

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه کاشان

دانشکده مهندسی

گروه مهندسی معدن

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته معدن

عنوان:

ارائه مدل بهینه توزیع خردشدگی حاصل از انفجار در

معدن سنگریزه سد گتوند علیا

استاد راهنما:

دکتر حسن بخشنده امنیه

به وسیله:

حمید رضا مالکی نژاد

شهریور ماه ۱۳۹۰

تقدیم بہ:

تمامی رہنویان راہ علم و معرفت

شکر و قدردانی

در اینجا لازم میدانم از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر حسن بخشنده انیه که همواره از راهنمایهای ایشان در مراحل مختلف برخوردار شدم و از بیچ گونه کمک و مساعدت دریغ نفرموده اند، شکر و قدردانی نمایم.

همچنین از تشریک مساعی آقای دکتر علی اکبر عبدالله زاده به عنوان استاد داور داخل دانشگاه و آقای دکتر کورش شهریار به عنوان استاد داور مدعو خارج از دانشگاه که این پایان نامه را مورد مطالعه قرار داده و در جلسه دفاعیه شرکت نموده اند شکر می نمایم.

در پایان از جناب آقای دکتر قنبر علی شیخ زاده که به عنوان نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه کاشان قبول زحمت نموده اند سپاسگزاری می نمایم.

چکیده

خردشدگی تابعی از ویژگی های توده سنگ، ماده منفجره و طرح انفجار بوده و فاکتور اصلی در کنترل و کاهش هزینه‌های مراحل مختلف عملیات معدنکاری همچون بارگیری، باربری و سنگ شکنی محسوب می‌گردد.

پیش بینی ابعاد قطعات حاصل از انفجار نه تنها در کاهش هزینه های تولید بلکه در دستیابی به طرح انفجاری بهینه موثر خواهد بود. مطالعات و تحقیقات جدی در این زمینه از سال ۱۹۷۰ صورت گرفته و مدل های متنوعی ارائه شده است. برخی از مدل ها تنها متوسط ابعاد خردشدگی (مدل لارسون) و برخی دیگر تمام توزیع خردشدگی (مدل کوز-رم) را تعیین می کنند. اگر چه پیش بینی دقیق توزیع خردشدگی با استفاده از این مدل ها به طور کامل امکان پذیر نیست و به طور تقریبی ابعاد قطعات حاصل از انفجار را می توان پیش بینی نمود اما امکان اصلاح آن ها برای هر معدن وجود دارد.

در این تحقیق پس از بررسی قابلیت مدل های تجربی پیش بینی توزیع خردشدگی در معدن سرریز سدگتوند علیا، مدل چونگ-کاتسابانیز با بالاترین قابلیت پیش بینی خردشدگی حاصل از انفجار در منطقه انتخاب و در معدن سنگریزه شماره یک تصحیح گردید. مدل تصحیح شده در معدن شماره دو اعتبارسنجی شد که نتایج نشان دهنده معتبر بودن مدل است. در مرحله بعد با استفاده از مدل تصحیح شده، الگوهای انفجاری با قطر چال های ۷۶ و ۸۹ میلی متر طراحی گردید به گونه ای که نتایج خردشدگی حاصل، در پوش مجاز مصالح سنگریزه سد گتوند علیا قرار گرفت.

همچنین با توجه به مفهوم متوسط خردشدگی و مدل گرادی و کیپ (که بیان کننده تعداد ترک های شعاعی اطراف چال انفجاری است)، مدلی برای پیش بینی متوسط خردشدگی ارائه و در معادن سنگریزه سد گتوند علیا اعتبارسنجی شد. کاربرد و اعتبارسنجی مدل پیشنهادی متوسط خردشدگی در معادن سنگریزه سد گتوند علیا نشان داد که این مدل، مدلی مناسب برای پیش بینی خردشدگی انفجارهای بزرگ مقیاس در معادن روباز است.

کلمات کلیدی: انفجار، خردشدگی، مدل های تجربی، آنالیز تصویری

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

مقدمه

فصل اول: مکانیزم خردشدگی و عوامل موثر بر آن.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ خردشدگی.....	۲
۳-۱ مکانیزم خردشدگی حاصل از انفجار.....	۳
۱-۳-۱ انفجار.....	۳
۲-۳-۱ انتشار موج ضربه.....	۳
۳-۳-۱ انبساط گازها و جابجایی توده سنگ.....	۴
۴-۱ خردشدگی بهینه.....	۵
۵-۱ تأثیر خردشدگی بر عملیات معدنکاری.....	۶
۶-۱ تأثیر ویژگی های ژئومکانیکی توده سنگ بر خردشدگی.....	۷
۷-۱ تأثیر خرج گذاری با پوشش هوا بر نتایج خردشدگی.....	۱۰

