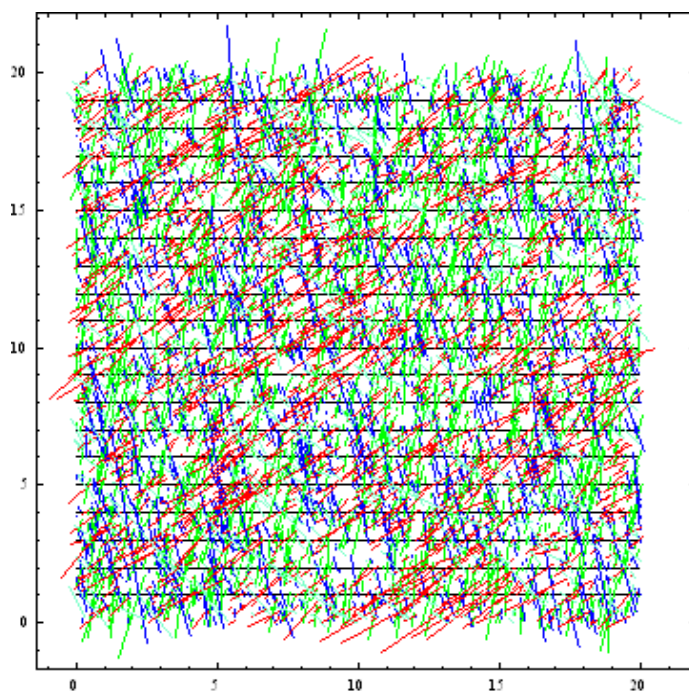


ب) درزه‌های باطول کوچکتر از ۰/۸ متر



الف) درزه‌های باطول بزرگتر از ۰/۸ متر

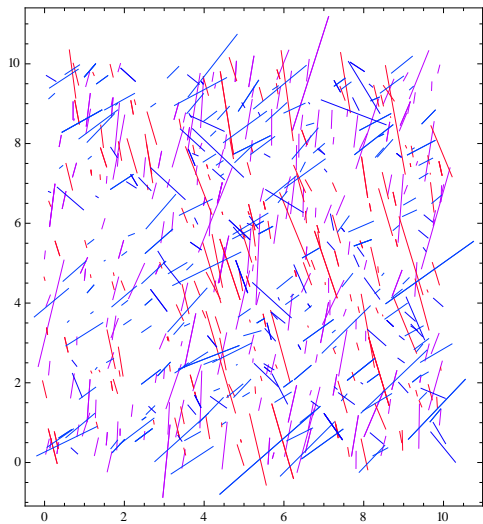
شکل ۶-۵: خروجی کلی یکی از مدل‌های ساخت شبکه درزه‌ها با چهار دسته درزه



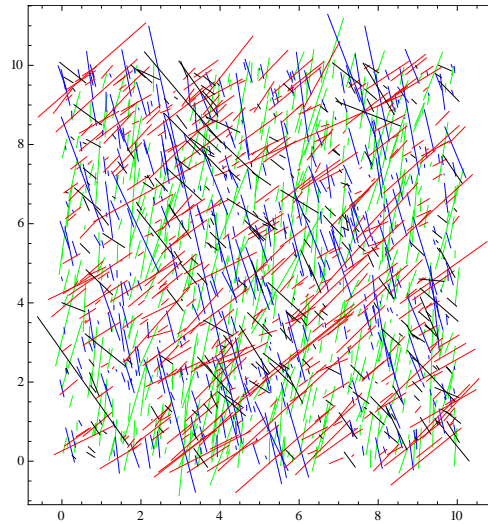
نشانک ۷-۵: مایی از یک مدل با چهار دسته درزه به همراه خطوط برداشت افقی در ترازهای یک متری

شکل ۸-۵ قابلیت نمونه‌گیری تصادفی درصد دلخواه از درزه‌های هر دسته درزه نشان داده شده است

نمونه‌ای از این مدل با تسلسل درزه‌داری برای دو دسته درزه در شکل ۹-۵ نشان داده شده است. در.

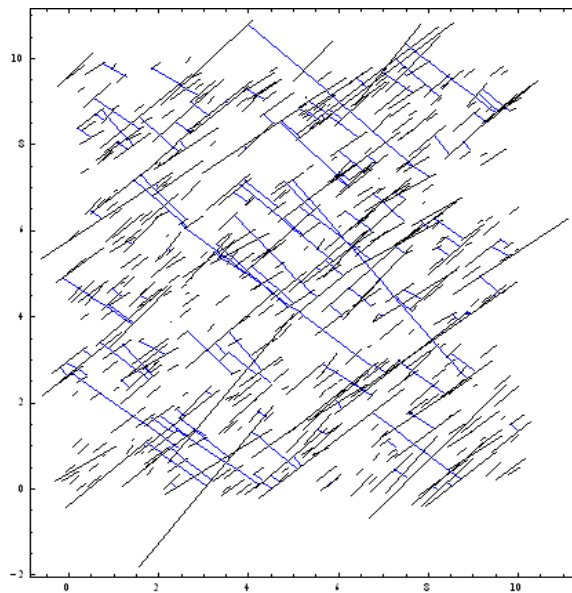


ب) مدل با نمونه‌گیری تصادفی از ۵۰ درصد درزه‌ها



الف) مدل با ۱۰۰ درصد درزه‌ها

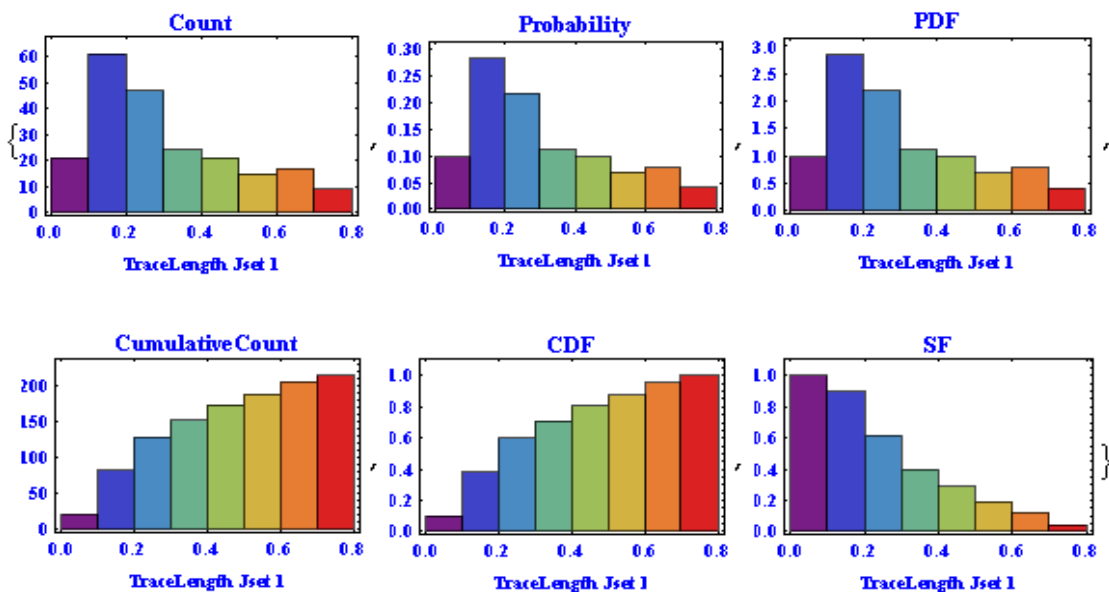
شکل ۸-۵: خروجی یکی از مدل‌های ساخت شبکه درزه‌ها برحسب درصد درزه‌های هر دسته درزه



شکل ۹-۵: نمونه‌ای از تهیه مدل درزه‌ها براساس ترتیب زایش به صورت سلسله مراتبی

امکان گرفتن خروجی توابع توزیع آماری و آماره‌های آنها در این نرم افزار تعبیه شده است. در شکل ۱۰-۵ تابع چگالی احتمال کوتاه شده (TPDF<sup>۱</sup>) به همراه توابع توزیع تعداد و تجمعی و تابع قابلیت اطمینان<sup>۲</sup> (SF) برای طول‌های اثر کوچکتر از ۰/۸ متر از دسته درزه‌ی شماره‌ی یک نشان داده شده است.

1- Truncated Probability Density Function  
2 - Survival Function (Reliability Function )

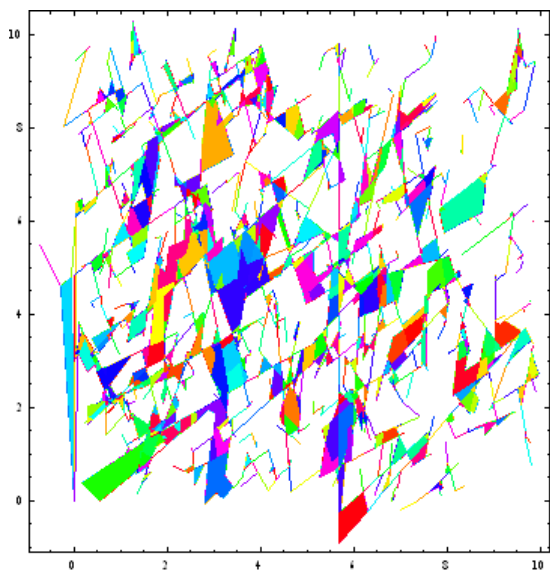


شکل ۵-۱۰: توابع توزیع طول اثر درزه‌های کوچکتر از ۰/۸ متر در دسته درزه شماره یک

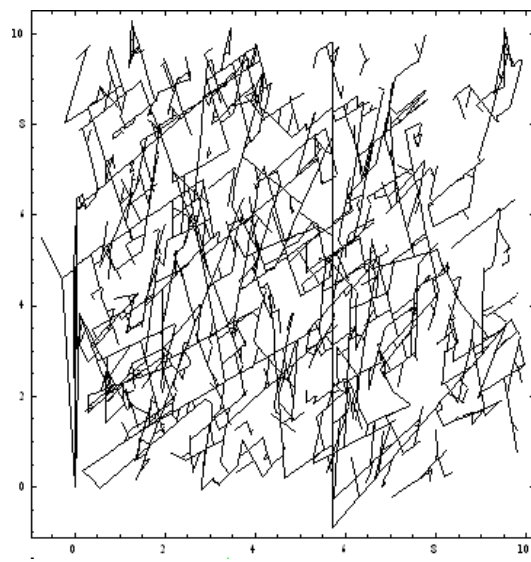
روش بلوک بندی تعمیمی از نتایج تحقیقات شی، گودمن و تاینوسی است (Shi et al., 1985).

سپس مساحت بلوک‌ها با استفاده از یک الگوریتم ابداعی ساده محاسبه می‌گردد، این فرآیند به صورت

تصویری در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است.



ب) تشکیل بلوک‌های کامل و محاسبه‌ی مساحت آن‌ها



الف) پس از منظم سازی درزه‌ها

شکل ۵-۱۱: فرآیند منظم سازی، تشکیل و محاسبه‌ی مساحت بلوک‌ها

در نهایت پس از تعیین مساحت بلوک‌ها تابع چگالی احتمال مساحت به همراه تابع چگالی تجمعی مساحت توسط نرم‌افزار محاسبه و در اختیار قرار خواهد گرفت. همچنین نسبت مساحت کل بلوک‌ها به مساحت کل مدل نیز به صورت درصد ارایه می‌شود.

### ۵-۳-۵- ابزارهای اعتبارسنجی نرم‌افزار

همان‌گونه که در قسمت گزارش خروجی مدل اشاره شد، توابع چگالی احتمال شیب و طول درزه‌ها پس از ساخت مدل بوسیله‌ی  $CAV-DFN^{2D}$  محاسبه خواهد شد و آماره‌های آنها با داده‌های ورودی مدل مقایسه می‌شود تا میزان انطباق مشخص گردد.

همچنین چگالی درزه‌داری سطحی ( $P_{20}$ )، شدت درزه‌داری سطحی ( $P_{21}$ ) و مقادیر چگالی درزه‌داری خطی ( $P_{10}$ ) برای خطوط برداشت مختلف در راستاهای افقی و قائم توسط توابع نوشته شده به تفکیک هر دسته درزه و به صورت کلی تعیین خواهد شد و این مقادیر با مقادیر ورودی مدل مقایسه می‌شود.

### ۵-۶- جمع‌بندی

در اکثر موارد به‌منظور محافظه‌کارانه عمل کردن در تحلیل‌های پایداری اعم از فضاها، زیرزمینی و روباز، گسترش ناپیوستگی‌ها به صورت نامحدود و پایا در نظر گرفته می‌شود، اما در واقع، گسترش درزه در مورد بیشتر ناپیوستگی‌ها و به‌ویژه درزه‌های موجود در توده سنگ، نامحدود نیست. این امر تاثیر زیادی بر میزان تخریب‌پذیری کانسار در روش‌های استخراج تخریبی، به‌ویژه روش تخریب توده‌ای دارد.

در نظر گرفتن ویژگی‌های تصادفی پارامترهای هندسی درزه و ارایه مدلی تا حد امکان واقعی از توده سنگ که از لحاظ آماری معتبر باشد و گویای ویژگی‌های هندسی توده سنگ برجا باشد، به منظور کاربرد در تحلیل‌های تخریب‌پذیری لازم است. با توجه به قابلیت‌های تعریف شده در نرم‌افزار  $CAV-DFN^{2D}$  از آن به عنوان ابزاری توانمند و مناسب برای برآورد خردشوندگی برجای توده سنگ

استفاده خواهد شد. ورودی مدل‌های خردشوندگی اولیه و ثانویه، خروجی مرحله‌ی تعیین خردشوندگی برجا توسط این نرم‌افزار خواهد بود. همچنین در مرحله‌ی تحلیل خردشوندگی اولیه و ثانویه سطوح ضعف (درزه‌های بالقوه) نیز به همین روش شبیه‌سازی خواهند شد.

## فصل ششم

۶- تحلیل تخریب پذیری و خردشوندگی توده سنگ درزه‌دار

پیش‌بینی قابلیت تخریب توده سنگ، یکی از عوامل مهم در موفقیت روش تخریب بلوکی و یکی از ارکان اصلی در طراحی این معادن است. مقاومت ماده‌سنگ، میزان درزه‌داری و ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها به ویژه جهت‌داری، فاصله‌داری و پایایی آن‌ها از خصوصیات طبیعی موثر بر تخریب‌پذیری توده‌سنگ هستند. با توجه به خصوصیات طبیعی توده سنگ و همچنین عوامل محیطی و عملیاتی که در اثر معدن‌کاری زیرزمینی به طور مستقیم بر کانسنگ و سنگ‌های اطراف آن به وجود می‌آید، پیش‌بینی قابلیت تخریب دارای پیچیدگی‌های بسیاری است.

در بخش اول برداشت درزه‌های ترانشه‌های موجود در معدن کهنگ ارایه شده است. سپس با تفکیک دسته درزه‌ها براساس مولفه‌های شیب و جهت شیب، ویژگی‌های هندسی آنها شامل شیب، جهت شیب و طول اثر با برآورد بهترین توابع توزیع احتمالاتی، برای هر دسته درزه مشخص شده است.

در بخش دوم گمانه‌های اکتشافی با استفاده از روش پردازش تصویر و به کمک برنامه‌ی کامپیوتری نوشته شده در محیط Mathematica ارزیابی شده و شدت درزه‌داری خطی ( $P_{10}$ ) برای کانسنگ معدن مس کهنگ تعیین شده است. سپس با استفاده از روش‌های زمین‌آمار، این مولفه در فضای سه بعدی مدل بلوکی تخمین زده شده است. این مقادیر برای افق‌های مختلف با استفاده از ضرایب انتقال به شدت درزه‌داری حجمی ( $P_{32}$ ) با فرض پایایی بی‌نهایت در محدوده‌ی هر بلوک تخمین، تبدیل شده است. سرانجام با استفاده از نمودار راجرز<sup>۱</sup> قابلیت تشکیل بلوک‌های کامل سنگی و قابلیت تخریب و حرکت توده سنگ برآورد شده است. همچنین تغییرات و محل ایجاد آن در توده سنگ شناسایی و مشخص شده است. در نهایت براساس بهترین توابع توزیع احتمالاتی ویژگی‌های هندسی دسته‌درزه‌های موجود، مدل هندسی شبکه درزه‌ها در نرم افزار CAV-DFN<sup>2D</sup> تهیه شده



است. خروجی‌های حاصل از مدل از جمله چگالی و شدت درزه‌داری با واقعیت موجود تطابق بسیار خوبی را نشان داد. میزان خردشوندگی برجای حاصل از درزه‌های ناپایا و همچنین نسبت سطح بلوکی شده به سطح کل، محاسبه شده است.

با استفاده از ابزارهای تکرار و اعتبارسنجی تعبیه شده در نرم افزار CAV-DFN<sup>2D</sup> میزان اعتبار مدل‌های ساخته شده با توجه به طول اثر درزه‌های موجود، در مدل‌هایی با ابعاد مختلف کنترل شده است که در نهایت با مقایسه‌ی مولفه‌های آماری بدست آمده از مشخصات هندسی درزه‌های ساخته شده با داده‌های ورودی، مدل ۱۵×۱۵ متر مربع مناسب تشخیص داده شده است. خروجی این مدل برای تعیین بلوک‌های کامل حاصل از برخورد درزه‌ها و تعیین خردشدگی برجا استفاده شده است. پس از این مرحله با استفاده از برنامه‌ی کامپیوتری نوشته شده برای برآورد خردشوندگی اولیه و ثانویه به نام <sup>1</sup>PSF، درزه‌های بالقوه براساس داده‌های حاصل از پردازش تصویر و برداشت از روی جعبه مغزه‌های اکتشافی با استفاده از روش DFN در داخل بلوک‌های مرحله‌ی قبل مدل‌سازی شده است. شاخص خردشوندگی اولیه در مورد جدایش سطوح ضعف، براساس شاخص ارزیابی شده توسط ایدای (Eadie,2002) و مقدار انرژی لازم برای تبدیل سطوح ضعف به درزه‌های بالفعل ارزیابی شده در فصل سوم تعریف شده است. مقدار خردشوندگی ثانویه با فرض اینکه جدایش از روی سطوح ضعف و یا در صورت نبود هیچ‌گونه سطح وضعی از وسط بلوک باشد، تعیین شده است. بسیاری از مولفه‌های تجربی، تحلیلی و احتمالاتی در نظر گرفته شده در مدل خردشوندگی ثانویه بر مبنای نظرات و تجربیات لابسچر به عنوان مشاور بین المللی کنسرسیوم تخریب توده‌ای، با ترکیب با سطح انرژی مورد نیاز بدست آمده از روی نتایج آزمایش طراحی شده برای دسته‌بندی و کمی‌سازی سطوح ضعف، بوده است.

## ۶-۲- عملیات درزه‌نگاری در محدوده معدن کهنگ

اولین مرحله در فرآیند مدل‌سازی هندسی جمع‌آوری اطلاعات ناپیوستگی‌ها برای تحلیل‌های آماری است. در پروژه معدن کهنگ عملیات درزه‌نگاری به ترتیب طبق مراحل زیر انجام شده است:

- برداشت
- ترسیم و تفکیک
- تحلیل آماری

### ۶-۲-۱- عملیات برداشت صحرایی

عملیات برداشت درزه‌ها در محدوده معدن کهنگ با استفاده از خط برداشت‌هایی به موازات ترانشه‌های آماده‌سازی سکوی حفاری انجام شده است. در این روش تمامی درزه‌هایی که خط برداشت را قطع می‌کنند برداشت می‌شوند. در روش برداشت خطی سطوح مسطح تمیز سنگی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که در برابر اندازه و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها بزرگ باشد. در این روش باید رخنمون شامل ۱۵۰ تا ۳۰۰ ناپیوستگی بوده و حداقل باید یک انتها از ۵۰ درصد آنها قابل مشاهده باشد. گفتنی است که استاندارد قابل قبول جهانی برای روش خط برداشت وجود ندارد و در واقع باید جزئیات روش را به نحوی تغییر داد که بتوان داده‌های لازم برای هدف مورد نظر را جمع‌آوری نمود و با شرایط محلی سنگ تطابق داد (Priest, 1993).

در تعداد زیادی از ترانشه‌های موجود در منطقه به دلیل خردشدگی و شکستگی بالای توده-سنگ و یا وجود روباره خاکی، امکان برداشت وجود نداشته است.

داده‌های مورد نیاز از ترانشه‌های مناسب در ترازهای ارتفاعی مختلف برداشت شد و ویژگی‌های هندسی درزه‌ها شامل شیب، جهت شیب، فاصله‌داری، بازشدگی، پرشوندگی و گسترش اندازه‌گیری شده است. برای دستیابی به دیدی درست از درزه‌های برداشت شده، آنها به سه گروه تقسیم شده‌اند. (۱) درزه‌هایی که هر دو انتهای آنها دیده می‌شود (n)، (۲) درزه‌هایی که فقط یک انتهای آنها دیده می‌-

شود (m و ۳) درزه‌هایی که هیچ یک از دو انتهای آنها دیده نمی‌شود (p). سپس ضرایب R0, R1 و R2 برای نشان دادن وضعیت پایانی درزه‌های گروه‌های ۱، ۲ و ۳ مطابق رابطه زیر محاسبه شده است (Kulatilake, et al, 1996):

$$R_0 = \frac{p}{(p+m+n)}$$

$$R_1 = \frac{m}{(p+m+n)} \quad (1-6)$$

$$R_2 = \frac{n}{(p+m+n)}$$

موارد مربوط به این مولفه در ستون مربوط به Termination در فرم‌های مخصوص برداشت ناپیوستگی ثبت شده است. نمونه‌ای از فرم تکمیل شده در شکل ۱-۶ نمایش داده شده است.

BH: 16

91637132.7  
3. 3644127.7

32.3846  
52.4673

عبارت: 2426

| DISCONTINUITY SURVEY DATA SHEET |      |      |               |                 |                              |               |         |             |            |          |             |           |            |                             |  |
|---------------------------------|------|------|---------------|-----------------|------------------------------|---------------|---------|-------------|------------|----------|-------------|-----------|------------|-----------------------------|--|
| GENERAL INFORMATION             |      |      |               |                 |                              |               |         |             |            |          |             |           |            |                             |  |
| Location                        |      | Date |               |                 | Discontinuity data sheet No. |               |         |             |            |          |             |           |            |                             |  |
| Kahanaf                         |      | Day  | Month         | Year            |                              |               |         |             |            |          |             |           |            |                             |  |
|                                 |      | 8    | 9             | 1394            |                              |               |         |             |            |          |             |           |            |                             |  |
| No                              | Type | Dip  | Dip direction | Persistence (m) | Spacing (Cm)                 | Aperture (mm) | filling | Termination | Weathering | JRC (me) | JRC (other) | Roughness | Water Con. | Remarks (Sketch Pic or JRC) |  |
| 1                               | ت    | 30   | 40            | 1.50m           | 0                            | 4mm           | Yes     | R2          |            | 2.4      |             | 3b        | 10         |                             |  |
| 2                               | ت    | 62   | 30            | 1m              | 24cm                         | 1mm           | No      | R2          |            | 4.6      |             | 3b        | 10         |                             |  |
| 3                               | ت    | 53   | 32            | 40cm            | 0                            | 1mm           | No      | R2          |            | 4.6      |             | 3b        | 10         |                             |  |
| 4                               | ت    | 58   | 33            | 58cm            | 8cm                          | 1mm           | No      | R2          |            | 4.6      |             | 3b        | 10         |                             |  |
| 5                               | ت    | 60   | 315           | 1.1m            | 6cm                          | 1mm           | Yes     | R1          |            | 4.6      |             | 3b        | 10         |                             |  |
| 6                               | ت    | 60   | 160           | 1.3m            | 0                            | 3mm           | Yes     | R1          |            | 4.6      |             | 3b        | 10         |                             |  |
| 7                               | ت    | 63   | 315           | 22cm            | 9cm                          | 1mm           | No      | R2          |            | 2.4      |             | 3b        | 10         |                             |  |
| 8                               | ت    | 60   | 320           | 20cm            | 8cm                          | 1mm           | No      | R2          |            | 2.4      |             | 3b        | 10         |                             |  |

شکل ۱-۶: بخشی از یک نمونه فرم برداشت تکمیل شده

تمامی خصوصیات کیفی ناپیوستگی از جمله سطح پرشدگی و نوع آن، ضریب زبری سطح و نوع زبری هر یک از ناپیوستگی‌ها بر اساس نمودارها و جداول مربوط که در شکل ۲-۶ نشان داده شده تا حد ممکن کمی‌سازی شده است. موارد مربوط به این مولفه‌ها در ستون‌های filling, JRC و Roughness در فرم مخصوص برداشت یادداشت شده است.

| Typical Roughness Profiles |        |           |
|----------------------------|--------|-----------|
| Profile Number             | 100 mm | JRC Range |
| 1                          |        | 0-2       |
| 2                          |        | 2-4       |
| 3                          |        | 4-6       |
| 4                          |        | 6-8       |
| 5                          |        | 8-10      |
| 6                          |        | 10-12     |
| 7                          |        | 12-14     |
| 8                          |        | 14-16     |
| 9                          |        | 16-18     |
| 10                         |        | 18-20     |

|   |                    |                            |                                   |                                  |                        |                  |                    |             |          |
|---|--------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------|--------------------|-------------|----------|
| 1 | Discontinuity Type | (J) joint                  | (F) fault                         | (B) bedding                      |                        |                  |                    |             |          |
| 2 | Aperture (mm)      | 1) <0.1                    | 2) 0.1-0.25                       | 3) 0.25-0.5                      | 4) 0.5-2.5             | 5) 2.5-10        | 6) 10-100          | 7) 100-1000 | 8) >1000 |
| 3 | Water Condition    | 1) None                    | 2) Wet                            | 3) Leakage                       | 4) Inflow (<1-3)       | 5) Inflow (<1-3) |                    |             |          |
| 4 | Roughness          | 1) Stepped                 | 2) Undulating                     | 3) Planar                        | a) Rought              | b) Smooth        | c) slickenside     |             |          |
| 5 | Weathering         | (F) fresh                  | (SW) slightly                     | (MW) moderately                  | (HW) highly weathering | (CW) completely  | (RS) residual soil |             |          |
| 6 | Termination        | (R <sub>0</sub> ) both end | (R <sub>1</sub> ) one end visible | (R <sub>2</sub> ) no end visible |                        |                  |                    |             |          |

شکل ۶-۲: نمودار و جدول استاندارد مشخصات زبری سطح ناپیوستگی

از آنجا که محدودیت‌هایی در جانمایی خط برداشت با طول مناسب در منطقه وجود داشته است، به اجبار در سه محدوده‌ی بسیار نزدیک به هم که دارای امتدادهای یکسان هستند، خطوط برداشت پیاده‌سازی و سپس ناپیوستگی‌ها برداشت شده است. بنابراین در مجموع از ۳ خط برداشت ذکر شده تعداد ۱۵۶ ناپیوستگی برداشت شده است. در این مناطق تعداد سه ترانشه برای پیاده‌سازی خط برداشت مناسب‌تر تشخیص داده شد در شکل ۶-۳ نمایی از یک ترانشه به همراه خط برداشت ارایه شده است.

در جدول ۱-۶ خلاصه‌ای از وضعیت پایان‌یابی ناپیوستگی‌های برداشتی ارائه شده است.



شکل ۳-۶: نمایی از خط برداشت شماره ۳

جدول ۱-۶: خلاصه وضعیت پایان‌یابی درزه‌های برداشت شده

| تعداد<br>درزه‌ها | نوع قطع‌شدگی (درصد) |                |                | طول اثر   |
|------------------|---------------------|----------------|----------------|-----------|
|                  | R <sub>2</sub>      | R <sub>1</sub> | R <sub>0</sub> | متوسط (m) |
| ۱۵۶              | ۶۸                  | ۲۸             | ۴              | ۰٫۷۲      |

عدم توانایی ثبت درزه‌هایی که طول آن‌ها از حد اندازه‌گیری کوچک‌تر است به عنوان خطای فرواندازه<sup>۱</sup> خوانده می‌شود. همچنین درزه‌هایی که طول آن‌ها به دلیل محدود بودن رخنمون سنگی دیده نمی‌شود، به عنوان خطای فراندازه<sup>۲</sup> شناخته شده است (Hudson & Priest, 1983).

تاثیر اندازه خطای فرواندازه را با کاهش سطح اندازه در موقع برداشت درزه، می‌توان کاهش داد. در این تحقیق طول ۰/۱ متر برای حد اندازه انتخاب شده است. رخنمون‌های سنگی انتخاب شده نیز دارای اندازه نسبتاً بزرگی در برابر اندازه درزه‌های موجود هستند. بنابراین خطای فرواندازه قابل توجه نیست. همچنین از آنجا که درصد درزه‌هایی که هر دو انتهای آن قابل مشاهده است، پایان‌یابی R<sub>2</sub>، بسیار بیشتر از انواع دیگر است که می‌توان از خطای فراندازه نیز چشم‌پوشی کرد.

