



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد

تعیین انرژی خردایش در انفجار سنگ با استفاده از مدل‌های شبکه شکستگی
مجزا (مطالعه موردی: معدن مس سونگون)

محمد ابوالحسنی

اساتید راهنما:

دکتر حسین میرزایی نصیرآباد

دکتر محمد عطایی

آذر ۱۳۹۴



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه استخراج معدن

تعیین انرژی خردایش سنگ در انفجار سنگ با استفاده از مدل‌های شبکه شکستگی
مجزا (مطالعه موردنی: معدن مس سونگون)

دانشجو: محمد ابوالحسنی

اساتید راهنما:

دکتر حسین میرزایی نصیرآباد

دکتر محمد عطایی

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

۱۳۹۴ آذر

الحمد لله رب العالمين

دانشگاه شاهروود

دانشکده: مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه: معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای / خانم محمد ابوالحسنی به شماره دانشجویی:

۹۲۰۱۵۱۴، تحت عنوان: تعیین انرژی خردایش در انفجار سنگ با استفاده از مدل‌های

شبکه شکستگی مجزا (مطالعه موردي: معدن مس سونگون) در تاریخ توسط

کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با

درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی : حسین میرزایی نصیرآباد		
	نام و نام خانوادگی : محمد عطایی		

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تعهد نامه

اینجانب محمد ابوالحسنی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تعیین انرژی خردایش در انفجار سنگ با استفاده از مدل‌های شبکه شکستگی مجزا (مطالعه موردنی: معدن مس سونگون) تحت راهنمائی حسین میرزاپی نصیرآباد و محمد عطایی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه 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.
- مطلوب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا باقیت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

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.

لعدم
به

نازیں پر و مادرم ...
پ

مشکر و قدردانی:

د آغاز خدا را شکرم که توفیقی دیگر عنایت کرد تا مرحله ای دیگر از جاده پر پیچ و خم زندگانی را به فرجام رسانیده و گامی هر چند کوچک در راستای اعلای علمی و صنعتی این مژده بوم بردارم. بی شک یاد او بود که در تمامی مراحل تحصیل به ویژه در انجام این پژوهه مرا مایه قوت قلب شد، تا حتی یک سخن‌های احساس می‌سازد و نتوانی به من راه نماید.

بر خود لازم می‌دانم از حمایت‌ها و همکاری‌های خانواده عزیزم به ویژه پدر و مادر عزیزم که در طی این سال‌ها نهایت مساعی خود را بکار بستند تا شرایطی را برای این بندۀ فرام کنند تا تحصیل علم و دانش تنها غبغه ذهنی من باشد. پس آن‌ها را که اولین آموزگاران زندگی من بودند و در تعلم و تربیت من سخن‌های فروکشان نگرفند. تقدیر و سپاس من نثار بهم آموزگاران و استادی که در طی سال‌ها تحصیل از محضرشان علم و معرفت را یاد کردم، به ویژه استادی راهنمای این پیمان نامه دکتر حسین میرزا یی نصیرآباد و دکتر محمد عطایی که تلمذ در محضر آن‌ها بایم افتخاری فراموش ناشدندی خواهد بود.

بهچین بر خود لازم می‌دانم از مهندس نصیرزاده، مهندس معصوم باقرزاده، مهندس رضا ابوالحسنی، مهندس بنام حسن، مهندس دانایی، مهندس نوروزی و مهندس اصفهانی که با مساعدت‌های بی‌مت و بی‌نتی خویش، مراد انجام هر چه بهتر و سریع تر این پژوهه یاری رسانند، مشکر و قدردانی نمایم.

دیمان از تمامی دوستان خویش که در طی سال‌ها مرا تجلی نمودند و خاطرات سال‌های تحصیل من با آن‌ها عجین شده مشکر و قدردانی نموده و برای آن‌ها آرزوی موفقیت می‌نمایم.

چکیده

در این پایان نامه انرژی صرف شده برای خردایش سنگ در انفجار توده سنگ معدن مس سونگون اندازه گیری شده است. بدین منظور دو زون از معدن شامل دیواره دایکی و زون ماده معدنی در قسمت میانی پله های معدن مس سونگون انتخاب شده است. در هر زون توزیع حجمی بلوک های برجای توده سنگ، خواص ژئومکانیکی ماده سنگ و توزیع دانه بندی توده سنگ خرد شده بعد از انفجار اندازه گیری شده و با استفاده از رابطه پیشنهادی حمدى انرژى خردایش در فرآیند انفجار تعیین شده است. برای تعیین توزیع حجمی بلوک های برجا، ابتدا خصوصیات هندسی ناپیوستگی های هر زون با استفاده از خطوط برداشت، برداشت شده و تعداد دسته درزه ها تعیین گردید. سپس با مشخص کردن تبعیت توزیع احتمال حاکم بر خصوصیات هندسی ناپیوستگی های هر دسته درزه، هندسه توده سنگ با استفاده از مفهوم شبکه شکستگی مجزا شبیه سازی شد و در نهایت با استفاده از نرم افزار 3DEC حجم بلوک ها تعیین و توزیع حجمی بلوک ها مشخص گردید. در مرحله بعد با نمونه گیری از محیط معدن، خواص فیزیکی و ژئومکانیکی ماده سنگ نظیر چگالی، مقاومت فشاری تک محوری، چقلمگی شکست مود کششی، سرعت صوت در سنگ و ... با روش های استاندارد موجود اندازه گیری شد. در مرحله آخر با تهیه عکس هایی از کپه های انفجار و با استفاده از نرم افزار Goldsize و آنالیز عکس ها توزیع دانه بندی قطعات سنگی خرد شده تعیین و نمودار روزین - راملر بر آنها برازش شد. طبق رابطه پیشنهادی حمدى انرژى خردایش انفجار به تفاوت سطح کل قطعات سنگ خرد شده و سطح کل بلوک های برجای توده سنگ مرتبط است. بنابراین از روی توزیع حجمی بلوک های برجا و قطعات خرد شده، مساحت ها تعیین و با استفاده از خواص ژئومکانیکی ماده سنگ، انرژى خردایش انفجار توده سنگ برای هر زون محاسبه شد. نتایج حاصل نشان داد در زون های دایک و مواد معدنی به ترتیب ۹/۶ و ۱۳/۶ درصد از کل انرژى حاصل از انفجار صرف خرد کردن سنگ می شود و بقیه انرژى صرف مسائل زیان باری مانند لرزش زمین، لرزش هوا، پرتاپ سنگ، عقب زدگی و ... می شود. همچنین

ارزیابی نتایج نشان داد در الگوهای با ابعاد بزرگ‌تر (فاصله‌داری و بارسنگ بزرگ‌تر) میزان انرژی خردایش بیشتر است. این امر نشان‌گر این است که در الگوهای با ابعاد کوچک‌تر انرژی بیشتری به هدر می‌رود. بنابراین لازم است الگوی انفجار دقیق‌تر طراحی شود تا ضمن کاهش هدر رفت انرژی، نتایج مطلوبی نیز حاصل شود.

كلمات کلیدی: انرژی خردایش، شبکه شکستگی مجزا، توزیع حجمی بلوک‌های برجای توده-سنگ، نرمافزار *Goldsize*، توزیع دانه‌بندی توده‌سنگ خرد شده، خواص ژئومکانیکی ماده سنگ، معدن مس سونگون

مقالات استخراج شده از پایان نامه:

- ✓ تعیین چقرمگی شکست مود I با استفاده از روش نیم دیسکی با شکاف مستقیم (مطالعه موردي: معدن مس سونگون)، همایش بین المللی معماری، عمران و شهرسازی در هزاره سوم، تهران - مرداد ماه ۹۴.

فهرست مطالب

۱	فصل اول: کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۱-۲- هدف از انجام تحقیق
۴	۱-۳- ضرورت انجام تحقیق
۵	۱-۴- روش تحقیق
۷	۱-۵- سابقه‌ی تحقیق
۸	۱-۶- ساختار پایان نامه
۱۱	فصل دوم: مکانیسم انفجار و عوامل موثر در انرژی خردایش سنگ
۱۲	۲-۱- مقدمه
۱۴	۲-۲- مکانیسم شکست سنگ در برابر انفجار
۱۸	۲-۳- انرژی مواد منفجره
۱۹	۲-۳-۱- انرژی خردایش
۲۱	۲-۳-۲-۱- تصحیح رابطه انرژی خردایش توسط حمدمی
۲۱	۲-۳-۲-۲- انرژی لرزشی
۲۲	۲-۳-۲-۳- انرژی جنبشی
۲۳	۲-۴- پارامترهای مؤثر در خردایش سنگ

۲۳	۱-۴-۲- خواص فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ و ناپیوستگی‌ها
۲۳	۲-۴-۲- پارامترهای ساختار توده سنگ
۲۴	۳-۴-۲- پارامترهای ماده منفجره
۲۴	۴-۴-۲- پارامترهای طراحی انفجار
۲۶	۵-۲- جمع‌بندی
۲۷	فصل سوم: توصیف هندسی توده سنگ درزه دار و شبیه‌سازی آن با رویکرد شبکه شکستگی مجزا
۲۸	۱-۳- مقدمه
۲۸	۲-۳- توده سنگ درزه دار و اجزای آن
۲۹	۱-۲-۳- ماده سنگ
۲۹	۲-۲-۳- ناپیوستگی‌های توده سنگ
۳۱	۳-۳- ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها
۳۲	۱-۳-۳- جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها
۳۳	۲-۳-۳- تعداد دسته درزه‌ها
۳۴	۳-۳-۳- فاصله داری درزه
۳۴	۴-۳-۳- تداوم درزه
۳۵	۵-۳-۳- زبری سطح درزه
۳۶	۶-۳-۳- بازشدگی درزه‌ها
۳۶	۷-۳-۳- شکل

۳۷	..... طول خط اثر ۸-۳-۳
۳۷	..... اندازه ۹-۳-۳
۳۷	..... دانسیته ۱۰-۳-۳
۳۷	..... موقعیت مرکز شکستگی ها ۱۱-۳-۳
۳۸	..... روش های برداشت ناپیوستگی ها ۴-۳
۳۸	..... برداشت ناپیوستگی ها در مغزه های حفاری ۱-۴-۳
۳۸	..... برداشت ناپیوستگی ها از روی رخنمون سنگی ۲-۴-۳
۳۹	..... خط برداشت ۱-۲-۴-۳
۴۱	..... پنجره برداشت ۲-۲-۴-۳
۴۲	..... روش های نوین آشکار سازی و برداشت شکستگی ها (لیزر اسکن سه بعدی) ۴-۴-۳
۴۲	..... تحلیل ناپیوستگی های برداشت شده با استفاده از نرم افزار <i>DIPS</i> ۵-۳
۴۳	..... نوع و شکل بلوک های توده سنگ ۶-۳
۴۴	..... توده سنگ و توزیع حجم بلوک های آن ۷-۳
۴۵	..... روش های شبیه سازی هندسی درزه های توده سنگ ۸-۳
۴۷	..... روش قطعی و محدود ۱-۸-۳
۴۷	..... روش زمین آماری ۲-۸-۳
۴۸	..... روش آماری ۳-۸-۳
	..... مرور کارهای انجام شده برای محاسبه حجم بلوک های توده سنگ با پارامترهای هندسی ۹-۳

۵۱	۱۰-۳- مدل‌سازی تصادفی شبکه درزهای
۵۴	۱۱-۳- پردازش داده‌ها در مدل شبکه شکستگی مجذع
۵۵	۱۲-۳- توزیع آماری و تولید تصادفی پارامترهای هندسی شکستگی‌ها
۵۶	۱۲-۱- توزیع جهت‌داری
۵۷	۱۲-۲- محل شکستگی‌ها
۵۸	۱۲-۳- توابع توزیع حاکم بر اندازه شکستگی‌ها
۶۰	۱۲-۴- توابع توزیع حاکم بر بازشدنی شکستگی‌ها
۶۱	۱۳-۳- چگالی سه بعدی شکستگی‌ها
۶۱	۱۴-۳- مفهوم المان حجم معرف
۶۲	۱۵-۳- شبیه‌سازی تصادفی شکستگی‌های توده‌سنگ با استفاده از روش مونت کارلو
۶۴	۱۶-۳- معرفی نرم‌افزار <i>3DEC</i>
۶۶	۱۷-۳- جمع‌بندی
۶۷	فصل چهارم: تعیین توزیع ابعادی توده سنگ خرد شده با استفاده از آنالیز تصویری
۶۸	۱-۴- مقدمه
۷۲	۲-۴- نرم افزار <i>Goldsizer</i>
۷۳	۳-۴- روش کار نرم‌افزار <i>Goldsizer</i>
۷۳	۴-۳-۱- گرفتن عکس از توده سنگ
۷۴	۴-۳-۲- تعریف مقیاس و مرزبندی نرم‌افزار <i>Goldsizer</i>

۷۶	..... ارایه نتایج نرم افزار Goldsize	۳-۳-۴
۷۶	..... مزایای نرم افزار Goldsize	۱-۴-۴
۷۷	..... معایب نرم افزار Goldsize	۲-۴-۴
۷۷	..... جمع بندی	۵-۴
۷۹	فصل پنجم: تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ	
۸۰	..... ۱- مقدمه	۱-۵
۸۱	..... ۱- چermگی شکست	۲-۵
۸۲	..... ۲- روش های متداول در تعیین چermگی شکست	۲-۵
۸۵	..... ۳- روش های تجربی محاسبه چermگی شکست حالت I	۲-۵
۸۶	..... ۴- مطالعات آزمایشگاهی انجام شده برای تعیین چermگی شکست حالت I	۲-۵
۸۷	..... ۳- چگالی خشک و تخلخل	۳-۵
۸۹	..... ۴- سختی اشمیت مواد سنگی	۴-۵
۹۰	..... ۵- مقاومت فشاری تک محوری	۵-۵
۹۲	..... ۶- سرعت امواج فشاری و مدول الاستیسیته	۵-۶
۹۲	..... ۱- سرعت امواج فشاری	۶-۵
۹۲	..... ۲- مدول الاستیسیته یا مدول یانگ	۶-۵
۹۳	..... ۷- جمع بندی	۷-۵
۹۵	فصل ششم: تعیین انرژی خردابیش در عملیات آتش کاری معدن مس سونگون ورزقان	

۹۶	۱-۶- مقدمه
۹۶	۶-۲- تعیین منحنی توزیع ابعادی بلوک‌های بر جای توده‌سنگ دیواره معدن مس سونگون
۹۶	۶-۱-۲- توصیف هندسی توده‌سنگ معدن مس سونگون
۹۷	۶-۲-۲- معرفی معدن مس سونگون ورزقان
۹۸	۶-۲-۳- برداشت ناپیوستگی‌های دیواره معدن مس سونگون
۱۰۰	۶-۴-۲- تحلیل ناپیوستگی‌های برداشت شده از دیواره معدن مس سونگون با استفاده از نرم‌افزار <i>DIPS</i>
۱۰۲	۶-۵-۲- چگالی سه بعدی شکستگی‌های دیواره معدن مس سونگون
۱۱۱	۶-۳- آنالیز تصویری توده‌سنگ آتشباری شده معدن مس سونگون به وسیله نرم افزار <i>Goldsize</i>
۱۱۲	۶-۳-۱- نتایج نرم افزار <i>Goldsize</i> برای توده نفوذی دایک
۱۱۵	۶-۳-۲- نتایج نرم افزار <i>Goldsize</i> برای مواد معدنی
۱۱۸	۶-۳-۳- مقایسه منحنی دانه‌بندی برای دو زون دایک و مواد معدنی
۱۲۰	۶-۴- تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماده‌سنگ پله‌های معدن مس سونگون
۱۲۰	۶-۴-۱- چگالی خشک و تخلخل
۱۲۴	۶-۴-۲- مقاومت فشاری تک محوری
۱۲۵	۶-۴-۳- سرعت امواج فشاری و مدول الاستیسیته
۱۲۵	۶-۴-۳-۱- سرعت امواج فشاری
۱۲۵	۶-۴-۳-۲- مدول الاستیسیته یا مدول یانگ

۱۲۶	سنگ معدن مس سونگون	۴-۴-۶- مطالعات آزمایشگاهی انجام شده برای تعیین چermگی شکست حالت <i>I</i> برای نمونه
۱۲۹	نتایج آزمایشگاهی	۴-۵- ارزیابی نتایج روابط تجربی برای تعیین چermگی شکست حالت <i>I</i> با استفاده از
۱۳۰	۵-۵- انرژی مواد منفجره در انفجارهای معدن مس سونگون	۵-۶- انرژی خردایش در معدن مس سونگون
۱۳۳	۷-۶- جمع بندی	۶- جمیع بندی
۱۳۵	فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات	
۱۳۶	۷-۱- نتیجه‌گیری	
۱۳۸	۷-۲- پیشنهادات	
۱۳۹	منابع	
۱۴۸	پیوست ۱	
۱۵۳	پیوست ۲	

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۱): شماتیک کلی فرایند محاسبه انرژی خردایش	۶
شکل (۱-۲): اثر خردایش روی عملیات پایین دست	۱۳
شکل (۲-۲): مناطق تشکیل شده اطراف یک خرج منفجر شده در سنگ	۱۷
شکل (۲-۳): خلاصه‌ای از مکانیسم خرد شدن سنگ	۱۷
شکل (۴-۲): پارامترهای انفجاری در آتشکاری پله‌ای	۲۵
شکل (۳-۱): اجرای تشکیل دهنده تودهسنگ	۲۹
شکل (۳-۲): تفاوت اندازه انواع ناپیوستگی‌ها در تودهسنگ	۳۱
شکل (۳-۳): ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌های موجود در تودهسنگ	۳۲
شکل (۳-۴): نمونه‌ای از کمپاس برانتون برای اندازه‌گیری شیب و جهت شیب	۳۳
شکل (۳-۵): نمایی از خط برداشت	۴۱
شکل (۳-۶): نمایی از دو نوع پنجره برداشت	۴۲
شکل (۳-۷): تقسیم‌بندی بلوک‌ها	۴۴
شکل (۳-۸): مهم‌ترین بلوک‌های موجود در تودهسنگ	۴۴
شکل (۳-۹): نمونه‌ای از تودهسنگ با توزیع حجمی بلوک‌های آن	۴۶
شکل (۳-۱۰): روند تولید شبکه شکستگی مجزا با استفاده از روش مونت کارلو	۶۳
شکل (۳-۱۱): فلوچارت یک برنامه کامپیوتری برای تولید شبکه شکستگی مجزا	۶۴
شکل (۴-۱): عکس آماده شده برای آنالیز تصویری زون دایک معن مس سونگون	۷۴

۷۵	..... شکل (۴-۴): مقیاس‌بندی در نرم‌افزار <i>Goldsizer</i>
۷۵	..... شکل (۴-۳): مرزیابی دستی در نرم‌افزار <i>Goldsizer</i>
۷۵	..... شکل (۴-۴): تصویر دیجیتالیز شده توسط نرم‌افزار <i>Goldsizer</i>
۷۶	..... شکل (۴-۵): منحنی دانه‌بندی خروجی نرم‌افزار <i>Goldsizer</i>
۸۱	..... شکل (۱-۵): سه حالت اصلی انتشار شکاف
۸۴	..... شکل (۲-۵): خلاصه‌ای از روش‌های مختلف ارایه شده برای تعیین چقرمگی
۸۷	..... شکل (۳-۵): مشخصات هندسی و روش بارگذاری خمس سه نقطه‌ای بر نمونه نیم دیسکی با شکاف مستقیم
۹۸	..... شکل (۶-۱): نمایی از معدن مس سونگون
۹۹	..... شکل (۶-۲): محل جدایش دو زون دایک و مواد معدنی در پله معدن مس سونگون
۱۰۱	..... شکل (۳-۶): نمایش استریو گراف شکستگی‌های دایک در پله‌های معدن مس سونگون
۱۰۱	..... شکل (۴-۶): نمایش استریو گراف شکستگی‌های مواد معدنی در پله‌های معدن مس سونگون
۱۰۵	..... شکل (۵-۶): استریوگراف شکستگی‌های دایک در پله‌های معدن مس سونگون حاصل از برنامه <i>3DEC</i>
۱۰۵	..... شکل (۶-۶): استریوگراف شکستگی‌های مواد معدنی در پله‌های معدن مس سونگون حاصل از نرم‌افزار <i>3DEC</i>
۱۰۷	..... شکل (۷-۶): مدل شبکه شکستگی مجازی تولید شده در <i>3DEC</i> و حجم بلوك‌های توده‌سنگ در زون دایک

- شکل (۶-۸): مدل شبکه شکستگی مجزای تولید شده در $3DEC$ و حجم بلوک‌های تودهسنگ در زون
۱۰۸.....مواد معدنی
- شکل (۶-۹): طول تقاطع شکستگی الف) زون دایک ب) زون مواد معدنی۱۰۹
- شکل (۶-۱۰): نمودار توزیع ابعادی برای اندازه برجای تودهسنگ (دایک)۱۱۰
- شکل (۶-۱۱): نمودار توزیع ابعادی برای اندازه برجای تودهسنگ (مواد معدنی)۱۱۰
- شکل (۶-۱۲): نمونه‌هایی از عکس‌های تهیه شده از زون دایک برای تحلیل در نرم‌افزار Goldsize۱۱۳
- شکل (۶-۱۳): میانگین توزیع ابعادی خردایش حاصل از انفجار در زون دایک‌ها۱۱۵
- شکل (۶-۱۴): عکس‌های تهیه شده از زون مواد معدنی برای تحلیل در نرم‌افزار Goldsize۱۱۶
- شکل (۶-۱۵): میانگین توزیع ابعادی ذرات برای مواد معدنی۱۱۸
- شکل (۶-۱۶): مقایسه منحنی دانه‌بندی برای تودهسنگ برجا در زون‌های دایک و مواد معدنی۱۱۹
- شکل (۶-۱۷): مقایسه منحنی دانه‌بندی برای تودهسنگ پس از انفجار در زون‌های دایک و مواد معدنی۱۱۹
- شکل (۶-۱۸): نمونه‌های تهیه شده برای تعیین چگالی خشک و تخلخل۱۲۰
- شکل (۶-۱۹): الف) اندازه‌گیری جرم اشباع غوطه ور ب) اندازه‌گیری جرم اشباع با سطح خشک شده ج) خشک کردن نمون در اوون۱۲۱
- شکل (۶-۲۰): دستگاه مغزه‌گیر۱۲۴
- شکل (۶-۲۱): نمونه دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک محوری۱۲۵
- شکل (۶-۲۲): آماده‌سازی نمونه در آزمایشگاه برای تعیین چقرومگی شکست۱۲۶

شکل (۲۳-۶): نمونه‌های آزمایشگاهی برای تعیین چقرومگی شکست حالت *I* الف) قبل از بارگذاری
۱۲۷.....ب) حین بارگذاری ج) بعد از بارگذاری

فهرست جدول‌ها

جدول (۳-۱): توصیف فاصله درزه‌ها در توده‌های سنگی درزه‌دار ۳۴
جدول (۳-۲): توصیف تداوم پیوستگی درزه در توده‌سنگ ۳۵
جدول (۳-۳): برگه ثبت داده‌ها به روش خط برداشت ۴۰
جدول (۳-۴): روش‌های ارایه شده برای تعیین هندسه بلوک‌های توده‌سنگ ۵۰
جدول (۳-۵): توزیع آماری متداول در تولید شبکه شکستگی مجزا ۵۵
جدول (۴-۱): نرم‌افزارهای تحلیل عکس ۷۰
جدول (۴-۲): مطالعات مهم منتشر شده روی توسعه و استفاده از <i>DIAT</i> ۷۱
جدول (۴-۳): تصحیح سختی اشمیت برای واجهش‌های غیر افقی ۸۹
جدول (۴-۴): جرئیات استاندارد <i>ISRM</i> و <i>ASTM-D-2938</i> برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری ۹۱
جدول (۴-۵): نمونه‌ای از اطلاعات برداشت شده برای زون دایک ۱۰۰
جدول (۴-۶): خصوصیات مربوط به جهت‌داری و تعداد درزه‌های دسته‌درزه‌ها در دیواره دایک معدن مس سونگون ۱۰۲
جدول (۴-۷): خصوصیات مربوط به جهت‌داری و تعداد درزه‌های دسته‌درزه‌ها در دیواره مواد معدنی معدن مس سونگون ۱۰۲
جدول (۴-۸): چگالی دسته درزه‌ها برای دیواره دایک ۱۰۳
جدول (۴-۹): چگالی دسته درزه‌ها برای دیواره مواد معدنی ۱۰۳
جدول (۶-۱): اندازه شکل و اندازه مشخصه برای بلوک‌های برجا ۱۱۱
جدول (۶-۲): نتایج آنالیز تصویری برای دایک‌ها ۱۱۴

جدول (۶-۸): نتایج آنالیز تصویری برای مواد معدنی	۱۱۷
جدول (۹-۶): اندازه شکل و اندازه مشخصه برای توده سنگ خرد شده	۱۱۸
جدول (۱۰-۶): نتایج آزمایش تعیین چگالی و تخلخل با روش اشباع و غوطه‌وری برای نمونه سنگ	۱۲۲
جدول (۱۱-۶): نتایج آزمایش تعیین چگالی و تخلخل با روش اشباع و غوطه‌وری برای نمونه سنگ مواد معدنی ۱	۱۲۲
جدول (۱۲-۶): نتایج آزمایش تعیین چگالی و تخلخل با روش اشباع و غوطه‌وری برای نمونه سنگ مواد معدنی ۲	۱۲۳
جدول (۱۴-۶): نتایج آزمایش تعیین چقرومگی	۱۲۸
جدول (۱۵-۶): مقایسه چقرومگی شکست آزمایشگاهی با چقرومگی تخمینی	۱۲۹
جدول (۱۶-۶): خواص فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ معدن مس سونگون	۱۳۰
جدول (۱۷-۶): پارامترهای لازم برای محاسبه انرژی خردایش و انرژی مواد منفجره در دیواره دایک معدن مس سونگون	۱۳۲
جدول (۱۸-۶): پارامترهای لازم برای محاسبه انرژی خردایش و انرژی مواد منفجره در دیواره مواد معدنی معدن مس سونگون	۱۳۲

فهرست علائم اختصاری

E_x : انرژی مواد منفجره (مگاژول)

E_F : انرژی خردایش (مگاژول)

E_S : انرژی لرزشی

E_K : انرژی جنبشی

E_{NM} : دیگر شکل‌های انرژی که محاسبه نشده‌اند

ΔA : تفاضل مساحت سطح بر جا و مساحت حاصل از خردایش

γ_f : انرژی ویژه سطح

η : نرخ انرژی خردایش

K_{IC} : چقرمگی شکست حالت کششی ماده‌سنگ بر حسب $Mpa\sqrt{m}$

ρ : چگالی مواد بر حسب g/cm^3

c : سرعت امواج فشاری در سنگ بر حسب m/s

V_t : حجم کل توده‌سنگ خرد شده

χ_{c1} : اندیس مشخصه قبل از انفجار

χ_{c2} : اندیس مشخصه بعد از انفجار

n_1 : اندیس شکل قبل از انفجار

n_2 : اندیس شکل بعد از انفجار

S_{mr} : سطح بلوک در توده‌سنگ بر جا

ρ : چگالی سنگ

c_L : سرعت امواج طولی

c_T : سرعت امواج عرضی

v : برآیند بردار سرعت‌ها

v_1 : مولفه شعاعی سرعت ذرات

v_2 و v_3 : مولفه عمودی و عرضی سرعت

$\rho(y)$: متغیر چگالی سنگ

H : ارتفاع پله

d : فاصله‌داری بین چال‌ها

B_h : میانگین بارسنگ افقی که از سطح پروفیل به دست می‌آید.

$f(\theta)$: توزیع فیشر

θ : زاویه انحراف از مقدار میانگین نرمال

K : ثابت فیشر

C : ثابت چگالی (واحد وابسته به D_L)

L : طول اثر شکستگی

D_L : ابعاد فراکتال

$D_{L(1D)}$: ابعاد فراکتال در یک بعد

$D_{L(2D)}$: ابعاد فراکتال در دو بعد

$D_{L(3D)}$: ابعاد فراکتال در سه بعد

N : تعداد درزهای دسته درزه

L : طول خط برداشت بر حسب متر

δ : زاویه بین خط نمونه‌برداری و نرمال صفحه شکست

D_1 : چگالی یک بعدی شکستگی‌ها

D_2 : چگالی دو بعدی شکستگی‌ها

D_3 : چگالی سه بعدی شکستگی‌ها

I : چقرومگی شکست حالت IC

$I_{S(50)}$: شاخص با نقطه‌ای

E : مدول الاستیسیته

K_{IC}^e : مقدار تخمینی چقرومگی شکست بر حسب $Mpa\sqrt{m}$

K_{IC} : چقرومگی شکست بر حسب $Mpa\sqrt{m}$

P : حداکثر نیرو در زمان شکست نمونه بر حسب MN

R : شاعع دیسک بر حسب متر

a : طول شکاف بر حسب متر

Y_K : فاکتور بدون بعد تنש برای نمونه‌ها

V : حجم کل نمونه بر حسب سانتی‌متر مکعب

M_{sat} : جرم اشباع با سطح خشک شده بر حسب گرم

M_{sub} : جرم اشباع غوطه‌ور نمونه بر حسب گرم

ρ_w : چگالی آب

V_V : حجم منافذ بر حسب سانتی‌متر مکعب

M_s : جرم خشک نمونه بر حسب گرم

ρ_d : چگالی خشک بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب

n : تخلخل نمونه بر حسب درصد

σ_c : مقاومت فشاری تک محوری

F : حداکثر بار وارد بر نمونه

A : سطح مقطع اولیه نمونه

v : سرعت امواج فشاری بر حسب متر بر ثانیه

λ : طول نمونه بر حسب متر

t : زمان بر حسب ثانیه

h_h : ارتفاع چال (متر)

h_b : ارتفاع پله (متر)

S : فاصله‌داری (متر)

B : بارسینگ (متر)

N : تعداد چال

V_t : حجم کل خرد شده

φ : قطر چال (اینج)

h_c : ارتفاع خرج

S_T : گل گذاری (متر)

U : اضافه حفاری (متر)

q : خرج ویژه (کیلوگرم بر متر مکعب)

فصل اول

کہات
یہ

خردايش موضوع اساسی در آتشباری معادن روباز است و از عوامل متعددی تأثیر می‌پذیرد که از جمله مهم‌ترین آن، خصوصیات زمین‌شناسی تودهسنگ، مشخصات هندسی انفجار، خصوصیات ماده‌ی منفجره مصرفی می‌باشد. خصوصیات ژئومکانیکی سنگ نیز تأثیر قابل توجهی بر آتشباری و خردايش حاصل از آن دارد. در واقع خردايش سنگ یک تعریف غیر مطلق است و به کاربرد سنگ بستگی دارد. درجه مطلوب خردايش به نوع و اندازه ماشین‌آلات بارگیری و باربری نیز وابسته است. عملیات خردکردن نیاز به انرژی بسیار زیادی دارند، بطوریکه هزینه خردکردن در بیش‌تر موارد بیش از ۵۰ درصد کل هزینه معدن‌کاری را تشکیل می‌دهد. بنابراین عملیات خردکردن و جلوگیری از خرد شدن بیش از حد مواد اهمیت بسیار زیادی دارد (*Hamdi & Mouza; 2008*، بخشندۀ امینه و مالکی‌نژاد؛ ۹۱).

در عملیات انفجار مصرف انرژی منتقل شده به سنگ بدین صورت می‌باشد: ایجاد شکاف در جا (کمتر از ۰.۱٪)، شکستن (۰.۱۵٪)، جابه‌جایی (۰.۴٪)، خرد کردن در نزدیکی چال (پودر شدن) (۰.۲٪ تا ۰.۱۵٪)، پرتاب سنگ (۰.۱٪)، تغییر شکل سنگ (۰.۱٪)، لرزش زمین (۰.۴٪)، لرزش هوا (۰.۳۸٪ تا ۰.۳۹٪) (استوار، ۱۳۷۷). در این مطالعه مقدار انرژی مفید که صرف خردايش سنگ می‌شود مد نظر است. تودهسنگ‌های موجود در طبیعت با توجه به نحوه تشکیل دارای انواع مختلف آذرین، دگرگونی و رسوبی هستند. محیط‌های سنگی بر اثر عوامل مختلف، نظیر عوامل تکتونیکی تحت تأثیر قرار می‌گیرند و ناپیوستگی‌های مختلف با خصوصیات متفاوت در آن‌ها ایجاد می‌شوند. با توجه به میزان بازشدگی، طول و شیب ناپیوستگی‌ها آن‌ها را به انواع مختلف تقسیم‌بندی می‌کنند. با توجه به انواع ناپیوستگی‌ها و فاصله‌داری آن‌ها بلوک‌هایی با ابعاد و شکل‌های مختلف در توده سنگ ایجاد می‌شود. نوع ماده سنگ تشکیل دهنده تودهسنگ، الگو و چگالی ناپیوستگی‌ها تأثیر زیادی در خصوصیات مکانیکی تودهسنگ دارند.

هندسه سیستم ناپیوستگی‌ها در توده‌های سنگی یکی از مهم‌ترین جنبه‌های تعیین خصوصیات مدل در علم مهندسی سنگ می‌باشد. یکی از مهم‌ترین مسایل در حوزه مهندسی سنگ، نشان دادن سیستم ناپیوستگی‌های یک توده‌سنگ به صورت مدل هندسی است این امر مستلزم توصیف کمی محل، جهت یابی، اندازه، شکل و میزان باز شدگی ناپیوستگی‌ها و همچنین نحوه اتصال این ناپیوستگی‌ها با هم می‌باشد (*Jing & Stephansson, 2007*).

دانش بر توزیع ابعادی توده‌سنگ برجا و سنگ خرد شده در مراحل مختلف معدن‌کاری و کانه-آرایی، از جمله اطلاعات پایه‌ای است که در ارزیابی طراحی سنگ شکن و نوارنقاله، عملیات انفجار و کارایی انواع مواد منفجره و طرح‌های انفجاری، پایداری شبیب دیواره پیت و بهینه سازی خردایش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-۲- هدف از انجام تحقیق

هدف این مطالعه، محاسبه انرژی مصرف شده برای خردایش در توده‌سنگ درزه‌دار با استفاده از شبکه شکستگی مجزا است. بدین منظور معدن مس سونگون به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب و انرژی مصرف شده برای خردایش توده‌سنگ پله‌های آن محاسبه می‌شود. انرژی خردایش با استفاده از اختلاف مساحت شکستگی‌های طبیعی توده‌سنگ (سطح ویژه موجود در توده‌سنگ) و سطح ثانویه حاصل از خردایش تعیین می‌شود. تفاضل این دو پارامتر بیانگر سطح ویژه جدید ایجاد شده می‌باشد که رابطه مستقیم با انرژی خردایش دارد. بنابراین در این مطالعه سطح ویژه برجای شکستگی‌های توده‌سنگ و سطح ویژه ثانویه حاصل از انفجار تعیین شده و با استفاده از رابطه پیشنهادی حمدی مقدار انرژی مصرف شده برای خردایش سنگ محاسبه می‌شود.

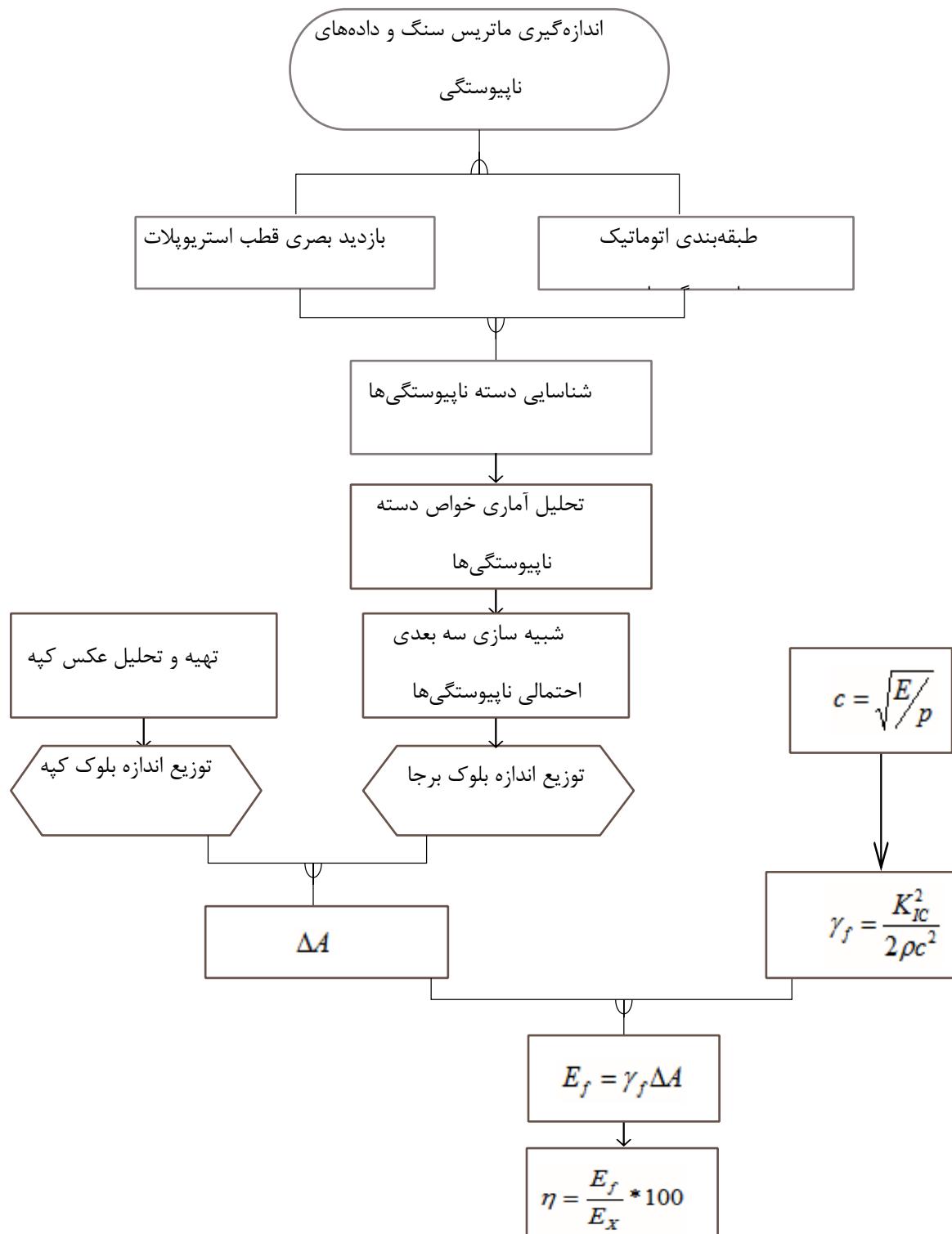
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق

مقدار انرژی صرف شده برای خرد کردن سنگ طی انفجار یکی از چالش‌هایی است که در تحقیقات امروزی مورد توجه قرار می‌گیرد. ارزیابی دقیق این بخش از انرژی یک نکته مهم برای کنترل فرایند پودر کردن می‌باشد (*Hamdi & Mouza, 2008*). مقدار انرژی آزاد شده در انفجار به سه بخش انرژی خردایش، انرژی لرزشی و جنبشی تقسیم می‌شوند که به مقدار انرژی ویژه برای ایجاد یک سطح شکستگی جدید انرژی خردایش گویند (*Sanchidrian et al, 2007*). انفجار در معدن به منظور خرد کردن مواد معنی و باطله صورت می‌گیرد که هدف اولیه خرد کردن و در نهایت تسهیل در بارگیری است. اما مهم‌ترین هدف در انفجار سنگ رسیدن به خردایش مناسب می‌باشد. خردایش مناسب در صورتی امکان‌پذیر است که انرژی ماده منفجره به خوبی به سنگ منتقل شده و باعث خرد شدن سنگ شود. بنابراین لازم است که مقدار انرژی صرف شده برای خردایش سنگ بررسی شود تا مشخص شود که چه مقدار از انرژی مفید بوده و چه مقدار از آن به هدر می‌رود و صرف مسایل زیان‌باری نظیر لرزش هوا، لرزش زمین و ... می‌شود. همچنین در هر معنی با توجه به نوع ماشین بارگیری، اندازه ورودی سنگ شکن اولیه و اندازه حداقل ذرات ورودی به آسیای اولیه در کارخانه فراوری، متوسط اندازه خرده‌های انفجاری باید از یک اندازه بهینه برخوردار باشد. به این معنی که اندازه سنگ‌های منفجر شده باید به اندازه‌ای کوچک باشد که به راحتی داخل سیستم بارگیری جای - گیرد و نیاز به انفجار ثانویه نداشته باشد. از سوی دیگر تولید خرده‌های بسیار ریز به منظور جلوگیری از تولید گرد و غبار و هدر رفتن ماده‌ی منفجره پیشگیری شود (بخشنده‌امینه و مالکی‌نژاد، ۹۱). به منظور رسیدن به اهداف فوق باید شناخت کامل از هندسه توده سنگ وجود داشته باشد و با به دست آوردن اندازه توزیع اندازه بلوك بر جا و مقایسه آن با توزیع اندازه بلوك بعد از انفجار (از کپه) مقدار انرژی مصرف شده برای خردایش سنگ تعیین شود تا ضمن خردایش مناسب و جلوگیری از فرایند پودر کردن مواد، مشکلات بارگیری و باربری و ... به حداقل برسد.