فصل دوم: روش های تعیین اندازه قطعات و توزیع اندازه خردشدگی

حاصل از انفجار.....	۱۳
۱-۲ مقدمه.....	۱۴
۲-۲ روش های اندازه گیری خردشدگی.....	۱۴
۱-۲-۲ غربال کردن.....	۱۵
۲-۲-۲ روش محاسبه تعداد تخته های بزرگ.....	۱۵
۳-۲-۲ روش ماده منفجره مصرفی در آتشکاری ثانویه.....	۱۵
۴-۲-۲ روش نرخ بارگیری شاول.....	۱۵
۵-۲-۲ روش تأخیر در سنگ شکن.....	۱۵
۶-۲-۲ روش شاخص خردشدگی.....	۱۶
۷-۲-۲ روش استفاده از مدل های تجربی.....	۱۶
۸-۲-۲ روش احتمالاتی.....	۱۶
۹-۲-۲ روش های مبتنی بر عکس.....	۱۷
۱-۹-۲-۲ روش عکس برداری و استفاده از عکس های استاندارد.....	۱۷
۲-۹-۲-۲ روش عکس برداری و استفاده از خط مقیاس.....	۱۸

۱۹.....	۳-۹-۲-۲	روش فوتوگرافیک یا روش تحلیل دستی.....
۱۹.....	۴-۹-۲-۲	روش پردازش تصویر.....
۲۹.....	۳-۲	مزایا و خطاهای سیستم های پردازش تصویر.....
۳۰.....	۱-۳-۲	مزایای سیستم های پردازش تصویر.....
۳۱.....	۲-۳-۲	منابع خطاها هنگام استفاده از سیستم های پردازش تصویر.....
۳۱.....	۱-۲-۳-۲	خطاهای مرتبط به روش تحلیل عکس.....
۳۲.....	۲-۲-۳-۲	خطاهای مرتبط به نمایش نمونه.....
۳۳.....	۳-۲-۳-۲	خطاهای مرتبط به پردازش تصویر.....
۳۴.....	۱-۳-۲-۳-۲	پنجره نمونه برداری.....
۳۴.....	۲-۳-۲-۳-۲	تغییر پذیری دوربین های CCD.....
۳۵.....	۳-۳-۲-۳-۲	تغییر پذیری روشنایی.....
۳۵.....	۴-۳-۲-۳-۲	پرسپکتیو.....
۳۶.....	۴-۲-۳-۲	خطاهای مرتبط به نمونه برداری.....
۳۷.....		فصل سوم: مدل های تجربی پیش بینی خردشدگی حاصل از انفجار.....
۳۸.....	۱-۳	مقدمه.....
۳۸.....	۲-۳	مدل های تجربی پیش بینی توزیع اندازه قطعات حاصل از انفجار.....
۳۸.....	۱-۲-۳	مدل دنیس داگاما.....
۳۹.....	۲-۲-۳	مدل لارسون.....
۴۰.....	۳-۲-۳	مدل کوزنتسوف.....
۴۱.....	۴-۲-۳	مدل کوز-رم.....
۴۲.....	۵-۲-۳	مدل باند-رم (BRM).....
۴۳.....	۶-۲-۳	مدل کوز-رم اصلاح شده.....
۴۴.....	۷-۲-۳	مدل کو - روستن.....
۴۵.....	۸-۲-۳	مدل سوئدیفو.....
۴۷.....	۹-۲-۳	مدل گاما و جیمنو.....
۴۷.....	۱۰-۲-۳	مدل انرژی- بلوک- انتقال (EBT).....
۴۸.....	۱۱-۲-۳	مدل های JKMRC.....
۴۹.....	۱-۱۱-۲-۳	مدل زون پودر شده.....
۵۱.....	۲-۱۱-۲-۳	مدل دو مولفه ای.....
۵۴.....	۱۲-۲-۳	مدل چونگ-کاتسابانیز (CK).....
۵۷.....	۱۳-۲-۳	مدل KCO.....
۵۸.....	۱۴-۲-۳	مدل سیلوا.....

