

اللَّهُمَّ اللَّهُمَّ اللَّهُمَّ



دانشکده معدن، نفت، ژئوفیزیک

گروه مهندسی استخراج معدن

ارائه‌ی شاخصی برای پیش‌بینی خردایش توده‌سنگ ناشی از
آتشباری در معادن روباز با استفاده از سیستم مهندسی سنگ
فازی (مطالعه موردی: معدن مس سونگون)

سجاد باقری‌زرغانی

اساتید راهنما

دکتر رضا خالوکاکایی

دکتر رامین رفیعی

بهمن ۱۳۹۷

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تایید کند.

تقدیم اثر

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیصم ساخته تا در سایه‌ی درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آن شاخ و برگ کیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نشان دلیلی است بر بودنم چرا که این دو وجود پس از پروردگاریه، هستی ام بوده اند وستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگاران‌ی که برایم زندگی؛ بودن و انسان بودن را معنا کردند حال این برک سبزی است تخف درویش تقدیم آنان....

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایشا و از خودگذشتگی‌شان، به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است، به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناشان به شجاعت می‌گراید و به پاس محبت‌های بی‌دیغشان که هرگز فروکش نمی‌کند.

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم.

تعمیر نامه

اینجانب سجاد باقری زرغانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارائه‌ی شاخصی برای پیش‌بینی خردایش توده‌سنگ ناشی از آتشفباری در معادن روباز با استفاده از سیستم مهندسی سنگ فازی (مطالعه موردی: معدن مس سونگون) تحت راهنمایی دکتر رضا خالوکاکایی و دکتر رامین رفیعی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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 ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها 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 پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

مهم‌ترین هدف عملیات آتشکاری، خردایش مطلوب سنگ است زیرا بخش اعظمی از هزینه‌های تولید را شامل می‌شود. تاکنون مدل‌های تجربی زیادی در زمینه‌ی پیش‌بینی خردایش حاصل از انفجار، ارائه شده است. مدل‌های ارائه‌شده به گونه‌ای هستند که نمی‌توان همه‌ی پارامترهای مرتبط را در یک زمان و باهم در نظر گرفت. با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها و شرایط، پیش‌بینی خردایش حاصل از انفجار به روش‌های جدیدی مانند سیستم مهندسی سنگ نیاز است که این کاستی‌ها را جبران کند. در این پایان‌نامه، معدن مس سونگون به عنوان مطالعه‌ی موردی انتخاب و اطلاعات یازده مورد از انفجارهای آن، برای ساخت مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. این پارامترها شامل بارسنگ، خرج ویژه، نسبت فاصله‌ی جناحی چال‌ها به بارسنگ (S/B)، نسبت گل‌گذاری به بارسنگ (St/B)، ضریب سفتی (H/B)، تعداد ردیف، زمان تاخیر، انحراف چال، قطر چال، نسبت اضافه‌حفری به بارسنگ (J/B)، تعداد دسته درزه، بازشدگی درزه‌ها، فاصله داری درزه‌ها، تداوم درزه‌ها، پرشدگی، شیب و جهت شیب، مقاومت سنگ هستند. با استفاده از این پارامترها ماتریس اندرکنش فازی تشکیل و شاخص خردایش سنگ ارائه شد. در ادامه از روش آنالیز تصاویر Goldsize برای تعیین کیفیت خردایش استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد مدل ارائه‌شده، از شاخص‌های آماری ضریب تصمیم‌گیری و مجذور میانگین خطا بین خردایش پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (واقعی) استفاده شد، که به ترتیب ۰/۹۲ و ۱/۷۲ بدست آمد. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده از ماتریس اندرکنش فازی پارامترهای مقاومت سنگ و جهت‌داری درزه‌ها به عنوان مسلط‌ترین پارامترها بر سیستم بدست آمد و پارامترهای بارسنگ، خرج ویژه و نسبت فاصله‌داری جناحی چال‌ها به بارسنگ به عنوان پارامترهایی که بیشترین اندرکنش را در سیستم دارند، تعیین شد.

کلمات کلیدی: پیش‌بینی خردایش، سیستم مهندسی سنگ فازی، معدن مس سونگون، ماتریس

اندرکنش، Goldsize

فهرست مطالب

ک	فهرست جداول
م	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: کلیات
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ بیان مسأله
۳	۳-۱ ضرورت تحقیق
۴	۴-۱ اهداف تحقیق
۴	۵-۱ روش انجام کار
۵	۶-۱ ساختار پایان نامه
۷	فصل ۲: سابقه‌ی تحقیق و پارمترهای مؤثر در خردایش
۸	۱-۲ مقدمه
۸	۲-۲ سابقه‌ی علمی خردایش سنگ
۱۷	۳-۲ پارامترهای ورودی
۱۹	۱-۳-۲ بارسنگ
۲۰	۲-۳-۲ نسبت ارتفاع چال به بارسنگ (نسبت سفتی)
۲۰	۳-۳-۲ نسبت اضافه حفاری به بارسنگ
۲۱	۴-۳-۲ تعداد ردیف
۲۲	۵-۳-۲ نسبت طول گل‌گذاری به بارسنگ
۲۲	۶-۳-۲ نسبت فاصله‌داری جناحی چال‌ها به بارسنگ
۲۳	۷-۳-۲ انحراف چال

۲۴	..... تاخیر زمانی ۸-۳-۲
۲۴	..... قطر چال ۹-۳-۲
۲۵	..... خرج ویژه ۱۰-۳-۲
۲۶	..... فاصله‌داری درزه‌ها ۱۱-۳-۲
۲۶	..... بازشدگی درزه‌ها ۱۲-۳-۲
۲۷	..... تعداد دسته درزه و تداوم ناپیوستگی‌ها ۱۳-۳-۲
۲۷	..... جهت‌داری دسته‌دازه‌های اصلی ۱۴-۳-۲
۲۷	..... مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ ۱۵-۳-۲
۲۷	..... جمع‌بندی ۴-۲

۲۹ فصل ۳: سیستم‌های مهندسی سنگ

۳۰	..... مقدمه ۱-۳
۳۰	..... مفهوم سیستم و تفکر سیستمی ۲-۳
۳۱	..... رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) ۳-۳
۳۲	..... ماتریس‌های اندرکنش ۱-۳-۳
۳۴	..... کدگذاری ماتریس‌های اندرکنش ۲-۳-۳
۳۷	..... تشکیل ماتریس اندرکنش ۳-۳-۳
۳۷	..... تشکیل نمودار علت-اثر و هیستوگرام شدت اندرکنش ۴-۳-۳
۳۹	..... طبقه بندی پارامترهای سیستم ۵-۳-۳
۳۹	..... تعیین شاخص با توجه به موضوع کار ۶-۳-۳
۴۰	..... منطق فازی ۴-۳
۴۳	..... سیستم مهندسی سنگ فازی ۵-۳
۴۷	..... جمع بندی ۶-۳

فصل ۴: معدن مس سونگون

۴۹

۱-۴ مقدمه ۵۰

۲-۴ معرفی معدن ۵۰

۱-۲-۴ موقعیت جغرافیایی معدن مس سونگون ۵۰

۲-۲-۴ شرایط آب و هوایی منطقه ۵۱

۳-۲-۴ زمین شناسی کانسار مس سونگون ۵۱

۳-۴ پارامترهای اکتشافی معدن مس سونگون ۵۲

۴-۴ حفاری ۵۳

۱-۴-۴ دستگاه حفاری بهلر (BOHLER-TD222) ۵۳

۲-۴-۴ دستگاه حفاری هولمن (HOLMAN) ۵۳

۵-۴ آتشکاری ۵۵

۶-۴ بارگیری ۵۶

۷-۴ باربری ۵۷

۸-۴ جمع‌بندی ۵۷

فصل ۵: ارائه‌ی شاخصی برای پیش‌بینی خردایش با استفاده از سیستم مهندسی سنگ ۵۹

۱-۵ مقدمه ۶۰

۲-۵ برداشت داده ۶۰

۳-۵ بررسی خردایش حاصل از انفجار ۶۴

۴-۵ تشکیل ماتریس اندرکنش ۷۴

۵-۵ کاربرد ماتریس اندرکنش ۷۶

۶-۵ محاسبه‌ی شاخص خردایش ۸۱

۷-۵ رده‌بندی پیشنهادی برای پارامترهای خردایش ۸۲

۸-۵ ارزیابی ریسک خردایش ۸۴

۹-۵ پیش بینی اندازه‌ی ۸۰٪ عبوری بر اساس سیستم مهندسی سنگ فازی ۸۵

۱۰-۵ جمع‌بندی ۸۶

۸۹ فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۶ نتیجه‌گیری ۹۰

۲-۶ پیشنهادات ۹۲

۹۸ پیوست

۹۳ مراجع

فهرست جداول

- جدول ۱-۲. مقادیر پارامترهای فاکتور سنگ ۱۰
- جدول ۲-۲. ثابت سنگ ارائه شده توسط سانچیدرین ۱۱
- جدول ۳-۲. راهکارهایی برای بهبود خردشدگی در تشکیلات درزه دار و توده ای ۱۳
- جدول ۴-۲. پارامترهای مورد استفاده برای پیش بینی خردایش ۱۸
- جدول ۵-۲. نتیجه ی خردایش در مقادیر مختلف نسبت سفتی ۲۰
- جدول ۶-۲. تاخیرهای پیشنهادی توسط پژوهشگران مختلف ۲۴
- جدول ۱-۳. ماتریس اندرکنش 3×3 برای پارامترهای مکانیک سنگی ۳۳
- جدول ۱-۴. پارامترهای اکتشافی معدن مس سونگون ۵۲
- جدول ۱-۵. پارامترهای مهندسی توده سنگ معدن مس سونگون ۶۲
- جدول ۲-۵. اطلاعات برداشت شده برای انفجارهای مورد بررسی ۶۳
- ادامه ی جدول ۳-۵. جدول اطلاعات برداشت شده برای انفجارهای مورد بررسی ۶۴
- جدول ۴-۵. رده بندی کیفی وضعیت خردایش ۶۷
- جدول ۵-۵. انفجار انتخابی ۱ ۶۸
- جدول ۶-۵. انفجار انتخابی ۲ ۷۰
- جدول ۷-۵. انفجار انتخابی ۳ ۷۲
- جدول ۸-۵. بیان کیفی انفجارهای بررسی شده ۷۴
- جدول ۹-۵. پارامترهای ورودی ۷۵
- جدول ۱۰-۵. ماتریس اندرکنش تهیه شده ۷۶
- جدول ۱۱-۵. پرسش نامه ی تکمیل شده توسط مهندس سامان دیلمقانی، مهندس آتشبار معدن مس سونگون ۷۷

جدول ۵-۱۲. ماتریس اندرکنش فازی.....	۷۸
جدول ۵-۱۳. مقادیر تاثیرگذاری و تاثیرپذیری و شدت اندرکنش و وزن پارامترهای موثر در خردایش.....	۷۹
جدول ۵-۱۴. رده‌بندی پیشنهادی پارامترهای ورودی.....	۸۲
جدول ۵-۱۵. ادامه‌ی جدول رده‌بندی پیشنهادی پارامترهای ورودی.....	۸۳
جدول ۵-۱۶. سطح ریسک بر اساس شاخص خردایش.....	۸۴
جدول ۵-۱۷. شاخص‌های محاسبه شده برای انفجارهای مختلف.....	۸۴
جدول ۵-۱۸. D_{80} بدست آمده از برداشت‌های واقعی سر معدن و پیش‌بینی شده توسط مدل ارائه- شده.....	۸۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲. تاثیر طول گل گذاری بر یکنواختی خردایش برای $X_{80} = 30 \text{ cm}$ و $X_{80} = 80 \text{ cm}$ با تغییر قطر چال..... ۲۳
- شکل ۲-۳. هزینه‌ی آتشکاری در محدوده‌ی قطرهای ۷۵ میلی‌متر تا ۳۵۰..... ۲۵
- شکل ۱-۳. مفهوم تفکر سیستمی ۳۱
- شکل ۲-۳. مفهوم ساختار رویکرد سیستم‌ها ۳۱
- شکل ۳-۳. مفهوم ماتریس اندرکنش برای سیستمی شامل دو پارامتر A و B ۳۳
- شکل ۴-۳. روش دوم کدگذاری ماتریس اندرکنش در رویکرد RES ۳۶
- شکل ۵-۳. نحوه‌ی شکل‌گیری محورهای علت و اثر در ماتریس اندرکنش ۳۸
- شکل ۶-۳. نمودار علت - اثر ۳۹
- شکل ۷-۳. مراحل مدل‌سازی فازی ۴۱
- شکل ۸-۳. مجموعه فازی برای هر ورودی سیستم فازی ۴۵
- شکل ۹-۳. خروجی سیستم فازی ۴۵
- شکل ۱۰-۳. سیستم فازی با ۵ ورودی، ۳۲ قانون و یک خروجی ۴۶
- شکل ۱-۴. موقعیت جغرافیایی معدن مس سونگون ۵۱
- شکل ۳-۴. دستگاه چال‌زنی معدن مس سونگون ۵۴
- شکل ۴-۴. کروکی طراحی شده برای حفر چال‌ها ۵۵
- شکل ۵-۴. دستگاه خرج‌گذاری معدن مس سونگون (آنفوتراک) ۵۶

- شکل ۴-۶. بارگیری دامپتراک توسط شاول ۵۸
- شکل ۴-۷. باربری معدن مس سونگون (دامپتراک) ۵۸
- شکل ۵-۱. پهنه‌بندی معدن مس سونگون ۶۱
- شکل ۵-۲. ترسیم ناپیوستگی‌های پهنه‌ی شماره‌ی ۱۰ بر روی شبکه‌های قطبی ۶۲
- شکل ۵-۳. نمونه عکس آنالیز شده دستی در نرم‌افزار Goldsize ۶۶
- شکل ۵-۴. نمودار توزیع ابعاد خردایش بدست‌آمده از نرم‌افزار Goldsize ۶۷
- شکل ۵-۵. خروجی نرم‌افزار Goldsize ۶۷
- شکل ۵-۶. نمودار خردایش عکس‌های انفجار انتخابی ۱ ۶۹
- شکل ۵-۷. نمودار خردایش انفجار انتخابی ۱ ۶۹
- شکل ۵-۸. نمودار خردایش عکس‌های انفجار انتخابی ۲ ۷۱
- شکل ۵-۹. نمودار خردایش انفجار انتخابی ۲ ۷۱
- شکل ۵-۱۰. نمودار خردایش عکس‌های انفجار انتخابی ۳ ۷۳
- شکل ۵-۱۱. نمودار خردایش انفجار انتخابی ۳ ۷۳
- شکل ۵-۱۲. نمودار علت - اثر ۸۰
- شکل ۵-۱۳. هیستوگرام شدت اندرکنش برای پارامترهای ورودی ۸۱
- شکل ۵-۱۴. نمودار ارتباط بین شاخص خردایش و برداشت‌های واقعی ۸۵
- شکل ۵-۱۵. ضریب تعیین R^2 بین D_{80} بدست آمده از برداشت‌های واقعی سر معدن و پیش‌بینی شده توسط مدل ارائه‌شده ۸۶

فصل ۱: کلیات

۱-۱ مقدمه

مهمترین هدف عملیات آتشباری در معادن سطحی، خردایش سنگ است. به طور کلی گسترش شکستگی در سنگ و تبدیل شدن آن به قطعات ریزتر که به وسیله انفجار یا به وسیله ابزار دیگر بدست می‌آید را خردایش گویند. در معادن روباز میزان خردشدگی تاثیر زیادی را بر هزینه‌های واحدهای پایین دست، از جمله بارگیری، باربری و سنگ‌شکنی دارد. از این رو پیش‌بینی خردشدگی و انتخاب الگوی انفجار بر اساس آن، به کاهش هزینه‌های ذکر شده منجر خواهد شد. به منظور دستیابی به خردایش مناسب لازم است تا با شناسایی عوامل تأثیرگذار بر آن، به خردایش مطلوب رسید.

به طور کلی عوامل تأثیرگذار بر روی عملیات آتشباری را می‌توان به دو گروه عمده شامل، پارامترهای قابل کنترل و پارامترهای غیرقابل کنترل تقسیم‌بندی نمود. از پارامترهای قابل کنترل می‌توان به قطر چال، ضخامت بارسنگ، فاصله ردیفی چال‌ها، ارتفاع پله، نوع ماده‌ی منفجره مصرفی، نوع و روش خرج‌گذاری، زمان تأخیر، کیفیت و مقدار طول گل‌گذاری، اندازه اضافه حفاری، شیب چال، ابعاد بلوک انفجاری، دقت حفاری، نوع و تعداد پرایمر مصرفی، امکان استفاده از خرج‌گذاری منقطع و ملاحظات مربوط به جمع‌آوری مواد خردشده از انفجار قبلی اشاره نمود. از پارامترهای غیرقابل کنترل می‌توان به وزن مخصوص سنگ، مقاومت‌های فشاری، برشی و کششی، خصوصیات ناپیوستگی‌ها و غیره اشاره نمود. در این فصل ابتدا به بیان مسأله پیرامون پیش‌بینی خردایش حاصل از آتشکاری پرداخته می‌شود و در ادامه، ضرورت انجام این پایان‌نامه و اهداف آن به اختصار توضیح داده خواهد شد.

۱-۲ بیان مسأله

محققین زیادی در گذشته روابطی تجربی را جهت پیش‌بینی خردایش حاصل از انفجار ارائه داده‌اند که با توجه به شرایط پیچیده حاکم بر عملیات آتشباری، نتایج حاصل‌شده، چندان مطلوب نبوده است. اشکال روش‌های تجربی این است که قابل تعمیم برای شرایط مختلف زمین و انواع الگوهای مختلف

آتشباری نیستند. مدل‌های ارائه شده به گونه‌ای هستند که نمی‌توان همه‌ی پارامترهای مرتبط را در یک‌زمان و باهم در نظر گرفت. با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها و شرایط، پیش‌بینی خردایش حاصل از انفجار به روش‌های جدیدی مانند سیستم مهندسی سنگ^۱، نیاز دارد که این کاستی‌ها را جبران کند و با آن بتوان همه‌ی پارامترها را در نظر گرفت. سیستم مهندسی سنگ، محدود به عوامل خاص نمی‌شود و می‌توان بسته به اهداف فعالیت و شرایط آن، تعداد عوامل موثر را افزایش داد و شدت اثرگذاری هر یک را بررسی نمود.

۳-۱ ضرورت تحقیق

عملیات آتشباری یکی از مهم‌ترین فرآیندهای استخراجی در معادن روباز است. که سایر فرآیندها به نحوی در ارتباط مستقیم و یا غیرمستقیم با آن می‌باشند. به‌طور کلی آتشباری در معادن به منظور خرد کردن باطله و ماده‌ی معدنی انجام می‌گیرد. بنابراین اندازه‌ی سنگ‌های منفجر شده باید به اندازه‌ی کافی کوچک باشند که به راحتی داخل جام سیستم بارگیری جای گیرند و نیاز به انفجار ثانویه نداشته باشند. از سویی ابعاد قطعات ماده‌ی معدنی خرد شده، تاثیر به‌سزایی در راندمان عملیات خردایش و سنگ‌شکنی کارخانه‌ی کانه‌آرایی دارند. بر این اساس، در دو مرحله‌ی اول عملیات معدنکاری یعنی چالزنی و آتشباری، با توجه به سیستم بارگیری، سیستم باربری و سنگ‌شکن اولیه، خردایش سنگ تا ابعاد خاصی طراحی می‌شود و در صورت رسیدن به خردایش موردنظر، هزینه‌های سایر مراحل تولید کاهش می‌یابد. زیرا هزینه‌های حفاری و انفجار در مورد سنگ‌های سخت با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده از تعدادی از معادن روباز حدود ۳۰ درصد از کل هزینه مستقیم تولید را تشکیل می‌دهد، که با افزایش قطعات بزرگ و نیاز به انفجار ثانویه تا ۵۰ درصد نیز افزایش می‌یابد [۱].

^۱ Rock Engineering System = RES

معدن مس سونگون هم از این فائده مستثنی نیست. از آنجایی که عملیات استخراج مورد نیاز کارخانه به روش چالزنی و آتشیاری انجام می‌گیرد، لازم است تا با پیش‌بینی خردایش ناشی از آتشیاری، پارامترهای طراحی الگوی آتشیاری را اصلاح کرد، تا دانه‌بندی مواد تولیدی در محدوده‌ی موردنیاز سنگ‌شکن‌های کارخانه قرار گیرند و از تولید بولدرهای بزرگ که باطله موقت (که با انجام عملیات حفاری قابل مصرف خواهند بود) تلقی می‌شود، جلوگیری کند.

۱-۴ اهداف تحقیق

هدف این پایان‌نامه ارائه‌ی شاخصی برای پیش‌بینی خردایش توده سنگ ناشی از آتشیاری در معادن روباز با استفاده از سیستم مهندسی سنگ فازی می‌باشد، برای این منظور، معدن مس سونگون به عنوان مطالعه‌ی موردی انتخاب شده است.

۱-۵ روش انجام کار

به منظور انجام این تحقیق، ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده و منابع گردآوری شده است. نواقص روش‌های تحلیلی و تجربی در محاسبات پیش‌بینی خردایش حاصل از آتشیاری مورد بررسی قرار گرفته و دلایل لزوم استفاده از روش سیستم مهندسی سنگ فازی بررسی شده است. سپس پارامترهای مؤثر در خردایش سنگ مورد مطالعه قرار گرفته است، در نهایت، با جمع‌آوری اطلاعات لازم از معدن مس سونگون، مدلی برای پیش‌بینی خردایش حاصل از آتشیاری با استفاده از سیستم مهندسی سنگ فازی ارائه شده است.

۱-۶ ساختار پایان نامه

این پایان نامه در ۵ فصل تنظیم شده است.

فصل ۱: در این فصل، کلیاتی در مورد موضوع، ضرورت و هدف انجام تحقیق و مراحل انجام کار آورده شده است.

فصل ۲: در این فصل، سابقه کارهای علمی صورت گرفته، بررسی شده است و پارامترهای بررسی شده توسط سایر محققان در خصوص پیش بینی خردایش حاصل از آتشیاری مطالعه شده است. در ادامه با توجه به پارامترهای استفاده شده در کارهای گذشته، درباره ی پارامترهای ورودی این پایان نامه تصمیم گیری شده است.

فصل ۳: در این فصل، به مباحث نظری در مورد سیستم مهندسی سنگ و نحوه ی فازی سازی آن در این پایان نامه پرداخته شده است.

فصل ۴: در این فصل، معدن مس سونگون معرفی شده است.

فصل ۵: در این فصل، با استفاده از سیستم مهندسی سنگ فازی، مدلی برای پیش بینی خردایش حاصل از آتشیاری ارائه شده است و در ادامه، نتایج حاصل از پیش بینی مدل ارائه شده توسط مدل با نتایج حاصل از آنالیز تصویری خردایش برداشت شده ی واقعی سر معدن مقایسه شده است.

فصل ۶: در این فصل، نتایج حاصل از تحقیق ارائه شده است و پیشنهادات برای بهبود مطالعات بعدی، بیان شده است.

فصل ۲: سابقه‌ی تحقیق و پارامترهای موثر در خریدارانش

۲-۱ مقدمه

پیش‌بینی ابعاد خردشدگی حاصل از انفجار، اولین قدم در بهینه‌سازی پارامترهای طراحی برای رسیدن به خردایش مورد نیاز است. مطالعات مختلفی در رابطه با پیش‌بینی خردایش با پارامترهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل انجام شده است. در این فصل به بررسی سابقه علمی موضوع پایان‌نامه و پارامترهای موثر بر خردایش، پرداخته شده است. و در نهایت پارامترهایی که در این پایان‌نامه جهت پیش‌بینی خردایش مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به اختصار توضیح داده شده است.

۲-۲ سابقه علمی خردایش سنگ

حدود ۵۰ سال پیش مکنزی^۱ منحنی‌هایی را ارائه داد، که وابستگی واحدهای گوناگون معدنکاری را در معدن (Quebec-Cartier) به خردایش نشان می‌داد. وی نشان داد، با افزایش خردایش تا حد بهینه، هزینه‌های بارگیری و باربری و سنگ‌شکنی کاهش می‌یابد [۱]. در حالی که هزینه‌های حفاری و آتشیاری با افزایش خردایش، افزایش می‌یابد.

در سال ۱۹۷۳، کوزنتسو^۲ مدلی بر مبنای رابطه‌ی بین ابعاد خردشدگی و خرج ویژه ارائه داد [۲]:

$$\bar{X} = A \times \left(\frac{V_R}{Q_T} \right)^{0.8} \times Q_T^{1.6} \quad (1-2)$$

که در این رابطه، \bar{X} متوسط ابعاد شکست (سانتی‌متر)؛ A فاکتور سنگ، V برای سنگ متوسط، 10 برای سنگ سخت و خیلی سخت، 13 برای سنگ سخت و با شکستگی کم؛ V_R حجم سنگ بر حسب مترمکعب؛ Q_T مقدار TNT لازم برای انفجار است و در صورتی که از آنفو به جای TNT استفاده شود با توجه به نسبت قدرت TNT به آنفو رابطه‌ی (۱-۲) به صورت رابطه‌ی (۲-۲) محاسبه می‌شود:

$$\bar{X} = A \times \left(\frac{V_R}{Q_e} \right)^{0.8} \times Q_e^{1.6} \left(\frac{S_{ANFO}}{115} \right)^{-19.30} \quad (2-2)$$

¹ Mackenzie

² Kuznetsov

که در آن Q_e جرم ماده‌ی منفجره مورد استفاده بر حسب کیلوگرم و S_{ANFO} قدرت نسبی ماده منفجره نسبت به آنفو است. اگر k خرج ویژه بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب باشد، داریم:

$$\frac{V_R}{Q_e} = \frac{1}{k} \quad (3-2)$$

در نهایت می‌توان از رابطه‌ی زیر برای محاسبه خرج ویژه مورد نیاز بر اساس خردایش مورد نیاز استفاده کرد [۲]:

$$K = \left[\frac{A}{\bar{X}} Q_e^{1.6} \left(\frac{115}{S_{ANFO}} \right)^{19.30} \right]^{1.25} \quad (4-2)$$

کانینگهام^۱ در سال ۱۹۸۳، برای اعمال ویژگی‌های توده‌سنگ در تعیین میانگی خردشدگی، از شاخص قابلیت انفجارپذیری ارائه‌شده توسط لیلی^۲، استفاده نمود و فاکتورسنگ (A) (جدول ۱-۲)، را که با رابطه‌ی (۵-۲) بیان شده، معرفی کرد، در جدول ۱-۲ مقادیر پارامترهای فاکتورسنگ آورده شده است [۳]:

$$A = 0.06 \times (RMD + JF + RDI + HF) \quad (5-2)$$

$$JF = JPS + JPA \quad (6-2)$$

در این رابطه: JPA: زاویه صفحه درزه^۳، RMD: توصیف توده سنگ^۴، JPS: فاصله‌داری درزه‌ها^۵، JPO: جهت‌یافتگی درزه‌ها^۶، HF: فاکتور سختی^۷ و RDI: تاثیر دانسیته^۸ است.

تعیین توزیع خردایش قطعات به اهمیت اندازه‌ی میانگین قطعات است. مدل رزین - رامر^۹، می‌تواند برای توصیف اندازه‌ی قطعات خردشده پس از انفجار استفاده شود [۴]:

$$R = e^{-\left(\frac{X}{X_c}\right)^n} \quad (7-2)$$

¹ Cunningham

² Lilly

³ Joint Plane Angle

⁴ Rock Mass Description

⁵ Joint Plane Spacing

⁶ Joint Plane Orientation

⁷ Hardness factor

⁸ Rock Density Index

⁹ Rosin-Rammler

که در رابطه بالا n : اندیس یکنواختی، X : اندازه‌ی قطعه، X_c : اندازه‌ی مشخصه‌ای، اندازه‌ای که $۶۳/۲\%$ مواد از سرنندی با اندازه‌ی X_c از آن عبور کند و R : درصد مواد باقی‌مانده روی سرنند.

مدل کوزنتسو و مدل رزین - راملر وقتی ترکیب شوند "کوز-رام" نامیده می‌شود. برای محاسبه‌ی بعد مشخصه‌ای رابطه رزین - راملر را می‌توان به صورت زیر نوشت [۴]:

$$X_c = \frac{X}{\left[\ln \frac{1}{R} \right]^{1/n}} \quad (۸-۲)$$

از آن جایی که رابطه کوزنتسو به اندازه‌ی متوسط که همان ۵۰% است، اشاره دارد بنابراین $X = \bar{X}$ و $R = ۵۰$

$$X_c = \frac{\bar{X}}{(0.693)^{1/n}} \quad (۹-۲)$$

جدول ۱-۲. مقادیر پارامترهای فاکتور سنگ [۵]

RMD	شاخص توصیف توده سنگ
۱۰	ترد و خیلی خرد شده
۲۰	سنگ بلوکی
۵۰	سنگ توده ای
JPS	فاصله دو سطح ناپیوستگی
۱۰	کمتر از ۰/۱ متر یا بسته
۲۰	بین ۰/۱-۱ متر یا متوسط
۵۰	بزرگتر از ۱ متر یا عریض
JPA	جهت یافتگی ناپیوستگی
۱۰	بصورت افقی
۲۰	شیب ناپیوستگی به طرف بیرون
۳۰	امتداد ناپیوستگی عمود بر سطح آزاد
۴۰	شیب ناپیوستگی به سمت داخل دامنه
RDI	شاخص تاثیر چگالی سنگ
۲۵ - ۵۰ RD	وزن مخصوص (تن بر متر مکعب)
HF	فاکتور سختی
یک سوم مدول یانگ مدول یانگ (Gpa)	کمتر از ۵۰ گیگا پاسکال
یک پنجم مقاومت فشاری تک محوری سنگ (Mpa)	مدول یانگ بیش از ۵۰ گیگا پاسکال

^۱ Young's Modulus

پارامتر n نیز توسط کانینگهام در سال ۱۹۸۷ به صورت زیر ارائه شده است [۶]:

$$n = \left(2.2 - 14 \frac{B}{D} \right) \left[\frac{1 + \frac{S}{B}}{2} \right] \left(1 - \frac{DEV}{B} \right) \left(\frac{LE}{H} \right) \quad (10-2)$$

که در رابطه‌ی بالا B: بارسنگ، D: قطر چال، S: فاصله‌ی ردیف‌های انفجار، DEV: انحراف چال بر حسب متر، LE: طول خرج‌گذاری بر حسب متر، H: ارتفاع پله بر حسب متر است.

مدل سوئدیفو^۱، نیز توسط جلمبرگ^۲ برای پیش‌بینی X₅₀ با توجه به الگوی انفجار و مشخصات توده سنگ ارائه شد [۷]. در این مدل برای تعیین کل توزیع خردشدگی از تابع رزین - راملر با شاخص یکنواختی ثابت ۱/۳۵ استفاده شده است:

$$X_{50} = 0.143 \left(B^2 \sqrt{\frac{1.25}{\frac{S}{B}}} \right)^{0.29} \left(\frac{C}{s \cdot q} \right)^{1.35} \quad (11-2)$$

که در آن S: فاصله‌ی چال‌ها در یک ردیف (متر)، B: بارسنگ (متر)، s که قدرت ماده‌ی منفجره نسبت به دینامیت سوئدی که برای آنفو معادل ۰/۸۴ است، q: خرج ویژه (کیلوگرم بر متر مکعب)، C: ثابت سنگ که توسط لانگ‌فورس^۳ در سال ۱۹۶۳ تعیین شد که معمولاً بین ۰/۳ تا ۰/۵ کیلوگرم بر مترمکعب است. سانچیدرین^۴ در سال ۲۰۰۲ این مقدار را برای انواع سنگ‌ها کالیبره نمود که نتایج کار وی در جدول ۲-۲ زیر آمده است [۸].

جدول ۲-۲. ثابت سنگ ارائه‌شده توسط سانچیدرین [۸]

نوع سنگ	خرج ویژه (کیلوگرم بر متر مکعب)	ثابت سنگ (C)
آندزیت، دولریت، گرانیت، سنگ آهن	۰/۷	۰/۶۲
دولومیت، کوارتزیت، سرپانتین	۰/۴۵	۰/۴
ماسه سنگ، سنگ آهک، شیل	۰/۳۰	۰/۲۷
زغال	۰/۲۵-۰/۱۵	۰/۲۲-۰/۱۴

^۱ Svedefo

^۲ Hjelmberg

^۳ Langefors

^۴ Sanchidrian

در سال ۱۹۹۵ دنیس^۱ و گاما^۲ مدلی را ارائه دادند که به صورت زیر است [۹]:

$$R(x) = aW^b \cdot \left[\frac{x}{B} \right]^c \quad (12-2)$$

که در این رابطه $R(x)$ درصد تجمعی قطعات کوچکتر از دهانه‌ی سرند x ، W انرژی لازم برای خردشدگی بر حسب کیلووات ساعت بر تن، B ضخامت بار سنگ بر حسب متر، X دهانه‌ی سرند به سانتی‌متر و a ، b و c ثابت‌هایی هستند که به خصوصیات سنگ و مواد منفجره بستگی دارند.

در این رابطه مقدار W از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$W = 10 \frac{W_i}{\sqrt{d_{80}}} \quad (13-2)$$

که در این رابطه W_i اندیس باند سنگ و d_{80} دهانه‌ی سرندی است که ۸۰ درصد قطعات از آن عبور می‌کند.