۱-۴- روش تحقیق

روش کار بدین صورت است که ابتدا، ناپیوستگی‌های زمین در محدوده معدنی مس سونگون با استفاده از روش خط برداشت^۱ برداشت می‌شود. سپس با استفاده از الگوریتم‌های موجود درزه‌های تودهسنگ خوشبندی شده و تعداد دسته درزه‌های غالب تودهسنگ مورد مطالعه تعیین می‌شود. در گام بعدی خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌های هر دسته درزه نظیر شیب، جهت شیب، اندازه، محل و ... مطالعه شده و با تحلیل‌های آماری تابع توزیع احتمال حاکم بر هر یک از خصوصیات هندسی و پارامترهای هر یک از توابع توزیع احتمال مشخص می‌شود. در نهایت هندسه سه بعدی تودهسنگ درزه‌دار به صورت تصادفی شبیه‌سازی شده و مدل‌های شبکه شکستگی مجزا تودهسنگ تعیین می‌شود تا مبنایی برای تعیین توزیع حجمی بلوک‌های برجای تودهسنگ مورد مطالعه قرار گیرد. در مرحله بعد، یعنی وقتی که انفجار صورت گرفت از نرم‌افزارهای آنالیز تصویری برای تعیین دانه بندی تودهسنگ خرد شده استفاده می‌شود. روش تخمین انرژی خردایش بر مبنای محاسبه تفاوت بین مساحت کل ناپیوستگی در تودهسنگ برجا و مساحت کل بلوک‌های کپه می‌باشد. مساحت ناشی از توزیع اندازه بلوک برجا، از طریق شبیه سازی به دست می‌آید و مساحت ناشی از توزیع اندازه دانه کپه، توسط برنامه آنالیز تصویری تعیین می‌شود. بعد از محاسبه سطح ویژه تودهسنگ برجا و سطح ویژه حاصل از خردایش، تفاضل این دو سطح به دست می‌آید و با در نظر گرفتن پارامترهای ژئومکانیکی تودهسنگ نظیر انرژی سطح ویژه، چگالی مواد، سرعت صوت، زبری شکستگی و مدول یانگ مقدار انرژی مصرف شده برای خردایش سنگ با استفاده از رابطه تجربی پیشنهادی حمدی محاسبه می‌شود که مراحل تحقیق به طور شماتیک در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.

^۱ Scanline



شکل (۱-۱): شماتیک کلی فرایند محاسبه انرژی خردایش

۱-۵- سابقه‌ی تحقیق

تحلیل خردایش تودهسنگ با مکانیسم آتشباری مستلزم بررسی کامل خصوصیات هندسی و ژئومکانیکی تودهسنگ و ارتباط آن با انرژی مصرفی است. بنابراین در سال‌های اخیر مطالعات متعددی برای تحلیل نتایج آتشباری و کیفیت خردایش و ارتباط نتایج حاصل با انرژی مصرفی صورت گرفته است.

اهمیت درزهای برجا و شکستگی روی درجه خردایش توسط گوش^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۰ بحث شده است. اوچرلونی و همکاران در سال ۱۹۹۰ با تحلیل نتایج ۱۲ انفجار انجام شده در یک معدن سنگ ساختمانی در جاوا^۲ نشان دادند که تخلخل سنگ بر توزیع خردایش تاثیر قابل توجهی دارد. چاکرابورتی^۳ و همکاران در سال ۱۹۹۴ گزارشی را ارایه کردند که نشان می‌دهد جهت درزهای به طور قابل ملاحظه‌ای روی شکل و میانگین اندازه خردشده اثر دارد. هاقان^۴ در سال ۱۹۹۵ به این نتیجه رسید که نتایج انفجار سنگ بیشتر از خواص سنگ تأثیر می‌پذیرد تا متغیرهای دیگر (Kulatilake et al, 2010). الر^۵ و همکاران در سال ۱۹۹۶ کارایی انفجار را از طریق مقایسه بین اندازه بلوک تودهسنگ ناشی از وجود شکستگی و توزیع اندازه بلوک ناشی از انفجار ارزیابی کردند. تکنیک تحلیل تصویر برای عکس‌هایی که به صورت تصادفی گرفته شده‌اند، به کار برده شد تا توزیع خردایش انفجار از آن به دست آید (Aler et al, 1996). اوچلیک^۶ در سال ۱۹۹۸ تأثیر پارامترهای ساختاری توodeسنگ روی توزیع خردایش انفجار را در سه مطالعه موردی نشان داد. در سال ۲۰۰۰ ژان وار^۷ و

¹ Ghosh

² Java

³ Chakraborty

⁴ Hagan

⁵ Aler

⁶ Ozcelik

⁷ Jhanwar

همکاران با استفاده از مطالعه موردي تأثير اندازه بلوک‌های برجا روی توزيع خردایش را نشان دادند؛ اندازه بلوک برجا را با استفاده از یک روش ساده شناخته شده مانند شمارش حجمی درزه تخمين زدند. در سال ۲۰۰۱ حمدی^۱ و همکاران روشی بر مبنای مفهوم ارزیابی بخش کل انرژی انفجاری مصرفی در ایجاد سطح شکستگی جدید ارائه کردند (*Hamdi et al, 2001*). در سال ۲۰۰۸ حمدی و همکاران یک روش برای ارزیابی کارایی انفجار توسعه دادند. این روش بر مبنای ارزیابی سطح جدید ایجاد شده به وسیله انفجار و تفاوت آن با سطح کل ناپیوستگی در توده سنگ برجا می‌باشد که سطح کل ناپیوستگی در توده سنگ برجا با استفاده از برنامه *SIMBLOC* و مساحت ناشی از توزيع اندازه کپه با برنامه *Fragscan* تعیین شده است (*Hamdi & Mouza, 2008*).

۱-۶- ساختار پایان نامه

این پژوهش در ۷ فصل تدوین شده است که فصل اول شامل بیان مسئله، ضرورت انجام تحقیق، اهداف و روش انجام آن است. در فصل دوم مکانیسم شکست سنگ، پارامترهای مؤثر در خردایش و روابط ارائه شده برای محاسبه انرژی خردایش بیان شده است. در فصل سوم ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ، روش‌های برداشت ناپیوستگی‌ها، روش‌های شبیه‌سازی هندسی توده سنگ و پیشینه فعالیت‌های انجام شده در زمینه محاسبه حجم بلوک‌های برجای توده سنگ پرداخته شده است. همچنین در این فصل توصیف هندسی توده سنگ با رویکرد شبکه شکستگی مجزا توضیح داده شده است. فصل چهارم با مروری بر کارهای قبلی انجام شده در زمینه آنالیز تصویری آغاز شده و در ادامه به نحوه تحلیل کپه انفجاری با استفاده از نرم‌افزار *Goldsizer* پرداخته می‌شود. در فصل پنجم روند تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ بیان شده و مطالعات آزمایشگاهی انجام شده برای تعیین مقدار چقرمگی، چگالی، تخلخل، مدول یانگ و ... توضیح داده می‌شود. فصل ششم با رسم نمودار توزيع ابعادی قبل از انفجار، نمودار توزيع ابعادی بعد از انفجار و محاسبه و خواص

^۱ *Hamdi*

فیزیکی و مکانیکی برای ماده سنگ معدن مس سونگون آغاز می‌شود. در این فصل انرژی مواد منفجره و انرژی خردایش با استفاده از رابطه ارایه شده توسط حمدی محاسبه شده و مقدار انرژی مفید صرف شده برای خردایش سنگ محاسبه می‌شود. در نهایت در فصل هفتم نتایج به دست آمده در این پژوهش مورد بحث قرار گرفته و پیشنهاداتی نیز برای مطالعات بعدی ارایه می‌شود.

فصل دوم

مکانیسم انفجار و عوامل موثر در ازرهی خردایش سگ

خرداش سنگ با استفاده از انرژی شیمیایی معمولاً برای خردایش و جابه‌جایی توده‌سنگ در معدن کاری، کارهای غیرنظمی و دیگر پروژه‌های استخراج سنگ انجام می‌شود. در معادن هدف خردایش سنگ، بدست آوردن محصول یکنواخت برای انجام بهتر عملیات بعدی نظیر بارگیری، برابری و سنگ‌شکنی می‌باشد. در مورد پروژه‌های مهندسی غیر نظامی نظیر کانال‌ها و تونل‌ها هدف ایجاد فضا برای برخی تسهیلات می‌باشد و مواد تولیدی استفاده خاصی ندارد. در مورد آتشباری‌های نزدیک به محل سکونت انسان‌ها یا ساختارهای مهم نظیر سدها، لرزش زمین ایجاد شده باید همراه با محدوده مجاز بوده و در راستای خردایش مناسب باشد. در کل ارزیابی کارایی انفجار عموماً به ارزیابی خردایش اشاره دارد. بنابراین بر اساس اهداف، رویکرد برای طراحی انفجار ممکن است متفاوت باشد (*Sastray & Chandar, 2013*).

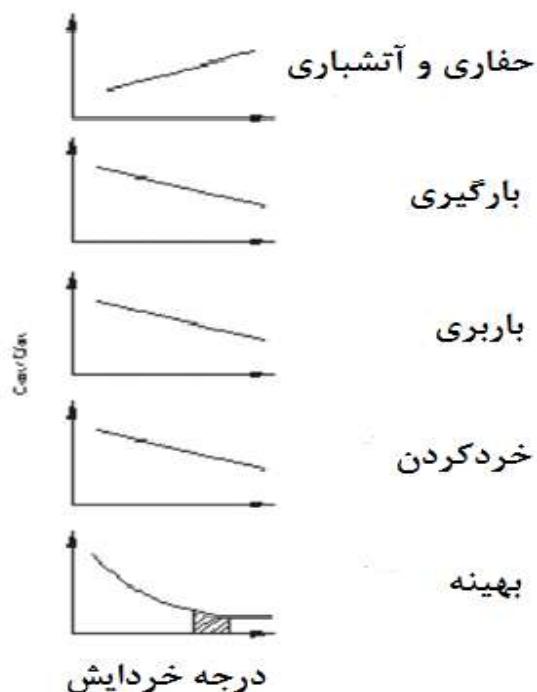
نتایج انفجاری می‌توانند در دو گروه خردایش مطلوب و خردایش نامطلوب نظیر لرزش زمین، سرو صدا و پرتاب سنگ دسته بندی شوند. بعلاوه برخی نتایج نامطلوب جزیی نظیر عقب‌زدگی، ایجاد پای پله و ... نیز وجود دارند (*Sastray & Chandar, 2013*). تعداد فاکتورهای مؤثر در نتایج آتشباری در دو گروه فاکتورهای قابل کنترل و غیر قابل کنترل گروه‌بندی می‌شوند (*Sastray & Chandar; 2013*, *Kulatilake et al; 2010*, *Eloranta*). خردایش به دست آمده در فرایند آتشباری بر هزینه‌های عملیات پایین دست نظیر بارگیری، جابه‌جایی و هزینه سایر فرایندها تأثیر دارد. اندازه خرد شده باید برای حمل و تجهیزات دیگر و به عبارتی برای کاهش هزینه‌های کلی تولید مناسب باشد. الورانتا^۱ در سال ۱۹۹۵، پالی^۲ و کوجوویک^۳ در سال ۲۰۰۱ بیان کردند که آتشباری تأثیر زیادی بر روی عملیات سنگ‌شکنی

¹ *Eloranta*

² *Paley*

³ *Kojovic*

و آسیاکنی دارد. ورکمن^۱ و الورانتا در سال ۲۰۰۳ بیان کردند که استفاده از انرژی ورودی بزرگ‌تر در عملیات واحد آتشباری ارزان‌تر از بسط دادن انرژی به عملیات پایین دست خواهد بود. الورانتا در سال ۱۹۹۵ نشان داد که بهبود خردایش نه تنها بار در آسیا و سنگ‌شکنی را کاهش می‌دهد بلکه نرخ بارگیری را بهبود می‌بخشد و تعمیرات در معدن را کاهش می‌دهد. خرد کردن مکانیکی و آسیا کنی گران‌تر از شکستن سنگ با استفاده از انرژی مواد منفجره می‌باشد. به هر حال هزینه حفاری و آتشباری با درجه خردایش افزایش می‌یابد و هزینه عملیات بعدی مانند بارگیری، باربری و سنگ‌شکنی در کل کاهش می‌یابد که باعث می‌شود هزینه تولید کم شود (Sastry & Chandar, 2013). شکل (۱-۲) اثر خردایش روی عملیات پایین دست را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۲): اثر خردایش روی عملیات پایین دست (Sastry & Chandar, 2013)

^۱ Workman

در کل در یک طراحی انفجار مناسب در حدود ۱۵ درصد انرژی، کار مفید انجام می‌دهد و بقیه‌ی آن در تولید اثرات جانبی زیان‌بار به هدر می‌رود (Lopez; 1995, Sastry & Chandar; 2013). انرژی آزاد شده به وسیله مواد منفجره می‌تواند در دو گروه انرژی شوکی و گازی گروه‌بندی شود، کار روی لایه‌های احاطه کننده منجر به خردشدنی از طریق مکانیسم‌های مختلف شکستگی می‌شود (استوار؛ ۱۳۷۷، Lopez; 1995).

در واقع عملیات آتشباری ترکیبی از نتایج مطلوب و نامطلوب می‌باشد. اثرات نامطلوب و ناخواسته ممکن نیست به طور کامل برطرف شود ولی می‌توان اثرات نامطلوب را کاهش دهد (Sastry & Chandar, 2013). در تحقیقات امروزی تعیین مقدار انرژی صرف شده برای خرد کردن سنگ یکی از چالش‌های اصلی می‌باشد. ارزیابی دقیق این بخش از انرژی آتشباری یک پارامتر کلیدی برای کنترل فرایند پودر کردن می‌باشد (Hamdi & Mouza, 2008). از این‌رو در این فصل در ابتدا مکانیسم شکست سنگ و انرژی آزاد شده در اثر انفجار بحث شده و پارامترهای مؤثر در خردایش سنگ بررسی می‌شود.

۲-۲- مکانیسم شکست سنگ در برابر انفجار

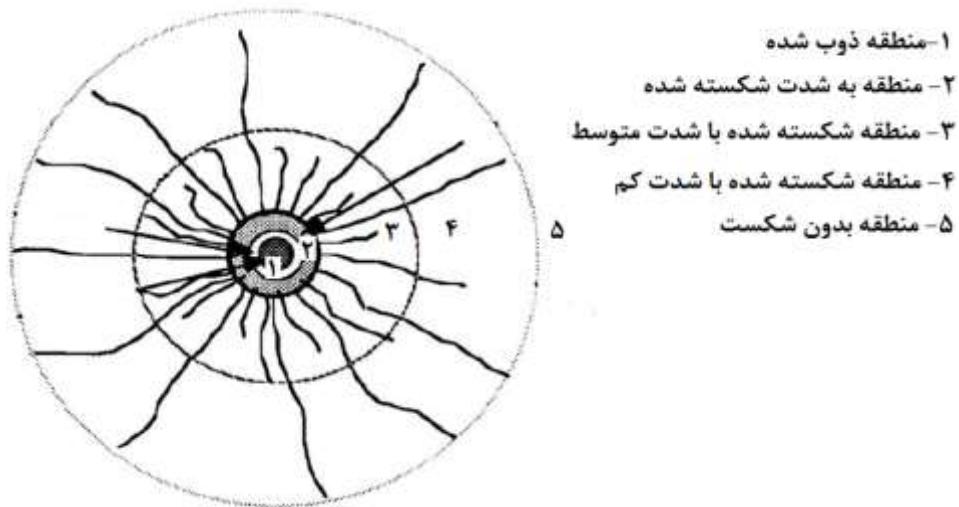
دو مکانیسم مهم ایجاد تنفس در انفجار وجود دارد؛ فشار ضربه و فشار گاز. مواد منفجره مختلف فشارهای ضربه و گاز متفاوتی دارند. در یک فرایند انفجار، انرژی انفجار به انرژی مکانیکی، گرما و محصولاتی با واکنش ناقص تبدیل می‌شود. فشار اولیه انفجار P_d به سرعت به فشار انفجار P_e کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که گازهای تولید شده تمام حفره‌های موجود در اطراف خرج را پر می‌کنند (Lopez; 1995، استوار؛ ۱۳۷۷).

فشار به وجود آمده از انفجار مواد منفجره پر قدرت شیمیایی بسیار بیشتر از مقاومت سنگ‌های اطراف خرج است. در نتیجه سطحی از سنگ که با ماده منفجره در تماس است به شدت خرد شده و

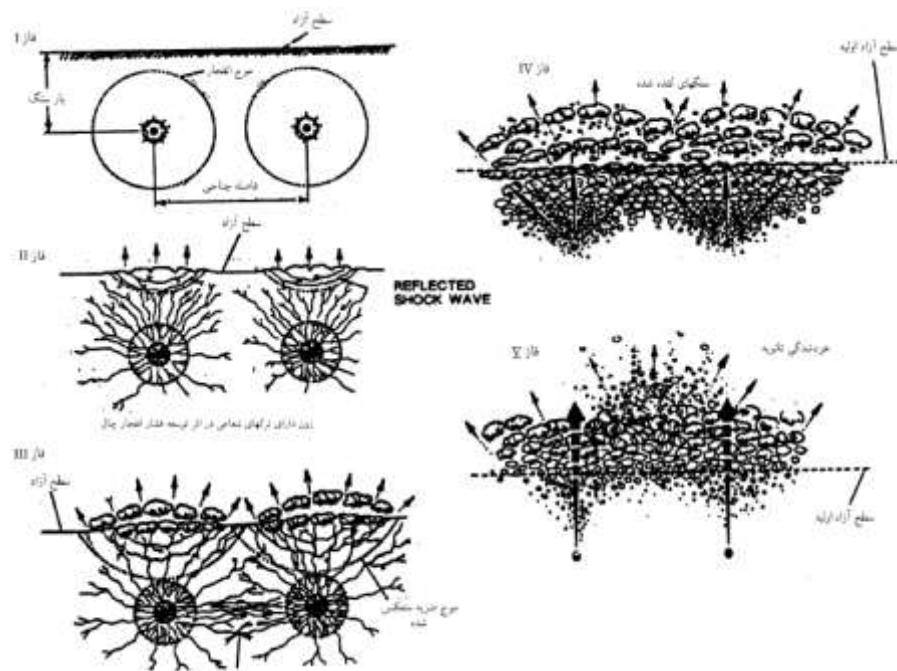
حتی ممکن است به حالت ذوب شدن نیز برسد؛ بنابراین یک ناحیه به شدت تغییر شکل یافته در مجاورت خرج تشکیل می‌شود. فشار انفجار باعث افزایش شعاع چال انفجاری تا دو برابر مقدار اولیه می‌شود. در این محدوده شدت تنفس‌های بالا باعث تشکیل موج ضربه در سنگ می‌شود. همچنین در این ناحیه که ناحیه ضربه نامیده می‌شود سنگ از نظر مکانیکی مانند یک جامد ویسکوز عمل می‌کند. عبور موج تنفس از سنگ باعث خرد شدن آن می‌شود و با کاهش لزجت شدت موج کم می‌شود، روند میرایی و کاهش سرعت انتشار موج تا رسیدن به سرعت انتشار صوت ادامه می‌یابد. برای یک چال انفجاری با شعاع r_h ، شعاع ناحیه ضربه ممکن است در حدود $2r_h$ باشد. محیطی که بعد از ناحیه شوک قرار دارد ناحیه تحول^۱ نامیده می‌شود. در این ناحیه سنگ مانند یک جامد با خاصیت الاستیک غیر خطی رفتار می‌کند. در نرخ کرنش بالا، جایی که تئوری کرنش الاستیک قادر به توصیف رفتار سنگ نیست، بر اثر اندرکنش سنگ با شکستگی‌های ذاتی موجود در سنگ شکستگی‌های جدیدی تحت میدان تنفس فشاری شعاعی شکل گرفته و توسعه می‌یابد. گسترش این شکستگی‌ها در جهت شعاعی است و در اثر این فرایند یک حلقه به شدت شکاف خورده در اطراف چال تشکیل می‌شود که ناحیه ریز ترک نامیده می‌شود. تشکیل شکستگی‌های شعاعی انرژی امواج انفجاری را می‌گیرد، در نتیجه از شدت آن کاسته می‌شود. این ناحیه تا جایی که شدت تنفس به سطحی برسد که سنگ رفتار الاستیک خطی پیدا کند ادامه می‌یابد. شعاع این ناحیه در حدود ۴ تا ۶ برابر شعاع چال انفجاری است. ناحیه الاستیک بلافاصله بعد از منطقه خرد شده قرار دارد و در آن لرزش‌های الاستیک رخ می‌دهد. در این ناحیه ممکن است شکستگی‌های جدیدی تشکیل شود ولی تشکیل آن منحصر به امتداد یافتن شکستگی‌ها به وجود آمده در مرحله تحول می‌باشد. بنابراین در یک فاصله کوتاه از ناحیه تحول، تعداد کمی از شکستگی‌ها گسترش می‌یابند. پیامدهای انفجار در ناحیه الاستیک به صورت لرزش بروز می‌کند. به عبارت دیگر پس از فرو نشستن انفجار، انرژی باقیمانده توسط امواج به محیط

^۱transition

اطراف محفظه انفجار منتقل می‌شود. این امواج که از درون زمین عبور می‌کنند حاوی این انرژی هستند، اصطلاحاً این امواج، امواج لرزه‌ای نامیده می‌شوند. لرزش‌های ناشی از این امواج می‌توانند موجب خسارت به سازه‌های مجاور سطحی و زیرزمینی نقطه انفجار شوند. مکانیسم شکست شرح داده شده در شکل (۲-۲) نشان داده شده است. در واقع با انفجار مواد منفجره موج ضربه باعث ایجاد ترک‌های شعاعی می‌شود و فشار گاز باعث گسترش این ترک‌ها می‌شود و شکاف‌هایی در اثر برداشته شدن بار و در مرزهای تغییر جنس مواد ایجاد می‌شود. هنگامی که موج کرنشی به سطح آزاد می‌رسد، دو نوع موج کشنشی و موج برنشی تولید می‌شود. این امر در حالی رخ می‌دهد که ترک‌های شعاعی حداقل تا فاصله یک سوم بین چال‌ها و سطح آزاد تشکیل می‌شوند. اگرچه مقدار نسبی انرژی‌های این دو موج بستگی به زاویه برخورد موج کرنشی فشاری دارد، ولی معمولاً خرد شدن سنگ در اثر موج کشنشی منعکس شده ایجاد می‌شود. اگر موج کشنشی به اندازه کافی قوی باشد تا بر مقاومت دینامیکی سنگ غلبه کند، توده‌سنگ در جهت عقب خود خرد خواهد شد همچنین در طول فرایند تشکیل ترک‌های شعاعی و پوسته شدن و همچنین بعد از آن، مواد سنگی جلوی چال را می‌توان به مانند یک تیر دو سر گیردار (در پای پله و محل بارگذاری) در نظر گرفت که تحت بارگذاری ناشی از گازها می‌باشد. بدین ترتیب این مواد در اثر خمین ایجاد شده دچار تغییر شده و خرد خواهند شد. در مرحله آخر قطعات سنگی که به وسیله مکانیسم‌های فوق الذکر ایجاد شده و در اثر گازهای حاصل از انفجار شتاب گرفته و در حال حرکت به سمت سطح آزاد می‌باشند، در نتیجه در برخورد با یگدیگر شکسته و به قطعات ریزتری تقسیم می‌شوند که شکل (۳-۲) خلاصه‌ای از مکانیسم خردایش را نشان می‌دهد (Lopez, 1995).



شکل (۲-۲): مناطق تشکیل شده اطراف یک خرج منفجر شده در سنگ (Hamdi, 2007)



شکل (۳-۲): خلاصه‌ای از مکانیسم خرد شدن سنگ (Lopez, 1995)

۳-۲- انرژی مواد منفجره^۱

مواد منفجره اولین منبع انرژی برای شکستن سنگ در کارهای معدنی، سنگ ساختمانی و ... می‌باشد. این انرژی باعث انتقال توده‌سنگ از حالت برجا به بلوک خرد شده و جابجایی آن‌ها می‌شود. بنابراین توده‌سنگ خرد شده می‌تواند به راحتی جهت خردایش بیشتر و فرآوری آن بارگیری و باربری شود. مواد منفجره قادر به آزاد کردن انرژی به صورت خودکار در کوتاه‌ترین زمان ممکن هستند. این نتایج در فشار بالا باعث تغییر شکل‌پذیری و شکستگی در مجاورت مواد منفجره می‌شود. در واقع این عوامل باعث می‌شود که مواد منفجره در شکستن سنگ بسیار مفید تلقی شود و در بسیاری از موارد غیر قابل جایگزین برای استخراج سنگ به شمار می‌آیند. انرژی مواد منفجره مجاز در روش‌های مختلف به صورت محاسبه‌ای و آزمایش‌های تجربی به دست می‌آید. بنابراین سوال‌هایی از قبیل چه مقدار انرژی مواد منفجره به سنگ منتقل می‌شود و چه ضریبی از آن در کاربردهای مؤثر صرف می‌شود، به طور عمده نامعلوم می‌ماند. اگرچه اندازه‌گیری برخی اثرات مواد منفجره در سنگ مرسوم می‌باشد ولی آن‌ها با هدف کنترل انفجار انجام می‌شوند و به ندرت در مورد محتوای انرژی آن بحث می‌شود. اطلاعات و تخمين انرژی در انفجار سنگ به تعداد کمی از تحقیقات محدود می‌شود. برta، اسپاتیس و اوچترلونی و همکاران مقدار انرژی جنبشی، شکستگی ایجاد شده و امواج لرزشی را محاسبه کردند. انرژی انفجاری و مقایسه آن با انرژی لرزشی توسط هول و بودن استین، فوغلسون و همکاران، برگ و کوک، نیکلولس، اتچینسون و هیزن گزارش شده اند (*Sanchidrian et al, 2007*). حمدی و دی موزا نیز محاسبه انرژی خردایش در انفجار سنگ را بررسی کردند (*Hamdi et al; Hamdi & Mouza; 2008 2001*) . برخی از شکل‌ها در طی انفجار ظاهر می‌شود که عبارتند از :(*Sanchidrian et al, 2007*)

الف) عمل شکست که در نهایت به عنوان سطح جدید در سنگ خردشده ظاهر می‌شود.

^۱ Explosive Energy

ب) جابجایی به صورت موج ضربه در داخل تودهسنگ، انتشار امواج پلاستیک و در نهایت امواج الستیک، پدیدار شدن به صورت موج لرزه‌ای یا لرزش زمین.

ج) جابجایی سنگ و تشکیل کپه، که به عنوان انرژی جنبشی در سنگ ظاهر می‌شوند.

در مجموع انرژی مواد منفجره به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E_E = E_F + E_S + E_K + E_{NM} \quad (1-2)$$

در این رابطه E_E انرژی مواد منفجره، E_F انرژی خردایش، E_S انرژی لرزشی، E_K انرژی جنبشی و E_{NM} دیگر شکل‌های انرژی که محاسبه نشده‌اند.

۱-۳-۲- انرژی خردایش^۱

یک مقدار ویژه انرژی که برای ایجاد سطح شکستگی جدید نیاز است؛ اگر این انرژی، بر واحد سطح γ_f باشد، انرژی خردایش می‌تواند از طریق رابطه زیر حساب شود (*Hamdi et al, 2001*, *Hamdi & Mouza; 2008, Sanchidrian et al; 2007*)

$$E_F = \gamma_f \Delta A \quad (2-2)$$

که ΔA تفاضل مساحت سطح برجا و مساحت حاصل از خردایش است. انرژی شکستگی ویژه γ_f می‌تواند از آزمایش تجربی خردایش تحت انرژی ورودی کنترل شده به وسیله ابزارهای خردکردن (پودر کردن) مکانیکی محاسبه شود، یا ناشی از خواص مواد سنگ، چقرومگی شگستگی و مدول الستیک می‌باشد. حالت اول شامل میلیون‌ها شکستگی در سنگ می‌باشد در حالی که چقرومگی شکستگی از آزمایش‌هایی که تنها از یک شکستگی تشکیل شده است، به دست می‌آید. مقدار γ_f از طریق رابطه (۳-۲) به دست می‌آید (*Hamdi & Sanchidrian et al; 2007, Hamdi et al; 2001*) (*Mouza; 2008,*

¹ Fragmentation Energy

$$\gamma_f = \frac{K_{IC}^2}{2 \rho c^2} \quad (3-2)$$

γ_f : انرژی ویژه سطح

K_{IC} : چرمگی شکست حالت کششی ماده سنگ بر حسب $MPa\sqrt{m}$

ρ : چگالی مواد بر حسب g/cm^3

c : سرعت امواج فشاری در سنگ بر حسب m/s

مقدار A از رابطه زیر به دست می‌آید که در نهایت منجر به رابطه (۵-۲) می‌شود (*Hamdi*, ۲۰۰۷):

(2007)

$$A = \frac{\lambda V_t}{\chi_c} \Gamma \left(1 - \frac{1}{n} \right) \quad (4-2)$$

$$\Delta A = \frac{\lambda_2 V_t}{\chi_{c2}} \Gamma \left(1 - \frac{1}{n_2} \right) - \frac{\lambda_1 V_t}{\chi_{c1}} \Gamma \left(1 - \frac{1}{n_1} \right) \quad (5-2)$$

V_t : حجم کل توده سنگ خرد شده

χ_{c1} : اندیس مشخصه قبل از انفجار

χ_{c2} : اندیس مشخصه بعد از انفجار

n_1 : اندیس شکل قبل از انفجار

n_2 : اندیس شکل بعد از انفجار

و مقدار λ برابر با ۶ می‌باشد.

بعد از محاسبه γ_f و ΔA و جایگذاری آن در رابطه (۲-۲) انرژی خردایش به دست می‌آید.

با محاسبه انرژی مواد منفجره و انرژی خردایش، میزان خردایش از رابطه (۶-۶) حاصل می‌شود:

$$\eta = \frac{E_f}{E_x} \times 100 \quad (6-2)$$

انرژی خردایش: E_f

مواد منفجره: E_x

نرخ انرژی خردایش، میزان انرژی خردایش یا کارایی انفجار

۱-۳-۲- تصحیح رابطه انرژی خردایش توسط حمدی

با توجه به رابطه مذکور مقدار انرژی خردایش مقدار خیلی کمی می‌باشد و معقول به نظر نمی‌رسد بنابراین حمدی با استفاده از رابطه زیر مقدار انرژی مصرف شده برای خردایش را تصحیح کرد (Hamdi, 2007).

$$Ef_2 = \frac{100}{15}Ef_1 + \frac{85}{15}\gamma_f S_{mr} \quad (7-2)$$

در رابطه بالا مقدار S_{mr} (سطح بلوك در توده سنگ برجا) از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$S_{mr} = \frac{6V_t}{\chi_{c1}} \Gamma \left(1 - \frac{1}{n_1} \right) \quad (8-2)$$

کل انرژی ماده منفجره به سنگ منتقل نمی‌شود و حدوداً ۵۰ درصد انرژی ماده منفجره به سنگ منتقل می‌شود از این‌رو درصد انرژی خردایش به صورت زیر بیان می‌شود (Hamdi, 2007):

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{200}{15} + \frac{170}{15} \times \frac{\gamma_f S_{mr}}{\eta_1 E_x} \quad (9-2)$$

۱-۳-۲-۳- انرژی لرزشی^۱

انرژی منتقل شده به سنگ در قالب امواج لرزشی به صورت زیر محاسبه می‌شود

(Sanchezidrian et al, 2007)

¹ Seismic Energy

$$E_S = 4\pi r^2 \rho \left[c_L \int_0^{\infty} v_1^2 dt + c_T \int_0^{\infty} (v_2^2 + v_3^2) dt \right] \quad (10-2)$$

که در آن:

E_S : انرژی لرزشی

ρ : چگالی سنگ

c_L : سرعت امواج طولی

c_T : سرعت امواج عرضی

v : برآیند بردار سرعت‌ها

v_1 : مولفه شعاعی سرعت ذرات

v_2 و v_3 : مولفه عمودی و عرضی سرعت

با محاسبه مقادیر مذکور مقدار انرژی لرزه‌ای محاسبه می‌شود.

۳-۲-۳-۳-۱- انرژی جنبشی^۱

انرژی جنبشی از اندازه‌گیری سرعت اولیه سطح سنگ در ارتفاع‌های مختلف در طول ارتفاع دیواره (y) محاسبه می‌شود. فیلم‌برداری با سرعت بالا و اندازه‌گیری رادار نشان داده که توزیع سرعت سطح برای انفجار نسبتاً کم می‌باشد، و سنگ سطح (سینه‌کار) به اتفاق سطح حرکت می‌کند. اگر فرض شود که سرعت کل توده‌سنگ در بخش افقی بارسنگ ثابت باشد، انرژی جنبشی از طریق رابطه (۱۱-۲) به دست می‌آید (Sanchezidrian et al, 2007)

¹ Kinetic Energy

$$E_K = \frac{1}{2} S B_h \int_0^H \rho(y) V_0^2(y) dy \quad (11-2)$$

$\rho(y)$: متغیر چگالی سنگ

H : ارتفاع پله

S : فاصله‌داری بین چال‌ها

B_h : میانگین بارسنگ افقی که از سطح پروفیل به دست می‌آید.

۴-۲- پارامترهای مؤثر در خردایش سنگ

پارامترهای مؤثر بر خردایش سنگ در دو گروه پارامترهای قابل‌کنترل و پارامترهای غیرقابل‌کنترل تقسیم می‌شوند. پارامترهای قابل‌کنترل پارامترهای طراحی انفجار و پارامترهای مواد منفجره هستند. ساختار توده سنگ و خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ نیز پارامترهای غیر قابل کنترل هستند که به اختصار هر یک از این پارامترهای شرح داده می‌شوند (*Kulatilake et al, 2010*).

۴-۱- خواص فیزیکی و مکانیکی ماده‌سنگ و ناپیوستگی‌ها

خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها متعلق به این گروه هستند که شامل چگالی، مقاومت فشاری دینامیکی، مقاومت کششی دینامیکی، مقاومت برشی، خواص الاستیک دینامیکی، سختی، ماندگاری (دوام)، ترکیب کانی‌شناسی و اندازه دانه‌های سنگ بکر و مقاومت برشی، تغییرشکل پذیری، زبری و خواص پرشدگی ناپیوستگی‌ها هستند (*Kulatilake et al, 2010*).

۴-۲- پارامترهای ساختار توده‌سنگ

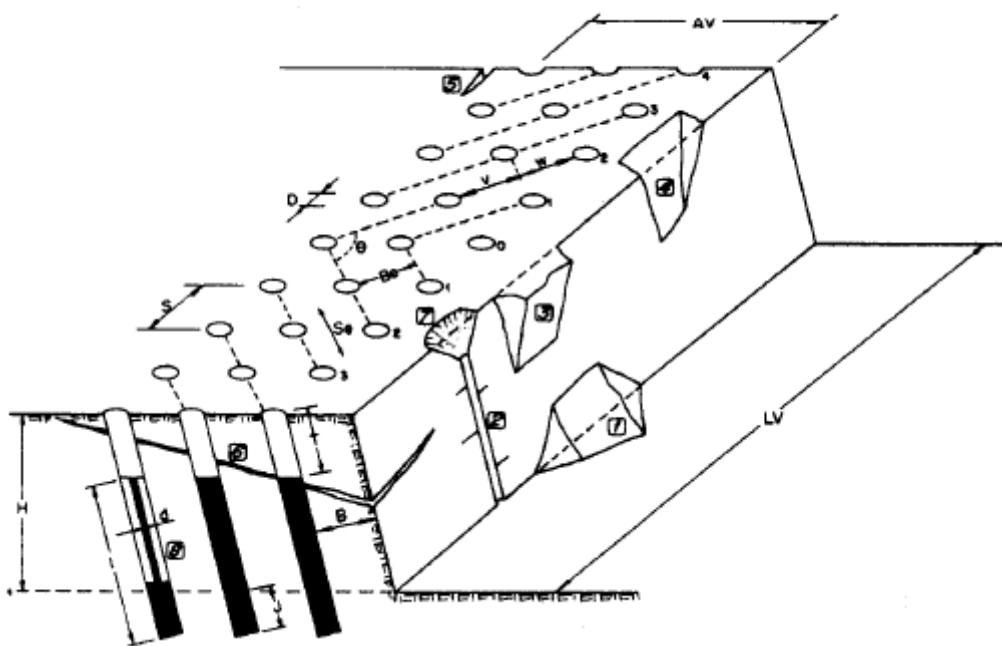
این گروه شامل پارامترهای ساختاری توده‌سنگ نظیر تعداد دسته ناپیوستگی‌ها، جهت‌داری، اندازه، فاصله‌داری و توزیع چگالی هر دسته ناپیوستگی هستند (*Kulatilake et al, 2010*).

۳-۴-۲- پارامترهای ماده منفجره

گروه بعدی شامل پارامترهای ماده منفجره می‌باشد. نوع ماده منفجره (آنفو، ژل آب، امولسیون یا دینامیت) چگالی (متغیر بین $1/6$ و $1/0$ گرم بر سانتی متر مکعب)، مقاومت، ضریب مقاومت، خرج ویژه (Kulatilake et al, 2010) کنترل هستند (kg Anfo/m³) و انرژی ویژه (Mj/kg) پارامترهای ماده منفجره هستند که این پارامترها قابل

۴-۴-۲- پارامترهای طراحی انفجار

بارسنگ، فاصله بین ردیف چال‌ها، ارتفاع پله، قطر چال حفر شده، طول چال، عمق خرج، ارتفاع گل‌گذاری، اضافه حفاری، الگوی حفاری (مربعی با شطرنجی)، جهت چال (عمودی یا شیبدار) جهت انفجار و توالی انفجار (لحظه‌ای یا تاخیری) پارامترهای طراحی انفجار هستند. همه این پارامترها قابل کنترل می‌باشند. شکل (۴-۲) پارامترهای انفجاری استفاده شده در انفجار پله را نشان می‌دهد که در زیر به توصیف مختصری از این عبارت‌ها پرداخته می‌شود (Kulatilake et al, 2010).



شکل (۴-۲): پارامترهای انفجاری در آتشکاری پله‌ای (Lopez, 1995)

- **قطر چال:** قطر چال حفاری مهم‌ترین پارامتر برای (مؤثر در انتخاب پارامترهای دیگر) هر طراحی انفجار می‌باشد.
- **بارسنگ:** فاصله سینه کار انفجاری از چال می‌باشد.
- **فاصله داری:** فاصله بین دو چال متواالی با هم که در یک دوره تاخیری آتش می‌شوند.
- **طول چال و اضافه حفاری:** چال معمولاً اندکی زیر طبقه کف برای به دست آوردن سطح صاف حفاری می‌شود، این طول کلی چال به عنوان طول چال شناخته می‌شود و قسمتی که زیر طبقه کف برای به دست آوردن سطح صاف حفاری می‌شود اضافه حفاری نام دارد.
- **ارتفاع پله:** ارتفاعی از چال که از بالای پله شروع و تا کف پله ادامه پیدا می‌کند، ارتفاع پله گویند.

- ارتفاع گل‌گذاری: برای جلوگیری از هدر رفتن انرژی انفجار، بخشی از چال حفاری در قسمت بالا با ماده منفجره پر نمی‌شود، این طول به عنوان ارتفاع گل‌گذاری شناخته می‌شود برخی مواد خنثی از قبیل برش‌های حفاری، ماسه، سنگ خرد شده و ... به عنوان گل‌گذاری استفاده می‌شود.

۵-۲- جمع‌بندی

مواد منفجره اولین منبع انرژی برای شکستن سنگ در کارهای معدنی می‌باشند که بخشی از این انرژی صرف مسایل زیان‌بار و بخشی هم صرف خرد کردن سنگ می‌شود. در خردایش سنگ پارامترهای مختلفی دخیل هستند که این پارامترها در دو گروه غیرقابل کنترل و پارامترهای قابل کنترل دسته‌بندی می‌شوند. بنابراین شناسایی، برداشت و محاسبه این پارامترها امری مهم در تعیین انرژی صرف شده در خردایش سنگ می‌باشد. از این‌رو با اطلاع از هندسه بلوك‌های توده‌سنگ قبل از انفجار، ابعاد بلوك‌های توده‌سنگ بعد از انفجار، خواص فیزیکی و مکانیکی ماده‌سنگ، الگوی انفجار و انرژی مواد منفجره می‌توان درصد انرژی صرف شده برای خردایش سنگ را محاسبه کرد. نحوه محاسبه پارامترهای مذکور و نتایج حاصل از آن موضوع فصل‌های بعدی می‌باشد.