1 - truncation bias  
2 - censoring bias

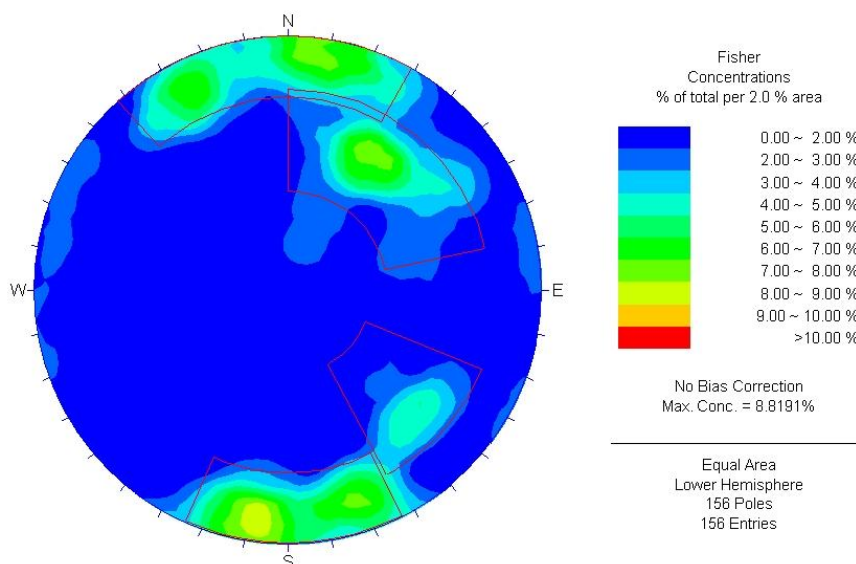
## ۶-۲-۲- ترسیم و تفکیک دسته‌درزه‌ها

با توجه به دسته‌درزه‌های قابل تفکیک در هر یک از سه ایستگاه برداشت، بر مبنای مولفه‌های شیب و جهت شیب، تمامی دسته‌درزه‌ها در ایستگاه‌های مختلف وجود دارد، که میزان فراوانی آن‌ها نیز تقریباً یکسان است. لذا برای تشخیص و تفکیک بهتر کلیه دسته‌درزه‌ها، همه‌ی درزه‌های موجود به صورت یک‌جا تحلیل شده است. با توجه به این که امکان برداشت بیشتر درزه در منطقه‌ی مورد مطالعه وجود ندارد لذا به همین تعداد بسنده شده است.

از طرفی با توجه به مرحله بعدی که استفاده از داده‌های برداشت شده برای ساخت مدل شبکه ناپیوستگی‌های گسسته به منظور برآورد خردشوندگی برجا و تخریب‌پذیری توده سنگ منطقه است، لذا میزان فراوانی هرچند اندک یک دسته درزه نیز، با توجه به مقادیر شیب، جهت شیب و طول آن می‌تواند بسیار تاثیرگذار باشد.

بر اساس تحلیل‌های انجام شده در نرم افزار Dips، ۴ تمرکز درزه قابل تشخیص است. تمرکز

قطب‌های درزه‌های برداشت شده در صفحه‌ی استریونوت در شکل ۶-۴ نمایش داده شده است.



شکل ۶-۴: نتور تمرکز درزه‌ها و تفکیک آن‌ها در منطقه برداشت

## ۶-۲-۳ - تحلیل‌های آماری ویژگی‌های هندسی شبکه ناپیوستگی‌ها

بررسی خصوصیات پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها، اساس مدل‌سازی‌های هندسی تصادفی و آماری است. پردازش داده‌ها شامل تعیین پارامترهای هر درزه بر مبنای تابع توزیع آن پارامتر در آن دسته درزه است. از نظر تئوری تفاوت موجود در توابع توزیع درزه ناشی از تفاوت در فرآیندهای مکانیکی مختلفی است که درزه را ایجاد می‌کند. برای مثال توزیع یکنواخت تنش باعث ایجاد توزیع‌های نمایی و فرآیندهای پیچیده باعث ایجاد توزیع‌های لاگ نرمال در مولفه‌ی طول اثر درزه خواهد شد (Dershowitz & Einstein, 1988).

با تفکیک هر دسته درزه و جداسازی ویژگی‌های درزه‌های مربوط به آن از جمله شیب، جهت شیب، چگالی و طول اثر، اطلاعات لازم برای مطالعات آماری و مدل‌سازی تصادفی فراهم می‌شود. با استفاده از نرم افزار آماری Easyfit، تابع چگالی احتمال مولفه‌های هندسی برداشت شده، برآورد شده است. برای آزمودن این فرضیه که توزیع داده‌های برداشت شده از یک الگوی خاص تابع چگالی احتمال<sup>۱</sup> پیروی می‌کند یا خیر، از آزمون‌های بهترین برازش<sup>۲</sup> استفاده شد. این آزمون‌ها بهترین توزیعی که بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش می‌شود را نشان می‌دهند. در این تحقیق از آزمون‌های بهترین برازش کولموگروف - اسمینوروف<sup>۳</sup>، آندرسون - دارلینگ<sup>۴</sup> و چی - اسکویر<sup>۵</sup> برای ارزیابی تابع چگالی احتمال شیب، جهت شیب و طول اثر درزه‌ها استفاده شده است.

آزمون کولموگروف - اسمینوروف: برای تشخیص فرضیه توزیع پیوسته بکار برده می‌شود. این آزمون بر اساس تابع توزیع تجمعی تجربی<sup>۶</sup> (ECDF) بنا نهاده شده است. برای نمونه‌های تصادفی  $x_1, x_2, \dots, x_n$  توزیعی با تابع توزیع تجمعی  $F(x)$ ، تابع توزیع تجمعی تجربی با استفاده از رابطه زیر

بیان می‌شود

- 
- 1 - Probability Density Function
  - 2 - Goodness of Fit
  - 3- Kolmogorov-Smirnov test
  - 4 . Anderson-Darling test
  - 5 . Chi-Squared test
  - 6 . Empirical Cumulative Distribution Function

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \cdot [\text{Number of observation} \leq x] \quad (۲-۶)$$

آماره کولموگروف - اسمینوروف<sup>۱</sup> (D) بر اساس بزرگترین اختلاف بین تابع توزیع تجمعی  
 تئوری و تجربی بدست می‌آید.

$$D = \max_{1 \leq i \leq n} \left( F(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(x_i) \right) \quad (۳-۶)$$

آزمون آندرسون - دارلینگ برآزش تابع توزیع تجمعی مشاهده شده را با تابع توزیع تجمعی  
 مورد نظر مقایسه می‌کند.

این آزمون نسبت به آزمون کولموگروف - اسمینوروف به داده‌های حاشیه وزن بیشتری می-  
 دهد. آماره آندرسون-دارلینگ<sup>۲</sup> ( $A^2$ ) طبق رابطه‌ی زیر تعریف شده است

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) \cdot [\ln F(x_i) + \ln(1 - F(x_{n-i+1}))] \quad (۴-۶)$$

آزمون چی - اسکویر برای آزمودن جامعه که از کدام توزیع پیروی می‌کند مورد استفاده قرار  
 گرفته است. این آزمون بر روی داده‌های دسته بندی شده<sup>۳</sup> اعمال می‌شود. مقدار آماره آزمون به  
 چگونگی دسته‌بندی بستگی دارد. آماره چی-اسکویر<sup>۴</sup> ( $\chi^2$ ) مطابق رابطه‌ی زیر تعریف شده است

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (۵-۶)$$

که در آن  $O_i$  فراوانی مشاهده شده دسته  $i$  و  $E_i$  فراوانی مورد انتظار بوده و از رابطه زیر محاسبه  
 می‌شود

$$E_i = F(x_2) - F(x_1), \quad (۶-۶)$$

که در آن  $F(x)$  تابع توزیع تجمعی احتمال تحت آزمون،  $x_1$  و  $x_2$ ، کران‌های دسته  $i$   
 هستند.

- 
- 1 . The Kolmogorov-Smirnov statistic (D)
  - 2 . The Anderson-Darling statistic (A2)
  - 3 . binned data
  - 4 . The Chi-Squared statistic



در سطح اعتماد مشخص ( $\alpha$ ) اگر مقدار آماره آزمون‌های کولموگروف - اسمینوروف (D)، آندرسون - دارلینگ ( $A^2$ ) و چی - اسکویر ( $\chi^2$ ) از مقدار بحرانی آن‌ها بیشتر باشد، فرضیه شکل توزیع رد خواهد شد. در جایی که فرضیه چند توزیع مختلف برای یک متغیر وجود داشته باشد هرچه آماره آزمون انجام شده در هریک از توزیع‌های پیشنهادی کمتر باشد، آن توزیع به عنوان توزیع بهتر شناخته خواهد شد. از مقادیر  $\alpha$  برابر ۰/۰۱ و ۰/۰۵، معمولاً برای ارزیابی فرض تهی<sup>۱</sup> ( $H_0$ ) در سطح اعتمادهای مختلف استفاده می‌شود. در اغلب موارد مقدار  $\alpha$  برابر ۰/۰۵ استفاده می‌شود در این تحقیق نیز از همین مقدار استفاده شده است. خلاصه‌ای از تحلیل آماری دسته درزه‌های برداشت شده در جدول ۲-۶ ارایه شده است.

جدول ۲-۶: خلاصه تحلیل آماری پارامترهای هندسی دسته‌درزه‌های برداشت شده

| طول اثر (متر) |         |         |                 |       | چگالی سطحی ( $P_{20}$ ) | جهت‌داری       |       |        |            |      |       | دسته درزه |
|---------------|---------|---------|-----------------|-------|-------------------------|----------------|-------|--------|------------|------|-------|-----------|
|               |         |         |                 |       |                         | جهت شیب (درجه) |       |        | شیب (درجه) |      |       |           |
| انحراف        | میانگین | پارامتر | پارامتر         | تابع  | انحراف                  | میانگین        | تابع  | انحراف | میانگین    | تابع |       |           |
| ۰/۵۷          | ۰/۷۲    | ----    | $\lambda$ ۱,۳۸۶ | نمایی | ۵/۱                     | ۱۸/۲۵          | ۱۷۳/۷ | نرمال  | ۶/۹۱       | ۷۹/۳ | نرمال | ۱         |
| ۰/۶۳          | ۰/۵۴    | ----    | $\lambda$ ۱,۵۸۳ | نمایی | ۴/۴۴                    | ۱۳/۹۲          | ۳۵۶/۴ | نرمال  | ۵/۶۶       | ۷۵/۵ | نرمال | ۲         |
| ۰/۷۸          | ۰/۶۷    | = ۰/۹۶  | - ۰/۹۲          | لاگ   | ۴/۲                     | ۱۷/۰۸          | ۲۱۸   | نرمال  | ۸/۳۷       | ۵۰/۸ | نرمال | ۳         |
| ۰/۳۷          | ۰/۴۹    | = ۰/۶۸  | - ۰/۹۵          | لاگ   | ۲/۶                     | ۱۰/۸           | ۳۱۲/۵ | نرمال  | ۱۱/۶       | ۵۵/۳ | نرمال | ۴         |

### ۲-۶-۳-۱- توزیع جهت‌داری

جهت یافتگی درزه‌ها شامل دو مولفه زاویه شیب و جهت شیب است. این دو مولفه در حالت مدل‌سازی سه بعدی به صورت مستقل و با توجه به تابع توزیع آماری خود تولید می‌شوند و در صورت وجود همبستگی بین آنها از توابع توزیع چند متغیره فیشر و بینگهام استفاده می‌شود. در حالت دو بعدی شیب ظاهری درزه در صفحه مورد نظر پیاده خواهد شد. از این رو تنها تغییرات شیب ظاهری برای مدل‌سازی مد نظر است. در تحقیق انجام شده دو دسته درزه‌ی اصلی با بیشترین فراوانی دارای

1 . null hypothesis (H0)

امتدادی تقریباً یکسان و جهت شیبی با اختلاف ۱۸۰ درجه‌ای هستند از اینرو صفحه مورد نظر برای ساخت مدل هندسی دو بعدی، صفحه‌ای با امتداد یکسان با این دو دسته درزه در نظر گرفته شده است. در جدول ۲-۶ مقادیر شیب و جهت شیب به همراه توابع توزیع آن‌ها ارایه شده است. به منظور تعیین توزیع جهت یافتگی از آزمون برازش اندرسون - دارلینگ (A-D) استفاده شده است.

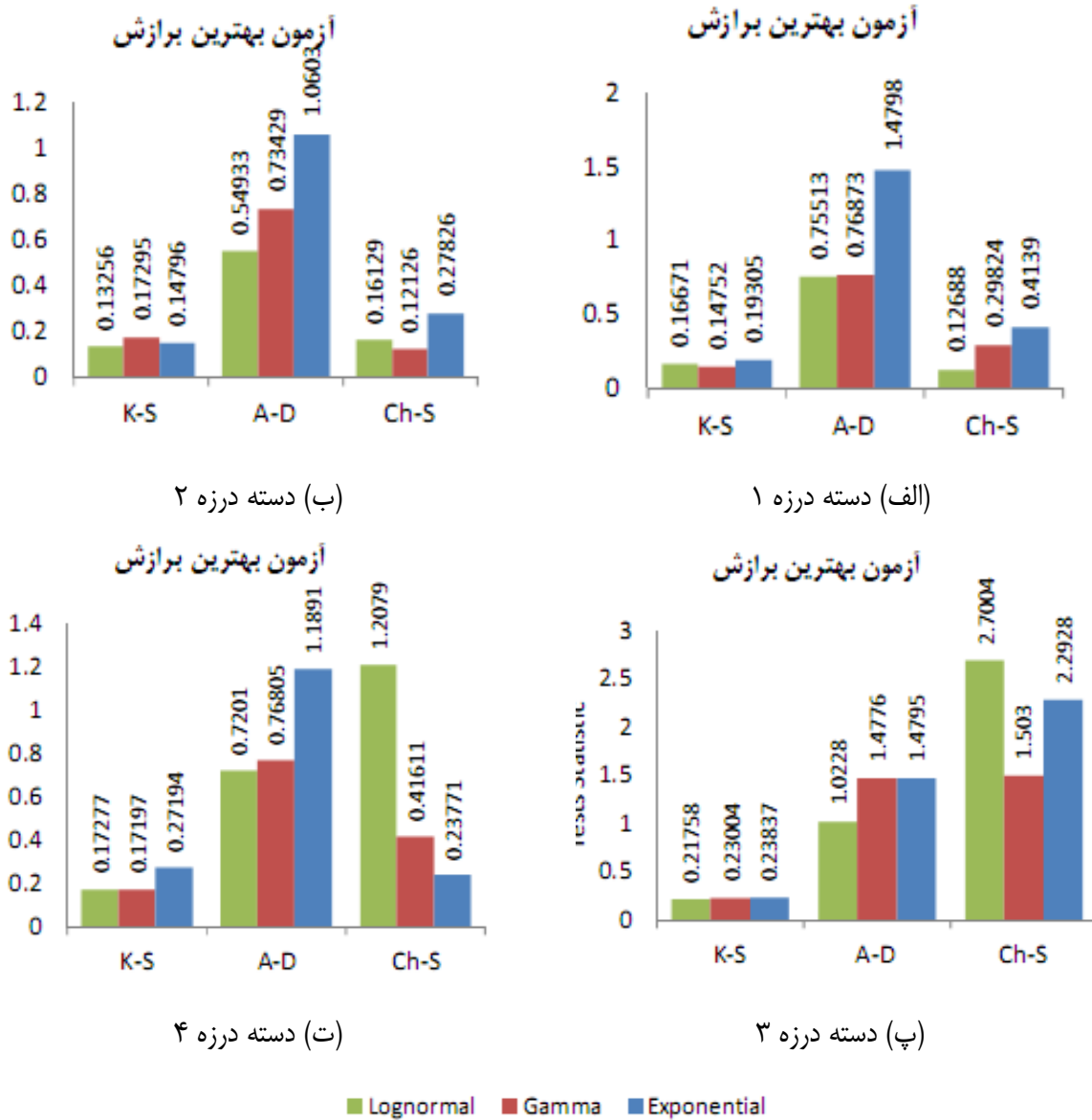
### ۲-۳-۲-۶- توزیع طول اثر (پایایی)

طول اثر درزه، ناشی از برخورد درزه با سطح رخنمون است. این طول بیانگر گسترش صفحه درزه و اندازه‌ی بلوک‌های سنگی است (Priest and Hudson, 1976). دانستن طول اثر ناپیوستگی‌ها از جهت تاثیر آن بر اندازه بلوک‌هایی که ممکن است تشکیل شوند، برای پیش‌بینی رفتار توده‌سنگ و میزان خردشوندگی برجای آن مهم است. متوسط، واریانس و توزیع طول اثر ناپیوستگی، اطلاعات مهمی برای هر دسته درزه محسوب می‌شوند که برای تهیه مدل هندسی تصادفی توده‌سنگ‌های درزه‌دار مورد نیاز هستند.

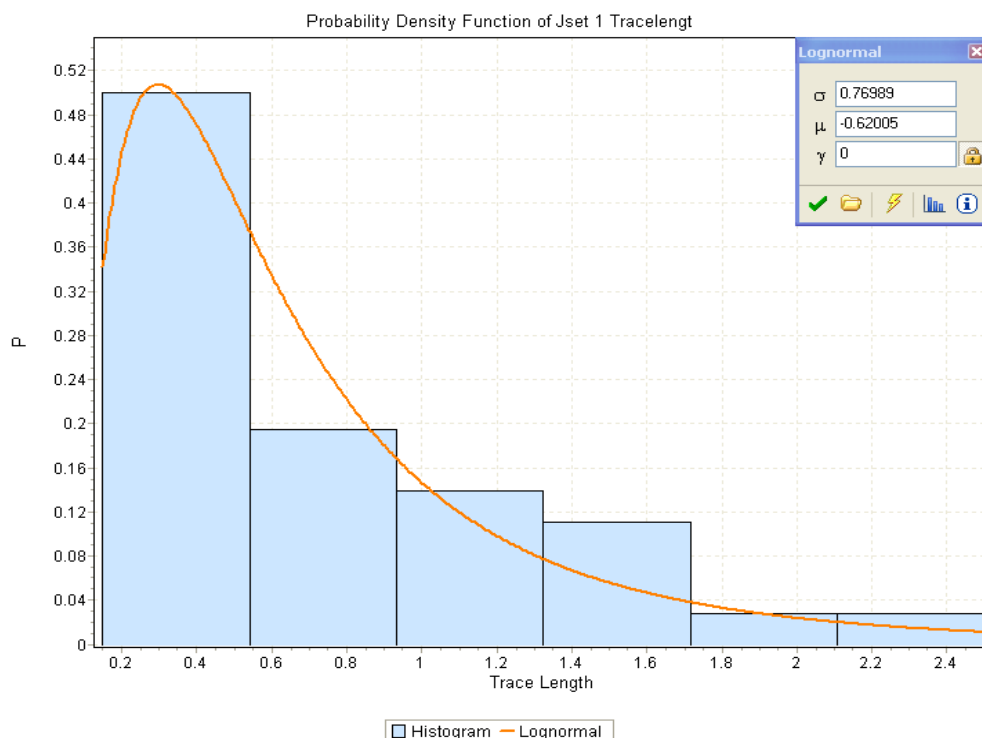
به دلیل اینکه برداشت مستقیم درزه‌ها در داخل توده سنگ در عمل غیرممکن است بنابراین فرض می‌شود که اندازه‌های سه‌بعدی درزه‌ها دارای ویژگی‌های آماری مشابه با نتایج بدست آمده از پیمایش‌های دوبعدی هستند (Priest, 1993). تاکنون بهترین برازش‌های پیشنهاد شده برای توزیع طول اثر درزه‌های حاصل از برداشت دوبعدی، توابع نمایی منفی (Kulatilake et al., 2003; (Priest, 1993; Zhang & Einstein, 2000; Baecher, 1983; Zadhesh et al., 2013) لاگ نرمال، Wu & Wang, 2002) و گاما (Priest, 1993; Zhang & Einstein, 2000) بوده است.

نتایج مقایسه‌ی آزمون‌های بهترین برازش شامل آزمون کولموگروف-اسمینوروف (K-S)، اندرسون - دارلینگ (A-D) و آزمون چی-اسکویر (Ch-S) برای طول درزه‌های برداشت شده در رخنمون‌های مورد مطالعه در شکل ۵-۶ نشان داده شده است.

به عنوان نمونه تابع توزیع برازش شده بر طول دسته درزه‌ی ۱ در شکل ۶-۶ نشان داده شده است. بر این اساس، مشخصات توابع توزیع هر دسته درزه در جدول ۶-۲ ارایه شده است.



شکل ۶-۵: نتایج مقایسه‌ی آزمون بهترین برازش بر طول اثر



شکل ۶-۶:ابع توزیع لاگ نرمال برازش شده بر طول اثر دسته درزه ۱ به همراه آماره‌های آن

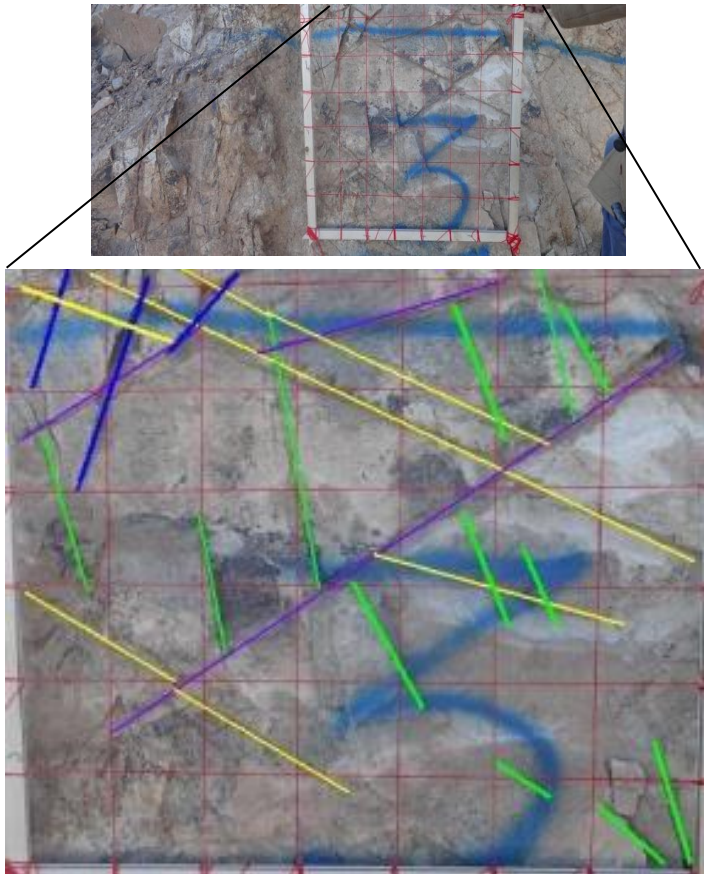
### ۶-۲-۳-۳- چگالی درزه‌داری

چگالی ناپیوستگی‌های سنگ در اصل تعداد ناپیوستگی‌ها بر واحد توده‌سنگ است که آن واحد، می‌تواند حجم، مساحت و یا طول باشد. عدم دسترسی سه بعدی به یک توده سنگ باعث خواهد شد اندازه‌گیری حجمی چگالی یا شدت درزه‌داری به صورت مستقیم، مشکل و غیر ممکن باشد. این در حالی است که اندازه‌گیری میدانی (مستقیم) این پارامترها به صورت یک بعدی (در طول خط برداشت و یا گمانه) و دو بعدی (در سطح دیواره‌ها، تونل‌ها و غیره) به سادگی قابل انجام است.

چگالی درزه‌داری دو بعدی ( $P_{20}$ )، به صورت تعداد کل درزه‌ها بر مساحت داده شده تعریف می‌شود. شدت درزه در دو بعد،  $P_{21}$ ، به عنوان طول کلی درزه در داخل مساحت داده شده تعریف می‌شود که مستقل از مقیاس است.  $P_{21}$ ، تعداد دسته درزه‌ها، پایایی درزه و تعداد درزه‌های موجود را در نظر می‌گیرد.

در این تحقیق با استفاده از روش برداشت پنجره مربعی درزه‌های قابل دیدن با استفاده از یک چهارچوب یک متر مربعی دارای شبکه مش بندی ۱۰ سانتی متر مربعی برداشت شده است یک نمونه

از برداشت در شکل ۶-۷ نشان داده شده است. درزه‌های متقاطع با هر خط مش اندازه‌گیری و تعداد کلی درزه‌های شمارش شده در چهارچوب یک متر مربعی به عنوان چگالی سطحی درزه تعریف شدند. مقادیر P<sub>20</sub> برای هر دسته درزه به صورت جداگانه محاسبه شده است. نتایج در جداول ۶-۲ و ۴-۴ ارائه شده است.



شکل ۶-۷: اندازه‌گیری چگالی درزه (P<sub>20</sub>)

### ۶-۳- ساخت مدل سه‌بعدی شدت درزه‌داری و شاخص کیفیت توده سنگ

#### به روش زمین آمار

با بهره‌مندی از روش پردازش تصویر، نگاره‌های لازم شامل، شدت درزه‌داری خطی (P<sub>10</sub>) و RQD در معدن مس کهنک برآورد شده است. در مرحله بعد با استفاده از روش‌های زمین آمار، این مولفه‌ها در فضای سه بعدی مدل بلوکی تخمین زده شده و در نهایت مقادیر P<sub>10</sub> برای افق‌های مختلف با استفاده از ضرایب انتقال به شدت درزه‌داری حجمی (P<sub>32</sub>) تبدیل شده است.

برای ساخت مدل فضایی از مولفه P10 و RQD بدست آمده به روش پردازش تصاویر از جعبه-های گمانه‌ها به شرح فصل سوم با نرم‌افزار تهیه شده<sup>۱</sup> DCP، از روش تخمین زمین آماری به‌وسیله‌ی نرم افزار Surpac-Gemcom استفاده شده است.

در زمین آمار علاوه بر مقدار یک کمیت معین در نمونه، موقعیت فضایی آن نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. بدین لحاظ می‌توان موقعیت فضایی نمونه‌ها را همراه با مقدار کمیت مورد نظر جامعه، مورد تحلیل قرار داد. به عبارت دیگر باید بتوان بین مقادیر مختلف یک کمیت در نمونه‌ها و جهت قرار-گیری نمونه‌ها نسبت به هم ارتباطی برقرار کرد. این ارتباط فضایی (فاصله‌ای و جهتی) بین مقدار یک کمیت در جامعه‌ی نمونه‌های برداشت شده در قالب‌های ریاضی قابل بیان است که به آنها ساختار فضایی گفته می‌شود (حسنی پاک، ع. ۱۳۸۰).

به منظور کم کردن خطای تخمین در برآورد مقدار P<sub>32</sub>، مقدار P<sub>10</sub> که به‌طور مستقیم از پردازش تصویر بدست آمده است بدون تبدیل به مولفه P<sub>32</sub>، برآورد می‌شود و سپس P<sub>32</sub> معادل آن با استفاده از روابط تحلیلی برای هر بلوک و یا متوسط هر تراز ارتفاعی محاسبه گردیده است. این روش باعث کم شدن خطا در تخمین خواهد شد.

### ۶-۳-۱ - مراحل ساخت مدل

برای ساخت مدل مراحل زیر در نظر گرفته شده است:

- ایجاد پایگاه داده براساس اطلاعات بدست آمده
- منظم سازی و تهیه فایل های ترکیبی
- تحلیل آماری داده‌ها و نرمال سازی آنها
- پراش‌نگاری<sup>۱</sup> (شامل: محاسبه پراش‌نمای<sup>۲</sup> تجربی، برازش پراش‌نمای نظری و تعیین ناهمسانگردی، تعیین پارامترهای تخمین، و اعتباریابی تخمین)

- ساخت مدل بلوکی خام

- تخصیص مولفه‌های تخمین به مدل بلوکی و تخمین سه بعدی

تمامی مراحل ساخت مدل سه بعدی برای هر دو مولفه‌ی  $P_{10}$  و RQD یکسان است. در این بخش به دلیل رعایت اختصار و واضح بودن شکل‌ها تنها موارد مربوط به  $P_{10}$  ارائه شده است و در پایان تصاویر مربوط به مدل بلوکی تخمین هر دو مولفه به منظور مقایسه‌ی خردشدگی و نتایج بدست آمده نمایش داده شده است.

اولین مرحله در مدل‌سازی بلوکی، بارگذاری داده‌های حاصل از پردازش تصویر به قواره‌ی پایگاه داده نرم افزار مدل‌سازی و سپس منظم سازی و ایجاد فایل ترکیبی<sup>۳</sup> است.

### ۶-۳-۲- ایجاد بانک اطلاعاتی گمانه‌ها

داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی و تخمین، شامل اطلاعات نگاره‌های ثبت شده از گمانه‌های اکتشافی است. روش نگاره‌سازی همان‌گونه که قبلاً توضیح داده شد، بر اساس پردازش تصویر و روش چشمی برای ۸ گمانه انجام شده است. پرونده‌های اولیه شامل جداول Assay، Collar و Survey است که به ترتیب با عناوین Assay.csv، Collar.csv و Survey.csv ذخیره شده و اطلاعات آن‌ها در جدول ۶-۳ ارائه شده است. در این مرحله با توجه به نگاره‌های گمانه‌ها، کلیه‌ی جداول اطلاعات تصاویر جعبه‌های مغزه مورد بررسی قرار گرفته است. این نگاره‌ها شامل اطلاعات مربوط به مختصات، عمق گمانه و داده‌های آنالیز تصویری نمونه‌ها است.