۵۸.....	۳-۲-۱۵ مدل کوز - رم اصلاح شده برای معدنکاری زیرزمینی در سنگ سخت.....
	فصل چهارم: ارائه مدل بهینه توزیع خردشدگی حاصل از انفجار در معدن
۶۱.....	سنگریزه سد گتوند علیا
۶۲.....	۴-۱ مقدمه.....
۶۳.....	۴-۲ موقعیت جغرافیایی سد گتوند علیا.....
۶۳.....	۴-۳ مشخصات فنی سد گتوند علیا.....
	۴-۴ گام های اساسی در دستیابی به مدل بهینه خردشدگی در معدن سنگریزه سد گتوند علیا.....
۶۴.....	۴-۴-۱ ارزیابی مدل های تجربی پیش بینی کننده توزیع خردشدگی حاصل از انفجار.....
	۴-۴-۲ تصحیح روش پردازش تصویر برای تعیین توزیع اندازه خردشدگی حاصل از انفجار.....
۷۱.....	۴-۴-۳ تصحیح مدل چونگ-کاتسابانیز در معدن سنگریزه سد گتوند علیا.....
۷۴.....	۴-۴-۴ اعتبارسنجی مدل چونگ-کاتسابانیز تصحیح شده.....
۷۸.....	۴-۴-۵ ارائه الگوهای پیشنهادی.....
۸۱.....	۴-۵-۱ ارائه مدل پیشنهادی متوسط خردشدگی.....
۸۲.....	۴-۵-۲ تصحیح مدل پیشنهادی.....
۸۳.....	۴-۵-۳ اعمال ویژگی های توده سنگ در مدل پیشنهادی.....
۸۴.....	۴-۵-۳ اعتبارسنجی مدل پیش بینی متوسط خردشدگی.....
۸۶.....	فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۹۰.....	فهرست مراجع
۹۴.....	پیوست A تعیین توزیع اندازه قطعات با استفاده از نرم افزار گلدسایز.....
۹۷.....	پیوست B تصاویر مربوط به تصحیح روش پردازش تصویر.....
۱۰۸.....	پیوست C تصاویر مربوط به انفجار معدن سنگریزه شماره یک.....
۱۳۱.....	پیوست D تصاویر مربوط به انفجار معدن سنگریزه شماره دو.....

فهرست جدول ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱ راه کارهایی برای بهبود خردشدگی در تشکیلات درزه دار و توده ای.....	۹
جدول ۱-۲ ضرایب توزیع روزین راملر تعیین شده توسط سیستم های پردازش تصویر برای ۱۰ عکس منتخب.....	۲۲
جدول ۲-۲ پارامترهای روزین-راملر برای ۱۰ عکس با استفاده از سیستم های Wipfrag و Fragalyst و روش دستی.....	۲۶
جدول ۱-۳ تعیین قابلیت انفجار پذیری توده سنگ.....	۳۹
جدول ۲-۳ فاکتور سنگ بر اساس فاکتور پروتودیاکونف.....	۴۰
جدول ۳-۳ قواعد تعیین پارامترهای قابلیت انفجار توده سنگ با توجه به مدل کوز-رم اصلاح شده.....	۴۴
جدول ۴-۳ ارتباط ثابت سنگ با خرج ویژه و نوع سنگ.....	۴۶
جدول ۵-۳ حساسیت نتایج خردشدگی به پارامترهای ورودی به مدل زون پودر شده.....	۵۵
جدول ۱-۴ الگوهای اولیه برای انجام انفجارهای آزمایشی در معدن سرریز سد گتوند علیا.....	۶۵
جدول ۲-۴ متوسط خردشدگی (سانتی متر) پیش بینی شده با استفاده از مدل های تجربی.....	۶۶
جدول ۳-۴ اختلاف متوسط خردشدگی (سانتی متر) پیش بینی شده با استفاده از مدل های تجربی و روش تجزیه سرنندی.....	۶۸
جدول ۴-۴ امتیاز بندی مدل ها بر اساس نحوه پیش بینی متوسط خردشدگی.....	۶۸
جدول ۵-۴ پارامترهای ورودی مدل های تجربی پیش بینی کننده توزیع خردشدگی حاصل از انفجار.....	۶۹
جدول ۶-۴ پارامترهای الگوی انفجار معدن سنگریزه شماره یک سد گتوند علیا.....	۷۴
جدول ۷-۴ پارامترهای الگوی انفجار معدن سنگریزه شماره دو سد گتوند علیا.....	۷۶
جدول ۸-۴ الگوهای طراحی شده برای دستیابی به توزیع خردشدگی مورد نیاز (قطر چال ۷۶).....	۷۸
جدول ۹-۴ پارامترهای توزیع خردشدگی الگوهای انفجاری ارائه شده در جدول ۸-۴.....	۷۸
جدول ۱۰-۴ الگوهای طراحی شده برای دستیابی به توزیع خردشدگی مورد نیاز (قطر چال ۸۹).....	۷۹
جدول ۱۱-۴ پارامترهای توزیع خردشدگی الگوهای انفجاری ارائه شده در جدول ۱۰-۴.....	۷۹