فصل سوم

تصیف هندسی توده‌گنک درزه‌دار و شیوه‌سازی آن با

رویکرد پیکربندی سلسلتی محذا

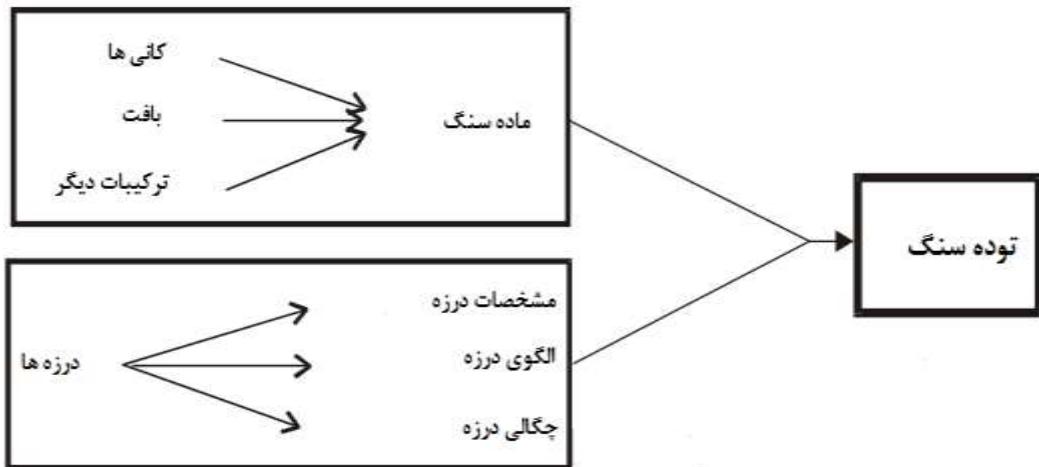
انواع ناپیوستگی‌هایی که در توده‌های سنگی ایجاد می‌شوند شامل زون‌های گسلی، گسل‌های منفرد، درزه، کلیواز، شیستوزیته، زون برشی، ترک کششی، فولیاسون و سطوح لایه‌بندی هستند (فریدونی، ۱۳۸۷). در واقع ناپیوستگی‌ها رفتار مکانیکی توده‌سنگ را کنترل می‌کنند؛ بنابراین شناخت ناپیوستگی‌ها برای کنترل رفتار مکانیکی توده‌سنگ امری ضروری می‌باشد. جهت‌یابی، چگالی، فاصله‌داری، شکل، اندازه، رخنمون، میزان بازشدگی و موقعیت ... از خصوصیات اصلی ناپیوستگی‌ها هستند (Jing & Stephansson, 2007). با دانستن همه این خصوصیات یک ناپیوستگی را می‌توان به طور کامل شناخت. این ناپیوستگی‌ها باعث ایجاد بلوک‌هایی با ابعاد و هندسه متفاوت در سنگ می‌شوند. اطلاع از هندسه توده‌سنگ و بلوک‌های آن در زمینه‌های مختلف مهندسی سنگ ضروری می‌باشد. بنابراین با اطلاع از خصوصیات ناپیوستگی می‌توان توده‌سنگ را در برنامه کامپیوتروی مدل‌سازی کرد و توزیع ابعادی بلوک‌ها را به دست آورد. از این‌رو در این فصل در ابتدا از توده‌سنگ و اجزای تشکیل دهنده آن و سپس ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌های توده‌سنگ بحث می‌شود. در گام بعدی به روش برداشت ناپیوستگی‌های توده‌سنگ، تاریخچه‌ای از کارهای قبلی انجام شده در زمینه هندسه توده‌سنگ و شبیه‌سازی توده‌سنگ با مدل‌های شبکه شکستگی مجزا پرداخته می‌شود.

۲-۳- توده‌سنگ درزه‌دار و اجزای آن

توده‌سنگ موجود در طبیعت با توجه به نحوه تشکیل دارای انواع مختلف آذرین، دگرگونی و رسوبی هستند. توده‌سنگ‌ها بر اثر عوامل مختلف نظیر عوامل تکتونیکی تغییر شکل می‌یابند و ناپیوستگی‌های مختلف با خصوصیات متفاوت در آن‌ها ایجاد می‌شوند. با توجه به میزان بازشدگی، طول و شیب ناپیوستگی‌ها آن‌ها را به انواع مختلف تقسیم بندی می‌کنند. با توجه به انواع ناپیوستگی‌ها و فاصله‌داری آن‌ها بلوک‌هایی با ابعاد و شکل‌های مختلف در توده‌سنگ ایجاد می‌شود.

نوع ماده سنگ تشکیل دهنده سنگ‌های توده‌سنگ، الگو و چگالی ناپیوستگی‌ها تأثیر زیادی در خصوصیات مکانیکی و هندسی توده‌سنگ دارد (Sharma & Saxena, 2001).

شکل (۳-۱) اجرای تشکیل دهنده توده‌سنگ که شامل ماده سنگ و ناپیوستگی‌ها می‌باشد را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱): اجرای تشکیل دهنده توده‌سنگ (Sharma & Saxena, 2001)

۱-۲-۳- ماده سنگ

ماده سنگ از کانی‌های مختلف، بافت و ترکیبات دیگر تشکیل شده است. نوع ماده سنگ ویژگی‌های هندسی و مکانیکی توده‌سنگ را تعیین می‌کند. به عنوان مثال مقاومت توده‌سنگ تحت تأثیر مستقیم مقاومت ماده سنگ است (Sharma & Saxena, 2001).

۲-۲-۳- ناپیوستگی‌های توده‌سنگ

ناپیوستگی‌های زیادی در توده‌سنگ وجود دارد که تعریف مختلفی از نظر متخصصین برای آن‌ها ارایه شده است. این ناپیوستگی‌ها تشکیل دهنده بلوک‌های توده‌سنگ بوده و رفتار مکانیکی توده سنگ را کنترل می‌کنند. مطابق شکل (۳-۲) در سال ۱۹۷۵ انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ تعاریف زیر را

بر اساس فاصله صفحات و طول باز شدگی برای باز شدگی‌های مختلف ارایه داده‌اند (& Sharma, 2001

- درزه^۱: صفحه به وجود آمده در سنگ که هیچ‌گونه جابه‌جایی نداشته باشد را درزه گویند

بنابراین عدم جابه‌جایی در سطح شکستگی تفاوت بین درزه و گسل می‌باشد. البته در درزه‌ها ممکن است جابه‌جایی‌ها خیلی کم و در حدود کمتر از نیم سانتی‌متر صورت گرفته باشد که از آن صرف‌نظر می‌شود و طول آن بین ۵ سانتی‌متر تا ۱۰۰ متر است.

- ترک^۲: یک جدادشده‌گی یا ناپیوستگی کوچک ناقص که طول آن کمتر از یک سانتی‌متر باشد را

- شکاف^۳: ناپیوستگی در سنگ ناشی از چین و گسل‌های شدید که همراه با بازشدگی زیاد باشد

- تورق^۴: صفحه یا سطح افقی بین لایه‌های سنگ را تورق گویند

- گسیختگی^۵: ناپیوستگی‌های حاصل از استخراج و یا فعالیت‌های انسانی را گسیختگی گویند.

- برش^۶: رگه‌ای از سنگ‌های خرد شده که معمولاً ضخامتی بیشتر از درزه‌ها دارند را برش

- رگه^۷: ناپیوستگی‌هایی با ضخامت زیاد که با سنگ یا خاک پر شده باشد را رگه گویند.

¹ Joint

² Crack

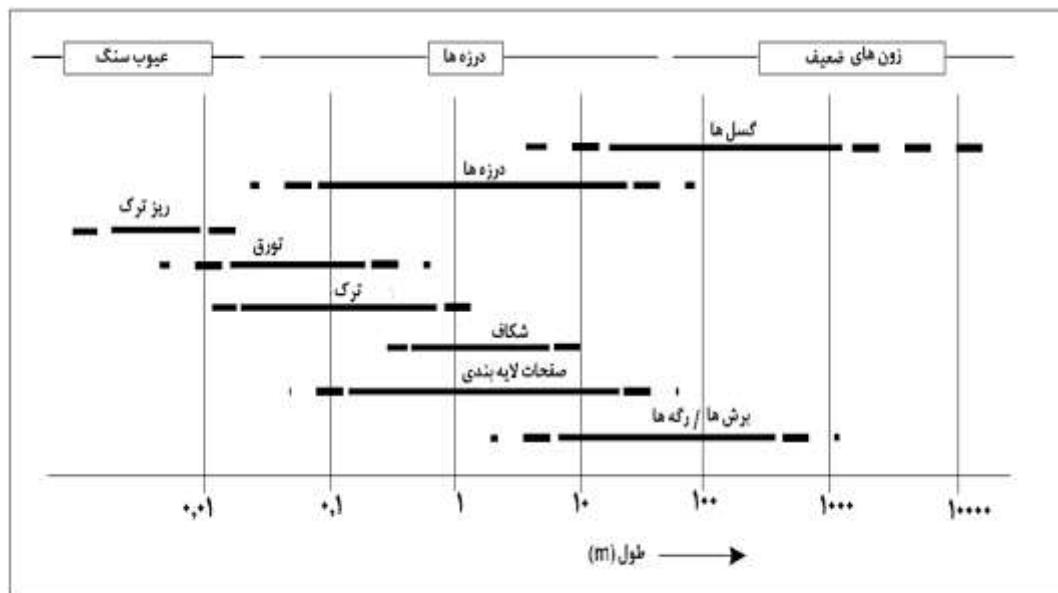
³ Fissure

⁴ Parting

⁵ Rupture

⁶ Shear

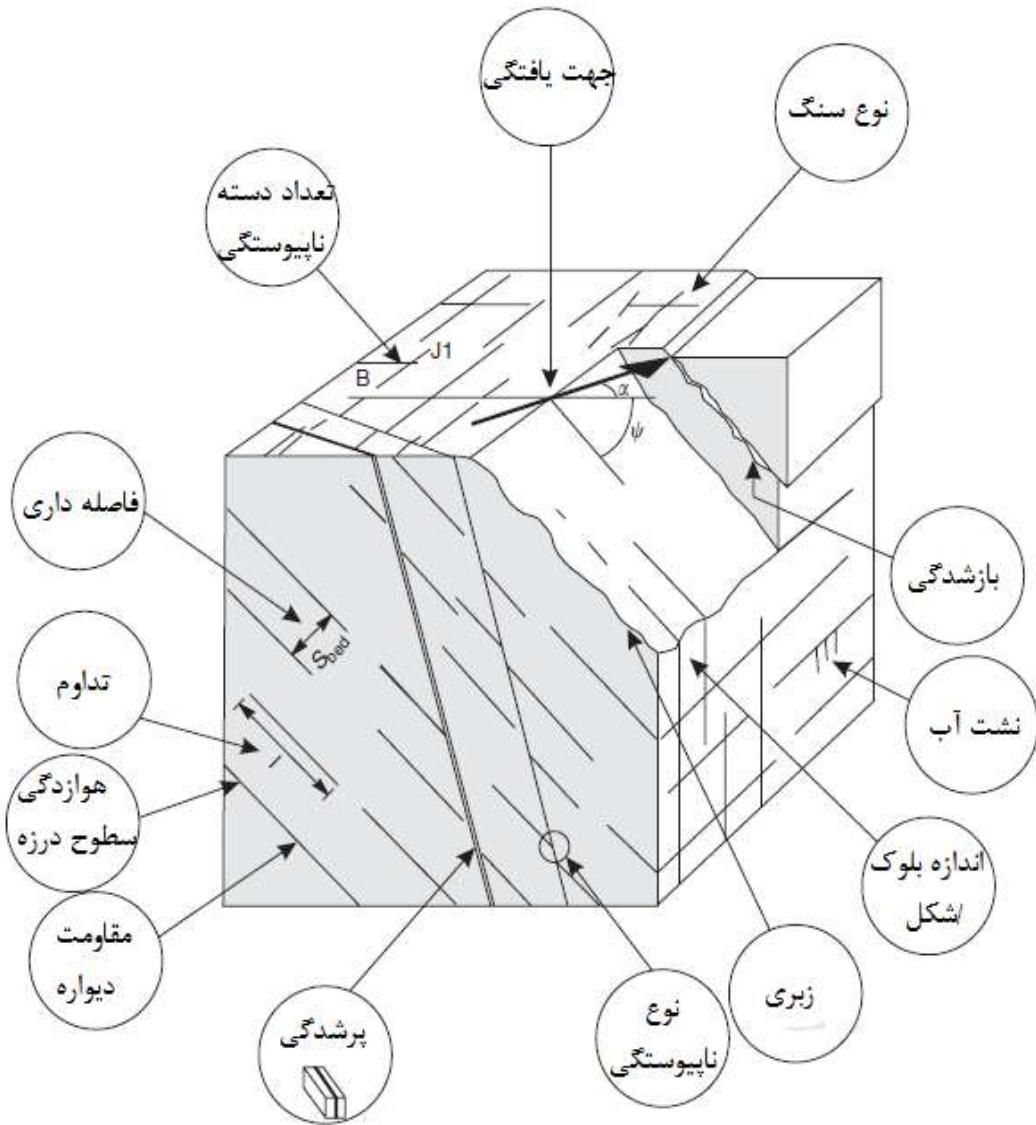
⁷ Seam



شکل (۳-۲): تفاوت اندازه انواع ناپیوستگی‌ها در تودهسنگ (Sharma & Saxena, 2001)

۳-۳- ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها

در کارهای مهندسی، ناپیوستگی‌ها مهم‌ترین فاکتوری هستند که تغییرشکل‌پذیری، مقاومت و نفوذپذیری تودهسنگ را کنترل می‌کنند؛ و همچنین ناپیوستگی‌های بزرگ و متداوم می‌توانند بر پایداری فضاهای روباز و زیرزمینی تأثیر بسزایی داشته باشند. بنابراین فهم کلی ویژگی‌های هندسی، مکانیکی و هیدرولوژی ناپیوستگی‌ها و شیوه تأثیر آن‌ها بر مکانیک سنگ و مهندسی سنگ ضروری خواهد بود. در شکل (۳-۳) نمای شماتیکی ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها در داخل تودهسنگ نشان داده شده است. مطابق استاندارد ISRM برای توصیف خصوصیات ناپیوستگی‌ها ۱۰ پارامتر معرفی شده است. این شکل مهم‌ترین ویژگی‌های هندسی تودهسنگ را نشان می‌دهد (Hudson & Harrison, 1997). در ادامه به تشریح برخی از این پارامترها و خصوصیاتی که وضعیت هندسه یک شکستگی در تودهسنگ درزه‌دار را توصیف می‌کند، پرداخته شده است.



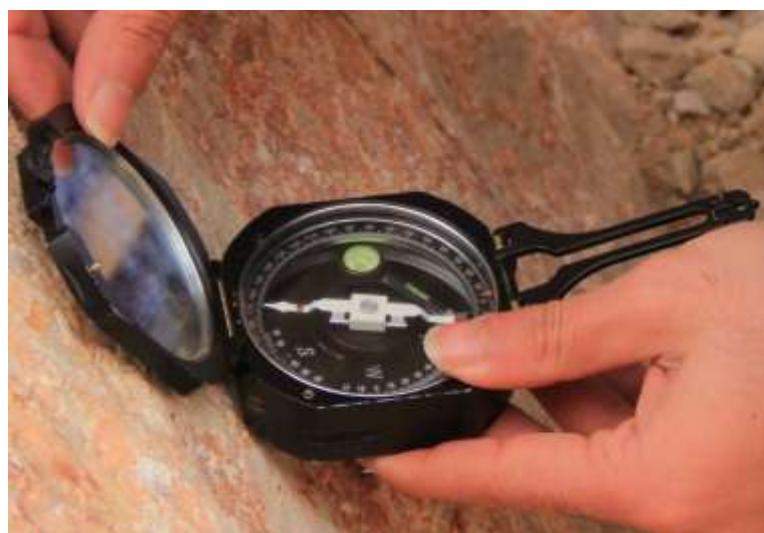
شکل (۳-۳): ویژگی های هندسی ناپیوستگی های موجود در توده سنگ (Hudson & Harrison, 1997)

۳-۱-۳-۳- جهت گیری ناپیوستگی ها^۱

جهت گیری شامل زاویه شیب و جهت شیب ناپیوستگی ها می باشد و موقعیت ناپیوستگی در فضا را مشخص می کند. این پارامتر مهم ترین ویژگی ناپیوستگی است و در حد مطلوبی در توده سنگ برای انواع ناپیوستگی ها از طریق برداشت های صحرایی و روش های دیگر قابل اندازه گیری می باشد

^۱ Orientation of discontinuities

اندازه‌گیری است شکل (۳-۴) نمونه‌ای از کمپاس برانتون برای اندازه‌گیری شیب و جهت شیب را نشان می‌دهد.^۱



شکل (۳-۴): نمونه‌ای از کمپاس برانتون برای اندازه‌گیری شیب و جهت شیب

۲-۳-۳- تعداد دسته درزه‌ها^۲

یک دسته درزه عبارت است از درزه‌های مستقلی که دارای ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مشابه بوده و تقریباً در یک جهت موازی نسبت به یکدیگر واقع شده باشند. به طور کلی رفتار مهندسی توده‌سنگ به شدت تحت تأثیر تعداد درزه‌ها است و در یک عملیات صحرایی تعداد درزه‌ها بایستی به دقیقت مورد بررسی قرار گرفته و ثبت شوند (Hudson & Harrison, 1997).

¹ Compas

² Number of joint sets

^۱-۳-۳- فاصله‌داری درزه^۱

فاصله‌داری به فاصله دو ناپیوستگی مجاور در امتداد خط برداشت گفته می‌شود. با توجه به این که فاصله ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ معمولاً ثابت نیست، اغلب برای معرفی این پارامتر از دو مقدار متوسط و بیشترین میزان فاصله‌داری استفاده می‌شود (*Priest & Hudson & Harrison, 1997*) (Hudson, 1980;

توصیف و تقسیم‌بندی مقادیر مختلف فاصله درزه‌ها بر اساس استاندارد *ISRM* در جدول (۱-۳) ارایه شده است.

جدول (۱-۳): توصیف فاصله درزه‌ها در توده‌های سنگی درزه‌دار (فریدونی، ۱۳۸۷)

توصیف	فاصله درزه (mm)
فوق‌العاده نزدیک	<۲۰
خیلی نزدیک	۲۰-۶۰
نزدیک	۶۰-۲۰۰
نسبتاً نزدیک	۲۰۰-۶۰۰
عریض	۶۰۰-۲۰۰۰
خیلی عریض	۲۰۰۰-۶۰۰۰
فوق‌العاده عریض	>۶۰۰۰

^۲-۳-۴- تداوم درزه^۲

طول برخورد ناپیوستگی با سطح رخنمون نشان‌گر اندازه و گسترش فضایی و طول نفوذ یک ناپیوستگی است. این ناپیوستگی در جایی خاتمه می‌یابد و یا این‌که به وسیله سنگ‌های خرد شده، خاک و ... قسمتی از طول آن مدفون می‌شود (*Hudson & Harrison, 1997*)

¹ Spacing

² Persistence

تمام درزه در مسایل رفتاری تودهسنگ اهمیت ویژه‌ای داشته و بخصوص در ارتباط با مسایل پایداری توده‌های سنگی شیبدار، قسمت‌های کوچک و پل مانندی که هنوز گسیخته نشده است تأثیر بسزایی در کل مقاومت برشی تودهسنگ می‌گذارد (فریدونی، ۱۳۸۷).

تصویف و تقسیم بندی ارایه شده توسط ISRM برای تمام درزه در جدول (۳-۲) درج شده است.

جدول (۳-۲): تصویف تمام پیوستگی درزه در تودهسنگ (فریدونی، ۱۳۸۷).

تصویف	تمام درزه (m)
تمام بسیار کم	>1
تمام کم	۱-۳
تمام متوسط	۳-۱۰
پیوستگی زیاد	۱۰-۲۰
پیوستگی خیلی زیاد	>20

۱-۳-۵-زبری سطح درزه^۱

به منظور تحلیل جهت و تمام، ناپیوستگی‌ها را صفحه‌ای فرض می‌کنند ولی سطح ناپیوستگی‌ها احتمالاً زبر و ناصاف باشد. زبری ناپیوستگی‌ها هم به وسیله چارت‌های استاندارد و هم به صورت ریاضی محاسبه می‌شوند. زبری لاینفک سطحی و تموج نسبت به صفحه میانگین یک ناپیوستگی از نظر مقاومت برشی حائز اهمیت است؛ که در صورت وجود بازشدگی زیاد یا وجود مواد جانشین شده در بین سطوح ناپیوستگی یا جابجایی قبلی سطوح ناپیوستگی از درجه این اهمیت کاسته می‌شود

(Hudson & Harrison, 1997)

^۱ Roughness

در تعریفی دیگر می‌توان گفت که زبری عبارت است از ناهمواری‌های موجود در سطح درزه در مقیاس کوچک و غیر موج بودن آن‌ها در مقیاس بزرگ و عملاً زبری بر جهت اولیه و اصلی جابجایی برشی اثر می‌گذارد (فریدونی، ۱۳۸۷).

برای اندازه‌گیری زبری سطح درزه در مقیاس کوچک از وسیله تعیین نیم‌رخ سطح درزه^۱ استفاده می‌شود (Hudson & Harrison, 1997).

۳-۳-۶- بازشدگی درزه‌ها^۲

بازشدگی فاصله عمودی بین دیواره سنگ مجاور یک ناپیوستگی است که ممکن است توسط هوا یا آب پر شده باشد. این مقدار برای سطوح مجاور صفحه‌ای ثابت و برای سطوح مجاور غیر موازی به صورت خطی تغییر می‌کند و برای سطوح مجاور زبر کاملاً متغیر است. اغلب به دلیل این‌که ناپیوستگی‌ها را به صورت پاره‌خط و صفحه فرض می‌کنند. میزان بازشدگی معمولاً صفر در نظر گرفته می‌شود (Jing & Stephansson, 2007؛ فریدونی، ۱۳۸۷).

۳-۳-۷- شکل^۳

شکل ناپیوستگی‌ها و شکستگی‌های توده‌سنگ اساساً نامعلوم بوده و از شکل خاصی تبعیت نمی‌کند، معمولاً برای ساده‌سازی در روند محاسبات به شکل دایره‌ای و مستطیلی و یا چند ضلعی صفحه‌ای فرض می‌شود (Jing & Stephansson, 2007).

¹ Profile Gauge

² Aperture or opening

³ Shape

^۱-۳-۸- طول خط اثر^۱

هر شکستگی در رخنمون دیواره سنگی به صورت یک خط مشاهده می‌شود. این خط، خط اثر شکستگی و طول آن، طول خط اثر نامیده می‌شود (Jing & Stephansson, 2007).

^۲-۳-۹- اندازه^۲

اندازه شکستگی‌ها عموماً نامعلوم بوده و مستقیماً نمی‌توان با استفاده از برداشت سطحی و اطلاعات گمانه‌ها به دست آورد. علماً فرض بر این است که طول خط اثر و اندازه شکستگی‌ها از تابع توزیع یکسانی تبعیت می‌کنند (Jing & Stephansson, 2007).

^۳-۳-۱۰- دانسیته^۳

دانسیته شکستگی در یک دسته شکستگی، به صورت تعداد متوسط شکستگی‌ها در واحد حجم توده‌سنگ معرفی می‌شود (Jing & Stephansson, 2007).

^۴-۳-۱۱- موقعیت مرکز شکستگی‌ها^۴

محل مرکز شکستگی‌ها، مرکز هندسی آن می‌باشد که تا حد زیادی مجهول بوده و مستقیماً از Jing &) (Stephansson, 2007 برداشت سطحی و یا مغزه‌های حفاری نمی‌توان آن را تعیین کرد.

متغیرهای بالا مجموعه پارامترهایی هستند که در برداشت صحرایی با استفاده از پیمایش صحرایی یا برداشت رخنمون‌ها اندازه‌گیری می‌شود. دقت و اهمیت داده‌های اندازه‌گیری شده به هدف

¹ Trace length

² Size

³ Density

⁴ Location (coordinates) of its geometric center

مهندسي بستگي دارد. در تمام اين برداشت‌ها بيان و نمايش داده‌ها باید به صورتی باشد که قابل درک و فهم بوده و تفسيرهای جامعی را جهت تجزيه و تحليل امكان‌پذير سازد.

۴-۳- روش‌های برداشت ناپیوستگی‌ها

برای درک بهتر بيان کمی تأثير ناپیوستگی بر روی رفتار توده‌سنگ لازم است که در مرحله اول ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها را اندازه‌گیری و به صورت کمی نشان داد. قبل از این‌که به معرفی روش‌های اندازه‌گیری ناپیوستگی‌ها پرداخته شود لازم است اهداف اندازه‌گیری را بيان کرد. این اهداف را می‌توان در در سه مورد بررسی ساختارهای زمین‌شناسی، دسته‌بندی توده‌سنگ و تولید داده‌های ورودی برای تحلیل‌های ویژه، مدل‌های عددی و تجربی پایداری توده‌سنگ، تغییر شکل‌پذیری سنگ، جريان سیال، آتشکاری، حفاری و یا نگهداری سنگ خلاصه کرد.

ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها مانند جهت داری، اندازه، فراوانی و هندسه سطح آن از ویژگی‌ها مهم هندسی آن بوده و باید اندازه‌گیری شوند. دو روش مهم و اساسی برای برداشت ناپیوستگی‌ها، برداشت از روی مغزه حفاری و دیگری برداشت از روی رخنمون‌های سنگی است (*Priest, 1993*).

۴-۱- برداشت ناپیوستگی‌ها در مغزه‌های حفاری

در این روش می‌توان بعضی از ویژگی‌های ناپیوستگی را از روی مغزه حفاری به دست آورد. مزیت مهم مغزه حفاری این است که به آسانی می‌توان از سنگ نمونه‌برداری کرده و آن را برای آزمایش‌های تغییر شکل‌پذیری و مقاومت سنگ به کار برد (*Priest, 1993*).

۴-۲- برداشت ناپیوستگی‌ها از روی رخنمون سنگی

اندازه‌گیری از روی رخنمون‌های سنگی چه بر روی زمین و چه در داخل زمین، از این مزیت که از منطقه بیش‌تری برای برداشت استفاده می‌شود، برخوردار است. به طوری که می‌توان ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها مانند جهت‌داری، اندازه و دیگر خصوصیات بزرگ مقیاس ناپیوستگی‌ها را

برداشت کرد. تنها مشکل و یا عیب این روش در دسترس نبودن رخنمون‌ها و تحت تأثیر قرار گرفتن آن‌ها از انفجار و یا دگر‌شکلی آن‌ها بر اثر هوازدگی و پنهان ماندن در زیر گیاهان است. همچنین مهارت کافی برای اندازه‌گیری‌ها نیاز خواهد بود، هزینه تجهیزات و کارگر در مقایسه با هزینه مغزه حفاری بسیار ناچیز است. تا این اواخر اندازه‌گیری‌ها بر روی رخنمون‌های سنگی به صورت دلخواه و قضاوت شخصی از برداشت‌های زمین‌شناسی تهیه می‌شد. این روش تنها برخی داده‌های کمی را برای طراحی مهندسی فراهم می‌کرد. اخیراً روش‌های بهتر و قوی آماری برای برداشت داده‌ها معرفی شده است. روش‌های پرکاربرد معرفی شده دو روش خط برداشت و پنجره برداشت می‌باشد. این روش‌ها توسط افراد مختلف تشریح و معرفی شده‌اند. در ادامه هر یک از آن‌ها به طور مفصل توضیح داده خواهند شد (Priest, 1993).

۱-۲-۴-۳- خط برداشت

سطح مسطح تمیز سنگی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که در برابر اندازه و فاصله ناپیوستگی‌ها بزرگ باشد. با توجه به نظر محققین باید رخنمون انتخابی شامل ۱۵۰ تا ۳۰۰ ناپیوستگی بوده و حداقل باید یک انتهای از ۵۰ درصد آن‌ها قابل مشاهده باشد. چنین رخنمون‌هایی در پرتگاه‌های کنار ساحل، شیب‌های حاصل از احداث جاده‌ها، پیت‌های معدنی و یا تونل‌های دسترسی یافت می‌شود. باید در انتخاب سایت دقت کرد که ناپیوستگی‌ها و مواد سنگ نمایان‌گر آن مکان و نیز رخنمون انتخابی برای کار برداشت ایمن باشد.

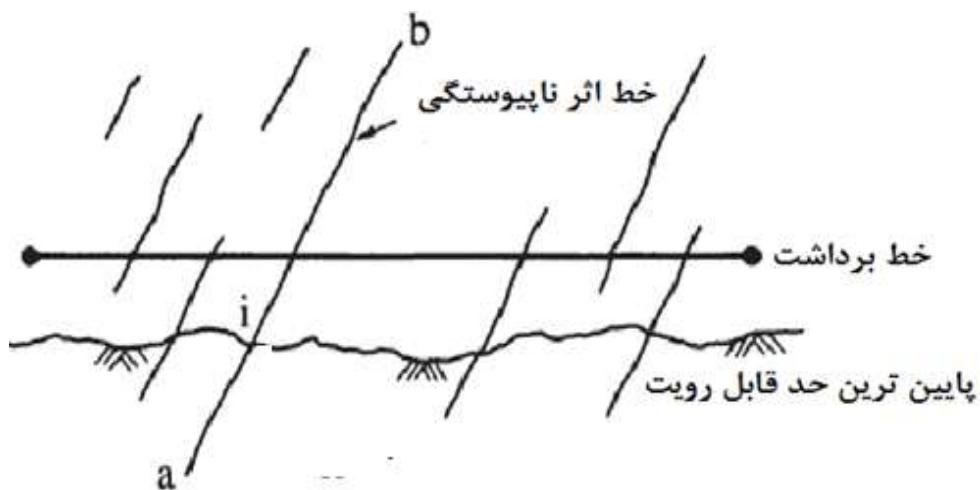
فصل مشترک ناپیوستگی‌ها و رخنمون‌های سنگی به صورت خطواره‌هایی در سطح سنگ دیده شده و شبکه دو بعدی از ناپیوستگی‌ها را تشکیل می‌دهند. خط برداشت از متر نواری ۲ تا ۳۰ متر تشکیل شده و با دو میخ در امتداد رخنمون و بیشترین شیب سنگی ثابت می‌شود؛ همچنین خط برداشت‌های ثانویه عمود بر خط برداشت اولیه، برای کم کردن خطای جهت‌داری برداشت می‌شود. بهتر است که نقطه شروع خط برداشت از یک ناپیوستگی باشد ولی رعایت این نکته چندان مهم

نیست. موقعیت مکانی، جهت‌داری شرایط رخنمون سنگی همراه زاویه میل و امتداد خط برداشت در قسمت بالایی ورقه برداشت ثبت خواهد شد. جدول (۳-۳) نمونه‌ای از فرم تهیه شده برای برداشت داده‌ها به روش خط برداشت را نشان می‌دهد.

جدول (۳-۳): برگه ثبت داده‌ها به روش خط برداشت

به نام خدا							
نوع سنگ:		تاریخ:				محل	
برداشت شده توسط:		جهت‌داری خط برداشت				جهت‌داری سینه‌کار	
توضیحات	زبری در مقیاس کوچک	انحنا و یا موج‌داری	شیب/جهت شیب	مشخص کننده وضعیت نقطه خاتمه شکستگی	طول ناپیوستگی در بالای خط برداشت	فاصله محل تقاطع خط برداشت و ناپیوستگی از ابتدای خط برداشت	

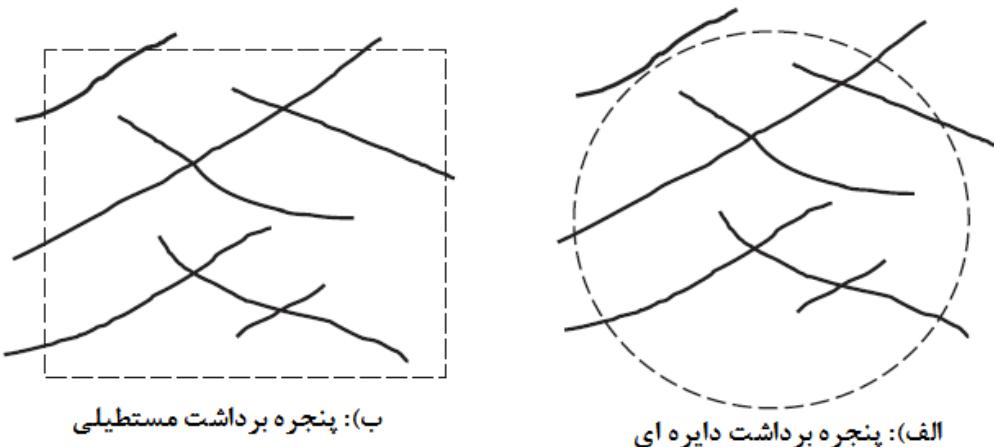
در این روش به منظور برداشت ناپیوستگی از یک خط مشخص که دارای زاویه میل و امتداد معلوم است استفاده می‌شود. تمام پارامترهای هر ناپیوستگی که خط برداشت را قطع کند ثبت می‌شوند شکل (۳-۵) نمایی از خط برداشت را نشان می‌دهد. حداقل باید از سه خط برداشت که در یک صفحه قرار ندارند استفاده شود (Priest, 1993). تمام داده‌های مورد نیاز این تحقیق با این روش جمع‌آوری شده است.



شکل (۳-۵): نمایی از خط برداشت (Priest, 1993)

۲-۴-۲-۲-۴-۳- پنجره برداشت

در این روش محدوده‌ای از سطح که بیان‌گر مشخصات کلی توده سنگ است و تمام درزهایی که در آن محدوده قرار دارند برداشت می‌شوند. روش پنجره برداشت را می‌توان با نصب یک مستطیلی از نوارها که به سطح سنگ پین شده‌اند، تعریف کرد. این پنجره بایستی تا حد امکان بزرگ باشد تا بتوانیم تأثیرات انحرافی نمونه‌گیری را حداقل کنیم، و اضلاع این مستطیل باید به گونه‌ای باشد که ۳۰ تا ۱۰۰ ناپیوستگی را قطع کند. در صورت امکان حداقل دو پنجره با ابعاد مشابه باید کنار هم و از جهات مختلف، ترجیحاً عمود بر هم، روی سطح برداشت نصب شود (Priest, 1993). در شکل (۳-۶) دو نوع پنجره برداشت نشان داده شده است.



شکل (۳-۶): نمایی از دو نوع پنجره برداشت (Jing & Stephansson, 2007)

۴-۴-۲-۳- روش‌های نوین آشکارسازی و برداشت شکستگی‌ها (لیزر اسکن سه بعدی)

در روش لیزر اسکن برداشت درزهای در سطح زمین و دیواره تونل‌ها با سرعت و دقیقیت بالا انجام می‌گیرد. در این روش پرتو نوری لیزر به سمت رخنمون منتشر شده و زمان بازگشت پرتو نوری انعکاسی برای محاسبه فاصله نقطه بازتابنده از محل استقرار دستگاه ثبت می‌شود. در صورتی که موقعیت و جهت منبع نوری لیزر مشخص باشد، امکان تعیین مختصات سه بعدی نقاط بازتابنده حاصل می‌شود (Feng et al, 2007). لیزر اسکن یک روش مؤثر برای ساختن مدل‌های دیجیتالی با کیفیت بالا از رخنمون‌های زمین‌شناسی به صورت سه بعدی می‌باشد (Trinks & Clegg, 2005).

بعد از برداشت درزهای برداشت درزهای داده‌ها در نرم‌افزار Dips تحلیل و تعداد دسته درزهای مربوط به هر زون مشخص می‌شود.

۳-۵- تحلیل ناپیوستگی‌های برداشت شده با استفاده از نرم‌افزار DIPS

نرم‌افزار Dips یکی از برنامه‌های کارآمد در زمینه زمین‌شناسی و معدن می‌باشد. از این نرم‌افزار برای مطالعات لرزه‌نگاری و سیستم ناپیوستگی‌های منطقه استفاده می‌شود. این نرم‌افزار توسط شرکت Rocscience ارائه شده است و قابلیت آنالیز داده‌های زمین و زمین‌آمار را دارد و با استفاده از

استریوگرام نیز قابلیت رسم نمودارهای مختلف را دارد . این نرم افزار تحت محیط سیستم عامل Windows اجرا می شود و دارای محیط گرافیکی مناسبی است . در ضمن دارای صفحه گستردگی جهت ورود داده های مختلف است. قبل از انجام هر کار باید از منطقه برداشت صورت بگیرد و داده های مانند امتداد و شبیه درزه ، مواد پرکننده، فاصله داری و پارامترهای مورد نیاز جهت ورود به نرم افزار برداشت و یادداشت شود. از توانایی های دیگر این نرم افزار آنالیز مجزا و قیدگذاری روی داده ها می باشد . این نرم افزار قابلیت رسم نمودارهای مختلف از قبیل رز دیاگرام ، نمودارهای کنتوری و استریونت را دارا می باشد و می تواند پراکندگی عارضه های مختلف زمین از جمله دسته درزه را با نمودارهای مختلف تحلیل نماید. یکی از کاربردهای این نرم افزار در تعیین جهت کلی درزه های موجود در ساختارهای اطراف یک سد می باشد که بعد از شناسایی این جهات گروتینگ (تزریق) را انجام می دهد. از موارد دیگر استفاده می توان به تعیین سیستم درزه های موجود در ساختارهای اطراف یک تونل جهت تحلیل ساختاری اشاره کرد.

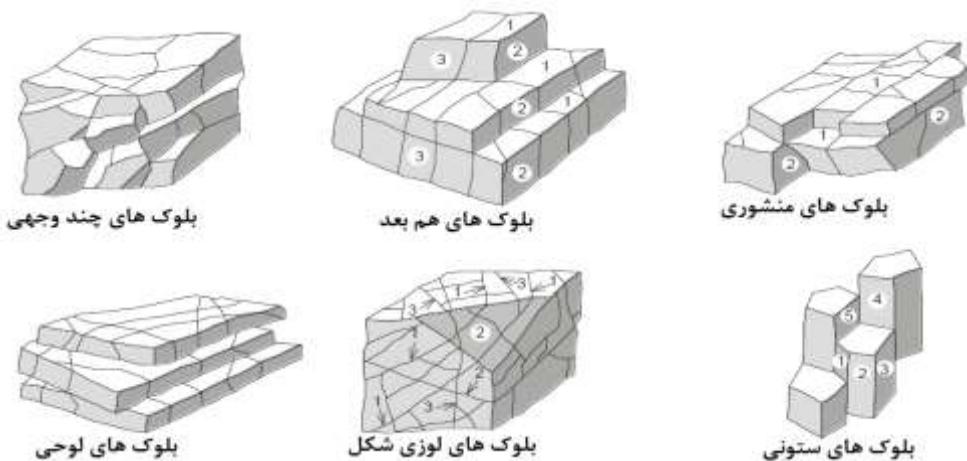
۶-۳- نوع و شکل بلوک های توده سنگ

بلوک های ایجاد شده توسط دسته درزه ها و سایر ناپیوستگی ها با توجه به فاصله بین درزه ها، شبیه درزه ها و تعداد درزه های نامرتب دارای شکل ها و اندازه های متفاوتی هستند. دیرمن^۱ با توجه به ویژگی های مختلف سنگ ها یک سیستم تقسیم بندی مطابق با شکل (۳-۷) را برای انواع بلوک های توده سنگ ارایه داده است. در این طبقه بندی بلوک ها به انواع بلوک های چند وجهی، هم بعد، منشوری، لوحی یا تخته ای، لوزی شکل و ستونی تقسیم می شوند. پالمستروم^۲ نیز مطابق شکل (۳-۸) بلوک ایجاد شده توسط درزه ها را با توجه به درزه های تشکیل دهنده آن به انواع بلوک های هم بعد،

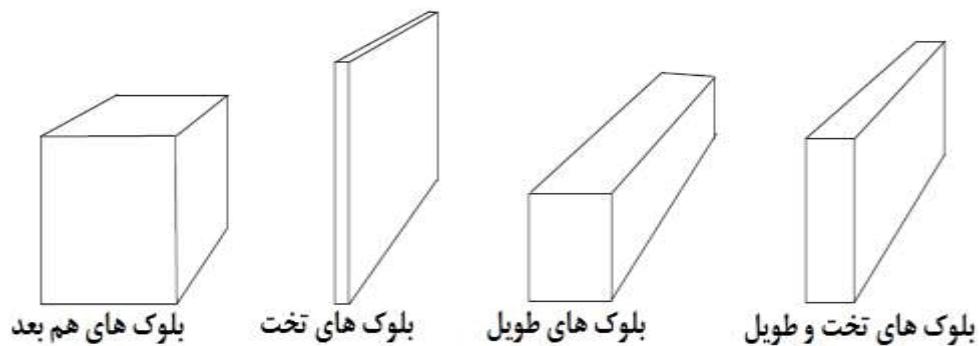
¹ Dearman

² Palmström

تخت، طویل و تخت و طویل تقسیم‌بندی کرده است. شکل بلوک‌ها بستگی زیادی به فاصله‌داری و جهت‌داری درزه‌ها در توده‌سنگ دارد (Sharma & Saxena, 2001).



شکل (۷-۳): تقسیم‌بندی بلوک‌ها (Sharma & Saxena, 2001)



شکل (۸-۳): مهم‌ترین بلوک‌های موجود در توده‌سنگ (Sharma & Saxena, 2001)

۷-۳- توده‌سنگ و توزیع حجم بلوک‌های آن

با توجه به این‌که انواع بلوک‌ها در توده‌سنگ تحت تأثیر هندسه درزه‌ها به وجود می‌آیند، دانستن توزیع حجم بلوک‌های توده‌سنگ می‌تواند درک مناسبی از بلوک‌های تشکیل‌دهنده آن باشد. با داشتن توزیع حجم بلوک‌ها می‌توان پیش‌بینی بهتری برای نگهداری بلوک‌های توده‌سنگ یا بلوک‌دهی آن‌ها

در سنگهای ساختمانی و ... داشت. برای محاسبه هندسه بلوکهای تودهسنگ ابتدا باید ناپیوستگی‌ها یا درزهای موجود در آن مشخص شود.

از لحاظ تئوری اگر در یک مسئله تعداد ناپیوستگی‌های موجود در تودهسنگ کم باشد، تعیین خصوصیات سیستم ناپیوستگی به سادگی و با برداشت‌های صحرایی همه ناپیوستگی‌ها صورت می‌پذیرد. برای نمایش صریح تمام ناپیوستگی‌ها (شامل محل، جهت‌یابی، شکل و اندازه و میزان بازشدنگی آن‌ها) و بلوکهای تشکیل شده توسط آن‌ها می‌توان به طور مستقیم خصوصیات تمام ناپیوستگی‌ها را تعیین و از آن‌ها برای تشکیل مدل هندسی معین استفاده کرد. اما این فرایند غیر عملی می‌باشد و به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. چون در مسایل کاربردی مطالعه تعداد بسیار زیاد ناپیوستگی‌ها با اندازه‌های مختلف مورد نیاز می‌باشد. یکسان نبودن خصوصیات ناپیوستگی‌ها باعث به وجود آمدن عدم قطعیت در پارامترهای شکل، اندازه و توزیع فضایی مربوط به ناپیوستگی‌ها می‌باشد. روش معمول برای این منظور، در نظر گرفتن صرفاً ناپیوستگی‌های بزرگ مقیاس، به تعداد محدود به عنوان ناپیوستگی‌های منفرد و مجزا می‌باشد و دیگر ناپیوستگی‌های تودهسنگ نیز باید از طریق روش‌های مختلف شبیه سازی کرد.