---

1- Variograophy  
2 -Variogram.  
3 - Composite file

جدول ۳-۶: ساختار پرونده‌های ایجاد شده در بانک اطلاعاتی

| مشخصات           |                |             |                 |                |       | نام فایل |
|------------------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------|----------|
| D <sub>2</sub>   | D <sub>1</sub> | To          | From            | Hole.Id        | نماد  | Assay    |
| مربوط به P10     | مربوط به RQD   | نقطه پایان  | نقطه شروع نمونه | شماره هر گمانه | توصیف |          |
| Max              | Z              | X           | Y               | Hole.Id        | نماد  | Collar   |
| حداکثر عمق گمانه | ارتفاع مطلق سر | مختصات شرقی | مختصات شمالی    | شماره هر گمانه | توصیف |          |
|                  | Azimut         | Dip         | Depth           | Hole.Id        | نماد  | Survey   |
|                  | آزیموت         | شیب گمانه   | عمق گمانه       | شماره هر گمانه | توصیف |          |

### ۳-۳-۶ - منظم‌سازی و تهیه پرونده‌های ترکیبی

پرونده‌های ترکیبی حاوی زوج نمونه‌ها با فواصل منظم هستند. این فاصله با استفاده از تحلیل آماری فواصل متوسط موجود در جعبه مغزه‌ها ۴/۵ متر با همپوشانی ۱۰ درصدی نسبت به هم انتخاب شده است (بر این اساس هر ۴/۵ تا ۵ متر را می‌توان به عنوان واحد نمونه‌گیری در نظر گرفت).

پس از ترکیب داده‌های گمانه‌ها در فاصله به دست آمده، در شکل ۶-۸ تغییرات P<sub>10</sub> در طول گمانه‌ها پس از ساخت پرونده ترکیبی نشان داده شده است. تغییرات شعاع و رنگ دیسک‌ها نمایانگر تغییر در مقدار عددی P<sub>10</sub> است. برای کنترل نحوه ساخت فایل ترکیبی و به دست آوردن یک دید اولیه در مورد تغییرات مولفه مورد نظر نسبت به عمق می‌توان از این نمودار استفاده نمود.

پس از آماده‌سازی داده‌ها، اولین قدم بررسی آماری داده‌های خام است. برای این منظور شناخت آماره‌های جامعه شامل میانگین<sup>۱</sup>، پراش<sup>۲</sup>، ضریب تغییرات<sup>۳</sup> و به خصوص چولگی<sup>۴</sup> که دلالت بر نرمال بودن و یا غیرنرمال بودن تابع توزیع دارد، مفید خواهد بود.

1 -Mean  
 2 -Variance  
 3 -Coefficient of Variation  
 4 -Skewness



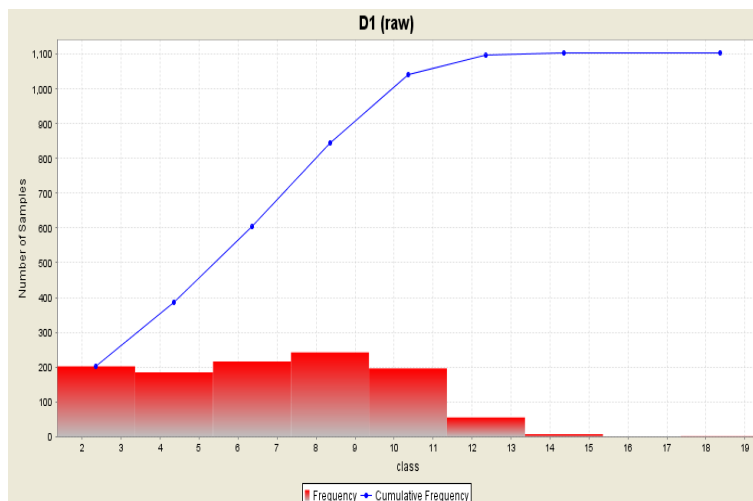


شکل ۶-۸: نمودار دیسکی تغییرات مقادیر  $P_{10}$

در بین همه عوامل فوق شکل تابع توزیع (شکل ۶-۹) و میزان انحراف تابع توزیع از حالت نرمال و امکان تبدیل داده‌ها به توزیع نرمال در تخمین از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است. زیرا اعتبار زمین آمار و تخمین کریجینگ<sup>۱</sup> به نرمال بودن داده‌های اولیه و یا نرمال سازی آنها است. به طوری که در شرایط غیر نرمال بخش دارای مقادیر کمتر تابع توزیع، زیاده‌تر و بخش دارای مقادیر بیشتر آن، کمتر تخمین زده می‌شود.

شناخت جامعه داده‌های مورد بررسی از نظر اینکه آیا می‌توان آنها را به عنوان یک جامعه یا محدوده<sup>۲</sup> به کاربرد و یا این که داده‌ها با توزیع آماری چند نمایی<sup>۳</sup> ظاهر می‌شوند حایز اهمیت فراوان است

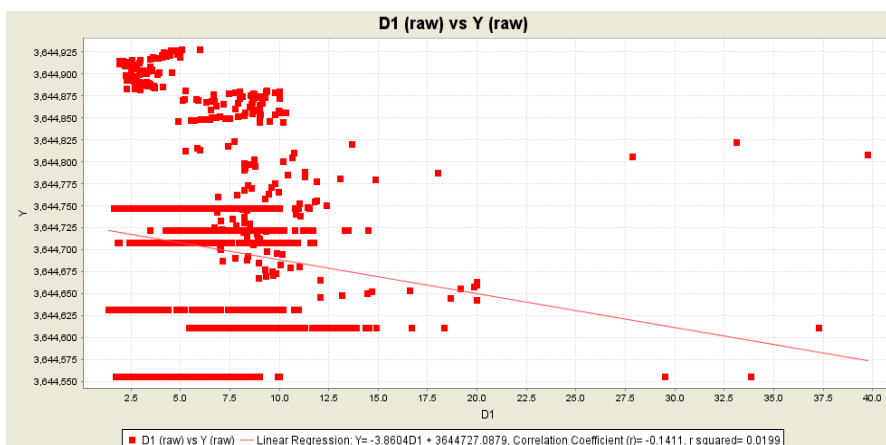
1- Kriging  
2 -Domain  
3 -Polymodal Distribution.



شکل ۹-۶: هیستوگرام داده‌های  $P_{10}$

### ۱-۳-۳-۶- تفکیک و تعیین مناطق همگون

منظور از مناطق همگون آماری، مناطقی هستند که خصوصیات یکسانی داشته و واریانس کوچکی داشته باشند. هدف از این عمل تعیین جمعیت‌هایی است که میانگین در آنها تقریباً ثابت بوده نماینده منطقه باشند و واریانس آنها نیز حداقل باشد. در واقع در آنها روند<sup>۱</sup> و یا جابه‌جایی شدیدی وجود نداشته باشد. بررسی و شناخت روند از روش‌های مختلف امکان پذیر است. یکی از این روش‌ها ترسیم تغییرات داده‌ها است. به عنوان نمونه در شکل ۶-۱۰ تغییرات مولفه  $P_{10}$  نسبت به تغییرات  $Y$  ترسیم شده که نشان دهنده‌ی عدم وجود روند خاص در محدوده مورد مطالعه است.

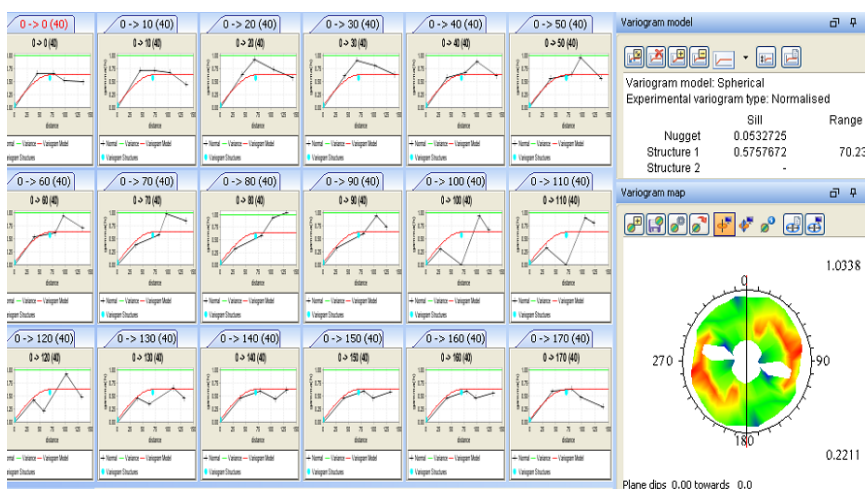


شکل ۱۰-۶: تغییرات مولفه  $p_{10}$  نسبت به تغییرات عرض جغرافیایی (مولفه  $D1$  نشانگر  $P_{10}$  است)

### ۴-۳-۶- ترسیم و تحلیل پراش نما (پراش نگاری)

هر مولفه دارای مدل پراش نمای منحصر به فردی است که پارامترهای آن به طور دقیق دست یافتنی نیست، اما تا حدودی می توان به آن نزدیک شد. با رسم پراش نما در جهات مختلف می توان ناهمسانگردی را در صورت وجود، مشخص و پارامترهای آن را به دست آورد. ترسیم و تحلیل پراش نما برای پی بردن به ساختار فضایی و بدست آوردن شعاع تأثیر الزامی است. با توجه به این که ممکن است به دلیل ژنز خاص، ناهمسانگردی در داده ها مشاهده شود و شعاع تأثیر در جهات مختلف تغییر کند بررسی ناهمسانگردی در منطقه نیز نیاز است.

برای مدل سازی پراش نما، از داده های اولیه  $P_{10}$  که بر اساس هیستوگرام ترسیمی و مولفه های آماری آن، می توان آنرا تقریباً نرمال فرض نمود، استفاده گردیده است. بر اساس داده های فایل ترکیبی تهیه شده از بانک اطلاعاتی چاه های اکتشافی، عملیات محاسبه پراش نمای تجربی برای  $P_{10}$  در جهات مختلف با اختلاف زاویه ی ۱۰ درجه ترسیم شده و خوش منظرترین پراش نما بدست آمده است (شکل ۶-۱۱). با برازش مدل های مختلف پراش نمای تعریف شده بهترین برازش مربوط به مدل کروی<sup>۱</sup> بوده که با تنظیم این مدل و انطباق آن با بهترین پراش نمای تجربی که از قبل مشخص شده بود مدل پراش نما در جهت اصلی تعیین گردیده است.

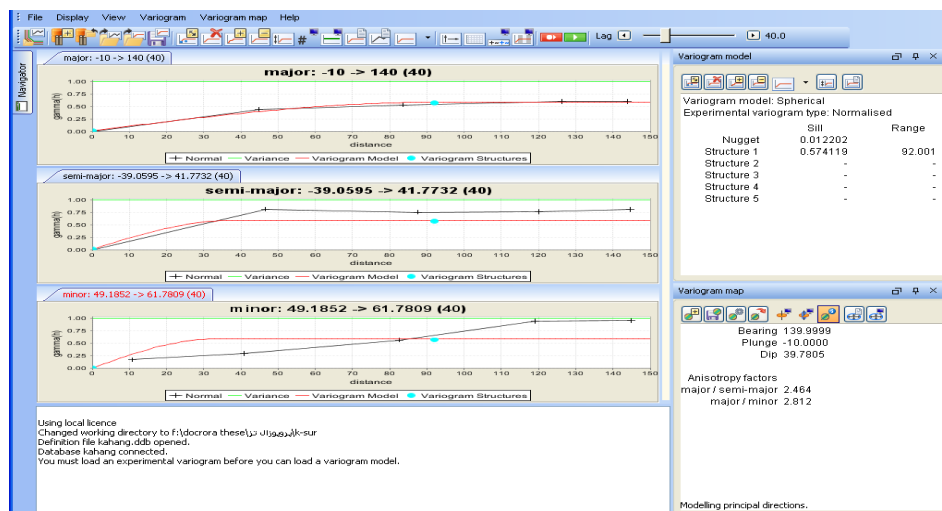


شکل ۶-۱۱: پراش نمای مولفه  $P_{10}$  در جهات مختلف

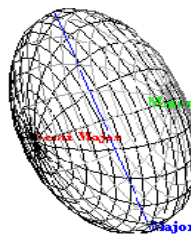
1 -Spherical.

## الف- ناهمسانگردی ارتباط فضایی در داده‌های $P_{10}$

ناهمسانگردی در پراش نماها معمولاً شامل تغییرات در شعاع تاثیر و حد آستانه است که در نرم‌افزارهای مدل‌سازی زمین آماری معمولاً نوع اول یعنی ناهمسانگردی هندسی محاسبه و در مدل وارد می‌شود. در شکل ۶-۱۲ پراش‌نمای  $P_{10}$  در راستای سه محور اصلی، نیمه اصلی و کوچک نشان داده شده است. با توجه به مقدار ضرایب ناهمسانگردی، توده سنگ از نظر تغییرات  $P_{10}$  یک توده ناهمسانگرد محسوب می‌شود. چراکه این ضرایب که از حاصل تقسیم شعاع‌های تاثیر در راستای محورهای سه گانه ذکر شده به دست می‌آیند، یکسان نیستند. در شکل ۶-۱۳ بیضوی مربوط نشان داده شده است. همچنین در جدول ۶-۴ مشخصات پراش‌نما و بیضوی ناهمسانگردی  $P_{10}$  دیده می‌شود.



شکل ۶-۱۲: پراش‌نمای مولفه  $P_{10}$  در راستای محور اصلی، نیمه اصلی و کوچک



شکل ۶-۱۳: بیضوی ناهمسانگردی ارتباط فضایی مولفه  $P_{10}$

جدول ۴-۶: مشخصات پراش نما و بیضوی ناهمسانگردی P<sub>10</sub>

| پراش نما          | نماد | آزیموت | شیب | زاویه جستجو | اثر قطعه ای | سقف  | شعاع تأثیر |
|-------------------|------|--------|-----|-------------|-------------|------|------------|
| جهت اصلی          | Ma   | ۱۴۰    | -۱۰ | ۴۰          | ۰٫۰۱۲       | ۰٫۵۷ | ۹۲         |
| کمترین شعاع تأثیر | Mi   | ۴۲     | -۴۰ | ۴۰          | ۰٫۰۱۲       | ۰٫۵۷ | ۳۸٫۳       |
| شعاع تأثیر متوسط  | Sm   | ۶۲     | ۵۰  | ۴۰          | ۰٫۰۱۲       | ۰٫۵۷ | ۳۲٫۸       |

ضرایب ناهمسانگردی پراش نما با استفاده از روابط زیر محاسبه می گردد.

$$k_1 = \frac{Ma}{Sm} \quad (۷-۶)$$

$$k_2 = \frac{Ma}{Mi} \quad (۸-۶)$$

که در آن ضرایب K1 و K2 به ترتیب برابر 2.46 و 2.81 است (ضرایب ناهمسانگردی به این معناست که برای مثال تغییرپذیری مقادیر P<sub>10</sub> در راستای محور متوسط ۲/۴۶ برابر تغییرپذیری در راستای محور اصلی است).

#### ب- اعتبارسنجی پراش نمای P<sub>10</sub>

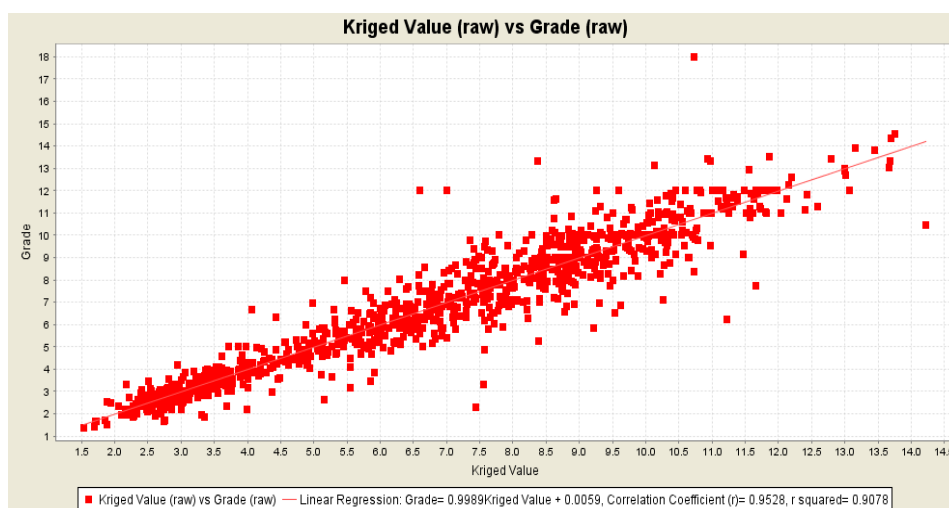
از بین روش های مختلف اعتبارسنجی پراش نما مانند روش انتگرال پراش نما، کمترین مربعات وزنی و روش کریجینگ جک نایف، روش کریجینگ جک نایف به دلیل در دسترس بودن در نرم افزار surpac مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش یکی از نقاط معلوم حذف و به روش کریجینگ تخمین زده می شود و این عمل برای تمام نقاط معلوم تکرار می شود و در نهایت خطای تخمین و واقعیت به صورت جامعه آماری خطاها مورد بررسی قرار می گیرد.

بر اساس روش جک نایف، درصد اختلاف واریانس خطاها<sup>۱</sup> با واریانس تخمین<sup>۲</sup> نسبت به واریانس خطاها (که بر اساس رابطه ۳-۶ محاسبه می شود)، باید کمتر از ۱۵ درصد باشد. این مقدار برای مولفه P10 برابر ۱۰/۰۶ درصد به دست آمده است که کمتر از حد مجاز آن است.

$$\frac{V - \text{AVG KRIG VAR}}{\text{AVG KRIG VAR}} \leq 15 \quad (9-6)$$

شکل ۶-۱۴ ضریب همبستگی بین نقاط تخمین زده شده با داده های واقعی را نشان می دهد که بالای ۹۵ درصد است

همچنین ۹۶/۵۱ درصد از خطاها در محدوده به اضافه و منهای دو برابر انحراف معیار خطاها قرار دارد و به معنای این است که هیستوگرام خطاها نرمال است، بنابراین واریوگرام مدل سازی شده از اعتبار لازم برخوردار است.



شکل ۶-۱۴: مقایسه مقادیر تخمین زده شده با داده های واقعی (ضریب همبستگی بالای ۹۵ درصد)

تمامی موارد ذکر شده برای مولفه RQD نیز تکرار شده است در مورد مولفه RQD نیز خطای تخمین بسیار پایین و انطباق با واقعیت موجود حدود ۹۷ درصد است. کلیه مراحل که در بخش های قبلی انجام شد، لازمه تخمین توسط روش زمین آماری کریجینگ است.

1 -Average Kriging Variance.  
2 -Variance

### ۶-۳-۵- ساخت مدل بلوکی تخمین

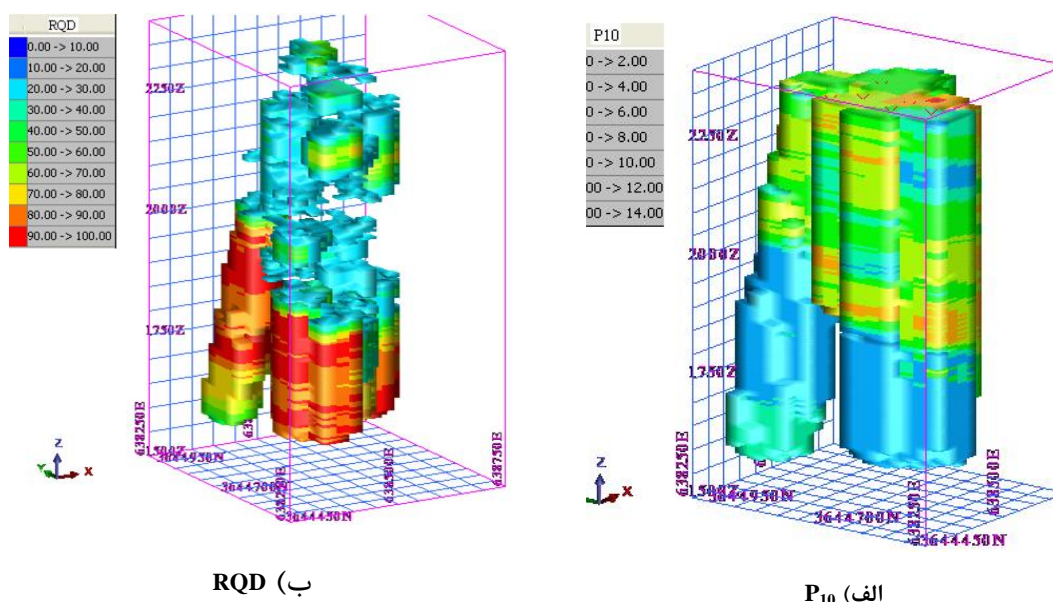
یک مدل بلوکی از مجموعه‌ای از بلوک‌ها با ابعاد مشخص تشکیل شده و نقطه وسط هر بلوک به عنوان محل ذخیره خصوصیات این بلوک در نظر گرفته می‌شود. این خصوصیات می‌تواند شامل مقدار مولفه مورد نظر، وزن مخصوص، مقدار تخمین زده شده از مولفه‌ی مورد محاسبه و خطای تخمین باشد. یک مدل بلوکی تابع ابعاد بلوک‌ها و موقعیت محدوده است. برای معدن کهنک با توجه به ابعاد مدل‌سازی ژئومکانیکی، ابعاد بلوک  $5 \times 30 \times 30$  (متر مکعب) در نظر گرفته شده است.

در جدول ۵-۶ مشخصات هندسی بلوک خام معدن کهنک ارائه شده است.

جدول ۵-۶: مشخصات هندسی مدل بلوکی خام معدن

| مختصات | ابعاد بلوک فرعی | ابعاد بلوک اصلی | بیشینه  | کمینه   |
|--------|-----------------|-----------------|---------|---------|
| X      | ۱۵              | ۳۰              | ۳۶۴۴۹۸۰ | ۳۶۴۴۵۰۰ |
| Y      | ۱۵              | ۳۰              | ۶۳۸۶۵۰  | ۶۳۸۳۰۰  |
| Z      | ۲.۵             | ۵               | ۲۳۵۰    | ۱۵۳۰    |

نتایج تخمین پارامترهای  $P_{10}$  و RQD روی مدل بلوکی در شکل ۶-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۵: نتایج تخمین زمین آماری در حجم توده سنگ

همانگونه که انتظار می‌رود تغییرات مقادیر  $P_{10}$  و RQD با یکدیگر همخوانی خوبی نشان داده است. نکته‌ی قابل توجه تغییر ناگهانی در افزایش شاخص کیفیت توده سنگ و همچنین کاهش

چگالی درزه‌داری از تراز ۲۰۰۰ متری به پایین است. که نشان دهنده‌ی وجود سنگی خوب تا خیلی خوب و با خردشدگی کم است. شرایط توده سنگ با استفاده از گمانه‌های اکتشافی و مدل‌سازی سه-بعدی انجام شده، نشان می‌دهد که از سطح زمین (حدود تراز ۲۳۴۰ متر از سطح دریا) تا تراز حدود ۲۰۰۰ متر، سنگ در رده کیفیت ضعیف تا بسیار ضعیف قرار می‌گیرد اما از این تراز به پایین، با یک مرز مشخص که بر طبق شواهد تصاویر مغزه‌های حفاری، یک گسل است، کیفیت توده سنگ به رده سنگ خوب تبدیل می‌گردد. متوسط مقادیر  $P_{32}$  و  $P_{10}$  در ترازهای ارتفاعی ۲۰ متری مطابق جدول ۶-۶ از عمق ۷۰۰ متری (تراز ۱۶۳۰ متر) تا سطح زمین (تراز ۲۳۳۰ متر) ارایه شده است. ستون آخر مربوط به مقادیر  $P_{32}$  است که با استفاده از رابطه وانگ (فصل چهارم) محاسبه و به جدول اضافه شده است. محاسبه  $P_{32}$  با استفاده از ضریب تبدیل C13 انجام شده است. در تعیین ضریب تبدیل، مقدار ثابت فیشر بین ۲۰ تا ۵۰ و مقدار زاویه  $\rho$ ، ۱۰ درجه در نظر گرفته شده است. بازه‌ی انتخاب شده برای ثابت فیشر حاصل تحلیل استریوگرافیک درزه‌های برداشت شده از ترانشه‌ها است و با توجه به این که دو دسته درزه‌ی ۱ و ۲ برداشت شده که بیشترین فراوانی را دارند دارای شیبی نزدیک به ۸۰ درجه هستند و خط برداشت افقی بوده است، لذا مقدار زاویه‌ی  $\rho$ ، ۱۰ درجه در نظر گرفته شده است. شایان توجه است که مقادیر  $P_{32}$  حاصل شده، خوش‌بینانه و در حد بالای ممکن بوده و با فرض پایایی کامل تمامی درزه‌ها در ابعاد بلوک‌های تعریف شده است.

#### ۴-۶- برآورد قابلیت تخریب براساس مقدار شدت درزه‌داری حجمی

راجرز<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۴ در مطالعات خود روشی را برای برآورد پتانسیل بلوکی شدن توده سنگ با استفاده از شدت درزه‌داری حجمی ارایه داده است (Rogers et al, 2014). او با استفاده از مدل-سازی هندسی ناپیوستگی‌ها با روش شبکه ناپیوستگی‌های گسسته<sup>۲</sup> (DFN) و تکرار آن با مقادیر  $P_{32}$  متفاوت به این نتیجه رسید که برای مقادیر پایین  $P_{32}$  (به عنوان نمونه کمتر از  $2 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) توده سنگ،

1 -Rogers

2 -Discrete Fracture Network

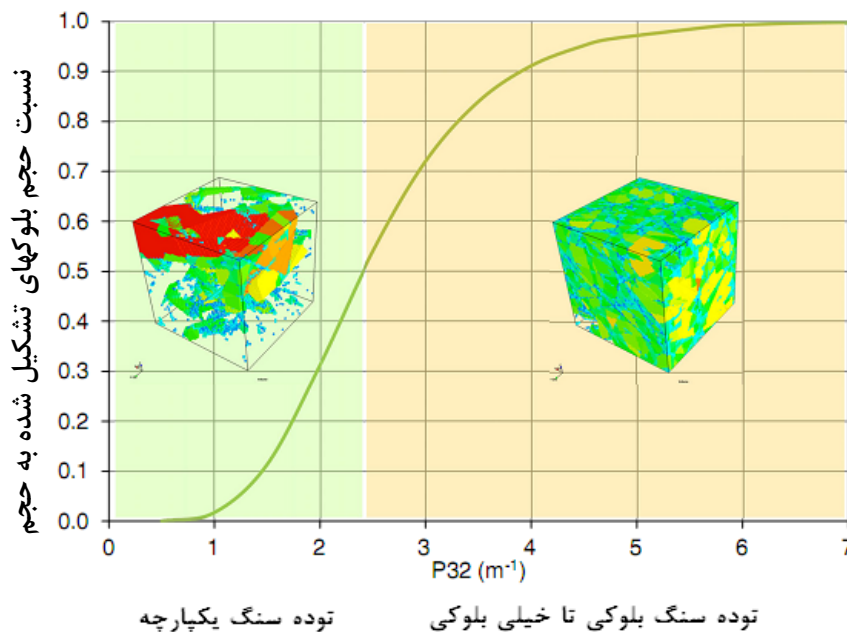


یکپارچه و غیربلوکی است. در این حالت مقاومت توده سنگ متاثر از خواص پل‌های سنگی موجود در آن است. در طرف مقابل برای مقادیر بالای  $P_{32}$  (به عنوان نمونه بیشتر از  $4.5 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) توده سنگ، بلوکی و یا شدیداً بلوکی و دارای بلوک‌هایی مشخص و با قابلیت جابجایی خواهد بود. در این حالت خواص توده سنگ متاثر از خواص درزه‌هاست. در شکل ۶-۱۶ نمایی از تحقیق انجام شده توسط راجرز نشان داده شده است.

