

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده فنی

بخش مهندسی معدن

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش استخراج

پیش بینی پرتاب سنگ با استفاده از الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات
مطالعه موردی معدن شماره‌ی (۱) سنگ آهن گل گهر

مؤلف:

حمید کیانی

استاد راهنما:

دکتر حمید منصوری

استاد مشاور:

دکتر محمدعلی ابراهیمی فرسنگی

آبان ماه ۱۳۹۲

تقدیم به:

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

چکیده

عملیات انفجار در معادن روباز با مخاطرات زیادی همراه است. یکی از مهمترین این مخاطرات پرتاب سنگ می‌باشد که عامل بسیاری از حوادث جانی و غیر جانی است. از این رو پیش‌بینی پرتاب سنگ برای تعیین محدوده‌ی ایمنی بسیار با اهمیت می‌باشد. تاکنون روش‌های تجربی بسیاری برای این منظور ارائه شده است که چندان دقیق نیستند. روش‌های مبتنی بر رگرسیون و نیز روش‌های هوش مصنوعی ابزارهای دقیق‌تری برای ارائه‌ی مدل‌های پیش‌بینی هستند. الگوریتم تجمع ذرات یکی از روش‌های مبتنی بر خرد جمعی می‌باشد که از حرکت جمعی پرندگان برای جستجوی غذا الهام گرفته شده است. در این تحقیق ابتدا علل و مکانیزم پرتاب سنگ بررسی شده و در ادامه چند روش تجربی برای پیش‌بینی پرتاب سنگ معرفی شده است. پس از تحلیل داده‌های برداشت شده از معدن سنگ آهن گل‌گهر و انتخاب پارامترهای مؤثر، چندین مدل آماری مبتنی بر رگرسیون چند متغیره‌ی خطی و غیر خطی ساخته شد و در نهایت مدل‌های غیر خطی ساخته شده، در الگوریتم PSO نیز مجدداً پیاده سازی شدند. تابع نمایی با ضریب تعیین $0/79$ برای روش رگرسیون و $0/8$ برای روش PSO نتایج بهتری نسبت به سایر توابع ارائه کرد. به‌طور کلی نتایج هر دو روش یا با هم مشابه بود و یا PSO نتایج بهتری داشت.

کلمات کلیدی: پرتاب سنگ، روش‌های تجربی، رگرسیون، الگوریتم تجمع ذرات، PSO

تقدیر و تشکر:

در این مجال بر خود لازم می‌دانم تا از اساتید محترم جناب آقای دکتر حمید منصوری و جناب آقای دکتر محمد علی ابراهیمی فرسنگی کمال سپاسگزاری را داشته باشم چراکه بدون راهنمایی‌های ایشان انجام این پایان‌نامه ممکن نبود.

همچنین از جناب آقای مهندس میرزایی، مهندس آل نبی و کلیه‌ی عزیزان شاغل در شرکت مهندسی کوشا معدن به دلیل همکاری بی‌دریغ‌شان تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از جناب آقای مهندس پورزمانی، مهندس حمزه‌نژادی و کلیه‌ی پرسنل معدن سنگ آهن گل‌گهر که در کنار کمک‌های بی‌دریغ‌شان شرایط مساعدی را برای حضور اینجانب در معدن فراهم آوردند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