۳-۸-۳- روش‌های شبیه سازی هندسی درزهای تودهسنگ

نبود اطلاعات کافی و غیر ممکن بودن برداشت همه ناپیوستگی‌ها باعث می‌شود برای دسترسی به اطلاعات تودهسنگ، درزهای را شبیه سازی کرد. برای این کار مراحل زیر لازم است:

۱- برداشت ناپیوستگی‌ها

۲- پیاده سازی بر روی استروننت

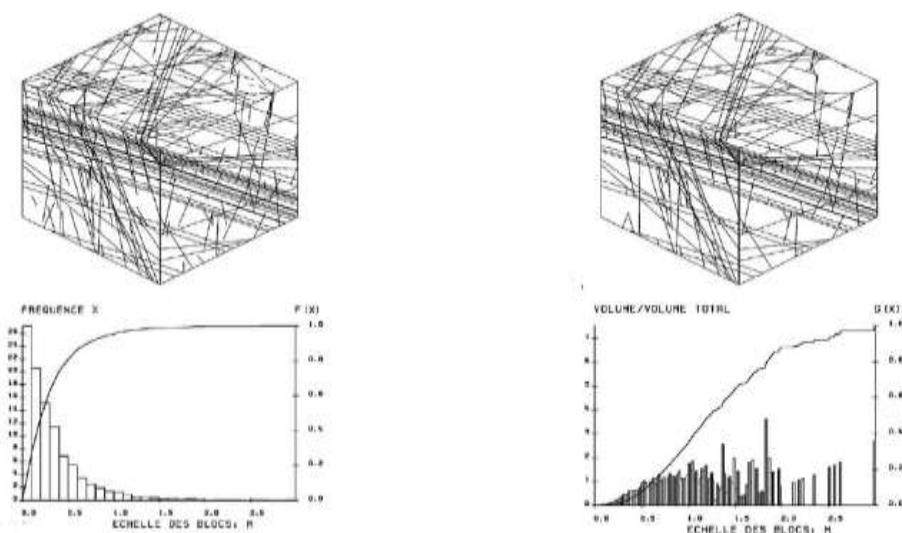
۳- تشخیص دسته درزهای یا ناپیوستگی‌های غالب

۴- شبیه سازی و تولید ناپیوستگی‌های جدید

۵- مدل‌سازی تودهسنگ و تعیین هندسه بلوك‌های تودهسنگ

ابتدا ناپیوستگی‌های تودهسنگ توسط روش‌های مختلف برداشت می‌شود. مرحله بعد آوردن ناپیوستگی‌ها برداشت شده بر روی صفحه استرونوت برای تشخیص دسته درزهای غالب و پارامترهای آن می‌باشد. با توجه به صفحه استرونوت ناپیوستگی‌های غالب تعیین می‌شوند. تعداد ناپیوستگی‌ها، شیب و جهت شیب، امتداد و فاصله داری آن‌ها از این طریق محاسبه می‌شود (*Hamdi & Mouza, 2008*).

شکل (۳-۹) نمونه‌ای از تودهسنگ و توزیع حجمی آن را نشان می‌دهد. در این شکل توزیع حجم بلوك‌های تودهسنگ به صورت شماتیک نشان داده شده است. ابتدا تمام ناپیوستگی‌های تودهسنگ شبیه‌سازی می‌شوند و پس از آن ناپیوستگی‌هایی که در تعیین بلوك‌ها تأثیری ندارند حذف می‌شوند. برای تعیین توزیع حجم بلوك‌ها نیاز به تعیین حجم تک تک بلوك‌های تودهسنگ می‌باشد که در این شکل مشخص می‌باشد (*Hamdi & Mouza, 2008*).



شکل (۳-۹): نمونه‌ای از تودهسنگ با توزیع حجمی بلوك‌های آن (*Hamdi & Mouza, 2008*)

روش‌های مختلفی برای شبیه سازی هندسی ناپیوستگی‌ها وجود دارند که عبارتند از (امینی،

:۱۳۸۵)

۱- روش قطعی و محدود

۲- روش زمین آمار

۳- روش آماری

۱-۸-۳- روش قطعی و محدود

در این روش فقط تعداد محدودی از ناپیوستگی‌های تودهسنگ که اغلب ناپیوستگی‌های اصلی می‌باشند مورد مطالعه قرار می‌گیرند. گاهی هر دسته درزه نیز تنها با شیب و جهت شیب مشخص می‌شود که باعث ایجاد بلوک‌هایی با ابعاد ماکزیمم می‌شود (امینی، ۱۳۸۵).

۲-۸-۳- روش زمین آماری

پارامتر هندسی ناپیوستگی در سنگ می‌تواند توسط روش‌های زمین آماری تخمین زده شوند. این روش این امکان را می‌دهد تا وابستگی مکانی پارامترها بررسی شود. به عنوان مثال پارامتر جهتداری یک درزه به طور عمومی نزدیکی زیادی به جهتداری درزه‌ای دیگر در نزدیکی درزه اول دارد. این ویژگی وابستگی مکانی نامیده می‌شود. پارامترهای هندسی که امکان بررسی آن‌ها وجود دارد، جهتداری، ابعاد و بازشدگی درزه‌ها هستند. در این روش ابتدا باید موقعیت مکانی درزه‌ها تعیین شود و سپس با استفاده از اطلاعات موجود در هر مرکز مشخصات و پارامترهای زمین آماری تخمین زده و درزه‌های تودهسنگ شبیه‌سازی می‌شوند (امینی، ۱۳۸۵).

۳-۸-۳- روش آماری

در روش‌های آماری باید الگوی مناسب برای درزهای توده‌سنگ با توجه به درزهای برداشت شده معرفی شود. در این روش تغییرات پارامترها و مختصات آن‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند و اثر آن‌ها بر مدل منظور می‌شود. مدل‌سازی آماری معمولاً در سه سیستم اصلی که در زیر آمده است صورت می‌پذیرد (امینی، ۱۳۸۵).

- سیستم دیسک‌های تصادفی

- سیستم ناپیوستگی‌های ترتیبی نامحدود

- شبیه سازی مجموعه بلوکی

۳-۹- مرور کارهای انجام شده برای محاسبه حجم بلوک‌های برجای توده‌سنگ با پارامترهای هندسی

خصوصیات هندسی توده‌سنگ و بلوک‌های آن همانند شکل و حجم بلوک‌ها در کاربردهای مختلف از جمله بلوکدهی سنگ‌های ساختمانی، انرژی خردایش، طراحی آتشباری، پایداری بلوک‌های سنگی و رقیق شدگی ماده معدنی در روش استخراج تخربی و ... استفاده می‌شود. تعیین حجم بلوک‌های موجود در توده‌سنگ توسط روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد؛ در همه این روش‌ها مقادیر واقعی و تخمین زده شده اختلاف وجود دارد. این اختلاف‌ها یا خطاهای ناشی از طبیعت زمین و عدم امکان برداشت همه ناپیوستگی‌های توده‌سنگ می‌باشد. در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت تکنولوژی برای کاهش این خطاهای روش دقیق‌تری برای برداشت ناپیوستگی‌ها و تعیین حجم بلوک‌ها ابداع شده است. برای تعیین هندسه بلوک‌های توده‌سنگ ابتدا ناپیوستگی‌ها شبیه سازی می‌شوند و هندسه بلوک‌های آن از طریق الگوریتم‌های مختلف محاسبه می‌شوند. در برخی از این الگوریتم‌ها

تودهسنگ در دو و در برخی در سه بعد مدل‌سازی می‌شوند. پس از شبیه‌سازی درزه‌ها در تودهسنگ، باید حجم بلوک‌های تشکیل شده توسط این درزه‌ها محاسبه شود.

برای مدل‌سازی کامپیوتری تودهسنگ و بلوک‌های آن باید از یک الگوریتم مناسب استفاده کرد. برنامه‌های کامپیوتری زیادی همانند *3DEC*, *UDEC*, *SIMBLOCK* و برنامه تهیه شده توسط خیشوند و همکاران، برنامه تهیه شده توسط یار احمدی و همکاران و ... برای تعیین شکل و حجم تودهسنگ درزه‌دار در دو و سه بعد ارایه شد که توسط الگوریتم، زبان برنامه‌نویسی و نرم افزارهای مختلف تهیه شده‌اند (*Yarahmadi et al, 2013; Khishvand et al, 2011; Hamdi & Mouza, 2008*). در جدول زیر روش‌های مختلفی که برای تعیین هندسه و حجم بلوک‌های تودهسنگ در سال‌های مختلف توسط محققین ارایه شده‌اند، آورده شده است.

جدول (۳-۴): روش‌های ارایه شده برای تعیین هندسه بلوک‌های توده‌سنگ (اصلاح شده *Yarahmadi et al., 2013*

ردیف	پدید آورندگان	سال انتشار	مبنای روش	بعد روش
۱	پالمستروم	۱۹۸۲	استفاده از پارامتر هندسی	دو و سه بعدی
۲	واربرتون	۱۹۸۳	استفاده از پارامتر هندسی	دو و سه بعدی
۳	لین و همکاران	۱۹۸۷	تکنیک‌های مکان شناسی	سه بعدی
۴	هليوت	۱۹۸۸	سيستم‌های عددی	سه بعدی
۵	شی	۱۹۹۸	استفاده از گراف‌های جهت‌دار	دو بعدی
۶	جینگ و استفانسون	۱۹۹۴	تکنیک‌های عددی	دو بعدی
۷	مارز و جرمین	۱۹۹۶	استفاده از پارامتر هندسی	سه بعدی
۸	لو و لاتهام	۱۹۹۹	استفاده از پارامتر هندسی	دو و سه بعدی
۹	فریرا و همکاران	۲۰۰۰	تئوری گراف‌ها	دو و سه بعدی
۱۰	جینگ	۲۰۰۰	تکنیک‌های عددی	سه بعدی
۱۱	استارازک و تسانگ	۲۰۰۲	استفاده از پارامتر هندسی	دو و سه بعدی
۱۲	اسمیت	۲۰۰۴	استفاده از پارامتر هندسی	دو و سه بعدی
۱۳	جینگ و استفانسون	۲۰۰۷	تکنیک‌های عددی	دو و سه بعدی
۱۴	لو و همکاران	۲۰۰۸	روش‌های برداری	سه بعدی
۱۵	اولکر و توران بوی	۲۰۰۹	الگوریتم ژنتیک	سه بعدی
۱۶	ژانگ و همکاران	۲۰۱۰	مدل‌های المان محدود و روش برداری	سه بعدی
۱۷	جعفری و همکاران	۲۰۱۰	ماتریس‌های اساسی	سه بعدی
۱۸	خیشوند و همکاران	۲۰۱۱	ماتریس‌های اساسی	سه بعدی
۱۹	ژانگ و همکاران	۲۰۱۲	تکنیک شبکه‌های مشبک	سه بعدی
۲۰	ژانگ و لی	۲۰۱۲	گراف‌های جهت دار	سه بعدی
۲۱	يار احمدی و همکاران	۲۰۱۳	پارامترهای هندسی	دو بعدی
۲۲	الموتی و همکاران	۲۰۱۳	شبکه شکستگی مجزا	سه بعدی
۲۳	ژانگ و همکاران	۲۰۱۴	مدل‌های المان محدود	سه بعدی
۲۴	قی - هو ژانگ و همکاران	۲۰۱۴	پارامترهای هندسی	سه بعدی

۳-۱۰- مدل‌سازی تصادفی شبکه درزه‌ها

نقشه فهم و توسعه ساختارهای سنگی در پروژه‌های مهندسی سنگ، مطالعات ناحیه‌ای و زمین‌شناسی می‌باشد. بدین منظور دانش سنگ‌شناسی و شناسایی پدیدهای ساختاری بزرگ مانند چین‌ها، گسل‌ها و دایک‌ها در نواحی معدن‌کاری فراهم می‌آیند. شناسایی شکستگی‌ها می‌تواند در تحلیل پایداری سیستم‌های دارای بلوك سنگی، تحلیل خردایش و ... بکار رود. بدین منظور لازم است تا محیط‌های ناپیوسته را بررسی کنیم که محیط ناپیوسته خود به دو زیرگروه محیط‌های ناپیوسته با شبکه شکستگی منظم و محیط‌های ناپیوسته با شبکه شکستگی نامنظم تقسیم می‌شوند

(Oda, 1982).

محیط‌های دارای شبکه شکستگی منظم دارای دسته شکستگی‌های موازی می‌باشند و شکستگی آن‌ها عموماً طول نامحدود دارند و به طور کلی می‌توان گفت شبکه ساده‌ای دارند. این محیط‌ها پایه‌ی اغلب روش‌های تحلیلی می‌باشند (Oda, 1982).

محیط‌های دارای شبکه شکستگی نامنظم نسبت به حالت قبلی عمومیت بیشتری داشته و به واقعیت شبکه شکستگی موجود در طبیعت نزدیک‌ترند و به عبارتی در طبیعت بیشتر یافت می‌شوند. این محیط‌ها تنها دسته شکستگی‌های موازی با طول محدود را مینا قرار نمی‌دهند بلکه شبکه شکستگی را مجموعه‌ای از تمام شکستگی‌ها چه با طول محدود و چه با طول نامحدود و یا حالات موازی و یا غیر موازی در نظر می‌گیرند (Oda, 1982).

در این میان شبکه شکستگی‌ها نیز از ساختار پیچیده‌ای برخوردارند و ساخت مدل‌های معین و کلی برای آن‌ها به آسانی امکان‌پذیر نیست. اغلب مدل‌هایی که برای توصیف شبکه شکستگی به کار می‌روند دارای برخی نواقص عمومی می‌باشند. از جمله این که تمامی شکستگی‌ها را با طول نامحدود فرض کرده و همچنین آن‌ها را به صورت دسته‌هایی موازی فرض می‌کنند (Yarahmadi et al; 2013). این دو فرض باعث عدم انطباق این مدل‌ها با شبکه‌های شکستگی موجود در طبیعت (Snow; 1969).

می‌شود. لذا مدل‌های شبکه شکستگی مجزا^۱ که اجازه ورود شکستگی‌ها با طول محدود را نیز می‌دهند، انطباق بیشتری با نتایج تجربی از خود نشان می‌دهند. نخستین مدل دو بعدی شبکه شکستگی مجزا در حدود ۳۰ سال پیش توسط لانگ^۲ و همکارانش در سال ۱۹۸۵ به وجود آمد و بهینه‌سازی و توسعه این مدل‌ها تا به امروز ادامه داشته (باغبانان و جولایی، ۱۳۸۹)، و در کشور ما در سال‌های اخیر توسعه برخی کدهای کامپیوتری جهت مدل‌سازی شبکه شکستگی مجزا به صورت دو بعدی گزارش شده است (میرزا‌ای نصیرآباد، ۱۳۹۱).

در شبیه‌سازی هندسی توده‌سنگ، سعی بر این است که ساختارهای اصلی زمین‌شناسی توده‌سنگ شناخته شده، ویژگی‌های هندسی آن اندازه‌گیری و با توجه به این ویژگی‌ها، موقعیت آن‌ها به بهترین وجه و با بیشترین تطابق با واقعیت، مکان‌یابی شوند. آن‌چه در شبیه‌سازی هندسی اهمیت فوق العاده‌ای می‌یابد نزدیک کردن مدل به واقعیت و اجتناب از فرضیات اضافی و تخمین‌های دور از واقعیت است (نوروزی، ۱۳۹۳).

از طرفی ناپیوستگی‌ها اثر مهمی بر روی خواص مقاومتی، تغییرشکل‌پذیری و نفوذپذیری توده‌سنگ‌ها دارند. بنابراین توصیف ویژگی‌های آن‌ها، بخش مهمی از توصیف ویژگی‌های توده‌سنگ است. توصیف قطعی ناپیوستگی‌های منفرد در توده‌سنگ فقط برای ناپیوستگی‌های بزرگ مانند گسل و چین‌خوردگی امکان‌پذیر است و برای توصیف درزهای باید از مدل‌های شبکه شکستگی تصادفی استفاده شود. مدل‌های تصادفی ابزار قوی‌ای را برای ارایه شبکه درزه بر اساس اطلاعات آماری حاصل شده از پیمایش‌های خطی و سطحی فراهم می‌کند.

در چند سال گذشته با دستیابی به توانایی گسترده‌تر قدرت محاسباتی، روش‌های مدل‌سازی تصادفی شبکه شکستگی مجزا (*DFN*) برتری بیشتری یافته‌اند. روش *DFN* در مدل‌سازی جریان آب

¹ *Discrete Fracture Network*

² *Long*

زیرزمینی از میان سیستم شکستگی طبیعی به طور وسیعی توسط پروژه‌های مختلف استفاده می‌شود. همچنین این روش کاربردهایی را در صنعت نفت و گاز برای مدل‌سازی مخازن هیدرولیکی و انرژی هسته‌ای برای طراحی سایت‌های دفع باطله رادیواکتیو یافته است. به هر حال، امروزه مدل‌های *DFN* به عنوان ابزارهایی مفید برای بررسی مسایل ژئومکانیکی در ارتباط با طراحی سازه‌هایی در توده‌سنگ‌های درزه‌دار معرفی شده‌اند (میرزا‌یی‌نصیرآباد، ۱۳۹۱). مزیت اصلی مدل‌های *DFN* در توانایی ارایه ناهمگنی و عدم قطعیت سیستم‌های درزه با تعریف تصادفی و واضح از درزه‌ها است. جنبه جالب دیگر روش مدل‌سازی *DFN* توانایی تشکیل بلوک‌ها توسط تعداد بسیار زیادی درزه است. شکل بسیاری از بلوک‌های تشکیل شده در مدل، کاملاً ناشناخته (بی‌شکل) است. این موضوع اجازه می‌دهد که تعریف واقعی‌تری از هندسه بلوک‌ها نسبت به روش‌های دیگر به دست آورد (نوروزی، ۱۳۹۳).

در دهه اخیر با توسعه مدل‌های تصادفی و کاربرد آن‌ها در ارایه شبکه شکستگی، پیشرفت‌های چشم‌گیری در زمینه مدل‌سازی سه بعدی توده‌سنگ حاصل شده است. کاربرد مدل‌سازی تصادفی شبکه شکستگی مجزا در ترکیب با روش عددی، می‌تواند بر محدودیت‌های تحلیل پایداری مرسوم که در آن درزه‌ها قطعی، نامحدود، دارای توزیع یکنواخت و مستقل از یکدیگر فرض می‌شوند، غلبه کند (نوروزی، ۱۳۹۳).

نرم‌افزارهای تجاری *فرکا^۱*، *فرکمن^۲* و *نپساک^۳* از جمله کدهای کامپیوترازی هستند که بر پایه‌ی مدل شبکه شکستگی مجزا استوار هستند، و در مطالعات مکانیک سنگ به ویژه در زمینه مدل‌سازی جریان و تعیین نفوذپذیری در سنگ‌های شکسته، کاربردهای گسترده‌ای دارند (جولایی، ۱۳۸۹).

¹ *FRACA*

² *FRACMAN*

³ *NAPSAC*

کدهای کامپیوتری $FRACIUT^{2D}$ ^۱ و $FRACIUT^{3D}$ ^۲ که به زبان برنامه‌نویسی سی (C) در دانشگاه صنعتی اصفهان نوشته شده‌اند، قادرند با استفاده از داده‌های برداشت شده از دیواره گمانه‌ها و رخنمون‌های سطحی، علاوه بر تولید خروجی رقومی، نمایش بصری از شبکه شکستگی در راستاهای مختلف ارایه کنند (جولایی، ۱۳۸۹).

۱۱-۳- پردازش داده‌ها در مدل شبکه شکستگی مجزا

در مدل‌سازی به وسیله شبکه شکستگی مجزا، حداقل داده‌هایی باید از طریق برداشت صحرایی و گمانه‌ها برداشت شود تا بتوان به کمک آن شبکه شکستگی‌ها را مدل‌سازی کرد. مدل‌سازی شکستگی‌های هر شبکه مستلزم آن است که بتوان تک تک پارامترهای هندسی هر شکستگی از شبکه شکستگی را تشخیص داد. در مدل‌سازی از تغییرات بازشدگی در امتداد هر شکستگی می‌توان چشم پوشی کرد. بدیهی است که تعداد شکستگی‌های هر شبکه تابعی از ابعاد محدوده مدل است، پس آن‌چه بیش از هر چیز باید تعیین شود ابعاد محدوده مدل می‌باشد، به‌طور کلی پارامترهایی که قبل از یک مدل‌سازی باید مشخص شود عبارتند از:

شناسایی دسته شکستگی‌ها

تعیین چگالی دسته شکستگی‌ها در واحد حجم

تعیین ابعاد محدوده مدل‌سازی

تعیین روش تولید مراکز شکستگی‌ها

شناسایی توزیع آماری طول شکستگی‌ها

شناسایی توزیع آماری بازشدگی شکستگی‌ها

^۱ *FRACTure Isfahan University of Technology-2 Dimensional*

^۲ *FRACTure Isfahan University of Technology-3 Dimensional*

شناسایی شکل هندسی احتمالی شکستگی‌ها

مبانی شناسایی دسته‌های شکستگی‌ها جهت یافتنی شکستگی‌هاست. چرا که نتایج تجربی نشان داده است شکستگی‌ها با جهت یافتنی شبیه به هم که در یک دسته قرار می‌گیرند سایر پارامترهای هندسی‌هایشان هم از یک نوع توزیع آماری پیروی می‌کنند. دسته‌بندی بر حسب توزیع جهت یافتنی شکستگی با محاسبه مولفه‌های بردار عمود بر صفحه شکستگی و رسم شکستگی در استریو گراف می‌باشد. سپس بوسیله روش‌های مختلف خوشبندی صورت می‌پذیرد.

۱۲-۳- توزیع آماری و تولید تصادفی پارامترهای هندسی شکستگی‌ها

برای شبیه‌سازی تصادفی هندسی شکستگی‌ها توده‌سنگ با استفاده از روش مونت کارلو، تعیین توابع توزیع حاکم بر پارامترهای هندسی شکستگی‌ها لازم است. برای شبیه‌سازی سیستم شکستگی‌ها محققان مختلف توابع توزیع احتمالی که با انطباق واقعی پراکندگی پارامترهای هندسی شکستگی‌های توده‌سنگ را توصیف می‌کنند، تعیین کرده‌اند. توابع توزیع آماری این پارامترهای هندسی در جدول (۳-۵) درج شده است (Jing & Stephansson, 2007)

جدول (۳-۵): توزیع آماری متداول در تولید شبکه شکستگی مجزا

پارامتر هندسی	تابع توزیع
مقدار شیب	توزیع فیشر
جهت شیب	توزیع فیشر، توزیع آرنولد
طول رخنمون	لاگ نرمال، نمایی منفی و قانون توان
موقعیت مرکز شکستگی	توزیع پواسون

۱-۱۲-۳- توزیع جهتداری

جهتداری ناپیوستگی‌ها از توزیع فیشر تعیین می‌کند که این توزیع دارای پارامتری به نام ضریب فیشر^۱ است. در واقع ضریب فیشر میزان پراکندگی داده‌های مربوط به جهتداری را نسبت به میانگین آن‌ها تعیین می‌کند. از این‌رو، هر چه قدر مقدار این ضریب بیش‌تر باشد، جهتداری ناپیوستگی‌های بیش‌تری به میانگین داده‌های جهتداری نزدیک می‌شود و بالعکس با کم شدن این ضریب سبب ایجاد پراکندگی بیش‌تری در جهتداری ناپیوستگی‌ها می‌شود. با کاهش ضریب فیشر پراکندگی جهتداری افزایش پیدا می‌کند و ناپیوستگی‌های یک دسته از حالت موازی بودن فاصله می‌گیرند در نتیجه احتمال این‌که وضعیت‌هایی در ناپیوستگی ایجاد شود که به موجب آن برخوردي بین آن‌ها رخددهد، افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش ضریب فیشر ناپیوستگی‌ها به سمت موازی بودن با یکدیگر پیش می‌رود و این امر سبب کاهش اتصال بین آن‌ها می‌شود. تحقیقات نشان داده است که زاویه شبی از توزیع فیشر پیروی می‌کند. توزیع فیشر نیز از رابطه زیر به دست می‌آید (میرزاچی نصیرآباد، ۱۳۹۱).

$$f(\theta) = \frac{K \sin \theta \cdot e^{K \cos \theta}}{e^K - e^{-K}} \quad (1-3)$$

در این رابطه:

θ : زاویه انحراف از مقدار میانگین نرمال

K : ثابت فیشر می‌باشد

با محاسبه تابع توزیع تجمعی توزیع فیشر رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F(<\theta) = \frac{e^K - e^{K \cos \theta}}{e^K - e^{-K}} \quad (2-3)$$

¹ Fisher

که در این رابطه F تابع توزیع احتمال است. که با جایگزین کردن یک مقدار تصادفی در بازه صفر تا یک، به جای مقدار F ، یک مقدار تصادفی θ با توجه به رابطه (۳-۳) بدست می‌آید.

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\ln[e^k - F(e^k - e^{-k})]}{K} \right\} \quad (3-3)$$

۴-۱۲-۳- محل شکستگی‌ها

برای تعیین محل درزه‌ها، رویکرد معمول استفاده از یک نقطه تکی (اغلب مرکز درزه) برای نشان دادن محل درزه‌ها است. در اکثر موارد برای مدل‌سازی شبکه شکستگی مجزا فرض می‌شود که موقعیت درزه‌ها از یک مدل پردازش پواسون تبعیت می‌کند. در مدل پواسون بر اساس یک الگوریتم بازگشتی خاص، محل مرکز درزه‌ها از طریق تولید اعداد تصادفی بر اساس یک الگوریتم بازگشتی تولید می‌شوند، که این الگوریتم قسمت اعشاری اعداد محاسبه شده را با استفاده از رابطه بازگشتی زیر اتخاذ می‌کند (میرزاچی نصیرآباد، ۱۳۹۱):

$$R_{i+1} = 27 R_i - \text{int}(27 R_i) \quad (4-3)$$

که در این رابطه R_i یک عدد تصادفی در بازه $0 \leq R_i \leq 1$ است و $\text{int}(x)$ قسمت صحیح عدد x است و R_0 یک مقدار اولیه است که از الگوریتم تناسب ضربی تولید می‌شود. اگر فاصله تولید شده به صورت دو بازه در امتداد محورهای دستگاه مختصات محلی تعریف شود، مختصات نقطه میانی (x_i, y_i, z_i) را برای تمامی درزه‌ها با استفاده از معادلات زیر می‌توان تولید کرد:

$$x_i = x_{gl} + R_i (x_{g2} - x_{g1}) \quad (5-3)$$

$$y_i = y_{gl} + R_i (y_{g2} - y_{g1}) \quad (6-3)$$

$$z_i = z_{gl} + R_i (z_{g2} - z_{g1}) \quad (7-3)$$

۳-۱۲-۳- توابع توزیع حاکم بر اندازه شکستگی‌ها

در زمینه توابع توزیع آماری طول خط اثر و فاصله‌داری درزه‌های توده‌سنگ مطالعات مختلفی انجام گرفته است. مک‌هامن در سال ۱۹۷۵، بارتون ۱۹۷۷، انشتین و همکاران در سال ۱۹۷۹ دریافتند که طول خط اثر و فاصله‌داری درزه‌ها از توابع توزیع لاغ نرمال پیروی می‌کند (*Vermilye &* ۱۹۹۹). رابرتسون در سال ۱۹۷۱، پیریست و هادسون در سال ۱۹۸۱ و لافونته در سال ۱۹۹۵ اعلام کردند که طول خط اثر در درزه‌های توده‌سنگ از تابع توزیع نمایی منفی پیروی می‌کند (*Baghbanan, 2008*). همچنین برای طول خط اثر معمولاً توزیع لاغ نرمال و نمایی بر طبق مطالعات باچر و همکاران در سال ۱۹۷۷ و لی و فارمر در سال ۱۹۹۳ مناسب می‌باشد (*Blum, 2004*). باغبانان در سال ۲۰۰۸ به بررسی اثر تنفس روی خواص هیدرومکانیکی توده‌سنگ پرداخت. وی در ارایه نتایج خود اعلام کرد که طول خط اثر و فاصله‌داری شکستگی‌ها منطقه سلافیلد انگلستان از تابع توزیع توان پیروی می‌کند (*Baghbanan, 2008*) و همچنین بر طبق مطالعات سیقال و پولارد در سال ۱۹۸۳، قودمونسون در سال ۱۹۸۷، ماین و همکاران در سال ۱۹۹۰، اودلینق در سال ۱۹۹۷ و و بونت و همکاران در سال ۲۰۰۱ طول اثر شکستگی از تابع توزیع توان پیروی می‌کند (*Blum, 2004*). با توجه به مواردی که مطرح شد مهمترین توابع توزیع آماری که عموماً طول خط اثر درزه‌ها از آن‌ها پیروی می‌کند توابع توزیع قاعده توان، لاغ نرمال و نمایی منفی است. توزیع قاعده توان جزئیات بیشتری نسبت به دیگر توابع توزیع نظیر نرمال، لاغ نرمال و نمایی ارایه می‌دهد. تابع توزیع قاعده توان از رابطه (۳-۸) به دست می‌آید (*Blum, 2004*):

$$N = C \cdot L^{-D_L} \quad (8-3)$$

N: تعداد شکستگی‌ها در واحد حجم

C: ثابت چگالی (واحد وابسته به D_L)

طول اثر شکستگی L

ابعاد فراکتال توزیع طول اثر D_L

مقدار ابعاد فراکتال تخمینی D_L به ابعاد نمونه برداری بستگی دارد. روش نمونه برداری یک بعدی (یعنی روش خط برداشت) ابعاد فراکتال D_L در حدود ۱ را نتیجه می‌دهد، روش نمونه برداری دو بعدی (یعنی روش پنجره برداشت) ابعاد فراکتال در حدود ۲ را نتیجه می‌دهد. به طوری که نمونه گیری ۳ بعدی شبکه شکستگی غیر ممکن می‌باشد. پیقوت در سال ۱۹۹۷ نشان داد که در شبکه شکستگی مجزای سه بعدی، ابعاد فراکتال تخمینی در حدود ۳ است و در برخی از مطالعات این مقدار عددی بین ۳ تا ۴ بیان می‌شود بنابراین برای تبدیل بعد فراکتال (D_L) بین ابعاد مختلف رابطه زیر برقرار می‌باشد (Blum, 2004)

$$D_{L(2D)} = D_{L(1D)} + 1 \quad (9-3)$$

$$D_{L(3D)} = D_{L(2D)} + 1 \quad (10-3)$$

ابعاد فراکتال در یک بعد $D_{L(1D)}$

ابعاد فراکتال در دو بعد $D_{L(2D)}$

ابعاد فراکتال در سه بعد $D_{L(3D)}$

در مورد نمونه گیری دو بعدی، ابعاد فراکتال کمتر از دو به این معنی است که شکستگی‌های بلند غالب هستند و برای ابعاد فراکتال بزرگ‌تر از دو شکستگی‌های کوچک غالب هستند. دیگر پارامتر مهم توزیع قاعده توان، ثابت C می‌باشد که در مطالعات با تعاریف متفاوتی یعنی ضریب تناسب، ثابت نرمالیزه و پارامتر چگالی شکستگی توصیف می‌شود. واحد ثابت چگالی C به مقدار D_L بستگی دارد. تابع توزیع تجمعی برای توزیع قاعده توان ارایه شده توسط ریلی به صورت زیر است (Blum, 2004)

$$F(L) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{L}{L_{min}}\right)^{-D_L} & \text{if } L > L_{min} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11-3)$$

پایین ترین طول برش: L_{min}

وتابع توزیع احتمال به وسیله رابطه زیر محاسبه می شود:

$$F(L) = \begin{cases} D_L L_{min}^{D_L} L^{-(D_L+1)} & \text{if } L > L_{min} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12-3)$$

همچنین میانگین طول خط اثر شکستگی (μ_L) توزیع قاعده توان از رابطه زیر به دست می آید:

$$\mu_L = \frac{D_L}{D_L - 1} L_{min} \quad (13-3)$$

از این رو با دانش بر پایین ترین طول برش، بعد فراکتال و ثابت چگالی می توان میانگین طول خط اثر شکستگی و چگالی شکستگی را محاسبه کرد.

۱۲-۴-۴- توابع توزیع حاکم بر بازشدگی شکستگی ها

با مطالعات صورت گرفته در زمینه تعیین توابع توزیع احتمال بازشدگی تا به حال مشخص شده است که این پارامتر از دو تابع توزیع احتمال لاغ نرمال و توان پیروی می کند. این توابع توزیع در مطالعات گیل در سال ۱۹۷۹، بارتون و حکمی در سال ۱۹۹۰، پیراک و نولته در سال ۱۹۹۷ مورد توجه قرار گرفته است (Jing & Stephansson, 2007). علاوه بر موارد اشاره شده در مطالعات حکمی و لارسون در سال ۱۹۹۶، اورون و برکویتز در سال ۲۰۰۱، در مطالعات شریفزاده و همکاران در سال ۲۰۰۴ نیز تابع توزیع نرمال بر روی بازشدگی درزهها برآش شده است. همچنین برآش تابع توزیع احتمال توان روی بازشدگی درزهها نیز در مطالعات انجام شده توسط دروزی و همکاران در سال ۲۰۰۱ و مورزنکو و همکاران در سال ۲۰۰۴ دیده شده است (Baghbanan, 2008).

۱۳-۳- چگالی سه بعدی شکستگی‌ها

برای تولید شبکه شکستگی مجازی تودهسنگ با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو لازم است تعداد شکستگی‌های مورد انتظار از هر دسته مشخص باشد. تعداد شکستگی‌ها به چگالی سه بعدی و حجم مدل مورد نظر بستگی دارد. برای به دست آوردن چگالی شکستگی‌ها تودهسنگ با توجه به موجود بودن اطلاعات برداشت‌های زمین‌شناسی منطقه ابتدا بايستی تعداد فراوانی درزه‌ها با استفاده از رابطه (۱۴-۳) در واحد طول پیمایش برداشت خطی مشخص شود و پس از آن با استفاده از ضرایب موجود با توجه به رابطه (۱۵-۳) بین چگالی سه بعدی و فراوانی شکستگی‌ها، چگالی سه بعدی شکستگی‌ها را محاسبه کرد (Jing & Stephansson, 2007). نتایج این محاسبات در جدول (۵-۳) و (۶-۳) آمده است.

$$D_1 = \left(\frac{N}{L}\right) \cos\delta \quad (14-3)$$

$$D_1 = \frac{D_3}{2}, \quad D_2 = \frac{\pi}{4} D_3 \quad (15-3)$$

در رابطه (۳۲-۳)، N تعداد درزه‌های دسته درزه، L طول خط برداشت بر حسب متر و δ زاویه بین خط نمونه‌برداری و نرمال صفحه شکست هستند. در رابطه (۳۳-۳)، D_1 چگالی یک بعدی شکستگی‌ها، D_2 چگالی دو بعدی شکستگی‌ها و D_3 چگالی سه بعدی شکستگی‌ها می‌باشد.

۱۴-۳- مفهوم المان حجم معرف

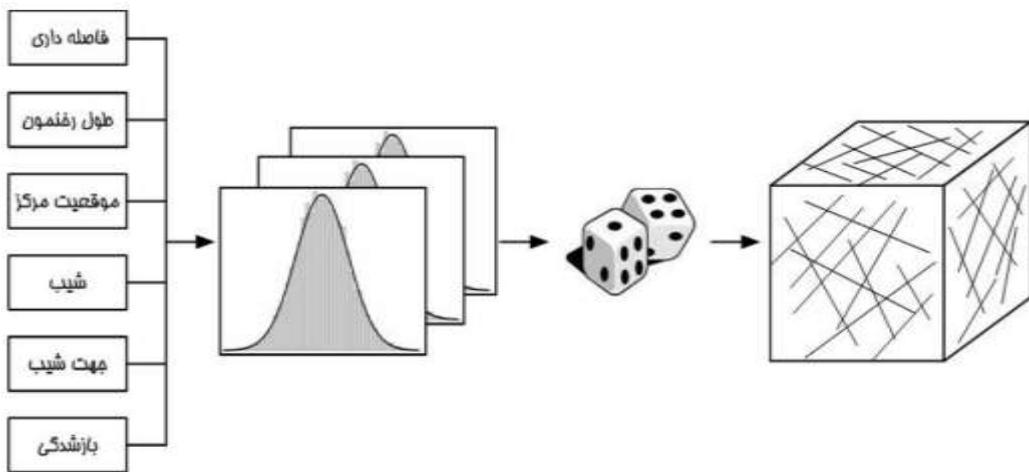
مطالعات به خوبی نشان می‌دهند که رفتار تودهسنگ بسیار وابسته به اندازه است در نتیجه در مطالعه بر روی خواص تودهسنگ مسئله‌ی اصلی انتخاب حجم تودهسنگی است که باید مورد مطالعه قرار گیرد تا رفتار تودهسنگ به درستی معرف خواص آن باشد. در صورتی که حجم اولیه معرف وجود نداشته باشد و یا بسیار بزرگ‌تر از مقیاس محدوده مورد بررسی باشد، امکان استفاده از روش محیط پیوسته وجود نخواهد داشت. لانگ و ویترسپون بر اساس نتایج آزمایش‌های خود روی بلوك‌های

سنگی با ابعاد و درزه‌داری مختلف، به این نتیجه رسیدند که اندازه حجم اولیه معرف برای مطالعات هیدرولیکی ۱۰ تا ۲۰ برابر فاصله‌داری متوسط درزه‌ها است. همچنین شولنز با مطالعه بر روی سنگ‌های بازالتی پیشنهاد کرد که اندازه حجم اولیه معرف ۵ تا ۱۰ برابر متوسط فاصله‌داری درزه‌ها و یا اندازه بلوك‌ها است. در موردی دیگر، هنگامی که پاراسیو در مدل‌سازی یک شیب سنگی به وسیله‌ی روش المان محدود با زمان‌های حل محاسباتی بزرگی روبرو شد؛ به منظور تسريع در زمان حل مدل‌ها از یک مدل مکعبی با اندازه ۱۰ برابر ماکزیمم فاصله‌داری دسته درزه‌ها به عنوان اندازه حجم اولیه معرف استفاده نمود. اودا در سال ۱۹۸۸ بر اساس تئوری تانسور ترک و با در نظر گرفتن یک سیستم شکستگی همگن آماری، سه برابر متوسط طول خط اثرهای درزه‌ها را به عنوان حجم اولیه معرف توده‌سنگ پیشنهاد کرد (*Esmaeili et al, 2010*).

در این مطالعه برای این‌که مدل ساخته شده تطابق بیشتری با مدل واقعی داشته باشد و با توجه به این‌که مقیاس محدوده مورد بررسی بزرگ‌تر از محدوده حجم معرف اولیه است، از حجم کل محدوده مورد بررسی برای ایجاد شبکه شکستگی مجزا استفاده شد.

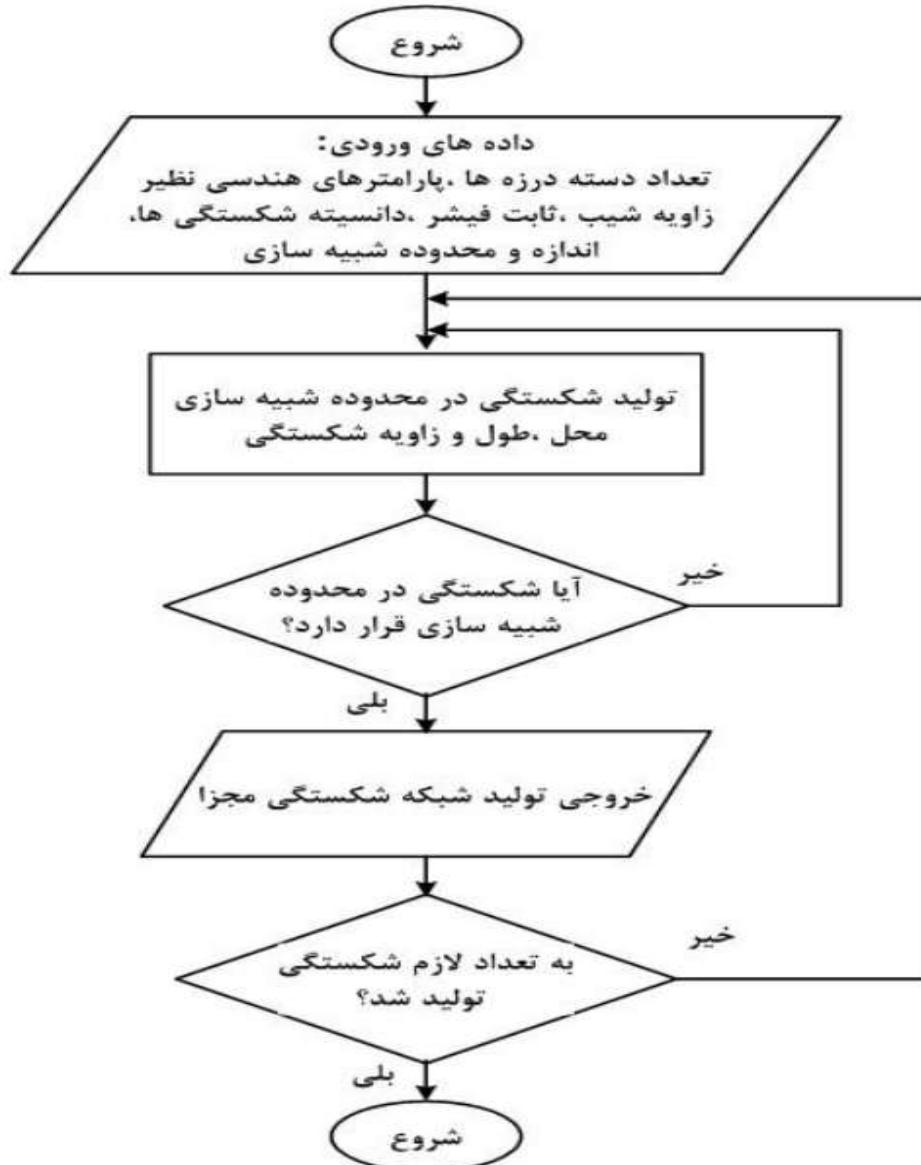
۱۵-۳- شبیه‌سازی تصادفی شکستگی‌های توده‌سنگ با استفاده از روش مونت کارلو

در مطالعات مختلف مهندسی سنگ برای توصیف هندسی سیستم شکستگی‌های توده‌سنگ از شبکه شکستگی‌های مجزا بر پایه‌ی شبیه‌سازی تصادفی مونت کارلو استفاده می‌شود. شبیه‌سازی مونت کارلو یک فرایند تصادفی است که تصادفی بودن هندسه شبکه شکستگی‌ها را با نمایش خواص شکستگی نظیر موقعیت، اندازه، جهت‌داری، و بازشدگی به صورت تصادفی که از توابع چگالی احتمال مخصوص به خود تبعیت می‌کنند، بیان می‌کند. شکل (۱۰-۳) مکانیسم تولید شکستگی‌های مختلف را با روش مونت کارلو به طور شماتیک نشان می‌دهد (میرزا‌بی‌نصیرآباد، ۱۳۹۱).