لو^۳ و لاتهام^۴ در سال ۱۹۹۸، ویژگی‌های سنگ بکر و ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ را به عنوان مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر انفجار معرفی کردند. آن‌ها با تعریف انفجار به عنوان تغییر شکل توزیع اندازه‌ی درجا به توزیع اندازه‌ی توده‌ی خردشده، مدلی تحت عنوان مدل انرژی-بلوک-انتقال را که در آن از قابلیت انفجارپذیری توده‌سنگ استفاده شده بود، ارائه کردند [۱۰].

چاکرابورتی^۵ و همکاران در سال ۲۰۰۴، با آنالیز خطی داده‌های حاصل از ۳۵ انفجار در سه معدن بزرگ، درجه‌ی تاثیر پارامترهای مختلف از جمله مدول یانگ، مقاومت فشاری تک محوره و ... را بررسی نموده و راهبردهای نتیجه‌بخشی را برای بهبود خردایش حاصل از انفجار در سنگ‌های درزه‌دار و توده‌ای ارائه کرده‌اند، نتایج مطالعات آن‌ها در جدول ۲-۳ نشان داده شده است [۱۱].

¹ Denis

² Gamma

³ Lu

⁴ Latham

⁵ Chakraborty

در سال ۲۰۰۶، مورین^۱ و فیکارزو^۲ از شبیه‌سازی مونت کارلو^۳ به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی خردایش استفاده کردند. در این تحقیق که بر اساس مدل "کوز-رام" صورت گرفت، از ویژگی‌های سنگ سالم و درزه‌دار، نوع و ویژگی‌های ماده منفجره و الگوی انفجار به عنوان پارامترهای ورودی استفاده شد. نتایج بدست‌آمده از مدل ساخته‌شده، در مقایسه با خردایش واقعی قابل قبول بودند. با شبیه‌سازی مونت کارلو، درک تأثیرات ویژگی‌های توده‌سنگ و ماده منفجره بر روی خردایش ناشی از انفجار افزایش یافت، همچنین میزان اعتماد به مدل "کوز-رام" نیز افزایش یافت [۱۲].

جدول ۲-۳. راهکارهایی برای بهبود خردشدگی در تشکیلات درزه‌دار و توده‌ای [۱۱]

راهکارهایی برای بهبود خردشدگی			RQD	نوع تشکیلات
افزایش ارتفاع پله	کاهش طول گل‌گذاری	افزایش نسبت فاصله‌ی چال‌ها در یک ردیف به بار سنگ	کمتر از ۶۰	درزه دار
کاهش بارسنگ	افزایش نسبت فاصله‌ی چال‌ها در یک ردیف به بار سنگ	کاهش انحراف حفاری	بیشتر از ۶۰	توده‌ای

اورعی و همکاران در سال ۲۰۰۶، با استفاده از شبکه‌های عصبی مقدار خردایش را در معدن گل‌گهر سیرجان پیش‌بینی کردند. در این تحقیق از پارامترهای نوع سنگ، چگالی سنگ، فاصله‌ی جناحی چال‌ها، طول گل‌گذاری، ارتفاع چال‌ها، طول خرج، وزن ماده‌ی منفجره، نوع ماده‌ی منفجره، ارتفاع آب در چال، خرج ویژه استفاده شده است، که پس از انجام آنالیز حساسیت، مشخص شد که خرج ویژه و فاصله‌ی جناحی چال‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار است [۱۳].

¹ Morin

² Ficarazzo

³ Monte Carlo

کایلاک^۱ در سال ۲۰۰۹، تاثیر ویژگی‌های توده‌سنگ (وزن مخصوص، آب‌محتوا، مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) را بر نتایج خردشدگی حاصل از انفجار بررسی نمود. کایلاک نشان داد که از بین ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی توده‌سنگ تنها بین زاویه‌ی اصطکاک داخلی، مقاومت کششی و خردشدگی همبستگی بالایی وجود دارد [۱۴].

منجری و همکاران در سال ۲۰۰۹ با استفاده از روش‌های فازی مقدار خردایش را در معدن گل‌گهر سیرجان پیش‌بینی کردند. پارامترهای ورودی این تحقیق بارسنگ، فاصله‌ی جناحی چال‌ها، ارتفاع چال‌ها، حفاری ویژه، طول گل‌گذاری، خرج بر تاخیر، چگالی سنگ و خرج ویژه است. در این تحقیق مشخص شد که روش‌های فازی با ضریب تعیین ۰/۹۶، کارایی بهتری نسبت به روش‌های رگرسیون با ضریب تعیین ۰/۸ دارند [۱۵].

منجری و همکاران در سال ۲۰۱۰، با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی مقدار خردایش را در معدن سنگان پیش‌بینی کردند. در این تحقیق از پارامترهای قطر چال، میانگین ارتفاع چال، نسبت بارسنگ به فاصله‌ی جناحی چال‌ها، طول گل‌گذاری، خرج ویژه چگالی سنگ، مقدار خرج در هر تاخیر استفاده شده است. ضریب تعیین بین مقدار اندازه‌گیری خردایش واقعی و پیش‌بینی‌شده توسط مدل ۰/۹۷ بدست آمد [۱۶].

در سال ۲۰۱۰، کولاتیلاکه^۲ از شبکه‌ی عصبی برای پیش‌بینی خردایش سنگ استفاده کرد. در این مطالعه پارامترهای نسبت فاصله ردیفی چالها به بارسنگ، نسبت ارتفاع چال به بارسنگ، نسبت بارسنگ به قطر چال، نسبت طول گل‌گذاری به بارسنگ، خرج ویژه، اندازه بلوک اصلی، مدول الاستیک در نظر گرفته شده است [۱۷].

^۱ Kılıccedil

^۲ Kulatilake

هوداوردی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۲، از مدل‌های پیش‌بینی شاخص خردایش و اندازه‌ی خردایش اصلی برای پیش‌بینی خردایش استفاده کردند. در این تحقیق از پارامترهای بارسنگ، فاصله‌داری جناحی چال‌ها، طول گل‌گذاری، ارتفاع چال، خرج ویژه استفاده شده است [۱۸].

صیادی و همکاران در سال ۲۰۱۳، با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی، مدلی برای پیش‌بینی خردایش ناشی از انفجار ارائه دادند. پارامترهای ورودی بارسنگ، فاصله‌ی جناحی چال‌ها، طول گل‌گذاری، ارتفاع چال، حفاری ویژه و خرج ویژه هستند، نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که طول گل‌گذاری و بارسنگ موثرترین پارامترها در خردایش سنگ هستند [۱۹].

کرمی و افیونی زاده در سال ۲۰۱۳، با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی خردایش ناشی از انفجار را در معدن گل‌گهر سیرجان پیش‌بینی کردند. پارامترهای ورودی شامل: بارسنگ، خرج ویژه، مقاومت فشاری تک محوره، نسبت فاصله‌ی جناحی چال‌ها به بارسنگ، تعداد ردیف، نسبت طول گل-گذاری به بارسنگ و ماکزیمم میزان خرج در هر تاخیر در نظرگرفته شد. ضریب تعیین بین مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی واقعی و نتیجه‌ی حاصل از مدل ارائه شده ۰/۸۳ بدست آمد [۲۰].

در سال ۲۰۱۳ فرامرزی و همکارانش مدلی را برای پیش‌بینی خردایش حاصل از انفجار بر اساس سیستم‌های مهندسی سنگ ارائه کردند. این روش با ۱۶ پارامتر موثر بر خردایش با قابلیت اندازه‌گیری ساده برای پیش‌بینی خردایش حاصل از آتشفباری در معدن مس سونگون با استفاده از روش RES و همچنین روش کوز-رام و رگرسیون‌های چندگانه مورد استفاده قرار گرفت نتایج حاصل از مدل جدید، برای ۹ انفجار خردایش اندازه‌گیری شده و با نتایج بدست آمده از روش کوز-رام و رگرسیون‌های چندگانه مقایسه شد. ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا برای مدل‌ها محاسبه شد. برای RES، رگرسیون خطی، چندجمله‌ای، لگاریتمی، نمایی و مدل کوزرام ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر با (۰/۶۵ و ۱۴/۵۱)، (۰/۵۸ و ۲۹/۷۳)، (۰/۵۴ و ۲۱/۵۸)، (۰/۶۱ و ۲۳/۸)،

^۱ Hudaverdi

(۰/۵ و ۱۸/۴۶) و (۰/۴۶ و ۲۲/۲۲) بدست آمد. این نتایج نشانگر این است که مدل RES با R^2 بالاتر و RMSE پایین تر، بهتر از سایر مدل‌ها پیش‌بینی را انجام داده است [۲۱].

شمس و همکاران در سال ۲۰۱۵، با استفاده از روش‌های استنتاج فازی، مدلی برای پیش‌بینی خردایش در معدن سرچشمه ارائه دادند. در این تحقیق از پارامترهای بارسنگ، فاصله‌ی جناحی چال‌ها، قطر چال، طول گل‌گذاری، خرج ویژه، ضریب چکش اشمیت، چگالی درزه‌ها استفاده شده است، در ادامه برای مقایسه، از روش تحلیل رگرسیون چندگانه نیز استفاده شد. نتایج ضریب تعیین و مجذور میانگین خطا برای روش استنتاج فازی به ترتیب ۰/۹۲۲ و ۲/۴۲ و برای روش تحلیل رگرسیون چندگانه به ترتیب ۰/۷۳۸ و ۴/۳۹۳ بدست آمد، مقایسه‌ی شاخص‌های عملکرد مدل‌های پیش‌بینی نشان‌دهنده‌ی برتری روش استنتاج فازی بر روش تحلیل رگرسیون چندگانه بود. همچنین نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که بارسنگ، فاصله‌ی جناحی چال‌ها و خرج ویژه موثرترین پارامترها در خردایش سنگ هستند [۲۲].

ابراهیمی و همکاران در سال ۲۰۱۶، از روش‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی و الگوریتم کلونی زنبور برای پیش‌بینی خردایش ناشی از در معدن سرب و روی انگوران استفاده کردند و پارامترهای در نظر گرفته شده شامل: بارسنگ، فاصله‌ی جناحی چال‌ها، طول گل‌گذاری، ارتفاع چال و خرج ویژه هستند. مجذور میانگین مربعات خطا برای شبکه‌ی عصبی مصنوعی و الگوریتم کلونی زنبور به ترتیب ۰/۵۳ و ۲/۷۶ بدست آمد که نشان دهنده‌ی عملکرد بهتر روش عصبی مصنوعی است [۲۳].

حسینی‌پناه و همکاران در سال ۲۰۱۶، با استفاده از روش سیستم مهندسی سنگ و رگرسیون چندگانه‌ی غیرخطی، خردایش ناشی از انفجار را در معدن سرچشمه بررسی کردند، پارامترهای ورودی شامل: بارسنگ، خرج ویژه، نسبت فاصله‌ی جناحی چال‌ها به بارسنگ، نسبت طول گل‌گذاری به بار سنگ، فاکتور سفتی (نسبت ارتفاع پله به بارسنگ)، تعداد ردیف، انحراف چال، قطر چال، نسبت قطر چال به بار سنگ. مجذور میانگین مربعات خطا برای روش‌های سیستم مهندسی سنگ و رگرسیون چندگانه

غیرخطی به ترتیب ۱/۹۵ و ۴/۰۲۲ بدست آمد، که نشان دهنده‌ی برتری مدل سیستم مهندسی سنگ نسبت به رگرسیون چندگانه‌ی غیر خطی است [۲۴].

در سال ۲۰۱۶، غیاسی و همکاران از مدل رگرسیون چندگانه و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش بینی خردایش استفاده کردند در این مطالعه مدل رگرسیون چندگانه عملکرد بهتری نسبت به شبکه عصبی مصنوعی داشت [۲۵].

۳-۲ پارامترهای ورودی

با بررسی مطالعات انجام شده در زمینه‌ی پیش‌بینی خردایش حاصل از آتشیاری، این نتیجه حاصل شد که پارامترهای قابل کنترل بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است و پارامترهای غیر قابل کنترل (ژئومکانیکی)، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این پارامترها به صورت خلاصه در جدول ۲-۶ آورده شده است. در نهایت با توجه به کارایی روش RES (در نظر گرفتن تعداد زیادی از پارامترها به صورت همزمان) سعی شد از پارامترهای قابل کنترل که در مطالعات پیشین، بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند و همچنین پارامترهای غیر قابل کنترل که کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند، در این پایان‌نامه به عنوان پارامترهای ورودی استفاده شود که شامل: بارسنگ، نسبت سفتی، نسبت اضافه‌حفری، تعداد ردیف، نسبت گل‌گذاری، نسبت فاصله‌داری، انحراف چال، تاخیر زمانی، قطر چال، خرج‌ویژه، تعداد دسته‌درزه، بازشدگی درزه‌ها، پرشدگی درزه‌ها، فاصله‌داری درزه‌ها، تداوم ناپیوستگی‌ها، جهت‌داری دسته‌درزه‌ها، مقاومت سنگ و قابلیت خردایش می‌باشد این پارامترها در ادامه به اختصار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۲-۴. پارامترهای مورد استفاده برای پیش‌بینی خردایش

قابلیت انفجار	مقاومت سنگ	جهت‌داری درزه‌ها	پرشدگی	تداوم درزه‌ها	فاصله‌داری درزه‌ها	بازشدگی درزه‌ها	تعداد دسته درزه	نسبت اضافه حفاری به بارسنگ	قطر چال	انحراف چال	زمان تاخیر	تعداد ردیف	ضریب سفتی (H/B)	نسبت گل‌گذاری به بارسنگ	نسبت فاصله‌ی جناحی به بارسنگ	خرج ویژه	بارسنگ	پارامترها ارائه دهنده
													✓	✓	✓	✓		اورعی و همکاران [۱۳]
✓																		کایلاک و همکاران [۱۴]
													✓	✓	✓	✓	✓	منجری و همکاران [۱۵]
									✓				✓	✓	✓	✓	✓	منجری و همکاران [۱۶]
									✓				✓	✓	✓	✓	✓	کولاتیلاکه [۱۷]
													✓	✓	✓	✓	✓	هوداوردی و همکاران [۱۸]
													✓			✓	✓	صیادی و همکاران [۱۹]
	✓													✓	✓	✓	✓	کرمی و افیونی زاده [۲۰]
	✓							✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	فرامرزی و همکاران [۲۱]
	✓								✓				✓	✓	✓	✓	✓	شمس و همکاران [۲۲]
													✓	✓	✓	✓	✓	ابراهیمی و همکاران [۲۳]
	✓								✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	حسینی‌پناه و همکاران [۲۴]

۲-۳-۱ بارسنگ

تأثیر بارسنگ موثر روی خردایش به مکانیزم شکست مربوط می‌شود. انفجار زمانی در بهینه‌ترین حالت است که موج انفجار ضخامت بارسنگ را تا سطح آزاد طی کرده و به صورت کششی برگشت کند، که در پی آن سنگ شکسته شده و به میزان مناسب خردایش و جابه‌جا گردد. این کارایی بستگی به انتخاب بار سنگ دارد. بارسنگ بسیار بزرگ در حالی که موج انفجاری از سطح آزاد برگشت نکند، باعث خفه‌شدن انفجار و در نتیجه خردایش نامناسب و اتلاف انرژی می‌شود. اگر بار سنگ بسیار کوچک باشد ترک‌های شعاعی تا سطح آزاد گسترش یافته و گازهای ناشی از انفجار به داخل هوا فرار می‌کنند و موجب ایجاد صدا و انفجار هوا می‌شوند. بنابراین انرژی کمتری برای خردایش در دسترس خواهد بود. طبق نظر بیهانداری^۱ (۱۹۷۵)، بایستی بین بارسنگ بهینه‌ی شکست^۲ و بارسنگ بهینه‌ی خردایش^۳ تفاوت لحاظ کرد. در بارسنگ بهینه‌ی شکست، حجم یا مقدار سنگ شکسته شده حداکثر است ولی خردایش بدست آمده قابل قبول نمی‌باشد و دارای قطعات بزرگ سنگ است. در حالی که در بارسنگ بهینه‌ی خردایش، کمیت سنگ شکسته شده کمتر، ولی خردایش بدست آمده یکنواخت‌تر بوده و قطعات درشت سنگ به وجود نمی‌آید. بارسنگ بهینه‌ی خردایش ۳۰ تا ۴۰٪ کمتر از بارسنگ بهینه‌ی شکست است. در بارسنگ بهینه‌ی خردایش فاصله‌داری چال‌ها می‌تواند بزرگتر انتخاب گردد. از این رو در قیاس با بارسنگ‌های بهینه‌ی بارزی در کمیت سنگ شکسته شده وجود نخواهد داشت. قابل ذکر است که تعدیل بارسنگ (B)، در نسبت (S/B) باعث کارایی بهتر امواج تنشی و انرژی گاز شده و خردایش بهبود می‌یابد [۲۶].

^۱ Bhandari

^۲ Optimum breakage burden

^۳ Optimum fragmentation burden

۲-۳-۲ نسبت ارتفاع چال به بارسنگ (نسبت سفتی)

نسبت سفتی پارامتر مهمی است که می‌تواند در کیفیت انفجار و نتیجه‌ی آن نقش جدی داشته باشد. درجه‌ی خردایش توسط ویژگی سفتی بارسنگ توده‌سنگ کنترل می‌شود. در صورتی که نسبت ارتفاع چال به بارسنگ (H/B)، بین ۱ تا ۴ باشد پله، کوتاه فرض می‌شود، و در حالتی که این نسبت بزرگتر از ۴ باشد پله، بلند در نظر گرفته می‌شود. برای یک قطر مشخص از ماده‌ی منفجره و مقدار معلوم بارسنگ، کاهش ارتفاع پله منجر به سفتی بیشتر و کاهش خردایش می‌شود و کاهش بارسنگ برای یک ارتفاع پله مشخص اثر معکوس را در پی خواهد داشت. بدیهی است که پله‌های بلندتر نتایج خردایش بهتری دارند. برای حصول بهترین خردایش $H/B \approx 4$ به عنوان مقدار مناسب پیشنهاد می‌شود در جدول ۲-۴ نتایج خردایش برای مقادیر مختلف نسبت سفتی نشان داده شده است [۲۷].

جدول ۲-۵. نتیجه‌ی خردایش در مقادیر مختلف نسبت سفتی [۲۷]

نسبت سفتی H/B	۱	۲	۳	۴
نتیجه‌ی خردایش	نامناسب	متوسط	خوب	عالی
ملاحظات	انفجار انجام نشود. تجدید طراحی	در صورت امکان تجدید طراحی	کنترل خوب خردایش مناسب	در نسبت $H/B > 4$ منفعتی وجود ندارد.

۲-۳-۳ نسبت اضافه حفاری به بارسنگ

برای جلوگیری از ایجاد برآمدگی^۱، ته چال^۲ و پاشنه^۳ در انفجار پله‌ای چال‌ها تا زیر سطح تراز کف پله حفاری می‌شوند. اضافه حفاری بیش از حد می‌تواند موجب افزایش سطح لرزش و خردشدگی نامطلوب کف پیت شود [۱۱]. در صورت استفاده‌ی مناسب اضافه حفاری می‌توان به نتایج بهتر در خردایش سنگ رسید

¹ Hump

² Bootleg

³ Toe

و از بروز عوارض غیر دلخواه از جمله خردایش نامطلوب در پای پله، به ویژه در پله‌های کوتاه و سفت جلوگیری کرد. چرا که به علت درجه‌ی آزادی کمتر، برای شکستن سنگ در پای پله نیاز به انرژی بیشتری می‌باشد. به هر حال با حفر شیب‌دار چال می‌توان مقدار اضافه حفاری را کاهش داد [۲۸].

۲-۳-۴ تعداد ردیف

تعداد ردیف چال‌های انفجاری اغلب توسط عرض پله کاری و بارسنگ تعیین می‌شود. با افزایش تعداد ردیف معمولاً خردایش بهبود می‌یابد. در سنگ‌های توده‌ای یا ساختارهای بلوکی انفجارهای تک ردیفه اغلب منجر به خردایش ناکافی می‌شوند. با افزایش تعداد ردیف‌ها از درصد بلوک‌های بزرگ در توده‌سنگ آتشکاری شده کاسته می‌شود [۲۹]. بنابراین در حالی که انفجارهای تک ردیفه تاثیرات مثبتی بر هزینه های شکستن سنگ دارند، برای خردایش بهتر، انفجارهای چندردیفه پیشنهاد شده است [۴].

در همین راستا می‌توان به رابطه‌ی لانگ فورس و کیلستروم (۱۹۷۶)، اشاره کرد. آنها پیشنهاد کردند که جهت بهبود خردایش، فاصله‌ی ردیف‌ها از بارسنگ بهینه محاسبه شده B به B_1 کاهش یابد. بنابراین:

$$B_1 = \frac{B}{(1 + 0.1H)} \quad (14-2)$$

که در این رابطه:

B_1 : بارسنگ تعدیل شده (m)، B : بارسنگ بهینه (m)، H : ارتفاع پله (m)

بنابراین با کاهش مناسب فاصله‌ی بین ردیف‌ها، در واقع چال‌ها برای تامین انرژی بیش‌تر برای خردایش سنگ بیش بارگذاری^۱ خواهند شد و نتایج خردایشی بهتری بدست می‌آید.

^۱ Overload

۲-۳-۵ نسبت طول گل گذاری به بار سنگ

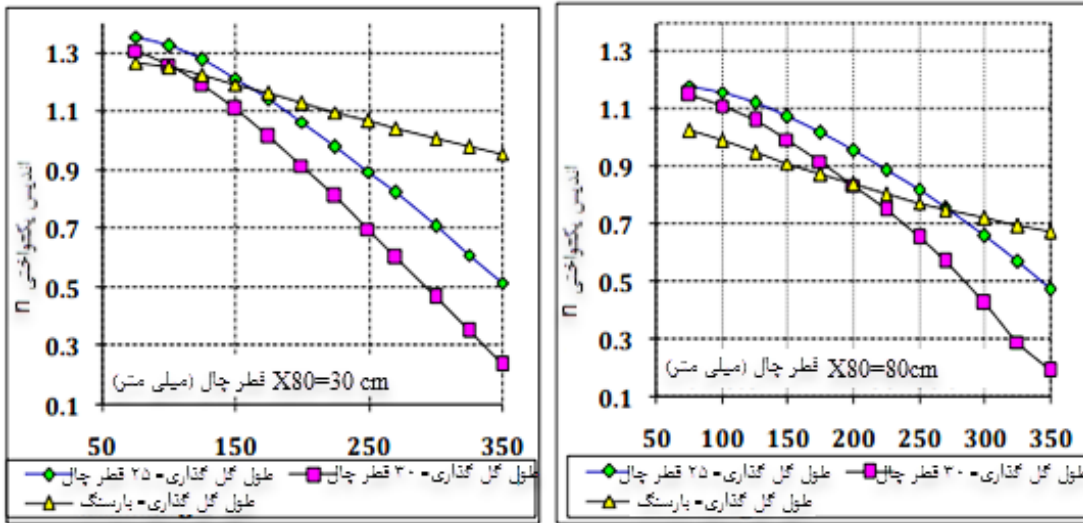
نقش اولیه‌ی گل گذاری، حبس گازهای حاصل از انفجار برای مدت زمان کافی به منظور شکست و جابجایی ضخامت بار سنگ است. اگر طول گل گذاری کم باشد منجر به خروج پیش از موعد و سرایت گاز به داخل هوا می‌شود. بنابراین در پی اتلاف انرژی، انرژی کافی برای شکست سنگ جلوی چال باقی نمی‌ماند و خردایش نامطلوب خواهد بود. در صورتی که طول گل گذاری زیاد باشد، سنگ دهانه^۱ چال نمی‌شکند و یا به صورت قطعات بزرگ می‌شکند که علاوه بر ایجاد عوارض نامطلوب، خردایش را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۸]. به منظور درک بهتر اثر پارامترهای مختلف بر روی خردایش، می‌توان اندیس یکنواختی n را تعریف کرد. اندیس یکنواختی n ، نشانگر میزان یکنواختی خردایش بعد از انفجار است، این که بعد از انفجار ذرات بسیار ریز یا قطعات بسیار بزرگ سنگ ایجاد نشود بیانگر مقادیر بالای n می‌باشد. بنابراین با انتخاب طول گل گذاری مناسب می‌توان به خردایش یکنواخت‌تری دست یافت. در شکل ۱-۲ اثر طول گل گذاری بر روی ضریب یکنواختی ملاحظه می‌شود با افزایش طول گل گذاری از ۲۵ برابر قطر چال تا ۳۰ برابر قطر چال، ضریب یکنواختی کاهش می‌یابد [۳۰].

۲-۳-۶ نسبت فاصله‌داری جناحی چال‌ها به بار سنگ

بیهانداری^۲ (۱۹۷۵)، نشان داد که برای خردایش بهینه، زوایای شکست بزرگتر از ۱۵۰ درجه اجازه‌ی استفاده از $S/B > 2$ را می‌دهند. مطابق با مطالعه‌ی مذکور، ضخامت‌های کم بار سنگ موجب استفاده بهتر از امواج تنشی و انرژی گاز را برای بهبود خردایش می‌شود. زمانی که چال‌های مجاور به طور جداگانه آتش می‌شوند، به علت وقفه‌ی زمانی بین چال‌ها، اندرکنش وجود نخواهد داشت. در چنین شرایطی بهتر

^۱ Cap rock

^۲ Bhandari



شکل ۱-۲. تاثیر طول گل گذاری بر یکنواختی خردایش برای $X80 = 30$ cm و $X80 = 80$ cm با تغییر قطر چال [۳۰]

است S تقریباً با B برابر در نظر گرفته شود [۲۹]. به هر حال زمانی که نسبت S/B بسیار زیاد باشد هر خرج یک مقطع منشوری را خرد کرده و جابه‌جا می‌کند که این امر موجب ایجاد سینه‌کار ناصاف (سینه‌کار میانی) شده و سنگ بین ردیف آخر به ویژه در تراز کف به صورت بکر باقی می‌ماند و باعث ایجاد پاشنه می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت که مزیت واقعی در خردایش با افزایش نسبت S/B تا مقدار چهار حاصل می‌گردد [۲۹].

۲-۳-۷ انحراف چال

از عوامل موثر در خردایش سنگ، دقت در حفر چال‌های انفجاری است. یافتن چال‌هایی در سطح که تا ۵۰٪ خطای حفاری در بارسنگ و فاصله‌داری چال‌ها به وجود آورده است، غیر معمول نیست. این خطاها توزیع و تراکم انرژی را در توده‌سنگ تغییر می‌دهد و منجر به ایجاد عوارض نامطلوب از جمله خردایش نامناسب و تولید تکه سنگ‌های بزرگ می‌گردد [۲۸].

۲-۳-۸ تأخیر زمانی

بر اساس نظر لنگ و فاورو^۱، تأخیر باید به گونه‌ای انتخاب شود که اجازه‌ی انتشار امواج فشاری و کششی را از چال تا سطح آزاد بدهد (تقریباً ۰/۵۸ ms/m). اگر تأخیر بین ردیفی کم باشد جابه‌جائی بارسنگ در جلوی هر ردیف دچار محدودیت می‌شود که این امر باعث افزایش بارسنگ در دومین ردیف و ردیف‌های بعدی می‌شود. پیامد چنین حالتی، خردایش نامطلوب و سفتی سنگ خرد شده است [۲۸]. در بسیاری از مطالعات در مقیاس تولیدی و در انفجارهای چند ردیفه، پیشنهادهایی برای انتخاب تأخیر زمانی در جهت بهبود خردایش ارائه شده است (جدول ۲-۵) [۲۸].

جدول ۲-۶. تأخیرهای پیشنهادی توسط پژوهشگران مختلف [۲۸]

پژوهشگر	تأخیر پیشنهادی به ازای هر متر بارسنگ (ms/m)
لانگ فورس و کیلستروم	۲ - ۵
برگمن و همکاران ^۲	۳/۳ - ۶/۶
لنگ و فاورو	۵ - ۸/۳
اندرسن و همکاران ^۳	۲/۸

۲-۳-۹ قطر چال

قطر چال نقش مهمی را در توزیع انرژی ماده‌ی منفجره بازی می‌کند و مستقیماً دارای اثرات جدی روی خردایش سنگ است [۲۸].

الف) چال‌های با قطر کم

در چال‌هایی با قطر کمتر به علت توزیع بهتر انرژی در انفجار، کنترل خردایش بهتر و قطعات خردشده یکنواخت‌تر می‌باشند. در سنگ‌های درزه‌دار استفاده از چال‌های با قطر کم می‌تواند بسیار مفید باشد.

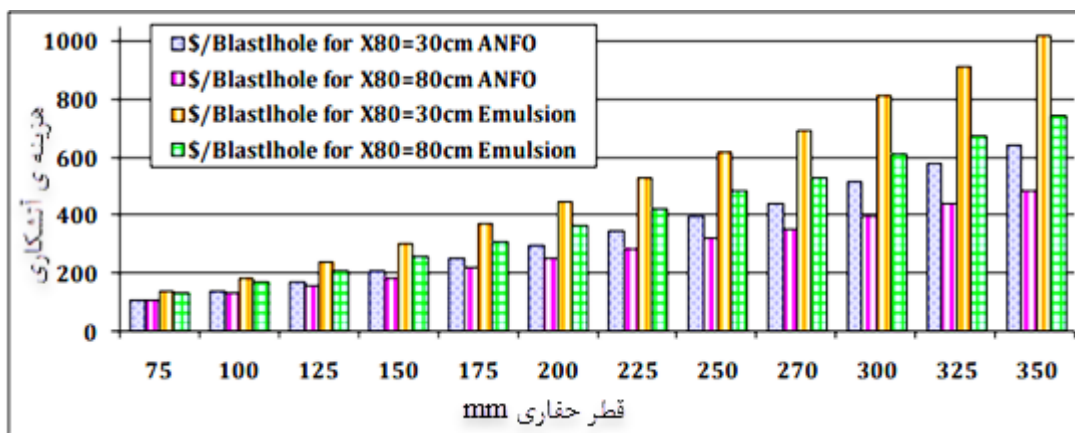
ب) چال‌های با قطر زیاد

¹ Lang & Favreau

² Bergman et al

³ Anderson et al

استفاده از چال‌های با قطر زیاد به علت وارد کردن انرژی شوک بالاتر به توده‌سنگ به خردایش کمک می‌کند. البته از معایب استفاده از چال‌های قطور این است که در صورتی که ابعاد خردایش ثابت بماند، با افزایش قطر چال، افزایش خرج‌ویژه ضروری خواهد بود. به هر حال زمانی که قطر چال افزایش می‌یابد در حالی که خرج‌ویژه و انرژی ثابت است، الگویی با چال‌های قطور خردایش درشت‌تری را خواهد داشت. شاید بتوان در چنین شرایطی با تغییر ندادن ضخامت بارسنگ و افزایش فاصله‌داری چال‌ها بر مشکل خردایش درشت سنگ غلبه کرد. به طور کلی این گونه به نظر می‌رسد که زمانی هدف خردایش تولید قطعات خردشده کوچکتر است در صورت استفاده از چال‌های با قطر زیاد، مزیتی در زمینه‌ی صرفه‌جویی در هزینه‌ها در پی نخواهد داشت. در شکل ۲-۳ تغییر هزینه به ازای هر چال حفاری در صورت استفاده از امولسیون و آنفو نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود بیش‌ترین هزینه در صورت استفاده از امولسیون در چال‌های با قطر زیاد و حفظ $X_{80} = 30\text{ cm}$ تحمیل می‌شود [۲۸].



شکل ۲-۳. هزینه‌ی آتشفشاری در محدوده‌ی قطرهای ۷۵ میلی‌متر تا ۳۵۰ [۲۸]

۲-۳-۱۰ خرج ویژه

یکی از پارامترهای اصلی در طراحی الگوی انفجار، خرج‌ویژه است. در صورت ثابت ماندن ضخامت بارسنگ با افزایش خرج‌ویژه، اندازه‌ی متوسط خردایش، کاهش می‌یابد. با افزایش خرج‌ویژه تا حد بهینه، علاوه بر

حصول خردایش، تورم و جابه‌جایی مطلوبی نیز ایجاد خواهد شد و مشکلات پای پله‌ی کمتری وجود خواهد داشت و این امر به رسیدن به یک هزینه‌ی عملیاتی بهینه کمک می‌کند [۲۹].

۲-۳-۱۱ فاصله‌داری درزه‌ها^۱

فاصله‌داری درزه‌ها باعث ایجاد بلوک‌های بزرگ، پس از خردایش می‌شوند، به علاوه وجود درزه‌هایی با جداسدگی، باعث می‌شود انرژی حاصل از انفجار به طور کامل صرف خردایش نشود، بلکه مقداری از آن از درزه‌ها فرار کند و قسمتی از آن صرف جابه‌جایی بلوک‌های بزرگ شود. همچنین در حالتی که فاصله‌داری جناحی چال‌ها، بیش از ۴ متر می‌باشد، وجود درزه‌هایی که به حالت عمود بر سطح جبهه‌کار هستند، باعث تضعیف موج انفجار شده، و باعث به‌وجود آمدن تکه‌های بزرگ سنگ خواهد شد [۳۱].