جدول ۶-۶: مقادیر میانگین شدت درزه‌داری خطی ( $P_{10}$ ) و شدت درزه‌داری حجمی ( $P_{32}$ ) در ترازهای ارتفاعی مختلف

| ردیف | ارتفاع                                  |   | از   | تا   |
|------|---|---|------|------|
|      | میانگین $P_{10}$<br>( $\text{m}^{-1}$ ) | میانگین $P_{32}$<br>( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ) |      |      |
| ۱    | ۱۶                                      | ۱۶۸۰  | ۱/۰۴ | ۱/۶۳ |
| ۲    | ۱۶                                      | ۱۶۷۰  | ۱/۱۳ | ۱/۷۷ |
| ۳    | ۱۶                                      | ۱۶۹۰  | ۱/۱۷ | ۱/۸۳ |
| ۴    | ۱۶۹۰                                    | ۱۷۱۰  | ۱/۱۶ | ۱/۸۲ |
| ۵    | ۱۷                                      | ۱۷۳۰  | ۱/۳۸ | ۲/۱۶ |
| ۶    | ۱۷                                      | ۱۷۵۰  | ۱/۵۵ | ۲/۴۳ |
| ۷    | ۱۷                                      | ۱۷۷۰  | ۱/۶  | ۲/۵۱ |
| ۸    | ۱۷                                      | ۱۷۹۰  | ۱/۶۴ | ۲/۵۷ |
| ۹    | ۱۷                                      | ۱۸۱۰  | ۱/۷۸ | ۲/۷۹ |
| ۱۰   | ۱۸                                      | ۱۸۳۰  | ۲/۰۳ | ۳/۱۸ |
| ۱۱   | ۱۸                                      | ۱۸۵۰  | ۲/۱۳ | ۳/۳۴ |
| ۱۲   | ۱۸                                      | ۱۸۷۰  | ۲/۲۸ | ۳/۵۷ |
| ۱۳   | ۱۸                                      | ۱۸۹۰  | ۲/۶۹ | ۴/۲۲ |
| ۱۴   | ۱۸                                      | ۱۹۱۰  | ۳/۳۸ | ۵/۳  |
| ۱۵   | ۱۹                                      | ۱۹۳۰  | ۳/۹  | ۶/۱۱ |
| ۱۶   | ۱۹                                      | ۱۹۵۰  | ۳/۹۸ | ۶/۲۴ |
| ۱۷   | ۱۹                                      | ۱۹۷۰  | ۳/۸۲ | ۵/۹۹ |
| ۱۸   | ۱۹                                      | ۱۹۹۰  | ۳/۷۳ | ۵/۸۵ |
| ۱۹   | ۱۹                                      | ۲۰۱۰  | ۳/۶۷ | ۵/۷۵ |
| ۲۰   | ۲۰                                      | ۲۰۳۰  | ۳/۷  | ۵/۸  |
| ۲۱   | ۲۰                                      | ۲۰۵۰  | ۳/۶۶ | ۵/۷۴ |
| ۲۲   | ۲۰                                      | ۲۰۷۰  | ۳/۵۱ | ۵/۵  |
| ۲۳   | ۲۰                                      | ۲۰۹۰  | ۳/۴۲ | ۵/۳۶ |
| ۲۴   | ۲۰                                      | ۲۱۱۰  | ۳/۲۶ | ۵/۱۱ |
| ۲۵   | ۲۱                                      | ۲۱۳۰  | ۳/۲۹ | ۵/۱۶ |
| ۲۶   | ۲۱                                      | ۲۱۵۰  | ۳/۵  | ۵/۴۹ |
| ۲۷   | ۲۱                                      | ۲۱۷۰  | ۳/۶۴ | ۵/۷۱ |
| ۲۸   | ۲۱                                      | ۲۱۹۰  | ۳/۶۳ | ۵/۶۹ |
| ۲۹   | ۲۱                                      | ۲۲۱۰  | ۳/۵۲ | ۵/۵۲ |
| ۳۰   | ۲۲                                      | ۲۲۳۰  | ۳/۶۱ | ۵/۶۶ |
| ۳۱   | ۲۲                                      | ۲۲۵۰  | ۳/۷۸ | ۵/۹۳ |
| ۳۲   | ۲۲                                      | ۲۲۷۰  | ۳/۸۸ | ۶/۰۸ |
| ۳۳   | ۲۲                                      | ۲۲۹۰  | ۴    | ۶/۲۷ |
| ۳۴   | ۲۲                                      | ۲۳۱۰  | ۴/۰۳ | ۶/۳۲ |
| ۳۵   | ۲۳                                      | ۲۳۳۰  | ۳/۷۵ | ۵/۸۸ |
| ۳۶   | ۲۳                                      | ۲۳۵۰  | ۳/۳۶ | ۵/۲۷ |
|      |   | میانگین کل                                      | ۲/۶۸ | ۴/۲۰ |

از نمودار ارایه شده در شکل ۱۶-۶ مشخص است که مرحله گذار از توده سنگ یکپارچه به توده سنگ بلوکی در مقادیر شدت درزه‌داری حجمی بین  $2 \text{ m}^2/\text{m}^3$  تا  $3 \text{ m}^2/\text{m}^3$  رخ می‌دهد.



شکل ۱۶-۶: پتانسیل تشکیل بلوک در یک توده سنگ به عنوان تابعی از  $P_{32}$  (Rogers. et al, 2014)

با توجه به نتایج بدست آمده از تهیه نگاره‌های توده سنگ معدن و تخمین زمین آماری شدت درزه‌داری حجمی، می‌توان گفت به‌طور متوسط در بین ترازهای ۴۰۰ تا ۷۰۰ متری از سطح زمین که عمده ذخیره‌ی کانسار موجود واقع شده، توده سنگ دارای خردشدگی برجای کم و پتانسیل پایینی برای تشکیل بلوک‌های قابل حرکت خواهد بود و به عبارت دیگر پتانسیل تخریب‌پذیری کمی را خواهد داشت. ولی برای هر بلوک تخمین زده شده در این محدوده به‌صورت مجزا شرایط خردشدگی ممکن است تا حدی متفاوت باشد.

مقدار میانگین  $P_{32}$  از عمق ۵۰۰ تا ۷۰۰ متری سطح زمین  $2/37$  بدست آمده است. با توجه به اینکه این عدد در خوشبینانه‌ترین حالت محاسبه (نامحدود بودن درزه‌ها)، بدست آمده و براساس منحنی شکل ۱۶-۶ تقریباً مرز بین توده سنگ یکپارچه و توده سنگ بلوکی و خردشده است، لذا در

طراحی روش‌های تخریبی باید ملاحظات لازم برای این مساله در نظر گرفته شود. میانگین کلی بدست آمده از P32 برای مدلی به عمق ۷۰۰ متر ۴/۲ است.

## ۶-۵- تحلیل خردشدگی برجا

آنچه در این بخش مورد نظر است، تعیین میزان خردشدگی و ابعاد بلوک‌های برجای تشکیل شده از شبکه درزه‌های موجود است. همان‌گونه که اشاره شد این بخش می‌تواند به عنوان یکی از مولفه‌های اولیه و اصلی امکان‌سنجی تخریب‌پذیری توده سنگ یا کانسار باشد. برای این منظور نرم-افزار تهیه شده برای مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی گسسته باید دارای قابلیت ساخت انواع مدل‌های درزه‌داری (سلسله مراتبی، پایا و ناپایا) با انواع توزیع‌های آماری مختلف به همراه امکانات اعتبارسنجی لازم برای مدل‌های ساخته شده باشد، و نیز قابلیت تشکیل بلوک‌های کامل حاصل از برخورد درزه‌ها و تعیین ابعاد آن‌ها به همراه امکان رسم توابع توزیع آماری را داشته باشد.

به منظور بررسی خردشدگی برجای توده‌سنگ درزه‌دار، ابتدا با استفاده از برداشت‌های سطحی انجام شده در معدن مس کهنک و برآورد ویژگی‌های آماری دسته درزه‌های موجود در این منطقه، مدل هندسی - تصادفی دو بعدی شبکه درزه‌ها با استفاده از نرم افزار  $CAV-DFN^{2D}$  تهیه شده است. مدل هندسی تهیه شده از لحاظ آماری تطابق خوبی با توده‌سنگ واقعی منطقه نشان داده است. سپس اندازه مدل معرف ( $REV^1$ ) به منظور تعیین خردشدگی برجا محاسبه شده است.

## ۶-۵-۱- ساخت مدل شبکه ناپیوستگی گسسته

برای ساخت مدل شبکه درزه‌ها به منظور تخمین خردشوندگی، اولین مرحله تعیین ابعاد مناسب مدل است. حد بیشینه ابعاد مدل به صورت تئوری ابعاد کل منطقه‌ای است که دارای شرایط درزه‌داری کاملاً مشابه با آنچه که برداشت شده است، باشد و کمینه این ابعاد باید به‌گونه‌ای تعریف

شود که نماینده توده سنگ مورد مطالعه باشد. در واقع باید مفهوم حجم نماینده پایه<sup>1</sup> (REV) در مورد ابعاد انتخاب شده صدق کند. همچنین مدل ساخته شده باید در مقایسه با واقعیت موجود و برداشت شده اعتبار کافی را داشته باشد.

به این منظور با توجه به طول درزه‌های برداشت شده مدل‌هایی با ابعاد  $5 \times 5$ ،  $10 \times 10$ ،  $15 \times 15$  و  $20 \times 20$  هر کدام ۶۰ مرتبه ساخته شد، یک نمونه از مدل ساخته شده به ابعاد  $20 \times 20$  در فصل قبل در شکل‌های ۴-۸ و ۴-۹ به تفکیک دسته درزه‌ها و به صورت کلی نشان داده شده است. در مرحله‌ی بعد با تعریف خطوط برداشت (نمونه‌گیری) افقی و قائم به فواصل یک متری داخل مدل‌ها، مقادیر چگالی درزه‌داری خطی ( $P_{10}$ ) برای هر خط برداشت تعیین شده است. سپس مقادیر میانگین آن در هر یک از این دو راستا برای هر مدل محاسبه شده است. در نهایت مقادیر تابع توزیع به همراه آماره‌های مرتبه اول و دوم آن (میانگین و انحراف استاندارد) برای هر یک از ابعاد برآورد شده است.

در مورد چگالی درزه‌داری سطحی ( $P_{20}$ ) نیز این فرآیند برای کل دسته‌دازه‌های هر مدل و به تفکیک هر دسته درزه تکرار شده است. تا آماره‌های مورد نیاز جهت مقایسه‌ی مدل‌ها با ابعاد متفاوت به دست آید. یکی دیگر از مولفه‌های بررسی شده مقدار شدت درزه‌داری سطحی ( $P_{21}$ ) است. این مولفه نیز برای هر مدل در هر یک از ابعاد ذکر شده تعیین شده است. سپس مقادیر میانگین و انحراف استاندارد آن برای هر یک از ابعاد محاسبه شده و همزمان با انجام فرآیند تعیین حجم نماینده، مقادیر شیب و طول برای هر دسته درزه برای هر یک از ابعاد در مدل‌های معرف هر بعد (با مولفه‌های آماری نزدیک به میانگین آن بعد)، تعیین شده است. سپس توابع چگالی احتمال به همراه آماره‌های آن‌ها با توابع چگالی احتمال و آماره‌های مقادیر برداشت شده که به عنوان ورودی مدل استفاده شده، مقایسه شده است تا مدل نهایی از برآزش خوب و قابل قبولی با شرایط واقعی برخوردار باشد.

پس از انجام تمامی فرآیندهای ذکر شده و مقایسه‌ی نتایج آماری به دست آمده، در نهایت مدل  $15 \times 15$  متر مربع مناسب تشخیص داده شد. چهار دسته درزه‌ی شبیه‌سازی شده به تفکیک در شکل ۴-۸ فصل قبل نمایش داده شده است. همچنین کلیه دسته درزه‌ها با طول‌های کوچکتر و بزرگتر از  $0/8$  متر در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. در شکل ۴-۱۰ مدل ساخته شده به همراه خطوط برداشت افقی نشان داده شده است.

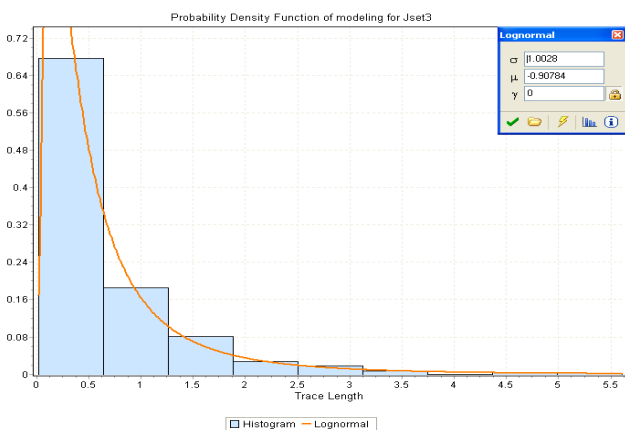
برخی از مولفه‌های هندسی مدل  $15 \times 15$  متر مربع که برای تحلیل خردشدگی برجا انتخاب شده است، به صورت مقایسه‌ای با مقادیر متناظر برداشت شده، در جدول‌های ۶-۷ تا ۶-۹ ارائه شده است. در جدول ۶-۷ مقادیر چگالی درزه‌داری سطحی و چگالی درزه‌داری خطی برداشت شده در راستای افق و حاصل از مدل‌سازی، مقایسه شده و میزان انطباق به تفکیک هر دسته درزه و به صورت کلی برآورد شده است. در این جدول‌ها آماره‌های توابع چگالی احتمال شیب و طول درزه‌ها پس از ساخت مدل بوسیله‌ی  $CAV-DFN^{2D}$  با داده‌های برداشت شده مقایسه شده است. در مورد مولفه‌ی شیب به دلیل این که روی صفحه‌ای که مقطع مدل‌سازی ایجاد شده دسته درزه‌های ۱ و ۲ با شیب واقعی مدل می‌شوند برای مقایسه از این دو دسته درزه استفاده شده است. نتایج در جدول شماره ۶-۸ ارائه شده است که تطابق خوبی را نشان می‌دهند. مقادیر توابع چگالی احتمال طول دسته درزه‌های مدل شده نیز تطابق بسیار خوبی را با داده‌های متناظر برداشت شده نشان می‌دهد. به عنوان نمونه توابع توزیع و آماره‌های مربوط به دسته درزه‌ی شماره ۳ در شکل ۶-۱۷ و جدول ۶-۹ برای مقایسه‌ی بهتر نشان داده شده است.

جدول ۶-۷: تعیین میزان انطباق چگالی درزه‌داری سطحی برداشت شده و مدل‌سازی بوسیله‌ی CAV-DFN2D

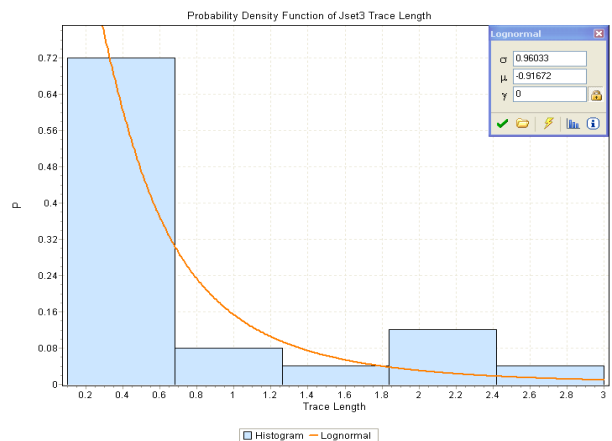
| درصد انطباق | چگالی درزه‌داری خطی افقی |            | چگالی درزه‌داری سطحی (P <sub>20</sub> ) |         |            |      |
|-------------|--------------------------|------------|---|---------|------------|------|
|             | مدل CAV-DFN2D            | برداشت شده | انطباق                                  | مدل CAV | برداشت شده | دسته |
|             |                          |            | ۹۹/۵                                    | ۵/۰۷    | ۵/۱        | ۱    |
|             |                          |            | ۱۰۰                                     | ۴/۴۴    | ۴/۴۴       | ۲    |
|             |                          |            | ۹۹/۷                                    | ۴/۱۹    | ۴/۲        | ۳    |
|             |                          |            | ۹۹/۶                                    | ۲/۶۱    | ۲/۶        | ۴    |
| ۹۹/۲        | ۸/۸۳                     | ۸/۹        | ۹۹/۸                                    | ۱۶/۳۱   | ۱۶/۳۴      | کل   |

جدول ۶-۸: مولفه‌های آماری شیب دسته درزه‌های شماره ۱ و ۲، برداشت شده و پس از مدل‌سازی بوسیله‌ی CAV-DFN2D

| شیب (درجه)            |         |                  |         | دسته درزه |
|-----------------------|---------|------------------|---------|-----------|
| مدل DFN <sup>2D</sup> |         | برداشت شده       |         |           |
| انحراف استاندارد      | میانگین | انحراف استاندارد | میانگین |           |
| ۶/۹۷                  | ۷۹/۶۹   | ۶/۹۱             | ۷۹/۳    | ۱         |
| ۵/۴۸                  | ۷۵/۵۴   | ۵/۶۶             | ۷۵/۵    | ۲         |



ب) داده‌های خروجی مدل CAV-DFN2D



الف) داده‌های برداشت شده

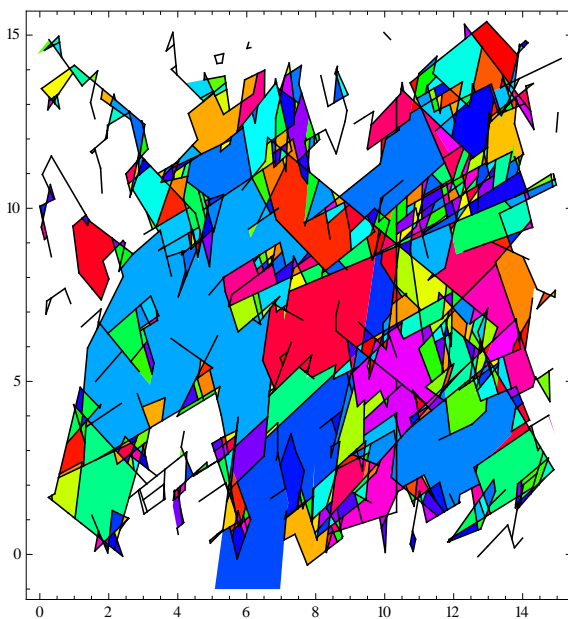
شکل ۶-۱۷: تابع توزیع برازش شده بر طول دسته درزه ۳ به همراه آماره‌های آن

جدول ۶-۹: مولفه‌های آماری طول دسته درزه‌ی شماره ۳، برداشت شده و پس از مدل‌سازی بوسیله‌ی CAV-DFN2D

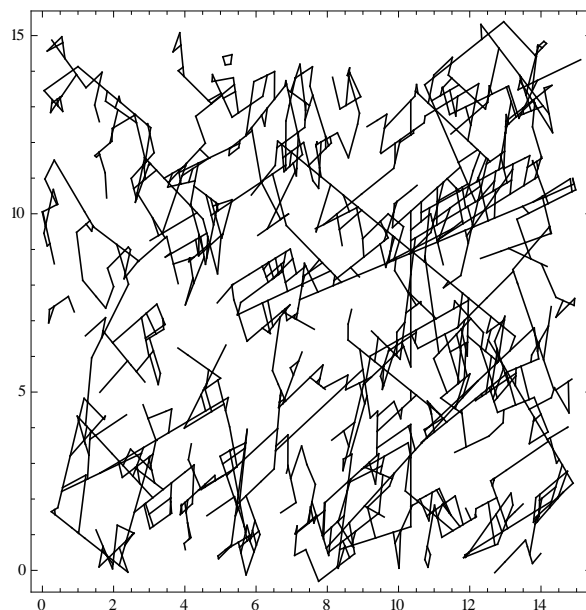
| تابع توزیع                | پارامتر موقعیت | پارامتر مقیاس | میانگین | انحراف استاندارد |
|---------------------------|----------------|---------------|---------|------------------|
|                           | $(\mu)$        | $(\sigma)$    |         |                  |
| برداشت                    | لاگ نرمال      | ۰/۹۶          | ۰/۶۷    | ۰/۷۸             |
| مدل CAV-DFN <sup>2D</sup> | لاگ نرمال      | ۱/۰۰          | ۰/۶۵    | ۰/۷۲             |

### ۶-۵-۲- محاسبه‌ی خردشدگی برجا

پس از تعیین ابعاد بهینه مدل و اعتبارسنجی آن، بخشی از هر درزه که در ایجاد بلوک نقشی ندارد حذف شده و به اصطلاح مدل منظم‌سازی می‌شود. پس از آن بلوک‌های کامل حاصل از تقاطع درزه‌ها مشخص می‌شود و مساحت آن‌ها محاسبه می‌گردد، این فرآیند به صورت تصویری در شکل ۶-۱۸ نشان داده شده است.



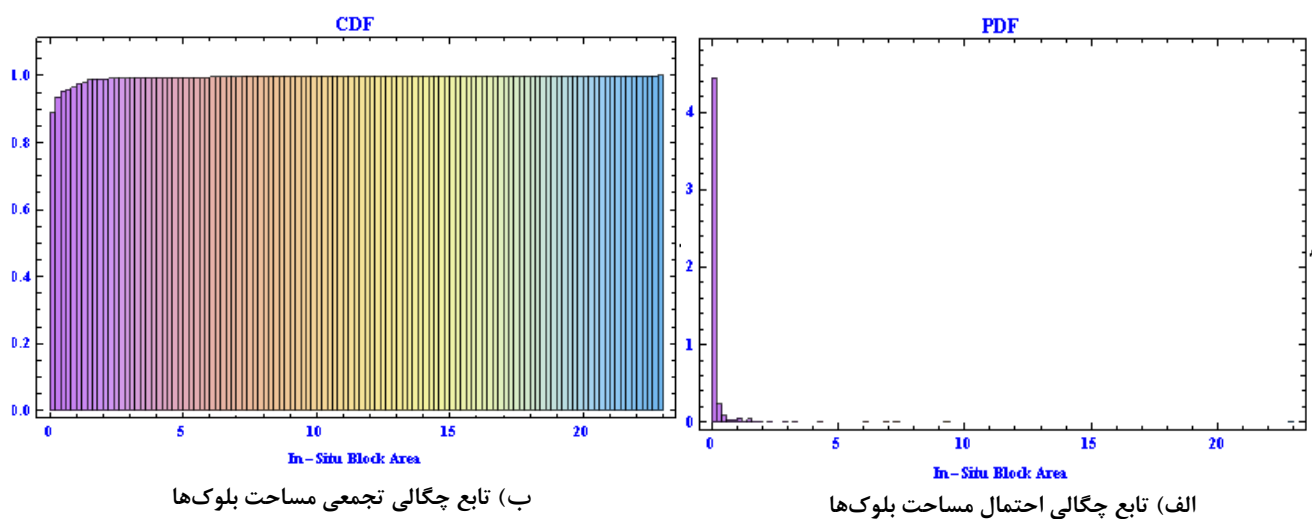
ب) تشکیل بلوک‌های کامل و محاسبه‌ی مساحت آن‌ها



الف) پس از منظم‌سازی درزه‌ها

شکل ۶-۱۸: خروجی مدل CAV-DFN2D

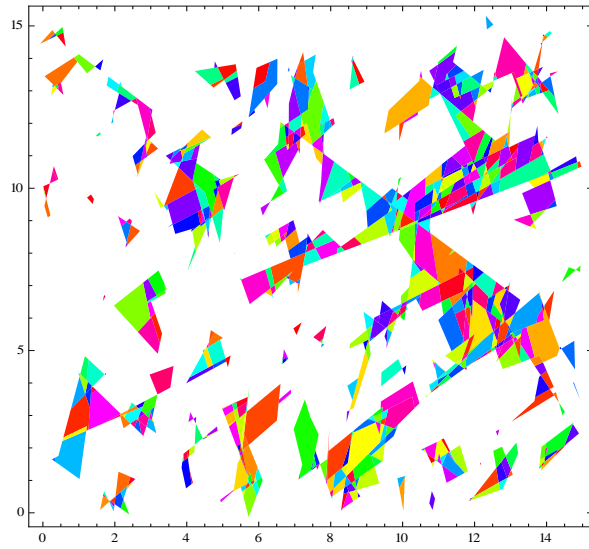
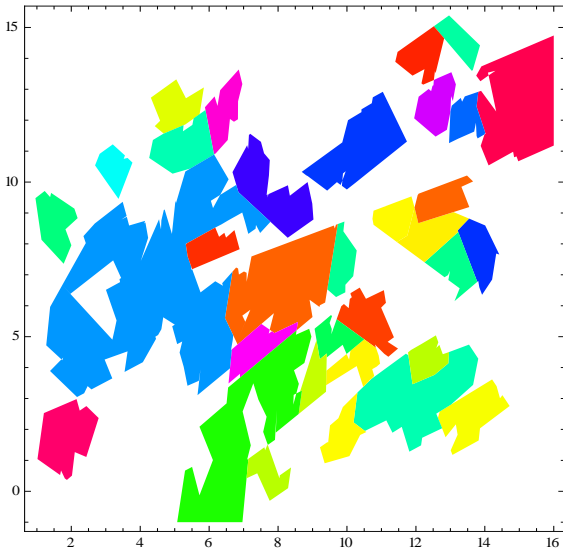
در نهایت پس از تعیین ابعاد بلوک‌ها تابع چگالی احتمال مساحت به همراه تابع چگالی تجمعی مساحت توسط نرم‌افزار محاسبه و مطابق شکل ۶-۱۹ در اختیار قرار خواهد گرفت. همچنین نسبت مساحت سطح کامل بلوکی شده به مساحت کل مدل نیز به صورت درصد ارایه می‌شود. نسبت سطح بلوکی شده به کل مدل ۶۹/۵ درصد محاسبه شده است. با بررسی منحنی‌های توابع چگالی احتمال و چگالی تجمعی مساحت بلوک‌ها مشخص می‌شود که بیش از ۹۹ درصد از بلوک‌های کامل تشکیل شده دارای مساحتی کوچکتر یا مساوی ۵ متر مربع هستند.



شکل ۶-۱۹: خروجی مدل CAV-DFN2D

مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌های برداشت شده از معدن میزان تشکیل بلوک‌های سنگی کامل را در وضعیتی خوب نشان می‌دهد (۶۹/۵ درصد) این در حالی است که ابعاد بیشتر بلوک‌های تشکیل شده (۹۹ درصد) کمتر یا مساوی ۵ متر مربع محاسبه شده است. همچنین سطح فضای اشغال شده توسط بلوک‌هایی با مساحتی بیشتر از ۱ متر مربع، حدود ۶۳ درصد است. تفکیک بلوک‌های کامل براساس مساحت بزرگتر و کوچکتر از ۱ متر مربع در شکل ۶-۲۰ نشان داده شده است.





الف) بلوک‌های با مساحت کوچکتر ۱ متر مربع      ب) بلوک‌های با مساحت بزرگتر مساوی ۱ متر مربع

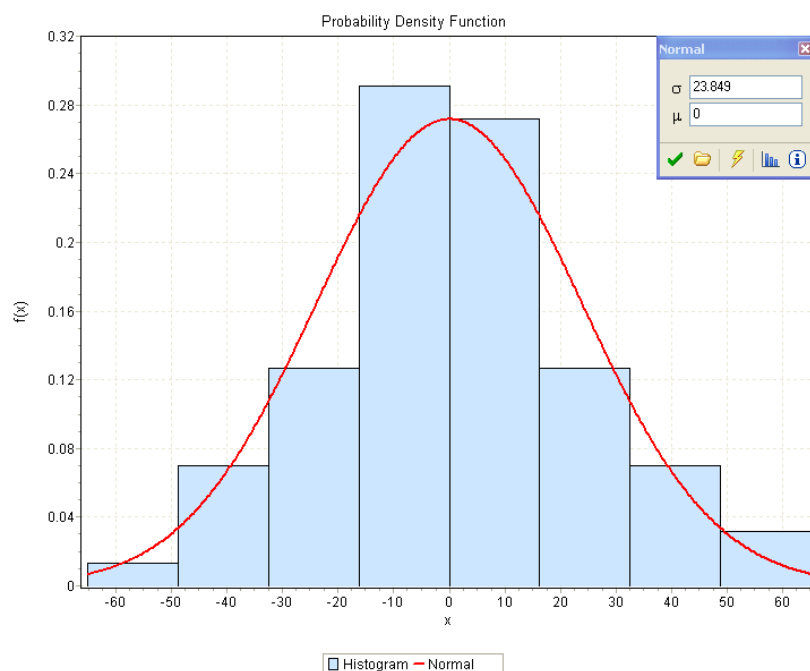
شکل ۶-۲۰: بلوک‌های کامل حاصل از خردشدگی برجا

## ۶-۶- مدل‌سازی هندسی سطوح ضعف (ناپیوستگی‌های بالقوه)

مولفه‌های لازم برای ساخت مدل هندسی ناپیوستگی‌های بالقوه به روش DFN همان‌گونه که در فصل چهارم توضیح داده شد، شامل: توزیع آماری شیب درزه، توزیع آماری طول اثر و مقدار چگالی یا شدت درزه است.

### ۶-۶-۱- برآورد توزیع آماری شیب سطوح ضعف

همان‌گونه که پیشتر در فصل سوم توضیح داده شد، امتداد سطوح ضعف و یا رگچه‌ها با استفاده از پردازش تصویر و برداشت مستقیم از روی مغزه‌ها نسبت به شمال با کمپاس تعیین شده است. با توجه به این که مقدار آزمون گمانه‌های مورد بررسی در این مورد همگی ۹۰ درجه بوده است، لذا تمامی شیب‌ها نسبت به سطح افق تصحیح شده است. در شکل ۶-۲۱ تابع توزیع مولفه‌ی شیب این سطوح به همراه آماره‌های آن نشان داده شده است.



شکل ۶-۲۱: تابع توزیع شیب سطوح ضعف و رگچه‌های موجود در توده سنگ

در مجموع ۱۶۴ مورد سطوح ضعف اعم از ناپیوستگی و یا جوش خورده برداشت شده است که دارای شیبی با تابع توزیع نرمال با میانگین شیب صفر درجه و انحراف معیار ۲۳٫۸۵ درجه بوده است.

### ۶-۶-۲- برآورد پایایی (طول اثر) سطوح ضعف بر اساس همبستگی پایایی و

#### بازشدگی درزه

تاکنون برخی محققان بر اساس ویژگی‌های درزه حاصل شده از برداشت‌های میدانی، روابطی بین طول اثر درزه و بازشدگی ارائه نموده‌اند (Hatton, 1994; Renshaw and Park, 1997). روابط به دست آمده، حاکی از آن است که یک قانون معتبر کلی بین طول و بازشدگی درزه وجود ندارد. با این حال، پیشینه مطالعات نشان می‌دهد که بازشدگی/پهنا و طول درزه‌ها حقیقتاً همبسته هستند، حتی اگر تابع همبستگی جهانی معتبری وجود نداشته باشد (Baghbanan and Jing, 2008).