شکل (۱۰-۳): روند تولید شبکه شکستگی مجرا با استفاده از روش مونت کارلو (میرزاچی نصیرآباد، ۱۳۹۱)

شبیه سازی مونت کارلو برای کاهش عدم قطعیتی که به واسطه ناشناخته بودن هندسه سیستم شکستگی به وجود می آید، یک ابزار کارآمد است و کمی سازی تغییرات پارامترها را توسعه می دهد. این ابزار مخصوصاً برای مهندسی فضاهای زیرزمینی در توده سنگ درزه دار مفید است. فلوچارت شبیه سازی شبکه شکستگی های توده سنگ درزه دار برای یک برنامه کامپیوتروی در شکل (۱۱-۳) ارایه شده است (میرزاچی نصیرآباد، ۱۳۹۱)



شکل (۱۱-۳): فلوچارت یک برنامه کامپیوترا برای تولید شبکه شکستگی مجزا (میرزا یی نصیر آباد، ۱۳۹۱)

۱۶-۳- معرفی نرم افزار 3DEC

نرم افزار 3DEC بر مبنای روش اجزای مجزا است. این روش در دسته روش های تحلیل محیط های ناپیوسته قرار دارد. تفاوت میان یک محیط ناپیوسته و یک محیط پیوسته، وجود سطوح مشترک یا تماس میان پیکره های جداگانه ای تشکیل دهنده سیستم است. بنیان این نرم افزار را فرمول بندی عددی آزمایش شده و به کار رفته در نرم افزار دو بعدی UDEC تشکیل می دهد. در این

نرم افزار واکنش محیط ناپیوسته (مانند یک توده سنگ درزه دار) در معرض بارگذاری استاتیک یا دینامیک شبیه سازی می شود. ساختمان این محیط ناپیوسته به صورت مجموعه ای از بلوک های جداگانه تعریف می شود. ناپیوستگی ها به صورت شرایط مرزی میان بلوک ها در نظر گرفته می شود و جابجایی های زیاد در امتداد ناپیوستگی ها و چرخش بلوک ها امکان پذیر است. رفتار هر بلوک می تواند به صورت ماده ای صلب یا تغییر شکل پذیر باشد. بلوک های تغییر شکل پذیر به شبکه ای از المان های تفاضل محدود تبدیل شده و هر یک از این المان ها مطابق با قانون تنش - کرنش خطی یا غیر خطی از پیش تعریف شده ای رفتار می کند. حرکت نسبی ناپیوستگی ها نیز از روابط نیرو - جابجایی خطی یا غیر خطی برای حرکت در هر دو راستای عمودی و بر شی تبعیت می کند. این نرم افزار دارای چندین مدل پیش ساخته برای رفتار ماده (هم برای بلوک های سالم و هم برای ناپیوستگی ها) است که امکان شبیه سازی واکنشی که معرف مواد زمین یا مشابه آن ها باشد را می دهد. نرم افزار 3DEC بر مبنای یک طرح محاسباتی لاگرانژی است که برای مدل کردن حرکت ها و تغییر شکل های بزرگ در یک سیستم بلوکی بسیار مناسب است.

نرم افزار 3DEC اصولاً برای تحلیل در پژوهه های مهندسی سنگ، از مطالعه هی شکست پیش رو ندهی شیروانی های سنگی گرفته تا برآورد تأثیر درزه ها، گسل ها، صفحات لایه بندی و سایر ویژگی های سنگ در حفاری های زیرزمینی و پی های سنگی توسعه داده شده است. این نرم افزار به طور ایده آل برای مطالعه هی حالت های بالقوه شکست که مستقیماً با ظهور مشخصه های ناپیوستگی ارتباط دارند، مناسب است. برای مثال وقتی ساختار زمین شناسی از طریق مشاهدات و نقشه برداری زمین شناسی، نسبتاً خوبی تعیین شده باشد، 3DEC می تواند به بهترین نحو مورد استفاده قرار گیرد. هر دو نوع ایجاد کننده درزه دستی و خودکار برای ساخت ناپیوستگی های منفرد یا دسته ای - که نشان دهنده می ساختار درزه در یک توده سنگ هستند، در 3DEC گنجانده شده است. الگوهای درزه متنوعی را می توان در مدل ایجاد کرد. همچنین در این برنامه دو ایجاد کننده تونل (جهت ساخت مدل هایی با حفریات با شکل منظم) وجود دارد.

نرم افزار 3DEC در نسخه ۲۰۱۳ قابلیت تولید شبکه شکستگی مجزا در فضای سه بعدی را دارد.

از این‌رو در این مطالعه برای شبیه‌سازی توده‌سنگ از محیط نرم افزار 3DEC استفاده شده است.

۱۷-۳- جمع‌بندی

در این فصل در مورد توده‌سنگ و اجزای تشکیل دهنده آن و سپس ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌های توده‌سنگ بحث شد که این پارامترها تأثیر بسزایی در پایداری فضاهای زیرزمینی، خردایش سنگ و ... دارند. با توجه به این‌که ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ باعث ایجاد بلوک‌هایی در توده‌سنگ می‌شود دانستن توزیع حجم بلوک‌های توده‌سنگ می‌تواند درک مناسبی از بلوک‌های تشکیل دهنده آن باشد. با داشتن توزیع حجم بلوک‌ها می‌توان پیش‌بینی بهتری برای نگهداری بلوک‌های توده‌سنگ یا بلوک‌دهی آن‌ها در سنگ‌های ساختمانی و ... داشت. برای محاسبه هندسه بلوک در کارهای متفاوتی انجام شده که این امر اهمیت این موضوع را می‌رساند. همچنین در ادامه به بیان مفهوم شبکه شکستگی مجزا توده‌سنگ و اهمیت این گونه شبیه‌سازی در مهندسی سنگ پرداخته شد. شبیه‌سازی تصادفی در مکانیک سنگ، امروزه جایگاه ویژه‌ای دارد و اغلب پژوهش‌گران با توجه به طبیعت ناپیوسته توده‌سنگ و عدم قطعیت‌های بسیاری که با آن روبرو هستند، استفاده از این روش را در شبیه‌سازی محیط‌های ناپیوسته و شبه پیوسته ترجیح می‌دهند. شرکت‌های بزرگی از جمله ITASCA، به تولید نرم افزارهایی با قابلیت شبیه‌سازی توده‌سنگ درزه‌دار و تولید شبکه شکستگی مجزا در محیط سه بعدی اقدام کرده‌اند. نرم افزار 3DEC در نسخه پنجم قابلیت تولید شبکه شکستگی‌های مجزا را دارد. در این مطالعه نیز برای تعیین حجم بلوک‌های توده‌سنگ از مفهوم مدل‌های شبکه شکستگی مجزا در برنامه 3DEC استفاده شده است.

فصل چهارم

تعیین توزیع ابعادی توده گنگ خردشده با استفاده از آنالیز

تصویری

در صنایع معدنی ویژگی‌های خردایش از قبیل شکل و اندازه از جمله اطلاعات بسیار مهم در بهینه‌سازی تولید می‌باشد. پس از انفجار، باید نتایج حاصل مورد ارزیابی قرار گیرد. با استفاده از این نتایج الگوی حفاری و انفجار مناسب، برای رسیدن به نتیجه مطلوب به دست می‌آید. خردشده‌گی مطلوب و مناسب فاکتورهای مهم در موفقیت یک عملیات انفجاری روبرو بوده و می‌تواند هرینه کلی یک معدن را به حداقل ممکن کاهش دهد. به این ترتیب اگر عملیات انفجاری با دقت صورت پذیرد، سیکل‌های بعدی عملیات معدن کاری به خوبی طراحی و اجرا می‌شود (*Sastray & Hustrulid; 1999*). از نظر طراحی انفجار نیز مهم است که، کارایی انواع مواد منفجره و طرح‌های انفجاری، با ارزیابی سریع توزیع ابعادی خردایش، به سرعت تحلیل و بررسی شوند. از طرفی پیش‌بینی خردشده‌گی و تعیین ابعاد قطعه خردشده و ارزیابی عملکرد این عملیات یک فاکتور مؤثر و بحرانی در انتخاب تجهیزات و ارزیابی آن‌هاست (نعمت‌اللهی، ۱۳۷۷).

روش‌های تعیین توزیع ابعادی بر طبق ارتباط بین اندازه‌گیری و آزمایش، به دو گروه روش‌های مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می‌شوند. آنالیز سرندي قطعات خرد شده، تنها روش مستقیم بوده و در میان سایر روش‌ها دقیق‌ترین و قابل اعتمادترین روش می‌باشد. در این روش باید هزینه و زمان بسیار زیادی را صرف کرد تا منحنی توزیع دانه‌بندی را به دست آورد. این روش به‌طور جزئی و در بعضی از انفجارهای آزمایشی با حجم کم قابل کاربرد است (*Thote & Singh; 2003, Sastry & Chandar; 2013, محمودنژاد؛ ۱۳۸۹*). آنالیز تصاویر دیجیتالی توده‌سنگ خردشده یکی از روش‌های غیر مستقیم تعیین توزیع دانه‌بندی است که به دلیل صرف هزینه و زمان کم، در زمینه ارزیابی خردایش، بسیار مورد توجه واقع شده است. بنابراین در کارهای معدنی روش‌های زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند (*Thote & Singh; 2003*):

۱- آنالیزهای مشاهده‌ای کیفی

۲- روش عکاسی

۳- روش فتوگرامتری

۴- تصویربرداری با سرعت بالا

۵- بررسی قابلیت تولید تجهیزات بارگیری

۶- شمارش قطعات درشت و انفجار ثانویه

۷- بررسی عملیات سنگشکنی

۸- روش سرند کردن

۹- آنالیز تصویر دیجیتال

در سال‌های اخیر، آنالیز تصویری به عنوان یک روش مرسوم برای تعیین توزیع دانه‌بندی توده‌سنگ انفجاری، استفاده شده است. قسمت اعظم دقت در آنالیز تصویری، وابسته به نرم افزار آنالیز تصویری می‌باشد. به همین دلیل در سال‌های اخیر نرم افزارهای زیادی برای آنالیز عکس‌های گرفته شده از توده‌سنگ، از طرف شرکت‌های مختلف طراحی شده‌اند که از تفاوت‌های عمدۀ آن‌ها می‌توان به محدوده کاربرد آن‌ها، روش مرزبندی خردمند، میزان حساسیت آن‌ها به کیفیت عکس و اطلاعاتی که به عنوان نتایج آنالیز ارایه می‌دهند، اشاره کرد. این تفاوت‌ها میزان واقعی بودن نتایج نرم‌افزارها و زمان لازم برای آنالیز را مشخص می‌کند. لیست این نرم‌افزارها در جدول (۱-۴) آمده‌اند.

جدول (۱-۴): نرم افزارهای تحلیل عکس (Raina 2013)

ویرایش دستی	سیستم‌های پردازش تصویر
خیر	<i>CIAS (USA), USBM, & Noramco Engg</i>
خیر	<i>FRAGSCAN (France). Ecole des Mines de Paris</i>
بلی	<i>Gold size (USA and Canada), Golder Associates</i>
خیر	<i>IPACs (Sweden)</i>
خیر	<i>KTH (Sweden)</i>
بلی	<i>Power Sieve (Australia)</i>
بلی	<i>Split (USA)</i>
-	<i>TUCIPS (Germany)</i>
بلی	<i>Fragalyst3.0 (India)</i>
بلی	<i>WipFrag (Canada)</i>

این سیستم‌ها می‌توانند به دو گروه گسترده تقسیم‌بندی شوند (Raina, 2013):

- (الف) سیستم‌های ایستا: عکس کپه‌های آتشباری جمع‌آوری شده و بعد از جمع‌آوری تحلیل می‌شوند.
- (ب) پویا: این سیستم به صورت آنلاین می‌باشد و روی نوارنقاله‌ها ثابت می‌شوند و عکس می‌گیرند و همچنین اندازه خوارک در کارخانه و سنگشکن در فاصله‌های مناسب تعیین شده و تحلیل می‌شوند.

در سال‌های مختلف مطالعات مختلفی با استفاده از تکنیک‌های تحلیل عکس دیجیتالی انجام شده که مطالعات مهم منتشر شده بعد از سال ۲۰۰۰ در جدول (۲-۴) آورده شده است.

جدول (۲-۴): مطالعات مهم منتشر شده روی توسعه و استفاده از *DIAT*^۱ (*Raina 2013*)

ردیف	سال	نویسنده‌گان	توصیف با توجه به <i>DIAT</i>
۱	۲۰۰۱	الورانتا	بهینه‌سازی خردایش از طریق <i>DIAT</i>
۲	۲۰۰۱	قرانداستروم و همکاران	بهینه‌سازی خردایش، استفاده از <i>Split</i> بهبود در خروجی آسیای میله‌ای
۳	۲۰۰۲	هندریکز	طراحی و کاربرد سیستم حفاری <i>AQUILA</i> کاربرد <i>Wipfrag</i>
۴	۲۰۰۲	چو و همکاران	شبیه سازی عددی، پیش‌بینی خردایش، مکانیسم شکستگی
۵	۲۰۰۲	مکنیستری و همکاران	استفاده از چاشنی الکتریکی <i>DIAT</i>
۶	۲۰۰۲	واردریپ و همکاران	مواد منفجره با سرعت بالا
۷	۲۰۰۳	مکنیستری و همکاران	استفاده از چاشنی الکتریکی <i>DIAT</i>
۸	۲۰۰۳	ورکمن	انرژی آتشباری، خردایش، اثر اندازه خوراک روی انرژی مصرفی در سنگ‌شکنی و آسیاکنی
۹	۲۰۰۳	الورانتا	سیستم <i>DIAT</i> ، خطای کالیبراسیون و ...
۱۰	۲۰۰۳	لاتهم و همکاران	مقایسه <i>Fragscan Power siever.Wipfrag</i> نقاط ضعف و قوت <i>DIAT</i>
۱۱	۲۰۰۴	حسینی و همکاران	اندازه قطعات بر روی نوار نقاله <i>Goldsize</i>
۱۲	۲۰۰۴	مکنیستری و همکاران	استفاده در خروجی آسیا <i>DIAT</i>
۱۳	۲۰۰۵	کای و سونق	خردایش، تونل‌سازی، چاشنی‌های الکتریکی
۱۴	۲۰۰۵	قهرمان و همکاران	مدل کوز-رام، مقایسه نتایج <i>DIAT</i>
۱۵	۲۰۰۵	قلوو	نتایج مناسب برای بخش‌هایی از آتشباری <i>DIAT</i>
۱۶	۲۰۰۶	سینگ و همکاران	عدم توافق نتایج <i>DIAT</i> و سرند کنی، بایاس نرمه
۱۷	۲۰۰۶	سانچیدراین و همکاران	اندازه‌گیری خردایش <i>DIAT</i>
۱۸	۲۰۰۶	پوتس و اوچپلونی	خردایش <i>DIAT</i>
۱۹	۲۰۰۶	کیم	انرژی مواد منفجره، نرخ کاهش خردایش، زبری شکستگی سنگ، <i>DIAT</i>
۲۰	۲۰۰۶	اوزقه‌مان	خردایش، طراحی انفجار، <i>DIAT</i>
۲۱	۲۰۰۷	اوزدمیر و همکاران	توزیع اندازه ذرات <i>Split</i>
۲۲	۲۰۰۷	چاوز و همکاران	بهینه‌سازی <i>DIAT MMFS</i>

^۱ Digital Image Analysis Technique

۲۳	۲۰۰۷	ماکی	<i>DIAT</i> , خردایش، چاشنی الکتریکی
۲۴	۲۰۰۷	الورانتا و همکاران	تاریخچه <i>DIAT</i> تکنولوژی تحلیل آنلاین ایستا
۲۵	۲۰۰۷	ال تیابت و همکاران	حرکت ذرات (<i>سیستم آنلاین</i>), مشکلات, <i>DIAT</i>
۲۶	۲۰۰۸	کینگ	استفاده از دوربین, <i>DIAT</i>
۲۷	۲۰۰۸	پلان قیو	<i>DIAT</i> تجهیزات، روش‌ها، تکنیک‌ها و اطلاعات
۲۸	۲۰۰۸	قهرمان و همکاران	<i>DIAT</i> , خردایش، چرخه زمانی مربوط به تجهیزات
۲۹	۲۰۰۸	اوطال و همکاران	روش کالیبراسیون توزیع سه بعدی از عکس دو بعدی
۳۰	۲۰۰۹	سینگ و همکاران	روش‌ها، عملیات، محدودیت‌های <i>DIAT</i>
۳۱	۲۰۰۹	کوه و همکاران	قطعه قطعه سازی، عکس‌برداری چند فلشی
۳۲	۲۰۰۹	سانچیدراین و همکاران	<i>DIAT</i> دقت
۳۳	۲۰۱۰	پالی	<i>Split</i> , خردایش، کارایی آسیای گلوله‌ای
۳۴	۲۰۱۰	کوازادا و همکاران	اثر اندازه نرمه روی تولید, <i>DIAT</i>
۳۵	۲۰۱۰	اوطال و همکاران	روش کالیبراسیون توزیع سه بعدی از عکس دو بعدی
۳۶	۲۰۱۰	سانچیدراین و همکاران	ارزیابی توابع توزیع
۳۷	۲۰۱۰	تورلی	اندازه‌گیری خردایش با استفاده از عکس‌برداری سطحی ۳ بعدی
۳۸	۲۰۱۰	انجین	طراحی انفجار بر اساس <i>DIAT</i>
۳۹	۲۰۱۰	راینا و همکاران	بهبود بهره‌وری با استفاده از <i>DIAT</i>
۴۰	۲۰۱۲	جیمو و الدریج	دید ماشینی و المان‌هایی از شناسایی الگوی آماری ماشین بردار پشتیبان

در این مطالعه به دلیل در دسترس بودن، سادگی کار با نرم‌افزار و مرزبندی دستی و دقیق قطعات خردشده از نرم‌افزار *Goldsizer* استفاده شده است که در زیر به توصیف مختصری از نرم‌افزار *Goldsizer* می‌پردازیم.

۴-۲-۴- نرم افزار *Goldsizer*

این نرم‌افزار محصول شرکت *Golder (Golder Associates)* می‌باشد. در نرم افزار *Goldsizer* مرز قطعات به طور دستی و با کمک ماوس مشخص می‌شود. هر چند این مرحله از کار، زمان زیادی

می‌برد اما مرز قطعات با دقت بیشتر تعیین می‌شود. این نرمافزار قابلیت تغییر و بهبود کیفیت تصاویر تهیه شده را ندارد. با توجه به این که مرزیابی قطعات به طور دستی صورت می‌گیرد، وجود سایه یا کیفیت نامناسب عکس، تأثیر چندانی بر ترسیم محیط قطعات ندارد. در این نرمافزار خطای ناشی از عدم اندازه‌گیری دقیق ذرات، قابل تصحیح می‌باشد.

در نرمافزار *Goldsizer*، امکان پیش‌بینی خردایش بر اساس مدل کاز-رام وجود داشته و کاربر می‌تواند با وارد نمودن مشخصات ماده منفجره، ویژگی‌های توده‌سنگ و طرح انفجار، خردایش حاصل از انفجار را پیش‌بینی و نتایج را با توزیع اندازه‌گیری شده مقایسه کند.

سیستم *Goldsizer* توزیع ابعادی را بر اساس معادله روزین-راملر انجام داده و پارامترهای این توزیع را محاسبه و نشان می‌دهد. همچنین می‌توان توزیع ابعادی را بطور ساده و فقط با شمارش قطعات واقع در یک محدوده ابعادی به دست آورد. در این نرمافزار، خطای ناشی از عدم اندازه‌گیری دقیق ذرات ریز تا حدودی قابل تصحیح است. مزیت دیگر *Goldsizer*، نمایش تعداد و مشخصات هندسی قطعات در تصویر می‌باشد. به علاوه می‌توان این صفحه آماری را به نرمافزار *Excel* منتقل کرده و کارهای آماری بیشتری بر روی داده‌ها انجام داد.

۳-۴- روش کار نرمافزار *Goldsizer*

روش کار نرمافزارهای آنالیز تصویری مشابه هم می‌باشد، تفاوت عمده آن‌ها در نحوه مرزبندی می‌باشد. مراحل کار با نرمافزار *Goldsizer* به شرح زیر است:

۴-۳-۱- گرفتن عکس از توده سنگ

روش کار با نرم افزار بدین شکل می‌باشد که در ابتدا از سطح توده‌سنگ پس از انفجار و یا هرجایی که معرف خرده‌سنگ‌های منفجر شده باشد، عکس برداری انجام می‌شود. نکته مهم این است که نرمافزار *Goldsizer* تنها عکس با فرمتهای *bmp* (*bitmap*) را می‌پذیرد، بنابراین ابتدا باید عکس‌ها را

به فرمت *bmp* تبدیل کرد و سپس در اختیار نرم‌افزار قرار داد. شکل (۱-۴) نمونه‌ای از عکس آماده شده برای تحلیل در این تحقیق را نشان می‌دهد.



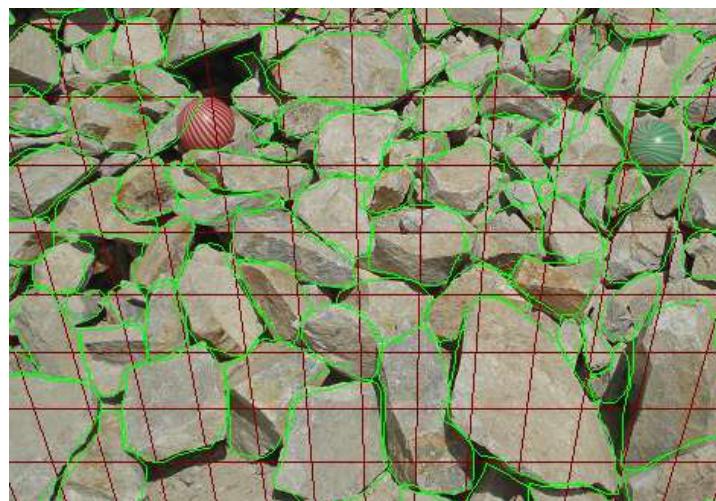
شکل (۱-۴): عکس آماده شده برای آنالیز تصویری زون دایک معدن مس سونگون

۴-۳-۲- تعريف مقیاس و مرزبندی نرم‌افزار Goldsize

در این مرحله برای تعريف مقیاس، باید به کمک ماوس، مقیاس موجود در تصویر را به همراه قطر آن، رسم کرد (شکل ۲-۴). سپس باید مرزبندی را به طور دستی و به کمک ماوس، انجام داد (شکل ۳-۴). هر چه مرزبندی دقیق‌تر باشد نتایج حاصله به نتایج واقعی نزدیک‌تر خواهد بود. بنابراین باید سعی شود، مرزبندی کلیه خردمنگ‌ها انجام شود. از طریق صفحه دیجیتالیز شده تصاویر توسط نرم‌افزار، می‌توان از مرزبندی کلیه خردمنگ‌ها اطمینان پیدا کرد. در این صفحه مکان‌های خالی به معنی نبودن خردمنگ‌ها یا مرزبندی نشدن آن‌ها است (شکل ۴-۴).



شکل (۲-۴): مقیاس‌بندی در نرم‌افزار Goldsize



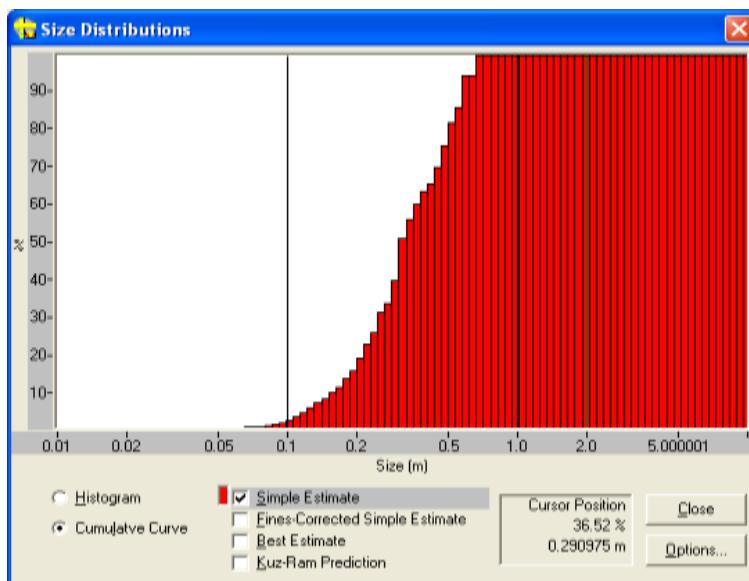
شکل (۳-۴): مرزیابی دستی در نرم‌افزار Goldsize



شکل (۴-۴): تصویر دیجیتالیز شده توسط نرم‌افزار Goldsize

۴-۳-۳- ارایه نتایج نرم افزار Goldsize

نرم افزار Goldsize منحنی دانه بندی و هیستوگرام را به عنوان نمایش توزیع ابعادی خرد هسنگ ها در اختیار کاربر می گذارد (شکل ۴-۵). در نرم افزار Goldsize، امکان پیش بینی خردایش بر اساس مدل کاز- رام وجود داشته و کاربر می تواند با وارد کردن مشخصات ماده منفجره، ویژگی های توده سنگ و طرح انفجار، خردایش حاصل از انفجار را پیش بینی و نتایج را با توزیع اندازه گیری شده مقایسه کند.



شکل (۴-۵): منحنی دانه بندی خروجی نرم افزار Goldsize

۴-۱- مزایای نرم افزار Goldsize

به دلیل اینکه در این نرم افزار مرز بندی به صورت دستی انجام می شود، کیفیت تصویر تأثیر چندانی روی آنالیز تصویر ندارد.

کار با این نرم افزار ساده است و نیاز به مهارت خاصی ندارد.

خطای هم پوشانی با مرز بندی تا حدودی می تواند رفع شود.

۴-۴-۲- معايip نرمافزار Goldsize

زمان زيادي برای آناليز تصوير لازم است زيرا مرز بندی به صورت دستی انجام می‌شود.

اين نرمافزار تنها در ويندوز *XP* قابلیت نصب دارد و تنها تصاویر دیجیتالی با فرمت *bmp* را آناليز می‌کند.

قابلیت کاربرد *on-line* را ندارد.

منحنی دانه‌بندی اين نرمافزار به صورت لحظه‌ای نمی‌باشد.

۴-۵- جمع‌بندی

روش‌های مختلفی برای تعیین توزیع ابعادی وجود دارند که به دو گروه روشهای مستقیم و روشهای غیر مستقیم تقسیم می‌شوند. در میان روشهای غیر مستقیم آنالیز تصویری به عنوان یک روش مرسوم برای تعیین توزیع ابعادی برای سنگ‌های خرد شده بعد از انفجار می‌باشد. از اين روش برنامه‌های مختلفی برای آنالیز تصویر ارائه شدند که در اين مطالعه به دليل دسترسي آسان، ساده بودن کار با نرمافزار، دقت بيشتر، قابلیت تحليل عکس با كیفیت‌های پایین و ... نرم افزار *Goldsize* برای تحليل كپه‌های انفجاری انتخاب شد.

γλ

فصل پنجم

تعیین خواص فنرکی و مکانیکی ماده سگ

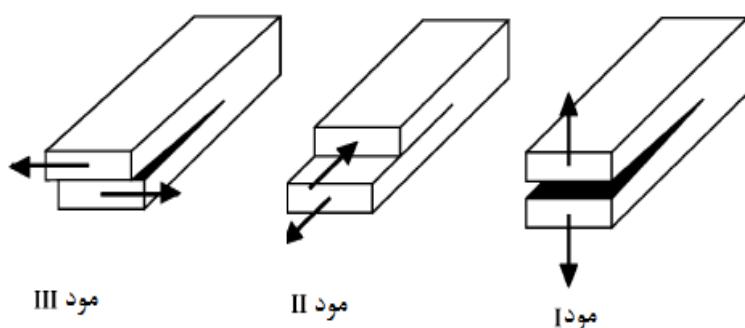
به طور کلی خواص مهندسی سنگ‌ها را می‌توان به دو دسته خواص فیزیکی و مکانیکی طبقه‌بندی کرد. شناخت خواص فیزیکی سنگ‌ها جزو مراحل اولیه مطالعه آن‌ها و تعیین کننده ویژگی‌های مهندسی آن‌ها می‌باشد. خواص فیزیکی در بیشتر کارهای عمرانی معدنی، نفت، گاز و آب که به گونه‌ای با زمین در ارتباط هستند، بیان می‌شود. خواص مکانیکی سنگ‌ها به کلیه خواصی گفته می‌شود که رفتار سنگ در ارتباط با نیروهای وارد بر سنگ نشان داده و تغییرات آن‌ها را با تغییر شکل‌های حاصله از این نیروها و با در نظر گرفتن زمان یا بدون آن مشخص می‌سازد. بدیهی است که در بررسی خواص مکانیکی غالباً بنحوی خواص فیزیکی سنگ نیز مد نظر است (فریدونی؛ ۱۳۸۷، *Sharma & Saxena; 2001*).

با توجه به وجود ناپیوستگی‌ها در سنگ می‌توان عکس العمل سنگ‌ها را در برابر نیروهای وارد به دو دسته متمایز تقسیم کرد. یکی رفتار مکانیکی سنگ بکر و دیگری رفتارهای مکانیکی توده‌سنگ. طبق تعریف سنگ بکر عبارت است از سنگی که قادر هرگونه ناپیوستگی ساختاری بوده و در واقع سالم و دست نخورده باشد و توده‌ی سنگ متشکل از سنگ بکر به اضافه ناپیوستگی‌ها و سطوح ضعیف ساختاری موجود در سنگ‌ها می‌باشد. مطالعه عملی سنگ بکر عمدهاً توسط بررسی‌های آزمایشگاهی نمونه‌ها سنگ بکر که از مغازه‌های حفاری تهیه شده‌اند، انجام می‌گیرد. مطالعه توده‌های سنگی توسط آزمون‌ها و بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی صورت می‌گیرد (فریدونی؛ ۱۳۸۷، *Sharma & Saxena; 2001*). در زیر به برخی از خصوصیات ماده‌سنگ و نحوه تعیین آن پرداخته شده است.

۱-۲-۵- چقرومگی شکست

امروزه بیشتر تحقیقات در زمینه مکانیک سنگ، متوجه پدیده مکانیک شکست بهخصوص در زمینه مسایل مهندسی سنگ می‌باشد که از قبیل این مسایل می‌توان به آتشباری و خردابیش سنگ‌ها، شکست هیدرولیکی، تحلیل شیب‌های سنگی، ژئوفیزیک، مکانیک زلزله، استخراج انرژی ژئوترمال زمین، حفاری‌های زیرزمینی، حفاری چاه‌های نفت و بسیاری از مسایل دیگر اشاره کرد (به‌الدینی و همکاران؛ ۱۳۹۱، Levent & Cigdem؛ 2011)

از دیدگاه علم مکانیک شکست بسته به نوع بارگذاری و هندسه شکستگی‌های سنگ، یک شکستگی به صورت یکی از سه حالت اصلی و یا ترکیبی از آن‌ها گسترش می‌یابد. در شکل (۱-۵) سه حالت اصلی انتشار شکاف آمده است. حالت I یا حالت باز شدگی متداول‌ترین فرم گسیختگی در اثر رشد شکاف است. در این حالت سطوح شکاف نسبت به صفحات به‌طور عمود بر هم در جهت مخالف یکدیگر تغییر مکان می‌دهند. حالت II یا حالت برشی که دو سطح شکاف نسبت به هم در جهت خط عمود بر نوک شکاف می‌لغزند. حالت III یا حالت پارگی که لغزش دو صفحه شکاف در جهتی به موازات خط پروفیل شکاف اتفاق می‌افتد (Soo-Ho et al, 2002).



شکل (۱-۵): سه حالت اصلی انتشار شکاف (میرزا‌بی‌نصیرآباد و همکاران، ۱۳۸۷)

۵-۲-۲- روش‌های متداول در تعیین چقرومگی شکست

مهم‌ترین مشخصه مواد در مکانیک شکست، چقرومگی شکست می‌باشد و به صورت مقاومت ماده در مقابل آغاز و رشد شکاف تعریف می‌شود (آیت‌الله‌ی و ثقی، ۱۳۸۹)، از آنجایی که سنگ‌ها معمولاً مواد ترد و شکننده هستند و در مقابل تنفس کششی ضعیف می‌باشند بنابراین K_{Ic} که چقرومگی شکست تحت بارگذاری حالت I می‌باشد یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های شکستگی سنگ می‌باشد. شرایط بارگذاری حالت I در نمونه‌های سنگ می‌تواند با بارگذاری کششی مستقیم، بارگذاری خمشی سه یا چهار نقطه‌ای و با بارگذاری فشاری نوع برزیلی ایجاد شود.

با توجه به مشکلات عملی، اعمال بار کششی مستقیم بر روی نمونه سنگ، یک روش معمول در آزمایش چقرومگی شکست نمی‌باشد. روش میله کوتاه (SR^۱) یا نمونه استوانه‌ای با شکاف شورن^۲ یکی از روش‌های پیشنهادی توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ است. بار کششی به صورت مستقیم و عمود بر صفحه شکاف شورن اولیه در روش میله کوتاه اعمال می‌شود (Levent & Cigdem, 2011). هندسه نمونه تحت خمش سه نقطه‌ای و تکنیک‌های آزمایش مربوطه برای تعیین چقرومگی K_{Ic} ، به دلیل سهولت آماده‌سازی نمونه و سادگی شکل آزمایش مناسب می‌باشند. برای نمونه‌های مغزه‌ای شکل سنگ، روش معمول خمش سه نقطه‌ای، برای تعیین K_{Ic} به کار می‌رود که شامل نمونه استوانه‌ای با شکاف لبه‌ای (SERBB^۳)، روش خمش نیم دیسکی (SCB^۴)، نمونه استوانه‌ای با شکاف لبه‌ای شورن تحت خمش سه نقطه‌ای و روش نیم دیسکی با شکاف شورن تحت خمش سه نقطه‌ای می‌باشد (Levent & Cigdem, 2011).

¹ short rod

² chevron

³ straight edge cracked round bar bend

⁴ semi- circular bending

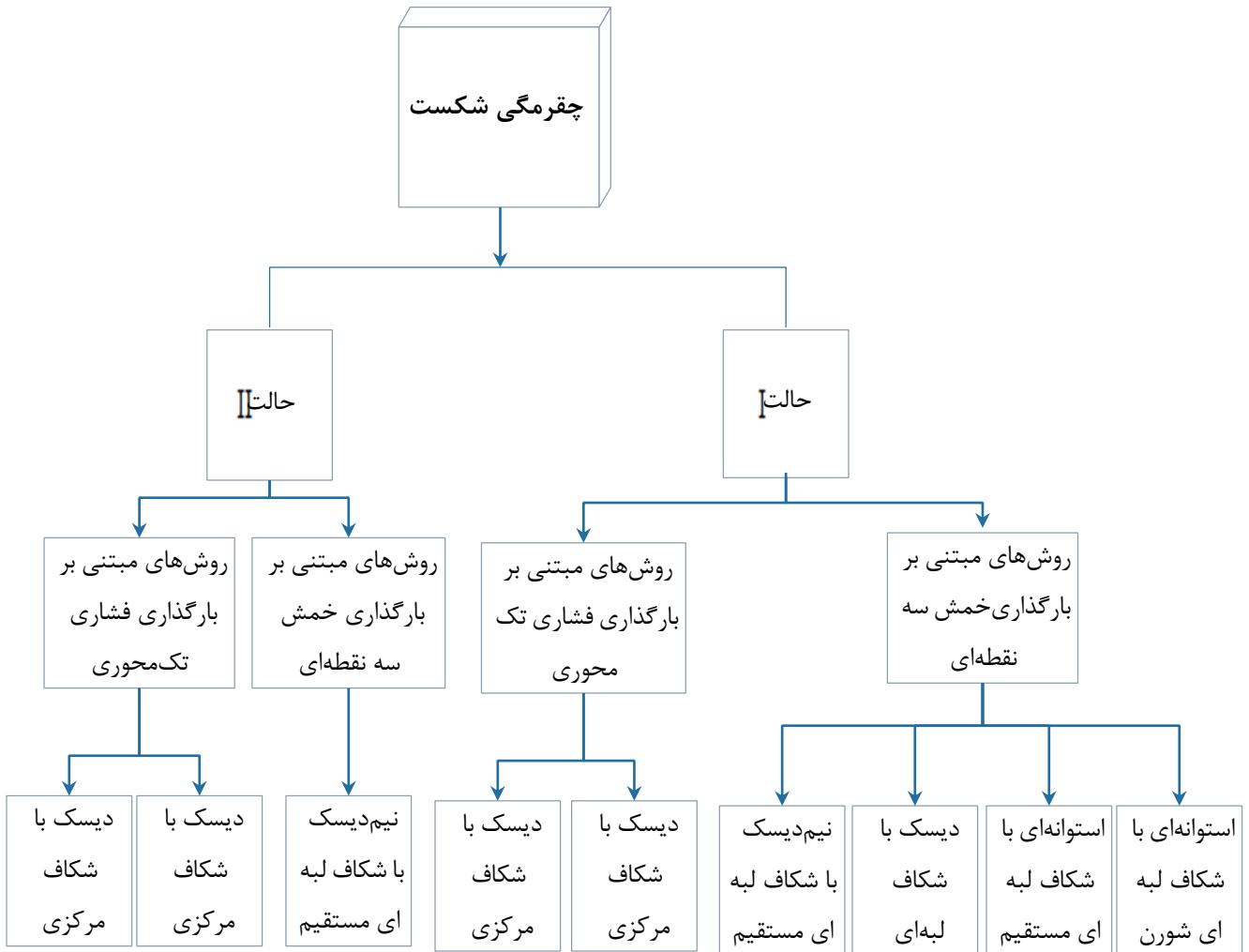
⁵ chevron bend

برای بارگذاری فشاری نوع برزیلی دیسکهای سنگ، روش‌های مختلفی برای تعیین K_{IC} مطرح شد. نمونه‌های دیسکی با شکاف مستقیم ($CSTBD$ ^۱)، تست فشاری قطری، نمونه‌های دیسکی با شکاف مرکزی شورن ($CCNBD$ ^۲)، آزمایش حلقه اصلاح شده، آزمایش دیسک برزیلی، روش دیسک برزیلی مسطح و روش دیسک برزیلی مسطح با منفذ شکاف خورده برخی روش‌هایی هستند که برای آزمایش شکستگی مغزه‌های سنگ تحت بارگذاری با فشار بالا و پایین استفاده می‌شوند. در میان این روش‌ها روش $CCNBD$ یکی از روش‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ برای تعیین چقرمگی شکست سنگ می‌باشد (Levent & Cigdem, 2011).

در برخی روش‌ها از قبیل $SERBB$ و SCB و نمونه استوانه‌ای با شکاف لبه‌ای مستقیم تحت خمش سه نقطه‌ای گزارش شد که مقدار به دست آمده K_{IC} کمتر از مقادیر پیشنهاد شده توسط $ISRM$ می‌باشد. روش پیشنهادی $ISRM$ شامل روش SR و CD و $CCNBD$ می‌باشد (Levent & Cigdem,) (2011). در شکل (۲-۵) خلاصه‌ای از روش‌های مختلف ارایه شده برای تعیین چقرمگی آورده شده است.