از طرفی فاصله‌داری یکنواخت درزه‌ها به تمرکز یا متغیر بودن چگالی درزه‌ها، ترجیح داده می‌شود، چرا که با وجود چنین شرایطی، مناطقی ضعیف خواهیم داشت، که با هدر رفتن انرژی از آنها، خردایش مطلوب حاصل نخواهد شد [۳۲].

۲-۳-۱۲ بازشدگی درزه‌ها^۲

بازشدگی درزه‌ها، شکافی بین دو قسمت از بلوک سنگی در توده‌سنگ است. باز شدگی درزه‌ها می‌تواند با آب، هوا و یا مواد معدنی دیگری پر شود این پارامتر با توجه به اینکه باعث هدر رفتن انرژی حاصل از آتشکاری می‌شود در نتایج خردایش موثر است [۳۲].

^۱ Joints spacing

^۲ Joints aperture

۲-۳-۱۳ تعداد دسته درزه و تداوم ناپیوستگی‌ها^۱

تعداد دسته درزه و تداوم ناپیوستگی‌ها با توجه به نقش بسیار مهمی که در میزان مقاومت توده سنگ دارند، روی قابلیت خردایش تاثیرگذار هستند [۳۲].

۲-۳-۱۴ جهت‌داری دسته‌درزه‌های اصلی^۲

جهت‌داری دسته‌درزه‌های اصلی، جزء عوامل بحرانی برای تعیین قابلیت خردایش هستند، به طوری که اگر جهت درزه‌ها، در خلاف جهت سینه‌کار باشد، باعث به وجود آمدن قطعات بزرگ خواهد شد [۳۳].

۲-۳-۱۵ مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ^۳

مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ، از کاربردی‌ترین پارامترهای مکانیکی سنگ است که در طراحی‌ها بیشتر از سایر پارامترها استفاده می‌شود. مقادیر UCS با استفاده از آزمایش‌های برجا یا آزمایشگاهی تعیین می‌شود. مقاومت سنگ رابطه‌ی مستقیم با خرج‌ویژه دارد، در غیر این صورت خردایش مطلوب حاصل نخواهد شد [۳۳].

۲-۴ جمع‌بندی

پیش‌بینی صحیح خردایش، عامل مهمی در زمینه‌ی فراهم‌کردن توده‌سنگ خردشده با توزیع ابعادی و خصوصیات مطلوب، برای بارگیری، خوراک سنگ‌شکن، آسیا و انبارکردن خواهد بود. مطالعات زیادی در گذشته بر روی خردایش حاصل از آتشباری، صورت‌گرفته و روابطی نیز برای پیش‌بینی آن ارائه شده است.

^۱ Joint persistence

^۲ Joint orientation

^۳ Uniaxial Compressive Strength of rock = UCS

اما با توجه به در نظرنگرفتن همزمان اکثر پارامترهای مؤثر بر انفجار روابط تجربی موجود و با توجه به شرایط پیچیده‌ی حاکم بر عملیات آتشباری، نتایج بدست‌آمده چندان مطلوب نبوده است. در این فصل، ابتدا کارهای انجام‌شده در زمینه‌ی پیش‌بینی خردایش مورد بررسی قرار گرفت، در ادامه با توجه به اینکه، در این مطالعات، پارامترهای غیرقابل کنترل زیاد مورد توجه قرار نگرفته‌اند و نیز کارایی روش RES، پارامترهای ورودی انتخاب شده و به اختصار در مورد آنها توضیح داده شد.

فصل ۳ : سیستم های مهندسی سنگ

۳-۱ مقدمه

در این فصل، سیستم مهندسی سنگ فازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور ابتدا سیستم مهندسی سنگ (RES) و سپس مختصری درباره‌ی منطق فازی و در انتها سیستم مهندسی سنگ فازی به اختصار توضیح داده می‌شود.

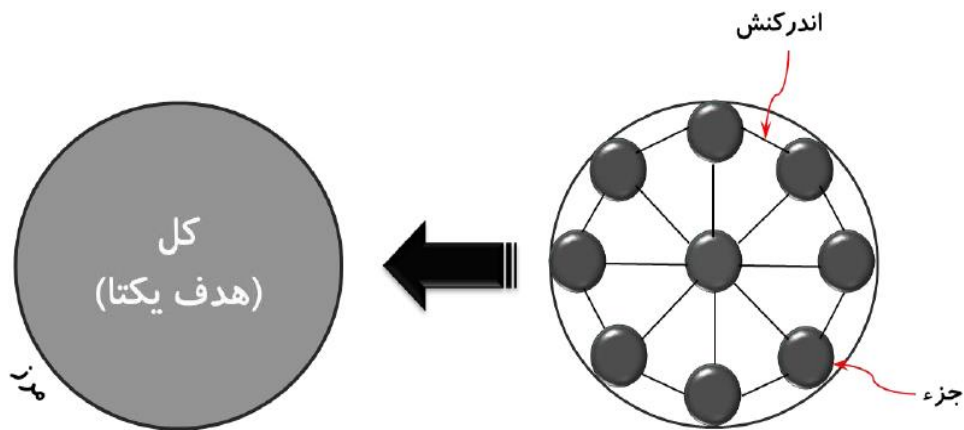
۳-۲ مفهوم سیستم و تفکر سیستمی

درباره‌ی سیستم تعاریف گوناگونی وجود دارد از نظر برتالانفی^۱ (۱۹۶۸) سیستم‌ها عبارتند از تعدادی عنصر که با یکدیگر ارتباط دارند. برخی سیستم را مجموعه‌ای از اجزاء به هم پیوسته می‌دانند که بین آن‌ها ارتباطی منظم وجود دارد، از یکدیگر تاثیر می‌پذیرند، بر هم اثر می‌گذارند، به صورت کل عمل می‌کنند و هدفدار هستند. کلیت که از ویژگی‌های هر سیستم است از سلسله مراتب تبعیت می‌کند، به طوری که هر سیستم در درون سیستم دیگر عمل می‌کند. طبق نظر جیائو^۲ استفاده از رویکرد سیستمی زمانی بسیار ضروری است که با مسائلی روبرو هستیم که از پیچیدگی زیادی برخوردارند، آن چنان که روش‌های مرسوم به تنهایی و به سادگی قادر به حل آن‌ها نمی‌باشند [۳۴]. بدین ترتیب سیستم را می‌توان متشکل از اجزای موثر بر هم با یک مرز مشخص فرض کرد (شکل ۳-۱).

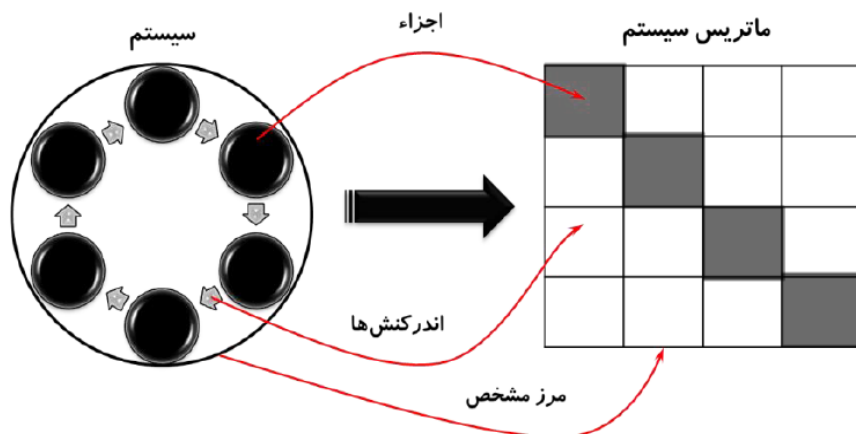
سیستم‌ها در کاربردهای مختلف معمولاً به صورت ماتریس‌هایی با نام ماتریس آن سیستم نشان داده می‌شوند. این ماتریس‌ها تمام خصوصیات یک سیستم اعم از اجزاء اندرکنش‌ها و مرز مشخص را دارا هستند [۳۴]. این مفهوم در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.

¹ Bertalanffy

² Jiao



شکل ۳-۱. مفهوم تفکر سیستمی [۳۴]



شکل ۳-۲. مفهوم ساختار رویکرد سیستمها [۳۴]

۳-۳ رویکرد سیستمهای مهندسی سنگ (RES)

سیستمهای مهندسی سنگ برای اولین بار توسط هادسون^۱ معرفی شده است و از آن زمان به طور گستردهای در حل مسائل مهندسی به کار رفته است. این روش در مطالعات زیست محیطی، مدیریت زبالهها و پسماندها، طراحی فاضلاب شهری، آلودگی هوا، پایداری شیب و طراحی سازههای زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی میزان خطرات زیست محیطی، میزان آلودگی رودخانهها و مدیریت زبالههای

^۱ Hudson

هسته‌ای نمونه‌هایی از کاربرد این روش است. این روش در مهندسی سنگ نیز کاربردهای گسترده‌ای داشته است. از آن جمله می‌توان به کاربرد آن در تحلیل پایداری شیب‌ها، طراحی تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی مانند گزینش محل ساخت نیروگاه زیرزمینی توسط شانگ و همکاران^۱، ارزیابی ریسک‌های ژئوتکنیکی در حفر تونل متروی آتن توسط بناردوس^۲ و کالیامپاکوس^۳ و ارزیابی ناپایداری تونل‌ها توسط شین و همکاران^۴ اشاره نمود. این روش در ارزیابی پایداری شیب نیز توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته که می‌توان به تحقیقات زارع نقده‌ی و خالوکاکی اشاره نمود. فروغ و ترابی با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ شاخصی برای تخمین توقفات TBM بر اثر پارامترهای توده‌سنگ ارائه نمودند.

۳-۳-۱ ماتریس‌های اندرکنش

در رویکرد سیستمی، ماتریس‌های اندرکنش ابزاری قوی هستند که تاثیر متقابل پارامترهای موثر بر یکدیگر را در مقیاسی برابر می‌سنجد. در ماتریس اندرکنش پارامترهای موثر روی قطر اصلی ماتریس قرار می‌گیرند و اندرکنش پارامترها با یکدیگر بر حسب آن با کدگذاری، در عناصر غیر قطری ماتریس مشخص می‌شود. در سیستم‌های مهندسی سنگ شناسایی پارامترهای بحرانی، مسیرهای تاثیرگذار، حلقه‌های برگشتی و ارزیابی تکنیک‌های انتخابی مهندسی مناسب، با استفاده از ماتریس اندرکنش صورت می‌گیرد [۳۴].

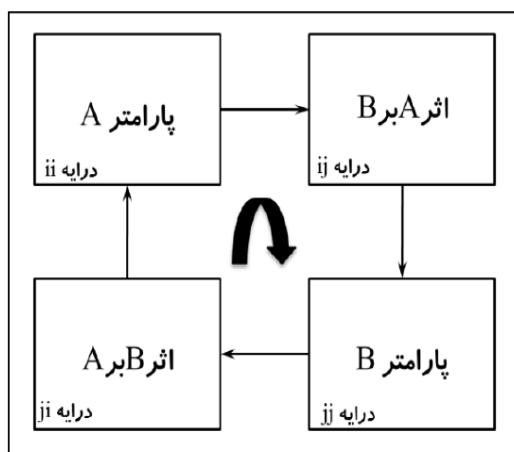
شکل ۳-۳ اندرکنش دو پارامتر A و B را نشان می‌دهد. ماتریس‌های اندرکنش ابزاری قوی برای استفاده در رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ و نمایش مکانیسم‌های تاثیر عوامل اصلی بر یکدیگر هستند [۳۴].

¹ Shang

² Benardos

³ Kaliampakos

⁴ Shin



شکل ۳-۳. مفهوم ماتریس اندرکنش برای سیستمی شامل دو پارامتر A و B [۳۴]
 به عنوان مثال ماتریس اندرکنش در یک توده سنگ درزه‌دار که سه موضوع و عامل اساسی ساختار سنگ، تنش در سنگ و جریان آب در آن در نظر گرفته شده است، یک ماتریس ۳×۳ است تشکیل می‌دهند که در روی قطر اصلی پارامترهای اصلی تنش، ساختار سنگ و جریان آب قرار می‌گیرند و در سایر درایه‌ها اندرکنش بین این ۳ پارامتر قرار می‌گیرد. به این ترتیب شش ترکیب دوتایی از این سه پارامتر حاصل می‌شود که به نام اندرکنش‌ها شناخته می‌شوند (جدول ۳-۱) [۳۴].

جدول ۳-۱. ماتریس اندرکنش ۳×۳ برای پارامترهای مکانیک سنگی [۳۴]

ساختار سنگ	شکستگی‌ها بر مقادیر و جهت تنش‌ها اثر می‌گذارند	شبکه شکستگی‌ها نفوذپذیری ثانویه را کنترل می‌کنند
F_{ij}		
تنش‌ها می‌توانند شکستگی‌ها را باز کنند یا ببندند و یا همین‌طور آنها را به وجود آورند	تنش‌ها	به طور کلی هر چه تنش‌های قائم بزرگتر باشند، نفوذپذیری کمتر است
	σ_{ij}	
جریان پیوسته آب در شکستگی‌ها بر خصوصیات آنها تاثیر می‌گذارد	جریان آب در شکستگی‌ها تنش قائم را کاهش می‌دهد	جریان آب
		K_{ij}

۳-۳-۲ کدگذاری ماتریس‌های اندرکنش

به طور کلی، فعالیت‌های مهندسی سنگ شامل اندرکنش‌های پیچیده بسیاری هستند. امروزه، روش سیستم‌های مهندسی سنگ به عنوان روشی موثر در تحلیل ساز و کارهای پیچیده و حل مسائل مهندسی سنگ گسترش یافته است. طبق تئوری سیستم‌های مهندسی سنگ، همه طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ‌ها را می‌توان به صورت تابعی از عوامل قطری ماتریس اندرکنش در نظر گرفت. انتخاب عوامل و وزن‌دهی آنها در سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ با کدگذاری ماتریس اندرکنش تعیین می‌شود [۳۴].

طبق نظر هادسون، ارائه‌دهنده رویکرد RES، پنج روش مختلف جهت کدگذاری ماتریس اندرکنش وجود دارد [۳۴]. این روش‌ها عبارتند از: روش دوتایی^۱، نیمه عددی خبره (ESQ)^۲، شیب نمودار پارامترها، تطبیقی از رویکرد سیستمی مستقیم و روش صریح^۳.

۳-۳-۲-۱ روش دوتایی

در این شیوه کدگذاری، مکانیزم بین دو پارامتر به صورت یکی از دو حالت روشن یا خاموش در نظر گرفته میشود، در صورتی که روشن باشد درایه مورد نظر مقدار واحد را قبول کرده و در صورتی که مکانیزم مورد نظر به حالت خاموش در نظر گرفته شود، مقدار صفر در درایه مربوط به آن قرار می‌گیرد.

۳-۳-۲-۲ روش نیمه عددی خبره (ESQ)

این روش در حقیقت نوع تعمیم یافته‌ای از روش دوتایی است که دارای پنج کلاس کدگذاری از ۰ تا ۴ می‌باشد. در این کلاس‌بندی، به ترتیب صفر برای عدم وجود اندرکنش، ۱ برای اندرکنش ضعیف، ۲ برای اندرکنش متوسط، ۳ برای اندرکنش قوی و ۴ برای اثر بحرانی و شدید در نظر گرفته می‌شود. این روش

¹ Binary

² Expert Semi-Quantitative

³ Explicit

نسبت به روش دوتایی از حساسیت بیشتری برخوردار است. ضعف اصلی این روش مربوط به تغییرپذیری بسیار زیاد آن در تخصیص کلاس‌ها به درایه‌ها می‌باشد که آن را در تشریح کامل مکانیزم‌های مربوطه ناتوان ساخته است. از طرفی در این روش، عمل کدگذاری توسط یک کارشناس یا خبره^۱ و یا گروهی از کارشناسان انجام می‌گیرد که این مسئله باعث ذهن‌گرایی^۲ کدگذاری‌ها و نتایج به دست آمده می‌گردد. با این حال به دلیل عدم وجود یک روش مرسوم دیگر برای پوشش این ضعف و نیز سادگی استفاده از آن، در حال حاضر این روش از بیشترین کاربرد برخوردار است.

۳-۲-۳-۲ روش شیب نمودار پارامترها

این روش از شیب نمودار پارامترها (در این جا برای نمونه $P_i - P_j$) برای کدگذاری استفاده می‌کند (شکل ۴-۳) اگر نمودار $P_i - P_j$ به صورت خط افقی باشد، در این صورت P_j به P_i وابسته نیست. ولی اگر رابط‌های خطی ما بین آنها وجود داشته باشد، مکانیزم مربوطه می‌تواند توسط شیب خط کدگذاری شود که در حقیقت سرعت تغییرات P_j به عنوان تابعی از P_i را نشان می‌دهد. به منظور استفاده از این روش، بایستی نمودارهای $P_i - P_j$ برای تمامی درایه‌های غیر قطر اصلی ماتریس مشخص شود. بدون شک، عدم خطی بودن روابط میان پارامترها مشکلی است که در بسیاری از موارد وجود خواهد داشت.

۳-۲-۳-۳ روش تطبیقی از یک رویکرد سیستمی مستقیم

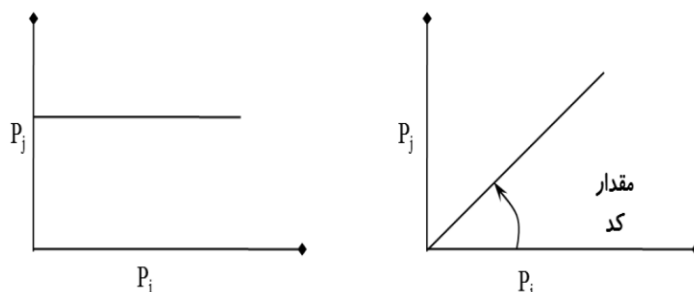
در این روش فرض بر این است که تمام مکانیزم‌ها در درایه‌های ماتریس اندرکنش میتوانند به صورت یک معادله مشتقات جزئی (PDE^۳) بیان شود. این روش نیز از ضعفی مشترک با آنچه برای روش سوم بیان شد

^۱ Expert

^۲ Subjectivity

^۳ Partial Differential Equation

برخوردار است. علاوه بر این، با وجود این اعمال معادلات مشتقات جزئی مرتبه دوم راه حل واقعی تری به نظر می‌رسد، ولی همین کار می‌تواند در ماتریس‌های بزرگ عملی بسیار سخت و پیچیده به شمار آید.



شکل ۳-۴. روش دوم کدگذاری ماتریس اندرکنش در رویکرد RES [۳۴]

۳-۳-۲-۵ روش صریح

در این حالت فرض می‌شود که چنان آگاهی کاملی از کل مکانیزم‌های ماتریس وجود دارد که امکان تحلیل عددی آنها فراهم است و می‌توان رفتار واقعی اندرکنش‌ها را مورد سنجش قرار داد. چنین آگاهی و اطلاعاتی مسلماً هرگز به طور کامل برای یک ماتریس وجود نخواهد داشت. روش ESQ در میان روش‌ها، با وجود ضعف‌های آشکار، تا حدی زیادی موفق بوده و تاکنون از بیشترین کاربرد برخوردار بوده است و به صورت اولیه در بسیاری از موارد پیشنهاد شده است.

۳-۳-۲-۶ انتخاب مهمترین عوامل مؤثر

انتخاب عوامل اصلی در ارزیابی موضوع مورد نظر، مهم‌ترین موضوع سیستم‌های مهندسی سنگ و تشکیل ماتریس اندرکنش است. با استفاده از نظرات کارشناسی و موضوع مورد نظر، تاثیرگذارترین پارامترها مشخص می‌شوند.

۳-۳-۳ تشکیل ماتریس اندرکنش

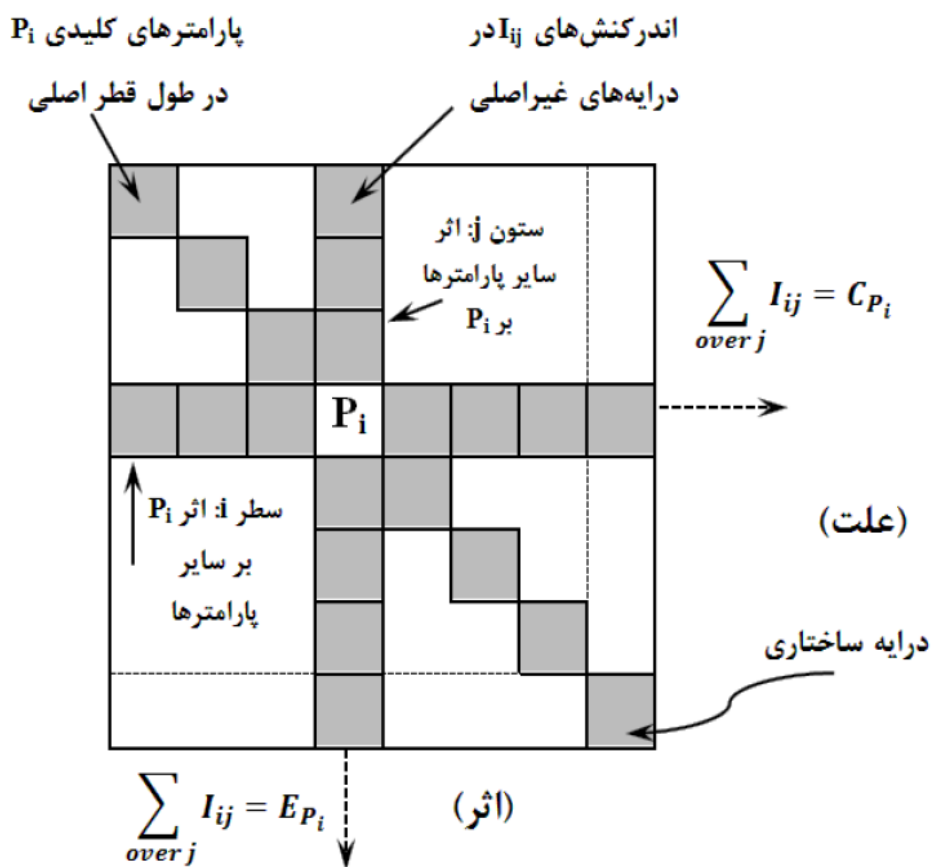
با شناسایی عوامل موثر با توجه به موضوع تحقیق، ماتریس اندرکنش تشکیل می‌شود. پارامترهای اصلی موثر بر روی قطر اصلی ماتریس اندرکنش قرار گرفته و خانه های دیگر ماتریس اندرکنش، تاثیرگذاری و تاثیرپذیری بین این پارامترها را نشان می‌دهد. در این روش ماتریس اندرکنش بر اساس شدت اندرکنش هر جفت از عوامل از مقدار عددی صفر (بدون اندرکنش) تا مقدار ۴ (اندرکنش قوی) کدگذاری می‌شوند. عوامل موثر بر روی قطر اصلی ماتریس قرار می‌گیرند و اندرکنش آنها با یکدیگر بر حسب میزان آن با کدگذاری در عناصر غیرقطری ماتریس مشخص می‌شود.

با استفاده از کدگذاری‌های انجام شده توسط کارشناسان و خبرگان با توجه به موضوع کار، ماتریس اندرکنش کدگذاری شده بدست می‌آید.

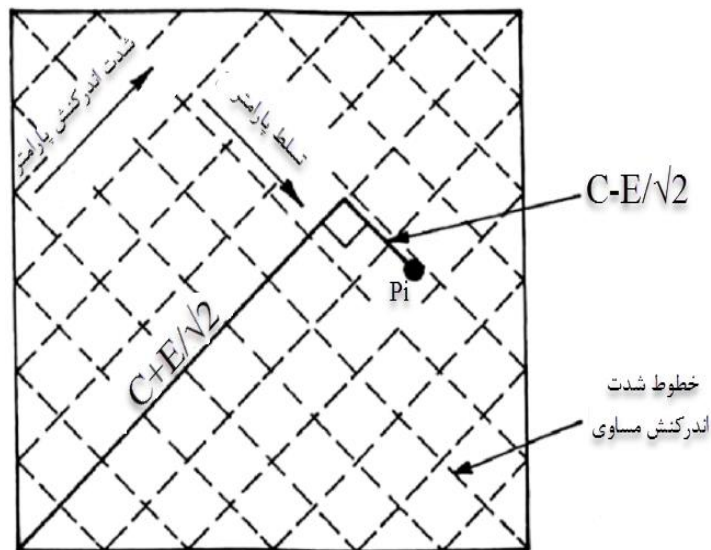
۳-۳-۴ تشکیل نمودار علت-اثر و هیستوگرام شدت اندرکنش

در ماتریس اندرکنش کدگذاری شده (شکل ۳-۵)، مجموع کدهای مربوط به هر سطر در سمت راست ماتریس، علت (C) و مجموع کدهای مربوط به هر ستون در پایین ماتریس، اثر (E) را تشکیل می‌دهند. زمانی که مجموع مقادیر عددی هر سطر (علت) و مجموع مقادیر هر ستون (اثر) به محورهای مختصات منتقل شوند، نمودار علت-اثر را پدید می‌آورند. در این نمودار پارامترهایی که در بخش پایین و راست نمودار قرار می‌گیرند، بر روی سیستم تسلط دارند و پارامترهای واقع در بالا سمت چپ تحت اثر سیستم قرار دارند. هیستوگرام شدت اندرکنش‌ها نیز نشان می‌دهد کدام پارامترها بیشترین اندرکنش را در سیستم دارند [۳۵]. در نمودار علت-اثر (شکل ۳-۶)، قطر نشان دهنده مکان هندسی $C=E$ می‌باشد. در طول این قطر، مجموع $C+E$ افزایش می‌یابد و خطوط شدت اندرکنش مساوی (مقادیر $C+E$) بر روی نمودار رسم می‌شوند تا تفاوت میان اثرات متقابل زیاد و کم را قائل شوند. نقاطی که در قسمت پایین سمت راست نمودار قرار می‌گیرند،

پارامترهایی را مشخص می‌کنند که بر روی سیستم تسلط دارند، چرا که از مقادیر C-E بزرگتری برخوردارند. پارامترهایی که تحت تاثیر سیستم قرار گرفته‌اند، در قسمت بالا سمت چپ نمودار قرار می‌گیرند و مقادیر C-E کمتری دارند. نمودار علت-اثر در فهم نقش هر پارامتر در پروژه بسیار حائز اهمیت بوده و قادر است اثرات سودمند و غیر سودمند از نظر مهندسی را مشخص سازد. محاسبه میزان اندرکنش به صورت مقدار C+E می‌تواند موجب شناسایی پارامترهایی گردد که لازم است تحت کنترل قرار گیرند. چرا که این پارامترها احتمالا می‌تواند باعث القای تغییرات مهمی در سیستم گردد [۳۴].



شکل ۳-۵. نحوه‌ی شکل‌گیری محورهای علت و اثر در ماتریس اندرکنش [۳۴]



شکل ۳-۶. نمودار علت - اثر [۳۴]

۳-۳-۵ طبقه بندی پارامترهای سیستم

برای بدست آوردن یک شاخص، نیاز به منوهای رده بندی برای تمامی عوامل موثر انتخاب شده خواهیم داشت. این منوهای رده بندی با توجه به تحقیقات انجام گرفته در گذشته و یا با استفاده از معیارهای تجربه برای هر یک از پارامترها تعیین می شوند. با استفاده از رده بندی های موجود و با استفاده از اطلاعات و دیتاهای موجود با توجه به موضوع کار ضریب وزنی را برای هر پارامتر تعیین کرده و سپس شاخص مورد نظر بدست می آید.

۳-۳-۶ تعیین شاخص با توجه به موضوع کار

برای محاسبه شاخص مربوطه که با توجه به موضوع کار با نمادهای خاصی نشان داده می شود، از معادله ۳-۱ استفاده می شود. بطوریکه i مربوط به پارامترهای ۱ تا n و z بسته به موضوع کار متفاوت است، برای مثال بررسی نرخ نفوذ TBM در تونل z مقطعی از تونل مورد نظر و یا در بررسی خردایش یک معدن می تواند شماره انفجار مد نظر قرار گیرد. در این رابطه P_i وزن هر پارامتر، P_{max} حداکثر امتیاز هر پارامتر می باشد.

همچنین a_i ضریب وزنی هر کدام از پارامترها است که با استفاده از معادله ۳-۲ محاسبه می‌شود [۳۴]. با محاسبه شاخص مورد نظر، نتایج بدست آمده از این روش را می‌توان با واقعیت مقایسه کرده و اعتبار روش را سنجید.

$$FI=100-\left(\sum_{i=1}^n a_i \frac{P_i}{P_{\max}}\right) \quad (۱-۳)$$

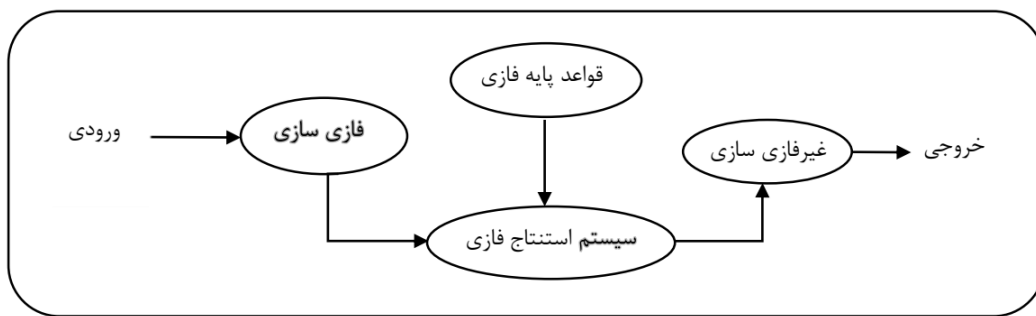
$$a_i = \frac{(C_i + E_i)}{(\sum C_i + \sum E_i)} \quad (۲-۳)$$

۳-۴ منطق فازی

در بسیاری از علوم نظیر ریاضیات و منطق فرض بر این است که مرزها و محدودیت‌های دقیقاً تعریف شده‌ای وجود دارند و یک موضوع خاص یا در محدوده آن مرزها می‌گجند یا نمی‌گنجد. مواردی چون مرد یا زن، سیاه یا سفید، صفر یا یک و... از این جمله‌اند. در این فلسفه نمی‌توان تا اندازه‌ای راستگو بود و هم کمی دروغگو بود. در این فرض که مرزها کاملاً مشخص و تعریف شده هستند این باور به صفر و یک‌ها و این منطق دو ارزشی به یونان قدیم و ارسطو می‌رسد. منطق ارسطو اساس ریاضیات کلاسیک را تشکیل می‌دهد. این منطق دقت را فدای سهولت می‌کند. نتایج منطق ارسطویی می‌تواند مطالب ریاضی و پردازش رایانه‌ای را ساده کند. می‌توان با رشته‌ای از صفر و یک‌ها بسیار ساده‌تر از کسرها کار کرد. اما حالت دو ارزشی نیازمند انطباق ورزی و از بین بردن زواید است. گر چه می‌توان مثال‌های فراوانی را ذکر کرد که کاربرد منطق ارسطویی در مورد آنها صحیح باشد، اما باید توجه داشت که نباید آن چه را که تنها برای موارد خاص مصداق دارد، به تمام پدیده‌ها تعمیم داد. در این منطق با مسائل بسیار قطعی برخورد می‌شود. حال آن‌که دنیای اطراف ما پر است از عدم قطعیت‌ها و ابهامات. لذا باید به دنبال روش‌هایی بود که بتوانند مسائل توأم با ابهام و عدم قطعیت را حل کنند. به عبارت دیگر باید به طریقی ابهام و عدم قطعیت موجود در مسائل را مدل کرد. یک روش موثر و کارآمد برای این منظور استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی است [۳۶].

استدلال^۱ با مجموعه‌های فازی، منطق فازی نامیده می‌شود. منطق فازی در حل مسائلی که درک آن‌ها مشکل است، ابزاری توانمند به شمار می‌رود. در منطق فازی به جای دو ارزشی بودن، طیفی از ارزش‌ها، در بازه‌ی بسته‌ای بین صفر و یک وجود خواهد داشت. با این طیف می‌توان عدم قطعیت را به خوبی نمایش داد. تمایز عمده منطق فازی با منطق چند ارزشی آن است که در منطق فازی مفهوم یک عبارت نیز می‌تواند مبهم باشد (مانند سردی هوا). در منطق فازی می‌توانیم جملاتی را که معمولاً در محاوره‌های روزانه برای ارزش‌گذاری مسائل استفاده می‌کنیم، از قبیل کاملاً درست است، کم و بیش درست است، تا حدی نادرست است و ... را به کار بندیم [۳۶].

پایه و اساس مجموعه‌ها و منطق فازی توسط پروفسور لطفی‌زاده مطرح شده است. در سال ۱۹۶۵ پروفسور عسگر لطفی‌زاده، اولین مقاله خود را در زمینه فازی تحت عنوان مجموعه‌های فازی منتشر کرد که جرقه اولیه‌ای از پرتو یک جهان بینی در عرصه ریاضیات و علوم بود. ساخت یک مدل فازی، شامل چهار گام است. این مراحل به ترتیب فازی سازی^۲، ایجاد پایگاه قواعد فازی، استنتاج فازی^۳ و غیر فازی سازی^۴ هستند (شکل ۳-۷) [۳۶].