در پایان بر خود لازم می‌دانم از کلیه‌ی عزیزانی که اینجانب را در گردآوری و تدوین این اثر یاری رسانده‌اند صمیمانه تشکر کنم و برایشان آرزوی موفقیت و سربلندی نمایم.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱	..... فصل اول: مقدمه.....
۲	..... ۱-۱- کلیات و ضرورت تحقیق.....
۲	..... ۲-۱- پیشینه‌ی تحقیق.....
۳	..... ۳-۱- اهداف تحقیق.....
۴	..... ۴-۱- ساختار پایان‌نامه.....
۵	..... فصل دوم: پرتاب سنگ.....
۶	..... ۱-۲- مقدمه.....
۶	..... ۲-۲- مفهوم پرتاب سنگ.....
۶	..... ۳-۲- مکانیزم پرتاب سنگ.....
۶	..... ۱-۳-۲- ایجاد حفره‌ی انفجاری.....
۷	..... ۲-۳-۲- پرتاب گل‌گذاری به خارج.....
۷	..... ۳-۳-۲- انفجار سینه‌کار.....
۷	..... ۴-۳-۲- آشکاری ثانویه.....
۸	..... ۴-۲- عوامل بروز پرتاب سنگ.....
۹	..... ۱-۴-۲- بارسنگ و فاصله‌ی ردیفی نامناسب چال‌ها.....
۱۰	..... ۲-۴-۲- خرج‌گذاری بیش از حد.....
۱۱	..... ۳-۴-۲- شرایط زمین‌شناسی.....
۱۱	..... ۴-۴-۲- خطای چالزنی.....
۱۱	..... ۵-۴-۲- گل‌گذاری نامناسب.....
۱۲	..... ۶-۴-۲- زمان تأخیر نامناسب.....
۱۲	..... ۷-۴-۲- نوع ماده‌ی منفجره.....
۱۲	..... ۵-۲- پارامترهای مؤثر بر پرتاب سنگ.....
۱۳	..... ۶-۲- پیش‌بینی پرتاب سنگ.....

۱۳	..... ۱-۶-۲ مدل‌های تجربی
۱۳	..... ۱-۱-۶-۲ مدل سوئدی
۱۵	..... ۲-۱-۶-۲ مدل آمریکایی
۱۶	..... ۳-۱-۶-۲ روش پروفیسور پکروفسکی
۱۷	..... ۴-۱-۶-۲ مدل ریچاردز و مور
۱۷	..... ۲-۶-۲ روش‌های آماری
۱۸	..... ۳-۶-۲ روش‌های هوش مصنوعی
۱۸	..... ۷-۲ جمع‌بندی
۲۰	..... فصل سوم: جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز
۲۱	..... ۱-۳-۱ مقدمه
۲۱	..... ۲-۳-۲ منطقه‌ی مورد مطالعه
۲۲	..... ۳-۳-۳ روش جمع‌آوری داده‌ها
۲۲	..... ۴-۳-۴ داده‌های جمع‌آوری شده‌ی انفجار
۲۴	..... ۵-۳-۵ جمع‌بندی
۲۵	..... فصل چهارم: مدل‌سازی آماری
۲۶	..... ۱-۴-۱ مقدمه
۲۶	..... ۲-۴-۲ نرم‌افزار SPSS
۲۶	..... ۳-۴-۳ آزمون نرمال بودن داده‌ها
۲۸	..... ۴-۴-۴ همبستگی میان پرتاب سنگ و متغیرهای مستقل
۲۹	..... ۵-۴-۵ رگرسیون
۳۰	..... ۱-۵-۴ رگرسیون چند متغیره‌ی خطی
۳۱	..... ۱-۱-۵-۴ آزمون استقلال خطاها
۳۱	..... ۲-۱-۵-۴ آزمون نرمال بودن خطاها
۳۲	..... ۳-۱-۵-۴ آزمون همخطی
۳۵	..... ۲-۵-۴ رگرسیون چند متغیره‌ی غیر خطی
۳۶	..... ۱-۲-۵-۴ مدل چند جمله‌ای
۳۶	..... ۲-۲-۵-۴ مدل چند جمله‌ای با ضرایب غیر صحیح