- جدول ۴-۱۲ داده‌های ثبت شده از دستگاه حفاری دریل واگن از نوع ROC D7 در معدن
سنگریزه شماره یک سد گتوند علیا.....۸۴
- جدول ۴-۱۳ داده‌های ثبت شده از دستگاه حفاری دریل واگن از نوع ROC D7 در معدن
سنگریزه شماره دو سد گتوند علیا.....۸۵
- جدول ۴-۱۴ مقایسه متوسط خردشدگی مدل پیشنهادی و پردازش تصویر.....۸۵

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ بخش های مختلف توزیع تجمعی عبوری خردشدگی.....	۲
شکل ۲-۱ مکانیزم شکست سنگ به وسیله انفجار.....	۴
شکل ۳-۱ تأثیر درجه خردشدگی بر هزینه بخش های مختلف و کلی عملیات معدنکاری.....	۵
شکل ۴-۱ ضریب تعیین بدست آمده از رگرسیون خطی چندمتغیره با استفاده از روش قدم به قدم برای الف) تشکیلات درزه دار ب) تشکیلات توده ای.....	۸
شکل ۵-۱ تغییرات خردشدگی با توجه به زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت کششی.....	۹
شکل ۶-۱ ستونی از پوشش هوا در طول ستون خرج گذاری.....	۱۱
شکل ۷-۱ طرح های مختلف بارگذاری ماده منفجره الف) خرج گذاری با پوشش هوا ب) خرج گذاری با پوشش خاک (انفجارهای مرسوم).....	۱۱
شکل ۸-۱ تأثیر استفاده از پوشش هوا در طول ستون خرج گذاری بر متوسط و شاخص خردشدگی.....	۱۲
شکل ۱-۲ دیاگرام روش مدل سازی احتمالاتی برای تعیین خردشدگی.....	۱۷
شکل ۲-۲ مراحل تعیین توزیع خردشدگی با استفاده از روش خط مقیاس پیشنهادی توسط لو و لاتهام.....	۱۸
شکل ۳-۲ عکس های استاندارد تهیه شده از نمونه های آزمایشگاهی.....	۲۳
شکل ۴-۲ نمودارهای قابلیت سیستم ها از توزیع اندازه خردشدگی.....	۲۴
شکل ۵-۲ مقایسه اندازه مشخصه و شاخص یکنواختی حاصله از سیستم های پردازش تصویر و تجزیه سرنندی ۱۰ عکس منتخب.....	۲۵
شکل ۶-۲ توزیع اندازه قطعات عکس های ۱ تا ۶ با استفاده از سیستم های Wipfrag و Fragalyst و روش دستی.....	۲۷
شکل ۶-۲ ادامه- توزیع اندازه قطعات عکس های ۷ تا ۱۰ با استفاده از سیستم های Wipfrag و Fragalyst و روش دستی.....	۲۸
شکل ۷-۲ توزیع متوسط خردشدگی برای ۱۰ عکس.....	۲۹
شکل ۸-۲ روش تعیین توزیع اندازه قطعات با استفاده از سیستم پردازش تصویر Split شکل ۹-۲ الف) عکس اصلی ب) عکس حاصل از عملکرد الگوریتم شناسا گر لبه ها (طول نوار ۶ اینچ است).....	۳۲
شکل ۱۰-۲ نمایشی از هم پوشانی جزئی قطعات سنگ.....	۳۳
شکل ۱۱-۲ نمایش وضعیت روشنایی ثابت در نوار نقاله.....	۳۵