شکل ۳-۷. مراحل مدل‌سازی فازی [۳۶]

¹ Reasoning
² Fuzzifier
³ Fuzzy inference engine
⁴ Defuzzifier

گام اول در مدل‌سازی فازی، فازی‌سازی است. تعریف مجموعه‌های فازی برای متغیرهای ورودی و خروجی، فازی‌سازی نامیده می‌شود [۳۶]. فازی‌سازی به صورت تبدیل مقادیر عددی به مقادیر فازی، توسط توابع عضویت، صورت می‌گیرد. شکل توابع عضویت به نوع مسئله بستگی دارد و می‌تواند به صورت خطی (مثلثی، ذوزنقه‌ای) و یا غیرخطی (گوسی) باشد [۳۷].

دومین مرحله در مدل‌سازی فازی، ایجاد ارتباط بین ورودی و خروجی به وسیله قواعد فازی است. یک قاعده فازی به طور کلی از یک مقدمه‌ی منطقی (اگر) و یک نتیجه (آنگاه) ساخته می‌شود. برای مثال اگر X زیاد باشد، آنگاه Y کم است. در این قانون، عبارت زیاد و کم به وسیله مجموعه‌های فازی (توابع عضویت فازی) بیان می‌شوند [۳۷].

سومین مرحله در مدل‌سازی فازی، انتخاب سیستم استنتاج فازی برای ترکیب کردن قواعد فازی است. از جمله مدل‌هایی که در سیستم استنتاج فازی استفاده می‌شوند، مدل‌های ممدانی^۱ و سوگنو^۲ هستند. مدل فازی ممدانی، عبارت‌های زبانی بدون ساختار را به یک مجموعه‌ی ساختار یافته ترجمه می‌کند. مجموعه‌ی ساختار یافته به شکل زیر است [۳۷].

$$\text{if } X_i \text{ is } A_{iI} \text{ and } X_r \text{ is } A_{iR} \text{ then } Y \text{ is } B_i \quad \text{for } i=1,2,\dots,k \quad (3-3)$$

که در آن X_I و X_R پارامترهای ورودی، A_{iI} ، A_{iR} و B_i توابع عضویت فازی و Y پارامترهای خروجی و تعداد قواعد فازی است. در روش ممدانی، هر دو قسمت مقدمه و نتیجه فازی هستند [۳۷].

در روش ممدانی از عملگر MIN برای AND و از عملگر MAX برای OR که به روش استنتاج MIN-MAX معروف است، استفاده می‌شود. در این روش اگر عبارت قسمت "اگر" توسط عملگر AND به هم ارتباط داده باشند، برای ترکیب این عبارات و به دست آوردن خروجی واحد از قاعده مورد نظر، کمینه

¹ Mamdani

² Sugeno

خروجی هر یک از این عبارات محاسبه می‌شود. اما اگر عبارت قسمت "اگر" توسط عملگر OR به هم ارتباط داده باشند، برای ترکیب این عبارات و به دست آوردن خروجی واحد از قاعده مورد نظر، بیشینه‌ی خروجی هر یک از این عبارات محاسبه می‌شود [۳۶].

چهارمین مرحله در مدل سازی فازی غیرفازی سازی است. در این مرحله خروجی فازی مدل به اعداد قطعی تبدیل می‌شود. برای غیرفازی سازی کردن روش‌های مختلفی وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: روش گرانیگاه، روش نصف کننده سطح، روش میانگین حداکثرها، روش کوچکترین حداکثرها و روش بزرگترین حداکثرها [۳۶].

۳-۵ سیستم مهندسی سنگ فازی

در رویکرد سیستمی، ماتریس‌های اندرکنش ابزاری قوی هستند که تأثیر متقابل پارامترهای مؤثر بر یکدیگر را در مقیاسی برابر می‌سنجد. در ماتریس اندرکنش پارامترهای مؤثر روی قطر اصلی ماتریس قرار می‌گیرند و اندرکنش پارامترها با یکدیگر بر حسب آن با کدگذاری، در عناصر غیر قطری ماتریس مشخص می‌شود. روش‌های مختلفی برای کدگذاری ماتریس اندرکنش وجود دارد که روش نیمه عددی خبره (ESQ) در میان سایر روش‌ها، تا حد زیادی موفق بوده و تاکنون کاربرد گسترده‌ای داشته است. با این وجود در این روش هیچ عدم قطعیتی در فرآیند کدگذاری در ماتریس اندرکنش در نظر گرفته نشده است. برای حل این مشکل در این پایان‌نامه از روش نیمه عددی خبره فازی (FESQ) استفاده می‌شود. با اعمال منطق فازی در فرآیند کدگذاری ذهنیت‌های مطرح شده توسط کارشناسان به حداقل می‌رسد.

برای این کار، ابتدا پرسش‌نامه‌هایی تهیه و از کارشناسان خبره در این زمینه خواسته شده است تا مقادیر اندرکنش بین پارامترها را بر اساس روش ESQ تعیین کنند. هر کارشناس برای هر درایه از ماتریس یکی از پنج حالت بدون اندرکنش، اندرکنش ضعیف، اندرکنش متوسط، اندرکنش قوی و اندرکنش بحرانی را انتخاب

می‌کند. برای فازی‌سازی ماتریس اندرکنش، برای هر عنصر از ماتریس، تعداد انتخاب هر یک از پنج حالت ممکن برای هر اندرکنش بر اساس قضاوت کارشناسان در نظر گرفته شده است، که عبارتند از:

الف) تعداد نظراتی که برای بیان اندرکنش مربوطه، حالت بدون اندرکنش را انتخاب نموده‌اند (n_0)؛

ب) تعداد نظراتی که برای بیان اندرکنش مربوطه، حالت اندرکنش ضعیف را انتخاب نموده‌اند (n_1)؛

ج) تعداد نظراتی که برای بیان اندرکنش مربوطه، حالت اندرکنش متوسط را انتخاب نموده‌اند (n_2)؛

د) تعداد نظراتی که برای بیان اندرکنش مربوطه، حالت اندرکنش قوی را انتخاب نموده‌اند (n_3)؛

ه) تعداد نظراتی که برای بیان اندرکنش مربوطه، حالت اندرکنش بحرانی را انتخاب نموده‌اند (n_4).

این مقادیر در ابتدا نرمال‌سازی شده و سپس به عنوان ورودی‌های سیستم فازی در نظر گرفته شده است.

برای هر ورودی سیستم فازی، دو مجموعه فازی به نام‌های «Low» و «High» در نظر گرفته شد، که در

شکل ۳-۸ نشان داده شده است. برای مثال اگر مقدار n_0 بر روی مجموعه فازی «High» قرار بگیرد، بدین

معنی است که بیشتر کارشناسان اذعان داشتند که هیچ اندرکنشی بین دو پارامتر وجود ندارد. به عبارتی

دیگر، احتمال حالت 0 از سایر حالت‌ها بیشتر است [۳۸].

اگر مقادیر نرمال شده ورودی‌ها برای هر درایه در ماتریس اندرکنش کمتر از $0/4$ باشد، مقدار درجه

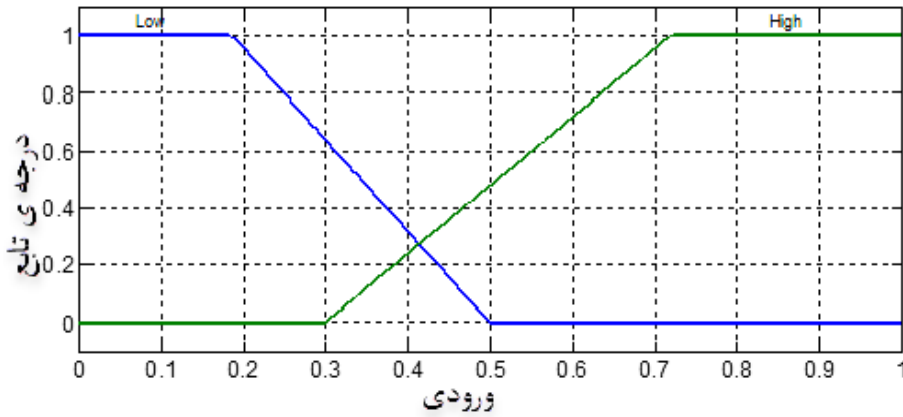
عضویت مجموعه فازی «Low» بیشتر از درجه عضویت مجموعه «High» است. این بدان معناست که تعداد

کمی از کارشناسان حالت مورد نظر را به عنوان اندرکنش آن درایه از ماتریس انتخاب نمودند. به همین

ترتیب اگر مقادیر نرمال شده برای هر درایه در ماتریس اندرکنش بیشتر از $0/4$ باشد، درجه عضویت مجموعه

فازی «High» بیشتر از درجه عضویت مجموعه «Low» است و می‌توان گفت اکثریت کارشناسان آن حالت

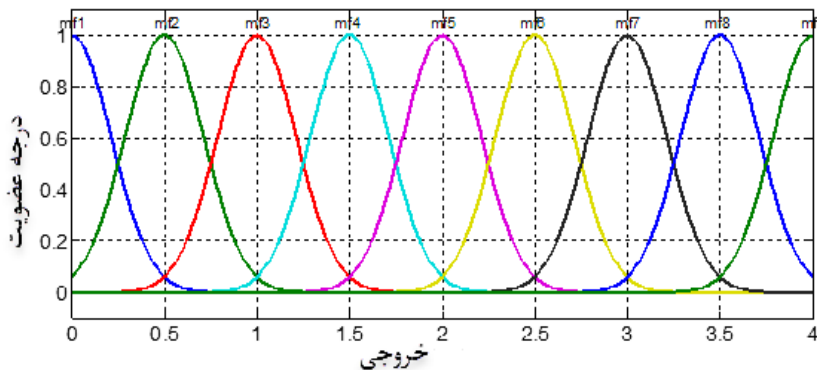
را برای اندرکنش آن درایه از ماتریس انتخاب نموده‌اند.



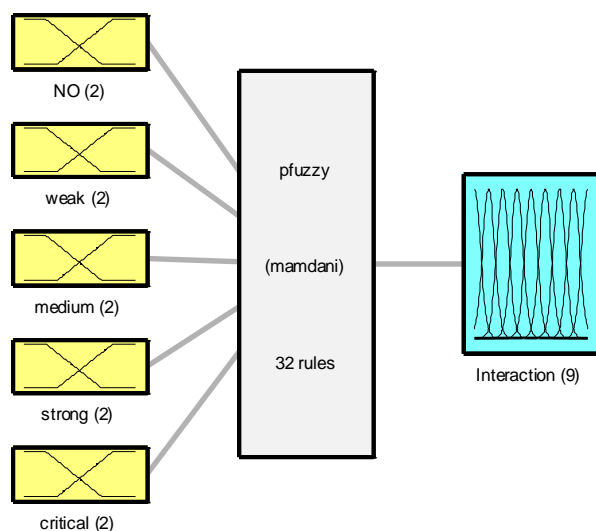
شکل ۳-۸. مجموعه فازی برای هر ورودی سیستم فازی [۳۸]

در سیستم طراحی شده، خروجی سیستم فازی، اندرکنش انتخاب شده توسط سیستم برای هر درایه از ماتریس است. ۹ مجموعه فازی (m_1 تا m_9) برای خروجی سیستم فازی طراحی شده است. علت انتخاب نه مجموعه فازی به جای پنج مجموعه، پوشش بهتر حالت‌های میانی برای بیان دقیق‌تر اندرکنش بین پارامترها است. خروجی سیستم فازی در شکل ۳-۹ نشان داده شده است [۳۸].

سیستم فازی طراحی شده، شامل ۵ ورودی و هر ورودی شامل ۲ مجموعه است، در نتیجه (۲۵) ۳۲ قانون برای سیستم تعریف شده است. سیستم فازی طراحی شده با ۵ ورودی و یک خروجی و ۳۲ قانون در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است [۳۸].



شکل ۳-۹. خروجی سیستم فازی [۳۸]



شکل ۳-۱۰. سیستم فازی با ۵ ورودی، ۳۲ قانون و یک خروجی [۳۸]

به عنوان مثال، برای محاسبه مقدار اندرکنش حاصل از تأثیر پارامتر P_1 (بارسنگ) بر روی پارامتر P_2 (خرج ویژه)، هفت کارشناس از بین هفده کارشناس کد ۳ (اندرکنش قوی)، ده کارشناس کد ۴ (اندرکنش بحرانی) را در نظر گرفته‌اند. در این صورت مقادیر فازی نرمال شده ورودی سیستم به صورت $n_0 = 0$ ، $n_1 = 0$ ، $n_2 = 0$ ، $n_3 = 0/411$ و $n_4 = 0/59$ محاسبه خواهد شد. سپس قوانین فازی طراحی شده اجرا و مقدار خروجی محاسبه می‌گردد (3/54). در نهایت با اعمال قضاوت کارشناسان در سیستم فازی و با استفاده از قوانین فازی طراحی شده، ماتریس اندرکنش فازی برای عوامل مؤثر در پیش‌بینی خردایش حاصل از آتشیاری ایجاد می‌گردد.

اگرچه در ماتریس اندرکنش حاصل از سیستم فازی نظرات تمامی کارشناسان پوشش داده شده است و این بهبود مناسبی برای کدگذاری ماتریس اندرکنش می‌باشد، ولی با افزایش تعداد ورودی‌ها و تعداد مجموعه‌های فازی برای هر ورودی تعداد قوانین به صورت نمایی زیاد خواهد شد و طراحی پایگاه قوانین فازی بسیار پیچیده می‌گردد.

۳-۶ جمع بندی

سیستم مهندسی سنگ، تکنیکی است که قابلیت تجزیه و تحلیل همزمان فرآیندهای پیچیده‌ی مهندسی سنگ را دارد. به طور کلی RES روشی است که امکان تحلیل همزمان روابط بین پارامترهای موثر را دارد، و آثار ناشی از اندرکنش بین آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد. در سیستم‌های مهندسی سنگ، شناسایی پارامترهای بحرانی، مسیرهای تاثیرگذار، حلقه‌های برگشتی و ارزیابی تکنیک‌های انتخابی مهندسی سنگ، با استفاده از ماتریس اندرکنش صورت می‌گیرد. طبق تئوری سیستم مهندسی سنگ، همه‌ی مسائل مهندسی سنگ را می‌توان به صورت تابعی از پارامترهای قطری ماتریس اندرکنش در نظر گرفت. برای بهبود نتایج حاصل از این روش، در این پایان‌نامه ماتریس اندرکنش این سیستم به صورت فازی تهیه شده است که نحوه‌ی انجام این کار، در این فصل به تفصیل آورده شده است.

فصل ۴ : معدن مس سونگون

۴-۱ مقدمه

معدن مس سونگون دومین تولیدکننده‌ی مس در ایران است.

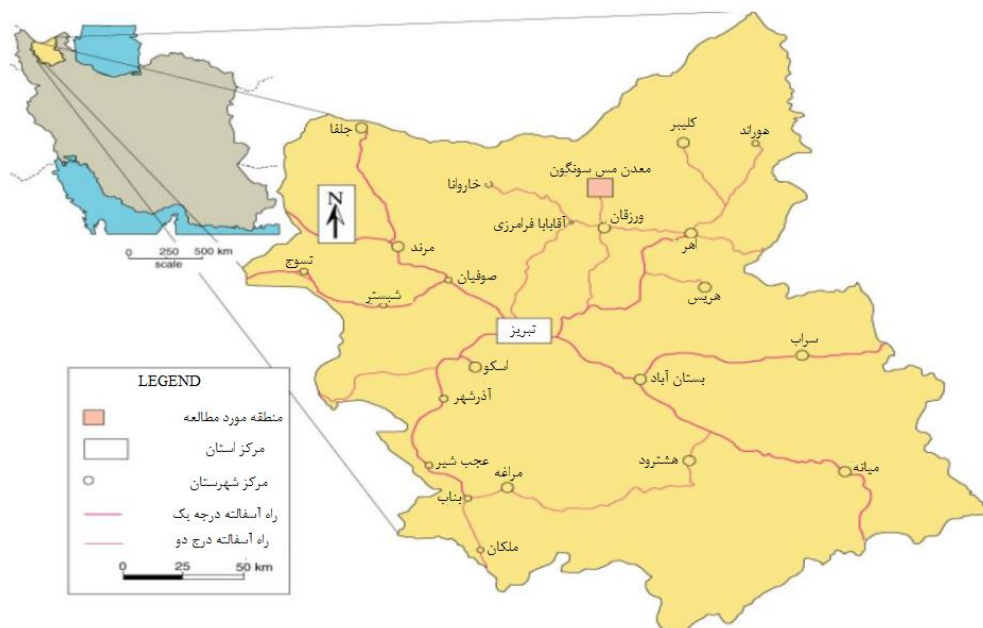
کانی‌سازی اصلی کانسار شامل کانی‌های مس و مولیبدن است. ذخیره احتمالی این معدن بیش از یک میلیارد تن و ذخیره قابل استخراج آن (با توجه به اکتشافات انجام گرفته)، حدود ۷۹۶ میلیون تن برآورد شده است، که در مجموع کل ذخایر قطعی، احتمالی و ممکن در محدوده‌ی کانسار سونگون ورزقان حدود ۱/۷ میلیارد تن سنگ مس با عیار ۰/۶۱٪ است. در این معدن غیر از فلز با ارزش مس، مولیبدن، طلا، نقره و دیگر عناصر با اهمیت به صورت فلزات همراه وجود دارند [۳۹]. در این فصل، ابتدا به معرفی این معدن و سپس به نحوه استخراج آن پرداخته می‌شود.

۴-۲ معرفی معدن

۴-۲-۱ موقعیت جغرافیایی معدن مس سونگون

معدن مس سونگون در شمال غرب ایران، در استان آذربایجان شرقی، ۱۳۰ کیلومتری شمال تبریز، ۷۵ کیلومتری شمال غرب اهر و ۳۰ کیلومتری شمال ورزقان در همسایگی جمهوری‌های آذربایجان و ارمنستان قرار دارد. مختصات جغرافیایی منطقه، ۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی می‌باشد. کانسار مس سونگون به طور متوسط نسبت به سطح دریا دارای ارتفاع متوسط ۲۰۰۰ متر، حداکثر ارتفاع در کانسار مس سونگون (چراغلو) ۲۷۰۰ متر از سطح دریا و عمیق‌ترین ارتفاع ۱۶۲۵ متر نسبت به سطح دریا می‌باشد. محدود کننده‌های کانسار مس سونگون شامل: رود خانه سونگون چای در شرق کانسار و رودخانه پخیر در شمال کانسار می‌باشد، که پس از پیوستن به هم، به رود خانه ایلگینه چای می‌پیوندند که نهایتاً به رود خانه ارس می‌ریزد. راه دسترسی اصلی معدن از طریق جاده‌ی آسفالت تبریز-

ورزقان-سونگون و راه دسترسی دوم از طریق جاده‌ی تبریز-اهر-ورزقان-سونگون میسر است. موقعیت
 جغرافیایی معدن در شکل ۴-۱ قابل مشاهده است [۳۹].



شکل ۴-۱. موقعیت جغرافیایی معدن مس سونگون

۴-۲-۲ شرایط آب و هوایی منطقه

در مورد وضعیت آب و هوایی منطقه باید گفت که بخاطر اینکه معدن در منطقه کوهستانی واقع شده است. میانگین حداکثر درجه حرارت در تابستان ۳۳ درجه سانتی‌گراد و در زمستان ۲۲ - درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. مقدار حداکثر بارندگی در محل حدود ۳۵۰ میلی‌متر در سال می‌باشد و مقدار رطوبت نسبی در سال بین ۵۲ تا ۸۲ درصد متغیر است، جهت غالب وزش باد، جنوب غربی است. اکثر روزهای بهار و تابستان، معدن مه‌آلود دیده می‌شود [۳۹].

۴-۲-۳ زمین شناسی کانسار مس سونگون

به طور کلی کانسار مس سونگون در ناحیه‌ی آتشفشان ارومیه-دختر که بخشی از کمربند متالوژنی آلپ-

هیمالیا است، قرار دارد. این کانسار پرفیری مونزونیتی است که در یک کمربند تکتونیکی ناحیه‌ی فرو رانش حاشیه قاره‌ای به سن ترشیاری قرار گرفته است. سطح توده‌ی کانسار در شبکه اکتشافات تفضیلی حدود یک کیلومتر مربع است. این کانسار از نوع نهشته‌های پرفیری مس بوده و رگچه‌های درهم پرعیار در توده‌ی نیمه عمیق مونزونیت پرفیری متمرکز شده‌اند. سنگ‌های درونگیر این توده مونزونیتی را واحدهای آهکی کرتاسه بالا و سری‌های ولکانیکی آندزیتی-لاتیتی تشکیل داده‌اند. در طی فرآیندهای کانی‌زایی انواع کانی-های سولفیدی، فلزات اصلی و اکسیدها به وجود آمده‌اند. کانی‌های سولفیدی موجود شامل: پیریت، مولیبدنیت، گالن، اسفالریت، مارکازیت پیرتیت و سولفیدهای مس (کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت و کوولیت) است. فلزات اصلی شامل: طلا و نقره و اکسیدها شامل: ایلمنیت، روتیل، مگنتیت و گوتیت است. همانند سایر معادن پورفیری، سه ناحیه‌ی (zone): فروشست (leached)، سوپرژن (supergene) و هیپوژن (hypogene) در معدن مس سونگون قابل رویت است. ضخامت ناحیه‌ی فروشست از ۲۰ تا ۱۵۰ متر در نوسان بوده و ناحیه‌ی سوپرژن دارای ضخامت متغیر از صفر تا ۲۰۰ متر است. ضخامت بخش هیپوژن تا حدود ۶۰۰ متر برآورد شده است [۳۹].

۳-۴ پارامترهای اکتشافی معدن مس سونگون

جدول ۱-۴. پارامترهای اکتشافی معدن مس سونگون [۳۹]

حجم کل ذخیره‌ی قطعی	۷۹۶ میلیون تن
حجم پیش باطله‌برداری	۱۰۵ میلیون تن
حجم کل باطله‌برداری	۷۶۷ میلیون تن
حجم کل ذخیره‌ی اکسید	۶/۷ میلیون تن
حجم مواد قابل استخراج	۳۸۸ میلیون تن
طول گمانه‌های حفرشده	۶۰ هزار متر
تعداد تونل‌های اکتشافی	۷ دهانه
سطح مقطع تونل‌ها	۴ مترمربع

۴-۴ حفاری

در معدن مس سونگون از سیستم چال‌زنی دورانی - ضربه‌ای برای حفر چال‌ها استفاده می‌شود. در شکل ۴-۲، تصویری از دستگاه حفاری قابل مشاهده است. دو نوع از دستگاه‌های چال‌زنی که مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

۴-۴-۱ دستگاه حفاری بهلر (BOHLER-TD222)

سیستم حفاری دستگاه، از نوع ضربه ای - دورانی می‌باشد، که چال‌هایی به قطر ۱۶۰ تا ۱۷۰ میلی متر حفر می‌نماید. طول راد دستگاه ۶/۵ متر بوده و چال‌هایی حداکثر تا ۱۲/۵ متر حفاری می‌کند. سرمته‌ی مورد استفاده در این نوع دستگاه از نوع Bottom Bit است که دارای راندمان بهتری نسبت به انواع خود می‌باشد و جنس دندان‌های روی سرمته، کربور تنگستن است. در دستگاه بهلر، سرمته به وسیله‌ی جریان هوای فشرده خنک می‌شود و مواد ته چال نیز به وسیله‌ی هوا به خارج از چال پرتاب می‌شود. این دستگاه مجهز به منبع ایجاد انرژی (کمپرسور)، لوله‌های انتقال دهنده‌ی انرژی (رادها) و مته و سیستم کنترل و تنظیم است. راندمان یک ساعت حفاری توسط این دستگاه در شرایط مطلوب در معدن سونگون، روی سینه کار در حدود ۱۴/۵ متر در ساعت می‌باشد، که برای رسیدن به راندمان بالا، کارکردن دستگاه باید مرتب و تنظیم شود و هم چنین باید برای عدم توقف دستگاه، برنامه ریزی شود [۳۹].

۴-۴-۲ دستگاه حفاری هولمن (HOLMAN)

این چالزن، چالزن دورانی سنگین وزن می‌باشد. دستگاه هولمن با سیستم ضربه ای - دورانی و با قطر راد ۱۵۰ میلی‌متر کار می‌کند، زیربندی این دستگاه، زیربندی بولدوزر می‌باشد که با موتور کاترپیلار کار

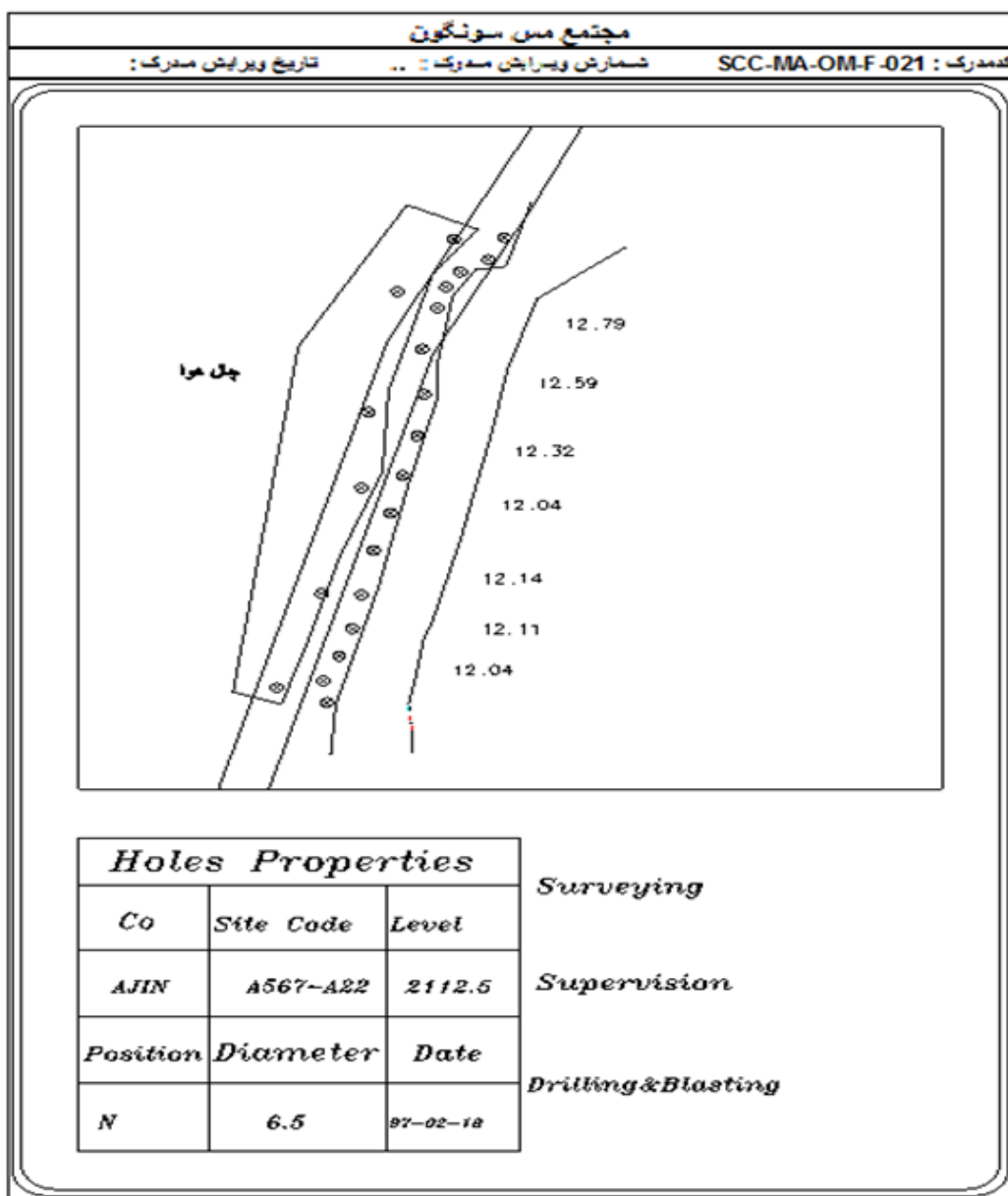
می‌کند و سرمته‌ی آن نیز از نوع دگمه‌ای (هلکو) می‌باشد. در نوع چالزن، خرده‌های حفاری بوسیله‌ی هوای فشرده و با سیستم مکنده‌ی دستگاه مکیده و در مکان دیگر تخلیه می‌شود [۳۹].



شکل ۴-۲. دستگاه چال‌زنی معدن مس سونگون

در معدن مس سونگون معمولاً از دریل‌های ۶/۵ اینچی استفاده می‌شود. بخش طراحی معدن، کروکی و نقشه‌ی چال‌ها را طراحی می‌کند و سپس بخش حفاری، مطابق نقشه‌ی ارائه شده، چال‌ها را حفاری می‌کند.

در شکل ۴-۳ نمونه‌ای از کروکی طراحی شده برای حفر چال‌ها آورده شده است. معمولاً چال‌ها را در شبکه‌های مربعی و لوزی حفر می‌کنند. پس از حفاری چال‌ها، مسئول بخش حفاری از چال‌ها بازدید کرده و چال‌هایی که دارای مشکل هستند، علامت‌گذاری کرده (کشیدن رنگ آبی دور چال)، تا قسمت آتشیاری، در آن چال‌ها ماده‌ی منفجره قرار ندهد [۳۹].



شکل ۴-۳. کروکی طراحی شده برای حفر چالها

۴-۵ آتشکاری

چالزنی و خرج گذاری در شیفیت صبح انجام می گیرد، ساعت آتشکاری و انفجار از ساعت ۱۳ تا ۱۴ می باشد. قبل از انفجار، محدوده‌ی معدن با تابلوهای واحد ایمنی بسته می شود و تمامی معدن از ماشین آلات و نیروهای انسانی تخلیه می گردد و به وسیله آژیرهای ثابت و متحرک در روی ماشینهای ایمنی

علامت داده می شود. سیستم ارتباطی آتشکارها با یکدیگر به وسیله ی گوشی بی سیم بوده، که با مرکز و اطلاعات در ارتباط می باشد و نیز به کمک پرچم های قرمزی رنگ انجام می پذیرد. حین عملیات خرج گذاری، محدوده ی هر جبهه کار به وسیله ی علائم هشدار دهنده و پرچم مشخص شده و ورود به محدوده ی انفجار برای همه به جز دست اندرکاران امر ممنوع می باشد. در معدن سونگون از نیترات آمونیوم (ANFO)، به عنوان خرج اصلی استفاده می شود. از بوستر امولایت و پودر آذر که نسبت به دینامیت، قدرت و سرعت زیادی دارند به عنوان خرج ته چال و خرج کمکی استفاده می شود. چاشنی مورد استفاده در معدن مس سونگون چاشنی معمولی، فتیله ی باروتی، رله ی تأخیری و کورتکس می باشد. در این معدن از چاشنی های تأخیری الکتریکی استفاده نمی شود. در شکل ۴-۴ دستگاه خرج گذاری معدن مس سونگون نشان داده شده است [۳۹].



شکل ۴-۴. دستگاه خرج گذاری معدن مس سونگون (آنفوتراک)

۴-۶ بارگیری

در معدن مس سونگون به ازای هر سه پله، یک دامپ در نظر گرفته شده است و شیب پله ها در حدود ۶۳ تا ۶۵ درجه می باشد و شیب کلی معدن در حدود ۳۷ درجه می باشد. نسبت باطله برداری در معدن ۲ به ۱

می‌باشد. پایین‌ترین تراز در معدن تراز ۱۸۶۷/۵ و بالاترین تراز در معدن ۲۳۳۷/۵ می‌باشد و دامپ کم‌عیار اکسید در تراز ۲۳۰۰ قرار دارد. در معدن سونگون عمده عملیات بارگیری توسط شاول، لودر و بولدوزر انجام می‌شود. در شکل ۴-۵ بارگیری دامپتراک توسط شاول نشان داده شده است [۳۹].

۴-۷ باربری

در معدن مس سونگون عملیات باربری در داخل پیت توسط دامپتراک‌ها انجام می‌گیرد. سه نوع دامپتراک در معدن وجود دارد که عبارتند از دامپتراک‌های ۳۰ تنی، ۶۰ تنی و ۱۰۰ تنی می‌باشد (شکل ۴-۶) [۳۹].

۴-۸ جمع‌بندی

با توجه به مشخصات کانسار و به دلیل تولید بالا و لزوم استفاده از ماشین‌آلات بزرگ، استخراج معدن مس سونگون به روش روباز طراحی شده است. عملیات حفاری چال‌ها، بارگیری مواد استخراج شده و حمل آن‌ها به دامپ‌های باطله و ماده‌ی معدنی و همین‌طور سنگ‌شکن، توسط شرکت‌های پیمان‌کاری انجام می‌شود. پس از حفر چال‌های انفجاری توسط دستگاه‌های حفاری، عملیات خرج‌گذاری و انفجار چال‌ها صورت می‌پذیرد. پس از عملیات انفجار چال‌ها، بارگیری مواد استخراج شده توسط شاول و لودر انجام می‌گیرد. بولدوزر و گریدر نیز برای تمیز کردن اطراف شاول و سطح پله‌ها استفاده می‌شود. حمل مواد استخراجی نیز توسط دامپتراک‌های ۳۰ تا ۱۰۰ تنی انجام می‌شود. باطله‌ها از پله‌های عملیاتی به طرف دامپ‌های باطله که در دره پخیرچای قرار دارند، حمل می‌گردند. مواد معدنی نیز به سنگ‌شکن و یا دامپ‌های سولفور واقع در جنوب و شمال معدن حمل می‌گردند.