¹ Cracked straight through Brazilian disk

² cracked chevron notched Brazilian disk



شکل (۲-۵): خلاصه‌ای از روش‌های مختلف ارایه شده برای تعیین چقلمگی (منصوری، ۱۳۹۲)

استفاده از بارگذاری کششی ممکن است باعث جدایش سنگ از پیرامون شکاف شود و همچنین گسیختگی‌هایی که از قبل در سنگ وجود داشته‌اند باعث جدایش سنگ می‌شود که این امر باعث گسیختگی سنگ دور از نوک شکاف می‌شود. با این حال استفاده از روش بارگذاری فشاری تمایل به محدود کردن مناطق کششی در اطراف نوک شکاف را دارد. بنابراین امکان جدایش یا پارگی از طریق نقص‌ها و ترک‌های موجود که دور از محل نوک قرار گرفته‌اند، کاهش می‌یابد. علاوه بر این چسباندن نمونه به نگهدارنده‌ها برای بارگذاری کششی، کار سختی می‌باشد. در نتیجه آزمایش ترجیحاً با بارگذاری فشاری انجام می‌شود که چقلمگی کششی از آن استنتاج شود. به منظور برآورد این

شرایط استفاده از نمونه‌های نیم دیسکی تحت بارگذاری سه نقطه‌ای پیشنهاد می‌شود (Soo-Ho et al, 2002).

روش نیم دیسکی در سال ۱۹۸۴ برای آزمایش حالت I چقرمگی شکستگی سنگ پیشنهاد شد (Mahinda & Ken, 2012). در این تحقیق نیز با توجه به تجهیزات موجود و تعداد نمونه در دسترس از روش نیم دیسکی تحت بارگذاری سه نقطه‌ای برای تعیین چقرمگی استفاده شد.

چقرمگی شکست یکی از ویژگی‌های مکانیکی ماده است که ممکن است با تغییر در شرایط محیط و بارگذاری تغییر کند. فاکتورهای زیادی همانند اندازه نمونه، همسانگردی، روش آزمایش، نرخ کرنش ابعاد دانه‌ها، اندازه یا طول شکاف و ... بر مقدار چقرمگی شکست تأثیر گذارند. همچنین به طور جالب توجهی، چقرمگی شکست می‌تواند با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سنگ نظیر مدول یانگ، مقاومت فشاری تک محوری، سایز دانه‌ها، طول تماس دانه‌ها و چگالی مرتبط شود (Whittaker et al, 1992).

۳-۲-۵- روش‌های تجربی محاسبه چقرمگی شکست حالت I

روش‌های اندازه‌گیری چقرمگی شکست شامل روابط تجربی، مطالعات عددی و مطالعات آزمایشگاهی می‌باشد. این روش‌ها مبتنی بر پارامترهای ژئومکانیکی سنگ می‌باشد. برخی از محققین با مطالعات تجربی خود روابطی بین چقرمگی شکست حالت I سنگ و پارامترهای ژئومکانیکی و مقاومتی سنگ نظیر ضریب الاستیسیته و شاخص بار نقطه‌ای ارایه دادند. روابط تجربی بین چقرمگی شکست حالت I سنگ و شاخص بار نقطه‌ای به صورت رابطه (۱-۵) و (۲-۵) می‌باشد:

$$K_{IC} \approx 1.1 + 0.1 I_{S(50)} \quad (1-5)$$

$$K_{IC} \approx 0.21 I_{S(50)} \quad (2-5)$$

در هر دو رابطه $I_{S(50)}$ شاخص با نقطه‌ای است. رابطه (۱-۵) زمانی که $10 < I_{S(50)} K_{IC}$ باشد، بیشتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند و زمانی که $10 > I_{S(50)}$ باشد کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند.

همچنین انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ برای به دست آوردن K_{IC} فرمولی تجربی ارایه داده است که به صورت زیر می‌باشد (Iqbal & Mohanty, 2007).

$$K_{IC}^e = 0.23(E)^{0.65} \quad (3-5)$$

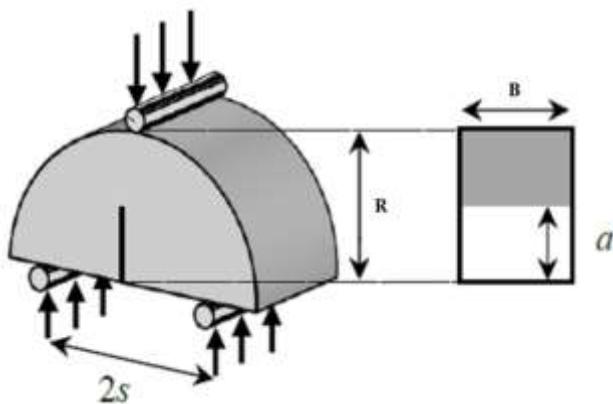
$$K_{IC}^e = 0.13(E)^{0.65} \quad (4-5)$$

در این رابطه E مدول الاستیسیته و K_{IC}^e مقدار تخمینی چقرمگی شکست می‌باشد. مقدار چقرمگی شکست بین دو بازه یعنی مقادیر به دست آمده از روابط (۳-۵) و (۴-۵) تغییر می‌کند.

۴-۲-۵- مطالعات آزمایشگاهی انجام شده برای تعیین چقرمگی شکست حالت I

تست‌های چقرمگی شکست با سایر تست‌های استحکام موجود در مکانیک سنگ تفاوت عمده‌ای دارد. زیرا نمونه‌ها باید دارای شکافی تعریف شده با مشخصات معین باشد تا بتوان اثرات شکاف را در حوزه مکانیک شکست بررسی کرد. در این مطالعه از روش بارگذاری خمش سه نقطه‌ای بر نمونه نیم دیسکی با شکاف مستقیم که به اختصار SNSCB¹ خوانده می‌شود، برای تعیین چقرمگی شکست حالت I استفاده شده است که شکل (۳-۵) مشخصات هندسی و بارگذاری نمونه را بطور شماتیک نشان می‌دهد.

¹ Straight-Notched Semi Circular Specimen under three-point Bend



شکل (۳-۵): مشخصات هندسی و روش بارگذاری خمش سه نقطه‌ای بر نمونه نیم دیسکی با ترک مستقیم .(Minami et al, 2015)

مقدار چقرمگی در این روش از رابطه (۵-۵) به دست می‌آید.

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{2RB} Y_k \quad (5-5)$$

که در آن K_{IC} چقرمگی شکست بر حسب $P, MPa\sqrt{m}$ ، R حداکثر نیرو در زمان شکست نمونه بر حسب MN ، B ضخامت نمونه بر حسب متر، a شعاع دیسک بر حسب متر، R طول شکاف بر حسب متر و Y_K فاکتور بدون بعد تنש برای نمونه‌ها خواهد بود (Minami et al, 2015).

ضریب شدت تنش بدون بعد نیز به ازای $S/D = 0.4$ با یک چند جمله‌ای درجه سوم به صورت رابطه (۶-۵) تقریب زده می‌شود.

$$Y_K = 4.47 + 7.4 \left(\frac{a}{D}\right) - 106 \left(\frac{a}{D}\right)^2 + 433.3 \left(\frac{a}{D}\right)^3 \quad (6-5)$$

۳-۵-چگالی خشک و تخلخل

برای تعیین چگالی خشک و تخلخل نمونه سنگی از روش غوطه‌ورسازی نمونه در آب استفاده شد. طبق این روش حجم نمونه‌هایی که شکل هندسی منظم و یا غیر منظم دارند را می‌توان از اختلاف بین جرم نمونه اشباع با سطح خشک شده و جرم نمونه اشباع در حالت غوطه ور در آب

محاسبه نمود که به آن قانون ارشمیدس نیز گویند (فهیمی‌فر، ۱۳۸۰). این روش برای سنگ‌های سست و کم دوام که در آب خرد شده و یا دچار تورم می‌شوند، مناسب نیست. در نهایت چگالی خشک و تخلخل نمونه‌ها از روابط زیر محاسبه شد (فهیمی‌فر، ۱۳۸۰).

$$V = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w} \quad (7-5)$$

V : حجم کل نمونه بر حسب سانتی‌متر مکعب

M_{sat} : جرم اشباع با سطح خشک شده بر حسب گرم

M_{sub} : جرم اشباع غوطه‌ور نمونه بر حسب گرم

ρ_w : چگالی آب

$$V_V = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w} \quad (8-5)$$

V_V : حجم منافذ بر حسب سانتی‌متر مکعب

M_s : جرم خشک نمونه بر حسب گرم

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (9-5)$$

ρ_d : چگالی خشک بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب

$$n = \frac{V_V}{V} * 100 \quad (10-5)$$

n : تخلخل نمونه بر حسب درصد و

۴-۵- سختی اشمیت مواد سنگی

برای تعیین مقاومت فشاری سطوح درزه از وسیله مخصوصی به نام چکش اشمیت^۱ استفاده می‌شود که توسط انجمن بین‌المللی (ISRM) به صورت استاندارد در آمده است. مکانیسم عمل چکش اشمیت استوار بر ضربه زدن یک میله فلزی (سندان) بر روی سطوح درزه و بازگشت آن و قرائت عدد مربوط از روی شاخص چکش می‌باشد.

برای هر نمونه سنگ، حداقل ۲۰ آزمایش انجام می‌گیرد سپس نیمی از داده که دارای کمترین مقدار هستند حذف می‌شوند و بقیه با توجه به جهت به کارگیری چکش مطابق جدول (۱-۵) تصحیح می‌شوند. لازم به ذکر است مقادیر تصحیح موجود در جدول به سختی اضافه شده و یا از آن کسر می‌شود.

جدول (۱-۵): تصحیح سختی اشمیت برای واجههای غیر افقی (فریدونی ۱۳۸۷)

مقدار تصحیح برای زاویه انحراف				مقدار واجهه (R)
به سمت پایین		به سمت بالا		
-۹۰	-۴۵	+۴۵	+۹۰	
+۳/۲	+۲/۴	-	-	۱۰
+۳/۴	+۲/۵	-۳/۵	-۵/۴	۲۰
+۳/۱	+۲/۳	-۳/۱	-۴/۷	۳۰
+۲/۷	+۲/۰	-۲/۶	-۳/۹	۴۰
+۲/۲	+۱/۶	-۲/۱	-۳/۱	۵۰
+۱/۷	+۱/۳	-۱/۶	-۲/۳	۶۰

^۱ schmidth hammer

کاربرد مهم چکش اشمیت محاسبه مقاومت فشاری سطوح درزهای می‌باشد که از طریق نمودارها و روابط تجربی قابل محاسبه است. نمودار و بعضی از روابط مهم موجود در این مورد در بخش پیوست آورده شده است.

۵-۵- مقاومت فشاری تک محوری

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مرسوم‌ترین آزمون آزمایشگاهی برای مطالعات مکانیکی سنگ بکر می‌باشد که با وجود ظاهری ساده، انجام دقیق آن بسیار مشکل است این آزمایش به عنوان آزمایش پایه در اکثر پروژه‌های معدنی انجام گرفته و بندرت اتفاق می‌افتد که در پروژه‌های مقاومت فشاری تک محوری نیاز نباشد. مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر، حد بالای مقاومت توده‌سنگ است. عوامل مؤثر بر مقاومت فشاری تک محوری را می‌توان به دو دسته عوامل داخلی و عوامل خارجی طبقه‌بندی نمود. عوامل داخلی وابسته به خصوصیات ذاتی سنگ بوده، در حالی که عوامل خارجی بستگی به روش آزمایش، دستگاه آزمایش، شرایط محیطی و مهارت شخص آزمایش کننده دارد (فریدونی، ۱۳۸۷).

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها معمولاً طبق استاندارد *ASTM-D-2938* و *ISRM* صورت می‌گیرد، به همین دلیل جزئیات این استانداردها در جدول (۸-۵) ارایه شده است.

جدول (۲-۵): جریات استاندارد **ASTM-D-2938** و **ISRM** برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری
(فریدونی، ۱۳۸۷)

ASTM-D-2938	ISRM	استاندارد
استوانهای	استوانهای	شکل نمونه
۴۷ میلیمتر	۵۴ میلیمتر	حداقل قطر نمونه (D)
۲ - ۲/۵	۲/۵ - ۳	نسبت ارتفاع به قطر نمونه (L/D)
۲۵ درجه	. / .۰۰۱ RAD	انحراف از قائم سطوح انتهایی نسبت به محور بارگذاری
۰/۰۲۵ میلیمتر	۰/۰۲ میلیمتر	حداکثر ناصافی انتهایی نمونه
۰/۵ میلیمتر	۰/۳ میلیمتر	حداکثر ناهمواری سطوح جانبی
-	۱ میلیمتر	دقیق اندمازه‌گیری ارتفاع (H)
-	۱/۰ میلیمتر	دقیق اندمازه‌گیری قطر
$D \leq D_p \leq 2D$	$D \leq D_p \leq D + 2$	قطر صفحات بارگذاری (D_p)
-	$D/3$ یا ۱۵ میلیمتر	حداکثر ضحامت صفحات بارگذاری
۵۸	۵۸	سختی صفحات بارگذاری
	۰/۰۰۵ میلیمتر	حداکثر زبری صفحات بارگذاری
-	۰/۵ - ۱ Mpa/s	نرخ بارگذاری
۱۵ - ۵ دقیقه	۱۰ - ۵ دقیقه	زمان شکستن نمونه
۱۰	۵	حداقل تعداد نمونه

مقاومت فشاری تک محوری (σ_c) از تقسیم حداکثر بار وارد بر نمونه (F) در طول آزمایش به سطح مقطع اولیه آن (A) محاسبه می‌شود (فریدونی، ۱۳۸۷).

$$\sigma_c = F/A \quad (17-5)$$

۶-۵- سرعت امواج فشاری و مدول الاستیسیته

۱-۶- سرعت امواج فشاری

سرعت امواج فشاری و برشی با توجه به زمان گذر موج از فرستنده به گیرنده در طول نمونه محاسبه می‌شود و معمولاً سرعت امواج برشی (V_s) دو سوم سرعت امواج فشاری می‌باشد. سرعت امواج الاستیک با افزایش تنش فشاری محوری افزایش می‌یابد. سرعت امواج صوتی در سنگ مناسب با سرعت صوت در کانی‌های تشکیل دهنده آن می‌باشد، البته در صورتی که تأثیر عواملی مثل اندازه یا جهت‌گیری دانه‌ها در نظر گرفته نشود. سرعت امواج الاستیک در سنگ به اندازه دانه‌ها نیز بستگی دارد و با ریزدانه شدن بافت سنگ افزایش می‌یابد. عمدتاً افزایش چگالی باعث افزایش سرعت می‌شود و رابطه بین این دو پارامتر ممکن است خطی و غیر خطی باشد (فهیمی‌فر، ۱۳۸۰).

$$v = \frac{x}{t} \quad (18-5)$$

در این رابطه v سرعت امواج فشاری بر حسب متر بر ثانیه، x طول نمونه بر حسب متر و t زمان بر حسب ثانیه می‌باشد.

۲-۶- مدول الاستیسیته یا مدول یانگ

مدول الاستیسیته نمونه سنگ نیز با در دست داشتن چگالی نمونه و سرعت امواج فشاری با استفاده از رابطه (۱۹-۵) به دست می‌آید (*Hamdi et al, 2001*):

$$E = c^2 \rho \quad (19-5)$$

در این رابطه E مدول الاستیسیته یا مدول یانگ، c سرعت امواج فشاری و ρ چگالی است.

۷-۵- جمع‌بندی

تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ امر مهمی برای برنامه‌ریزی عملیات حفاری، تعیین انرژی خردایش سنگ و ... می‌باشد. خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ شامل چگالی، تخلخل، سرعت مقاومت فشاری و ... هستند. این خصوصیات توسط مطالعات آزمایشگاهی تعیین می‌شوند. در این فصل روش محاسبه هر یک از این خواص و استانداردهای لازم برای محاسبه آن‌ها بیان شده است.

فصل ششم

تعیین ارزشی خردایش در عملیات آتشکاری معدن مس

سونگون ورزقان

در اثر عوامل مختلف نظیر فعالیت‌های تکتونیکی شکستگی‌هایی در توده‌سنگ ایجاد می‌شود. این ناپیوستگی‌ها باعث ایجاد بلوک‌ها با ابعاد و هندسه متفاوت در توده‌سنگ می‌شوند. در اثر انفجار بلوک‌های توده‌سنگ شکسته شده و از حالت برجا به کپه انفجاری منتقل می‌شوند. همانطور که بحث شد تفاضل سطح بلوک‌های برجا و سطح بلوک‌های خرد شده رابطه مستقیمی با انرژی خردایش دارند. با تعیین اختلاف سطح دو حالت و محاسبه مقدار انرژی ویژه سطح می‌توان انرژی صرف شده برای خردایش سنگ را به دست آورد. بنابراین در این فصل، ابتدا توده‌سنگ منطقه مورد مطالعه در معدن مس سونگون با استفاده از مدل شبکه شکستگی مجزا شبیه‌سازی می‌شود تا حجم بلوک‌های برجای توده‌سنگ محاسبه شده و نمودار توزیع ابعادی آن رسم شود. برای محاسبه تفاضل سطح بلوک‌های توده‌سنگ برجا و بلوک‌های خرد شده، کپه انفجاری با استفاده از نرم‌افزار آنالیز تصویر Goldsize تحلیل می‌شود و نمودار توزیع ابعادی آن رسم می‌شود. تفاضل دو سطح با استفاده از رابطه ذکر شده در فصل ۲ محاسبه می‌شود. در گام بعدی خواص فیزیکی و مکانیکی ماده‌سنگ منطقه مورد مطالعه برای تعیین انرژی ویژه سطح با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی تعیین می‌گردد.

۶-۲-۶- تعیین منحنی توزیع ابعادی بلوک‌های برجای توده‌سنگ دیواره معدن مس سونگون

۶-۲-۶-۱- توصیف هندسی توده‌سنگ معدن مس سونگون

در این مطالعه، همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد با استفاده از اطلاعات حاصل از برداشت‌های زمین‌شناسی پله‌های معدن مس سونگون ورزقان برای تعیین توزیع حجم بلوک‌های برجای توده‌سنگ در فضای سه بعدی با استفاده از آخرین نسخه نرم‌افزار 3DEC که قابلیت تولید شبکه شکستگی مجزا را در فضای سه بعدی دارد، مدل شبکه شکستگی مجزای پله‌ها تولید می‌شود.

۶-۲-۲- معرفی معدن مس سونگون ورزقان

معدن مس سونگون در استان آذربایجان شرقی، شهرستان ورزقان با طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۴۲ دقیقه و ۲۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۴۱ دقیقه و ۳۰ ثانیه شمالی واقع شده است. دسترسی به محل معدن، از طریق جاده تبریز- ورزقان و جاده‌ای آسفالتی به مسافت حدود ۲۲ کیلومتر در شمال ورزقان میسر می‌باشد (فخامتی و همکاران، ۱۳۹۲).

هامیلتون در سال ۱۹۷۸ ضمن بررسی‌های خود، سونگون *I* و سونگون *II* را معرفی کرده است. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی، واحدهای سنگ‌شناسی معدن مس سونگون شامل سنگ‌های کربناته (*scarn*)، توده مونزونیت پرفیری سونگون (*sp*)، واحدهای آذر آواری (پیروکلاست‌ها *pc*) و گدازهای (تراکیت بازالت‌ها *TB*) و دو تیپ دایک، *DK1a* و *DK1b* می‌باشد. به طور کلی در محدوده دیواره نهایی معدن مس سونگون سه سیستم گسل دیده می‌شود که با توجه به مشخصه امتداد از یگدیگر قابل تفکیک هستند و بر همین اساس، منطقه به سه زون ساختاری (*I*, *II*, *III*) تقسیم شده است (فخامتی و همکاران ۱۳۹۲).

حداقل و حداقلتر تراز ماده معدنی به ترتیب ۱۶۵۰ و ۲۳۰۰ متر بوده و شیب توپوگرافی در این منطقه حدود ۳۰ تا ۴۰ درجه می‌باشد. این کانسار دارای ۶۶۵ میلیون تن ذخیره قطعی هایپوزن و ۱۰۸ میلیون تن ذخیره قطعی سوپرژن است. عیار حد ۰/۲۵ درصد در نظر گرفته شده است. ارتفاع پله‌ها در حدود ۱۲/۵ متر، شیب آن‌ها در حدود ۷۰ درجه و عرض جاده‌ها ۳۰ متر انتخاب شده است. عرض مفید جاده‌ها پس از کسر عرض کanal و خاکریز معادل ۲۵ متر و شیب جاده‌ها نیز ۸ درصد محاسبه شده است و شیب عمومی معدن حدوداً ۳۷ درجه می‌باشد (افرایی و همکاران، ۱۳۹۱).

در این معدن از آنفو برای چال‌های انفجری خشک و از امولایت برای چال‌های آبدار به عنوان ماده منفجره اصلی استفاده می‌شود. برای شروع انفجر معمولاً از فتیله انفجری استفاده می‌شود. شکل (۱-۶) نمایی از معدن مس سونگون را نشان می‌دهد.



شکل (۶-۱): نمایی از معدن مس سونگون

۶-۲-۳- برداشت ناپیوستگی‌های دیواره معدن مس سونگون

در این مطالعه برای تعیین حجم بلوک‌های برجای توده‌سنگ، دیواره پله‌های معدن مس سونگون در بررسی قرار گرفت. پله‌هایی از معدن که دارای ریزش کم‌تر خرده‌سنگ، ایمنی بیش‌تر، دارای سطحی مناسب برای برداشت ناپیوستگی‌ها و همچنین پله‌هایی که در برنامه استخراج معدن بودند، برای برداشت ناپیوستگی‌ها انتخاب و در دو زون دایک و مواد معنی ناپیوستگی‌ها برداشت شدند.

شکل (۶-۲) محل جدایش دو زون دایک و مواد معنی در پله معدن را نشان می‌دهد که بخش سمت راست شکل نشان‌گر دیواره دایک و بخش سمت چپ نشان‌گر دیوار مواد معنی می‌باشد.



شکل (۲-۶): محل جدایش دو زون دایک و مواد معدنی در پله معدن مس سونگون

با استفاده از تکنیک خط برداشت ناپیوستگی‌های منطقه مورد مطالعه برداشت شد. در زون دایک ۲۱۴ درزه برداشت شد. برای برداشت درزه‌ها در این زون از ۴ خط برداشت با طول‌های حدوداً ۱۶، ۲۵ و ۲۰ متر استفاده شد. در زون مواد معدنی ۲۳۰ درزه برداشت شد. برای برداشت در زون مواد معدنی از دو خط برداشت با طول‌های ۳۷ و ۲۱ متر استفاده شد. اطلاعات برداشت شده به ترتیب شبی، جهت شبی، فاصله محل تقاطع خط برداشت و ناپیوستگی‌ها از ابتدای خط برداشت، فاصله دو درزه نسبت به هم در راستای طول خط برداشت و طول ناپیوستگی‌ها در بالای خط برداشت می‌باشد.

جدول (۱-۶) نمونه‌ای از اطلاعات برداشت شده برای زون دایک را نشان می‌دهد.

جدول (۱-۶): نمونه‌ای از اطلاعات برداشت شده برای زون دایک

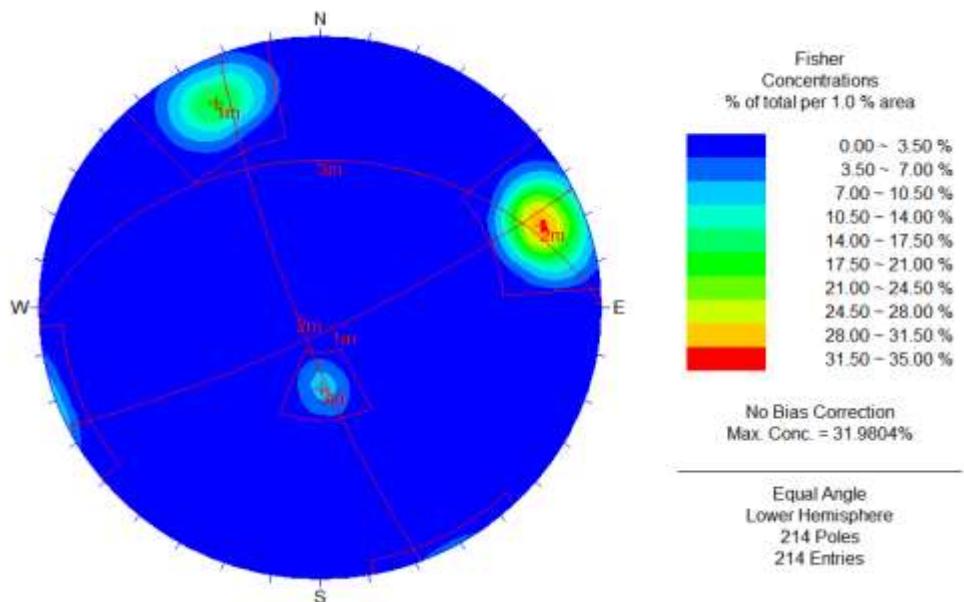
ردیف	شیب	جهت شیب	فاصله محل تقاطع خط برداشت و ناپیوستگی‌ها از ابتدای خط برداشت(متر)	فاصله دو درزه نسبت به هم در راستای طول خط برداشت(متر)	طول ناپیوستگی‌ها در بالای خط برداشت(متر)
۱	۸۰	۲۴۰	۰/۴۹	-	۱۰/۷
۲	۷۵	۱۵۵	۱	۰/۵۱	۱۰/۹
۳	۸۲	۲۴۸	۱/۲۸	۰/۲۸	۱
۴	۶۵	۲۴۲	۱/۵۹	۰/۳۱	۱۱/۶
۵	۷۸	۲۴۰	۲	۰/۴۱	۲/۲۵
۶	۷۵	۱۵۲	۲/۴	۰/۴	۱۰/۹
۷	۳۳	۳۵۲	۲/۸۴	۰/۴۴	۱۹/۳
۸	۸۵	۱۵۰	۳/۳۹	۰/۵۵	۲/۵
۹	۸۴	۲۴۷	۳/۷۹	۰/۴	۱۰/۶
۱۰	۸۴	۲۴۷	۴/۰۵	۰/۲۶	۱۰/۶
۱۱	۸۲	۱۶۳	۴/۵۲	۰/۴۷	۱۰/۶
۱۲	۳۹	۱۱	۴/۶۵	۰/۱۳	۰/۵
۱۳	۸۳	۲۵۵	۵/۱۳	۰/۴۸	۱۰/۶
۱۴	۸۹	۱۵۰	۵/۵۴	۰/۴۱	۱۰/۵
۱۵	۷۵	۳۵۲	۶	۰/۴۶	۱

۶-۲-۴- تحلیل ناپیوستگی‌های برداشت شده از دیواره معدن مس سونگون با استفاده از

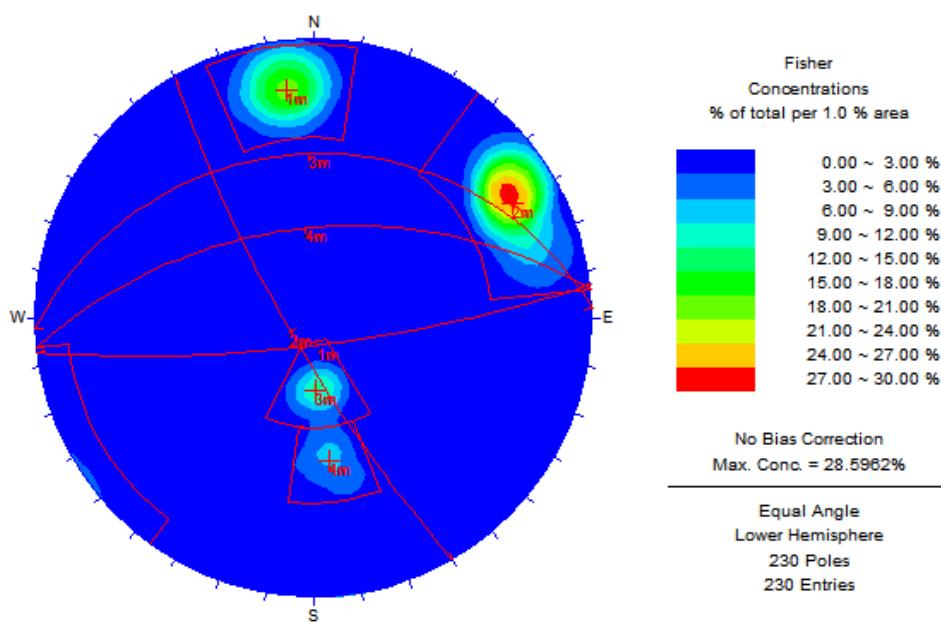
نرم‌افزار DIPS

برداشت‌های صحرایی ناپیوستگی‌ها از رخنمون‌های سنگی موجود به عنوان اولین قدم در ارزیابی مقدار انرژی صرف شده برای خردایش سنگ است لذا در تحقیق حاضر با بررسی‌های صحرایی پارامترهای مربوط به ناپیوستگی‌ها، برداشت شده و سپس با استفاده از اطلاعات صحرایی برداشت شده و روش‌های آماری (نرم‌افزار Dips) سیستم‌های ناپیوستگی غالب در محل تعیین شد که سه دسته درزه در زون دایک و چهار دسته درزه در زون مواد معدنی شناسایی شد. شکل (۳-۶) و (۴-۶) نمایش

استریوگراف شکستگی‌های توده‌سنگ در معدن مس سونگون را به ترتیب برای سیستم درزه‌های زون دایک و مواد معدنی پس از تحلیل در نرم‌افزار Dips نشان می‌دهد.



شکل (۳-۶): نمایش استریو گراف شکستگی‌های دایک در پله‌های معدن مس سونگون



شکل (۴-۶): نمایش استریو گراف شکستگی‌های مواد معدنی در پله‌های معدن مس سونگون

مشخصات درزه‌های برداشت شده پس از تحلیل در نرم‌افزار *Dips* نظیر میانگین شیب، جهت شیب و ثابت فیشر و تعداد درزه‌های هر دسته درزه در جدول (۲-۶) و (۳-۶) برای هر دو زون دایک و مواد معدنی آورده شده است.

جدول (۲-۶): خصوصیات مربوط به جهت‌داری و تعداد درزه‌های دسته‌درزه‌ها در دیواره دایک معدن مس

سونگون

تعداد درزه	ثابت فیشر	جهت شیب	شیب	
۱۰۱	۱۴۰/۴۱	۲۴۹/۱۶	۸۰/۱۷	دسته درزه ۱
۶۲	۱۱۴/۵۷	۱۵۳/۸۲	۷۹/۵۲	دسته درزه ۲
۳۲	۱۰۹/۶۲	۳۵۹/۰۹	۳۳	دسته درزه ۳

جدول (۳-۶): خصوصیات مربوط به جهت‌داری و تعداد درزه‌های دسته‌درزه‌ها در دیواره مواد معدنی معدن

مس سونگون

تعداد درزه	ثابت فیشر	جهت شیب	شیب	
۹۶	۱۰۶/۴	۲۴۰/۳۰	۷۹/۰۲	دسته درزه ۱
۶۱	۱۶۰/۳۰	۱۷۲/۸۰	۷۸/۷۴	دسته درزه ۲
۳۹	۱۷۹/۵۰	۳۵۷/۶۵	۲۸/۵۷	دسته درزه ۳
۲۹	۹۵/۱۵	۳۵۳/۷۸	۵۳/۹۲	دسته درزه ۴

شیب، جهت شیب و ثابت فیشر برای هر دسته درزه با استفاده از روابط تجربی نیز به دست آمد که نتایج آن در پیوست آورده شده است.

۶-۵-۲-۶- چگالی سه بعدی شکستگی‌های دیواره معدن مس سونگون

برای به دست آوردن چگالی شکستگی‌های توده‌سنگ با توجه به اطلاعات برداشت‌های زمین‌شناسی منطقه، تعداد فراوانی درزه‌ها محاسبه شد و سپس با استفاده از روابط موجود چگالی سه

بعدی شکستگی‌ها محاسبه شد (روابط محاسبه چگالی سه بعدی شکستگی‌ها در فصل ۳ آورده شده است) که نتایج این محاسبات در جدول (۴-۶) و (۵-۶) آمده است.

جدول (۴-۶): چگالی دسته درزه‌ها برای دیواره دایک

دسته درزه	فرآوانی شکستگی	چگالی سه بعدی شکستگی
۱	۱/۳۱	۲/۶۲
۲	۰/۸۱	۱/۶۲
۳	۰/۴۲	۰/۸۴

جدول (۵-۶): چگالی دسته درزه‌ها برای دیواره مواد معدنی

دسته درزه	فرآوانی شکستگی	چگالی سه بعدی شکستگی
۱	۱/۶۵	۳/۳۰
۲	۱/۰۵	۲/۱۰
۳	۰/۶۷	۱/۳۴
۴	۰/۵	۱

۶-۲-۶- ورودی‌های مدل شبکه شکستگی مجزا

ورودی‌های مدل شبکه شکستگی مجزا شامل جهت‌داری (شیب و جهت شیب)، ثابت فیشر، توزیع اندازه شکستگی، چگالی سه بعدی شکستگی، محل شکستگی‌ها و ابعاد محدوده مدل‌سازی می‌باشد. ابعاد محدوده مدل‌سازی برای زون دایک‌ها $14*14*70$ و برای زون مواد معدنی $14*14*58$ می‌باشد. در واقع محدوده‌ای که در آن آتشباری صورت گرفت، به عنوان ابعاد محدوده مدل در نظر گرفته شده است. جهت‌داری و ثابت فیشر مربوط به هر دسته درزه در جدول (۲-۶) و (۳-۶) آورده شده است. چگالی سه بعدی مربوط به هر دسته درزه نیز در جدول (۴-۶) و (۵-۶) آورده شده است. همچنین توزیع اندازه شکستگی از تابع احتمالی که بیان گر توزیع قطر دیسک‌ها باشد،

تعیین می‌شود. توابع توزیعی که در برنامه $3DEC$ موجود هستند شامل تابع توزیع یکنواخت^۱، گوس^۲، قاعده توان^۳ و بوتس استرپید^۴ می‌باشد. همان‌طور که در بخش‌های مربوطه به بخش توابع توزیع حاکم بر اندازه شکستگی بیان شد تابع توزیع قاعده توان جزئیات بیشتری نسبت به توابع دیگر ارایه می‌دهد. برطبق مطالعات سیگال و پولادر، گودمونسون، ماین و ... اندازه شکستگی از تابع قاعده توان پیروی می‌کند. در این مطالعه نیز از تابع قاعده توان به عنوان تابع توزیع حاکم بر اندازه شکستگی‌ها استفاده شده است. محل شکستگی‌ها در نرم‌افزار $3DEC$ از تابع توزیع پواسون پیروی می‌کند و در این مطالعه نیز از تابع توزیع پواسون برای تعیین محل شکستگی‌ها استفاده شده است.

۶-۲-۷- تولید شبکه شکستگی مجزا با استفاده از کد $3DEC$ برای دیواره معدن مس

سونگون

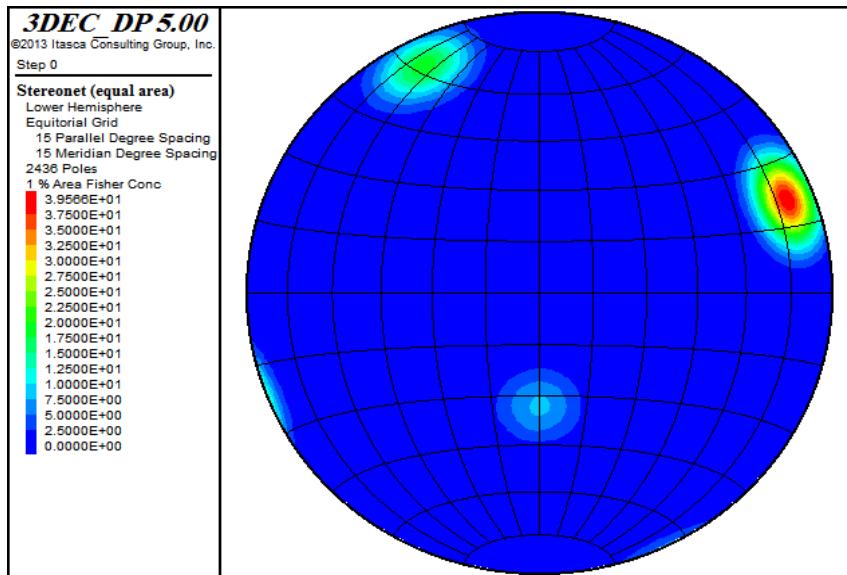
تولید شبکه شکستگی مجزا در این پایان نامه در محیط کد $3DEC$ و با استفاده از توابع توزیع در نظر گرفته شده برای پارامترهای هندسی صورت گرفته است. شبکه شکستگی مجزا با استفاده از پارامترهای هندسی درزهای هندسی و با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی مونت کارلو ایجاد می‌شود. با استفاده از داده‌ها و پارامترهای هندسی مربوطه مدل شبکه شکستگی مجزا ایجاد شد. شکل (۵-۶) و (۶-۶) تصویر استریوگراف حاصل از برنامه $3DEC$ را به ترتیب برای زون دایک و مواد معدنی نشان می‌دهد.