۳۷	..... مدل مرکب از تابع چند جمله‌ای با ضرایب غیر صحیح و نمایی
۳۸	..... مدل نمایی
۳۹	..... مدل لگاریتمی
۴۰	..... مدل توانی
۴۱	..... مدل معکوس
۴۲	..... جمع‌بندی
۴۴	..... فصل پنجم: الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات (PSO)
۴۵	..... ۱-۵- مقدمه
۴۶	..... ۲-۵- طرز کار الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات
۴۹	..... ۳-۵- ساخت مدل پیش‌بینی پرتاب سنگ با کمک PSO
۵۲	..... ۱-۳-۵- مدل چند جمله‌ای با ضرایب غیر صحیح
۵۳	..... ۲-۳-۵- مدل چند جمله‌ای
۵۵	..... ۳-۳-۵- مدل مرکب از تابع چند جمله‌ای با ضرایب غیر صحیح و نمایی
۵۷	..... ۴-۳-۵- مدل نمایی
۵۹	..... ۵-۳-۵- مدل لگاریتمی
۶۰	..... ۶-۳-۵- مدل توانی
۶۲	..... ۷-۳-۵- مدل معکوس
۶۶	..... ۴-۵- جمع‌بندی
۶۷	..... فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۶۸	..... ۱-۶- نتیجه‌گیری
۶۸	..... ۲-۶- پیشنهادات
۷۰	..... منابع
۷۵	..... پیوست

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۸	جدول ۱-۲: ویژگی‌های مکانیزم‌های پرتاب‌سنگ و نواحی آسیب‌پذیر.
۲۳	جدول ۱-۳: خلاصه‌ی نتایج داده‌های جمع‌آوری شده از معدن شماره‌ی (۱) گل‌گهر.
۲۳	جدول ۲-۳: تعدادی از داده‌های جمع‌آوری شده از معدن سنگ آهن گل‌گهر.
۲۷	جدول ۱-۴: چولگی و کشیدگی محاسبه شده برای پرتاب‌سنگ در نرم‌افزار SPSS.
۲۷	جدول ۲-۴: نتایج آزمون شاپیرو-ویلک برای پرتاب‌سنگ در نرم‌افزار SPSS.
۲۹	جدول ۳-۴: ضریب همبستگی و ضریب تعیین بین پرتاب‌سنگ و متغیرهای مستقل به‌همراه مدل خطی هر متغیر.
۳۱	جدول ۴-۴: خلاصه‌ی نتایج رگرسیون چند متغیره‌ی خطی.
۳۳	جدول ۵-۴: جدول ضرایب مدل رگرسیون چند متغیره‌ی خطی.
۳۳	جدول ۶-۴: نتایج حاصل از مدل چند متغیره‌ی خطی.
۳۶	جدول ۷-۴: نتایج مدل چند جمله‌ای.
۳۷	جدول ۸-۴: نتایج مدل چند جمله‌ای با ضرایب غیر صحیح.
۳۸	جدول ۹-۴: نتایج مدل مرکب از تابع چند جمله‌ای با ضرایب غیر صحیح و نمایی.
۳۹	جدول ۱۰-۴: نتایج مدل نمایی.
۴۰	جدول ۱۱-۴: نتایج مدل لگاریتمی.
۴۰	جدول ۱۲-۴: نتایج مدل توانی.
۴۱	جدول ۱۳-۴: نتایج مدل معکوس.
۵۲	جدول ۱-۵: مقدار پارامترهای الگوریتم PSO برای مدل چند جمله‌ای با ضرایب غیر صحیح
۵۲	جدول ۲-۵: نتایج حاصل از آموزش و تست مدل چند جمله‌ای با ضرایب غیر صحیح توسط PSO.
۵۴	جدول ۳-۵: مقدار پارامترهای الگوریتم PSO برای مدل چند جمله‌ای.
۵۴	جدول ۴-۵: نتایج حاصل از آموزش و تست مدل چند جمله‌ای توسط PSO.
۵۶	جدول ۵-۵: مقدار پارامترهای الگوریتم PSO برای مدل مرکب از تابع چند جمله‌ای و نمایی.
۵۶	جدول ۶-۵: نتایج حاصل از آموزش و تست مدل مرکب توسط PSO.
۵۷	جدول ۷-۵: مقدار پارامترهای الگوریتم PSO برای مدل نمایی.
۵۸	جدول ۸-۵: نتایج حاصل از آموزش و تست مدل نمایی توسط PSO.