شکل ۴-۵. بارگیری دامپتراک توسط شاول



شکل ۴-۶. باربری معدن مس سونگون (دامپتراک)

فصل ۵ : ارزیابی منحصی برای پیش بینی خردایش با استفاده از سیستم مهندسی

سنگ فازی

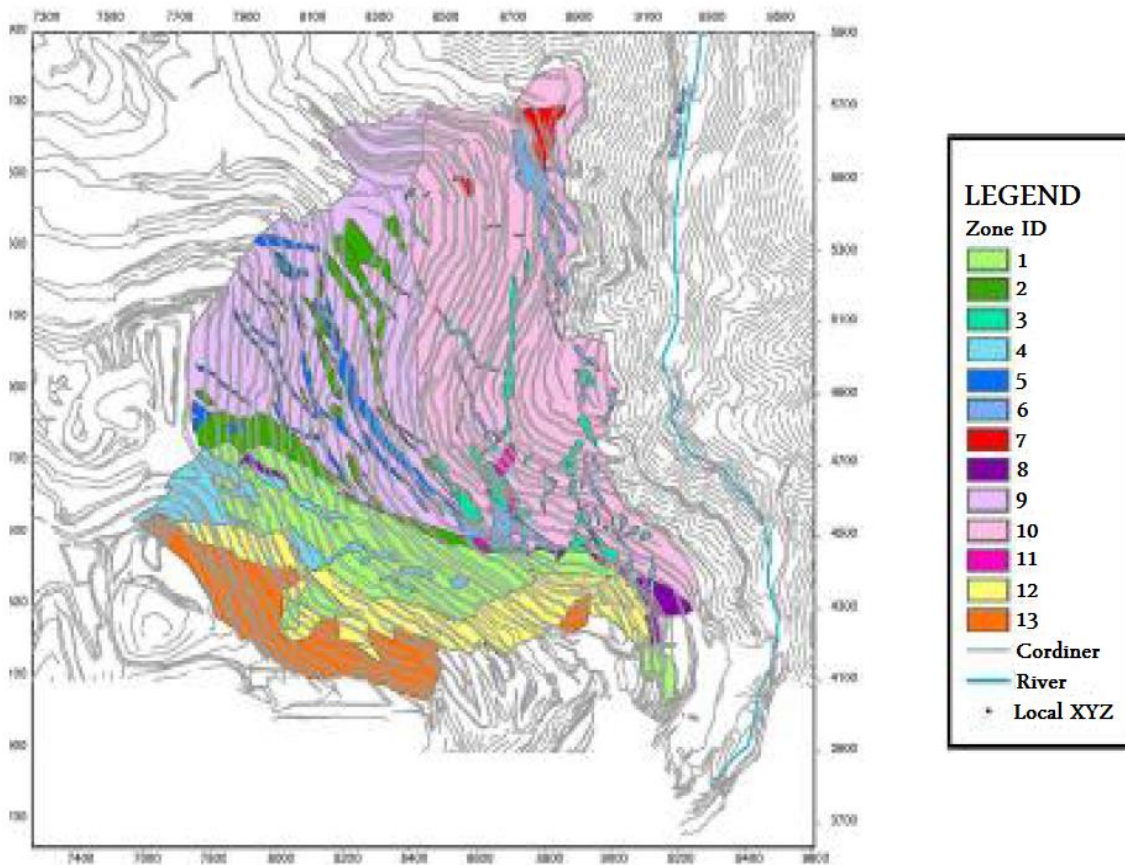
۵-۱ مقدمه

هدف اصلی از انجام عملیات انفجار در معادن، خردایش سنگ و حصول ابعاد سنگ خرد شده‌ی مورد نیاز است که در نهایت به بهینه‌سازی هزینه‌های کلی می‌انجامد. به منظور انجام برنامه‌ریزی مناسب تولید و همچنین انجام فرآیند بهینه‌سازی حین استخراج معدن، آگاهی از توزیع ابعادی مواد خردشده حاصل از انفجار، پیش از انجام انفجار، لازم و ضروری است. بدین منظور، در این فصل، ابتدا داده‌ها از معدن مس سونگون برداشت شده و با استفاده از نرم‌افزار Goldsize خردایش آن مورد بررسی قرار می‌گیرد، در ادامه با استفاده از پرسش‌نامه‌های تهیه شده‌ی ماتریس اندرکنش فازی، قابلیت خردایش محاسبه می‌شود و سپس مجموع علت و اثر، وزن هر پارامتر محاسبه شده و نمودار علت-اثر و هیستوگرام شدت اندرکنش‌ها رسم و نتایج بدست آمده بررسی می‌شود. سپس بازه‌بندی پیشنهادی برای پارامترها ارائه شده و با محاسبه شاخص خردایش، سطح ریسک انفجارهای برداشت‌شده از معدن مس سونگون مورد بررسی قرار می‌گیرد و در ادامه با استفاده از شاخص خردایش و D80 مدلی برای پیش‌بینی خردایش ارائه می‌شود.

۵-۲ برداشت داده

در این پایان‌نامه، اطلاعات ۱۱ مورد از انفجارهای انجام‌شده در معدن مس سونگون مورد استفاده قرار گرفته است. فحتمتی و همکاران در سال ۱۳۹۲، معدن مس سونگون را به ۱۳ پهنه تقسیم‌بندی کردند (شکل ۵-۱)، آن‌ها برای این کار، حدود ۳۰۰۰ برداشت از مشخصات درزه‌های موجود در پله‌های معدن، با توجه به شرایط ساختمانی، زمین‌شناسی و دگرسانی محل برداشت، انجام دادند. همچنین به منظور تعیین مقادیر پارامترهای مهندسی سنگ، آزمون‌های آزمایشگاهی مقاومت فشاری تک محوره با تعیین مدول الاستیسیته و ضریب پواسون (۱۱۲ نمونه)، آزمایش مقاومت فشاری سه محوره (۱۲۷ نمونه) و مقاومت کششی برزیلین

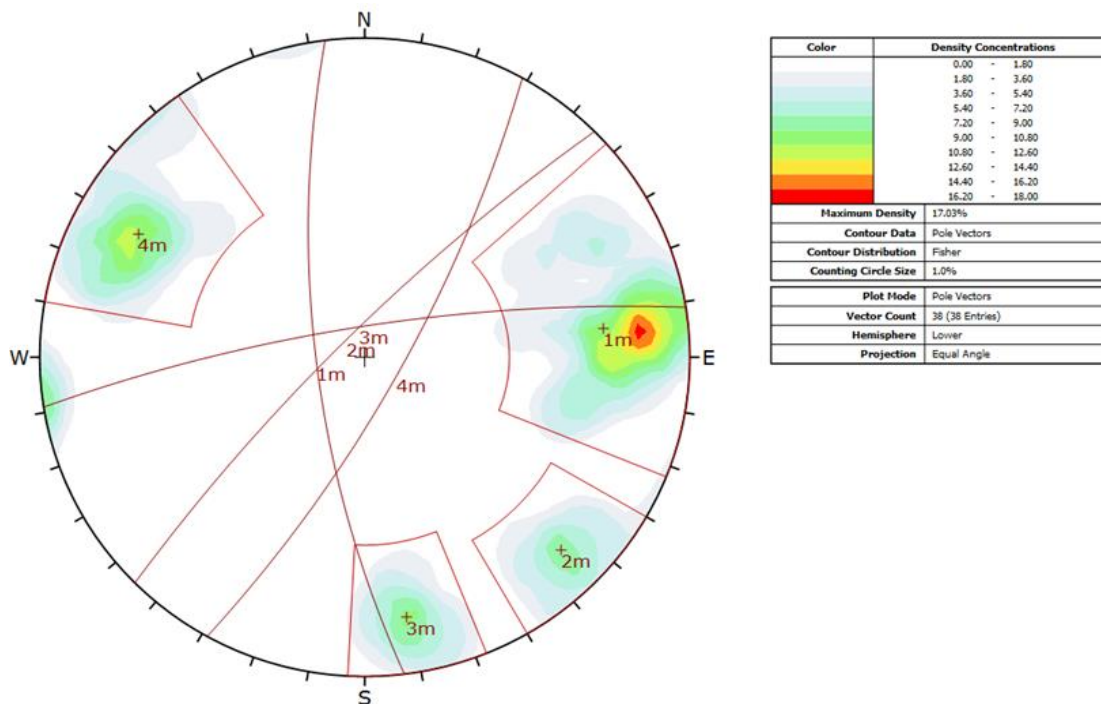
(۲۵۵ نمونه)، بر روی نمونه‌های بدست‌آمده از ۱۵ گمانه ژئوتکنیکی را انجام دادند. بر این اساس، هر پهنه، واحدی از معدن است که ویژگی‌های یکسانی از نظر جنس مصالح، نوع دگرسانی و نیز شرایط زمین‌شناسی ساختمانی دارد [۴۰]. در ادامه با توجه به محل قرارگیری محل آتشفباری که از بخش آتشفباری معدن قابل تهیه است، مقاومت سنگ میانگین آن پهنه، به عنوان پارامتر مقاومت سنگ این پایان‌نامه لحاظ شده است. در جدول ۵-۱ پارامترهای مهندسی توده‌سنگ معدن مس سونگون، که توسط فحامتی و همکاران ارائه شده است، آورده شده است. سپس برداشت کاملی از درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها در پهنه‌های مورد بررسی انجام گرفت و اطلاعات جمع‌آوری شده برای هر پهنه، بر روی شبکه‌های قطبی رسم گردید (شکل ۵-۲).



شکل ۵-۱. پهنه‌بندی معدن مس سونگون [۴۰]

جدول ۵-۱. پارامترهای مهندسی توده‌سنگ معدن مس سونگون [۴۰]

Zone ID	Rock Type	Alt.	Fault Zone	Rock mass Engineering Parameters											
				C (MPa)		(degree)		E (GPa)		UCS (MPa)		SIG _T (MPa)			
				Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
1	DK1a	PHY	I	0.077	0.249	46.69	61.90	0.06	0.27	1.44	4.12	12.14	146.72	0.54	19.3
2			II												
3			III												
4	DK1b	PRP	I	0.103	0.264	49.32	62.62	0.05	0.28	1.86	4.12	20.25	165.54	1.97	15.83
5			II												
6			III												
7	Skarn	-	III	0.091		46.44		0.12		1.87		20.54		-	-
8	SP	PHY	I	0.065	0.177	40.00	56.44	0.07	0.3	1.10	3.56	7.06	74.67	1.3	13.46
9			II												
10			III												
11		POT	III	0.075	0.227	45.73	58.95	0.03	0.28	1.49	4.12	13.09	117.85	1.33	17.8
12	PC	به علت سطحی بودن، در برنامه ریزی استخراج کوتاه مدت، حذف می‌شوند.													
13	TB														



شکل ۵-۲. ترسیم ناپیوستگی‌های پهنه‌ی شماره‌ی ۱۰ بر روی شبکه‌های قطبی

برای پارامترهای بازشدگی، تداوم و فاصله‌داری درزه‌ها، میانگین تعداد آنها منظور شده است. پارامترهای

قابل کنترل از قبیل بارسنگ، فاصله‌ی جناحی چال‌ها و... از بخش آتشیاری معدن تهیه شده است.

اطلاعات برداشت شده در جدول ۲-۵ و جدول ۳-۵ آورده شده است.

جدول ۲-۵. اطلاعات برداشت شده برای انفجارهای مورد بررسی

۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره انفجار
۱	۱۲	۶	۵	۲	۹	شماره‌ی پهنه
۵	۶	۴	۴	۴/۵	۶	بارسنگ (m)
۱۰۰	۱۶۳	۱۵۵	۱۶۳	۱۴۰	۱۶۰	خرج ویژه (g/ton)
۱/۳۱	۱/۲۰	۱/۳۵	۱/۵۰	۱/۰۰	۱/۱۸	S/B
۱/۰۴	۰/۸۳	۰/۷۱	۰/۷۵	۱/۰۰	۰/۸۳	St/B
۲/۶۷	۲/۱۹	۳/۰۴	۳/۲۸	۲/۵۴	۲/۱۰	ضریب سفتی (H/B)
۳	۴	۳	۴	۳	۴	تعداد ردیف
۰	۰	۰	۰	۰	۰	زمان تاخیر (ms/m)
۰	۰	۰	۰	۰	۰	انحراف چال (deg)
۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	قطر چال (m)
۰/۲۷	۰/۱۷	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۱۹	J/B
۵	۲	۴	۳	۳	۲	تعداد دسته درزه
بزرگتر از ۵	۱ تا ۵	بزرگتر از ۵	۱ تا ۵	بزرگتر از ۵	۱ تا ۵	بازشدگی درزه‌ها (mm)
۰/۰۶-۰/۲	۰/۲-۰/۶	۰/۲-۰/۶	۰/۲-۰/۶	۰/۲-۰/۶	۰/۲-۰/۶	فاصله‌داری درزه‌ها (m)
۱۰ تا ۳	۱۰ تا ۳	۱۰ تا ۳	۱۰ تا ۳	۱۰ تا ۳	۱۰ تا ۳	تداوم درزه‌ها (m)
پرشدگی سخت	پرشدگی سخت	پرشدگی سخت	پرشدگی سخت	پرشدگی سخت	پرشدگی سخت	پرشدگی
مطلوب	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	شیب و جهت شیب
۷۹	۶۵	۹۲	۹۲	۷۹	۴۰	مقاومت سنگ (Mpa)

ادامه‌ی جدول ۳-۵. جدول اطلاعات برداشت شده برای انفجارهای مورد بررسی

۱۱	۱۰	۹	۸	۷	شماره انفجار
۱۰	۱۱	۲	۲	۴	شماره پهنه
۵	۵	۴	۴	۳/۵	بارسنگ (m)
۱۰۰	۱۰۰	۱۴۰	۱۵۰	۱۶۰	خرج ویژه (g/ton)
۱/۱۸	۱/۴۰	۱/۳۰	۱/۷۸	۱/۴۳	S/B
۰/۸۰	۱/۰۴	۰/۷۵	۰/۷۵	۱/۱۴	St/B
۱/۳۰	۲/۵۸	۳/۱۰	۲/۹۳	۳/۵۹	ضریب سفتی (H/B)
۲	۲	۲	۳	۳	تعداد ردیف
۰	۰	۰	۰	۰	زمان تاخیر (ms/m)
۰	۰	۰	۰	۰	انحراف چال (deg)
۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	قطر چال (m)
۰/۱۰	۰/۱۷	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۲۹	J/B
۲	۴	۳	۳	۵	تعداد دسته درزه
	بزرگتر	بزرگتر			بازشدگی درزه ها (mm)
۵ تا ۱	از ۵	از ۵	۵ تا ۱	۵ تا ۱	
۰/۰۶-۰/۲	۰/۰۶-۰/۲	۰/۲-۰/۶	۰/۲-۰/۶	۰/۲-۰/۶	فاصله داری درزه ها (m)
۱۰ تا ۳	۱۰ تا ۳	۱۰ تا ۳	۱۰ تا ۳	۱۰ تا ۳	تداوم درزه ها (m)
پرشدگی سخت	پرشدگی سخت	پرشدگی سخت	پرشدگی نرم	پرشدگی سخت	پرشدگی
مطلوب	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	شیب و جهت شیب
۴۰	۴۰	۷۹	۷۹	۹۲	مقاومت سنگ (Mpa)

۳-۵ بررسی خردایش حاصل از انفجار

یکی از عناصر کلیدی در بهینه‌سازی سیستم خردایش، توسعه‌ی روش‌های عملی برای تعیین درجه‌ی خردایش است. هم روش‌های مستقیم و هم روش‌های غیرمستقیم برای تعیین خردایش وجود دارد. روش‌های مستقیم شامل آنالیز سرنندی، شمارش بولدرها و اندازه‌گیری مستقیم قطعات است. واضح است که دقیق‌ترین روش تعیین خردایش، سرنند کردن کل مواد است. اگرچه سرنند کردن برای مقادیر کم مواد امکان‌پذیر است، ولی روشی وقت‌گیر، خسته‌کننده و پرهزینه است. همچنین شمردن و اندازه‌گیری

بولدرها یک روش متداول و ساده است که فقط اطلاعاتی در مورد قسمت انتهایی توزیع خردایش فراهم می‌کند. امروزه روش‌های غیرمستقیم در این زمینه گسترش زیادی پیدا کرده‌اند. دو دسته از تکنیک‌های غیرمستقیم عبارتند از:

الف) روش‌های عکس برداری

ب) اندازه‌گیری پارامترهایی که می‌توانند به درجه‌ی خردایش همبستگی داشته باشند.

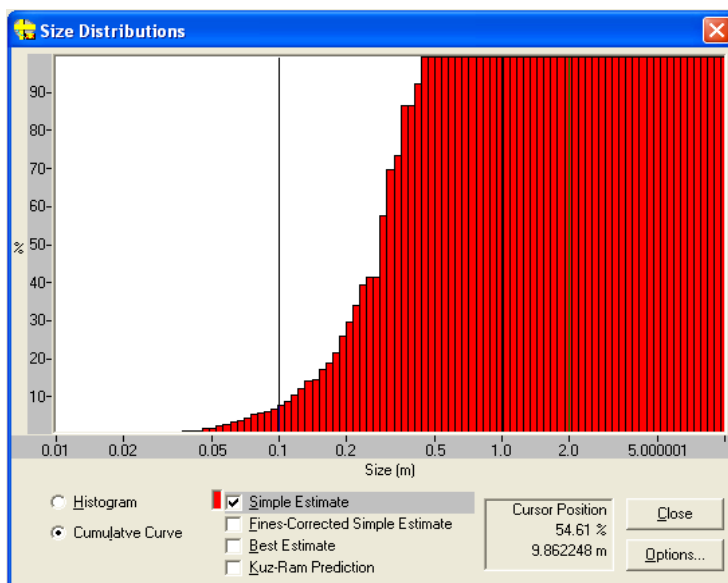
یکی از روش‌های نوین و متداول در تعیین توزیع خردشدگی سنگ، روش عکس برداری است. این روش یک روش غیر مستقیم در تعیین دانه‌بندی جبهه کار است. از مزایای این روش می‌توان به استفاده آسان، اندازه‌گیری سریع در محل، قیمت مناسب، عدم ایجاد اختلال در تولید، قابلیت کاهش خطا از طریق افزایش تعداد نمونه‌ها، و غیر مخرب بودن آن نسبت به آنالیز سرنندی (در اندازه‌گیری سنگ‌ها و کانه‌های ضعیف مانند ذغال و ژئوپس) اشاره کرد [۲۷]. در این تحقیق از نرم‌افزار Goldsize برای بررسی خردایش استفاده شده است. برای این کار ابتدا بالا و پایین کپه‌ی انفجاری دو عدد توپ به عنوان مقیاس با اندازه‌ی ثابت ۱۷/۰ متر (جهت تشخیص فاصله‌ی دو مقیاس و نیز تشخیص شیب)، قرار داده شده است. سپس با استفاده از دوربین دیجیتال، در سه مرحله (بلافاصله بعد از انفجار، در ۵۰ درصد بار حمل شده و حدود ۲۰ درصد انتهای بار)، از جهات مختلف از کپه‌ی انفجاری تعداد زیادی عکس گرفته شده است، در مرحله‌ی بعد ۱۰ الی ۱۵ عکس، با توجه به اینکه معرف بخش بزرگی از خردایش حاصله باشند، انتخاب شده و بعد از تبدیل شدن به فرمت BMP وارد نرم‌افزار می‌شوند. در مرحله‌ی بعد مقیاس‌ها مشخص شده و اندازه‌ی آنها وارد نرم‌افزار شده است. سپس مرز تک‌تک ذرات به صورت دستی مشخص می‌شود (شکل ۵-۳).



شکل ۳-۵. نمونه عکس آنالیز شده دستی در نرم افزار Goldsize

بعد از مراحل فوق، نرم افزار بر اساس اندازه‌ی ذرات و درصد ذرات عبوری، یک نمودار تجمعی برای هر تصویر ارائه می‌دهد (شکل ۴-۵). با استفاده از نمودارهای توزیع ابعاد خردایش، می‌توان نمودارهای خردایش در هر مقطع را در نرم‌افزار Excel ترسیم کرد.

با استفاده از نمودار توزیع ابعاد خردایش، نمودارهای خردایش را برای هر عکس به رسم می‌شود. برای رسم نمودارهای خردایش، بر روی نمودار تجمعی بدست آمده از نرم‌افزار، اندازه‌ی ذرات برای درصدهای مختلف ذرات عبوری، یادداشت می‌شود. سپس با نرم‌افزار Excel نمودارهای خردایش رسم می‌شود. یکی از خروجی‌های که از نرم‌افزار حاصل می‌شود، درصد بازدهی انفجار است. درصد بازدهی انفجار برای هر عکس را می‌توان تفاضل *in range* و *under size* تعریف کرد. بنابراین بازدهی عملیات انفجار، میانگین بازدهی عکس‌های آن انفجار است. از شکل ۵-۵ که خروجی نرم‌افزار Goldsize است اطلاعاتی مانند X80 و *in range* و *under size* و... قابل استخراج است در ادامه با استفاده از جدول ۴-۵ می‌توان، خردایش حاصل از انفجار را به صورت کیفی بیان کرد.



شکل ۴-۵. نمودار توزیع ابعاد خردایش بدست آمده از نرم افزار Goldsize

	Simple Estimate	Fines Corrected	Best Estimate	Frag. Prediction
Oversize	0.00 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %
In range	85.33 %	85.33 %	0.00 %	98.65 %
Undersize	14.31 %	14.32 %	0.00 %	32.89 %
80% Size	0.34 m	0.34 m	0.00 m	0.27 m
50 % Size	0.17 m	0.17 m	0.00 m	0.15 m
20% Size	0.12 m	0.12 m	0.00 m	0.07 m

شکل ۵-۵. خروجی نرم افزار Goldsize

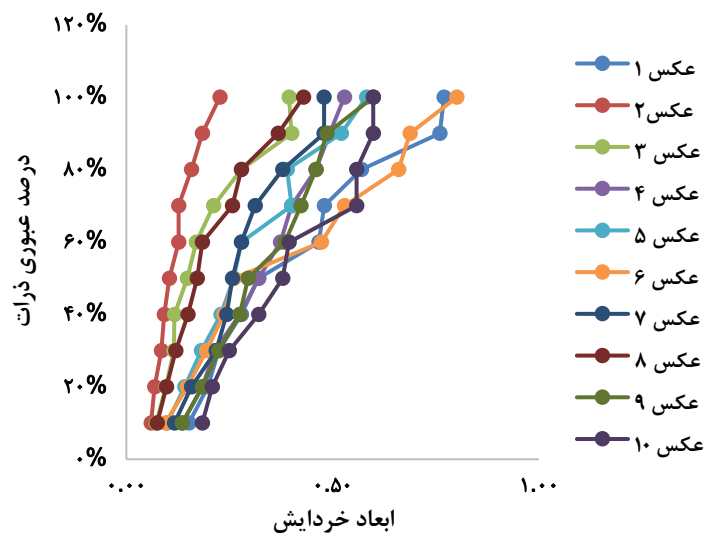
جدول ۴-۵. رده بندی کیفی وضعیت خردایش [۴۱]

رده	۱	۲	۳	۴	۵	۶
بازدهی انفجار %	بیشتر از ۹۵	۸۵-۹۵	۷۵-۸۵	۶۵-۷۵	۵۰-۶۵	کمتر از ۵۰
وضعیت کیفی	عالی	خیلی خوب	خوب	متوسط	نامناسب	خیلی بد

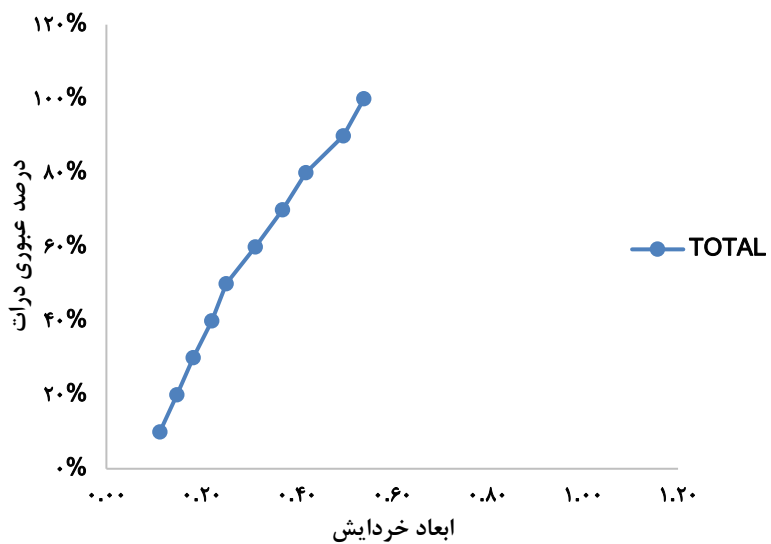
در ادامه نتیجه‌ی تجزیه و تحلیل سه انفجار از یازده انفجار برداشت شده، که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند و در ادامه برای مقایسه با نتایج حاصل شده از پیش‌بینی مدل، مورد استفاده قرار می‌گیرند، آورده شده است (جدول ۵-۵ تا جدول ۷-۵ و شکل ۵-۵ تا شکل ۵-۱۱).

جدول ۵-۵. انفجار انتخابی ۱

درصد تجمعی	عکس ۱	عکس ۲	عکس ۳	عکس ۴	عکس ۵	عکس ۶	عکس ۷	عکس ۸	عکس ۹	عکس ۱۰	میانگین (m)
۱۰%	۰/۱۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۱۱
۲۰%	۰/۲۰	۰/۰۷	۰/۱۰	۰/۱۸	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۰	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۱۵
۳۰%	۰/۲۲	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۲۲	۰/۱۲	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۱۸
۴۰%	۰/۲۸	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۲۸	۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۱۵	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۲۲
۵۰%	۰/۳۲	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۳۲	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۱۷	۰/۳۰	۰/۳۸	۰/۲۵
۶۰%	۰/۴۷	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۳۷	۰/۲۸	۰/۴۷	۰/۲۸	۰/۱۸	۰/۳۸	۰/۳۹	۰/۳۱
۷۰%	۰/۴۸	۰/۱۳	۰/۲۱	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۵۳	۰/۳۱	۰/۲۶	۰/۴۲	۰/۵۶	۰/۳۷
۸۰%	۰/۵۷	۰/۱۶	۰/۲۸	۰/۴۶	۰/۳۹	۰/۶۶	۰/۳۸	۰/۲۸	۰/۴۶	۰/۵۶	۰/۴۲
۹۰%	۰/۷۶	۰/۱۸	۰/۴۰	۰/۴۹	۰/۵۲	۰/۶۹	۰/۴۸	۰/۳۷	۰/۴۹	۰/۶۰	۰/۵۰
۱۰۰%	۰/۷۷	۰/۲۳	۰/۳۹	۰/۵۳	۰/۵۸	۰/۸۰	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۵۴
X _{۸۰} (m)	۰/۹۹	۰/۱۶	۰/۲۹	۰/۴۶	۰/۴۱	۰/۶۵	۰/۳۸	۰/۲۹	۰/۴۷	۰/۵۹	۰/۴۷
بازدهی انفجار %	۶۰/۴۶	۵۵/۰۹	۷۷/۲۰	۸۸/۰۶	۷۲/۸۵	۵۱/۰۸	۹۳/۳۱	۷۷/۲۰	۸۶/۵۲	۶۱/۱۱	۷۲/۲۹



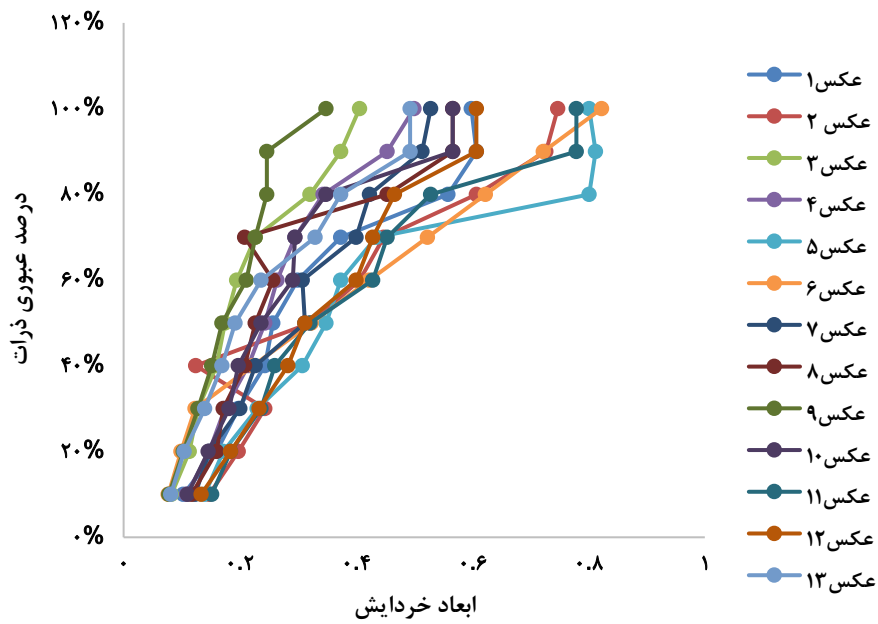
شکل ۵-۶. نمودار خردایش عکس‌های انفجار انتخابی ۱



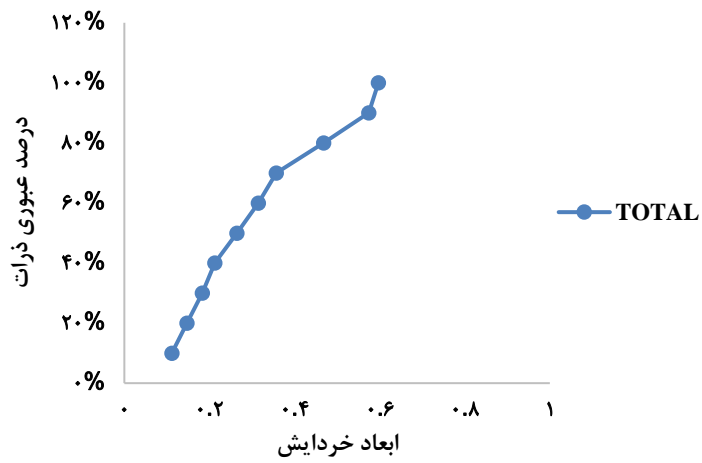
شکل ۵-۷. نمودار خردایش انفجار انتخابی ۱

جدول ۵-۶. انفجار انتخابی ۲

میانگین (m)	عکس ۱۳	عکس ۱۲	عکس ۱۱	عکس ۱۰	عکس ۹	عکس ۸	عکس ۷	عکس ۶	عکس ۵	عکس ۴	عکس ۳	عکس ۲	عکس ۱	درصد تجمعی
۰/۱۱۲	۰/۰۸۱	۰/۱۳۳	۰/۱۵۲	۰/۱۱	۰/۰۷۸	۰/۱۱۷	۰/۱۲۳	۰/۰۷۷	۰/۱۴	۰/۱۰۹	۰/۰۸۲	۰/۱۴۷	۰/۱۰۳	۱۰%
۰/۱۴۷	۰/۱۰۴	۰/۱۸۴	۰/۱۸۴	۰/۱۴۵	۰/۱۰۳	۰/۱۶	۰/۱۴۷	۰/۰۹۹	۰/۱۷۲	۰/۱۴۷	۰/۱۱۳	۰/۱۹۷	۰/۱۶	۲۰%
۰/۱۸۴	۰/۱۴	۰/۲۳۳	۰/۲۳۶	۰/۱۸۲	۰/۱۲۸	۰/۱۷۲	۰/۲	۰/۱۲۳	۰/۲۳	۰/۱۷۴	۰/۱۲۸	۰/۲۴۳	۰/۱۹۷	۳۰%
۰/۲۱۳	۰/۱۶۹	۰/۲۸۳	۰/۲۶	۰/۱۹۷	۰/۱۵۲	۰/۲۰۹	۰/۲۲۷	۰/۲۲۳	۰/۳۰۸	۰/۲۱۴	۰/۱۶	۰/۱۲۴	۰/۲۴۳	۴۰%
۰/۲۶۴	۰/۱۹۲	۰/۳۱۲	۰/۳۲۱	۰/۲۳۶	۰/۱۶۹	۰/۲۲۷	۰/۳۱۲	۰/۳۲۳	۰/۳۴۸	۰/۲۴۳	۰/۱۷۴	۰/۳۲۲	۰/۲۵۷	۵۰%
۰/۳۱۵	۰/۲۳۶	۰/۴	۰/۴۲۹	۰/۲۹۱	۰/۲۱۱	۰/۲۵۷	۰/۳۰۸	۰/۴۲۳	۰/۳۷۳	۰/۲۶۴	۰/۱۹۵	۰/۴۰۶	۰/۲۹۹	۶۰%
۰/۳۵۷	۰/۳۳	۰/۴۲۹	۰/۴۵۴	۰/۲۹۵	۰/۲۲۷	۰/۲۰۸	۰/۴	۰/۵۲۳	۰/۴۳۵	۰/۲۹۵	۰/۲۲۷	۰/۴۴۷	۰/۳۷۳	۷۰%
۰/۴۶۹	۰/۳۷۳	۰/۴۶۶	۰/۵۲۸	۰/۳۴۸	۰/۲۴۶	۰/۴۵۴	۰/۴۲۳	۰/۶۲۳	۰/۸۰۱	۰/۳۴۴	۰/۳۲۱	۰/۶۰۷	۰/۵۵۸	۸۰%
۰/۵۷۴	۰/۴۹۳	۰/۶۰۷	۰/۷۷۹	۰/۵۶۶	۰/۲۴۶	۰/۵۶۶	۰/۵۱۴	۰/۷۲۳	۰/۸۱۲	۰/۴۵۴	۰/۳۷۳	۰/۷۲۷	۰/۶۰۷	۹۰%
۰/۵۹۷	۰/۴۹۳	۰/۶۰۷	۰/۷۷۹	۰/۵۶۶	۰/۳۴۸	۰/۵۶۶	۰/۵۲۸	۰/۸۲۲	۰/۸۰۱	۰/۵	۰/۴۰۶	۰/۷۴۷	۰/۵۹۹	۱۰۰%
۰/۴۷	۰/۳۷	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۳۸	۰/۲۵	۰/۴۵	۰/۴۳	۰/۵۸	۰/۸۱	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۶۰	۰/۵۳	X۸۰(m)
۷۷/۲۴	۶۲/۳۷	۸۱/۹	۸۲/۴۶	۷۱/۹۳	۸۰/۹۱	۸۱/۳۱	۸۳/۹۷	۷۹/۹۱	۷۲/۲۲	۹۰/۶۶	۸۴/۲۲	۶۷/۶	۶۴/۶۲	بازدهی انفجار %