با فرض این که تابع چگالی احتمال برای توزیع لاگ‌نرمال بازشدگی‌های درزه (h) ،  $f_A(h)$  باشد، تابع چگالی احتمال کوتاه شده (TPDF<sup>1</sup>) برای توزیع لاگ‌نرمال بازشدگی‌های درزه به صورت زیر است (Bang et al., 2012):

$$f_{TA}(h) = \frac{f_A(h)}{\int_{h_a}^{h_b} f_A(t)dt} , \quad h_a \leq h \leq h_b \quad (10-6)$$

که در آن  $h_a$  و  $h_b$  به ترتیب حدود پایینی و بالایی بازشدگی درزه هستند. شایان توجه است به دلیل خطاهای موجود در اطلاعات سیستم درزه برداشت شده، کاربرد توزیع‌های کوتاه‌شده بازشدگی‌های درزه و طول‌ها اجتناب ناپذیر است. تابع توزیع تجمعی کوتاه شده (TCDF) برای توزیع لاگ-نرمال بازشدگی به صورت رابطه‌ی ۱۱-۶ بدست خواهد آمد:

$$F_{TA}(h) = \int_{h_a}^h f_{TA}(t)dt = \frac{\int_{h_a}^h f_A(t)dt}{\int_{h_a}^{h_b} f_A(t)dt} = \frac{F_A(h) - F_A(h_a)}{F_A(h_b) - F_A(h_a)} , \quad h_a \leq h \leq h_b \quad (11-6)$$

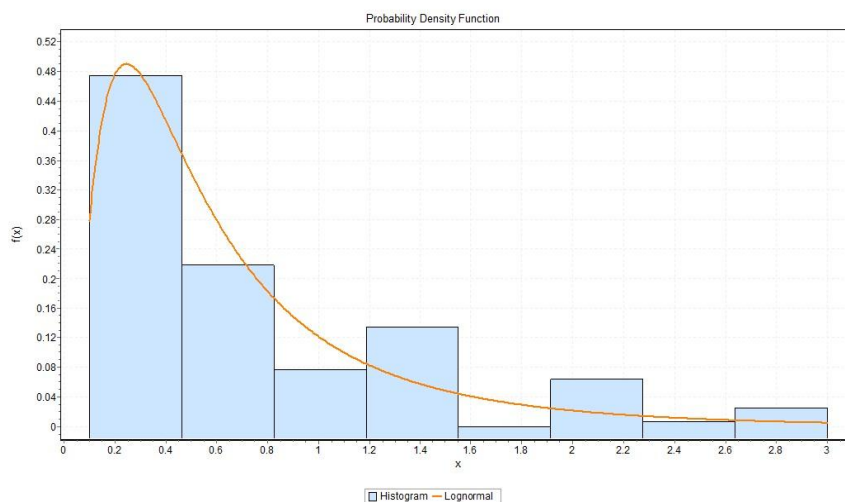
بر همین اساس، روابط مشابهی برای TCDF توزیع طول درزه به دست خواهد آمد.

برای در نظر گرفتن همبستگی طول و بازشدگی، فرض می‌شود که TCDF برای توزیع لاگ-نرمال بازشدگی‌های درزه (h) دارای تعداد تصادفی مشابه با TCDF برای توزیع لاگ‌نرمال طول درزه (l) هستند. لذا برای مورد مطالعاتی توده سنگ معدن کهنک، معادله همبستگی طول و بازشدگی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود (Bang et al., 2012):

$$\frac{F_A(h) - F_A(h_a)}{F_A(h_b) - F_A(h_a)} = \frac{F_L(l) - F_L(l_a)}{F_L(l_b) - F_L(l_a)} \quad (12-6)$$

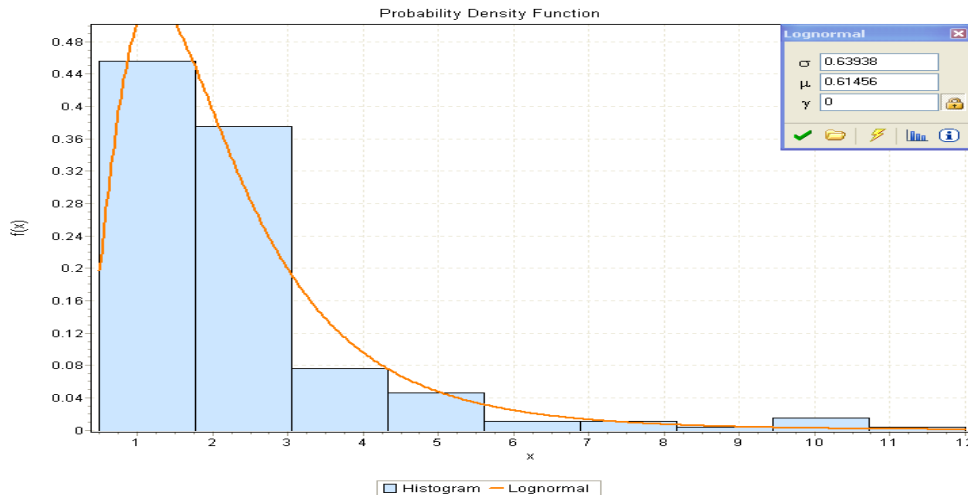
که در آن  $F_L(l)$  تابع توزیع تجمعی برای توزیع لاگ‌نرمال طول درزه و  $l_a$  و  $l_b$  به ترتیب حدود پایینی و بالایی طول درزه هستند. توابع توزیع برازش شده بر طول و پرشوندگی کل درزه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۲۲-۶ و ۲۳-۶ نشان داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که تاکنون رابطه‌ای بین ضخامت پرشوندگی و طول اثر درزه ارائه نشده است.

با توجه به بازدیدهای انجام شده از منطقه و انبار مغزه‌ها، همانگونه که قبلاً اشاره شد منطقه تنیده نیست و همچنین جنس مواد پرکننده نیز از جنس مواد رسوبی و غیر هم‌رنگ با سنگ زمینه است. لذا می‌توان این‌گونه فرض کرد که ضخامت پرشدگی رگچه‌ها و سطوح ضعف همان بازشدگی اولیه‌ی آنها است. با این فرض و بر اساس این توابع توزیع و با کاربرد رابطه ۶-۱۲ مقادیر طول سطوح ضعف و رگچه‌ها براساس میزان ضخامت پرشدگی مشاهده شده در مغزه‌ها برآورد شده است. بر همین اساس تابعی در برنامه‌ی تحلیل خردشوندگی اولیه و ثانویه ( $PSF^1$ ) نوشته شده که با گرفتن مقدار بازشدگی، براساس توابع توزیع تعریف شده مقدار متناظر طول اثر را برای مدل‌سازی به برنامه‌ی اصلی خواهد داد.



شکل ۶-۲۲: تابع توزیع برازش شده بر طول کل درزه‌ها

لازم به ذکر است که یکی از شاخص‌های آرایه شده برای تقسیم بندی ناپیوستگی‌های بالقوه که در فصل سوم به آنها اشاره شد، میزان بازشدگی و یا ضخامت پرشدگی این سطوح در توده سنگ است. به دلیل این‌که اندازه‌گیری میزان بازشدگی سطوح ضعف با توجه به شرایط ذکر شده در مورد مغزه‌ها غیرممکن است، تنها شاخص موجود و قابل اندازه‌گیری ضخامت مواد پرکننده سطوح ضعف است.



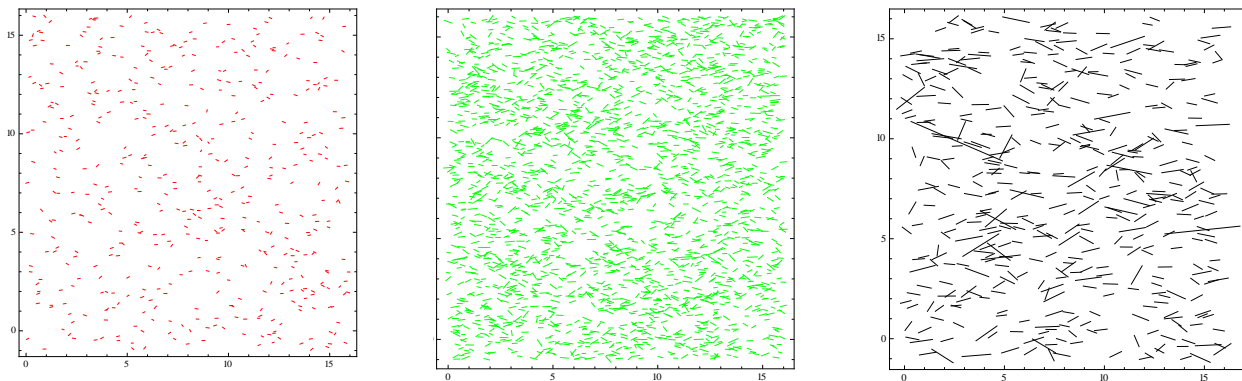
شکل ۶-۲۳: تابع توزیع برازش شده بر بازشدگی کل درزه‌ها

از آنجا که جنس مواد پرکننده برداشت شده همگی رسوبی و متفاوت از جنس سنگ بستر است، همان‌گونه که در شکل‌های ۳-۲۰ و ۳-۲۱ نشان داده شده است، ضخامت زیادتر مواد پرکننده، سطح ضعیف‌تری را ایجاد خواهد نمود. از اینرو سطوح ضعف با ضخامت بیش از ۱ میلیمتر ناپیوستگی نوع ۱، با ضخامت پرکننده‌ی بین چند دهم تا ۱ میلیمتر، ناپیوستگی نوع ۲ و ضخامت حدود ۰/۱ میلیمتر ناپیوستگی نوع ۳ در نظر گرفته شده است.

### ۳-۶-۶- برآورد چگالی درزه‌داری

در مجموع از حدود ۴۰ متر طول مغزه، ۱۶۴ ناپیوستگی بالقوه ثبت شده است، با توجه به شیب تقریباً افقی و کم این ناپیوستگی‌ها، چگالی درزه‌داری خطی ( $P_{10}$ ) حدود  $4m^{-1}$  برآورد شده است. از آنجا که به منظور مدل‌سازی دو بعدی به چگالی درزه‌داری سطحی ( $P_{20}$ ) نیاز است. لذا با توجه به ابزار تعیین چگالی خطی در راستای خط برداشت قائم،  $P_{20}$  بگونه‌ای انتخاب شده است که میانگین  $P_{10}$  در راستای خطوط برداشت قائم در مدل تقریباً برابر  $4m^{-1}$  باشد. عدد  $P_{20}$  بدست آمده پس از تکرار مدل‌سازی‌های آماری و میانگین‌گیری از خطوط برداشت قائم  $12m^{-2}$  تعیین شده است. لازم به ذکر است که چگالی تعریف شده چگالی کلی مربوط به هر سه نوع ناپیوستگی بالقوه است. میزان چگالی مربوط به هریک از انواع ناپیوستگی به صورت خودکار براساس فراوانی مقدار

ضخامت پرشوندگی از روی تابع توزیع بازشدگی. توسط نرم افزار تعیین خواهد شد. در شکل ۶-۲۷  
 نمایی از مدل هندسی هر سه نوع ناپیوستگی به تفکیک نشان داده شده است.



پ) ناپیوستگی نوع ۳

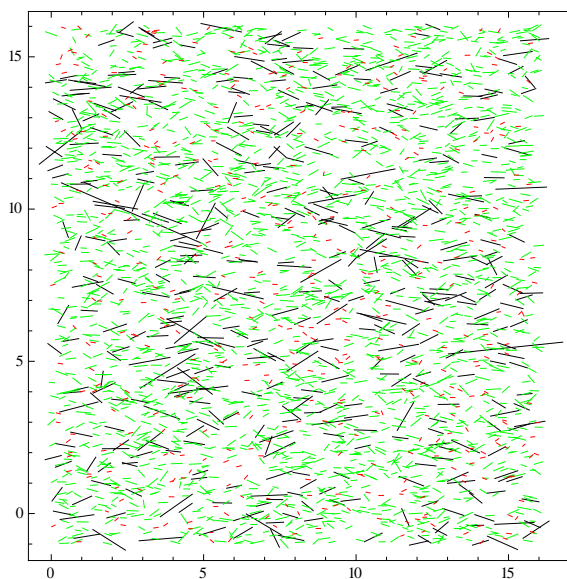
ب) ناپیوستگی نوع ۲

الف) ناپیوستگی نوع ۱

شکل ۶-۲۴: ناپیوستگی های بالقوه مدل سازی شده

همانگونه که در شکل مشخص است، ناپیوستگی های بالقوه ی نوع ۲ (بازشدگی بین ۰/۱ تا ۱ میلیمتر) بیشترین فراوانی و چگالی را در مدل خروجی داشته است که با توجه به شکل تابع توزیع بازشدگی ها همین انتظار نیز می رود.

در شکل ۶-۲۵ ناپیوستگی های بالقوه به صورت یکجا نشان داده شده است.



شکل ۶-۲۵: مدل هندسی کلی از ناپیوستگی های بالقوه

## ۶-۷- شاخص خردشوندگی اولیه

با فرض یک دست بودن توده سنگ که جزو فرضیات اصلی این تحقیق است، و همچنین نرخ تخلیه‌ی متناسب برای جلوگیری از انفجار هوا، عوامل اصلی تاثیرگذار بر فرآیند خردشوندگی اولیه براساس جمع‌بندی نظرات محققان را می‌توان موارد ذیل بیان نمود:

- شرایط درزه‌داری
  - اثر تنش‌های القایی در ناحیه باریکی پشت جبهه تخریب
  - مقاومت بلوک سنگ سالم
  - اثر رگچه‌ها و میان لایه‌های نازک در بلوک‌های سنگی
- یکی از فرضیات اصلی در این تحقیق در نظر گرفتن سطوح ضعف و ناپیوستگی‌های بالقوه موجود در توده سنگ به عنوان عامل اصلی خردشوندگی اولیه است. با این فرض میزان تبدیل این سطوح بالقوه به ناپیوستگی بالفعل، متأثر از تنش‌های القایی موجود پس از حفر زیربرش و مقاومت این سطوح است.

ایدای<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۲ بیان کرد که خردشوندگی اولیه ناشی از سه مولفه‌ی زیر است (Brown, E T, 2003):

- بزرگی و امتداد تنشهای برجا
  - مقاومت بلوک‌های سنگی و
  - هندسه‌ی فضای حفر شده
- او از شاخصی نسبتاً ساده برای در نظر گرفتن مولفه‌های یاد شده استفاده کرد، این شاخص نسبت به پیشینه‌ی تنش مماسی القایی به مقاومت فشاری سنگ برجا بود (Mathews et al 1980, Grimstad and Barton 1993). این شاخص به عنوان مبنایی برای تخمین گسترش نقطه‌ی انتهایی

طول اثر درزه‌های غیرمتقاطع در مدل استفاده شده است. در این شاخص راهبرد ارایه شده توسط گریمستد و بارتون<sup>۱</sup> در مورد اثرات تنش برای بازه‌ای از نسبت‌های تنش - مقاومت به عنوان مبنای اولیه به منظور تخمین میزان گسترش درزه‌ها استفاده شده است. مبنای ارایه شده در جدول ۶-۱۰ نشان داده شده است. درستی مقدار بزرگی گسترش درزه‌ی ارایه شده در این جدول بوسیله‌ی تحلیل‌های عددی در بازه‌ای قابل قبول بوسیله‌ی ایدای نشان داده شده است (Brown, E T, 2003).

جدول ۶-۱۰: تخمین درصد گسترش طول اثر درزه براساس نرخ‌های مختلف تنش - مقاومت ارایه شده توسط گریمستد و بارتون (Eadie, 2002)

| توسعه‌ی درزه بر حسب درصد | سطح تنش و اثر آن  | $\sigma/\sigma_c$ |
|--------------------------|---|-------------------|
| ۰                        | تنش کم، نزدیک سطح زمین، درزه‌های باز  | $> 0/01$          |
| ۰                        | تنش متوسط، شرایط تنش مطلوب  | $0/01$ تا $0/3$   |
| ۱۰ تا ۰                  | تنش بالا، ساختاری خیلی محکم، معمولاً مناسب برای پایداری، احتمالاً برای پایداری دیواره نامناسب | $0/3$ تا $0/4$    |
| ۳۰ تا ۵۰                 | ورقه ورقه شدن آرام توده سنگ پس از بیش از یک ساعت  | $0/5$ تا $0/65$   |
| ۵۰ تا ۷۵                 | تورق و انفجار سنگ در توده سنگ پس از چند دقیقه   | $0/65$ تا ۱       |
| ۷۵ تا ۱۰۰                | انفجار سنگ سنگین و تغییر شکل‌های فوری دینامیکی در توده سنگ                                    | $< 1$             |

شاخص خردشوندگی اولیه در این تحقیق با فرض جدایش سطوح ضعف، براساس شاخص ارایه شده توسط ایدای و مقدار انرژی لازم برای تبدیل سطوح ضعف به درزه‌های بالفعل براساس آزمایش طراحی و اجرا شده در فصل سوم، تعریف شده است. به این صورت که مقدار انرژی لازم برای جدایش هر یک از سطوح ناپیوستگی سه گانه‌ی بالقوه، نسبتی از انرژی لازم برای شکست از روی ماده سنگ بلوک سنگی است. این نسبت به صورت ضریبی از مقاومت فشاری ماده سنگ بیان شده است. طبق نظر لابسچر در صورتی که بلوک سنگی دارای رگه و ناپیوستگی نبوده و همگن باشد مقدار مقاومت بلوک سنگی<sup>۲</sup> (RBS) برابر با ۸۰ درصد مقاومت سنگ بکر<sup>۳</sup> (IRS) در نظر گرفته خواهد شد (Laubscher and Jakubec, 2001).

1 - Grimstad and Barton  
2 - Rock Block Strength.  
3 - Intact Rock Strength.



$$RBS = 0.8 \times IRS$$

(۱۳-۶)

از این رو انرژی لازم برای جدایش سطوح ناپیوستگی‌های بالقوه در مقابل تنش‌های القایی براساس میزان سطح انرژی بدست آمده در فصل سوم تعیین شده است. این مقدار برای ناپیوستگی بالقوه نوع ۱ برابر با ۳۰ درصد مقاومت بلوک سنگی سالم و یا براساس رابطه‌ی (۱۳-۶)، ۲۴ درصد مقاومت ماده سنگ، ناپیوستگی بالقوه نوع ۲ برابر با ۶۰ درصد مقاومت بلوک سنگی سالم و یا ۴۸ درصد مقاومت ماده سنگ و ناپیوستگی بالقوه نوع ۳ برابر با ۹۰ درصد مقاومت بلوک سنگی سالم و یا ۷۲ درصد مقاومت ماده سنگ در نظر گرفته شده است.

با این فرض به جای مقدار مقاومت فشاری ماده سنگ در جدول ۶-۱۰ مقدار معادل هر نوع ناپیوستگی بالقوه جایگزین می‌شود و میزان طول اثر درگیر به عنوان سطح درزه با مقاومت کششی صفر (ناپیوستگی بالفعل) تعیین خواهد شد. به عنوان مثال اگر نسبت تنش القایی به مقاومت فشاری در نظر گرفته شده برای ناپیوستگی نوع ۱ (۲۴ درصد مقاومت ماده سنگ)، بزرگتر از یک باشد، تمامی طول این ناپیوستگی به عنوان درزه‌ی بالفعل با مقاومت کششی صفر به عنوان سطح جدید وارد مدل اولیه شده و امکان تشکیل بلوک‌های سنگی جدید حاصل از آن بررسی می‌گردد. این روند برای تمامی ناپیوستگی‌های بالقوه تکرار شده و میزان خردشوندگی اولیه در کل مدل براساس بلوک‌های سنگی جدید تعیین خواهد شد.

## ۶-۸- شاخص‌های خردشوندگی ثانویه

فرآیندهایی که بلوک سنگی در معرض آن قرار می‌گیرند، توزیع اندازه ذرات را در نقاط تخلیه تعیین می‌کنند. عوامل اصلی تاثیرگذار بر فرآیند خردشوندگی ثانویه براساس جمع‌بندی نظرات محققان در فصل دوم، بخش ۲-۳-۳ معرفی شده است.

شاخص‌های در نظر گرفته شده برای برآورد خردشوندگی ثانویه بر مبنای قواعد تحلیلی و تجربی‌ای است که فرآیند خردشوندگی و مولفه‌های موثر بر آن را توضیح می‌دهد. بسیاری از مولفه‌های تجربی، تحلیلی و احتمالاتی در نظر گرفته شده در مدل خردشوندگی ثانویه بر مبنای نظرات و

تجربیات لابسچر<sup>۱</sup>، با ترکیب با سطح انرژی مورد نیاز بدست آمده از روی نتایج آزمایش طراحی شده در این پروژه برای دسته‌بندی و کمی‌سازی سطوح ضعف، است.

استرھویزن<sup>۲</sup> برای برآورد خردشدن یک بلوک در طول ستون تخلیه، مولفه‌ای را به نام ارتفاع چرخه<sup>۳</sup> معرفی کرده است. ارتفاع چرخه به معنای ارتفاعی است که یک بلوک مجزا با تناسب ظاهری<sup>۴</sup> ۱۰:۱ در طول ستون تخلیه باید طی کند تا قطعاً به دو قسمت مساوی از وسط شکسته شود. این مفهوم طبق رابطه‌ی زیر ارایه شده است (Esterhuizen G. S, 2005).

$$H = F_c \times F_p \times F_r \times \sigma_{c(\text{block})} \quad (14-6)$$

که در آن  $\sigma_{c(\text{block})}$ : مقاومت بلوک سنگی که وابسته به حجم و تعداد درزه‌های موجود در بلوک است.

$F_c$ : ضریبی است که نسبت مقاومت بلوک به ارتفاع چرخه را بیان می‌کند که برابر با یک در نظر گرفته شده است.

$F_p$ : ضریبی برای در نظر گرفتن فشار تخریب است (ضریب فشار).

$F_r$ : ضریبی برای در نظر گرفتن نرخ تخلیه‌ی مواد است (ضریب نرخ تخلیه).

بر همین مبنا ضریب فشار ( $F_p$ )، برای محاسبه‌ی ارتفاع چرخه به صورت زیر تعریف می‌شود:

- در صورتی که میزان فشار وارد بر کف کمتر از یک مگاپاسکال (1 Mpa) باشد، در ارتفاع چرخه بی‌تاثیر خواهد بود ( $F_p=1$ ).

- مقدار ضریب فشار ( $F_p$ ) زمانی که فشار از یک تا دوازده مگاپاسکال اضافه شود، به صورت خطی از یک به ۰/۵ کاهش خواهد یافت.

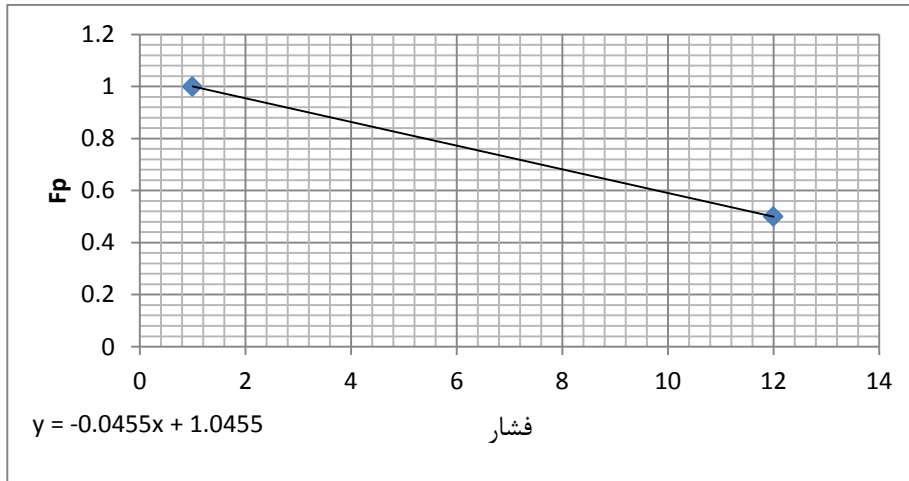
- زمانیکه فشار وارد بر کف از دوازده مگاپاسکال تجاوز کند مقدار ضریب فشار در عدد ۰/۵ ثابت خواهد بود.

۱ - مشاور بین المللی کنسرسیوم تخریب توده‌ای

2 - Esterhuizen  
3 - Cycle Height.  
4 - Aspect Ratio

نمودار شکل ۶-۲۶ تغییرات مقدار  $F_p$  براساس میزان فشار وارد بر کف را نشان داده است.

مقادیر  $F_p$  در دوسر نمودار نشان داده شده ثابت است.



شکل ۶-۲۶: نمودار تغییرات مقدار  $F_p$  نسبت به فشار وارد بر کف ستون تخلیه

ضریب نرخ تخلیه ( $F_r$ ) و تاثیر آن در فصل دوم، بخش ۲-۳-۳-۴ معرفی شد.

مفهوم تناسب ظاهری بلوک در این تحقیق به صورت دو بعدی به شکل زیر تعریف شده است:

$$\nu = (P/2A) \times l \quad (2-2)$$

در این رابطه  $P$  محیط بلوک،  $A$  مساحت بلوک و  $l$  بیشینه‌ی اختلاف بین بیشینه و کمینه طول‌ها یا عرض‌های رئوس بلوک است. این مقدار برای اشکال دایره و مربع برابر واحد و برای مابقی اشکال بزرگتر از یک خواهد بود.

## ۶-۹- برنامه کامپیوتری PSF

برنامه‌ی  $PSF^1$  با هدف ایجاد ابزاری برای برآورد میزان خردشوندگی توده سنگ در طول فرآیندهای مختلف تخریب توده‌ای با استفاده از زبان برنامه نویسی نرم‌افزار Mathematica نوشته شد. این برنامه مبتنی بر قواعد تجربی، تحلیلی و احتمالاتی است که فرآیندها و مولفه‌هایی که نقش اصلی در خردشوندگی اولیه و ثانویه ایفا می‌کنند را در نظر گرفته است.

برنامه شامل سه بخش اصلی است:

1 - Primary and Secondary Fragmentation.

- بخش اول، مدل‌سازی هندسی ناپیوستگی‌های بالقوه (سطوح ضعف). این بخش همانگونه که پیشتر در این فصل توضیح داده شده است، با استفاده از برنامه‌ی CAV-DFN2D و توابعی برای تعیین میزان طول اثر سطوح ضعف بر مبنای میزان بازشدگی<sup>۱</sup>، از طریق برداشت‌های انجام شده سطوح ضعف را مدل‌سازی می‌کند. سپس براساس شاخص‌های میزان بازشدگی (ضخامت پرشدگی) و یا طول اثر که کاربر تعریف خواهد کرد سطوح ضعف مدل‌سازی شده به یک، دو و یا حداکثر سه رده تقسیم‌بندی خواهد شد.

- بخش دوم، تحلیل خردشوندگی اولیه. در این بخش میزان خردشوندگی اولیه‌ی توده سنگ که به معنای خردشدن در جای توده سنگ اطراف فضای تخریب است، محاسبه خواهد شد. مبنای محاسبه‌ی این نوع از خردشوندگی میزان تبدیل سطوح ضعف به ناپیوستگی بالفعل، متأثر از تنش‌های القایی موجود پس از حفر زیربرش و شاخص مقاومت این سطوح است.

- بخش سوم، تحلیل خردشوندگی ثانویه. در این بخش میزان خردشوندگی ثانویه‌ی بلوک‌های سنگی از زمان جداشدن از فضای تخریب و قرارگرفتن در ستون تخلیه تا رسیدن به دهانه‌ی تخلیه، محاسبه خواهد شد. مولفه‌هایی همچون نرخ تناسب ظاهری بلوک‌ها، فشار تخریب، ارتفاع تخلیه، مقاومت سطوح ضعف موجود در بلوک، مقاومت بلوک، اثر بالشتکی ذرات ریز و پدیده‌ی تاق زدگی برای تحلیل در این بخش در نظر گرفته شده است.

خروجی این برنامه شامل نمودارهای توزیع ابعادی بلوک‌های سنگی در مرحله‌ی خردشوندگی اولیه و هر مرحله‌ی دلخواه از خردشوندگی ثانویه بسته به محل قرارگیری در ارتفاع‌های مختلف ستون تخلیه است. تمامی بلوک‌ها به صورت مجزا به همراه ابعاد و سطوح ضعف موجود در آنها در هر مرحله در فایل‌ی ذخیره شده و قابل بازیابی خواهد بود.

---

۱ - قبلاً توضیح داده شد که باز شدگی در اینجا معادل ضخامت پرشدگی در نظر گرفته می‌شود.

## ۶-۹-۱- ورودی و خروجی برنامه PSF

ورودی مورد نیاز و خروجی حاصل از آن به تفکیک هر یک از بخش‌های سه‌گانه‌ی این برنامه متفاوت است.