¹ Uniform

² Gauss

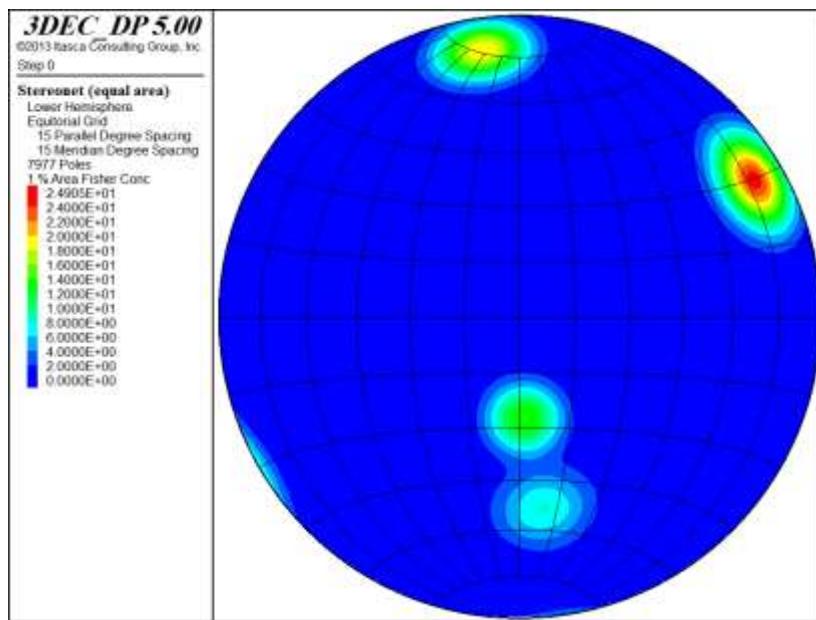
³ Powerlaw

⁴ Bootstrapped



شکل (۶-۵): تصویر استریوگراف شکستگی‌های دایک در پله‌های معدن مس سونگون حاصل از برنامه

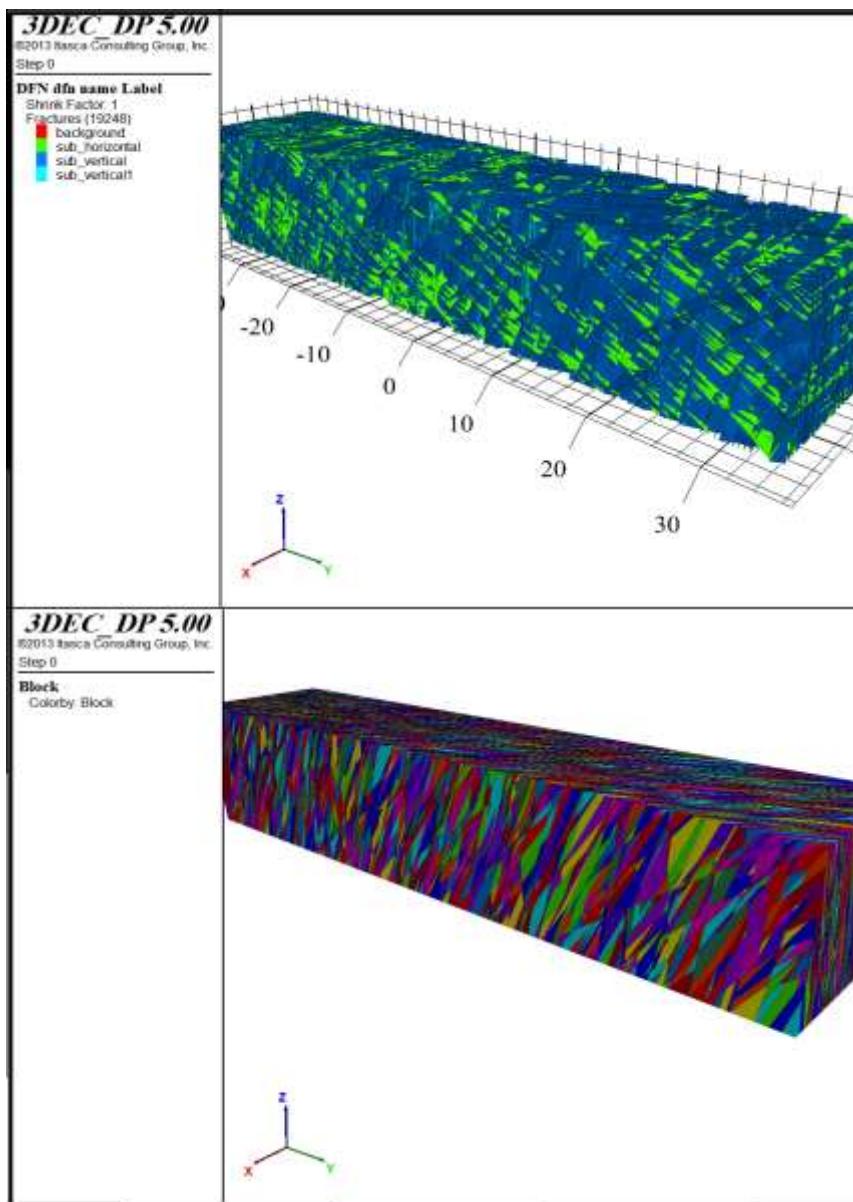
3DEC



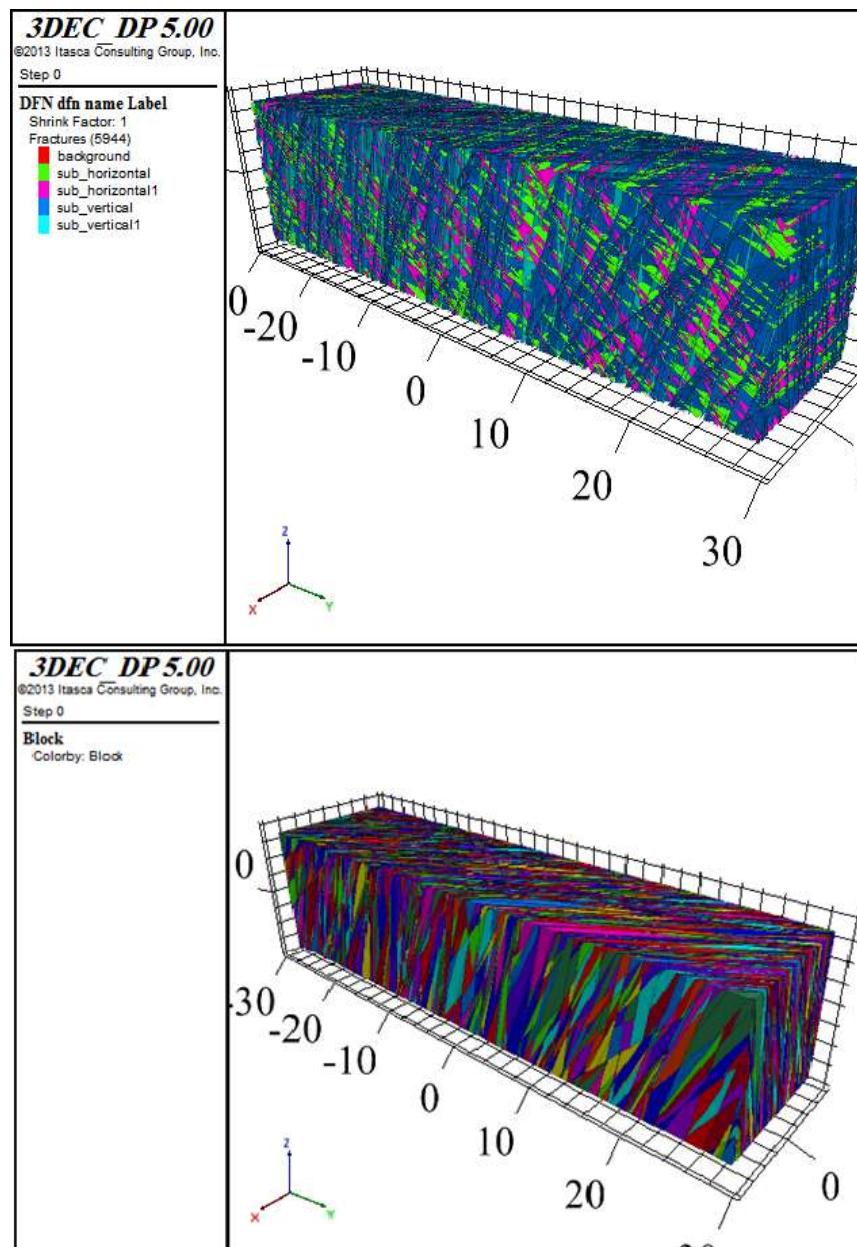
شکل (۶-۶): تصویر استریوگراف شکستگی‌های مواد معدنی در پله‌های معدن مس سونگون حاصل از نرم

3DEC افزار

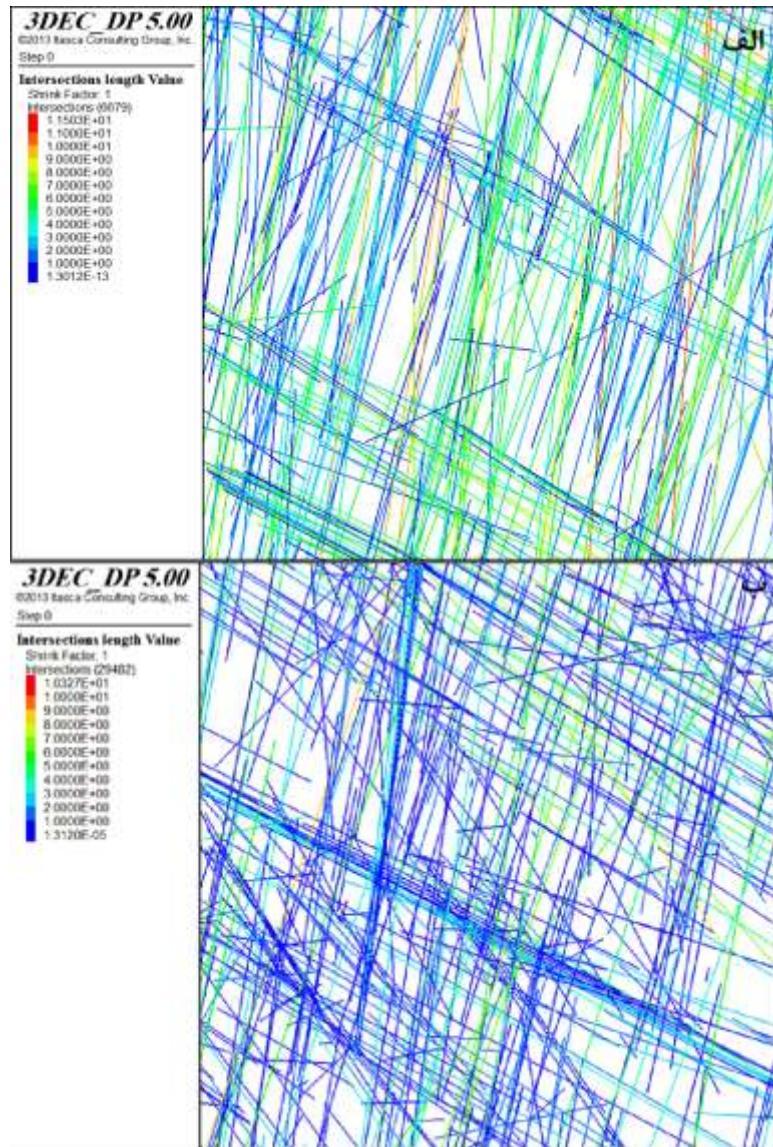
نایپیوستگی‌های موجود باعث ایجاد بلوک‌هایی در توده‌سنگ می‌شود اندازه بلوک‌های برجا مهم‌ترین پارامتر توده‌سنگ برای پیش‌بینی خردایش می‌باشد و با آتشباری انداره بلوک‌های برجا به حالت اندازه بلوک‌های نابر جا (آتشباری شده) منتقل می‌شوند. انرژی انتقال به وسیله ماده منفجره فراهم می‌شود. بنابراین استفاده از اندازه بلوک برجا به عنوان پارامتر سنگ بسیار مهم در مدل‌سازی خردایش می‌باشد. شکل (۷-۶) و (۸-۶) نمونه‌ای از شکل هندسی شکستگی‌های توده‌سنگ در شبیه‌سازی عددی برای زون دایک و مواد معدنی را نشان می‌دهد که بخش بالای شکل صفحات شکستگی ایجاد شده به وسیله درزه‌ها و قسمت پایینی شکل، بلوک‌های ایجاد شده به وسیله درزه‌ها را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۹-۶) به طور نمونه دو مقطع عرضی دو بعدی از توده‌سنگ درزه‌دار شبیه‌سازی شده منطقه مورد مطالعه برای دو زون دایک و مواد معدنی را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۶): مدل شبکه شکستگی مجازی تولید شده در 3DEC و حجم بلوک‌های توده‌سنگ در زون دایک



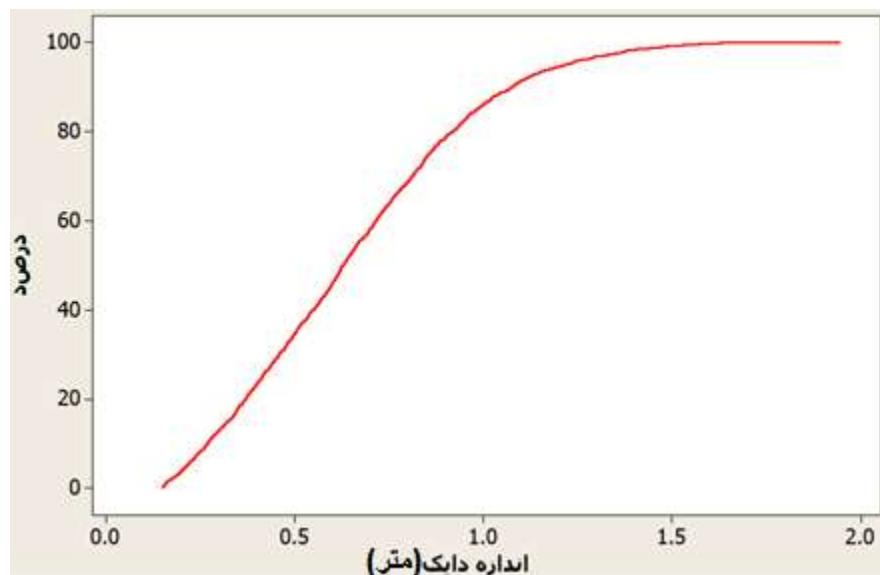
شکل (۸-۶): مدل شبکه شکستگی مجازی تولید شده در 3DEC و حجم بلوک‌های توده‌سنگ در زون مواد معدنی



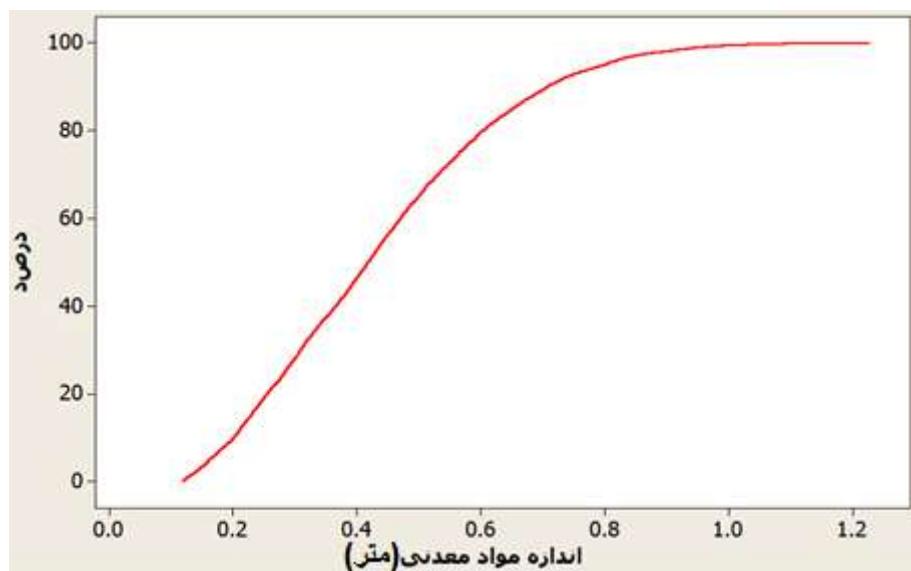
شکل (۶-۹): طول تقاطع شکستگی (الف) زون دایک (ب) زون مواد معدنی

اندازه بلوک‌های برجا با استفاده از نرم‌افزار *3DEC* و مدل شبکه شکستگی مجزا تعیین شد. حجم بلوک‌های به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار *Minitab* و *Easy Fit* تحلیل شد. بعد از ایجاد مدل شبکه شکستگی مجزا، بلوک‌های حاصل از برخورد صفحات درزه و اندازه شکستگی آن استخراج شد و در نهایت نمودار توزیع ابعادی برجای توده‌سنگ برای زون دایک و مواد معدنی با استفاده از

نرم افزارهای مذکور رسم شد که شکل (۱۰-۶) و (۱۱-۶) نمودار توزیع ابعادی برجای توده سنگ برای زون دایک و مواد معدنی را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰-۶): نمودار توزیع ابعادی برای اندازه برجای توده سنگ (دایک)



شکل (۱۱-۶): نمودار توزیع ابعادی برای اندازه برجای توده سنگ (مواد معدنی)

بررسی‌ها نشان‌گر این بود که اندازه بلوک‌های برجا از تابع ویبول پیروی می‌کند. این تابع به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F_{WRR}(x, x_c, n) = 1 - \exp[-(x/x_c)^n] = 1 - 2^{-(x/x_{50})^n}, \quad 0 \leq x \leq \infty \quad (1-6)$$

در اینجا x_c اندازه مشخصه (اندازه در $1/e - 1$ یا $63/5$ درصد عبوری می‌باشد) و n اندیس شکل یا یکنواختی می‌باشد (*Sanchidrian et al, 2012*).

مقادیر اندازه مشخصه و اندیس شکل نیز برای نمودارهای فوق به دست آمد تا در محاسبات بعدی برای تعیین انرژی خردایش مورد استفاده قرار گیرد. این مقادیر به ترتیب $0/75$ و $2/28$ برای زون دایک و $0/5$ و $2/40$ برای زون مواد معدنی می‌باشد که این مقادیر در جدول (۶-۶) آورده شده است.

جدول (۶-۶): اندیس شکل و اندازه مشخصه برای بلوک‌های برجا

اندازه مشخصه	اندیس شکل	
$0/75$	$2/28$	دایک
$0/5$	$2/40$	مواد معدنی

۳-۶- آنالیز تصویری تودهسنگ آتشباری شده معدن مس سونگون به وسیله نرم افزار Goldsize

پس از این‌که تودهسنگ مورد مطالعه آتشکاری شد، مرحله بعدی مشخص کردن کپه برای عکس برداری، مقیاس گذاری، تهیه عکس از کپه و تحلیل آن می‌باشد. مناطق مورد مطالعه شامل زون دایک و زون مواد معدنی هستند.

۶-۳-۱- نتایج نرم افزار Goldsize برای توده نفوذی دایک

برای تحلیل ابعاد خردشده بعد از انفجار از کپه عکس‌برداری شد که شکل (۶-۱۲) نمونه‌ای از عکس‌های تهیه شده از زون دایک برای تحلیل در نرم افزار *Goldsize* را نشان می‌دهد. نتایج آنالیز تصویری با نرم افزار *Goldsize* برای توده نفوذی دایک با ۵ عکس تهیه شده در جدول (۶-۷) آورده شده است. نتایج به دست آمده از ۵ عکس با هم ترکیب و نتایج حاصله به عنوان توزیع دانه‌بندی توده‌سنگ انفجاری در نظر گرفته شده است.



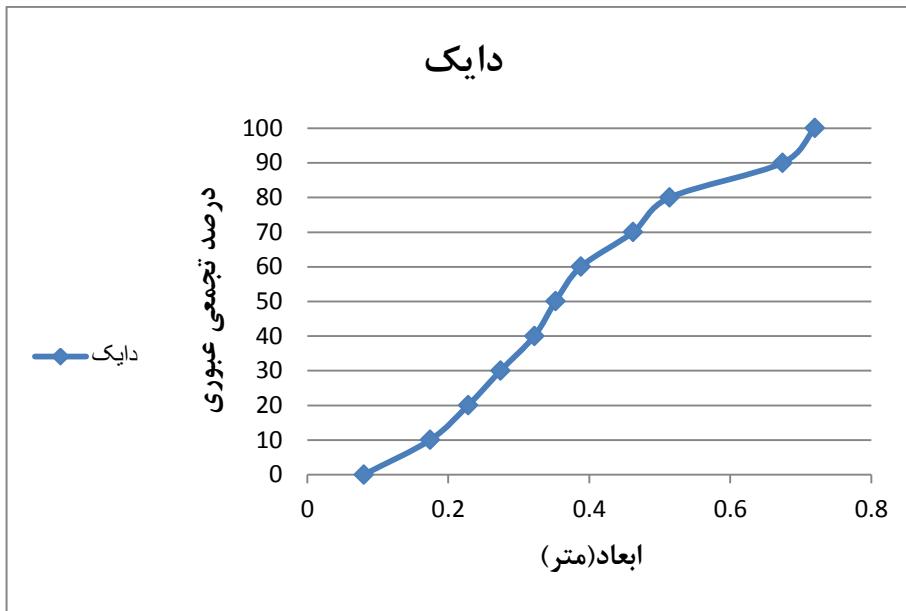
شکل (۱۲-۶): نمونه‌هایی از عکس‌های تهیه شده از زون دایک برای تحلیل در نرم‌افزار Goldsize

جدول (۷-۶): نتایج آنالیز تصویری برای دایک‌ها

میانگین	اندازه دانه (متر)					درصد عبوری
	عکس ۵	عکس ۴	عکس ۳	عکس ۲	عکس ۱	
۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۸	۰
۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	۱۰
۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۲۲	۲۰
۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۳	۰/۳۱	۰/۲۷	۳۰
۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۲۵	۰/۳۴	۰/۳۹	۰/۳۱	۴۰
۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۲۷	۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۳۶	۵۰
۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۲۹	۰/۴۲	۰/۴۵	۰/۴۲	۶۰
۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۳۱	۰/۴۵	۰/۵۹	۰/۴۸	۷۰
۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۳۶	۰/۵۴	۰/۶۳	۰/۵۳	۸۰
۰/۶۷	۰/۶۲	۰/۵۱	۰/۷۴	۰/۸۶	۰/۶۴	۹۰
۰/۷۲	۰/۶۸	۰/۶۳	۰/۷۹	۰/۸۶	۰/۶۴	۱۰۰

شکل (۶-۱۳) میانگین توزیع ابعادی خردایش حاصل از انفجار در زون دایک‌ها را نشان می‌دهد.

این نمودار از تحلیل عکس کپه (سنگ خرد شده حاصل از انفجار) به دست آمد. اندازه مشخصه (اندازه عبوری در ۵/۶۳ درصد) و انديس شکل يا يكناختي به دست آمده از اين نمودار به ترتيب ۴۱/۰ و ۶۲/۱ مي باشد.



شکل (۶-۱۳): میانگین توزیع ابعادی خردایش حاصل از انفجار در زون دایک‌ها

۲-۳-۶- نتایج نرم افزار Goldsize برای مواد معدنی

در زون ماده معدنی نیز برای تحلیل ابعاد خردشده بعد از انفجار از کپه عکس‌برداری شد که شکل (۶-۱۴) نمونه‌ای از عکس‌های تهیه شده از زون ماده معدنی برای تحلیل در نرم افزار Goldsize را نشان می‌دهد. نتایج آنالیز تصویری با نرم‌افزار Goldsize برای مواد معدنی با ۴ عکس تهیه شده در جدول (۶-۸) آورده شده است. نتایج به دست آمده از ۴ عکس با هم ترکیب و نتایج حاصله به عنوان توزیع دانه‌بندی توده‌سنگ انفجاری زون ماده معدنی در نظر گرفته شده است.

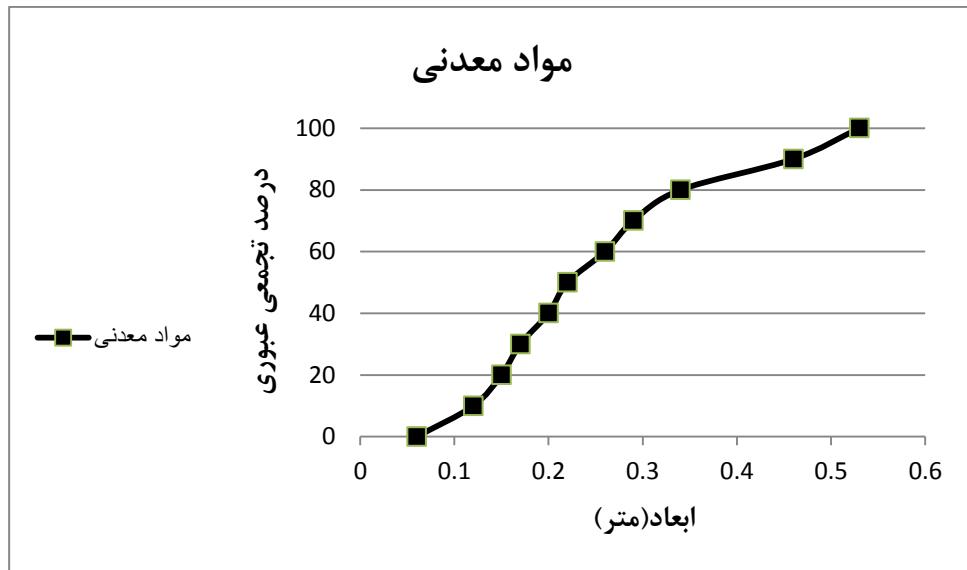


شکل (۱۴-۶): عکس‌های تهیه شده از زون مواد معدنی برای تحلیل در نرم‌افزار Goldsize

جدول (۶-۸): نتایج آنالیز تصویری برای مواد معدنی

میانگین	اندازه دانه (متر)				درصد عبوری
	عکس ۴	عکس ۳	عکس ۲	عکس ۱	
۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۸	.
۰/۱۲	۰/۱	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۵	۱۰
۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۱۸	۲۰
۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۲۱	۳۰
۰/۲	۰/۱۶	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۲۵	۴۰
۰/۲۲	۰/۱۷	۰/۲۷	۰/۱۸	۰/۲۷	۵۰
۰/۲۶	۰/۱۹	۰/۳۲	۰/۱۹	۰/۳۴	۶۰
۰/۲۹	۰/۲۱	۰/۳۴	۰/۲۲	۰/۳۹	۷۰
۰/۳۴	۰/۲۴	۰/۴۲	۰/۲۶	۰/۴۵	۸۰
۰/۴۶	۰/۲۹	۰/۵۷	۰/۳۲	۰/۶۶	۹۰
۰/۵۳	۰/۳۶	۰/۶۳	۰/۳۹	۰/۷۳	۱۰۰

شکل (۶-۱۵) میانگین توزیع ابعادی خردایش حاصل از انفجار در زون مواد معدنی را نشان می‌دهد. این نمودار از تحلیل عکس کپه (سنگ خرد شده حاصل از انفجار) به دست آمد. اندازه مشخصه (اندازه عبوری در $63/5$ درصد) و انديس شکل يا يكناختي به دست آمده از اين نمودار به ترتیب $۰/۲۷$ و $۱/۷۲$ می‌باشد. انديس شکل و اندازه مشخصه برای هر دو زون در جدول (۶-۹) آورده شده است.



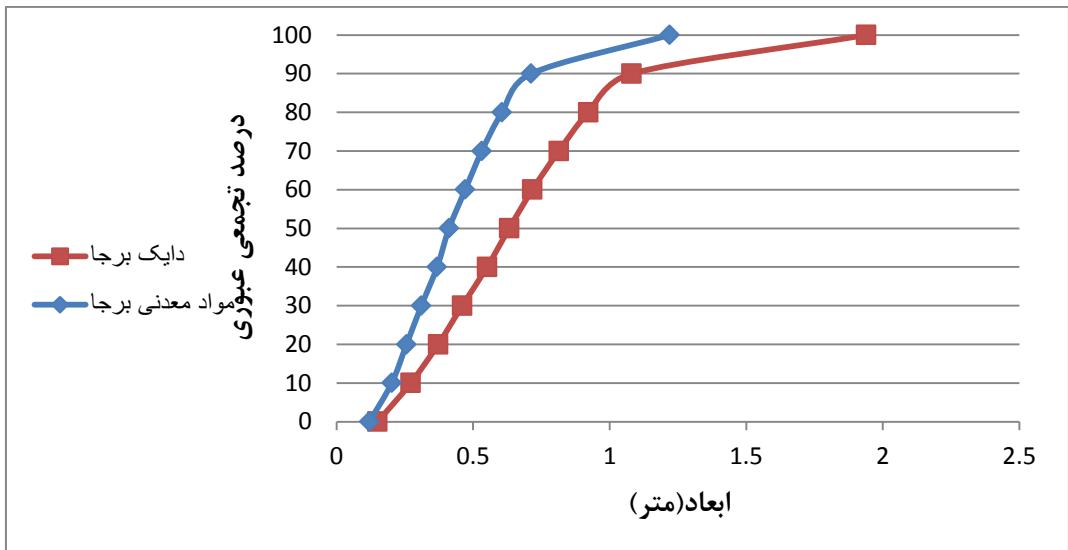
شکل (۶-۱۵): میانگین توزیع ابعادی ذرات برای مواد معدنی

جدول (۶-۹): اندیس شکل و اندازه مشخصه برای توده سنگ خرد شده

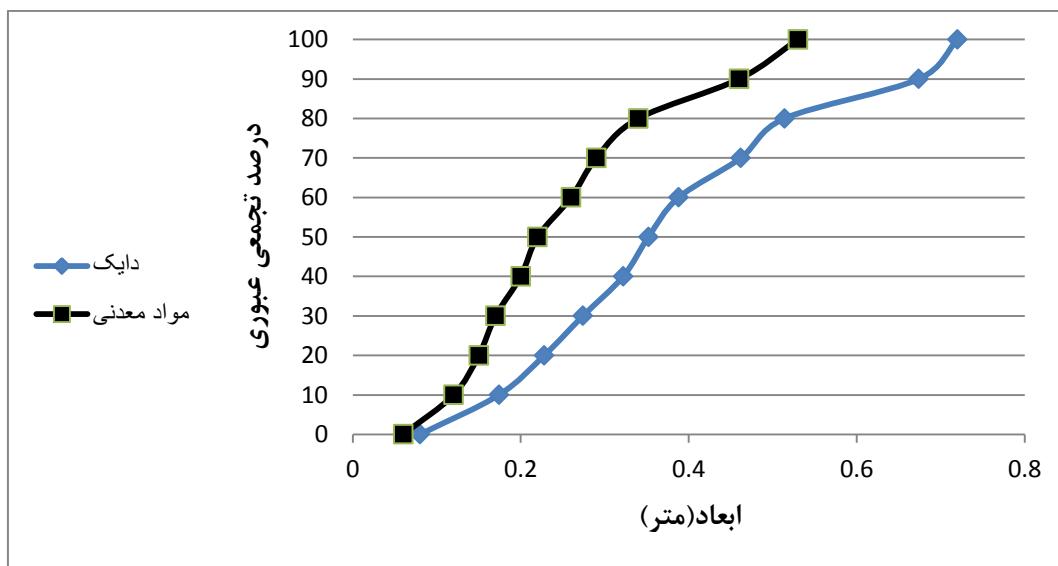
اندازه مشخصه	اندیس شکل	
۰/۴۱	۱/۶۲	دایک
۰/۲۷	۱/۷۲	مواد معدنی

۳-۳-۶ مقایسه منحنی دانه‌بندی برای دو زون دایک و مواد معدنی

بعد از رسم توزیع ابعادی ذرات برای دو زون دایک و مواد معدنی، منحنی توزیع ابعادی این زون‌ها در شکل (۶-۱۶) و شکل (۶-۱۷) برای دو حالت قبل از انفجار و بعد از انفجار با هم مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل حاکی از این است که ابعاد قطعات زون مواد معدنی ریز‌دانه‌تر از دایک‌ها می‌باشد.



شکل (۶-۱۶): مقایسه منحنی دانه‌بندی برای توده‌سنگ بر جا در زون‌های دایک و مواد معدنی



شکل (۶-۱۷): مقایسه منحنی دانه‌بندی برای توده‌سنگ پس از انفجار در زون‌های دایک و مواد معدنی

۶-۴-۶- تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ پله های معدن مس سونگون

۶-۴-۱- چگالی خشک و تخلخل

نمونه های معرف برای این آزمایش از نمونه سنگ معدن مس سونگون نظیر دایک و دو نوع ماده معدنی می باشد که ۱۰ قطعه سنگ از هر کدام با حداقل وزن ۵۰ گرم تهیه شد نمونه های سنگی تهیه شده در شکل (۶-۱۸) نشان داده شده است.



شکل (۶-۱۸): نمونه های تهیه شده برای تعیین چگالی خشک و تخلخل

بعد از آماده سازی، نمونه ابتدا در آب شسته شد تا گرد و غبار سطی آن برطرف شود سپس نمونه در داخل آب و در خلا اشباع شد. نمونه به سبد داخل وان آب که به ترازوی اشمیت آویزان است منتقل شده و جرم اشباع غوطه ور سبد و نمونه اندازه گیری شد. جرم اشباع غوطه ور نمونه (M_{sub}) از تفاضل جرم اشباع - غوطه ور سبد و نمونه از جرم غوطه ور سبد به دست می آید. نمونه را از داخل وان آب خارج نموده و سطح آن با دستمال مرطوب خشک شد به طوری که هیچ ذره ای از آن جدا نشود سپس آن را وزن نموده که از این طریق جرم اشباع با سطح خشک شده (M_{sat}) به دست آمد. سپس

نمونه را در اون^۱ گذاشته تا نمونه خشک شود و به وزن ثابت برسد. بعد از خشک شدن نمونه جرم نمونه خشک (M_s) اندازه‌گیری شد مراحل کار در شکل (۱۹-۶) نشان داده شده است.



شکل (۱۹-۶): (الف) اندازه‌گیری جرم اشباع غوطه و (ب) اندازه‌گیری جرم اشباع با سطح خشک شده (ج)
خشک کردن نمون در اون

^۱ oven

نتایج آزمایش‌ها برای سه نوع سنگ معدن مس سونگون در جدول (۱۰-۶)، (۱۱-۶) و (۱۲-۶) آورده شده است.

جدول (۱۰-۶): نتایج آزمایش تعیین چگالی و تخلخل با روش اشباع و غوطه‌وری برای نمونه سنگ دایک

نام نمونه	ردیف	غوطه‌ور (g)	اشباع	خشک شده (g)	اشباع خشک	وزن خشک (g)	حجم (cm ³)	حجم منافذ (cm ³)	چگالی خشک (g/cm ³)	تخلخل (%)
دایک	۱	۵۴/۷۱	۸۸/۱۶	۸۷/۱۶	۳۳/۴۵	۲/۶۱	۱	۳۳/۴۵	۲/۶۱	۲/۹۹
	۲	۵۴/۱۱	۸۶/۵۳	۸۵/۷	۳۲/۴۲	۲/۶۴	۰/۸۳	۳۲/۴۲	۲/۶۴	۲/۵۵
	۳	۶۲/۸۱	۱۰۰/۳۴	۹۹/۷۷	۳۷/۵۳	۲/۶۶	۰/۵۷	۳۷/۵۳	۲/۶۶	۱/۵۲
	۴	۵۹/۳۷	۹۵/۲	۹۴/۲۴	۳۵/۸۳	۲/۶۳	۰/۹۶	۳۵/۸۳	۲/۶۳	۲/۶۹
	۵	۴۳/۷	۶۹/۹۹	۶۹/۳۷	۲۶/۲۹	۲/۶۴	۰/۶۲	۲۶/۲۹	۲/۶۴	۲/۳۵
	۶	۳۷/۳۵	۵۹/۷۱	۵۹/۲۵	۲۲/۳۷	۲/۶۵	۰/۴۶	۲۲/۳۷	۲/۶۵	۲/۰۶
	۷	۵۷/۲۳	۹۱/۵۴	۹۱/۰۴	۳۴/۳۱	۲/۶۵	۰/۵	۳۴/۳۱	۲/۶۵	۱/۴۶
	۸	۶۱/۴۶	۹۸/۱۸	۹۷/۵۵	۳۶/۷۳	۲/۶۶	۰/۶۳	۳۶/۷۳	۲/۶۶	۱/۷۲
	۹	۳۷/۴۳	۶۰/۳۹	۵۹/۴۸	۲۲/۹۶	۲/۵۹	۰/۹۱	۲۲/۹۶	۲/۵۹	۳/۹۵
	۱۰	۵۸/۲	۹۱/۷۱	۹۰/۹۳	۳۳/۵۱	۲/۷۱	۰/۷۸	۳۳/۵۱	۲/۷۱	۲/۳۳
میانگین										۲/۳۶

جدول (۱۱-۶): نتایج آزمایش تعیین چگالی و تخلخل با روش اشباع و غوطه‌وری برای نمونه سنگ مواد

معدنی ۱

نام نمونه	ردیف	غوطه‌ور (g)	اشباع	خشک شده (g)	اشباع خشک	وزن خشک (g)	حجم (cm ³)	حجم منافذ (cm ³)	چگالی خشک (g/cm ³)	تخلخل (%)
مواد معدنی ۱	۱	۶۱/۴۵	۹۹/۱۸	۹۵/۰۸	۳۷/۷۴	۲/۵۲	۴/۱۱	۳۷/۷۴	۲/۵۲	۱۰/۸۸
	۲	۴۶/۵۲	۷۳/۷۹	۶۹/۶	۲۷/۲۸	۲/۵۵	۴/۱۹	۲۷/۲۸	۲/۵۵	۱۵/۳۸
	۳	۵۹/۱	۹۴/۶۴	۹۰/۳۵	۳۵/۵۴	۲/۵۴	۴/۲۹	۳۵/۵۴	۲/۵۴	۱۲/۰۸
	۴	۴۷/۰۳	۷۵/۵۱	۷۰/۹۸	۲۸/۴۸	۲/۴۹	۴/۵۲	۲۸/۴۸	۲/۴۹	۱۵/۸۷
	۵	۶۱/۴۷	۹۸/۳۶	۹۲/۶۱	۳۶/۸۹	۲/۵۱	۴/۷۵	۳۶/۸۹	۲/۵۱	۱۵/۵۸

۱۰/۱۷	۲/۳۱	۳/۶۳	۳۵/۶۶	۸۲/۳۵	۸۵/۹۸	۵۰/۳۲	۶	
۱۵/۸۸	۲/۵۲	۴/۲۱	۳۶/۵۲	۶۶/۸۳	۷۱/۰۴	۴۴/۵۲	۷	
۹/۵۶	۲/۶۴	۳/۴۴	۳۵/۹۴	۹۴/۷۹	۹۸/۲۳	۶۲/۲۹	۸	
۱۵/۸۶	۲/۵۳	۴/۲۱	۲۶/۵۶	۶۷/۳۱	۷۱/۵۳	۴۴/۹۷	۹	
۱۵/۶۵	۲/۶۵	۴/۸۴	۳۰/۹۱	۸۲/۰۵	۸۶/۸۹	۵۵/۹۸	۱۰	
۱۳/۷	۲/۵۲	میانگین						

جدول (۱۲-۶): نتایج آزمایش تعیین چگالی و تخلخل با روش اشباع و غوطه‌وری برای نمونه سنگ مواد

معدنی ۲

نام نمونه	ردیف	غوطه‌ور (g)	اشباع	خشک شده (g)	اشباع خشک	وزن خشک (g)	حجم (cm ³)	حجم منافذ (cm ³)	چگالی خشک (g/cm ³)	تخلخل (%)
مواد معدنی ۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	۱۵/۷۸	۲/۴۶	۴/۶۳	۲۹/۳۴	۷۲/۱۶	۷۶/۷۹	۴۷/۴۵	۲	۲/۴۶	۱۵/۷۸
	۱۲/۱۳	۲/۵۶	۳/۸۱	۳۱/۳۹	۸۰/۲۱	۸۲/۰۲	۵۲/۶۳	۳	۲/۵۶	۱۲/۱۳
	۱۷/۱۷	۲/۴۷	۵/۷۱	۳۳/۲۷	۸۲/۲۱	۸۷/۹۲	۵۴/۶۵	۴	۲/۴۷	۱۷/۱۷
	۱۵/۴۷	۲/۵۱	۵/۳	۳۴/۲۸	۹۱/۸۵	۹۱/۲۱	۵۶/۹۳	۵	۲/۵۱	۱۵/۴۷
	۱۲/۶۱	۲/۵۷	۴/۵۸	۳۶/۳۲	۹۳/۲۲	۹۷/۸	۶۱/۴۸	۶	۲/۵۷	۱۲/۶۱
	۲۰/۸۸	۲/۴۹	۵/۲۷	۲۵/۲۲	۶۲/۷۷	۶۸/۰۴	۴۲/۸۱	۷	۲/۴۹	۲۰/۸۸
	۳/۲۹	۲/۷	۰/۶	۱۸/۲۲	۴۹/۲۲	۴۹/۸۲	۳۱/۶	۸	۲/۷	۳/۲۹
	۲۴/۸۴	۲/۴۴	۶/۱۴	۲۴/۷۱	۶۰/۲۱	۶۶/۳۴	۴۱/۶۳	۹	۲/۴۴	۲۴/۸۴
	۲۲/۵۴	۲/۴	۵/۲۵	۲۳/۳	۵۹/۰۱	۶۱/۲۶	۳۷/۹۶	۱۰	۲/۴	۲۲/۵۴
میانگین										۱۶/۰۸

نتایج حاصل برای ۳ نوع سنگ معدن مس سونگون نشان می‌دهد که چگالی خشک دایک و دو نوع مواد معدنی به ترتیب برابر با ۲/۶۴، ۲/۵۲ و ۲/۵۱ می‌باشد و همچنین تخلخل برای این نمونه‌ها برابر با ۲/۳۶، ۲/۳۶ و ۱۳/۷ و ۱۶/۰۸ می‌باشد.

۶-۴-۲- مقاومت فشاری تک محوری

از نمونه سنگ معدن مس سونگون (دایک) با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر به‌طوریکه در شکل (۶-۶) مشخص است نمونه‌هایی طبق استاندارد *ISRM* تهیه، برش و تسطیح داده شد.



شکل (۶-۶): دستگاه مغزه‌گیر

شکل (۶-۲۱) دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در آزمایشگاه دانشگاه شاهرود را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۶-۲۱) نمونه‌های آماده شده تحت بارگذاری قرار گرفت و حداقل بار وارد بر سطح مقطع نمونه ثبت شد. با توجه به رابطه موجود مقدار مقاومت فشاری تک محوری سنگ دایک ۶۵/۵ مگاپاسگال به دست آمد.



شکل (۲۱-۶): نمونه دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

۶-۴-۳- سرعت امواج فشاری و مدول الاستیسیته

۶-۴-۱- سرعت امواج فشاری

زمان عبور موج در نمونه سنگ معدن مس سونگون با استفاده از دستگاه التراسونیک ثبت شد و سرعت امواج فشاری نمونه به دست آمد.

سرعت امواج فشاری به دست آمده برای نمونه سنگ دایک و ماده معدنی به ترتیب ۳۵۶۷ و ۳۲۱۰ متر بر ثانیه می‌باشد.

۶-۴-۲- مدول الاستیسیته یا مدول یانگ

مدول الاستیسیته نمونه سنگ نیز با در دست داشتن چگالی نمونه و سرعت امواج فشاری به دست می‌آید. مدول یانگ به دست آمده برای دایک و ماده معدنی به ترتیب $33/6$ و $25/7$ گیگاپاسکال می‌باشد.

۶-۴-۴- مطالعات آزمایشگاهی انجام شده برای تعیین چقرمگی شکست حالت I برای نمونه

سنگ معدن مس سونگون

آزمایش‌های چقرمگی شکست با سایر تست‌های استحکام موجود در مکانیک سنگ تفاوت عمدہ‌ای دارد. زیرا نمونه‌ها باید دارای ترکی تعریف شده با مشخصات معین باشد تا بتوان اثرات شکاف را در حوزه مکانیک شکست بررسی کرد. در این مطالعه از روش بارگذاری خمش سه نقطه‌ای بر نمونه نیم دیسکی با ترک مستقیم که به اختصار SNSCB¹ خوانده می‌شود، برای تعیین چقرمگی شکست حالت I استفاده شده است که شکل (۲۲-۶) آماده‌سازی نمونه در آزمایشگاه برای تعیین چقرمگی شکست را نشان می‌دهد.



شکل (۲۲-۶): آماده‌سازی نمونه در آزمایشگاه برای تعیین چقرمگی شکست

بعد از آماده سازی، نمونه‌ها تحت بارگذاری قرار گرفتند که در نمونه موجود شکاف از قسمت نوک شروع به رشد می‌کند و در داخل صفحه، شیار به صورت پایدار شروع به پیشروی می‌کند و تا

¹ Straight-Notched Semi Circular Specimen under three-point Bend

نقطه‌ای که ضریب شدت تنش نوک شکاف به مقدار ماکزیمم خود برسد یا باز اعمالی به مقدار بحرانی خود برسد، رشد شکاف ادامه می‌یابد. پس از آن رشد ناپایدار شکاف اتفاق می‌افتد و شکاف به صورت آنی رشد کرده و شکست در قطعه صورت می‌گیرد در شکل (۲۳-۶) نمونه‌های آزمایشگاهی قبل از بارگذاری، حین بارگذاری و بعد از بارگذاری نشان داده شده‌اند.



شکل (۲۳-۶): نمونه‌های آزمایشگاهی برای تعیین چقرمگی شکست حالت I (الف) قبل از بارگذاری (ب) حین بارگذاری (ج) بعد از بارگذاری

برای ۱۲ نمونه با ابعاد مختلف طول شکاف، آزمایش خمین سه نقطه‌ای انجام شد و مقدار بار شکست نمونه ثبت شد. مقدار چقرمگی شکست با توجه به روابط مذکور در فصل ۵ محاسبه شده است. نتایج این آزمایش در جدول (۱۴-۶) درج شده است.