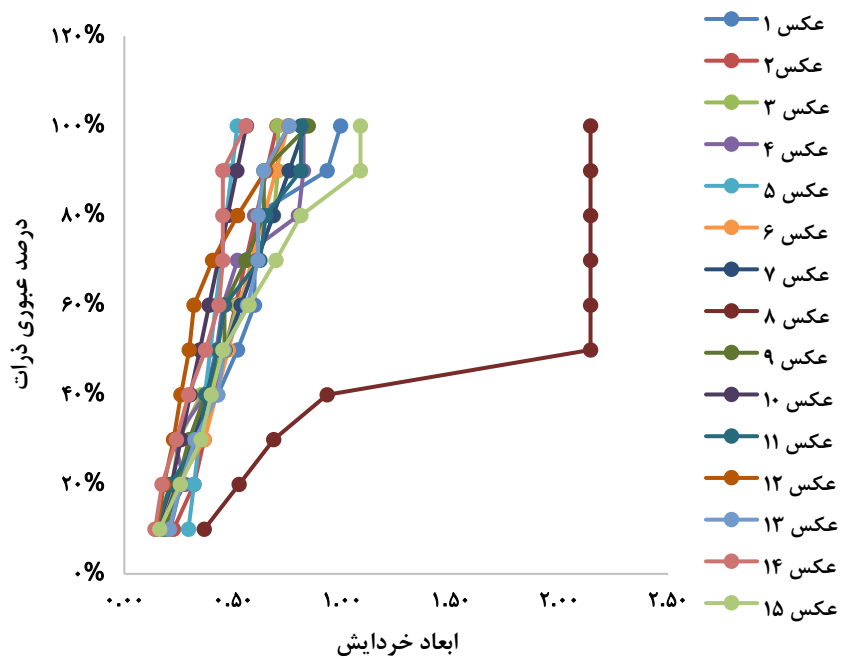
شکل ۵-۸. نمودار خردایش عکس‌های انفجار انتخابی ۲



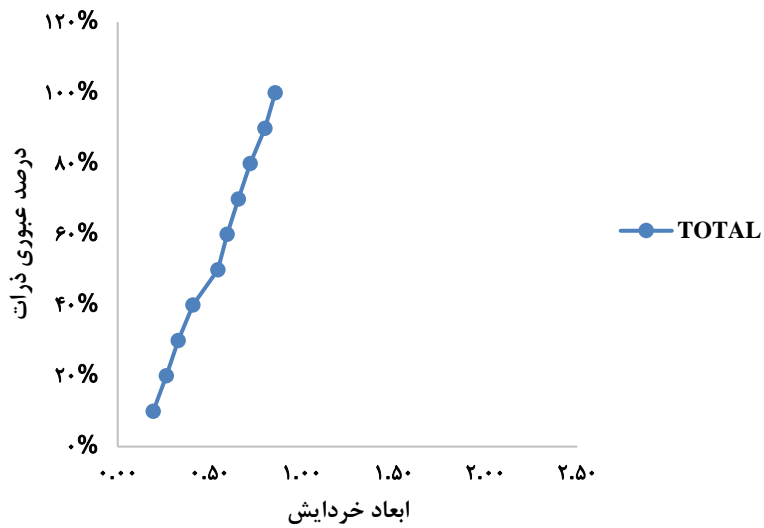
شکل ۵-۹. نمودار خردایش انفجار انتخابی ۲

جدول ۵-۷. انفجار انتخابی ۳

میانگین (m)	عکس ۱۵	عکس ۱۴	عکس ۱۳	عکس ۱۲	عکس ۱۱	عکس ۱۰	عکس ۹	عکس ۸	عکس ۷	عکس ۶	عکس ۵	عکس ۴	عکس ۳	عکس ۲	عکس ۱	درصد تجمعی
۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۳۷	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۳۰	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۲۳	۰/۲۱	۱۰%
۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۱۷	۰/۲۶	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۵۳	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۳۲	۰/۲۸	۰/۲۲	۰/۳۲	۰/۲۶	۲۰%
۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۲۴	۰/۳۳	۰/۲۳	۰/۳۴	۰/۲۶	۰/۳۰	۰/۶۹	۰/۳۲	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۳۷	۰/۳۳	۳۰%
۰/۴۱	۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۴۳	۰/۲۶	۰/۳۸	۰/۳۰	۰/۳۷	۰/۹۳	۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۳۷	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۴۲	۰/۴۳	۴۰%
۰/۵۴	۰/۴۵	۰/۳۷	۰/۴۶	۰/۳۰	۰/۴۳	۰/۳۵	۰/۴۶	۲/۱۴	۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۴۰	۰/۴۲	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۵۲	۵۰%
۰/۵۹	۰/۵۷	۰/۴۴	۰/۵۷	۰/۳۲	۰/۴۶	۰/۳۹	۰/۴۶	۲/۱۴	۰/۵۴	۰/۵۳	۰/۴۲	۰/۴۵	۰/۵۲	۰/۵۱	۰/۶۰	۶۰%
۰/۶۶	۰/۷۰	۰/۴۵	۰/۶۲	۰/۴۱	۰/۶۲	۰/۴۳	۰/۵۶	۲/۱۴	۰/۶۱	۰/۵۹	۰/۴۵	۰/۵۲	۰/۶۱	۰/۵۶	۰/۶۰	۷۰%
۰/۷۲	۰/۸۱	۰/۴۵	۰/۶۲	۰/۵۲	۰/۶۵	۰/۴۸	۰/۶۴	۲/۱۴	۰/۶۸	۰/۶۴	۰/۴۷	۰/۸۰	۰/۶۹	۰/۶۱	۰/۶۰	۸۰%
۰/۸۰	۱/۰۹	۰/۴۵	۰/۶۴	۰/۶۵	۰/۸۱	۰/۵۲	۰/۶۴	۲/۱۴	۰/۷۶	۰/۷۰	۰/۵۰	۰/۸۲	۰/۷۱	۰/۶۵	۰/۹۳	۹۰%
۰/۸۶	۱/۰۹	۰/۵۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۵۶	۰/۸۵	۲/۱۴	۰/۸۳	۰/۷۵	۰/۵۲	۰/۸۲	۰/۷۱	۰/۷۰	۰/۹۹	۱۰۰%
۰/۵۵	۰/۵۴	۰/۵۵	۰/۵۸	۰/۵۳	۰/۶۶	۰/۴۸	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۵۱	۰/۴۹	۰/۵۳	۰/۵۷	۰/۶۰	۰/۴۹	۰/۵۱	X۸۰(m)
۵۴/۵۵	۵۳/۴۸	۸۸/۲۱	۵۰/۰۳	۷۵/۱۹	۶۴/۵۱	۶۷/۸۳	۵۶/۶۱	۶۲/۰۰	۱۸/۷۶	۵۵/۱۷	۱۶/۶۳	۶۴/۲۹	۵۳/۱۲	۴۸/۲۵	۴۴/۱۲	بازدهی انفجار %



شکل ۵-۱۰. نمودار خردایش عکس‌های انفجار انتخابی ۳



شکل ۵-۱۱. نمودار خردایش انفجار انتخابی ۳

با توجه به بازدهی انفجار بدست آمده برای هر انفجار و نیز رده بندی بیان شده در جدول ۴-۵ خردایش انفجارها ارزیابی و نتایج آن در جدول ۵-۸ ارائه شده است.

جدول ۵-۸. بیان کیفی انفجارهای بررسی شده

شماره انفجار	میانگین بازدهی انفجار عکسها	ارزیابی کیفی خردایش
۱	۸۳	خوب
۲	۷۵	خوب
۳	۷۷	خوب
۴	۶۴	نامناسب
۵	۷۸	خوب
۶	۷۳	متوسط
۷	۸۰	خوب
۸	۶۵	متوسط
۹	۸۱	خوب
۱۰	۵۳	نامناسب
۱۱	۷۴	متوسط

۴-۵ تشکیل ماتریس اندرکنش

همان طور که در فصل ۲ به آن اشاره شد، با بررسی کارهای انجام شده در زمینه‌ی پیش‌بینی خردایش حاصل از آتشکاری، پارامترهای مورد استفاده در این پایان‌نامه انتخاب شده است (جدول ۵-۹). به منظور درک چگونگی اثرات متقابل پارامترها، نیاز به یک مطالعه‌ی سیستمی است تا بتوان میزان اثر یک پارامتر در سایر پارامترها را تشریح نمود. بنابراین هفده پارامتر انتخاب شده، در امتداد قطر اصلی یک ماتریس اندرکنش به همراه درایه‌ی پایین سمت راست که توسط "قابلیت خردایش" پر می‌شود، قرار می‌گیرند. درایه‌ی آخر اشاره شده در واقع موضوع مورد مطالعه است. ستون اثرات متقابل که از این درایه‌ی آخر عبور می‌کند، نشان می‌دهد که چگونه سیستم، قابلیت خردایش را تحت تاثیر

قرار می‌دهد؛ به همین شکل سطر عبوری از این درایه نشان‌دهنده‌ی اثر قابلیت خردایش بر سیستم

است (جدول ۵-۱۰).

جدول ۵-۹. پارامترهای ورودی

علامت	پارامتر ورودی
P_1	بارسنگ
P_2	خرج ویژه
P_3	S/B
P_4	St/B
P_5	ضریب سفتی (H/B)
P_6	تعداد ردیف
P_7	زمان تاخیر
P_8	انحراف چال
P_9	قطر چال
P_{10}	J/B
P_{11}	تعداد دسته درزه
P_{12}	بازشدگی درزه‌ها
P_{13}	فاصله داری درزه‌ها
P_{14}	تداوم درزه‌ها
P_{15}	پرشدگی
P_{16}	شیب و جهت شیب
P_{17}	مقاومت سنگ

جدول ۵-۱۰. ماتریس اندرکنش تهیه شده

P _۱																	
	P _۲																
		P _۳															
			P _۴														
				P _۵													
					P _۶												
						P _۷											
							P _۸										
								P _۹									
									P _{۱۰}								
										P _{۱۱}							
											P _{۱۲}						
												P _{۱۳}					
													P _{۱۴}				
														P _{۱۵}			
															P _{۱۶}		
																P _{۱۷}	
																	P _{۱۸}

۵-۵ کاربرد ماتریس اندرکنش

ماتریس اندرکنش فازی برای مسئله پیش‌بینی خردایش به روشی که در فصل ۳ به آن اشاره شد، کدگذاری شد. برای این کار ابتدا پرسش‌نامه‌ای تهیه و به ۱۷ کارشناس خبره در زمینه‌ی آتشکاری داده شد و از آن‌ها خواسته شد ماتریس اندرکنش مربوطه را به روش ESQ که معروف‌ترین و پرکاربردترین روش کدگذاری است، پر کنند. یکی از پاسخ‌نامه‌ها به عنوان نمونه در جدول ۵-۱۱ نشان داده شده است و بقیه در پیوست آورده شده است.

جدول ۵-۱۱. پرسش‌نامه‌ی تکمیل شده توسط مهندس سامان دیلمقانی، مهندس آتشبار معدن مس

سونگون

P _۱	۳	۴	۲	۰	۲	۳	۰	۲	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	P _۲	۳	۳	۰	۳	۲	۰	۴	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۴	۳	P _۳	۲	۰	۲	۳	۰	۲	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۳	۲	P _۴	۰	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۲	۲	۳	P _۵	۲	۲	۴	۲	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۲	۲	۱	۰	P _۶	۴	۰	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱	۲	۱	۱	۰	۳	P _۷	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	P _۸	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۴	۳	۲	۱	۳	۱	۲	P _۹	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۲	۰	۰	۲	۰	۰	۳	۰	P _{۱۰}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۳	۳	۲	۰	۲	۴	۳	۱	۱	P _{۱۱}	۰	۴	۲	۰	۰	۰
۳	۳	۳	۲	۰	۲	۱	۱	۲	۰	۰	P _{۱۲}	۲	۳	۴	۱	۴
۳	۲	۳	۱	۰	۳	۲	۱	۳	۰	۴	۲	P _{۱۳}	۳	۱	۲	۳
۲	۲	۲	۱	۰	۲	۱	۱	۱	۰	۲	۳	۱	P _{۱۴}	۳	۳	۴
۳	۳	۳	۲	۰	۲	۲	۳	۲	۰	۱	۳	۱	۲	P _{۱۵}	۲	۴
۲	۱	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۰	۳	۳	۳	۳	P _{۱۶}	۲
۴	۴	۴	۳	۲	۳	۴	۳	۴	۴	۳	۴	۳	۳	۱	۲	P _{۱۷}

همان‌طور که در فصل ۳ اشاره شد، برای فازی‌سازی ماتریس اندرکنش، برای هر عنصر از ماتریس، تعداد انتخاب هر یک از پنج حالت ممکن برای هر اندرکنش بر اساس قضاوت کارشناسان در نظر گرفته شده است، در جدول ۵-۱۲ مقادیر فازی اندرکنش پارامترهای مؤثر در خردایش حاصل از انفجار آورده شده است.

جدول ۵-۱۲. ماتریس اندرکنش فازی

P _۱	۳/۵	۴	۴	۲	۲	۲/۵	۲	۱	۲	۰	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۳۳۵	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۳/۸
۲/۳	P _۲	۳	۲	۳	۱/۴	۲/۵	۲	۱	۰/۹	۰	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۶۱	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۳/۸
۲/۶	۳/۱	P _۳	۱	۲	۰/۹	۲/۳	۲	۱	۱/۵	۰	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۳/۸
۱/۴	۲/۶	۳	P _۴	۳	۰/۲	۰/۹	۲	۰	۱/۳	۰	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۲
۲/۷	۲/۳	۲	۳	P _۵	۰/۲	۲	۲	۲	۱/۳	۰	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۳
۲	۲	۲	۲	۱	P _۶	۱/۹	۳	۱	۰/۳	۰	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۲
۱	۲	۲	۲	۲	۰/۲	P _۷	۰	۰	۰/۲	۰	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۶۵	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۳/۸
۱/۴	۱/۲	۱	۱	۱	۰/۲	۰/۹	P _۸	۰	۲	۰	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۶۹	۰/۱۵۷	۳
۳/۲	۳/۸	۴	۳	۳	۱/۷	۰/۲	۲	P _۹	۲	۰	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۶۵	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۳/۸
۰/۹	۲/۶	۳	۰	۲	۱/۴	۰/۲	۱	۰	P _{۱۰}	۰	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۲
۳	۳	۳	۳	۲	۰/۲	۲	۴	۱	۱	P _{۱۱}	۰/۱۶	۳/۸۴	۲	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۳/۸
۲/۸	۳	۳	۲	۱	۱/۲	۲	۱	۲	۰/۳	۰	P _{۱۲}	۱/۷۵	۲	۲/۵۸	۰/۱۷۹	۳/۸۳	۳/۸
۳	۲/۳	۲	۳	۱	۰/۲	۲	۲	۲	۰/۹	۴	۰/۱۸	P _{۱۳}	۱/۲۴	۰/۹۳۱	۰/۱۷۹	۳/۸۲	۳/۸
۲	۲	۲	۲	۱	۰/۲	۱/۶	۱	۱	۰/۲	۲	۲	۱	P _{۱۴}	۱/۷۳	۰/۸۹	۳/۸۱	۳
۱/۲	۱	۱	۱	۱	۰/۲	۱/۵	۱	۰	۰/۲	۱	۱/۹۴	۰/۱۷	۰/۱۹۱	P _{۱۵}	۰/۱۶۹	۳/۱۱	۲
۲	۱/۷	۲	۲	۱	۲	۱/۴	۲	۱	۱	۰	۲	۲	۲	۱/۴۲	P _{۱۶}	۲	۲
۳/۷	۳/۷	۴	۳	۳	۲/۶	۲	۲	۳	۲	۳	۲/۲۵	۲	۲	۱/۴۲	۰/۱۷۹	P _{۱۷}	۳/۸
۰/۲	۰/۲	۰	۰	۰	۰/۲	۰/۲	۰	۰	۰/۲	۰	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	P _{۱۸}

در جدول ۵-۱۳ مقادیر علت (C) و اثر (E) و شدت اندرکنش (C+E)، غلبه (C-E) و وزن پارامترها (a_i) آورده شده است. همان‌طور که در فصل ۳ اشاره شد وزن پارامترها از رابطه‌ی ۵-۱ قابل محاسبه است.

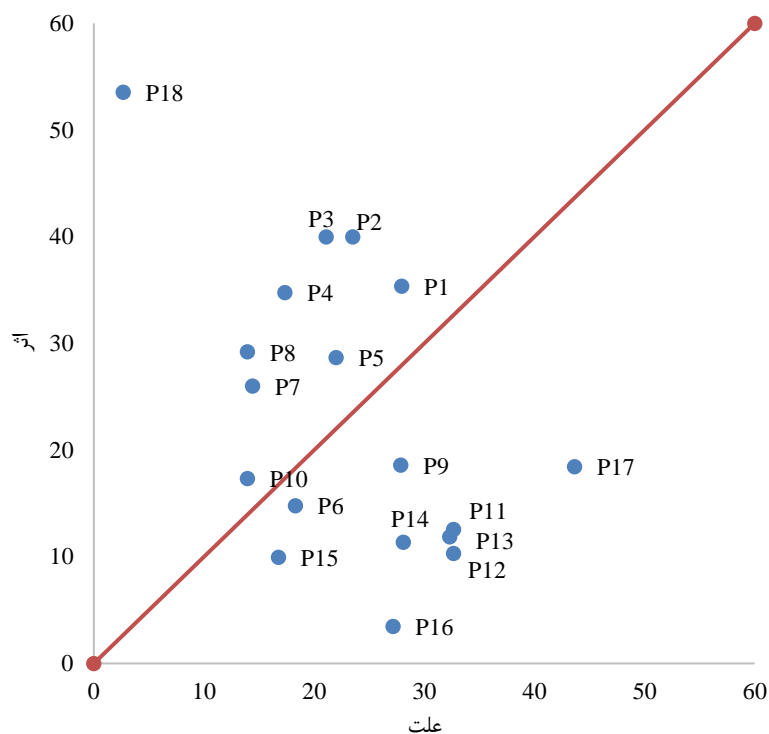
$$a_i = \frac{(C_i + E_i)}{(\sum C_i + \sum E_i)} \quad (۵-۱)$$

جدول ۵-۱۳. مقادیر تاثیرگذاری و تاثیرپذیری و شدت اندرکنش و وزن پارامترهای موثر در خردایش

علامت	پارامتر ورودی	C	E	C+E	C-E	a _i
P ₁	بارسنگ	۲۷/۹۵۱	۳۵/۳۵۸	۶۳/۳۰۹	-۷/۴۰۷	۰/۰۷۶
P ₂	خرج ویژه	۲۳/۴۹۵	۳۹/۹۸۷	۶۳/۴۸۲	-۱۶/۴۹	۰/۰۷۶
P ₃	S/B	۲۱/۰۸۹	۳۹/۹۸۷	۶۱/۰۷۶	-۱۸/۹	۰/۰۷۳
P ₄	St/B	۱۷/۳۶۱	۳۴/۷۵۶	۵۲/۱۱۷	-۱۷/۴	۰/۰۶۳
P ₅	ضریب سفتی (H/B)	۲۲/۰۱	۲۸/۶۹۴	۵۰/۷۰۴	-۶/۶۸۴	۰/۰۶۱
P ₆	تعداد ردیف	۱۸/۳۰۱	۱۴/۷۹۴	۳۳/۰۹۵	۳/۵۰۷	۰/۰۴
P ₇	زمان تاخیر	۱۴/۴۰۶	۲۶/۰۱۷	۴۰/۴۲۳	-۱۱/۶۱	۰/۰۴۹
P ₈	انحراف چال	۱۳/۹۵۱	۲۹/۲۱۱	۴۳/۱۶۲	-۱۵/۲۶	۰/۰۵۲
P ₉	قطر چال	۲۷/۸۷۲	۱۸/۶۱۳	۴۶/۴۸۵	۹/۲۵۹	۰/۰۵۶
P ₁₀	J/B	۱۳/۹۳۷	۱۷/۳۳۳	۳۱/۲۷	-۳/۳۹۶	۰/۰۳۸
P ₁₁	تعداد دسته درزه	۳۲/۳۰۵	۱۱/۸۸۱	۴۴/۱۸۶	۲۰/۴۲	۰/۰۵۳
P ₁₂	بازشدگی درزه‌ها	۳۲/۶۷۱	۱۰/۳۳۳	۴۳/۰۰۴	۲۲/۳۴	۰/۰۵۲
P ₁₃	فاصله داری درزه‌ها	۳۲/۶۷۱	۱۲/۵۵۸	۴۵/۲۲۹	۲۰/۱۱	۰/۰۵۴
P ₁₄	تداوم درزه‌ها	۲۸/۰۹۸	۱۱/۳۵۶	۳۹/۴۵۴	۱۶/۷۴	۰/۰۴۷
P ₁₅	پرشدگی	۱۶/۷۵۶	۹/۹۶۵	۲۶/۷۲۱	۶/۷۹۱	۰/۰۳۲
P ₁₆	شیب و جهت شیب	۲۷/۱۶۷	۳/۴۹۲	۳۰/۶۵۹	۲۳/۶۸	۰/۰۳۷
P ₁₇	مقاومت سنگ	۴۳/۶۳۹	۱۸/۴۵۴	۶۲/۰۹۳	۲۵/۱۹	۰/۰۷۵
P ₁₈	قابلیت خردایش	۲/۶۶۹	۵۳/۵۶	۵۶/۲۲۹	-۵۰/۸۹	۰/۰۶۸
	جمع کل	۴۱۶/۳۴۹	۴۱۶/۳۴۹	۸۳۲/۷	۰	۱

علت (C) به صورت مجموع تمام کدهای سطر و اثر (E) به صورت مجموع تمام کدهای ستون برای هر پارامتر قابل محاسبه است. مقادیر علت و اثر هر پارامتر به روی محورهای x و y منتقل شده و بدین ترتیب نمودار علت-اثر را تشکیل می‌شود. در شکل ۵-۱۲ موقعیت هر نقطه در فضای نمودار علت-اثر نشان داده شده است. بدیهی است هرچه مقدار عددی حاصل جمع (C+E) پارامتر مورد نظر بیشتر

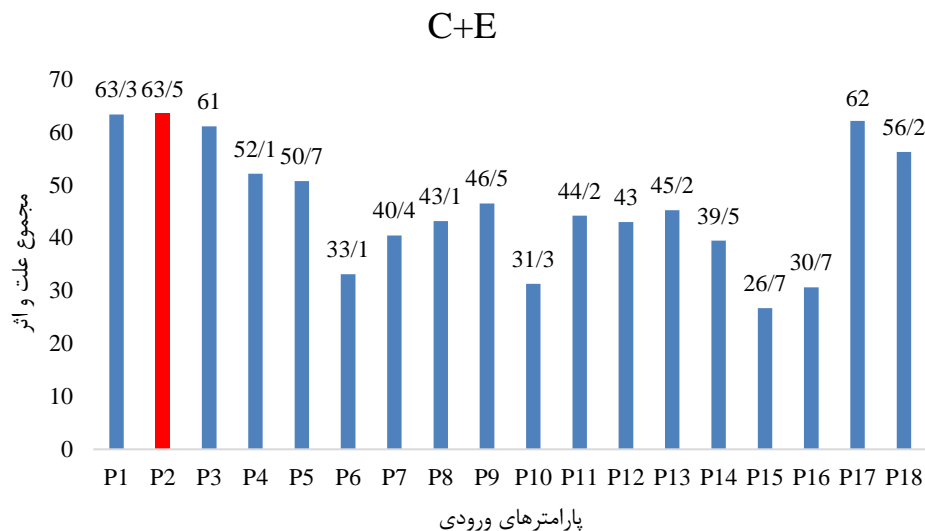
باشد، شدت اندرکنش آن با کل سیستم بیشتر بوده و هرچه مقدار عددی تفاضلی (C-E) (با در نظر گرفتن علامت آن) بیشتر باشد میزان غلبه پارامتر مذکور بر روی سیستم بیشتر است. مقدار منفی (C-E) نشان دهنده‌ی غلبه‌ی سیستم بر پارامتر مورد نظر است. از نمودار علت-اثر رسم شده آشکار می‌گردد که پارامتر ۱۸ یعنی قابلیت خردایش کاملاً تحت تاثیر سیستم بوده و در عوض پارامترهای ۱۷ و ۱۶ به ترتیب یعنی مقاومت سنگ و جهت‌داری درزه‌ها بیشترین تسلط را بر سیستم دارند.



شکل ۵-۱۲. نمودار علت - اثر

با به دست‌آوردن مجموع علت و اثرها برای هر پارامتر (C+E) می‌توان هیستوگرام شدت اندرکنش را رسم کرد که در آن پارامترها با توجه به موضوع یادشده به ترتیب قرار می‌گیرند. انتخاب مجموع C+E به عنوان فاکتور تمایز بین پارامترها به دلیل تمرکز بر نقش اندرکنش سیستم بوده‌است. به طور کلی هرچه اندرکنش یک سیستم بیشتر باشد، آن سیستم به صورت بالقوه ناپایدار است، زیرا شانس بیشتری وجود دارد که تغییر کوچک در یک پارامتر تا حد قابل توجهی بر رفتار سیستم تاثیر بگذارد. هیستوگرام

شدت اندرکنش پارامترها (شکل ۵-۱۳) نشان می‌دهد که پارامترهای بارسنگ، خرج ویژه، نسبت فاصله-ی جناحی چال‌ها به بارسنگ و قابلیت خردایش بیشترین اندرکنش را در سیستم داشته و این بدان معنی است که تغییر کوچکی در این پارامترها تا حد قابل توجهی بر رفتار سیستم تاثیر خواهد گذاشت.



شکل ۵-۱۳. هیستوگرام شدت اندرکنش برای پارامترهای ورودی

۵-۶ محاسبه‌ی شاخص خردایش

محاسبه شاخص خردایش امکان پیش‌بینی خردایش حاصل از آتشباری را مقدور می‌سازد. شاخص خردایش از رابطه‌ی (۵-۱) بدست می‌آید [۲۱].

$$FI=100-\left(\sum_{i=1}^n a_i \frac{P_i}{P_{max}}\right) \quad (۲-۵)$$

که در این رابطه P_i وزن هر پارامتر، P_{max} حداکثر امتیاز هر پارامتر است.

۷-۵ رده‌بندی پیشنهادی برای پارامترهای خردایش

به منظور محاسبه‌ی مقادیر P_i و P_{max} برای پارامترهای انتخاب شده باید رده‌بندی صورت گیرد. این رده‌بندی‌ها با توجه به مطالعه‌ی مقاله‌های ارائه‌شده در این زمینه انجام شده است همچنین برای بهبود رده‌بندی نظرسنجی کتبی تهیه و به دو خبره که تخصص آن‌ها انفجار بوده است، داده شد و در آن نقش هر پارامتر در خردایش سنگ، مد نظر قرار گرفته است، به طوری که در بهترین حالت بسته به نوع پارامتر بیش‌ترین امتیاز و در بدترین حالت، امتیاز صفر در نظر گرفته می‌شود. مقادیر رده‌بندی پارامترهای موثر در جدول ۵-۱۴ آورده شده است.

جدول ۵-۱۴. رده‌بندی پیشنهادی پارامترهای ورودی

رده‌بندی پیشنهادی برای بارسنگ					
بارسنگ (m)	< ۳	۳-۵	۵-۷	۷-۹	> ۹
امتیاز	۴	۳	۲	۱	۰
رده‌بندی پیشنهادی برای خرج ویژه					
خرج ویژه (g/ton)	۲۱۰-۳۰۰	۱۷۵-۲۱۰	۱۵۰-۱۷۵	۱۲۵-۱۵۰	< ۱۲۵
امتیاز	۴	۳	۲	۱	۰
رده‌بندی پیشنهادی برای نسبت جناحی چال‌ها به بارسنگ					
S/B	< ۱	۱-۲	۲-۳	۳-۴	> ۴
امتیاز	۰	۳	۲	۱	۰
رده‌بندی پیشنهادی برای نسبت گل‌گذاری به بارسنگ					
S_v/B	۰/۹-۱/۲	۱/۲-۱/۴	۰/۷-۰/۹	> ۱/۴	< ۰/۷
امتیاز	۴	۳	۲	۱	۰
رده‌بندی پیشنهادی برای ضریب سفتی					
H/B	> ۴	۳-۴	۲-۳	۱-۲	> ۱
امتیاز	۴	۳	۲	۱	۰
رده‌بندی پیشنهادی برای تعداد ردیف					
تعداد ردیف	< ۳	۳-۵	۵-۶	۶-۷	> ۷
امتیاز	۴	۳	۲	۱	۰
رده‌بندی پیشنهادی برای زمان تاخیر					
زمان تاخیر (ms/m)	۷-۱۰	۵-۷	۲-۵	< ۲۰	< ۲
امتیاز	۴	۳	۲	۱	۰

جدول ۵-۱۵. ادامه‌ی جدول رده‌بندی پیشنهادی پارامترهای ورودی

رده‌بندی پیشنهادی برای انحراف چال					
انحراف چال(deg)	۰	۰-۵	۵-۱۰	۱۰-۱۵	> ۱۵
امتیاز	۰	۱	۲	۳	۲
رده‌بندی پیشنهادی برای قطر چال					
قطر چال(mm)	< ۱۰۰	۱۰۰-۱۵۰	۱۵۰-۲۰۰	۲۰۰-۲۵۰	< ۳۰۰
امتیاز	۴	۳	۲	۱	۰
رده‌بندی پیشنهادی برای نسبت اضافه حفاری به بارسنگ					
J/B	< ۰/۱	۰/۱-۰/۳	۰/۳-۰/۵	> ۰/۵	
امتیاز	۰	۱	۳	۲	
رده‌بندی پیشنهادی برای تعداد دسته درزه					
تعداد دسته درزه	۱-۲	۲-۳	۳-۴	> ۴	
امتیاز	۳	۲	۱	۰	
رده‌بندی پیشنهادی برای بازشدگی درزه‌ها					
بازشدگی درزه‌ها(mm)	بدون بازشدگی	< ۰/۱	۰/۱ تا ۱	۱ تا ۵	> ۵
امتیاز	۴	۳	۲	۱	۰
رده‌بندی پیشنهادی برای فاصله‌داری درزه‌ها					
فاصله داری درزه‌ها(m)	۲<	۰/۶ تا ۲	۰/۲ تا ۰/۶	۰/۲ تا ۰/۶	< ۰/۰۶
امتیاز	۴	۳	۲	۱	۰
رده‌بندی پیشنهادی برای تداوم درزه‌ها					
تداوم درزه‌ها(m)	< ۱	۱ تا ۳	۳ تا ۱۰	۱۰ تا ۲۰	> ۲۰
امتیاز	۴	۳	۲	۱	۰
رده‌بندی پیشنهادی برای پرشدگی درزه					
پرشدگی	بدون پرشدگی	پرشدگی بسیار سخت < ۵mm	پرشدگی سخت > ۵mm	پرشدگی نرم < ۵mm	پرشدگی بسیار نرم > ۵mm
امتیاز	۰	۱	۲	۳	۴
رده‌بندی پیشنهادی برای شیب و جهت شیب					
شیب و جهت شیب	بسیار نامطلوب	نامطلوب	متوسط	مطلوب	بسیار مطلوب
امتیاز	۰	۱	۲	۳	۴
رده‌بندی پیشنهادی برای مقاومت سنگ					
مقاومت سنگ(Mpa)	۲۵۰<	۱۰۰ تا ۲۵۰	۵۰ تا ۱۰۰	۲۵ تا ۵۰	< ۲۵
امتیاز	۰	۱	۲	۳	۴

۵-۸ ارزیابی ریسک خردایش

هدف اصلی از انجام عملیات انفجار در معادن، خردایش سنگ و حصول ابعاد سنگ خردشده مورد نیاز است، که در نهایت به بهینه‌سازی هزینه‌های کلی می‌انجامد. در عملیات بزرگ مقیاس معدن کاری روباز، خردایش سنگ در وجوه مختلف بر اقتصاد معدن به طور جدی تاثیرگذار است. بنابراین منطقی است که خردایش نامناسب به عنوان یک ریسک تلقی شود [۲۱]. شاخص خردایش محاسبه‌شده (جدول ۵-۵-۱۷) را می‌توان در یک بازه‌ی ۱۰۰ امتیازی تقسیم بندی کرد (جدول ۵-۱۶). در این بازه‌بندی مقادیر بالای شاخص خردایش دلالت بر شرایط نامناسب دارد و با کاهش این شاخص شرایط بهبود می‌یابد [۴۲].