- شکل ۲-۱۲ مثالی از نحوه مقیاس گذاری برای رفع خطای پرسپکتیو..... ۳۶
- شکل ۳-۱ تغییر وضعیت منحنی توزیع اندازه قطعات قبل و بعد از عملیات انفجار..... ۴۸
- شکل ۳-۲ نمایش تشکیل زون پودر شده، زون شکست و زون تشکیل قطعات..... ۴۹
- شکل ۳-۳ توزیع بخش های مختلف مدل زون پودر شده..... ۵۰
- شکل ۴-۱ پوش مجاز خردشدگی مصالح سنگریزه مورد نیاز بدنه سد گتوند علیا..... ۶۲
- شکل ۴-۲ نتایج تجزیه سرنندی مصالح سنگریزه حاصل از انفجار الگوهای ۱ تا ۴ معدن سرریز..... ۶۵
- شکل ۴-۳ مقایسه متوسط خردشدگی پیش بینی شده با استفاده از مدل های تجربی و نتایج تجزیه سرنندی الگوهای ۱، ۲، ۳ و ۴..... ۶۶
- شکل ۴-۴ مقایسه پیش بینی مدل های تجربی و نتایج تجزیه سرنندی الگوی یک..... ۶۹
- شکل ۴-۵ مقایسه پیش بینی مدل های تجربی و نتایج تجزیه سرنندی الگوی دو..... ۷۰
- شکل ۴-۶ مقایسه پیش بینی مدل های تجربی و نتایج تجزیه سرنندی الگوی سه..... ۷۰
- شکل ۴-۷ مقایسه پیش بینی مدل های تجربی و نتایج تجزیه سرنندی الگوی چهار..... ۷۰
- شکل ۴-۸ برازش تابع توزیع روزین-راملر به توزیع اندازه قطعات حاصل از نرم افزار گلدسایز..... ۷۲
- شکل ۴-۹ توزیع اندازه مصالح با استفاده از روش تجزیه سرنندی..... ۷۳
- شکل ۴-۱۰ منحنی متوسط توزیع اندازه قطعات با استفاده از روش تجزیه سرنندی..... ۷۳
- شکل ۴-۱۱ برازش تابع توزیع روزین - راملر به توزیع اندازه قطعات حاصل از تجزیه سرنندی..... ۷۴
- شکل ۴-۱۲ منحنی پیش بینی شده توزیع اندازه قطعات با استفاده از مدل چونگ-کاتسابانیز..... ۷۵
- شکل ۴-۱۳ منحنی توزیع اندازه قطعات حاصل از انفجار با استفاده از روش پردازش تصویر تصحیح شده..... ۷۵
- شکل ۴-۱۴ منحنی توزیع اندازه قطعات پیش بینی شده با استفاده از مدل چونگ-کاتسابانیز تصحیح شده..... ۷۶
- شکل ۴-۱۵ منحنی توزیع اندازه قطعات حاصل از انفجار با استفاده از روش پردازش تصویر تصحیح شده..... ۷۷
- شکل ۴-۱۶ مقایسه منحنی های توزیع اندازه قطعات (حاصل از انفجار) ایجاد شده با استفاده از مدل چونگ-کاتسابانیز و روش پردازش تصویر..... ۷۷
- شکل ۴-۱۷ منحنی های توزیع خردشدگی حاصل از الگوهای انفجاری موجود در جدول ۴-۸..... ۷۹

شکل ۱۸-۴ منحنی های توزیع خردشدگی حاصل از الگوهای انفجاری موجود در	
جدول ۱۰-۴.....	۸۰
شکل ۱۹-۴ دستگاه حفاری دریل واگن ROC D7 اطلس کوپکو.....	۸۳

مقدمه

انفجار به عنوان یکی از مهم ترین بخش های عملیات معدنکاری دارای سه هدف اصلی آزادسازی توده سنگ از حالت درجا، کاهش اندازه قطعات برای تسهیل در عملیات بارگیری و باربری و کاهش هزینه های سنگ شکنی و آسیا از طریق تضعیف قطعات است. مطالعات صورت گرفته توسط محققان مختلف نشان داده که کارایی بخش های مختلف عملیات معدنکاری وابسته به درجه خردشدگی است بدین گونه که با افزایش درجه خردشدگی هزینه های بارگیری، باربری و سنگ شکنی کاهش و هزینه های چالزنی و انفجار افزایش می یابد. خردشدگی حاصل از انفجار تحت تأثیر پارامترهای غیر قابل کنترل مانند ویژگی های توده سنگ و پارامترهای قابل کنترل مانند هندسه طرح انفجار و ویژگی های ماده منفجره مصرفی است. مدل سازی خردشدگی حاصل از انفجار امکان پیش بینی توزیع اندازه قطعات ایجاد شده پس از انفجار را برای انواع شرایط توده سنگ، هندسه طرح انفجار و ماده منفجره مصرفی فراهم می آورد. پیش بینی ابعاد قطعات حاصل از انفجار نه تنها در کاهش هزینه های تولید بلکه در دستیابی به طرح انفجاری بهینه جهت دستیابی به خردشدگی مورد نیاز موثر خواهد بود.

سد گتوند علیا بزرگترین سد سنگریزه ای کشور با هسته رسی می باشد که بر روی رودخانه کارون در دست ساخت است. بر اساس مشخصات فنی طرح برای مصالح بدنه سد، دانه بندی ویژه ای در نظر گرفته شده است. بنابراین تأمین مصالح مورد نیاز آن نیازمند طراحی الگوی عملیات انفجاری مناسب می باشد. هدف اصلی این تحقیق ارائه روشی کاربردی جهت طراحی پارامترهای طرح عملیات انفجار است به گونه ای که تأمین کننده خردشدگی مورد نیاز باشد.