- جدول ۵-۹: مقدار پارامترهای الگوریتم PSO برای مدل لگاریتمی. ۵۹
- جدول ۵-۱۰: نتایج حاصل از آموزش و تست مدل لگاریتمی توسط PSO. ۵۹
- جدول ۵-۱۱: مقدار پارامترهای الگوریتم PSO برای مدل توانی. ۶۰
- جدول ۵-۱۲: نتایج حاصل از آموزش و تست مدل توانی توسط PSO. ۶۱
- جدول ۵-۱۳: مقدار پارامترهای الگوریتم PSO برای مدل معکوس. ۶۲
- جدول ۵-۱۴: نتایج حاصل از آموزش و تست مدل معکوس توسط PSO. ۶۲
- جدول ۵-۱۵: نتایج کلیه‌ی مدل‌های ساخته‌شده به روش رگرسیون چند متغیره‌ی غیر خطی ۶۴
- جدول ۵-۱۶: نتایج کلیه‌ی مدل‌های ساخته‌شده با کمک الگوریتم PSO ۶۵

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۷	شکل ۱-۲: مکانیزم‌های اصلی ایجاد پرتاب سنگ.
۱۰	شکل ۲-۲: بارسنگ ناکافی به سبب انحراف چال.
۱۰	شکل ۳-۲: واقع شدن دهانه‌ی چال نزدیک لبه، در جبهه کار خیلی مایل.
۱۱	شکل ۴-۲: خروج گازها در اثر وجود درزه‌های باز شده، رگه‌های گلی و حفرات.
۱۵	شکل ۵-۲: حداکثر پرتاب سنگ به‌ازای ابعاد سنگ برای قطر چال‌های مختلف.
۱۵	شکل ۶-۲: حداکثر پرتاب سنگ براساس خرج ویژه.
۲۸	شکل ۱-۴: نمودار فراوانی مربوط به داده‌های پرتاب‌سنگ.
۳۲	شکل ۲-۴: نمودار توزیع فراوانی خطای حاصل از مدل چند متغیره‌ی خطی.
۳۴	شکل ۳-۴: نمودار پراکندگی میان متغیرهایی که بیشترین همبستگی را دارند.
۳۴	شکل ۴-۴: نمودار پراکندگی میان پرتاب‌سنگ واقعی و پیش‌بینی شده برای داده‌های ساخت مدل.
۳۵	شکل ۵-۴: نمودار پراکندگی میان پرتاب‌سنگ واقعی و پیش‌بینی شده برای داده‌های آزمون مدل.
۳۶	شکل ۶-۴: نمودار پراکندگی میان پرتاب‌سنگ واقعی و پیش‌بینی شده برای مدل چند جمله‌ای.
۳۷	شکل ۷-۴: نمودار پراکندگی میان پرتاب‌سنگ واقعی و پیش‌بینی شده برای مدل چند جمله‌ای با ضرایب غیر صحیح.
۳۸	شکل ۸-۴: نمودار پراکندگی میان پرتاب‌سنگ واقعی و پیش‌بینی شده برای مدل مرکب از تابع چند جمله‌ای با ضرایب غیر صحیح و نمایی.
۳۹	شکل ۹-۴: نمودار پراکندگی میان پرتاب‌سنگ واقعی و پیش‌بینی شده برای مدل نمایی.
۴۰	شکل ۱۰-۴: نمودار پراکندگی میان پرتاب‌سنگ واقعی و پیش‌بینی شده برای مدل لگاریتمی.
۴۱	شکل ۱۱-۴: نمودار پراکندگی میان پرتاب‌سنگ واقعی و پیش‌بینی شده برای مدل توانی.
۴۲	شکل ۱۲-۴: نمودار پراکندگی میان پرتاب‌سنگ واقعی و پیش‌بینی شده برای مدل معکوس.
۴۸	شکل ۱-۵: نحوه‌ی به روز شدن موقعیت ذره در الگوریتم PSO.
۵۰	شکل ۲-۵: فلوجارت مراحل محاسبات در الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات.
۵۲	شکل ۳-۵: نمودار پراکندگی بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده برای مدل چند جمله‌ای با ضرایب غیر صحیح.
۵۳	شکل ۴-۵: نحوه‌ی جابجایی ذرات برای تخمین مدل چند جمله‌ای با ضرایب غیر صحیح در الگوریتم PSO.
۵۴	شکل ۵-۵: نمودار پراکندگی بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده برای مدل چند جمله‌ای.