### ۶-۹-۱-۱- ورودی و خروجی بخش اول

ورودی‌های این بخش، اطلاعات مورد نیاز مدل‌سازی هندسی سطوح ضعف است. اطلاعات اصلی شامل تابع توزیع شیب، تابع توزیع بازشدگی و یا ضخامت پرشدگی سطوح ضعف و چگالی درزه‌داری سطحی است. با داشتن این اطلاعات پایه به اضافه‌ی تابع توزیع طول اثر درزه‌ها در منطقه، به شرح گفته شده در بخش مدل‌سازی هندسی سطوح ضعف، این دسته از ناپیوستگی‌ها ساخته شده و تفکیک خواهند شد.

خروجی شامل مدل هندسی سطوح ضعف و توابع توزیع آماری تمامی مولفه‌های هندسی ساخته شده به صورت کلی و به تفکیک نوع ناپیوستگی خواهد بود.

### ۶-۹-۱-۲- ورودی و خروجی بخش دوم

خروجی‌های رقومی بخش اول که به تفکیک نوع ناپیوستگی مشخص شده، به عنوان یکی از ورودی‌های اصلی این بخش محسوب می‌شود. ورودی‌های دیگر شامل تنش‌های اصلی منطقه در عمق مورد مدل‌سازی و مقاومت فشاری ماده سنگ است. با وارد کردن این مولفه‌ها و استفاده از شاخص‌های پیش گفته برای تحلیل خردشوندگی اولیه، درصدی از طول هریک از سطوح ضعف را که می‌تواند به سطح ناپیوستگی بالفعل تبدیل شود، بر مبنای میزان تنش لازم با توجه به نوع سطوح ضعف، توسط برنامه محاسبه شده و وارد مدل هندسی اولیه‌ی تهیه شده توسط کد CAV-DFN2D خواهد شد. در این بخش تمامی بلوک‌های کاملی را که در اثر اضافه شدن ناپیوستگی‌های جدید امکان تشکیل دارند مشخص شده و مدل دوباره بلوک بندی خواهد شد.

خروجی این بخش شامل بلوک‌های کامل تشکیل شده به صورت رقومی و بصری و همچنین توزیع ابعادی بلوک‌ها است.

نکته مورد توجه مقدار تنش القایی بر روی سطح فضای تخریب است. در برنامه‌ی تهیه شده در صورت وارد نشدن این مولفه، تنش اصلی بیشینه در منطقه برابر با تنش القایی مماسی در نظر گرفته خواهد شد. در هر صورت مقدار دقیق‌تر این مولفه را می‌توان براساس مدل‌سازی عددی فضای تخریب با در نظر گرفتن هندسه‌ی زیربرش و تنش‌های برجای منطقه تقریب زد و بطور مستقیم به عنوان ورودی این بخش به برنامه وارد کرد.

### ۶-۹-۱-۳- ورودی و خروجی بخش سوم

همانند مرحله‌ی قبل تمامی خروجی‌های رقومی بخش قبل شامل هندسه‌ی بلوک‌ها و همچنین سطوح ضعف و ناپیوستگی موجود در هریک از بلوک‌ها به عنوان ورودی‌های اولیه‌ی این بخش محسوب می‌شود. ورودی‌های دیگر شامل مجموعه مولفه‌های لازم برای برآورد شاخص‌های خردشوندگی ارایه شده بر مبنای روابط تجربی و تحلیلی است. این مولفه‌ها شامل: وزن مخصوص توده سنگ خردشده، ارتفاع تخلیه، نسبت عرض به ارتفاع ستون تخلیه‌ی فعال، نرخ تخلیه، درصد ذرات ریزدانه، ضریب تورم توده سنگ و مقاومت فشاری ماده سنگ است.

در این بخش خردایش هر بلوک به صورت مجزا تحت شرایط داده شده به مدل و شاخص‌های ارایه شده، ارزیابی خواهد شد. هم‌زمان با حرکت بلوک در طول ستون تخلیه براساس ارتفاع چرخه‌ی محاسبه شده، فشار تخریب نیز در پایان هر چرخه دوباره محاسبه خواهد شد، و بر همین اساس ارتفاع چرخه‌ی جدید برای بلوک‌های شکل گرفته‌ی حاصل از خردایش مرحله‌ی قبل محاسبه خواهد شد. این عمل تا رسیدن به سطح ارتفاعی نقطه‌ی تخلیه مواد ادامه می‌یابد. در طول فرآیند خردشوندگی ثانویه برای هر بلوک، بلوک‌های حاصل از خردشدن بلوک اولیه و ارتفاع خردشدن هر بلوک توسط برنامه ثبت و نگهداری خواهد شد.

ضریب تناسب ظاهری و میزان مقاومت هر بلوک در هر مرحله بر مبنای شاخص ارایه شده از تعداد و نوع ناپیوستگی‌های بالقوه موجود در بلوک، محاسبه شده و بر مبنای آن چرخه‌ی ارتفاعی لازم برای شکست بلوک و همچنین سطح شکست مشخص خواهد شد.

در نهایت خروجی مدل شامل خروجی رقومی و بصری از تمامی بلوک‌های حاصل از خردشوندگی و منحنی توزیع ابعاد بلوک‌ها خواهد بود.

## ۶-۱۰- تحلیل خردشوندگی با نرم افزار PSF

به منظور تحلیل خردشوندگی اولیه و ثانویه مشخصات توده سنگ برداشت شده در منطقه معدن مس کهنک به عنوان داده‌های ورودی به نرم‌افزار در نظر گرفته شده است.

### ۶-۱۰-۱- داده‌های ورودی و فرضیات مدل

مقاومت فشاری نمونه‌های سنگی محدوده مطالعاتی بین حداقل ۳۱ مگاپاسکال برای گرانودیوریت تا حداکثر ۷۸ مگاپاسکال برای آندزیت متغیر بوده است.

بر اساس این اطلاعات و با توجه به سایر گزارش‌ها و همچنین بازدیدهای صحرایی به عمل آمده، مقاومت فشاری تک محوری برای توده سنگ در محدوده معدن، به طور میانگین برابر ۴۶ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است (پارس پی آزما، ۱۳۹۱).

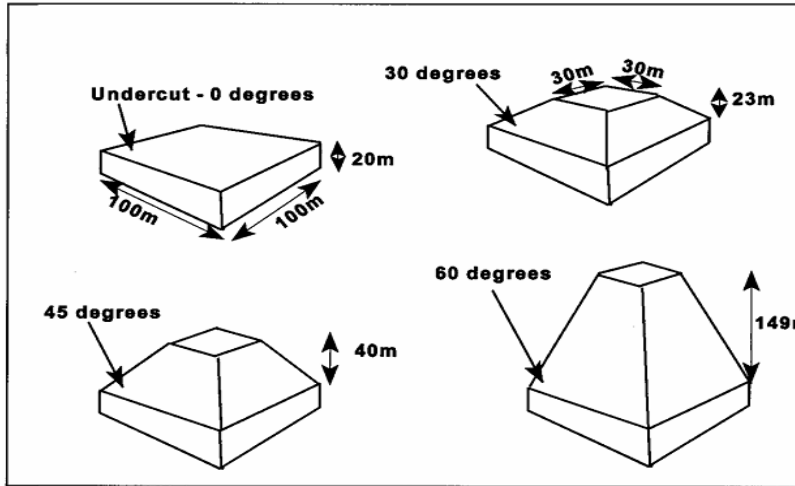
نتایج به دست آمده برای چگالی سنگ‌های نمونه‌برداری شده در این محدوده مطالعاتی، حاکی از آن است که محدوده تغییرات آنها بین ۲/۳۵ برای آندزیت دایک تا ۲/۸۲ برای گرانیت است. البته لازم به ذکر است که این میزان برای سنگ‌های به شدت آتره شده و خرد شده سطحی و تا عمق حدود ۱۰ متر، با در نظر گرفتن شرایط توده ماده معدنی و تجربیات قبلی در معادن مشابه، ۲/۲ در نظر گرفته شده و در سایر تحلیل‌ها با توجه به نوع و حجم حدودی سنگ‌های عمقی در محدوده کاواک معدنی و محدوده سازه‌های زیر زمینی، ۲/۵ برآورد گردیده است. (پارس پی آزما، ۱۳۹۱)

براساس مطالعات انجام شده از عمق و محل قرارگیری ذخیره‌ی اصلی کانسار، فرضیاتی برای مدل‌سازی عمق قرارگیری ماده معدنی و دهانه‌ی تخلیه در نظر گرفته شده است که در زیر به آنها اشاره شده است.

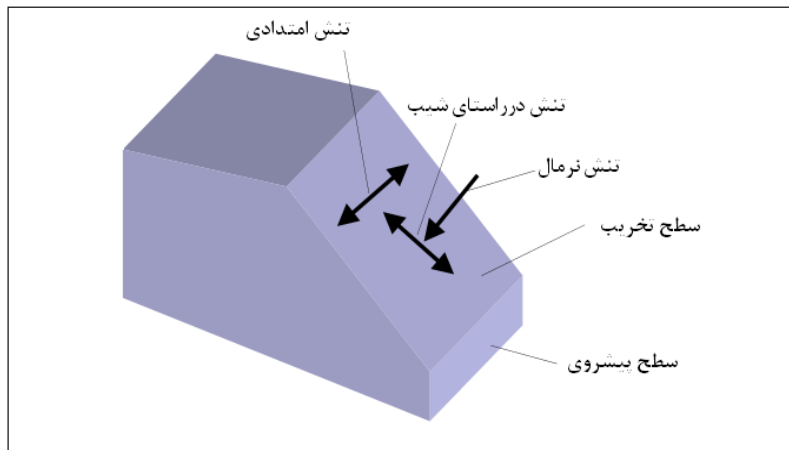
با فرض قرار گرفتن مدل توده سنگ مورد بررسی در عمق ۴۰۰ متری از سطح زمین و این که تنش قائم صرفاً ناشی از وزن طبقات بالاتر باشد، مقدار تنش قائم ناشی از روباره حدود ۱۰ Mpa (مگاپاسکال) برآورد شده است. همچنین با فرض عمق ۵۵۰ متری از سطح زمین برای دهانه‌ی تخلیه، مقدار ارتفاع ستون تخلیه در این مدل برابر با ۱۵۰ متر در نظر گرفته شده است. فرض شده که مقدار عرض فعال تخلیه براساس طرح مفهومی موجود برای طراحی حدود ۳۰ متر باشد. میزان ضریب تورم توده سنگ منطقه براساس ضریب تورم توده سنگ‌های مختلف که بطور معمول عددی بین ۱/۱۵ تا ۱/۴ است، برابر با ۱/۳ در نظر گرفته شده است. نرخ تخلیه در مدل براساس مقدار پیش‌بینی شده در طرح مفهومی برابر با ۲۰ سانتیمتر در روز، فرض شده است. میزان درصد ذرات ریزدانه (کوچکتر از ۱ متر مربع) پس از تحلیل خردشوندگی اولیه تعیین خواهد شد. وزن مخصوص توده سنگ خردشده ۲٫۲ در نظر گرفته شده است.

برای تعیین اختلاف در میزان خردشوندگی اولیه با توجه به نامعلوم بودن مقدار دقیق نسبت تنش افقی به قائم در منطقه‌ی مورد مطالعه، نسبت تنش افقی به قائم در مدل در راستای X برابر با یک و در راستای Y برابر دو در نظر گرفته شده است، تنش‌های القایی موثر بر سطوح زیربرش براساس مدل‌سازی عددی هندسه‌های متفاوت زیربرش با شیب صفحات جانبی صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در شرایط تنش مشابه توسط لابسچر و استرهویزن تعیین شده است ( Esterhuizen G. S., 2005). هندسه‌ی سطوح زیربرش مدل‌سازی شده به همراه ابعاد آنها در شکل ۶-۲۷ نشان داده شده است. مولفه‌های تنش‌های القایی به صورت شماتیک در شکل ۶-۲۸ نشان داده شده است. مقادیر مولفه‌های تنش‌های القایی روی سطح بالایی زیربرش نسبت به تغییر شیب صفحات جانبی در شکل ۶-۲۹ نشان داده شده است.

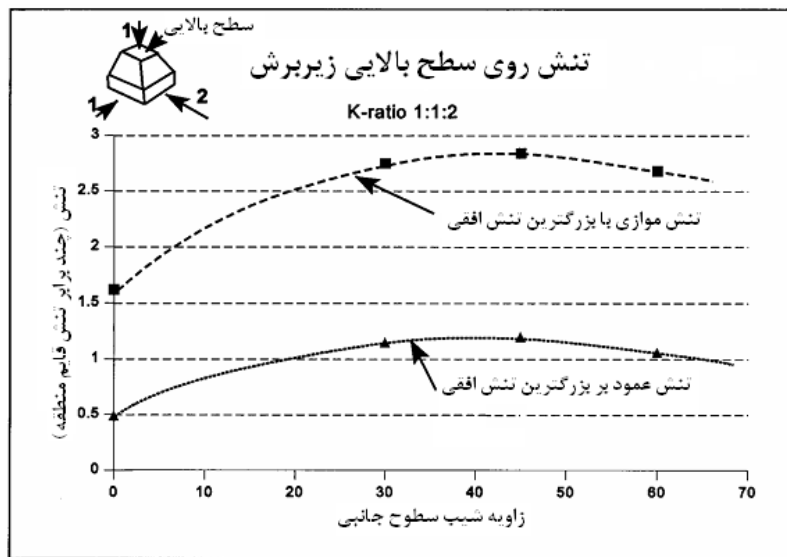




شکل ۶-۲۷: هندسه‌ی سطوح زیربرش مدل‌سازی شده به همراه ابعاد



شکل ۶-۲۸: مولفه‌های تنش‌های القایی روی سطح زیربرش به صورت شماتیک



شکل ۶-۲۹: تغییرات مولفه‌های تنش‌های القایی روی سطح بالایی زیربرش نسبت به تغییر شیب صفحات جانبی (Esterhuizen G. S, 2005)

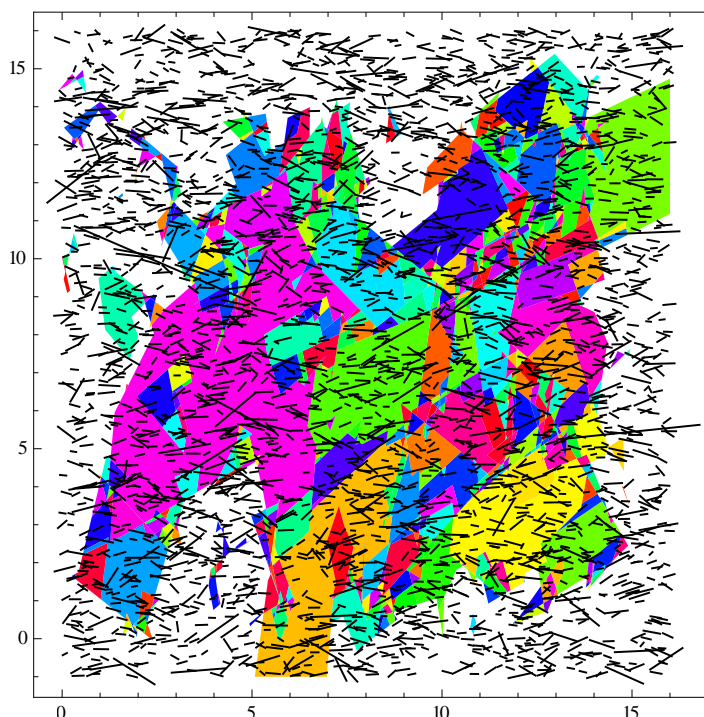
با فرض مدل‌سازی در راستای تنش افقی حداکثر، در یک مدل شیب صفحات جانبی زیربرش ۲۰ درجه در نظر گرفته شده و در مدل دیگر این صفحات افقی فرض شده‌اند.

براساس نمودار نشان داده شده در شکل ۶-۲۹، با افقی در نظر گرفتن سطوح جانبی (کمترین میزان تنش القایی) مقدار تنش القایی برابر با ۱۶ مگاپاسکال خواهد بود و چنانچه سطوح جانبی شیبی حدود ۲۰ درجه داشته باشند، تنش القایی حدود ۲۵ مگاپاسکال خواهد بود.

در جدول ۶-۱۱ کلیه‌ی ورودی‌های مدل تحلیل خردشوندگی اولیه و ثانویه به تفکیک ارائه شده است. پس از ایجاد مدل خردشوندگی برجا براساس مشخصات هندسی ناپیوستگی‌های برداشت شده از منطقه و همچنین ساخت مدل ناپیوستگی‌های بالقوه، این اطلاعات به همراه مقدار تنش القایی و مقاومت ماده سنگ به منظور تحلیل خردشوندگی اولیه وارد نرم افزار PSF شده است. در شکل ۶-۳۰ مدل خردشوندگی برجا به همراه ناپیوستگی‌های بالقوه توده سنگ منطقه نشان داده شده است.

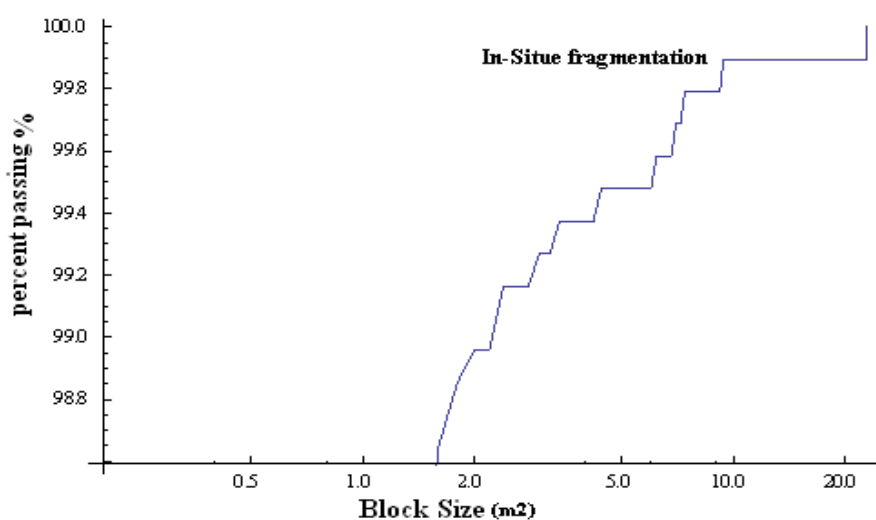
جدول ۶-۱۱: ورودی‌های مورد نیاز مدل تحلیلی خردشوندگی اولیه و ثانویه

| نوع مدل          | نام ورودی    | نماد              | مقدار | واحد              |
|------------------|--------------|-------------------|-------|-------------------|
| خردشوندگی اولیه  | تنش القایی   | $\sigma_{\theta}$ | ۱۶    | Mpa               |
|                  | مقاومت       | $\sigma_c$        | ۲۵    | Mpa               |
|                  | مدل هندسی    | ----              | ----  | ----              |
|                  | خروجی        | -----             | ----- | -----             |
|                  | مقاومت       | $\sigma_c$        | ۴۶    | Mpa               |
| خردشوندگی ثانویه | وزن          | $\gamma$          | ۲۲۰۰  | Kg/m <sup>3</sup> |
|                  | ارتفاع تخلیه | Hd                | ۱۵۰   | m                 |
|                  | ضریب تورم    | Sf                | ۱/۳   | ---               |
|                  | درصد ذرات    | f                 | ---   | ---               |
|                  | عرض فعال     | Wd                | ۳۰    | m                 |
|                  | نرخ تخلیه    | Rd                | ۲۰    | Cm/day            |
|                  | بلوک‌های     | ----              | ----  | ----              |
|                  |              |                   |       |                   |



شکل ۳۰-۶: مدل خردشدگی برجا به همراه ناپیوستگی‌های بالقوه

نمودار توزیع ابعادی بلوک‌های حاصل از خردشدگی برجا در شکل ۳۱-۶ نشان داده شده است.

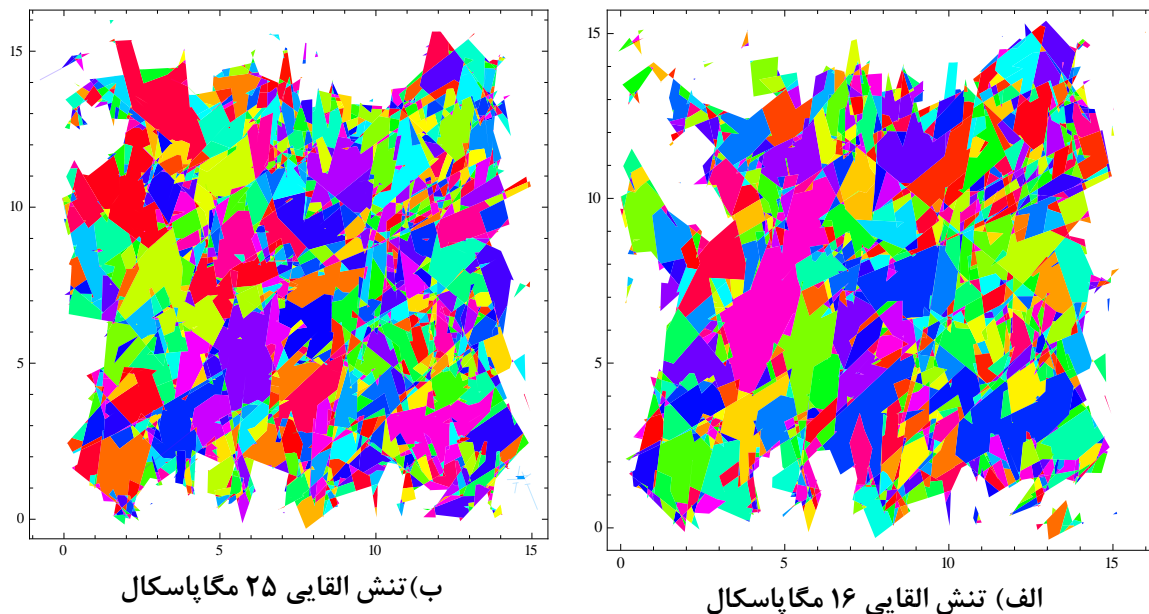


شکل ۳۱-۶: نمودار نیمه لگاریتمی توزیع ابعادی بلوک‌ها در حالت خردشدگی برجا

## ۲-۱۰-۶- تحلیل خردشوندگی اولیه

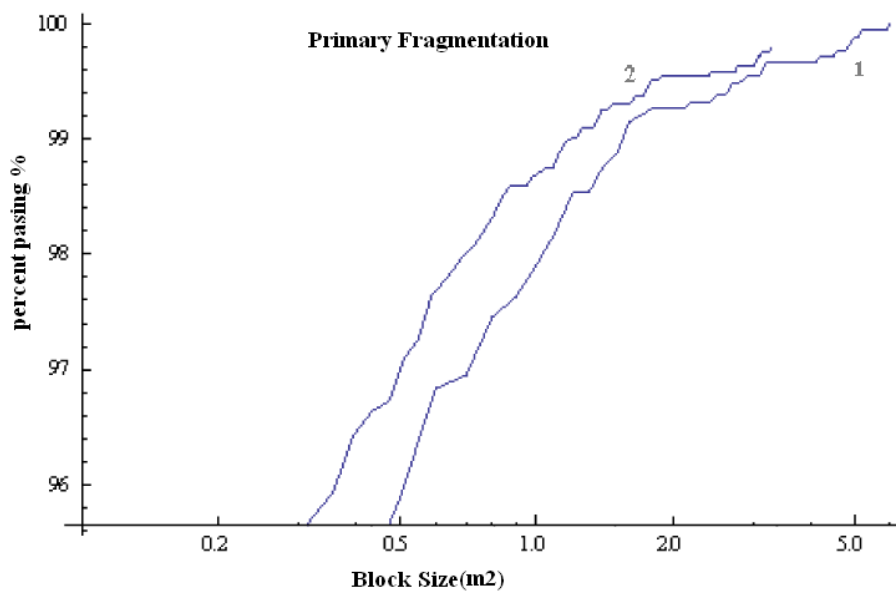
تحلیل خردشوندگی اولیه برای هر دو حالت تنش القایی مفروض انجام شده است. خردشدگی

بلوک‌های مدل برای مقایسه در شکل ۳۲-۶ نشان داده شده است.



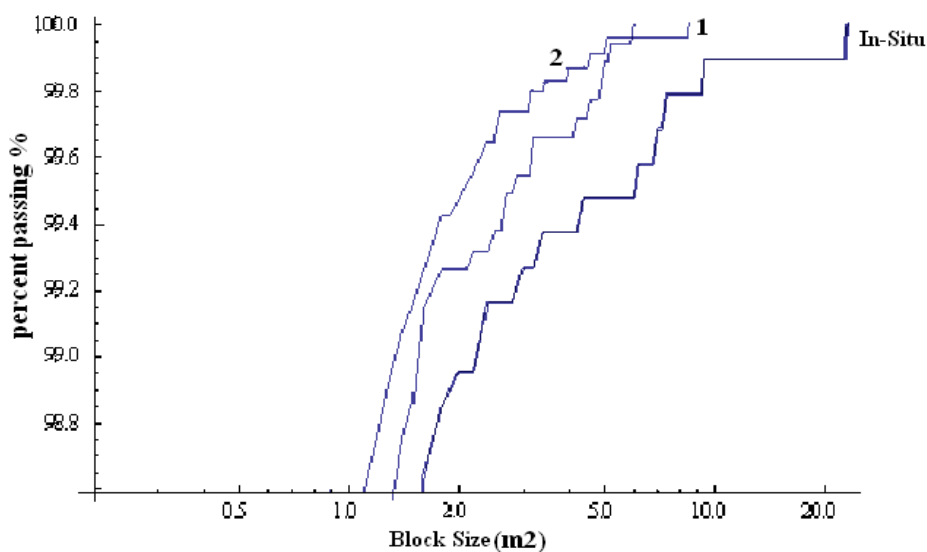
شکل ۳۲-۶: نمایی از خردشوندگی اولیه بلوک‌ها در شرایط تنش القایی متفاوت

برای مقایسه‌ی بهتر میزان خردشوندگی اولیه، نمودار نیمه لگاریتمی توزیع ابعادی بلوک‌ها در دو حالت متفاوت تنش القایی در شکل ۳۳-۶ نمایش داده شده است. نمودار شماره‌ی ۱ حاصل از تنش القایی ۱۶ مگاپاسکال و نمودار شماره‌ی ۲ مربوط به تنش القایی ۲۵ مگاپاسکال است.

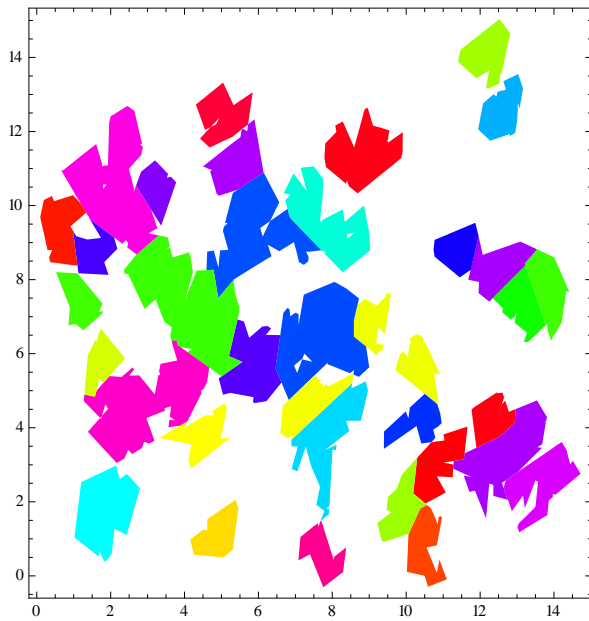


شکل ۳۳-۶: نمودارهای توزیع ابعادی بلوک‌ها پس از خردشوندگی اولیه

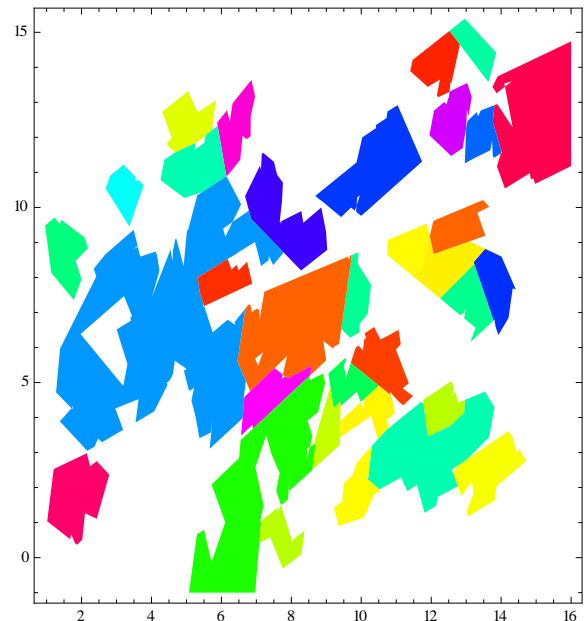
همانگونه که انتظار می‌رفت میزان خردشوندگی اولیه در حالتی که تنش القایی بزرگتر است، بیشتر بوده و نمودار ۲ نسبت به نمودار ۱ به سمت چپ منتقل شده است. نکته‌ی قابل توجه در این نمودار این است که هرچه ابعاد بلوک‌ها بزرگتر شده است این دو نمودار به یکدیگر نزدیکتر شده‌اند. دلیل عمده‌ی این امر را می‌توان تشکیل بلوک‌های جدید حاصل از طول بزرگتر سطوح ضعیفی که در تنش‌های القایی بالاتر به ناپیوستگی‌های بالفعل تبدیل شده‌اند، دانست. این واقعیت در شکل ۶-۳۲، در بالا و سمت چپ شکل‌های الف و ب مشهود است. برای مقایسه‌ی بهتر تغییرات ابعاد بلوک‌ها نسبت به حالت خردشدگی برجا نمودار کلی خردشدگی برجا و خردشوندگی‌های اولیه به صورت خروجی از نرم‌افزار گرفته شده که در شکل ۶-۳۴ نشان داده شده است. همچنین بلوک‌های با ابعاد بزرگتر از ۱ متر مربع برای حالت خردشدگی برجا و خردشوندگی اولیه با تنش القایی ۲۵ مگاپاسکال در شکل ۶-۳۵ نشان داده شده است.