در این مجموعه در فصل اول مکانیزم خردشدگی حاصل از انفجار، خردشدگی بهینه و تأثیر ویژگی های ژئومکانیکی توده سنگ بر خردشدگی آورده شده است. در فصل دوم روش های تعیین اندازه قطعات و توزیع اندازه خردشدگی حاصل از انفجار و خطاهای سیستم های پردازش تصویر شرح داده شده است. در فصل سوم مدل های تجربی پیش بینی خردشدگی حاصل از انفجار بیان شده است. در فصل چهارم گام های اساسی در دستیابی به مدل بهینه خردشدگی در معدن سنگریزه سد گتوند علیا شرح داده شده و همچنین با توجه به مفهوم متوسط خردشدگی و مدل گرادی و کیپ، مدلی برای پیش بینی متوسط خردشدگی حاصل از انفجار ارائه شده است. در فصل پنجم با توجه به تحقیق صورت گرفته نتایج و پیشنهادات ارائه شده است.

فصل اول

مکانیزم خردشدگی و عوامل

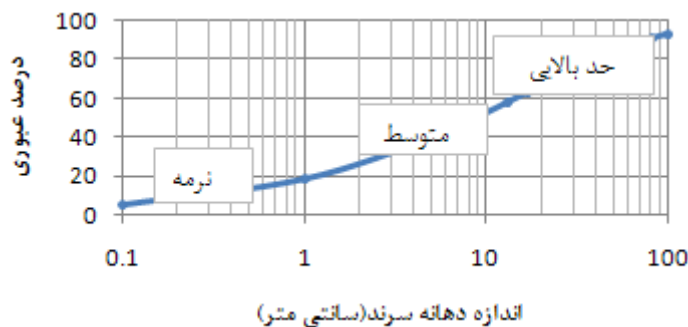
موثر بر آن

۱-۱ مقدمه

انفجار به عنوان اولین مرحله خردایش سنگ تأثیر بسزایی بر مراحل مختلف عملیات معدنکاری دارد. بنابراین برای درک بهتر مدل های تجربی پیش بینی کننده خردشدگی حاصل از انفجار و استفاده مناسب از این مدل ها، لازم است شناخت و آگاهی کاملی از مفهوم خردشدگی و فاکتورهای موثر بر آن وجود داشته باشد. لذا در این فصل سعی شده تا کلیاتی از خردشدگی و پارامترهای موثر بر آن بیان شود.

۲-۱ خردشدگی

قطعه قطعه شدن یا متلاشی شدن سنگ در اثر عملیات آتشکاری را خردشدگی می نامند. اگر تکه سنگ های حاصل شده تقریباً هم اندازه باشند خردشدگی را همگن یا یکنواخت و در غیر این صورت خردشدگی را غیر همگن می نامند. معمولاً برای معرفی و بررسی میزان خردشدگی از منحنی های توزیع تجمعی عبوری استفاده می شود. به طور معمول یک منحنی توزیع تجمعی عبوری خردشدگی همان طور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است از سه قسمت اصلی نرمه ها^۱، بخش میانی یا متوسط خردشدگی^۲ و حد بالایی خردشدگی^۳ تشکیل شده است.



شکل ۱-۱ بخش های مختلف توزیع تجمعی عبوری خردشدگی

^۱ Fines

^۲ Mean

^۳ Upper limit

۱-۳ مکانیزم خردشدگی حاصل از انفجار

به طور کلی خردشدگی ناشی از انفجار توده سنگ حاصل دو عامل انفجار ماده منفجره در نتیجه آزاد شدن انرژی و عکس العمل سنگ در مقابل انرژی آزاد شده می باشد [1]. از لحظه وقوع انفجار تا شکسته شدن و جابجا شدن توده سنگ خرد شده، اتفاقات مشخصی روی می دهد که می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- انفجار

۲- انتشار امواج ضربه ای

۳- تولید گاز و آزاد شدن انرژی

۴- جابجا شدن توده سنگ

۱-۳-۱ انفجار

ماده منفجره در اثر انفجار بلافاصله به توده ای از گاز داغ مبدل می گردد که در این لحظه فشار بسیار زیادی نیز تولید می گردد، این فشار را فشار انفجار می گویند. در واقع فشار انفجار ناشی از انتشار موج انفجار در ستون ماده منفجره است به عبارتی موج انفجار از نقطه شروع آتش شدن چاشنی یا پرایمر در ستون ماده منفجره با سرعت مافوق صوت حرکت می کند گر چه سرعت انفجار زیاد است اما در هر حال برای تکمیل شدن انفجار و آزاد شدن کامل انرژی، زمان لازم دارد [1].