- شکل ۵-۶: نحوه‌ی جابجایی ذرات برای تخمین مدلچند جمله‌ای در الگوریتم PSO. ۵۵
- شکل ۵-۷: نمودار پراکندگی بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده برای مدل مرکب. ۵۶
- شکل ۵-۸: نحوه‌ی جابجایی ذرات برای تخمین مدل مرکب در الگوریتم PSO. ۵۷
- شکل ۵-۹: نمودار پراکندگی بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده برای مدل نمایی. ۵۸
- شکل ۵-۱۰: نحوه‌ی جابجایی ذرات برای تخمین مدل نمایی در الگوریتم PSO. ۵۸
- شکل ۵-۱۱: نمودار پراکندگی بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده برای مدل لگاریتمی. ۵۹
- شکل ۵-۱۲: نحوه‌ی جابجایی ذرات برای تخمین مدل لگاریتمی در الگوریتم PSO. ۶۰
- شکل ۵-۱۳: نمودار پراکندگی بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده برای مدل توانی. ۶۱
- شکل ۵-۱۴: نحوه‌ی جابجایی ذرات برای تخمین مدل توانی در الگوریتم PSO. ۶۱
- شکل ۵-۱۵: نمودار پراکندگی بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده برای مدل معکوس. ۶۲
- شکل ۵-۱۶: نحوه‌ی جابجایی ذرات برای تخمین مدل معکوس در الگوریتم PSO. ۶۳
- شکل ۵-۱۷: مقایسه‌ی روند تخمین پرتاب‌سنگ توسط مدل نمایی ساخته شده با روش رگرسیون و PSO. ۶۳

فصل اول

مقدمه

۱-۱- کلیات و ضرورت تحقیق

در انفجارهای تولیدی معادن سطحی، هدف، دستیابی به حد مشخصی از خردایش است به نحوی که هزینه‌ی بارگیری و حمل مواد و همچنین کلیه‌ی عوارض جانبی پس از انفجار و هزینه‌های عملیاتی مرتبط با آن حداقل باشد. به هر حال عملیات انفجار پتانسیل ایجاد مخاطرات بیشماری را دارد. یکی از پیامدهای خطرناک و نامطلوب عملیات انفجار در معادن روباز پدیده‌ی پرتاب‌سنگ است. پرتاب‌سنگ، پرتاب خارج از کنترل سنگ خرد شده‌ی حاصل از انفجار است که اصلی‌ترین منبع صدمه به تجهیزات و افراد می‌باشد [۱]. اطلاعات تاریخی خلاصه شده توسط وراکیس و لوب نشان می‌دهد که برای دوره‌ی زمانی سال‌های ۱۹۷۸ تا ۲۰۰۱، در مجموع ۱۹۵ حادثه‌ی آتشکاری در معادن سطحی زغال در آمریکا اتفاق افتاده است. از ۱۹۵ حادثه، ۴۵/۶۴ درصد به‌طور مستقیم به کمبود ایمنی منطقه‌ی انفجار، ۵۴ حادثه (۲۷/۶۹ درصد) به پرتاب‌سنگ، ۳۳ عدد (۱۶/۹۲ درصد) به انفجار نابهنگام و ۱۱ عدد (۵/۶۴ درصد) به عمل نکردن انفجار بستگی داشته است [۲]. لذا کنترل و پیش‌بینی حداکثر پرتاب‌سنگ برای جلوگیری از این حوادث ضروری می‌باشد.