جدول (۱۴-۶): نتایج آزمایش تعیین چقرمگی

ردیف	ضخامت (m)	طول شکاف (m)	شعاع (m)	a/D	بار (MN)	شکست	چقرمگی ($Mpa\sqrt{m}$)
۱	۰/۰۲۵۹۸	۰/۰۱۴۰۲	۰/۰۳۳۷۴	۰/۲۰۸	۰/۰۰۲۵	۱/۵۹۱	
۲	۰/۰۲۶۲۶	۰/۰۱۲۴۸	۰/۰۳۳۷۴	۰/۱۸۵	۰/۰۰۵	۲/۷۶۷	
۳	۰/۰۲۲	۰/۰۱۱۶۶	۰/۰۳۳۷۴	۰/۱۷۳	۰/۰۰۲۵	۱/۵۵۳	
۴	۰/۰۲۱۸۹	۰/۰۱۲۱۶	۰/۰۳۳۷۴	۰/۱۸	۰/۰۰۳	۱/۹۴۳	
۵	۰/۰۱۸۰۱	۰/۰۱۲۹۸	۰/۰۳۳۷۴	۰/۱۹۲	۰/۰۰۱۵	۱/۲۶	
۶	۰/۰۱۷۸۵	۰/۰۱۴۲۴	۰/۰۳۳۷۴	۰/۲۱۱	۰/۰۰۲	۱/۸۹	
۷	۰/۰۲۰۲۶	۰/۰۱۱۰۱	۰/۰۳۳۷۴	۰/۱۶۳	۰/۰۰۳	۱/۹۳۴	
۸	۰/۰۲۰۲۶	۰/۰۱۲۸۷	۰/۰۳۳۷۴	۰/۱۹۱	۰/۰۰۳	۲/۲۲	
۹	۰/۰۱۵۰۷	۰/۰۱۲۶۴	۰/۰۳۶۰۶	۰/۱۷۵	۰/۰۰۲۵	۲/۲۱۹	
۱۰	۰/۰۱۶۳۷	۰/۰۱۲۵	۰/۰۳۶۰۶	۰/۱۷۳	۰/۰۰۳	۲/۴۲۹	
۱۱	۰/۰۱۸۶۷	۰/۰۱۰۸۷	۰/۰۲۷	۰/۲۰۱	۰/۰۰۱۵	۱/۴۲۹	
۱۲	۰/۰۱۸۶۷	۰/۰۱۰۶۹	۰/۰۲۷	۰/۱۹۸	۰/۰۰۱۵	۱/۴۰۲	
میانگین							
۱/۸۸۶							

همان‌طور که در جدول (۱۴-۶) دیده می‌شود برای ۱۲ عدد نمونه با مشخصات هندسی متفاوت، مقدار چقرمگی بدست آمده در بازه بین $۱/۲۶ Mpa\sqrt{m}$ تا $۲/۷۶ Mpa\sqrt{m}$ تغییر می‌کند که میانگین چقرمگی به دست آمده برای ۱۲ نمونه برابر با $۱/۸۸۶ Mpa\sqrt{m}$ می‌باشد.

۴-۵-۶- ارزیابی نتایج روابط تجربی برای تعیین چقرمگی شکست حالت I با استفاده از نتایج

آزمایشگاهی

مقدار چقرمگی شکست با روابط تجربی پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ که نتایج آن در جدول (۱۵-۶) آورده شده است و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شد. مقدار خطای نسبی بین روش آزمایشگاهی و روابط تجربی 6% به دست آمده که قابل قبول و نشان‌گر این است که روابط تجربی ISRM تطابق خوبی با روش آزمایشگاهی نیم دیسکی با شکاف مستقیم دارد. به دلیل این‌که تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی و انجام آزمایش تعیین چقرمگی شکست هزینه‌بر و زمان‌بر می‌باشد از روش تجربی مذکور می‌توان برای تخمین چقرمگی شکست دیگر بخش‌های معدن استفاده کرد.

جدول (۱۵-۶): مقایسه چقرمگی شکست آزمایشگاهی با چقرمگی تخمینی

مقدار خطای نسبی	میانگین	بیشترین مقدار	کمترین مقدار	
6%	$1/88 Mpa\sqrt{m}$	$2/76 Mpa\sqrt{m}$	$1/26 Mpa\sqrt{m}$	چقرمگی شکست (آزمایشگاهی)
	$1/77 Mpa\sqrt{m}$	$2/26 Mpa\sqrt{m}$	$1/27 Mpa\sqrt{m}$	چقرمگی تخمینی با استفاده از روابط تجربی

در نهایت خواص فیزیکی و مکانیکی ماده‌سنگ پله‌های معدن مس سونگون با استفاده از روش‌های مناسب و با توجه به تجهیزات موجود در آزمایشگاه تعیین شد که نتایج آن در جدول (۶-۶) آورده شده است.

جدول (۶-۱۶): خواص فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ معدن مس سونگون

مدول الاستیسیته <i>Gpa</i>	سرعت امواج فشاری <i>m/s</i>	مقاومت فشاری تک محوری <i>Mpa</i>	تخلخل %	چگالی خشک <i>g/cm³</i>	چقرومگی <i>Mpa√m</i>	نوع سنگ
۳۳/۶	۳۵۶۷	۶۵/۵	۲/۳۶	۲/۶۴	۱/۸۸	دایک
۲۵/۷	۳۲۱۰	-	۱۳/۷	۲/۵	۱/۴۸	مواد معدنی

۵-۶- انرژی مواد منفجره در انفجارهای معدن مس سونگون

برای محاسبه انرژی حاصل از انفجار با داشتن مقدار مواد منفجره مصرفی برای خرد کردن حجم مشخصی از توده سنگ و از ضرب آن به حرارت مواد منفجره^۱ که به صورت کیلوکالری بر کیلوگرم ماده منفجره، کیلوگرم متر بر کیلوگرم ماده منفجره بیان می‌شود، انرژی مواد منفجره به دست می‌آید. انرژی مواد منفجره برای الگوهای ۵*۴ و ۴/۵*۳/۲ با چالی به ارتفاع ۱۳/۶ متر و الگوهای ۴*۵ و ۴/۵*۳/۲ با چالی به ارتفاع ۸ متر برای زون دایک محاسبه شد که به ترتیب ۳۵۱۷/۵، ۱۲۳۱/۴، ۶۴۴۸/۸، ۱۷۳۹/۴ و ۱۰۴۳/۷ مگاژول می‌باشد. همچنین در زون مواد معنی برای الگوهای ۵*۶ و ۵/۵*۴ انرژی مواد منفجره به ترتیب ۱۲۱۷۶/۱ و ۶۹۵۷/۸ مگاژول محاسبه شد.

۶-۶- انرژی خردایش در معدن مس سونگون

پارامترهای لازم برای تعیین انرژی خردایش سنگ به طور مورده در معدن مس سونگون و نمونه‌های سنگ معدن بررسی و محاسبه شد. انرژی خردایش نیز با استفاده از روابط موجود که در فصل ۲ به‌طور کامل بحث شد، محاسبه می‌شود. انرژی خردایش برای الگوهای ۵*۶، ۴*۵ و ۴/۵*۳/۲

^۱ Heat of Explosive

با چالی به ارتفاع $13/6$ متر و الگوهای $5*4$ و $4/5*3/2$ با چالی به ارتفاع ۸ متر برای زون دایک محاسبه شد که به ترتیب $254/9$ ، $224/3$ ، $594/8$ و $39/2$ مگاژول می‌باشد. همچنین در زون مواد معدنی برای الگوهای $6*5$ و $5/5*4$ انرژی خردایش به ترتیب $571/5$ و $733/5$ مگاژول محاسبه شد. پارامترهای لازم برای محاسبه انرژی خردایش و انرژی مواد منفجره در معدن مس سونگون برای هر دو زون دایک و مواد معدنی در جدول (۱۷-۶) و (۱۸-۶) آورده شده است. همچنین میزان انرژی خردایش نیز محاسبه شد که در جدول مذکور آورده شده است.

جدول (۱۷-۶): پارامترهای لازم برای محاسبه انرژی خردایش و انرژی مواد منفجره در دیواره دایک معدن مس سونگون

h_h	h_b	$S * B$	N	V_t	φ	h_c	S_T	U	q	γ_f	χ_{c1}	n_1	χ_{c2}	n_2	E_F	E_x	η
۱۳/۸	۱۲/۵	۶*۵	۶	۲۲۵۰	۶/۵	۹/۱	۴/۵	۱.۱	۰/۴	۵۳۰	۰/۷۵	۲/۲۸	۰/۴۱	۱/۶۲	۲۵۴/۹	۳۵۱۷/۵	۱۴/۴۹
		۵*۴	۲۱	۵۲۵۰					۰/۶						۵۹۴/۸	۱۲۳۱۱/۴	۹/۸۶
		۴/۵*۳/۲	۱۱	۱۹۸۰					۰/۸۴						۲۲۴/۳	۶۴۴۸/۸	۶/۹۵
	۸	۵*۴	۵	۸۰۰		۵/۴	۲/۶	-	۰/۵۶						۹۰/۶	۱۷۳۹/۴	۱۰/۴۲
		۴/۵*۳/۲	۳	۳۴۵/۶					۰/۷۸						۳۹/۲	۱۰۴۳/۷	۷/۵

جدول (۱۸-۶): پارامترهای لازم برای محاسبه انرژی خردایش و انرژی مواد منفجره در دیواره مواد معدنی معدن مس سونگون

h_h	h_b	$S * B$	N	V_t	φ	h_c	S_T	U	q	γ_f	χ_{c1}	n_1	χ_{c2}	n_2	E_F	E_x	η
۱۳/۵	۱۲/۵	۶*۵	۱۲	۴۵۰۰	۶/۵	۹	۴/۵	۱	۰/۴۰	۴۳۰	۰/۵	۲/۴۰	۰/۲۷	۱/۷۲	۵۷۱/۵	۶۹۵۷/۸	۱۶/۴
		۵/۵*۴	۲۱	۵۷۷۵					۰/۵۴						۷۳۳/۵	۱۲۱۷۶/۱	۱۲/۱

۷-۶- جمع بندی

انرژی خردایش متاثر از پارامترهای زیادی می‌باشد که مجموع این پارامترها در دو گروه پارامترهای قابل کنترل و غیر قابل کنترل دسته بندی می‌شوند. پارامترهای لازم جهت محاسبه انرژی خردایش بر روی ماده‌سنگ و توده‌سنگ منطقه مورد مطالعه در معدن مس سونگون بررسی و محاسبه شد. در نهایت مقدار انرژی مواد منفجره و انرژی خردایش و درصد انرژی خردایش حاصل از آن به دست آمد که به طور میانگین درصد انرژی خردایش به ترتیب برای دایک و مواد معدنی ۹/۶ و ۱۳/۶ درصد می‌باشد. این امر با توجه به توزیع انرژی منتقل شده به سنگ معقول و منطقی به نظر می‌رسد. بنابراین برای محاسبه انرژی خردایش و محاسبه درصد انرژی صرف شده برای خردایش سنگ می‌توان از این روش استفاده کرد تا ضمن اطلاع از انرژی صرف شده برای خردایش سنگ، از هدر رفتن انرژی و یا ایجاد قطعات بزرگ سنگ جلوگیری کرد.

فصل هشتم

نتیجہ کری و پیشہ دات

۱-۷- نتیجه‌گیری

خرداش سنگ یک موضوع اساسی در آتشباری معدن روباز است و از عواملی نظیر خصوصیات هندسی توده‌سنگ، مشخصات ژئومکانیکی، مشخصات هندسی انفجار و مشخصات ماده منفجره مصرفی تأثیر می‌پذیرد که این عوامل در دو گروه پارامترهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل دسته‌بندی می‌شوند با توجه به پارامترهای غیر قابل کنترل باید دقت خاصی در انتخاب پارامترهای قابل کنترل انجام شود تا درجه خرداش مطلوب حاصل شود. درجه خرداش به کاربرد سنگ بستگی دارد و همچنین به نوع ماشین‌آلات بارگیری، برابری، سنگ شکنی و آسیا کنی وابسته است. از آنجایی که مصرف انرژی در خرداش سنگ مربوط به بخش سنگ شکنی و آسیا است، افزایش انرژی ورودی در بخش عملیات انفجار می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای مصرف انرژی در بخش سنگ‌شکنی و آسیا را کاهش دهد. بنابراین انفجار به عنوان اولین مرحله در فرایند خرداش سنگ، اهمیت سزاگی در تعديل میزان انرژی مصرفی برای کاهش اندازه قطعات سنگ می‌باشد. ولی انفجار باید به نحوی صورت گیرد که از اهداف انفجاری فاصله نگیرد. بنابراین عملیات خردکردن و جلوگیری از خردکردن بیش از حد اهمیت زیادی دارد. با دانش بر انرژی خرداش می‌توان درصد انرژی مصرف شده برای خرداش سنگ و مقدار انرژی که صرف عوامل زیان‌بار دیگر نظیر مانند لرزش زمین، هوا و ... می‌شود را محاسبه کرد.

در این مطالعه برای محاسبه انرژی خرداش، دیواره پله‌های معدن مس سونگون مورد بررسی قرار گرفت این کار در سه مرحله انجام شد که به ترتیب زیر هستند:

مرحله اول: تعیین منحنی توزیع ابعادی بلوك‌های برجای توده‌سنگ دیواره معدن مس سونگون

مرحله دوم: آنالیز تصویری توده‌سنگ آتشباری شده معدن مس سونگون به وسیله نرم افزار

Goldsizer

مرحله سوم: تعیین خواص ژئومکانیکی ماده‌سنگ پله‌های معدن مس سونگون

در مرحله اول ناپیوستگی های منطقه برداشت شد و با توجه به خصوصیات ناپیوستگی تودهسنگ، منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل شبکه شکستگی مجزا در محیط نرم افزار 3DEC شبیه سازی شد. پس از ایجاد مدل شبکه شکستگی مجزا برای تودهسنگ مورد مطالعه (دو زون دایک و مواد معدنی)، حجم بلوک های بر جا استخراج شد و توزیع حجمی بلوک ها برای هر زون به دست آمد. در مرحله دوم از کپه تودهسنگ آتشباری شده عکس برداری شد و با استفاده از نرم افزار Goldsize تحلیل گردید و توزیع دانه بندی قطعات سنگی خرد شده رسم شد. در مرحله سوم برای تعیین خواص ژئومکانیکی در معدن مس سونگون از دیواره های مورد مطالعه نمونه برداری شد. در آزمایشگاه دانشگاه شاهروд خواص ژئومکانیکی ماده سنگ با روش های استاندارد آزمایشگاهی بدست آمد. در نهایت طبق رابطه پیشنهادی حمدی انرژی خردایش برای هر زون محاسبه شد و برای هر زون درصد انرژی خردایش به دست آمد. درصد انرژی خردایش برای زون دایک با الگوهای مختلف انفجاری به ترتیب ۷/۵ درصد می باشد. همچنین درصد انرژی خردایش برای زون مواد معدنی با الگوهای مختلف انفجاری ۱۶/۴ و ۱۲/۱ درصد به دست آمد. این امر بیان گر این است که چه مقدار از انرژی صرف خرد کردن سنگ و چه مقدار از آن به هدر می رود.

به طور میانگین درصد انرژی خردایش برای دایک و مواد معدنی ۹/۶ و ۱۳/۶ درصد محاسبه شد. با بررسی نتایج به این نتیجه می رسیم که در زون دایک انرژی کمتری صرف خرد کردن سنگ ها شده و بخش بیشتری از انرژی مواد منفجره صرف مسایل زیان بار می شود. این انرژی می تواند به صورت لرزش هوا و لرزش زمین آزاد شده و به سازه های اطراف خسارت وارد کند. همچنین ارزیابی نتایج بیانگر این است که در الگوهای با ابعاد بزرگ تر درصد بیشتری از انرژی مواد منفجره صرف خرد شدن سنگ ها می شود. در الگوهای با ابعاد کوچک تر بخش کمی از انرژی مواد منفجره صرف خردایش سنگ می شود. تحلیل کلی نتایج نشان می دهد که در زون دایک و همچنین در الگوهای انفجاری با ابعاد کوچک تر هدر رفت انرژی زیاد می باشد. این امر باعث ایجاد اثرات نامطلوب بعد از انفجار می شود. از

این رو دانش بر میزان انرژی خردایش امری ضروری در خردایش سنگ می‌باشد. با دانش کامل بر این مساله می‌توان از اثرات نامطلوب بعد از انفجار جلوگیری کرد.

۲-۷- پیشنهادات

با توجه به این‌که نرخ انرژی صرف شده برای خرد کردن سنگ با تغییر الگوی آتشباری تغییر می‌کند، پیشنهاد می‌شود مقدار انرژی خردایش برای هر زون با الگوهای متفاوت محاسبه شود و از این طریق الگوی مناسب در آتشباری معدن مس سونگون انتخاب شود، تا دانه بندی یکنواخت متناسب با تجهیزات بارگیری، باربری، سنگ شکنی و آسیا کنی حاصل شود و اثرات نامطلوب آتشباری به حداقل ممکن کاهش یابد.

از آنجایی که درصد انرژی صرف شده برای خردکردن دایک مقدار کمتری می‌باشد لازم است پارامترهای قابل کنترل که در خردایش سنگ تأثیر دارند به دقت بررسی شوند تا از ایجاد قطعات بزرگ سنگ جلوگیری شود.

در این مطالعه انرژی خردایش در ابعاد ماکرو بررسی شده است، پیشنهاد می‌شود انرژی خردایش در ابعاد میکرو نیز بررسی شده و با هم مقایسه شوند.

به دلیل این‌که قطر چال یکی از پارامترهای اصلی در انفجار چال می‌باشد و در این مطالعه از چال‌ها با قطر یکسان استفاده شده است، پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی تأثیر قطر چال در نتایج آتشباری و خردایش سنگ بررسی شود.

Aler J, Mouza J, Arnould M. "Evaluation of Blast Fragmentation Efficiency and its Prediction by Multivariate Analysis Procedures." Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 1996: Vol, 33, No. 2, pp. 189-196.

Baghbanan, A. "Scale and Stress Effects on Hydro-Mechanical Properties of Fractured Rock Masses." PHD. Thesis. Royal Institute of Technology, 2008.

Blum, Ph. Upscaling of Hydro-Mechanical Processes in Fractured Rock. A thesis submitted to The University of Birmingham for the degree of Doctor of Philosophy, The University of Birmingham: School of Geography, Earth and Environmental Sciences, 2004.

Elmouttie M, Krähenbühl G ,Poropat G“ Robust algorithms for polyhedral modelling of fractured rock mass structure ”.Computers and Geotechnics. 2013 ,

Esmaeili K, Hadjigeorgiou j, Grenon M. " Estimating Geometrical and Mechanical REV Based on Synthetic Rock Mass Models at Brunswick Mine." Int, J. Rock Mech. Min. Sci, 2010.

Feng Q, Rosshoff K, Slob, S. "Fracture mapping using 3D laser scanning techniques." 2007.

Hamdi E, Mouza J. "A methodology for rock mass characterisation and classification to improve blast results." International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 42, 2005: 177–194.

Hamdi E, Mouza j. "Fragmentation energy in rock blasting." Geotech Geol Eng (Geotech Geol Eng), 2008: 26:133–146.

Hamdi E, Mouza J, Fleurisson J.A. "Evaluation of the Part of Blasting Energy Used for Rock Mass Fragmentation." Fragblast, 2001: Vol. 5, No. 3, pp. 180-193.

Hamdi E, Mouza J, Fleurisson J.A. "Evaluation of the Part of Blasting Energy Used for Rock Mass Fragmentation." Fragblast, 2001: Vol. 5, No. 3, pp. 180-193.

Hamdi, E. "A Fractal Description of Simulated 3D Discontinuity Networks." Rock Mech. Rock Engng, 2006.

- Hamdi, E. "La fragmentation comme création de surfaces." chapter 3, Hamdi thesis, 2007.*
- Hudaverdi T, Kuzu C, Fisne A. "Investigation of the blast fragmentation using the mean fragment size and fragmentation index." International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 56, 2012: 136–145.*
- Hudson J.A, Harrison J.P. "Engineering rock mechanics an introduction to the principles."*
Published by Elsevier Science Ltd, 1997.
- Hustrulid, w. "blasting principals for open pit mining." 1999: Vol.1,General.*
- Iqbal M. J, Mohanty B. "Experimental Calibration of ISRM Suggested Fracture Toughness Measurement Techniques in Selected Brittle Rocks." Rock Mech. Rock Engng, 2007: 453–475.*
- Jing L, Stephansson O. "The basics of fracture system characterization- field mapping and stochastic simulations." In Fundamental of Discrete Element Methods for Rock Engineering, Theory and Applications, by Stephansson O Jing L. 2007.*
- Khishvand M, Jafari A, Rahami H“ .Developing an algorithm for reconstruction of blocky systems in discontinuous media: two-dimensional analysis ”.Geomechanics and Geoengineering ,Vol. 6, No. 3, September 2011, 171.۱۸۳–*
- Kulatilake P.H.S.W, Qiong Wu , Hudaverdi T , Kuzu C. "Mean particle size prediction in rock blast fragmentation using neural networks." Engineering Geology 114, 2010: 298–311.*
- Levent T, Cigdem K. " Mode I fracture toughness determination with straight notched disk bending method." International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 48 , 2011: 1248–1261.*
- Lopez, J.c. "Drilling and blasting of rocks." Balkema, 1995.*
- Mahinda D.K, Ken P. Ch. "Fracture toughness testing of brittle materials using semi-circular bend (SCB) specimen." Engineering Fracture Mechanics 91, 2012: 133–150.*
- Minami K, Shingo Y, Sang-Ho Ch, Kamil S, Leona V, Yuzo O. "Estimation of Fracture Toughness of Sandstone by Three Testing Methods." ISRM specialized conference, 2015.*

Oda, M. "Fabric tensor for discontinuous geological materials." Soils and Foundations, 1982: Vol.22, No.4, pp.96.

Price N.j, Cosgrove W. Analysis of Geological structures. Cambridge: Cambridge University of Press, 1990.

Priest S. D, Hudson J. A. "Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys." Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 1980.

Priest, S.D. Discontinuity Analysis for Rock Engineering. Originally published by Chapman & Hall, 1993.

Raina, A.K. "A history of digital image analysis technique for blast fragmentation assessment and some Indian contributions." Measurement and Analysis of Blast Fragmentation – Sanchidrian & Singh (Eds)n,Taylor & Francis Group, 2013: ISBN 978-0-415-6.

Sanchidrian J.A, Ouchterlony F, Moser P, Segarra P , Lopez L.M. "Energy components in rock blasting." International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 44, 2007: 130–147.

Sanchidrian J.A, Ouchterlony F, Moser P, Segarra P , Lopez L.M. "Performance of some distributions to describe rock fragmentation data." International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 53, 2012: 18–31.

Sastry V.R, Chandar K.R. "Assessment of objective based blast performance." Ranking system, Measurement and Analysis of Blast Fragmentation – Sanchidrian & Singh (Eds), Taylor & Francis Group, 2013: ISBN 978-0-415-62140-3.

Sharma K.R, Saxena V.M. By in in-suit characterization of rock, 49-97. A.A Balkema publishres, 2001.

Snow, D.T. "Anisotropic permeability of fractured media." Water resource Research, 1969: Vol. 5, No.6, pp. 1273-1289.

Soo-Ho, Chung-In L, Seokwon J. "Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens." Engineering Geology 66, 2002: 79–97.

Thote N.R, Singh D.P. "Blast fragmentation size assessment analysis for production blasts in Indian mining conditions." Explosives and Blasting Technique, Holmberg, 2003: ISBN 90 5809 605 X.

Trinks I, Clegg P. "Mapping and analyzing virtual outcrops." 2005.

Vermilye JM, Scholz CH. "Relation Between Vine Length and Aperture." J Struct Geol, 1995: 17(3):423-434.

Whittaker B.N, Singh R.N, Sun G. "Rock Fracture Mechanics-Principals, Design and Application." 1992.

Yarahmadi R, Bagherpour R, Kakaie R, Mirzaie N. H, Yari M. "Development of 2D computer program to determine geometry of rock mass blocks." International Journal of Mining Science and Technology, 2013.

Zhang L, Einstein H.H. "Estimating the intensity of rock discontinuities." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 37, 2000: 819±837.

Zhang Qi-hua, Ai-qing Wu, Li-jie Zhang" Statistical analysis of stochastic blocks and its application to rock support ".Technology, Tunnelling and Underground Space ,

.۲۰۱۴

Zhang Y, Xiao M, Ding X, Wua A" Improvement of methodology for block identification using mesh gridding technique ".Tunnelling and Underground Space Technology ,

.۲۰۱۲

Zhang Z.X, Lei Q.H" .Object-oriented modeling for three-dimensional multi-block systems ". Computers and Geotechnics.۲۰۱۲ ,

Zheng y, Xia Lu, Yu Q" A method for identifying three-dimensional rock blocks formed by curved fractures ".Computers and Geotechnics.۲۰۱۴ ,

Zimmerling J, Alkins R. "A statistical model of fragmentation." Rock Fragmentation by Blasting – Singh & Sinha (Eds), 2013.

استوار، ر. آتشکاری در معادن رویاز، جلد دوم، تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۷.

افرایی، س، صالحی ح، خسرو ح، "بررسی سیستم بارگیری و باربری در معدن مس سونگون و انتخاب ناوگان بهینه با توجه به شرایط آینده استخراج معدن." چهارمین کنفرانس مهندسی معدن، ۱۳۹۱.

امینی، ا، قدیرزاده، م، یاراحمدی بافقی ع، "مدل‌سازی هندسی - ژئوتکنیکی توده‌سنگ‌های درزه‌دار به روش آماری در محیط *Mathematica* (مطالعه موردی بلوك شماره ۲ معدن چغارت)." پنجمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن، اصفهان، ۱۳۸۵.

آیت‌الله‌ی، م، ثقفی ح، "تعیین چقرمگی شکست یک نوع سنگ مرمریت با استفاده از یک قطعه آزمایشگاهی." کنگره بین‌المللی معدن، ۱۳۸۹.

باغبانان، ع، جولایی الف، "تولید شبکه شکستگی مجزا در فضای سه بعدی." چهاردهمین همایش انجمن زمین‌شناسی، رومیه، ۱۳۸۹.

بخشنده‌امینه، ح، مالکی نژاد ح، "ارائه مدل تجربی پیش‌بینی متوسط ابعاد خردشده‌گی حاصل از انفجار در توده سنگ کنگلومراي سد گتوند علیا." نشریه علمی پژوهشی مدیریت انرژی، پاییز ۹۱.

به‌الدینی، ح، فاتحی مرجی، م، پورقاسمی، م، "ارائه مدلی جدید جهت تعیین مقدار چقرمگی شکست سنگ (K_{Ic}) با استفاده از روش ترک چورونی." اولین کنفرانس فناوری‌های معدن‌کاری ایران، یزد، ۱۳۹۱.

جولایی، ا، "مدل‌سازی سه بعدی جریان سیال در سنگ‌های شکسته در مخازن نفتی ایران." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۹.

زاده‌ش، ج. "مدل‌سازی تداوم درزه‌ها و بررسی تاثیر آن بر مقاومت توده‌سنگ درزه‌دار." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهرود، ۱۳۹۱.

فخامتی، ف، تلخابو، شمسی، ح. "پنهان‌بندی زمین‌شناسی مهندسی معدن مس سونگون جهت استفاده در تحلیل‌های پایداری شب." هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، آبان ۱۳۹۲.

فرامرزی، ع، منصوری، ح، ابراهیمی فرسنگی، م. "ارزیابی لرزش ناشی از انفجار در معدن روباز مس سونگون." چهارمین کنفرانس مهندسی معدن، ۱۳۹۱.

فریدونی، د. زمین‌شناسی عمومی و مهندسی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، ۱۳۸۷.

فهیمی‌فر، الف. "آزمایش‌های مکانیک سنگ: مبانی نظری و استانداردها." دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۸۰.

محمدوزاد، الف. "تحلیل منحنی‌های دانه‌بندی توده‌سنگ خردشده توسط نرم افزارهای آنالیز تصویری و مقایسه آن با شرایط واقعی." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهرود، ۱۳۸۹.

منصوری، ص. "ارزیابی دقیق روش‌های مختلف اندازه‌گیری چقرمگی شکست سنگ در شرایط کشش و برش با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و مدل سازی عددی." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهرود، ۱۳۹۲.

میرزایی‌نصیرآباد، ح. "تهیه برنامه کامپیوترا توسعه شبکه‌های شکستگی مجازی توده‌سنگ درزه‌دار." اولین همایش زمین‌شناسی فلات ایران - کرمان، اسفند ۱۳۹۱.

میرزایی‌نصیرآباد، ح، کاکایی، ر، حسنی، ب. "تعیین ضریب تمرکز تنفس مود کششی شکستگی‌های سنگ با استفاده از روش بدونمش گالرکین و برونيایی جابجایی." دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.

نعمتاللهی، ح. "کانه‌آرایی. " جلد اول، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، ۱۳۷۷.

نوروزی، م. "برآورد مقاومت تودهسنگ دارای ناپیوستگی‌های ناپایایا با استفاده از مدل تصادفی شبکه درزهای مجزا (مورد مطالعاتی: تودهسنگ ساختگاه سد و نیروگاه رودبار لرستان)." پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شاهزاد، اسفند ۱۳۹۳.

پوستہ

میانگین شیب و جهت شیب و ثابت فیشر با استفاده از روابط تجربی نیز محاسبه گردید که روابط تجربی برای محاسبه مقادیر مذکور در زیر آورده شده است (Priest, 1993):

$$n_x = w \cos \alpha_n \cos \beta_n \quad (1-1)$$

$$n_y = w \sin \alpha_n \cos \beta_n \quad (2-1)$$

$$n_z = w \sin \beta_n \quad (3-1)$$

در اینجا n_x , n_y و n_z بردار نرمال وزن دار هستند. α_n و β_n به ترتیب تренд^۱ و پلانژ^۲ نرمال هستند که از روابط (۴-۱) و (۵-۱) به دست می آیند و w مقدار وزن می باشد که از رابطه (۶-۱) به دست می آید.

$$\alpha_n = \alpha_d \mp 180^\circ \quad 0 \leq \alpha_d \leq 360 \quad (4-1)$$

$$\beta_n = 90 - \beta_d \quad 0 \leq \beta_d \leq 90 \quad (5-1)$$

$$w = \frac{1}{\cos \delta} \quad \delta < 90 \quad (6-1)$$

در اینجا مقدار δ کمتر از 90° می باشد و از طریق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\cos \delta = |\cos(\alpha_n - \alpha_s) \cos \beta_n \cos \beta_s + \sin \beta_n \sin \beta_s| \quad (7-1)$$

در این رابطه نیز α_s و β_s به ترتیب تrnd و پلانژ خط برداشت هستند. در نهایت بعد از محاسبه، δ برای هر درزه به دست می آید که می توان با توجه به w_{ni} که از رابطه (۹-۱) به دست می آید و روابط مذکور مقدار بردار نرمال را با رابطه (۱۰-۱)، (۱۱-۱) و (۱۲-۱) محاسبه کرد.

¹ trend

² plunge

$$N_w = \sum_{i=1}^N w_i \quad w_i \geq 1 , \frac{N_w}{N} = 1/5 - 5 \quad (8-1)$$

$$w_{ni} = \frac{w_i N}{N_w} \rightarrow \sum_{i=1}^N w_{ni} = N \quad (9-1)$$

$$r_{nx} = \sum_{i=1}^M n_{xi} \quad (10-1)$$

$$r_{ny} = \sum_{i=1}^M n_{yi} \quad (11-1)$$

$$r_{nz} = \sum_{i=1}^M n_{zi} \quad (12-1)$$

و از طریق رابطه (13-1) مقدار بردار برایند به دست می‌آید:

$$|r_n| = \sqrt{r_{nx}^2 + r_{ny}^2 + r_{nz}^2} \quad (13-1)$$

با محاسبه بردار برآیند و مشخص بودن تعداد درزه‌های هر دسته درزه M , با توجه به رابطه (1)

(14-1) و (15-1) ثابت فیشر محاسبه می‌شود:

$$k \cong \frac{M}{M - |r_n|} \quad (14-1)$$

$$k \cong \frac{M - 1}{M - |r_n|} \quad (15-1)$$

$$k \cong \frac{M - 2}{M - |r_n|} \quad (16-1)$$

در روابط بالا k ثابت فیشر می‌باشد. مقادیر متوسط شیب α و جهت شیب β به ترتیب از رابطه (17-1) و (18-1) بدست می‌آید. مقدار شیب به Q بستگی دارد و این مقدار می‌تواند بسته به مقدار r_x و r_y یکی از مقادیر 0° ، 180° و یا 360° باشد که در جدول (1-1) مشخص شده است.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{r_x}{r_y}\right) + Q \quad (17-1)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{r_z}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}}\right) \quad (18-1)$$

جدول (۱-۱): مقدار Q با توجه به مقادیر r_y و r_x

Q	r_y	r_x
0	≥ 0	≥ 0
180°	≥ 0	< 0
180°	< 0	< 0
360°	< 0	≥ 0

مقادیر شیب، جهت شیب و ثابت فیشر با استفاده از این روابط به دست آمد که نتایج آن در

جدول (۲-۱) و (۳-۱) آورده شده است:

جدول (۲-۱): شیب، جهت شیب، ثابت فیشر و تعداد درزهای دسته درزهای دیواره دایک معدن مس

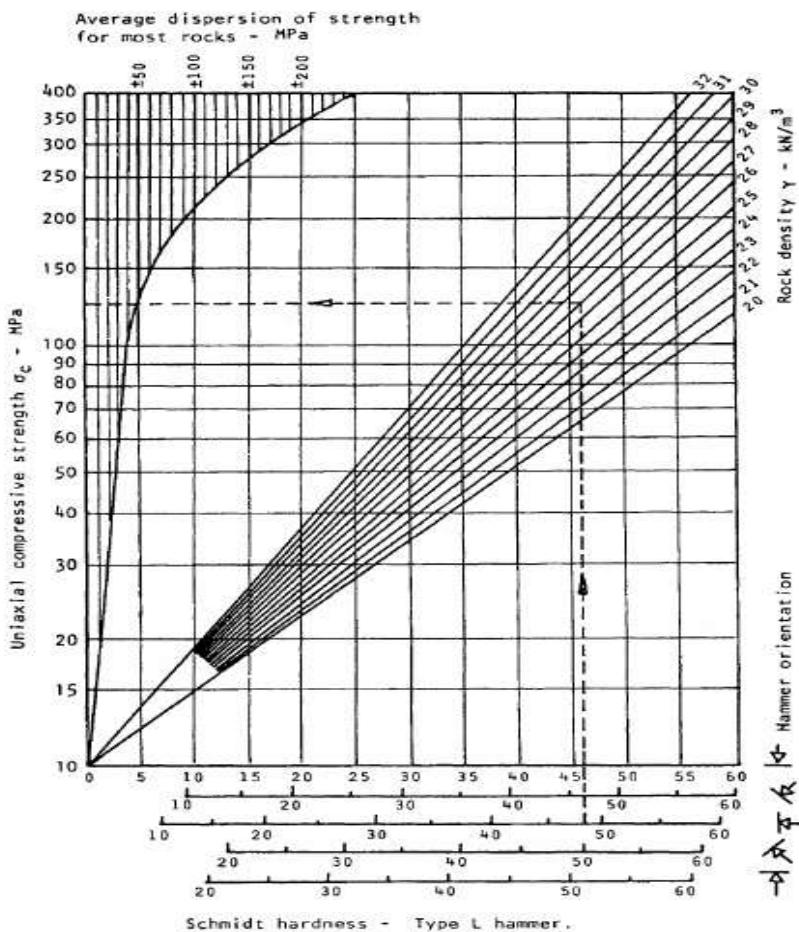
سونگون با استفاده از روابط تجربی

ثابت فیشر	جهت شیب	شیب	
۱۳۵/۳۴	۲۴۹/۰.۹	۸۰/۰.۲	دسته درزه ۱
۱۳۴/۰.۲			
۱۳۲/۶۹			
۸۸/۸۸	۱۵۳/۸۲	۷۹/۵۲	دسته درزه ۲
۸۷/۶۵			
۸۶/۴۱			
۷۲/۷۲	۳۵۹/۰.۹	۳۳	دسته درزه ۳
۷۰/۹۰			
۶۹/۱			

جدول (۳-۱): شیب، جهت شیب، ثابت فیشر و تعداد درزه‌های دسته‌درزه‌ها در دیواره مواد معدنی معدن

مس سونگون با استفاده از روابط تجربی

ثابت فیشر	جهت شیب	شیب	
۱۰۷/۵۳	۲۴۰/۳	۷۹/۰۲	دسته درزه ۱
۱۰۶/۴			
۱۰۵/۲۹			
۱۳۱/۶۱	۱۷۲/۴۶	۷۸/۵۴	دسته درزه ۲
۱۲۹/۵۲			
۱۲۷/۴۳			
۱۰۸/۸۵	۳۵۶/۵۸	۳۰/۴۰	دسته درزه ۳
۱۰۶/۳۸			
۱۰۳/۹۱			
۸۴/۵۱	۳۵۴/۷۵	۵۶/۲۱	دسته درزه ۴
۸۱/۳۹			
۷۸/۲۵			



شکل (۱-۲): رابطه بین سختی اشمیت، چگالی سنگ و مقاومت فشاری تک محوری (Hudson & Harrison 1997)

رابطه دیبر^۱ (۱۹۶۰)

$$\sigma_a = 6/9 * 10^{[0/16 + 0/0078(H_s \gamma_a)]} \quad (1-2)$$

$$E_t = 600/5 * (H_s \gamma_a) - 20/276 \quad (2-2)$$

شاخص عدد سختی اشمیت: H_s

^۱ Deer D.U

γ_a : چگالی خشک سنگ (گرم بر سانتی متر مکعب)

σ_a : مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)

E_t : مدول الاستیسیته سنگ

این رابطه برای سختی های بین ۰ تا ۶۰ کاربرد دارد

رابطه کیدبینزکی^۱ (۱۹۸۰)

$$\sigma_a = 0/447e^{(0/045H_s + \gamma_a)} \quad (۳-۲)$$

H_s : شاخص میانگین عدد سختی اشمتیت

γ_a : چگالی خشک سنگ (گرم بر سانتی متر مکعب)

σ_a : مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)

e : پایه لگاریتم نپرین

رابطه پیشنهادی ISRM

$$Log\sigma_c = 0/00014\gamma_a H_s + 3/16 \quad (۴-۲)$$

H_s : عدد سختی بازگشتی اشمتیت

γ_a : چگالی خشک سنگ (گرم بر سانتی متر مکعب)

σ_c : مقاومت فشاری تک محوری (Psi)

¹ Keadbinski

^۱ رابطه بارتون و کوبی^۱

$$\log JCS = 0/00088\gamma_d R + 1/01 \quad (5-2)$$

R : عدد سختی بازگشتی اشميit

γ_d : چگالی خشك سنگ (کيلونيوتون بر متر مكعب)

JCS : مقاومت فشاري تک محوري (مگاپاسگال)

رابطه آفموت^۲

$$JCS = 6/9 \times 10^{[1/348\log(H_s+\gamma)-1/325]} \quad (6-2)$$

H_s : شاخص عدد سختی اشميit

γ : چگالی خشك سنگ (گرم بر سانتيمتر مكعب)

JCS : مقاومت فشاري تک محوري (مگاپاسگال)

روابط فوق همگی تجربی بوده و برای استفاده از آنها باید دقت نمود که کدام رابطه برای استفاده

در تعیین مقاومت فشاري تک محوري سطوح درزه سنگ‌های مورد نظر مناسب‌تر است و انطباق

بهتری با مقاومت فشاري تک محوري سنگ دارد.

^۱ barton and choubev

^۲ Afmut

Abstract

In the present study, the energy consumption for rock fragmentation in Sungun mine has been investigated. In view of that, two rock zones of the mine were considered. The amount of energy for rock fragmentation in each zone was calculated using the model developed by Hamdy. In order to determine the Volumatic distribution of the in situ rock blocks, the geometrical properties of discontinuities and the number of joints in each zone were determined. Also, the probability distribution functions of the geometrical properties of discontinuities in each set of joints were specified. Then, the geometry, volume and Volumatic distribution of rock blocks were specified using 3DEC commercial code. In the next step, physical and geomechanical properties of the rock blocks were measured. In the final step, the size distribution of the fragmented rock blocks was determined using GOLDSIZE commercial code. According to the estimation model developed by Hamdy, the energy of rock fragmentation is related to the difference between the total surface area of the fragmented rock pieces and the total surface area of in situ rock blocks. So, the energy of rock fragmentation was measured using the geomechanical properties, Volumatic distribution of the in situ rock blocks and fragmented rock pieces. Results showed that in the dyke and mineral deposit zones, 13.6 and 9.6 percent of the total blasting energy is used for rock fragmentation, respectively. The rest of the energy is used for the catastrophic events such as earth quake, fly rock, etc. Furthermore, the evaluation the results showed that in the bigger rock block profiles (distancing, overburden), the amount of energy needed for rock fragmentation increases, which indicates that in the smaller rock profiles the energy dissipation is higher. In view of that, there must be an exact pattern of rock blasting and fragmentation in order to reduce the energy dissipation and gain desirable outcomes.

Keywords: Energy of rock fragmentation, Discrete Fracture Network Models, Volumatic distribution of in situ rock blocks, Software Gold Size, physical and geomechanical properties of the rock blocks, Sungun Copper Mine



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

*Determination of Fragmentation Energy in Rock Mass Blasting Based
on Discrete Fracture Network Models (Case Study: Sungun Copper
Mine)*

Mohammad Abolhasani

Supervisors:

Dr.H.Mirzai Nasirabad

Prof. M. Ataei

Dec 2015