جدول ۵-۱۶. سطح ریسک بر اساس شاخص خردایش [۴۲]

III	II	I	گروه بندی
بالا	متوسط	پایین	شاخص خردایش
$66 > FI > 100$	$33 > FI > 66$	$0 > FI > 33$	محدوده‌ی شاخص خردایش

جدول ۵-۱۷. شاخص‌های محاسبه شده برای انفجارهای مختلف

۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره انفجار
۵۰	۴۹	۴۷	۴۸	۴۵	۵۲	۴۷	۴۸	۴۵	۵۰	۵۴	شاخص خردایش (FI)
II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	سطح ریسک

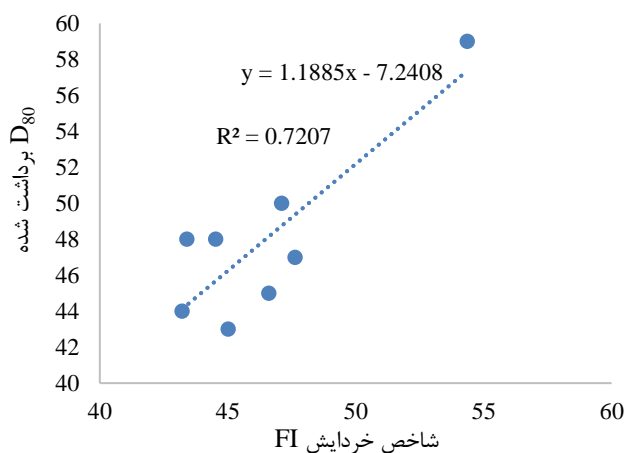
نتایج حاصل شده حاکی از آن است که وضعیت خردایش انفجارها با توجه به سطح ریسک انفجارها، در وضعیت متوسط قرار دارند.

در این مرحله ۸ انفجار از ۱۱ انفجار به صورت تصادفی انتخاب شده و با استفاده از شاخص خردایش محاسبه شده و D80 بدست آمده برای انفجارهای انتخاب شده، مدلی برای پیش‌بینی خردایش حاصل از آتشباری ارائه شده است.

۹-۵ پیش بینی اندازه‌ی ۸۰٪ عبوری بر اساس سیستم مهندسی سنگ فازی

پیش‌بینی خردایش بر اساس شاخص خردایش حاصل از ماتریس اندرکنش فازی محاسبه شده است. شاخص خردایش به نوعی نمایانگر ۱۷ پارامتر مؤثر تشخیص داده شده بر ابعاد سنگ خرد شده، پس از انفجار است. بر این اساس معادله‌ی پیش‌بینی خردایش با $R^2 = 0.72$ به این صورت است (شکل ۵-۱۴):

$$D_{80} = 1.188(FI) - 7.24$$



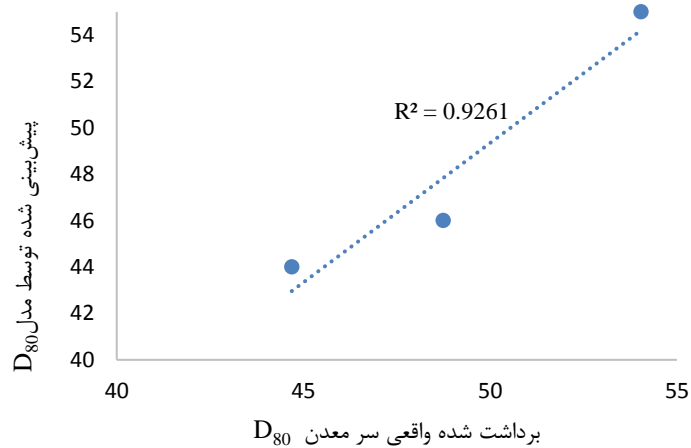
شکل ۵-۱۴. نمودار ارتباط بین شاخص خردایش و برداشت‌های واقعی

در ادامه با استفاده از رگرسیون بدست آمده از ۸ انفجار، خردایش ۳ انفجار دیگر پیش‌بینی شد و با مقایسه نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل ارائه شده و D_{80} برداشت شده واقعی سر معدن، به ترتیب ضریب تعیین (R^2) و مجذور میانگین خطا ($RMSE^1$)، ۰/۹۲ و ۱/۷۲ بدست آمد (جدول ۵-۱۸) و (شکل ۵-۱۵).

¹ Root Mean Square Error

جدول ۵-۱۸. D_{80} بدست آمده از برداشت‌های واقعی سر معدن و پیش‌بینی شده توسط مدل ارائه شده

D_{80} برداشت شده واقعی سر معدن	D_{80} پیش‌بینی شده توسط مدل
۴۶	۴۸/۴
۴۴	۴۴/۸
۵۵	۵۴



شکل ۵-۱۵. ضریب تعیین R^2 بین D_{80} بدست آمده از برداشت‌های واقعی سر معدن و پیش‌بینی شده توسط مدل ارائه شده

۵-۱۰ جمع‌بندی

در این فصل، ابتدا خردایش انفجارهای برداشت شده با استفاده از نرم‌افزار Goldsize مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه‌ی حاصل شده حاکی از آن است که خردایش انفجارهای مورد بررسی، در بازه‌ی متوسط تا خوب قرار دارد. در ادامه ماتریس اندرکنش تشکیل و بعد از تکمیل آن توسط هفده کارشناس خبره، به صورت فازی درآمد. سپس مجموع علت (C)، اثر (E)، C+E، C-E و a_i (وزن پارامتر) محاسبه شد. در ادامه با توجه به نمودار علت-اثر ترسیم شده و هیستوگرام اندرکنش، پارامترهای مقاومت سنگ و جهت‌داری درزه‌ها به عنوان مسلط‌ترین پارامترها بر سیستم بدست آمد و پارامترهای بارسنگ، خرج-ویژه و نسبت فاصله‌داری جناحی چال‌ها به بارسنگ به عنوان پارامترهایی که بیشترین اندرکنش را در سیستم دارند، انتخاب شوند. در ادامه شاخص خردایش برای یازده انفجار برداشت‌شده محاسبه و با توجه

به آن، مدلی برای پیش‌بینی خردایش ارائه شد. برای این کار اطلاعات هشت انفجار از یازده انفجار برای ساخت مدل و سه انفجار از یازده انفجار برای ارزیابی مدل ارائه شده، استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد نتایج بدست آمده از پیش‌بینی مدل و خردایش واقعی (Goldsizer) با ضریب تعیین ۰/۹۲ و مجذور میانگین خطای ۱/۷۲ به هم نزدیک هستند.

فصل ۶ : نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه‌گیری

هدف اصلی عملیات انفجار در پروژه‌های معدنی، خردشدگی توده‌سنگ است. خردشدگی یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر در کارایی تجهیزات بارگیری، باربری و سنگ شکنی است؛ بنابراین، پیش‌بینی ابعاد قطعات خردشده‌ی حاصل از انفجار در تعیین پارامترهای الگوی انفجاری بهینه کمک خواهد کرد. در این پژوهش کارهایی که در گذشته انجام شده‌اند، کارهایی که در گذشته انجام شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این کار، تعیین پارامترهای ورودی بود. با بررسی کارهای انجام شده، این نتیجه حاصل شد که در مدل‌های ارائه شده جهت پیش‌بینی خردایش، پارامترهای غیر قابل کنترل از قبیل تعداد دسته درزه، فاصله‌داری درزه‌ها، پرشدگی و بازشدگی درزه‌ها و جهت‌داری درزه‌ها کم‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند و نیز تعداد پارامترهایی که در این مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، محدود بوده است و این به دلیل عدم کارایی این مدل‌ها برای در نظرگرفتن تعداد زیادی از پارامترها به صورت همزمان بوده است. برای رفع این مشکل، در این پایان‌نامه از سیستم مهندسی سنگ فازی استفاده شده است، سیستم مهندسی سنگ روشی است که امکان تجزیه و تحلیل همزمان تعداد زیادی از پارامترها و روابط بین پارامترهای موثر را دارد. در نهایت پارامترهای بارسنگ، خرج ویژه، نسبت فاصله‌ی جناحی چال‌ها به بارسنگ (S/B)، نسبت گل‌گذاری به بارسنگ (St/B)، ضریب سفتی (H/B)، تعداد ردیف، زمان تاخیر، انحراف چال، قطر چال، نسبت اضافه‌حفری به بارسنگ (J/B)، تعداد دسته درزه، بازشدگی درزه‌ها، فاصله‌داری درزه‌ها، تداوم درزه‌ها، پرشدگی، شیب و جهت شیب، مقاومت سنگ به عنوان پارامترهای ورودی تعیین شده است.

سیستم مهندسی سنگ نیاز به ابزاری دارد که بتواند کلیه پارامترها و اندرکنش میان آن‌ها را مورد بررسی قرار دهد. این کار با ماتریس اندرکنش انجام می‌شود. در این روش پارامترهای موثر روی قطر اصلی ماتریس قرار می‌گیرند و اندرکنش‌های میان آن‌ها در عناصر غیرقطری ماتریس قرار می‌گیرند. از آنجایی که در این پایان‌نامه، ماتریس اندرکنش به صورت فازی تهیه شده است، پرسش‌نامه‌هایی طراحی

و به ۱۷ نفر از کارشناسان خبره در زمینه‌ی آتشکاری داده شد و از آنها خواسته شد با استفاده از روش ESQ به آن پاسخ دهند. در ادامه ماتریس اندرکنش فازی از مجموع ماتریس‌های اندرکنش تکمیل شده توسط کارشناسان، بدست آمد.

در یک ماتریس اندکنش، سهم همه‌ی پارامترها در تاثیر گذاشتن بر روی سیستم و تاثیرگرفتن از سیستم یکسان نیست. هم‌چنین بعضی از پارامترها نسبت به پارامترهای دیگر، تاثیر بیشتری بر روی سیستم دارند و در مقابل، بعضی از پارامترها نسبت به پارامترهای دیگر تاثیر بیشتری از سیستم می‌پذیرند. برای این کار مقادیر علت (C) و اثر (E) برای هر پارامتر محاسبه و نمودار علت-اثر رسم شده است. از نمودار علت-اثر بدست آمده در این پایان‌نامه، آشکار می‌گردد که پارامتر ۱۸ یعنی قابلیت خردایش کاملاً تحت تاثیر سیستم بوده و در عوض پارامترهای ۱۷ و ۱۶ یعنی مقاومت سنگ و جهت‌داری درزه‌ها بیشترین تسلط را بر سیستم دارند. در ادامه با بدست آوردن مجموع علت و اثرهای هر پارامتر، هیستوگرام شدت اندرکنش رسم شده است. هیستوگرام شدت اندرکنش پارامترها نشان می‌دهد که پارامترهای بارسنگ، خرج‌ویژه، نسبت فاصله‌ی جناحی چال‌ها به بارسنگ و قابلیت خردایش بیشترین اندرکنش را در سیستم داشته و این بدان معنی است که تغییر کوچکی در این پارامترها تا حد قابل توجهی بر رفتار سیستم تاثیر خواهد گذاشت. در ادامه شاخص خردایش برای هر انفجار محاسبه شده است سپس با استفاده از آن، ریسک خردایش در معدن مس سونگون محاسبه شد. در نهایت با استفاده از شاخص خردایش ۸ انفجار که به صورت تصادفی انتخاب شده است و D_{80} برداشت شده‌ی واقعی مربوط به انفجارهای مذکور، مدلی برای پیش‌بینی خردایش حاصل از آتشکاری ارائه شده است

$$(D_{80} = 1/188(FI) - 7/24).$$

در ادامه به مقایسه‌ی D_{80} پیش‌بینی شده توسط مدل و برداشت‌های واقعی سر معدن سه انفجار باقی مانده پرداخته شد که به ترتیب ضریب تعیین و مجذور میانگین خطا، ۰/۹۲ و ۱/۷۲ بدست آمد.

۲-۶ پیشنهادات

- ۱- پیشنهاد می شود مدل ارائه شده با داده های حاصل از سایر معادن روباز اعتبار سنجی شود.
- ۲- پیشنهاد می شود در طراحی الگوی انفجار و نیز مطالعات آینده، پارامترهای که در این پایان نامه مهم تشخیص داده شده اند، بیشتر مورد توجه قرار گیرد.
- ۳- با توجه به وجود محدودیت در برداشت داده در معدن مورد مطالعه، پیشنهاد می شود تعداد داده های بیشتری برای ساخت مدل و ارزیابی آن استفاده شود.

مراجع

- [1] Mackenzie, A. *Optimum blasting*. in *Proceedings of the 28th annual minnesota mining symposium*. 1967.
- [2] Kuznetsov, V., *The mean diameter of the fragments formed by blasting rock*. Soviet Mining, 1973. 9(2): p. 144-148.
- [3] Cunningham, C. *The Kuz-Ram Model for production of fragmentation from blasting*. in *Proc. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea*. 1983.
- [4] Saavedra, J., et al. *A neural network model for fragmentation by blasting*. in *Proceedings of the 8th International Symposium on rock fragmentation by blasting. Santiago, Chile*. 2006.
- [5] Lilly, P. *The use of the blastability index in the design of blasts for open pit mines*. in *Proceedings Western Australian Conference on Mining Geomechanics, Kalgoorlie, WA. Western Australian School of Mines, Curtin University of Technology*. 1992.
- [6] Cunningham, C. *Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model-Four years on*. in *Proc. 2nd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*. 1987.
- [7] Hjelmberg, H. *Some ideas on how to improve calculations of the fragment size distribution in bench blasting*. in *1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Lulea University Technology Lulea, Sweden*. 1983.
- [8] Sanchidrian, J.A., et al. *On the use of rock constants in bench blast design methods*. in *Proceedings of the 7th international symposium on rock fragmentation by blasting-fragblast*. 2002.
- [9] Da Gama, C.D. *A model for rock mass fragmentation by blasting*. in *8th ISRM Congress*. 1995. International Society for Rock Mechanics.
- [10] Lu, P. and J.-P. Latham, *A model for the transition of block sizes during fragmentation blasting of rock masses*. *Fragblast*, 1998. 2(3): p. 341-368.

- [11] Chakraborty, A., et al., *Parametric study to develop guidelines for blast fragmentation improvement in jointed and massive formations*. Engineering geology, 2004. **73**(1-2): p. 105-116.
- [12] AL, M.E., *Monte Carlo simulation as a tool to predict blasting fragmentation based on the Kuz–Ram model*. Computers & geosciences, 2006. **32**(3): p. 352-359.
- [13] Oraee, K. and B. Asi. *Prediction of Rock Fragmentation in Open Pit Mines, using Neural Network Analysis*. in *Fifteenth international symposium on mine planning and equipment selection (MPES 2006)*. 2006.
- [14] Kılıçcedil, A., et al., *Influence of rock mass properties on blasting efficiency*. Scientific Research and Essays, 2009. **4**(11): p. 1213-1224.
- [15] Monjezi, M., M. Rezaei, and A.Y. Varjani, *Prediction of rock fragmentation due to blasting in Gol-E-Gohar iron mine using fuzzy logic*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009. **46**(8): p. 1273-1280.
- [16] Monjezi, M., A. Bahrami, and A.Y. Varjani, *Simultaneous prediction of fragmentation and flyrock in blasting operation using artificial neural networks*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, **20** :p. 476-480.
- [17] Kulatilake, P., et al., *Mean particle size prediction in rock blast fragmentation using neural networks*. Engineering Geology, 2010. **114**(3-4): p. 298-311.
- [18] Hudaverdi, T., C. Kuzu, and A. Fisne, *Investigation of the blast fragmentation using the mean fragment size and fragmentation index*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012. **56**: p. 136-145.
- [19] Sayadi, A., et al., *A comparative study on the application of various artificial neural networks to simultaneous prediction of rock fragmentation and backbreak*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013. **5**(4): p. 318-324.
- [20] Karami, A. and S. Afiuni-Zadeh, *Sizing of rock fragmentation modeling due to bench blasting using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)*. International Journal of Mining Science and Technology, 2013. **23**(6): p. 809-813.

- [21] Faramarzi, F., H. Mansouri, and M.E. Farsangi, *A rock engineering systems based model to predict rock fragmentation by blasting*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013. 60: p. 82-94.
- [22] Shams, S., et al., *Application of fuzzy inference system for prediction of rock fragmentation induced by blasting*. Arabian Journal of Geosciences, 2015. 8(12): p. 10819-10832.
- [23] Ebrahimi, E., et al., *Prediction and optimization of back-break and rock fragmentation using an artificial neural network and a bee colony algorithm*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016. 75(1): p. 27-36.
- [24] Hasanipanah, M., et al., *Risk assessment and prediction of rock fragmentation produced by blasting operation: a rock engineering system*. Environmental Earth Sciences, 2016. 75(9): p. 808.
- [25] Ghiasi, M., et al., *Prediction of blast boulders in open pit mines via multiple regression and artificial neural networks*. International journal of mining science and technology, 2016. 26(2): p. 183-186.
- [26] Bhandari, S., *Engineering rock blasting operations*. 1997.
- [27] Hustrulid, W.A., *Blasting principles for open pit mining: general design concepts*. 1999: Balkema.
- [28] Rajpot, M., *The effect of fragmentation specification on blasting cost*. 2009.
- [29] Hudaverdi, T., P. Kulatilake, and C. Kuzu, *Prediction of blast fragmentation using multivariate analysis procedures*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011. 35(12): p. 1318-1333.
- [30] Otterness, R., et al. *Correlation of shot design parameters to fragmentation*. in *Proceedings of 7th annual research symposium on explosives and blasting technique. ISEE, Solon*.1991.
- [31] Lyana, K.N., et al., *Effect of geological condition on degree of fragmentation in a Simpang Pulai marble quarry*. Procedia Chemistry, 2016. 19: p. 694-701.
- [32] Mahtab, M. and J. Dixon, *Influence of rock fractures and block boundary weakening on cavability*. Trans Soc Min Eng AIME, 1976. 260: p. 6-12.

- [33] Lilly, P.A., *An empirical method of assessing rock mass blastability*. The Aus, 1986.
- [۳۴] خالوکاکایی، ر.، زارع نقردهی، م.، تحلیل و رده بندی پتانسیل ناپایداری شیب های سنگی مشرف به جاده گردنه خوش بیلاق با استفاده از رویکرد سیستمی، مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران ۱۳۸۸.
- [35] *Rock Engineering Systems: Theory and Practice*. 1992, Ellis Horwood: Chichester.
- [۳۶] عطایی، م.، تصمیم گیری چند معیاره فازی. دانشگاه صنعتی شاهرود ۱۳۸۹.
- [37] Rezaei, M., M. Monjezi, and A.Y. Varjani, *Development of a fuzzy model to predict flyrock in surface mining*. Safety science, 2011. 49(2): p. 298-305.
- [۳۸] رفیعی، ر.، تعیین شاخص قابلیت تخریب توده سنگ در معادن تخریب بلوکی با استفاده از سیستم مهندسی سنگ (RES)، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه صنعتی شاهرود - دانشکده معدن و ژئوفیزیک ۱۳۹۴.
- [39] <http://azarbaijan.nicico.com>, 1397.
- [۴۰] فخامتی، ف.، تلخابلو، م.، شم سی، ح.، پهنه بندی زمین شناسی مهندسی معدن سونگون جهت استفاده در تحلیل های پایداری شیب، هشتمین همایش انجمن زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد ۱۳۹۲.
- [۴۱] اونق، م.، طراحی الگوی چالزنی و انفجار مناسب تونل های پیشروی در معادن زیرزمینی زغال با در نظر گرفتن خردایش و کاهش بیش شکست مطالعه موردی (معدن زغال زمستان یورت - گلستان، ایران). وزارت علوم، تحقیقات، و فناوری - دانشگاه صنعتی شاهرود - دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک ۱۳۹۶.

[۴۲] فرامرزی، ف.، ابراهیمی فرسنگی، م.، منصوری، ح.، ارزیابی ریسک ناشی از انفجار در معادن

رو باز با روش ماتریس اندرکنش-اندیس آسیب پذیری. وزارت علوم، تحقیقات و فناوری -

دانشگاه شهید باهنر کرمان ۱۳۹۰.

پیوست

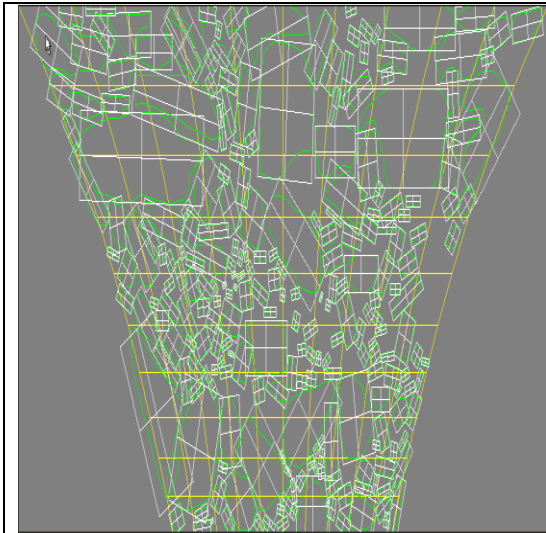
پیوست شماره یک: عکس‌های خردایش و خروجی‌های نرم‌افزار Goldsize

انفجار شماره‌ی ۲

عکس ۱

The screenshot displays the Goldsize software interface, divided into two main panels. The left panel, titled 'Project info', contains a 'Summary' tab with fields for Title, Author, Samples (set to 1), File, and Directory. Below these is a 'Sizing Analysis' table. The right panel, titled 'Size Distributions', shows a histogram of particle size distribution with a red bar chart and a cumulative curve. A cursor is positioned at 1.02% on the x-axis, corresponding to a size of 0.048612 m.

	Simple Estimate	Fines Corrected	Best Estimate	Frag. Prediction
Oversize	0.00 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %
In range	74.20 %	74.20 %	0.00 %	98.65 %
Undersize	12.08 %	12.08 %	0.00 %	32.89 %
80% Size	0.56 m	0.56 m	0.00 m	0.27 m
50 % Size	0.28 m	0.28 m	0.00 m	0.15 m
20% Size	0.13 m	0.13 m	0.00 m	0.07 m



Project info

Summary | Notes

Title:

Author:

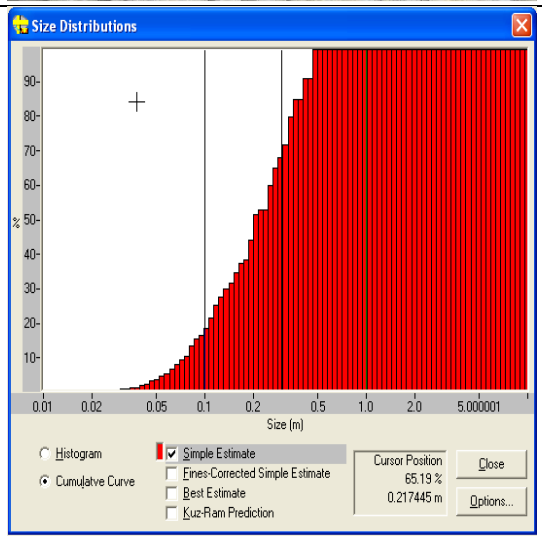
Samples: 2

File

Directory

Sizing Analysis

	Simple Estimate	Fines Corrected	Best Estimate	Frag. Prediction
Oversize	0.00 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %
In range	100.00 %	100.00 %	0.00 %	98.65 %
Undersize	18.10 %	18.12 %	0.00 %	32.89 %
80% Size	0.34 m	0.34 m	0.00 m	0.27 m
50 % Size	0.20 m	0.20 m	0.00 m	0.15 m
20% Size	0.11 m	0.11 m	0.00 m	0.07 m



Project info

Summary

Title: OK

Author: Cancel

Samples: 3

File:

Directory:

Sizing Analysis

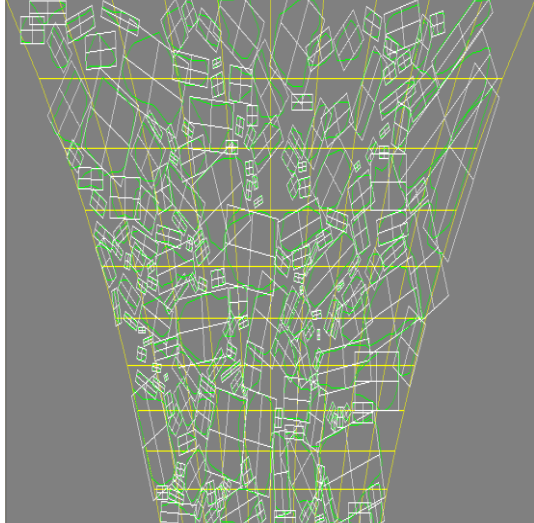
	Simple Estimate	Fines Corrected	Best Estimate	Frag. Prediction
Oversize	0.00 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %
In range	48.49 %	48.49 %	0.00 %	98.65 %
Undersize	2.02 %	2.02 %	0.00 %	32.89 %
80% Size	0.85 m	0.85 m	0.00 m	0.27 m
50 % Size	0.52 m	0.52 m	0.00 m	0.15 m
20% Size	0.30 m	0.30 m	0.00 m	0.07 m


Size Distributions

Size (m)

Histogram
 Simple Estimate
 Fines-Corrected Simple Estimate
 Best Estimate
 Kuz-Ram Prediction

Cursor Position: 97.61 %
0.027527 m





Project info

Summary

Title:

Author:

Samples: 4

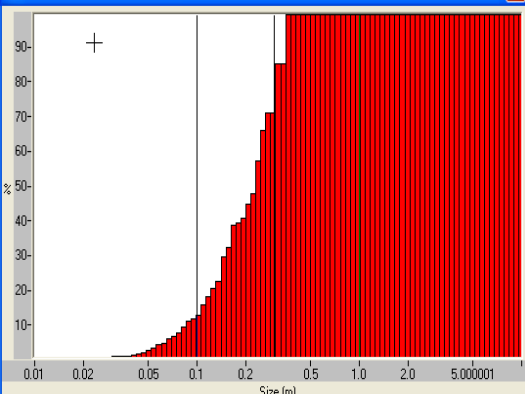
File:

Directory:

Sizing Analysis

	Simple Estimate	Fines Corrected	Best Estimate	Frag. Prediction
Oversize	0.00 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %
In range	100.00 %	100.00 %	0.00 %	98.65 %
Undersize	12.24 %	12.24 %	0.00 %	32.89 %
80 % Size	0.31 m	0.31 m	0.00 m	0.27 m
50 % Size	0.23 m	0.23 m	0.00 m	0.15 m
20 % Size	0.13 m	0.13 m	0.00 m	0.07 m

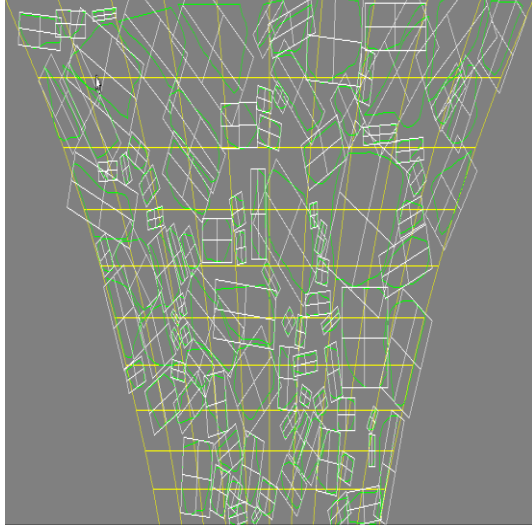

Size Distributions



Histogram
 Simple Estimate
 Cumulative Curve

Fines-Corrected Simple Estimate
 Best Estimate
 Kuz-Flam Prediction

Cursor Position: 88.05 %
 0.029697 m

Project info

Summary

Title: _____

Author: _____

Samples: 5

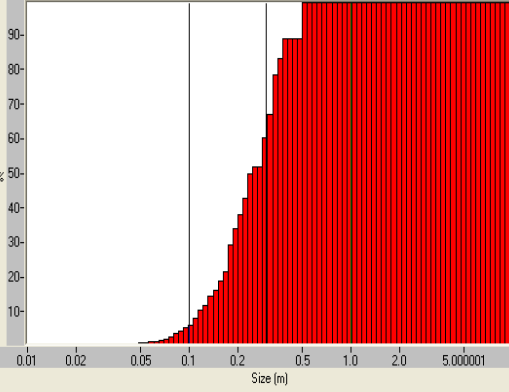
File: _____

Directory: _____

Sizing Analysis

	Simple Estimate	Fines Corrected	Best Estimate	Frag. Prediction
Oversize	0.00 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %
In range	100.00 %	100.00 %	0.00 %	98.65 %
Undersize	5.54 %	5.54 %	0.00 %	32.89 %
80% Size	0.35 m	0.35 m	0.00 m	0.27 m
50% Size	0.24 m	0.24 m	0.00 m	0.15 m
20% Size	0.16 m	0.16 m	0.00 m	0.07 m

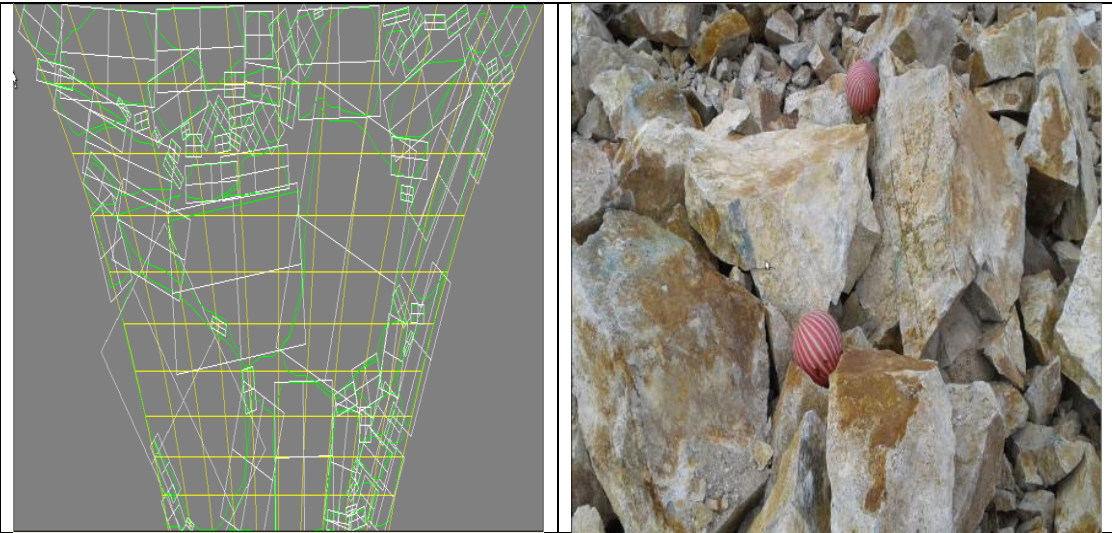
Size Distributions



Histogram
 Cumulative Curve

Simple Estimate
 Fines-Corrected Simple Estimate
 Best Estimate
 Kuz-Ram Prediction