۱-۳-۲ انتشار موج ضربه

انتشار موج ضربه در سنگ قبل از آزاد شدن ناگهانی گازهای ناشی از انفجار صورت می گیرد. تاثیر امواج بر محیط اطراف چال، به صورت فشاری است که بر آن وارد می کند. فشار وارد بر دیواره چال به سرعت زیاد شده و به ماکزیمم خود می رسد و اندکی بعد به صورت نمایی از مقدار فشار کاسته می شود. علت کم شدن فشار دو عامل انبساط چال و سرد شدن گازها می باشد [1].

در مرحله فشاری، موج ضربه ناشی از انفجار با سرعت ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ متر بر ثانیه در سنگ عبور می کند. در این حالت سنگ فشرده شده و شکاف های ریز میکروسکوپی در آن ایجاد می گردد. موج ضربه پس از رسیدن به سطح آزاد منعکس شده و موجب بوجود آمدن تنش کششی در سنگ می گردد. سرعت موج در این حالت ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر بر ثانیه است و موجب تولید شکاف های شعاعی کوچک اولیه در چال می شود [1].

۱-۳-۳ انبساط گازها و جابجایی توده سنگ

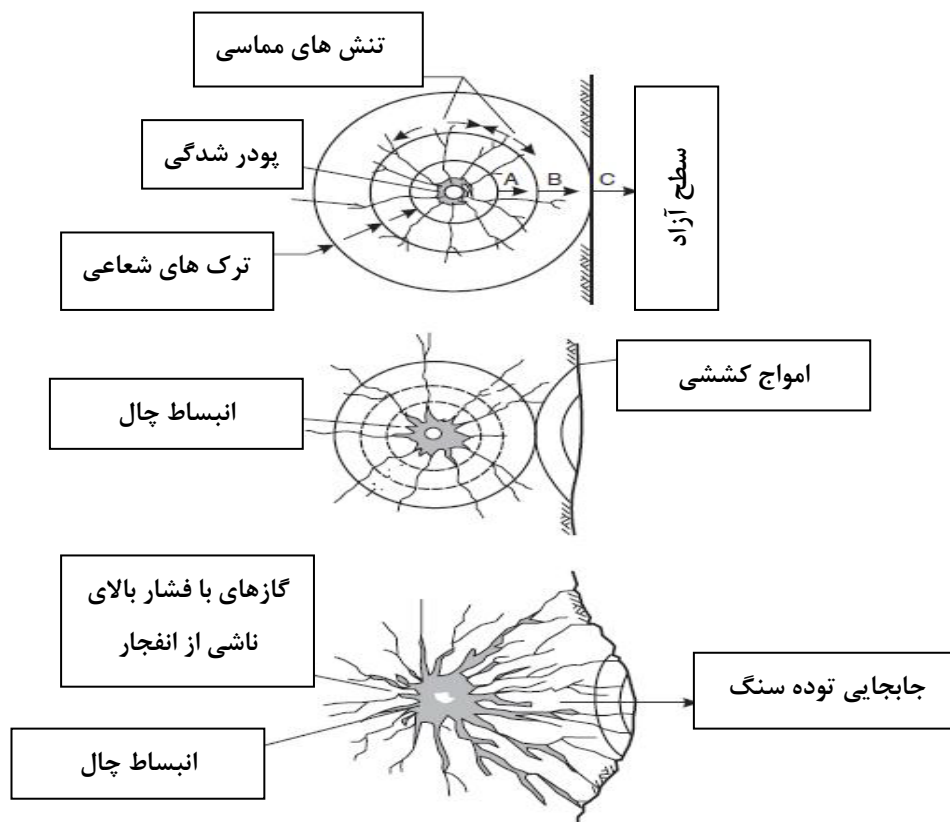
گازهای حاصل از انفجار در چال محبوس گشته و همین امر باعث می شود که فشار مستمری به دیوار چال وارد آید. معمولاً مقدار این فشار نصف فشار انفجار است. گاز فشرده شده که دارای انرژی پتانسیل فوق العاده است به صورت های زیر بر سنگ اثر می کند [1]:

الف- در ترک های ریز حاصل از موج ضربه نفوذ کرده، موجب انبساط و گسترش آنها می شود که در نهایت منجر به شکسته شدن سنگ می گردد.

ب- گاز تحت فشار سعی می کند از راه کمترین مقاومت به بیرون چال نفوذ کرده و در صورت وجود چنین شرایطی نباید انتظار داشت که نتیجه مطلوب از انفجار چال حاصل گردد زیرا انرژی گاز عملاً به هدر می رود.