شکل ۶-۳۴: نمودارهای توزیع ابعادی بلوک‌ها در حالت برجا و پس از خردشوندگی اولیه در حالت ۱ و ۲



ب) حاصل از خردشوندگی اولیه در حالت ۲



الف) حاصل از خردشوندگی برجا

شکل ۶-۳۵: بلوک‌های کامل با ابعاد بزرگتر از ۱ متر مربع

### ۶-۱۰-۳- تحلیل خردشوندگی ثانویه

براساس نتایج خروجی خردشوندگی اولیه و مولفه‌های ذکر شده در جدول ۶-۱۳، خردشوندگی

ثانویه برای بلوک‌های حاصل از خردشوندگی اولیه‌ی در حالت ۱ در این بخش تحلیل شده است.

تحلیل خردشوندگی ثانویه برای هر بلوک به صورت مجزا انجام خواهد شد، روش تحلیل

همانگونه که پیشتر توضیح داده شد بر مبنای محاسبه‌ی ارتفاع چرخه‌ی لازم برای شکست بلوک از

روی سطوح ضعف موجود و یا از وسط بلوک با توجه به میزان ضریب تناسب ظاهری آن است. به

عبارت دیگر در هر بخشی که بلوک لاغرتر باشد احتمال شکست در آن راستا و در همان موقعیت

بیشتر خواهد بود.

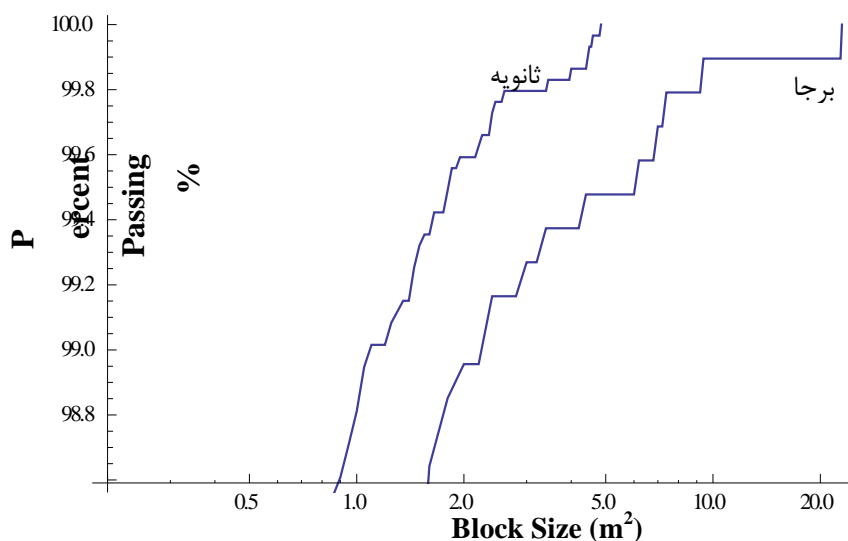
مقاومت هر بلوک یکی از مولفه‌های لازم برای محاسبه‌ی ارتفاع چرخه، محسوب می‌شود. این

مقاومت متأثر از نوع و تعداد ناپیوستگی بالقوه در داخل بلوک است. در بخش‌های قبلی در مورد مقدار

مقاومت بلوک براساس نوع ناپیوستگی بالقوه توضیح داده شده است.

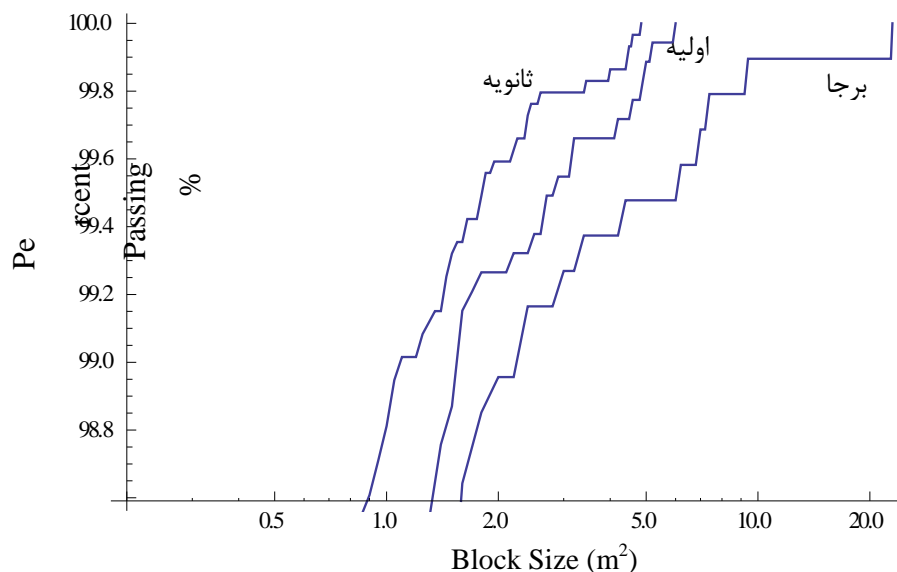
میزان ذرات ریز دانه‌ی محاسبه شده در مدل خردشوندگی اولیه برای حالت تنش القایی ۱۶ مگاپاسکال، حدود ۵۴ درصد محاسبه شده است و به عنوان ورودی به مدل خردشوندگی ثانویه داده شده است.

نمودار توزیع ابعادی شکل ۶-۳۶، میزان ابعاد بلوک‌ها را برای دو حالت خردشدگی برجا و خردشوندگی ثانویه نشان داده است.



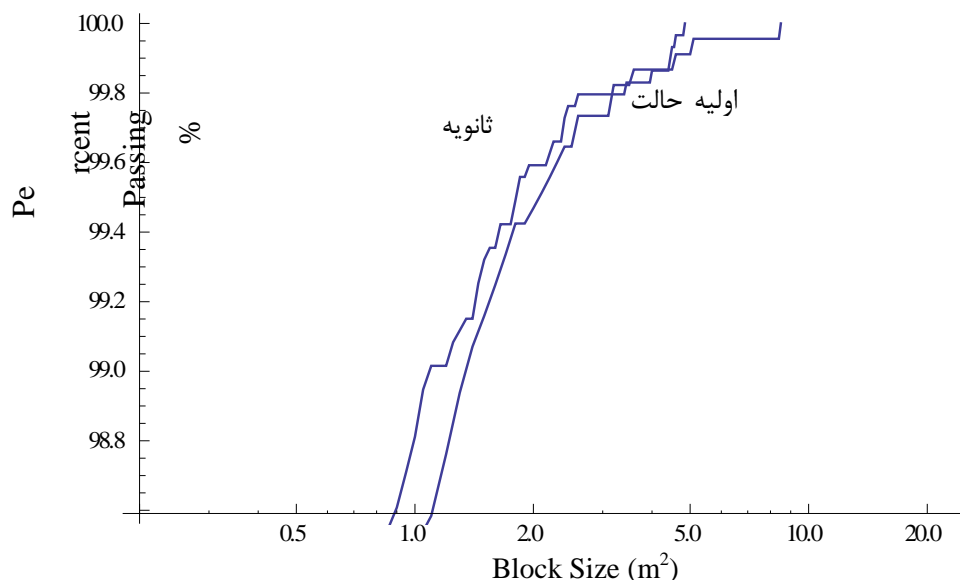
شکل ۶-۳۶: نمودارهای توزیع ابعادی بلوک‌ها در حالت برجا و پس از خردشوندگی ثانویه

در شکل ۶-۳۷ نمودار توزیع ابعادی بلوک‌ها در سه حالت خردشدگی برجا، خردشوندگی اولیه و خردشوندگی ثانویه، نشان داده شده است.



شکل ۶-۳۷: نمودارهای توزیع ابعادی بلوک‌ها در حالت برجا و پس از خردشوندگی اولیه و خردشوندگی ثانویه

به منظور مقایسه‌ی توزیع ابعادی بلوک‌های حاصل از خردشوندگی اولیه در حالت تنش القایی ۲۵ مگاپاسکال با مقادیر ابعاد بلوک‌های حاصل از خردشوندگی ثانویه در مدل با تنش القایی ۱۶ مگاپاسکال نمودار در شکل ۳۸-۶ نشان داده شده است.



شکل ۳۸-۶: نمودارهای توزیع ابعادی بلوک‌ها در حالت خردشوندگی اولیه با تنش القایی ۲۵ مگاپاسکال و خردشوندگی ثانویه

در شکل ۳۹-۶ بلوک‌های با ابعاد بزرگتر از ۱ متر مربع برای حالت خردشوندگی اولیه با تنش القایی ۲۵ مگاپاسکال و خردشوندگی ثانویه پس از ارتفاع چرخه‌ی اول و یک مرحله خردشوندگی برای همه‌ی بلوک‌ها نشان داده شده است.

در چرخه‌ی اول بیشترین ارتفاع چرخه‌ی تعیین شده برای یکی از بلوک‌ها، برابر با ۸۷/۴ متر بوده است. اکثر بلوک‌ها ( ۹۹/۲ درصد) در چرخه‌ی دوم به مقدار خردشوندگی مطلوب (کوچکتر یا مساوی با ۱ مترمربع) رسیده‌اند. و مقدار ارتفاع کل چرخه برای آنها کمتر از ۱۵۰ متر که در جدول ۱۱-۶ به عنوان ارتفاع تخلیه در نظر گرفته شده، ثبت شده است.





از دیگر محدودیت‌های نرم‌افزارهای عددی، حجم محاسبات بسیار بالا است و استفاده نکردن از حافظه‌ی سیستم کامپیوتر برای اجرا است.

تنها امکان مقایسه‌ی نتایج با نرم افزار<sup>1</sup> BCF وجود داشت که تلاش‌های زیاد برای تهیه‌ی این نرم‌افزار بی‌نتیجه ماند. لازم به ذکر است که این نرم‌افزار دارای اصول تحلیلی مشابه نرم‌افزار تهیه شده است این نرم‌افزار بصورت سه بعدی و با فرض درزه‌های نامحدود است. همچنین امکان شبیه‌سازی سطوح ضعف نیز در آن وجود ندارد و تنها خواص بلوک‌های سنگی در آن براساس نظرات لابسچر که قبلاً بیان شد، تغییر داده می‌شود.

با توجه به موارد گفته شده در اعتبارسنجی نرم افزار تهیه شده در مورد خردشوندگی اولیه و ثانویه به اعتبار و درستی روابط ارایه شده توسط متخصصان این حوزه و مورد قبول بودن و استفاده عملیاتی از این روابط به منظور پیش امکان‌سنجی و امکان‌سنجی خردشوندگی، اکتفا شده است. لازم به ذکر است که آنچه نرم‌افزار حاضر را از دیگر نرم‌افزارهای عددی و تحلیلی ارایه شده و قابل کاربرد در این حوزه، متمایز کرده است عبارتست از: در نظر گرفتن ناپایایی و ترتیب زایش هر چند دسته درزه، مدل‌سازی سطوح ضعف داخل بلوک‌ها و تعیین مقاومت بلوک براساس مقاومت سطوح ضعف.

## ۶-۱۲- جمع‌بندی

در این بخش تخریب‌پذیری و خردشوندگی، از دو منظر مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. چرا که در واقع تحلیل تخریب‌پذیری و خردشوندگی از دیدگاه ژئومکانیکی از مقیاس توده سنگ تا مقیاس یک بلوک سنگی مجزا را شامل می‌شود. نگاه اول، نگاه کل‌گرا به توده سنگ و برآورد تخریب‌پذیری کلی براساس مولفه‌ی پایایی درزه است. نگاه دوم، نگاهی جزء‌گرا در مقیاس یک فضای استخراج طراحی شده در مورد خردشوندگی اولیه و یا حتی در مقیاس یک بلوک سنگی مجزا در مورد خردشوندگی ثانویه است.

در بخش اول جمع‌بندی مطالب ارایه شده شامل موارد ذیل است:

- مزیت استفاده از روش تخمین زمین آماری، تعیین شعاع تاثیر برای مشخص نمودن کافی بودن فاصله بین گمانه‌های انتخاب شده، همچنین تعیین خطای تخمین و اعتباریابی نتایج بدست آمده است، که این میزان تا بیش از ۹۵ درصد تامین گردید.

در بخش دوم جمع‌بندی مطالب ارایه شده شامل موارد ذیل است:

- نتایج مدل‌سازی هندسی انجام شده توسط نرم‌افزار  $CAV-DFN^{2D}$  در مقایسه با واقعیت موجود بسیار رضایت بخش بوده است. با توجه به قابلیت‌های تعریف شده در نرم‌افزار  $CAV-DFN^{2D}$  از آن به عنوان ابزاری توانمند و مناسب برای برآورد خردشدگی برجای توده سنگ استفاده شده است.
- در مرحله‌ی تحلیل خردشوندگی اولیه و ثانویه سطوح ضعف (درزه‌های بالقوه) نیز توسط نرم‌افزار  $CAV-DFN^{2D}$  با در نظر گرفتن رابطه بین میزان بازشدگی (ضخامت پرشدگی) با طول اثر درزه، براساس داده‌های حاصل از پردازش تصویر مغزه‌ها و برداشت مستقیم از مغزه‌ها، شبیه‌سازی شده است.
- درصد مساحت بلوک‌های با سطح کوچکتر از ۱ متر مربع (ذرات ریز دانه) در مدل خردشدگی برجا برابر با ۳۶/۵ درصد محاسبه شد.
- در بررسی خردشوندگی اولیه، با در نظر گرفتن تنش القایی ۲۵ مگاپاسکال نسبت سطح بلوکی شده به ابعاد کل مدل حدود ۷۷ درصد محاسبه شده است. درصد سطح بلوک‌های با مساحت کوچکتر از ۱ متر مربع (ذرات ریز دانه) در این مدل حدود ۵۸ درصد محاسبه شد.
- در بررسی خردشوندگی ثانویه، در چرخه‌ی اول بیشترین ارتفاع چرخه‌ی تعیین شده برای یکی از بلوک‌ها، حدود ۸۷ متر بوده است.
- در حدود ۹۹ درصد از بلوک‌های موجود، در ارتفاع چرخه‌ی دوم به مقدار خردشوندگی مطلوب (کوچکتر یا مساوی با ۱ مترمربع) رسیدند. و مقدار ارتفاع کل چرخه برای آنها کمتر از ۱۵۰ متر ثبت شد.

- مقایسه‌ی منحنی‌های توزیع ابعادی بلوک‌ها برای خردشوندگی اولیه با تنش القایی ۲۵ مگاپاسکال و خردشوندگی ثانویه‌ی بلوک‌های حاصل از مدل خردشوندگی اولیه با تنش القایی ۱۶ مگاپاسکال، نشان می‌دهد که این دو منحنی بسیار به هم نزدیک هستند. که این مسئله ناشی از زیاد بودن نقش جدایش از روی سطوح ضعف در خردشوندگی است

## فصل هفتم

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۷-۱- نتیجه‌گیری

مهمترین نتایج تحقیق به تفکیک بخش‌های مختلف ارایه شده است.

عمده‌ترین نتایج بدست آمده از برنامه‌ی پردازش تصویر و طراحی و اجرای روش آزمایش پیشنهاد شده برای تعیین سطوح ضعف به عنوان عوامل اصلی خردشوندگی اولیه و ثانویه در چند بخش بصورت ذیل ارایه شده است:

- به منظور صحت‌سنجی نتایج روش پردازش تصویر با استفاده از برنامه‌ی تهیه شده، موارد کنترلی، از جمله مقایسه با نتایج تعیین چشمی مولفه‌ها از روی تصاویر و همچنین مقایسه مولفه RQD با مقادیر واقعی لاگ ثبت شده در جعبه‌مغزه‌ها، بکار گرفته شد، در نهایت دقت برنامه‌ی تهیه شده (DCP) و قابل اطمینان بودن مولفه‌های  $P_{10}$  و RQD حاصل از آن تا بیش از ۹۰ درصد مورد تایید قرار گرفت.

- با توجه به نتایج نهایی بدست آمده از آزمایش طراحی شده (جدول ۳-۳) می‌توان برآورد چشمی و تعیین سطوح ضعف قبل از رخداد شکست و خردشدگی را خوب دانست.

- درصد خطای تعیین نوع سطح شکست برای درزه‌های نوع ۲ در این آزمایش ۳۲ درصد و برای درزه‌های نوع ۳، ۳۷.۵ درصد بدست آمد.

- براساس تفکیک سطح انرژی مورد نیاز برای شکست، درزه‌های نوع ۱، ۳۰ درصد انرژی لازم برای شکست ماده سنگ و درزه‌های نوع ۲ و ۳ به ترتیب ۶۰ و ۹۰ درصد انرژی شکست ماده سنگ را برای تبدیل شدن به درزه‌های بالفعل نیاز دارند.

نتایج بدست آمده از برداشت سطوح ضعف از روی مغزه‌های اکتشافی معدن کهنک نشان می‌-

دهد که:

- عامل اصلی شکست ثانویه در مغزه‌ها، وجود سطوح ضعف به ویژه رگچه‌های موجود در آن است.

- از بررسی مغزه‌ها در عمق مشخص می‌شود که منطقه تنیده نیست (تحت تاثیر تنش‌های زیادی نبوده است). عدم خرد شدگی سنگ‌های منطقه با وجود رگچه‌ها و رگه‌های زیادی که در آن وجود دارد، تایید کننده‌ی این موضوع است.
- مقایسه کلی بین تصاویر مغزه‌ها قبل و بعد از برش، نشان می‌دهد که درصد زیادی از ناپیوستگی‌های ثانویه که شامل شکستگی از روی سطح زمینه سنگ و شکستگی در امتداد رگچه‌ها می‌شود، در هنگام برش و یا بر اثر عوامل انسانی ایجاد شده است.
- نتایج اصلی بدست آمده از بخش تحلیل تخریب‌پذیری توده سنگ معدن کهنک را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:
  - با توجه به نتایج بدست آمده از تهیه نگاره‌های توده سنگ معدن و تخمین زمین آماری شدت درزه‌داری حجمی، می‌توان گفت به طور متوسط در بین ترازهای ۴۰۰ تا ۷۰۰ متری از سطح زمین که عمده ذخیره‌ی کانسار در آن واقع شده، توده سنگ دارای خردشدگی برجای کم و پتانسیل پایینی برای تشکیل بلوک‌های قابل حرکت است و به عبارت دیگر پتانسیل تخریب-پذیری کمی را خواهد داشت. ولی برای هر بلوک تخمین زده شده در این محدوده بصورت مجزا شرایط خردشدگی ممکن است تا حدی متفاوت باشد.
  - نتایج بدست آمده از پردازش تصویر و تخمین زمین آماری نگاره‌های ثبت شده، تغییری ناگهانی را در کیفیت توده سنگ و تعداد درزه‌های موجود در آن را با یک سطح جدایش مشخص در ارتفاع حدود ۲۰۰۰ متری از سطح دریا نشان می‌دهد که در گزارش‌های مطالعه‌های ژئوفیزیکی منطقه نیز به چنین نکته‌ای اشاره شده است.
  - مزیت استفاده از روش تخمین زمین آماری، تعیین شعاع تاثیر برای مشخص نمودن کافی بودن فاصله بین گمانه‌های انتخاب شده، همچنین تعیین خطای تخمین و اعتباریابی نتایج بدست آمده است، که این مقدار تا بیش از ۹۵ درصد تامین شده است.

- مهمترین نتیجه‌ی حاصل از مدل‌سازی هندسی ناپیوستگی‌های برداشت شده را می‌توان به- صورت زیر بیان نمود:
- نتایج مدل‌سازی هندسی انجام شده توسط نرم‌افزار CAV-DFN<sup>2D</sup> در مقایسه با واقعیت موجود بسیار رضایت بخش بوده است. با توجه به قابلیت‌های تعریف شده در نرم‌افزار CAV-DFN<sup>2D</sup> از آن به عنوان ابزاری توانمند و مناسب برای برآورد خردشوندگی برجای توده سنگ استفاده شده است.
  - از قابلیت‌های اصلی بسته‌ی تهیه شده برای تحلیل خردشوندگی، در نظر گرفتن هندسه‌ی ناپیوستگی‌ها به صورت ناپایا است که بیشترین تطابق را با واقعیت دارد.
  - نتایج اصلی بدست آمده از تحلیل خردشدگی برجا، خردشوندگی اولیه و خردشوندگی ثانویه، در ذیل ارائه شده است:
  - به منظور تعیین اندازه مدل معرف (RES) برای برآورد خردشدگی برجا، پس از تکرار مدل‌سازی هندسی برای ابعاد مختلف (۶۰ مدل برای هر یک از ابعاد مختلف مدل در پنج اندازه‌ی مختلف) و بررسی تمامی نتایج آماری به دست آمده از آنها، در نهایت مدل ۱۵×۱۵ متر مربع در مقایسه با واقعیت موجود و برداشت شده مناسب تشخیص داده شد.
  - در بررسی خردشدگی برجا، نسبت سطح بلوکی شده به کل مدل ۶۹/۵ درصد محاسبه شده است. با بررسی منحنی‌های توابع چگالی احتمال و چگالی تجمعی مساحت بلوک‌ها مشخص می‌گردد که بیش از ۹۹ درصد از بلوک‌های کامل تشکیل شده دارای مساحتی کوچکتر یا مساوی ۵ متر مربع هستند.
  - درصد مساحت بلوک‌های با سطح کوچکتر از ۱ متر مربع (ذرات ریز دانه) در مدل خردشدگی برجا برابر با ۳۶/۵ درصد محاسبه شد.



- در بررسی خردشوندگی اولیه، با در نظر گرفتن تنش القایی ۱۶ مگاپاسکال نسبت سطح بلوکی شده به ابعاد کل مدل در حدود ۷۷ درصد محاسبه شده است. درصد سطح بلوک‌های با مساحت کوچکتر از ۱ متر مربع (ذرات ریز دانه) در این مدل در حدود ۵۴ درصد محاسبه شد.
- در بررسی خردشوندگی اولیه، با در نظر گرفتن تنش القایی ۲۵ مگاپاسکال، نسبت سطح بلوکی شده به ابعاد کل مدل در حدود ۷۷ درصد محاسبه شده است. درصد سطح بلوک‌های با مساحت کوچکتر از ۱ متر مربع (ذرات ریز دانه) در این مدل برابر با ۵۸/۵۰ درصد محاسبه شد.
- در بررسی خردشوندگی ثانویه، در چرخه‌ی اول بیشترین ارتفاع چرخه‌ی تعیین شده برای یکی از بلوک‌ها، حدود ۸۷ متر بوده است.
- در حدود ۹۹ درصد از بلوک‌های موجود، در ارتفاع چرخه‌ی دوم به مقدار خردشوندگی مطلوب (کوچکتر یا مساوی با ۱ مترمربع) رسیدند. و مقدار ارتفاع کل چرخه برای آنها کمتر از ۱۵۰ متر ثبت شد.
- با احتساب بخشی از خردشوندگی ثانویه به علت پدیده‌ی تاق زدگی می‌توان با فرض‌های موجود مساله، ارتفاع ۱۵۰ متر با عرض فعال ۳۰ متر، برای ستون تخلیه را مقدار خوبی قلمداد نمود.
- مقایسه‌ی منحنی‌های توزیع ابعادی بلوک‌ها برای خردشوندگی اولیه با تنش القایی ۲۵ مگاپاسکال و خردشوندگی ثانویه‌ی بلوک‌های حاصل از مدل خردشوندگی اولیه با تنش القایی ۱۶ مگاپاسکال، نشان می‌دهد که این دو منحنی بسیار به هم نزدیک هستند. که این مساله ناشی از زیاد بودن نقش جدایش از روی سطوح ضعف در خردشوندگی است
- در برنامه‌ی کامپیوتری PSF برخلاف نظر لابسچر که فقط مولفه‌ی اصطکاکی مواد پرکننده برای سطوح ضعف را کمی‌سازی می‌کند، میزان انرژی لازم برای جدایش از روی این سطوح مورد توجه است.

- در کمی‌سازی سطوح ضعف به عنوان داده‌ی ورودی به برنامه‌ی PSF، ضخامت ماده پُرکننده به معنای معادل بازشدگی و شاخصی از طول اثر این سطوح نقش زیادی را در نتایج تحلیل دارد که در محاسبات لابسچر در نظر گرفته نشده است.
- در اعتبارسنجی نرم افزار تهیه شده در مورد خردشوندگی اولیه و ثانویه به اعتبار و درستی روابط ارایه شده توسط متخصصان این حوزه و مورد قبول بودن و استفاده عملیاتی از این روابط به منظور پیش امکان‌سنجی و امکان‌سنجی خردشوندگی، اکتفا شده است.
- آنچه نرم‌افزار حاضر را از دیگر نرم‌افزارهای عددی و تحلیلی ارایه شده و قابل کاربرد در این حوزه، متمایز کرده است عبارتست از: در نظر گرفتن ناپایایی و ترتیب زایش هر چند دسته درزه، مدل-سازی سطوح ضعف داخل بلوک‌ها و تعیین مقاومت بلوک براساس مقاومت سطوح ضعف.

## ۷-۲- پیشنهادها

- با توجه به نتایج بدست آمده در بخش‌های مختلف پیشنهادهایی برای بهبود تحلیل‌های انجام شده و استفاده از بسته‌ی نرم‌افزاری تهیه شده ارایه شده است:
- بهبود شرایط انجام آزمایش کمی‌سازی سطوح ضعف، از جمله ایجاد شرایطی برای برخورد کاملاً افقی سطح موزاییکی با سطح ماسه‌ی کف، اندازه‌گیری انرژی برخورد به شیوه‌ای دقیق‌تر به همراه ثبت همزمان داده‌های آن، انجام آزمایش برای سنگ‌های مختلف و ...
  - گسترش برنامه‌ی نوشته شده برای مدل‌سازی هندسی و تحلیل خردشوندگی از حالت دوبعدی به سه‌بعدی
  - انجام مدل‌سازی‌های عددی کوچک مقیاس برای بررسی تغییرات رفتار سطوح ضعف در شرایط خردشوندگی ثانویه

- انجام مدل سازی عددی با در نظر گرفتن شرایط مدل برای هر بلوک بصورت مجزا، همانند شرایط در نظر گرفته شده برای تحلیل خردشوندگی ثانویه در نرم افزار تهیه شده، برای غلبه بر مشکل زمان بر و غیرقابل حل بودن معادلات تغییرشکل و جابجایی تمامی بلوکها بصورت همزمان
- باز تعریف برنامه ی کامپیوتری نوشته شده برای تحلیل خردشوندگی اولیه و ثانویه براساس نظرات لابسچر برای برآورد مقاومت بلوک دارای سطوح ضعف و مقایسه ی نتایج با نرم افزار فعلی با استفاده از داده های کامل یک مورد عملیاتی واقعی
- استفاده از نرم افزار تهیه شده در موارد عملیاتی واقعی به منظور تحلیل حساسیت شرایط، در مراحل امکان سنجی و پیش امکان سنجی
- امکان تخمین و برآورد اولیه از ابعاد بهینه ی زیربرش، ارتفاع و عرض فعال ستون تخلیه براساس شرایط توده سنگ و تنش های برجای موجود در موارد عملیاتی واقعی

## منابع

امینی، ا. و یاراحمدی بافقی، ع. (مهر ۱۳۸۶). "مدل سازی سه بعدی هندسی ، ژئوتکنیکی توده سنگ های درزه دار به روش آماری ( مطالعه موردی: بلوک تکتونیک II معدن چغارت)". **مجموعه مقالات سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران** ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

حسینی پاک، ع. ا. (۱۳۸۰)، "زمین آمار"، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم،

سی. گونزالس رافائل - ای. وودز ریچارد، (۱۳۸۷)، "پردازش تصویر دیجیتال"، ترجمه جعفرنژاد قمی عین الله، انتشارات علوم رایانه، چاپ دوم.

سی. گونزالس رافائل - ای. وودز ریچارد، (۱۳۸۸)، "پردازش تصویر دیجیتال در مطلب"، ترجمه: مصطفی کیا، انتشارات خدمات نشر کیان رایانه سبز، چاپ اول.

کاک ممی، س (۱۳۹۰)، پایان نامه ارشد: "مدل سازی هندسی - ژئوتکنیکی معدن سنگ آهن چاه گز به روش دیسک های تصادفی با استفاده از پردازش تصویر" دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد.

گودرزی، ه. و یاراحمدی بافقی، ع. (آبان ۱۳۹۲). "مدل سازی سه بعدی هندسی - ژئوتکنیکی توده سنگ های درزه دار به روش دیسک های تصادفی (ارائه برنامه RD3DGM)"، **مجموعه مقالات دهمین کنفرانس ملی تونل، تهران**.