Cursor Position: 55.97 %
 1.148791 m



Project info

Summary

Title: OK

Author: Cancel

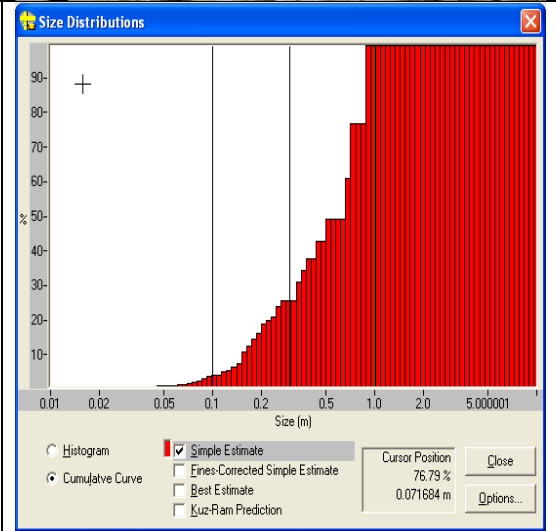
Samples: 6

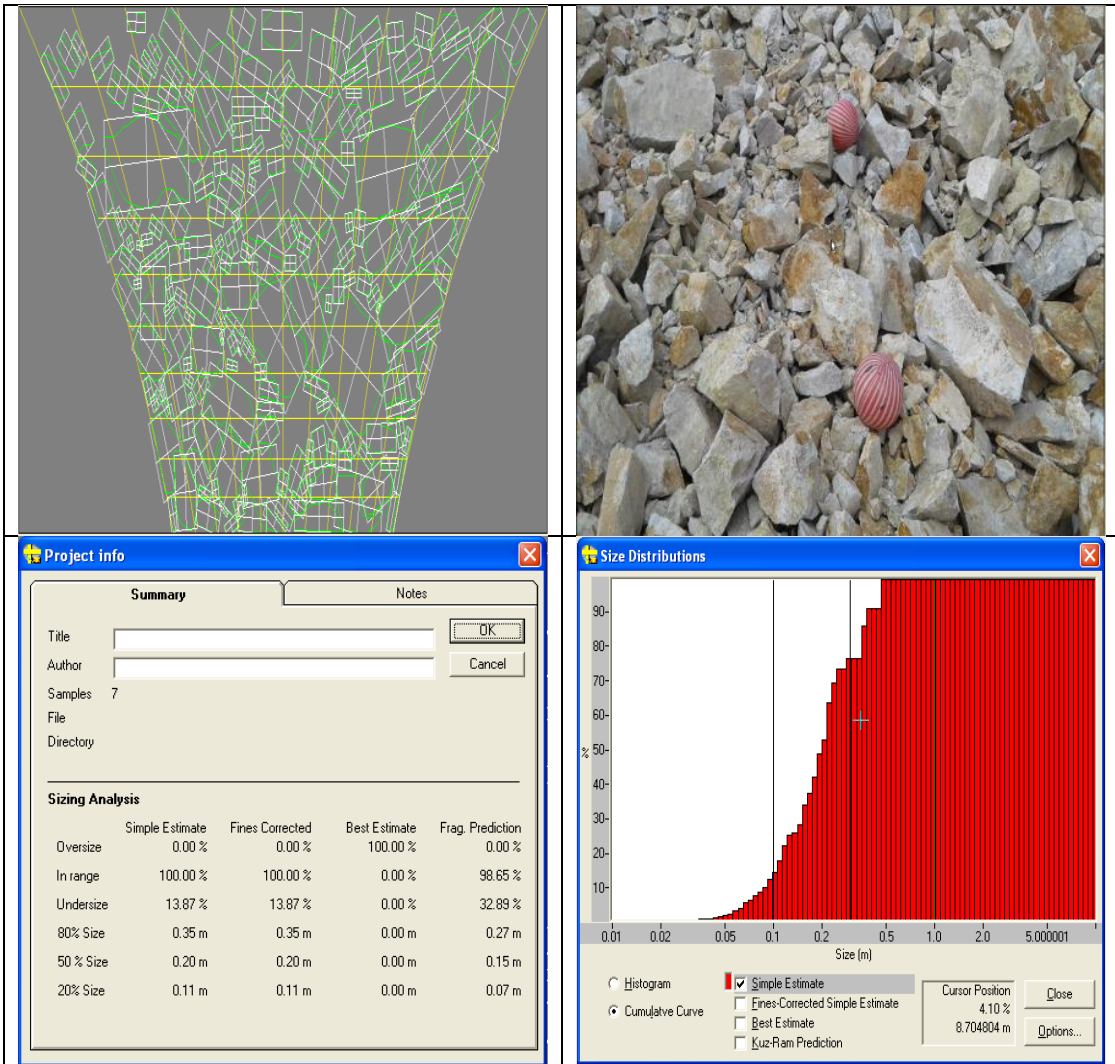
File:

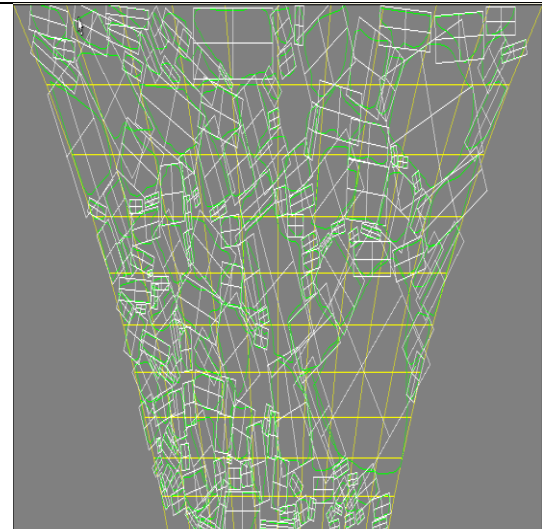
Directory:


Sizing Analysis

	Simple Estimate	Fines Corrected	Best Estimate	Frag. Prediction
Over size	0.00 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %
In range	49.17 %	49.17 %	0.00 %	98.65 %
Under size	3.49 %	3.49 %	0.00 %	32.89 %
80% Size	0.86 m	0.86 m	0.00 m	0.27 m
50 % Size	0.64 m	0.64 m	0.00 m	0.15 m
20% Size	0.23 m	0.23 m	0.00 m	0.07 m









Project info

Summary

Title:

Author:

Samples: 8

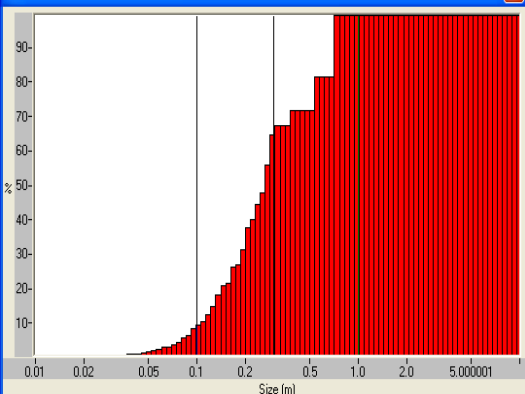
File:

Directory:

Sizing Analysis

	Simple Estimate	Fines Corrected	Best Estimate	Frag. Prediction
Over size	0.00 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %
In range	71.94 %	71.94 %	0.00 %	98.65 %
Under size	8.91 %	8.91 %	0.00 %	32.89 %
80% Size	0.55 m	0.55 m	0.00 m	0.27 m
50 % Size	0.26 m	0.26 m	0.00 m	0.15 m
20% Size	0.14 m	0.14 m	0.00 m	0.07 m

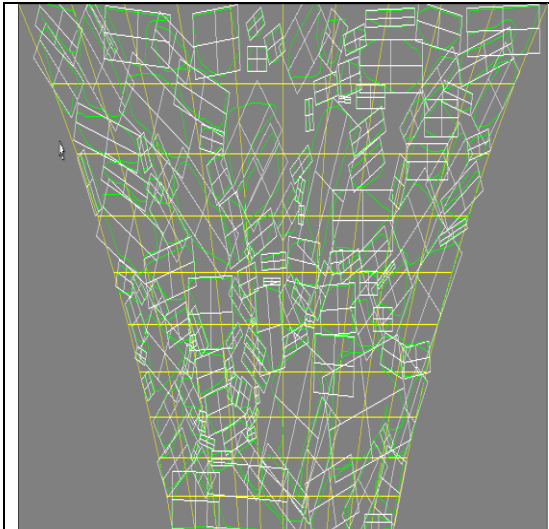

Size Distributions



Histogram
 Cumulative Curve

Simple Estimate
 Fines-Corrected Simple Estimate
 Best Estimate
 Kuz-Flam Prediction

Cursor Position: 57.68 %
 0.014543 m

Project info

Summary

Title:

Author:

Samples: 9

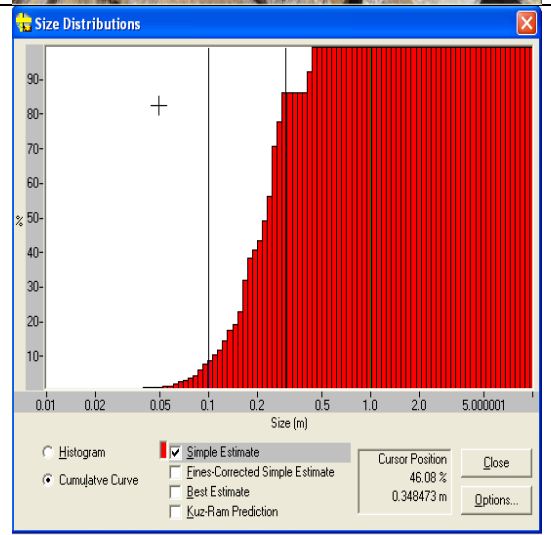
File:

Directory:

Sizing Analysis

	Simple Estimate	Fines Corrected	Best Estimate	Frag. Prediction
Oversize	0.00 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %
In range	100.00 %	100.00 %	0.00 %	98.65 %
Undersize	8.17 %	8.17 %	0.00 %	32.89 %
80% Size	0.28 m	0.28 m	0.00 m	0.27 m
50 % Size	0.22 m	0.22 m	0.00 m	0.15 m
20% Size	0.15 m	0.15 m	0.00 m	0.07 m

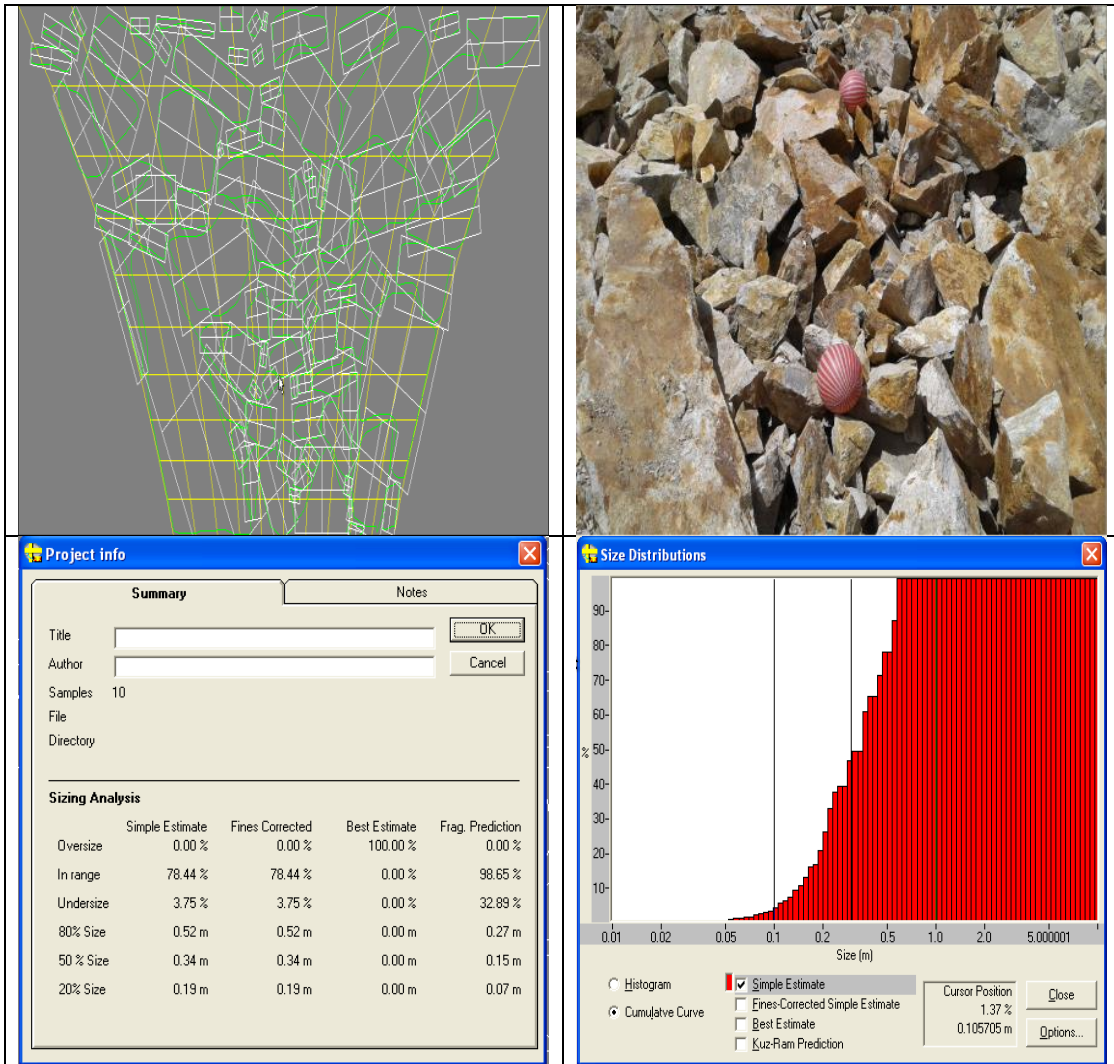
Size Distributions

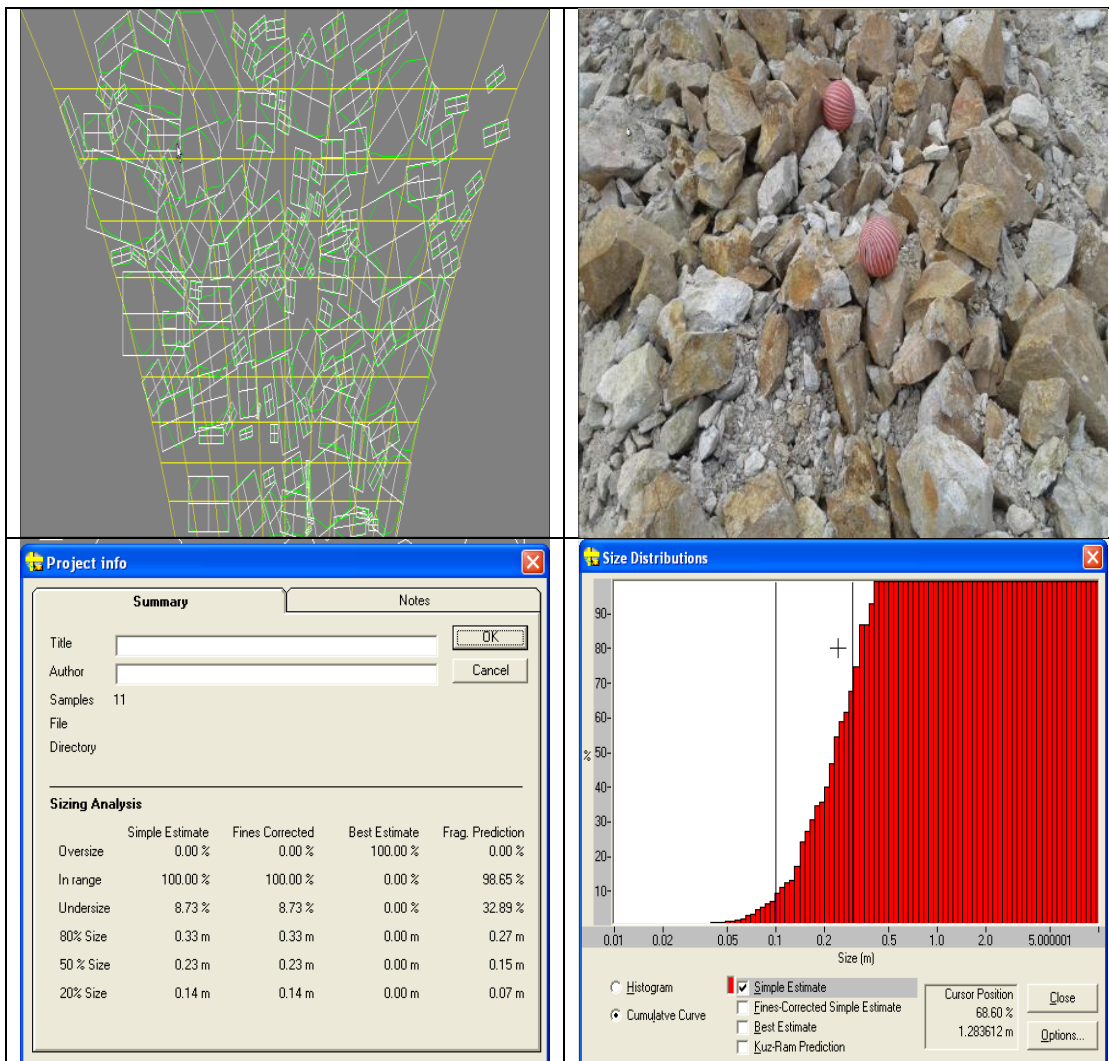


Histogram
 Cumulative Curve

Simple Estimate
 Fines-Corrected Simple Estimate
 Best Estimate
 Kuz-Ram Prediction

Cursor Position: 46.08 %
 0.348473 m





The image displays a 3D wireframe model of a rock pile on the left, a photograph of the actual rock pile on the right, and two software windows at the bottom: 'Project info' and 'Size Distributions'.

Project info

Summary

Title:

Author:

Samples: 12

File:

Directory:

Sizing Analysis

	Simple Estimate	Fines Corrected	Best Estimate	Frag. Prediction
Over size	0.00 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %
In range	85.95 %	85.95 %	0.00 %	98.65 %
Under size	5.40 %	5.40 %	0.00 %	32.89 %
80% Size	0.45 m	0.45 m	0.00 m	0.27 m
50 % Size	0.34 m	0.34 m	0.00 m	0.15 m
20% Size	0.20 m	0.20 m	0.00 m	0.07 m

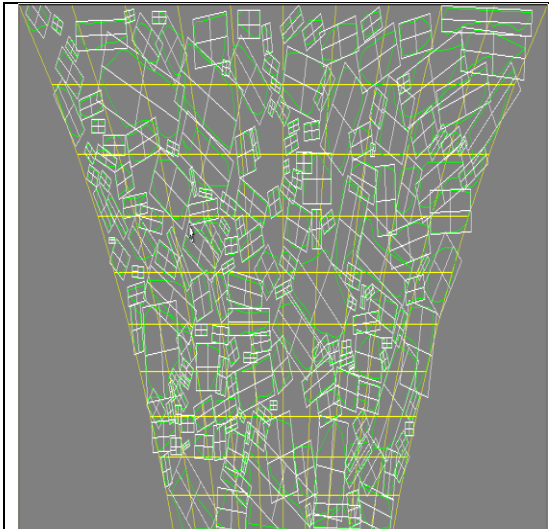
Size Distributions


Graph showing Size (m) on the x-axis (log scale: 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.000001) and % on the y-axis (0-90). The graph displays a histogram of red bars and a cumulative curve. A cursor is positioned at 72.35 % and 0.010718 m.

Options:

- Histogram
- Simple Estimate
- Fines-Corrected Simple Estimate
- Best Estimate
- Kuz-Ram Prediction

Cursor Position: 72.35 %
0.010718 m





Project info

Summary | Notes

Title: OK

Author: Cancel

Samples: 13

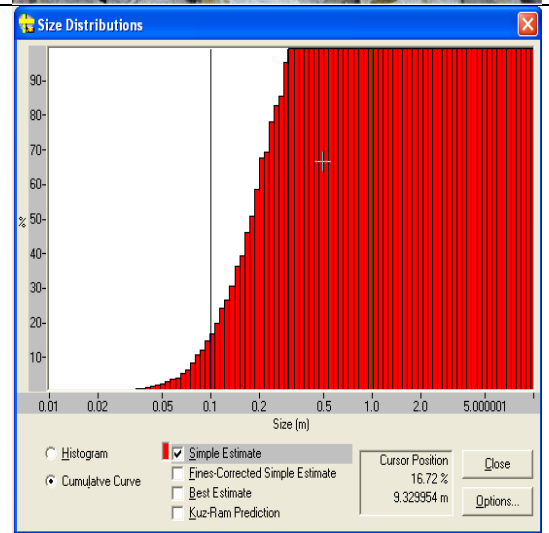
File

Directory

Sizing Analysis

	Simple Estimate	Fines Corrected	Best Estimate	Frag. Prediction
Oversize	0.00 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %
In range	100.00 %	100.00 %	0.00 %	98.65 %
Undersize	16.54 %	16.54 %	0.00 %	32.89 %
80% Size	0.24 m	0.24 m	0.00 m	0.27 m
50% Size	0.18 m	0.18 m	0.00 m	0.15 m
20% Size	0.11 m	0.11 m	0.00 m	0.07 m

Size Distributions



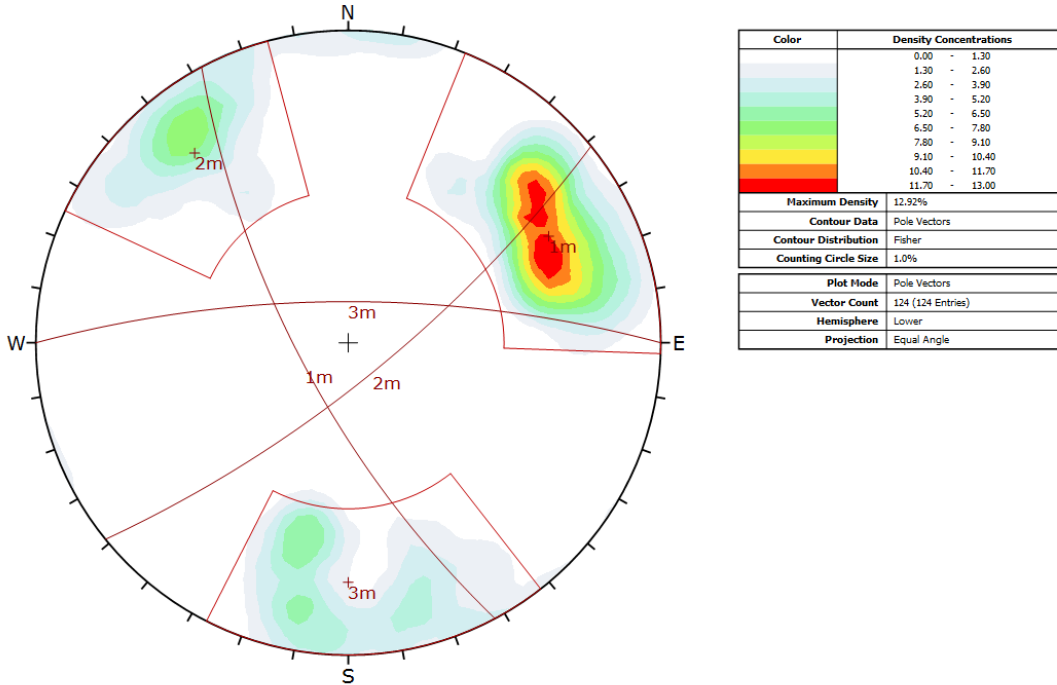
Histogram
 Simple Estimate
 Fines-Corrected Simple Estimate
 Best Estimate
 Kuz-Ram Prediction

Cursor Position: 16.72 %
9.329954 m

Close Options...

پیوست شماره‌ی دو:

رسم ناپیوستگی‌های پهنه‌ی شماره‌ی ۲ بر روی شبکه‌های قطبی که انفجار دو در آن پهنه قرار دارد.



پیوست شماره‌ی سه:
پرسش‌نامه‌های تکمیل شده توسط کارشناسان

بارسنگ	۳	۲	۱	۰	۲	۳	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۴	خرج ویژه	۴	۳	۰	۳	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۴	S/B	۲	۰	۴	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۲	۰	ST/B	۰	۱	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۳	۲	۴	H/B	۳	۴	۴	۴	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۴	۴	۱	۰	تعداد ردیف	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۴	۳	۳	۰	۳	زمان تاخیر	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰	۲	۰	۰	۰	۰	انحراف چال	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۲	۳	۲	۰	۱	۲	۳	قطر چال	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۲	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	J/B	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۳	۳	۲	۰	۲	۴	۳	۱	۱	تعداد دسته درزه	۰	۴	۲	۰	۰	۰
۳	۳	۳	۳	۰	۲	۴	۰	۱	۱	۰	بازشدگی درزه ها	۰	۲	۴	۰	۰
۳	۳	۳	۳	۰	۲	۳	۱	۱	۱	۴	۰	فاصله داری درزه هها	۱	۱	۰	۰
۳	۳	۳	۳	۰	۱	۲	۱	۰	۰	۲	۲	۰	تداوم درزه ها	۰	۰	۰
۲	۲	۲	۲	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	پرسدگی	۰	۰
۲	۲	۲	۱	۳	۱	۲	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	شیب و جهت شیب	۰
۴	۴	۴	۳	۴	۳	۴	۲	۳	۱	۱	۳	۲	۲	۲	۰	مقاومت سنگ

بارسنگ	۴	۴	۳	۳	۴	۲	۰	۰	۱	۰	۱	۲	۱	۰	۱	۰
۳	خرج ویژه	۲	۲	۱	۲	۳	۰	۰	۰	۰	۲	۱	۳	۰	۱	۰
۱	۳	S/B	۱	۱	۳	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰
۰	۴	۰	ST/B	۰	۰	۲	۰	۰	۱	۰	۲	۲	۱	۰	۱	۰
۴	۲	۳	۳	H/B	۴	۴	۴	۳	۴	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰
۱	۰	۱	۰	۰	تعداد ردیف	۳	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰
۱	۱	۱	۱	۰	۰	زمان تاخیر	۰	۰	۰	۰	۲	۲	۱	۰	۰	۰
۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	انحراف چال	۰	۲	۰	۱	۱	۰	۰	۲	۰
۴	۳	۴	۴	۰	۲	۳	۲	قطر چال	۳	۰	۲	۲	۲	۰	۱	۰
۰	۳	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	J/B	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۳	۳	۲	۰	۲	۴	۳	۱	۱	تعداد دسته درزه	۰	۴	۲	۰	۰	۰
۲	۱	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۳	۰	۰	بازشدگی درزه ها	۲	۰	۲	۰	۴
۱	۱	۱	۱	۰	۱	۲	۰	۱	۱	۴	۰	فاصله داری درزه ها	۱	۰	۰	۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲	۲	۲	تداوم درزه ها	۱	۰	۳
۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	پرشدگی	۰	۲
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۴	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	شیب و جهت شیب	۱
۳	۲	۳	۳	۰	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۲	۲	۱	۰	۰	مقاومت سنگ

بارسنگ	۳	۲	۱	۰	۴	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	خرج ویژه	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	S/B	۰	۰	۰	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۳	۰	ST/B	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	H/B	۰	۰	۴	۳	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	تعداد ردیف	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰	۲	۰	۰	۴	زمان تاخیر	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	انحراف چال	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
۳	۱	۳	۰	۱	۳	۱	۲	قطر چال	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۲	۰	۰	۴	۰	۰	۱	۰	J/B	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۳	۳	۲	۰	۲	۴	۳	۱	۱	تعداد دسته درزه	۰	۴	۲	۰	۰	۰
۰	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	بازشدگی درزه ها	۲	۰	۲	۰	۴
۰	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۴	۲	فاصله داری درزه هها	۱	۰	۰	۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۲	۲	۱	تداوم درزه ها	۰	۰	۴
۰	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۱	۲	۰	۰	پرشدگی	۰	۴
۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲	۰	۰	۲	۲	۲	۰	شیب و جهت شیب	۴
۳	۳	۳	۰	۴	۰	۰	۰	۳	۲	۳	۰	۰	۰	۰	۰	مقاومت سنگ

پیوست شماره‌ی چهار:

کد نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB برای استخراج جواب‌ها از پرسش نامه

های تهیه شده و نرمال‌سازی آن‌ها

```
input=cell(1);
b=dir;
for i=3:size(b,1)

    input{i-2}=xlsread(b(i).name);

end

row_col=numel(input{1})-numel(find(isnan(input{1})));
number_col=size(input,2);
A=5*ones(row_col,number_col);
N_0=zeros(row_col,1);
N_1=zeros(row_col,1);
N_2=zeros(row_col,1);
N_3=zeros(row_col,1);
N_4=zeros(row_col,1);
P_0=zeros(row_col,1);
P_1=zeros(row_col,1);
P_2=zeros(row_col,1);
P_3=zeros(row_col,1);
P_4=zeros(row_col,1);

for i=1:number_col
    B=input{i};
    B=B(:);
    B(isnan(B))=[];
    for j=1:row_col
        A(j,i)=B(j);
    end

end

for j=1:row_col
    N_0(j)=numel(find(A(j,:)==0));
    N_1(j)=numel(find(A(j,:)==1));
    N_2(j)=numel(find(A(j,:)==2));
    N_3(j)=numel(find(A(j,:)==3));
    N_4(j)=numel(find(A(j,:)==4));
    P_0(j)=N_0(j)/number_col;
    P_1(j)=N_1(j)/number_col;
    P_2(j)=N_2(j)/number_col;
    P_3(j)=N_3(j)/number_col;
    P_4(j)=N_4(j)/number_col;
end
```

```
output_N=[N_0,N_1,N_2,N_3,N_4];
output_P=[P_0,P_1,P_2,P_3,P_4];
save output output_N output_P
clear
```

پیوست شماره‌ی پنج:

کد نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB برای بدست آوردن ماتریس اندرکنش فازی

```
[System]
Name='152'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=5
NumOutputs=1
NumRules=32
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'
```

```
[Input1]
Name='P_0'
Range=[0 1]
NumMFs=2
MF1='Low':'trapmf',[-0.9 -0.1 0.18 0.5]
MF2='High':'trapmf',[0.3 0.75 1.1 1.9]
```

```
[Input2]
Name='P_1'
Range=[0 1]
NumMFs=2
MF1='Low':'trapmf',[-0.9 -0.1 0.18 0.5]
MF2='High':'trapmf',[0.3 0.75 1.1 1.9]
```

```
[Input3]
Name='P_2'
Range=[0 1]
NumMFs=2
MF1='Low':'trapmf',[-0.9 -0.1 0.18 0.5]
MF2='High':'trapmf',[0.3 0.75 1.1 1.9]
```

```
[Input4]
```

Name='P_3'
Range=[0 1]
NumMFs=2
MF1='Low': 'trapmf',[-0.9 -0.1 0.18 0.5]
MF2='High': 'trapmf',[0.3 0.75 1.1 1.9]

[Input5]
Name='P_4'
Range=[0 1]
NumMFs=2
MF1='Low': 'trapmf',[-0.9 -0.1 0.18 0.5]
MF2='High': 'trapmf',[0.3 0.75 1.1 1.9]

[Output1]
Name='output1'
Range=[0 4]
NumMFs=9
MF1='mf1': 'gaussmf',[0.2124 0]
MF2='mf2': 'gaussmf',[0.2124 0.5]
MF3='mf3': 'gaussmf',[0.2124 1]
MF4='mf4': 'gaussmf',[0.2124 1.5]
MF5='mf5': 'gaussmf',[0.2124 2]
MF6='mf6': 'gaussmf',[0.2124 2.5]
MF7='mf7': 'gaussmf',[0.2124 3]
MF8='mf8': 'gaussmf',[0.2124 3.5]
MF9='mf9': 'gaussmf',[0.2124 4]

[Rules]
1 1 1 1 1, 5 (1) : 1
1 1 1 1 2, 9 (1) : 1
1 1 1 2 1, 7 (1) : 1
1 1 1 2 2, 8 (1) : 1
1 1 2 1 1, 5 (1) : 1
1 1 2 1 2, 6 (1) : 1
1 1 2 2 1, 6 (1) : 1
1 1 2 2 2, 7 (1) : 1
1 2 1 1 1, 3 (1) : 1
1 2 1 1 2, 5 (1) : 1
1 2 1 2 1, 4 (1) : 1
1 2 1 2 2, 6 (1) : 1
1 2 2 1 1, 4 (1) : 1
1 2 2 1 2, 6 (1) : 1
1 2 2 2 1, 5 (1) : 1
1 2 2 2 2, 6 (1) : 1
2 1 1 1 1, 1 (1) : 1
2 1 1 1 2, 5 (1) : 1
2 1 1 2 1, 4 (1) : 1

2 1 1 2 2, 6 (1) : 1
2 1 2 1 1, 2 (1) : 1
2 1 2 1 2, 5 (1) : 1
2 1 2 2 1, 4 (1) : 1
2 1 2 2 2, 6 (1) : 1
2 2 1 1 1, 2 (1) : 1
2 2 1 1 2, 4 (1) : 1
2 2 1 2 1, 3 (1) : 1
2 2 1 2 2, 6 (1) : 1
2 2 2 1 1, 4 (1) : 1
2 2 2 1 2, 6 (1) : 1
2 2 2 2 1, 4 (1) : 1
2 2 2 2 2, 5 (1) : 1

Abstract

The most important purpose of blasting operations is useful fragmentation, because it involves a large part of production costs. So far, many empirical models have been presented in the field of prediction of fragmentation from the explosion. The models are presented in such a way that all relevant parameters cannot be considered together and simultaneously. Considering these constraints and conditions, new ways such as the Rock engineering system compensates the defects of the prediction of fragmentation from the explosion. In this thesis, Sungun Copper Mine was selected as a case study and eleven items of its explosions were used to construct the proposed model. These parameters include the Burden, Powder factor, the ratio of the spacing to the Burden (S/B), the ratio of the Stemming to the Burden (St/B), Stiffness ratio (H/B), the number of rows, the Time delay, the Blasthole deviation, the Hole diameter, , the ratio of the subdrilling to the Burden (J/B), number of joints, Joint aperture, Joint spacing, Joint persistence, Joint filling, Joint orientation, Uniaxial compressive strength of rock. Using these parameters, the fuzzy interaction matrix was formed and the rock fragmentation index was presented. The Goldsize image analysis method was used to determine the fragmentation quality. To validate obtained results between prediction and measured (real), determination coefficient (R^2) and root mean square error (RMSE) index are chosen. R^2 and RMSE are equal to 0.92 and 1.72. Also, according to the results obtained from the fuzzy interaction matrix, the parameters of Uniaxial compressive strength of rock and Joint orientation as the most important parameters on the system were obtained and The parameters of Burden, Powder factor, and the ratio of the spacing to the Burden are determined as parameters that have the greatest interaction in the system.

Keywords: prediction of fragmentation, fuzzy rock engineering system, Sungun copper mine, interaction matrix, Goldsize



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

M.Sc. Thesis in Mine exploitation

**Developing a new index for rock mass fragmentation due to
blasting in open pit mining using fuzzy rock engineering
system Case study: Sungun copper mine**

By: Sajjad BagheriZaraghani

Supervisors:

Dr. R. KhalooKakaie

Dr. R. Rafiee

January 2019