ج- استمرار فشار گاز در چال علاوه بر توسعه شکاف های ریز قبلی موجب بوجود آمدن شکاف های شعاعی جدید در توده سنگ می شود.

همان طور که در شکل ۱-۲ ملاحظه می شود بر اثر انفجار و موج ضربه شکاف های شعاعی در اطراف چال ایجاد شده و به وسیله فشار گاز چال منبسط شده و شکاف ها گسترش می یابند.

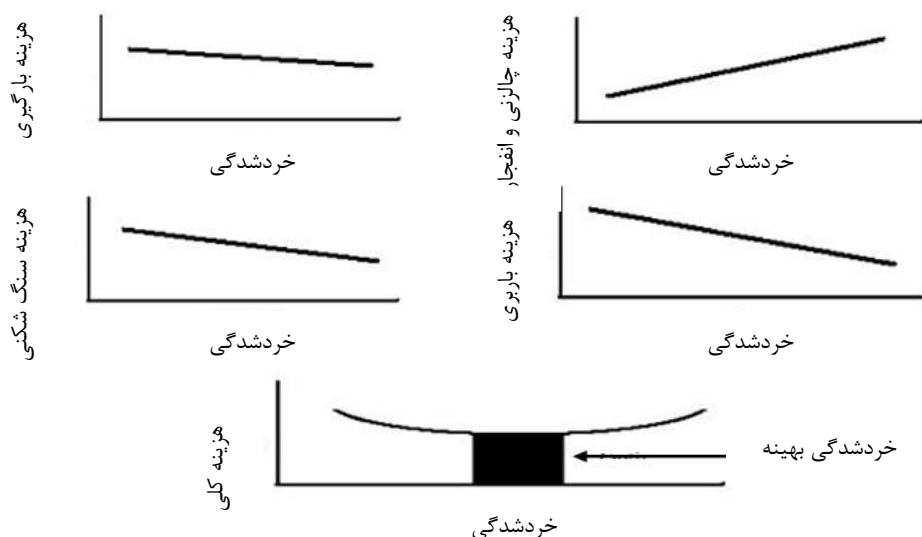


شکل ۱-۲ مکانیزم شکست سنگ به وسیله انفجار [1]

۴-۱ خردشدگی بهینه

از نقطه نظر سیستم های بارگیری و باربری خردشدگی بهینه آن میزان خردشدگی است که بزرگترین اندازه آن به راحتی در جام سیستم بارگیری جای گیرد و فاکتور پرشوندگی آن ها ماکزیمم گردد. معمولاً در یک سیکل عملیات معدنکاری، محصولات حاصل از انفجار بعد از عملیات بارگیری و باربری به عنوان خوراک به سنگ شکن اولیه و به دنبال آن یک سنگ شکن ثانویه و یا بعدی وارد می شوند. از نقطه نظر سیکل عملیات خردایش، خردشدگی بهینه حاصل از انفجار به گونه ای است که عملکرد سیکل مربوطه ماکزیمم بوده و مصرف نیرو حداقل باشد. اما برای برخی از مواد معدنی، توزیع بهینه خردشدگی، ماکزیمم عملکرد سیکل خردایش نبوده بلکه ارزش بازار تعیین کننده توزیع ابعاد قطعات خرد شده حاصل از انفجار خواهد بود. برای مثال چنانچه می دانیم قطعات سنگ آهن خرد شده دانه ریز ارزش کمتری نسبت به قطعات سنگ آهن کلوخه ای دارند. همچنین عملیات انفجار باید به گونه ای انجام گیرد که اثرات منفی جانبی آن حداقل باشد. برای مثال در هنگام استخراج طلا توسط عملیات معدنکاری، میزان اختلاط ماده معدنی و باطله به عنوان یک معیار بحرانی تلقی شده و عملیات انفجار باید به گونه ای صورت گیرد که اختلاط ماده معدنی و باطله حداقل باشد.

مکنزی^۱ (۱۹۹۶ و ۱۹۹۷) نشان داد که با افزایش درجه خردشدگی هزینه های بارگیری، باربری و سنگ شکنی کاهش و هزینه های حفاری و انفجار افزایش می یابد. منحنی های ارائه شده توسط مکنزی در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. همان طور که از این شکل ملاحظه می شود خردشدگی بهینه، میزان خردشدگی است که به ازای آن هزینه های کلی بخش معدن مینیمم شود [2 و 3].



شکل ۳-۱ تأثیر درجه خردشدگی بر هزینه بخش های مختلف و کلی عملیات معدنکاری [3]

^۱ Mackenzie