نوروزی، م. (۱۳۹۳)، رساله دکتری: "برآورد مقاومت توده سنگ دارای ناپیوستگی های ناپایا با استفاده از مدل تصادفی شبکه درزه های مجزا" دانشکده مهندسی معدن نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

مبینی، م. (۱۳۹۰)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "بهبود فرایند درزه نگاری در توده سنگ های درزه دار با بکارگیری تکنیک های پردازش تصویر" دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد.

مهندسین مشاور پارس پی آزما (۱۳۹۱)، گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیک و مکانیک سنگ فاز مقدماتی در محدوده کانسار مس کهنگ.

Baecher G. B., Einstein H. H., Lanney N. A. (1977), "Statistical description of rock properties and sampling", Energy resources and excavation technology, The 18<sup>th</sup> U.S. symposium on rock mechanics, Golden: Colo. Sch. Mines Press, pp. 1–8.

Baghbanan, A., Jing, L. (2008), "Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture", **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 44, pp. 704–719.

Bang S. H., Jeon S., Kwon S. (2012), "Modeling the hydraulic characteristics of a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture: application in the underground research tunnel at Kaeri", **Nuclear Engineering and Technology**, 44, 6.

Brown, E.T., (2003), Block caving geomechanics, The International Caving Study Stage I 1997-2000, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Brisbane, Australia.

Canny, J. F. (1986), "A computational approach to edge detection", IEEE Transactions. Pattern Analysis Machine Intelligence. 8, pp. 679–698.

Carranza-Torres C. (1998), Study of the relationship between caved column height and pressure at the cave base, Itasca Consulting Group, Minneapolis.

Chen, S., Yue, Z.Q., & Tham, L.G, (2004), "Digital image-based numerical modeling method for prediction of inhomogeneous rock failure", **Rock Mechanics & Mining Sciences** 41 939–957.

Deb, D., Hariharan, S., Rao, U. M., & Ryu, C. H. (2008). "Automatic detection and analysis of discontinuity geometry of rock mass from digital images", **Computers & Geosciences** 34, pp. 115–126.

Dershowitz, W. S., Herda, H. H. (1992). "Interpretation of fracture spacing and intensity". In: Proceedings of 33<sup>rd</sup> US Symposium on Rock Mechanics. Rotterdam: Balkema; p. 757–766.

Dershowitz, W. S., Einstein, H. H., (1988), "Characterizing rock joint geometry with joint system models". **Rock Mechanics and Rock Engineering** 21, 21–51.

Eadie, B. A. (2002), Modelling primary and secondary fragmentation for block caving. **PhD thesis** (unpublished), University of Queensland, Brisbane.

- Elmo, D. (2006), "Evaluation of a hybrid FEM/DEM approach for determination of rock mass strength using a combination of discontinuity mapping and fracture mechanics modeling, with particular emphasis on modelling of jointed pillars". **PhD Thesis**, Camborne School of Mines, University of Exeter U.K.
- Elmo, D., Vyazmensky, A., Stead, D., Rance, J. R. 2007a. "A hybrid FEM/DEM approach to model the interaction between open pit and underground block caving mining". In: **Proceedings of the 1 st Canadian-US Rock Mechanics Symposium**, Vancouver, Canada, Vol 2, 1287-1294.
- Elmo D., Vyazmensky, A., Stead, D., Rance. J. 2008a. "Numerical analysis of pit wall deformation induced by block caving mining". In: **Proceedings of the 5th Conference and Exhibition on Mass Mining**, Lulea, Sweden, June 2008, 1073-1082.
- Elmo, D., Rogers, S., Beddoes, R. and Catalan, A. (2010). "An integrated finite/discrete element method - discrete fracture network synthetic rock mass approach for the modelling of surface subsidence associated with panel cave mining at the Cadia East underground project", in **Proceedings 2nd International Symposium on Block and Sublevel Caving (Caving 2010)**, Y. Potvin (ed), 20-22 April 2010, Perth, Australia, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 167-180.
- Esterhuizen, G. S. (2005). A Program to Predict Block Cave Fragmentation. Technical Reference and User's Guide, Version 3.05.
- Flynn, Z. N., Pine, R. J. (2007), "Fracture characterisation determined by numerical modelling analyses", The 11<sup>th</sup> Congress of the international Society for Rock Mechanics, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-45084-3.
- Goodman, R. E., (1979), Methods of geological engineering in discontinuous rocks. St. Paul: West Publishing Co.
- Grenon, M., Hadjigeorgiou, J. (2008), "A design methodology for rock slopes susceptible to wedge failure Using fracture system modeling", **Engineering Geology** 96, 78–93.
- Hadjigeorgiou, J., Esmaili, K., Grenon, M. (2008). "Stability analysis of vertical excavations in hard rock by integrating a fracture system into a PFC model." In: **Tunnelling and Underground Space Technology**, article in press.
- Hamrin, H. (2001). Underground mining methods and applications. Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Histories, (Ed: W A Hustrulid and R L Bullock), 3-14. Society for Mining, Metallurgy and Exploration: Littleton, Colorado.
- Heliot D., (1988), PhD. thesis, "Conception et realisation d'un outil integre de modelisation des massifs rocheux fracture en blocs" . **These INPL** , Laboratoire de mecanique des terrains , Nancy , France.

- Hudson J. A., La Pointe (1980), "Printed circuits for studying rock mass permeability", **International journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics abstracts**, Technical Note, 17, 5, pp. 297-301.
- Hudson, J. A., Priest, S. D. (1983). "Discontinuity Frequency in Rock Masses". **International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics**, Abstract, 20(2), 73-89.DOI:10.1016/0148-9062(83)90329-7.
- Ivanova V., Xiaomeng Y., Veneziano D., Einstein H. H. (1995), "Development of stochastic models for fracture systems", **Rock Mechanics**, Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 552 6.
- Kang, C. C., Wang, W. J. (2007). "A novel edge detection method based on the maximizing objective function", *Pattern Recognition* 40, pp. 609 – 618.
- Kemeny, J., Post, R. (2003). "Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces" **Computers & Geosciences** 29, 65–77.
- Kulatilake, P.H.S.W., Chen, J., Teng, J. (1996). "Discontinuity Geometry Characterization in a Tunnel Close to the Proposed Permanent Shiplock Area of the Three Gorges Dam site in China". **International Journal of Rock Mechanics, Mining Science & Geomechanics Abstract**, 33(3), 255-277. DOI:10.1016/0148-9062(95)00060-7.
- Kulatilake, P.H.S.W., Park J., Um J. G. (2004), "Estimation of rock mass strength and deformability In 3-D for a 30 m cube at a depth of 485 m at Aspo Hard Rock Laboratory", **Geotechnical and Geological Engineering**, 22, pp. 313–330.
- Kulatilake, P.H.S.W., Um J., Wang M., Escandon R. F., Varvaiz J. (2003). "Stochastic fracture geometry modeling in 3-D including validations for a part of Arrowhead East Tunnel, California, USA", **Engineering Geology**, 70, pp. 131–155.
- Laubscher D. H., 1977, "Geomechanics Classification of Jointed Rock Masses- A Mining Applications", *Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy of South Africa*, Vol. 86.
- Laubscher, D H. (1994). "Cave mining-the state of the art". **The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy**, Vol. 94, pp. 279-293.
- Laubscher, D H. (2000). "A Practical Manual on Block caving". Prepared for International Caving Study, JKMR and Itasca Consulting Group. Brisbane . p. 500.
- Laubscher D. H., Jakubec J. ( 2001). "The MRMR Rock Mass Classification for Jointed Rock Masses", *Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies*, SME, pp. 475-481.
- Lemu, F., Hadjigeorgiou, J. (2003). "Discontinuity trace map construction Using photographs of rock exposures", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40, pp. 903–917.

- Mas Ivars, D., Pierce, M., DeGagné, D., Darcel, C. (2008), “Anisotropy and scale dependency in jointed rock mass strength – A synthetic rock mass study.” **Proceedings First International FLAC / DEM Symposium on Numerical Modeling**, R. Hart, C. Detournay and P. Cundall (eds), 25–27 August, Minneapolis, US. Minneapolis, Itasca.
- Martel, S., & Hestir, K., & Long, J. C. S. (1991). “Generation of Fracture Patterns Using Self-Similar Function Concepts”. Earth Sciences Division Annual Report, Lawrence Berkeley Lab, Berkeley, California, 52-56.
- Mauldon M., Dunne W. M., Rohrbaugh M. B. (2001), “Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces”, **Journal of Structural Geology**, 23, pp. 247–258.
- MINITAB QUALITY COMPANION™, (2009), <http://www.minitab.com>
- Moffitt K. M., Rogers S. F. (2007), “Probabilistic analysis of block stability in underground excavations using realistic fracture network models”, The 11<sup>th</sup> Congress of the international Society for Rock Mechanics, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-45084-3.
- Oskoei, M. A., Hu, H. (2010). A Survey on Edge Detection Methods," 29February.
- Pierce, M., Cundall, P., Potyondy, D., Mas Ivars, D. (2007), “A Synthetic Rock Mass Model for Jointed Rock. Rock Mechanics”, **Meeting Society’s Challenges and Demands** – E. Eberhardt, D. Stead and T. Morrison (eds), Taylor and Francis Group, London, pp. 341–349.
- Pine R. J., Coggan, J. S., Flynn, Z., & Elmo, D. (2006). “The Development of a New Numerical Modeling Approach for Naturally Fractured Rock Masses”. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 39(5), 395- 419. DOI:10.1007/s00603-006-0083-x.
- Price D.G. (2009). “Engineering Geology: Principles and Practice”, Edited and compiled: M.H.de Freitas, Springer.
- Priest, S. D., Hudson, J. A. (1976). “Discontinuity Spacing in Rock.” **International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics**, Abstract 13(5), 135-148. DOI:10.1016/0148-9062(76) 90818-4.
- Priest S. D. (1993), “**Discontinuity Analysis for Rock Engineering**”, Published by Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8 HN.
- Priest S. D. (2004), “Determination of discontinuity size distributions from scanline data”, **Rock Mechanics and rock Engineering**, 37, 5, pp. 347–368.
- Priest, S. D., & Samaniego, J. A. (1988). “The Statistical Analysis of Rigid Block Stability in Jointed Rock Masses”. 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, (pp. 398-403), Barton, A.C.T.: Institution of Engineers, Australia, Sydney. ISBN: 0858254271 & 0858254085.



- Reid, T.R., Harrison, J.P. (2000). “A semi-automated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures”. **Rock Mechanics & Mining Sciences** 37, 1073-1089.
- Renshaw CE, Park JC. (1997), Effect of mechanical interactions on the scaling of fracture length and aperture. *Nature*;386:482–4.
- Reyes, O., & Einstein, H. H. (1991). “Failure Mechanics of Fractured Rock - A Fracture Coalescence Model”. 7<sup>th</sup> International Society for Rock Mechanics, A.A. Balkema. Permission to Distribute
- Rogers S. F., Kennard D. K., Dershowitz W. S., Vanas A. (2007), “Characterizing the in situ fragmentation of a fractured rock mass using a discrete fracture network approach”, *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44401-9.
- Rogers, S. F., Elmo, D., & Catalan, A. (2014). “Volumetric Fracture Intensity Measurement for Improved Rock Mass Characterisation and Fragmentation Assessment in Block Caving Operations”. **International Journal of Rock Mechanics Rock Engineering**, 44(5), 704– 719.
- Rockfield. (2006). ELFEN, Rockfield Software Ltd. Swansea, UK.
- Sainsbury, B., Pierce, M., Mas Ivars, D. (2008). “Simulation of rock mass strength anisotropy and scale effects using a Ubiquitous Joint Rock Mass (UJRM) model.” **Proceedings First International FLAC / DEM Symposium on Numerical Modelling**, 25–27 August, Minneapolis, US. Minneapolis, Itasca.
- Shi, G. H., Goodman, R. E., & Tinucci, P. J. (1985), “Application of Block Theory to simulate joint trace maps”, *Proc., Int. Symposium. Fundamentals of Rock Joints*, CENTEK Publ., Lulea.
- Starzec, P., Tsang, C.-F. (2002). “Use of fracture-intersection density for predicting the volume of unstable blocks in underground openings”. lli: **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Vol. 39, 807-813
- Suorineni, F. T., 2010, “The stability graph after three decades in use: Experiences and the way forward”. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, 24(4), pp. 307–339.
- Tollenaar R. N. (2008), “Characterization of discrete facture networks and their influence on caveability and fragmentation”. **A thesis submitted in partial fulfillment of the requiements for the degree of master of applied science**. The University of British Columbia.
- Villaescusa E. (1993), “Statistical modeling of rock jointing. Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering” .Ed.Li K.S,Lo S.C.Balkema: Rotterdam – Brookfield, 221-231.
- Vyazmensky, A., Elmo, D., Stead, D., Rance, J.R. (2007). “Combined finite-discrete element modelling of surface subsidence associated with block caving mining”.

**In: Proceedings of the jst Canadian-US RockMechanics Symposium, Vancouver, Canada, Vol 1, 467-475.**

- Vyazmensky A., Elmo D., Stead D., Rance J. (2008).” Numerical analysis of the influence of geological structures on development of surface subsidence associated with block caving mining”. **In: Proceedings of the 5th Conference and Exhibition on Mass Mining**, Lulea,Sweden, June 2008, 857-866
- Xu C. and Dowd P. (2010), “A new computer code for discrete fracture network modeling”, **Computers & Geosciences**, 36, pp. 292–301.
- Yu, X., M.S. Thesis (1992). “Stochastic Modeling of Rock Fracture Geometry”,MIT, Cambridge, MA. URI: <http://hdl.handle.net/1721.1/12176>.
- Zadhesh J., Jalali S. E., Ramezanzadeh A. (2013), “Estimation of joint trace length probability distribution function in igneous, sedimentary, and metamorphic rocks”, **Arab. J. Geo. Sci.**, DOI 10.1007/s12517-013-0861-1.
- Zhang L. and Einstein H. H. (1998), “Estimating the mean trace length of rock discontinuities”, **Rock Mechanics and rock Engineering**, 31, pp. 217-235.
- Zhang L. and Einstein H. H. (2000), “Estimating the Intensity of Rock Discontinuities”, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science**, 37, pp. 819

پیوست

## متمتیکا<sup>۱۹۳</sup> چیست؟

متمتیکا یک نرم افزار جامع برای انجام محاسبات علوم کاربردی و فنی می باشد. با استفاده از این نرم افزار می توان محاسبات برخی روش های تخصصی علوم مانند حل مسائل ریاضی، فیزیک، کنترل، برق، برنامه نویسی، شبیه سازی و ... را انجام داد.

اکثر عملیات ریاضی به کمک نرم افزار متمتیکا با دستورهای ساده، به راحتی قابل اجراست. متمتیکا به عنوان یک زبان برنامه نویسی سطح بالا علاوه بر توانایی و امکانات زبان های چون C و پاسکال، دارای مزایایی چون شناخت اعداد بزرگ و کوچک، در برداشتن همه توابع، پیاده سازی اکثر الگوریتم های کاربردی با سرعت بالا، قبول ورودی (حتی تابع) با روشی آسان، ارائه فرم گرافیکی همراه با صدا و متحرک سازی است.

در این تحقیق، نرم افزار پردازش تصاویر مغزه ها (DCP)، مدل سازی هندسی دو بعدی ناپیوستگی ها به روش DFN با عنوان CAV-DFN2D و نرم افزار تحلیل خردشوندگی اولیه و ثانویه (PSF) در محیط متمتیکا نوشته شده است.

### برنامه DCP

این برنامه از چند تابع اصلی برای تفکیک رنگ، تعیین ابعاد شکل، فیلتر کردن رنگ های خاص یا نویزهای تصویر، تشخیص لبه (ناپیوستگی)، پیاده سازی خط برداشت روی هر ردیف مغزه، شمارش تعداد درزه ها و مشخص کردن قطعات با طول بزرگتر از ۱۰ سانتیمتر و همچنین خروجی صفحه گسترده ی نتایج تشکیل شده است. تمامی توابع تفکیک رنگ، فیلتر کردن و تشخیص لبه برای رسیدن به بهترین جواب روی هر تصویر، قابل تنظیم هستند.

ورودی برنامه شامل تصویر آماده شده از مغزه ها و خروجی فایل Excell مقادیر P10 و RQD است.

در جدول زیر توابع اصلی این برنامه به همراه توضیح مختصر ارائه شده است:

| ردیف | تابع اصلی           | توضیح  |
|------|---------------------|--|
| ۱    | ColorSeparate       | به منظور تفکیک رنگی تصاویر مغزه و قابلیت حذف یک رنگ خاص به انتخاب کاربر از زمینه‌ی تصویر |
| ۲    | ImageDimensions     | تعیین ابعاد شکل بارگذاری شده   |
| ۳    | ImageConvolve       | ایجاد فیلترهای رنگی مناسب با قابلیت تنظیم برای حذف نویزهای تصویر                         |
| ۴    | EdgeDetect<br>Canny | تشخیص لبه‌های تصویر (ناپیوستگی‌ها) با استفاده از الگوریتم Canny                          |
| ۵    | scanline            | تعریف خطوط برداشت بر روی مغزه‌ها   |
| ۶    | jointcount          | شمارش درزه‌های متقاطع با خط برداشت   |
| ۷    | rqdtest1            | تعیین فواصل بزرگتر از ۱۰ سانتیمتر از خطوط درزه که از روی مغزه‌ها تشخیص داده شده است      |
| ۸    | OutPut              | بخش خروجی شامل فایل‌های متنی از RQD و P10 هر ردیف مغزه                                   |

## برنامه CAV-DFN2D

این برنامه شامل دو بخش ایجاد مدل هندسی و بلوک‌های کامل حاصل از تقاطع درزه‌ها و

بخش ایجاد خروجی به فرمت نرم‌افزارهای عددی است.

### توابع بخش اول

این توابع به سه زیربخش اصلی به شرح ذیل قابل تفکیک است:

- ۱- توابع ساخت مدل هندسی درزه‌ها
- ۲- توابع اعتباریابی درزه‌های ساخته شده
- ۳- توابع ساخت بلوک‌های کامل از پاره‌خطها و محاسبه‌ی مساحت آنها

### ۱- توابع ساخت مدل هندسی درزه‌ها

ورودی‌های این تابع شامل مختصات نقاط گوشه‌های سطح مدل‌سازی بصورت پلی‌گون، اطلاعات آماری شیب هر دسته درزه، اطلاعات آماری طول اثر هر دسته درزه و تعیین توابع توزیع آنها که بصورت گزینه‌های قابل انتخاب در برنامه تعبیه شده است، همچنین ابعاد شبکه تولید مراکز هندسی درزه نیز باید به مدل داده شود.

تابع ساخت مدل هندسی درزه‌ها شامل چهار زیرتابع است که در جدول زیر به صورت مختصر

توضیح داده شده است

| توابع اصلی     | زیرتابع      | توضیح   |
|----------------|--------------|---|
| Trace Creation | Trace        | ایجاد طول اثر هر درزه به صورت تصادفی براساس نوع تابع توزیع طول اثر (لاگ نرمال یا نمایی منفی) با انتخاب کاربر براساس میانگین و انحراف معیار داده شده |
|                | Tile Point   | ایجاد شبکه و تعیین نقاط گوشه‌های شبکه برای توزیع همگن نقاط مراکز درزه در داخل سطح چندضلعی داده شده به آن  |
|                | Centet Point | ایجاد مراکز هندسی درزه‌ها براساس چگالی درزه‌اری   |
|                | Rand Dip     | ایجاد شیب هر درزه به صورت تصادفی براساس نوع تابع توزیع آن به انتخاب کاربر   |

## ۲- توابع اعتباریابی درزه‌های ساخته شده

ورودی این توابع خروجی حاصل از بخش اول برنامه است. این توابع امکان ساخت مدل‌ها به تعداد دلخواه به منظور مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی، نمونه‌گیری از درصدی از درزه‌ها بصورت تصادفی، تعیین میزان شدت درزه‌داری سطحی و شدت درزه‌داری خطی را به کاربر خواهند داد. توابع اصلی و زیرتابع‌های آنها در جدول زیر به همراه توضیح مختصر ارایه شده است.

| ردیف | تابع اصلی             | زیرتابع          | توضیح   |
|------|-----------------------|------------------|---|
| ۱    | Repeat Trace Creation | ---              | تکرار مدل‌سازی با تابع Trace Creation به تعداد دلخواه   |
| ۲    | Nth Percent of joints | ---              | نمونه‌گیری درصدی مشخص از درزه‌ها به صورت تصادفی از هر دسته درزه                                 |
| ۳    | P21 Calculation       | Length of Joints | تعیین طول درزه‌های ایجاد شده بصورت تک تک و یا مجموع طول آنها برای محاسبه‌ی P21                  |
| ۴    | Select joints         | ---              | انتخاب درزه‌های هر دسته درزه و یا کل درزه‌ها در یک بازه‌ی مشخص شده از طول اثر یا شیب توسط کاربر |
| ۵    | P10 Test              | Taghato          | تعیین تعداد و محل برخورد درزه‌ها با خط اسکن مشخص شده توسط کاربر به منظور تعیین میزان P10        |

امکان تکرار هر یک از این توابع ردیف‌های ۲ تا ۵ برای مدل‌های مختلف ایجاد شده توسط تابع ردیف ۱ نیز وجود دارد. همچنین امکان داشتن خروجی بصورت توابع توزیع آماری گرافیکی در توابع ردیف‌های ۳ تا ۵ برای مدل‌های مختلف و یا هر خط برداشت وجود خواهد داشت.

### ۳- بلوک‌های کامل و محاسبه‌ی مساحت آنها

ورودی این بخش، شامل خروجی معتبر بخش دوم برنامه است. در این بخش توابعی برای تعیین نقاط تقاطع درزه‌ها و پاره خط‌های ایجاد شده از آنها و همچنین توابعی برای تشکیل بلوک کامل و محاسبه‌ی مساحت آن وجود دارد.

توابع اصلی و زیرتابع‌های آنها در جدول زیر به همراه توضیح مختصر ارایه شده است.

| ردیف | تابع اصلی           | زیرتابع                 | توضیح   |
|------|---------------------|-------------------------|---|
| ۱    | Make polygon        | Taghato                 | تعیین تعداد و محل برخورد هر درزه با درزه یا درزه‌های دیگر |
|      |                     | Segment create          | ساختن پاره خط حاصل از برخورد درزه‌ها                      |
|      |                     | Point of intersection   | قرار دادن نقاط برخورد در لیستی برای ساخت بلوک‌ها          |
|      |                     | Angle between Line      | تعیین زاویه بین یک پاره خط و جهت مثبت محور X              |
|      |                     | Counter Clockwise Angle | تعیین زاویه بین دو پاره خط در خلاف جهت عقربه‌های ساعت     |
| ۲    | Calculation of Area | ---                     | محاسبه‌ی مساحت بلوک‌های ساخته شده                         |

### توابع بخش دوم

شامل ایجاد خروجی مناسب از درزه‌های تولید شده برای ورود به نرم‌افزارهای عددی UDEC و

PFC2D است.



## برنامه PSF

این برنامه شامل دو بخش اصلی تحلیل خردشوندگی اولیه و تحلیل خردشوندگی ثانویه است.

### توابع بخش اول

ورودی این بخش شامل بلوک‌های حاصل از نرم‌افزار CAV-DFN2D و سطوح ضعف شبیه‌سازی

شده توسط این نرم‌افزار است.

تابع اصلی و زیرتابع‌های آن در جدول زیر به همراه توضیح مختصر ارائه شده است.

| ردیف | تابع اصلی                | زیرتابع                              | توضیح   |
|------|--------------------------|--------------------------------------|---|
| ۱    | Primary<br>Fragmentation | Distribution of Filling<br>Width     | تعریف تابع توزیع ضخامت پرکننده‌ی سطوح<br>ضعف                  |
|      |                          | Filling to Tracelength<br>conversion | تبدیل میزان پرشدگی به طول اثر                                 |
|      |                          | joints creation                      | ایجاد درزه‌های بالفعل براساس سطح تنش و<br>قواعد تجربی و آماری |
|      |                          | Makepols                             | تولید بلوک‌های جدید حاصل از خردشوندگی<br>اولیه                |
|      |                          | Calculation of Area                  | محاسبه‌ی مساحت بلوک‌های تشکیل شده                             |

### توابع بخش دوم

ورودی این بخش شامل بلوک‌های حاصل از بخش اول، ارتفاع ستون تخلیه، عرض ستون

تخلیه، ضریب تورم توده سنگ، نرخ تخلیه، مقاومت فشاری ماده سنگ، درصد ذرات ریزدانه و وزن

مخصوص ماده سنگ است. در این بخش هدف تعیین ارتفاع چرخه‌ی مورد نیاز برای خردشدن هر بلوک سنگی تا ابعاد ریزدانه‌ی تعریف شده است.

تابع اصلی و زیرتابع‌های آن در جدول زیر به همراه توضیح مختصر ارایه شده است.

| توضیح   | زیرتابع                                  | تابع اصلی           | ردیف |
|---|--|---------------------|------|
| تعیین ضریب شکل ظاهری بلوک‌ها  | Shape rate                               | Cycle Height        | ۱    |
| تعیین انواع سطوح ضعف موجود در هر بلوک                                 | Find joint types in polygon bound        |                     |      |
| تعیین نقاط مراکز سطوح ضعف واقع در هر بلوک                             | Find joint types center in polygon bound |                     |      |
| محاسبه‌ی فشار تخریب   | Cave pressure                            |                     |      |
| جدا کردن بلوک‌ها از روی سطوح ضعف براساس مقاومت و میزان فشار ایجاد شده | Split Blocks                             |                     |      |
| تعیین بلوک‌های جدید   | New Blocks Form                          |                     |      |
| محاسبه‌ی مساحت بلوک‌های ساخته شده                                     | ---                                      | Calculation of Area | ۲    |

## **Abstract**

The block caving mining method allows mining of massive, low grade deposits at depth, and has the lowest production costs and the highest production rates of any underground mining method is used today. Among the most important factors in block cave mines are fragmentation and caveability. Poor estimation of both of these variables can lead to production and processing problems, or in the worst scenario, failure of the project.

Fragmentation in block caving method s has three stages. In situ, primary and secondary. In situ fragmentation is result of discontinuities with zero tension strength but primary and secondary fragmentations are happened in a 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 are affected blocks, weak surfaces like, veinlet and schistose surfaces (surfaces with tension strength) are first candidates for breakage and slice. Target is construction a way for prediction of potential discontinuities. In 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. Veinlet and weak surfaces in rock like as schistose surfaces (surfaces with tension strength) are potential discontinuity. According to this test, potential discontinuities are classified to No 1, 2 and 3.

In recent researches from different cave mining in the world, P32 (volumetric fracture intensity) is recognized the most effective parameter for cavability and fragmentation. Therefore performance of P32 for caving prefeasibility or feasibility in a Kahang Copper mine is checked. In this step a computer code written in Mathematica software based on image processing method. With using this Digital Core Image processing code (DCP) RQD and P10 (lining joint intensity) are estimated very well. Basic advantages of this code are speed and accuracy processing. With these advantages, an operator can give necessary logs from core boxes' images without any difficulty for transportation of boxes, taking time and extra outgoing. In the next step P10 is estimated for 3D block models with geostatistic modeling way. Finally P32 is calculated from P10 with using of transportation coefficient for different levels.

Fracture spacing, persistence and dispersion are more effective factors in cavability. In fact persistence of discontinuities especially in rock mass fractures, are finite. This has a high effect on cavability of rock mass in caving methods like in mass mining. In some of geometric modeling methods, like discrete fracture networks (DFN), discontinuities are finite and limit that have a good match with reality especially for cavability analysis.

Mathematica Software is selected for writing 2dimensional discrete fracture network code (CAV-DFN<sup>2D</sup>), because of its good graphic and calculation abilities. CAV-DFN<sup>2D</sup> has good different abilities like producing of numerical and graphical outputs, making finite and infinite joints models, defining of complete blocks with computation of their areas from joints intersections, consideration of joints hierarchies, production of suitable outputs for numerical codes like UDEC & PFC2D and statistics outputs of any model geometrical parameters. geometrical modeling is constructed for joints geometrical information from site surveying of Kahang mine. After determination of Representative Elementary Volume ( $15 \times 15 \text{ m}^2$ ) and verifying of model, complete blocks with their areas are determined. Results are shown about 30% of blocks are infinite or big and this is a challenge for primary and secondary fragmentations. In next step potential joints are modeled with CAV-DFN<sup>2D</sup>. To estimate the primary and secondary fragmentation a code was wrote with Mathematica (PSF). In this program the primary and secondary fragmentation during caving process is estimated based on the criteria defined in the thesis and assuming that the separation is only on weak surface. After analyzing with existing assumptions, draw column height of 150 meters with an active width of 30 meters, to achieve an appropriate fragmentation, is considered a good value.

Key Words: Block Caving method, Cavability, Fragmentation, Infinite discontinuity, Real discontinuity, Potential discontinuity, Discrete Fracture Network.



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Mining Petroleum and Geophysics**

PhD Dissertation in Mining Exploitation

**Cavability and Fragmentation Analysis for Jointed Rock  
Mass in Block Caving Method (Case Study: Kahang Copper  
Mine)**

By: Enayat Allah Emami Meybodi

Supervisor:

Dr Seyed Mohammad Esmaiel Jalali

Advisor:

Dr Alireza Yarahmadi Bafghi

September 2016