۲-۱- پیشینه‌ی تحقیق

در تحقیقات مختلف، لانج فورس و کیشل استروم^۱، هولمبرگ و پرسون^۲، روث^۳، پرسون و همکاران پارامترهای مؤثر بر پرتاب‌سنگ را بیان کردند [۳ و ۴ و ۵ و ۶]. فلچر و دی‌آندرا^۴، ماسی و سوئی^۵ و باومیک و همکاران^۶ شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی را به عنوان پارامترهای غیرقابل کنترل در پرتاب‌سنگ بررسی کردند [۷ و ۸ و ۹]. با مطالعات صورت گرفته، چندین عامل مهم از جمله بارسنگ و فاصله‌ی ردیفی نامناسب چال‌ها، خرج‌گذاری بیش از حد، شرایط نامساعد زمین‌شناسی، خطای چال‌زنی، گل‌گذاری نامناسب و تأخیرهای ناکافی در بروز پرتاب‌سنگ مؤثر تشخیص داده شدند [۱۳]. مهمترین مدل‌های تجربی توسط لاندبرگ^۷، روث و ریچارد و مور^۸ ارائه شده‌اند [۵ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲]. همچنین مدل پیش‌بینی پرتاب‌سنگ با کمک معادلات بالستیکی حرکت پرتابه،

¹Langefors and Kishlstrom

²Holmberg and Persson

³Roth

⁴Fletcher and D' Andrea

⁵Massey and Sui

⁶Bhowmik et al.

⁷Lundborg

⁸Richards and Moor

توسط استوژادینوویچ و همکاران^۱ ارایه شده است [۱۳]. مطالعات بیشتر بر روی این پدیده توسط لاگارد - پدرسون^۲ و پرسون، سیسکیند و کوپ^۳، شی و کلارک^۴، باچ پای و همکاران^۵ و رهاک و همکاران^۶ صورت گرفته است [۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸]. در سال‌های اخیر از روش‌های مبتنی بر تحلیل‌های آماری و روش‌های نوین مانند هوش مصنوعی نیز برای پیش‌بینی پرتاب سنگ به‌طور گسترده استفاده شده است که عمده‌ترین آن‌ها توسط رضایی و همکاران، منجزی و همکاران^۷، امینی و همکاران^۸، قاسمی و همکاران^۹ و خاندلوال^{۱۰} و منجزی با کمک روش رگرسیون چند متغیره‌ی غیر خطی، شبکه‌های عصبی، الگوریتم ژنتیک، منطق فازی، روش شبیه‌سازی مونت کارلو و روش SVM انجام شده است [۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴].

۱-۳- اهداف تحقیق

تاکنون روش‌های تجربی بسیاری برای پیش‌بینی حداکثر پرتاب سنگ ارایه شده‌اند که بیشتر آن‌ها بر اساس محاسبه‌ی سرعت اولیه‌ی پرتاب و استفاده از روابط سینماتیکی طراحی شده‌است. اما روش‌های تجربی به‌دلیل محدودیت در استفاده از پارامترهای مؤثر بر پرتاب سنگ چندان دقیق نیستند. به همین جهت امروزه استفاده از روش‌های هوش مصنوعی از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک، منطق فازی، الگوریتم‌های خرد جمعی و... از گستردگی زیادی برخوردار شده‌اند. این روش‌ها به‌دلیل عدم محدودیت در استفاده از پارامترهای مؤثر و همچنین قدرت بالای محاسباتی، جواب‌های دقیق‌تری نسبت به روش‌های تجربی می‌دهند. علاوه بر دقت بالا، سرعت بالای محاسبات در این روش‌ها نیز توجه محققین را به استفاده از این روش‌ها جلب کرده است.

الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات یک روش مبتنی بر خرد جمعی است که از حرکت جمعی گروه پرندگان برای یافتن غذا الهام گرفته شده است [۲۵]. از این روش در علوم مختلف مهندسی

¹ Stojadinovic et al.

² Ladegard - Pederson

³ Siskind and Kopp

⁴ Shea and Clark

⁵ Bajpae et al.

⁶ Rehak et al.

⁷ Monjezi et al.

⁸ Amini et al.

⁹ Ghasemi et al.

¹⁰ Khandelwal

به‌خصوص در مهندسی برق و کامپیوتر، مهندسی عمران و ... به‌طور وسیع استفاده شده است. با توجه به استفاده‌ی روز افزون این گونه روش‌ها در مدل‌سازی جهت حل مسائل پیچیده‌ی علمی و مهندسی، در این پژوهش از این الگوریتم برای پیش‌بینی حداکثر پرتاب‌سنگ ناشی از انفجار در معدن سنگ آهن گل‌گهر استفاده شد. به‌منظور فهم ارتباط بین متغیرها و همچنین مقایسه‌ی دو روش، اساس کار بر مدل‌سازی آماری و سپس پیاده‌سازی دوباره‌ی آن با الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات قرار گرفت.

۱-۴- ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم ابتدا مفهوم پرتاب‌سنگ و سپس مکانیزم و عوامل ایجاد این پدیده بررسی می‌گردد. سپس پارامترهای مؤثر بر پرتاب‌سنگ معرفی می‌شوند؛ در نهایت روش‌های مختلف پیش‌بینی پرتاب‌سنگ به‌طور مختصر توضیح داده خواهد شد. فصل سوم این گزارش اختصاص به معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه و روش جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز برای مطالعه‌ی پرتاب سنگ در این منطقه دارد. در این فصل قسمتی از اطلاعات بدست آمده ارایه شده است. تحلیل‌ها و مدل‌سازی آماری در فصل چهارم ارایه شده‌اند. در این فصل ابتدا به آزمون نرمال بودن داده‌ها پرداخته می‌شود و سپس همبستگی میان متغیرها برای تعیین پارامترهای مؤثر بررسی می‌گردد. در نهایت مدل‌های ساخته‌شده با کمک روش رگرسیون ارایه و با هم مقایسه می‌شوند. در فصل پنجم مفاهیم و تعاریف الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات، مکانیزم این الگوریتم و نحوه‌ی پیاده‌سازی آن توضیح داده می‌شود. سپس مدل‌های مختلف ساخته‌شده توسط این روش ارایه و نتایج حاصل از این روش و روش رگرسیون با هم مقایسه می‌گردد. در فصل ششم نتایج کلی حاصل از این پژوهش به همراه پیشنهادات آورده شده‌است.

فصل دوم

پرتاب سنگ

۱-۲ - مقدمه

یکی از مهمترین مخاطرات ناشی از انفجار در معادن سطحی و زیرزمینی پدیده‌ی پرتاب‌سنگ^۱ است. از آنجا که پرتاب‌سنگ می‌تواند عامل بسیاری از صدمات جانی و خسارت به تجهیزات و تأسیسات باشد؛ کنترل این پدیده در معادن بسیار حائز اهمیت است. برای کنترل پرتاب‌سنگ ابتدا باید آنرا به خوبی شناخت. در این فصل ابتدا مفهوم پرتاب سنگ و سپس مکانیزم و عوامل مؤثر بر آن معرفی خواهد شد و در نهایت روش‌های مختلف پیش‌بینی پرتاب‌سنگ بررسی می‌شود.

۲-۲ - مفهوم پرتاب سنگ

بر طبق تعریف ارائه شده توسط مؤسسه‌ی سازندگان مواد منفجره^۲، پرتاب‌سنگ، حرکت سنگ خرد شده بر اثر انرژی ماده‌ی منفجره به آن‌سوی منطقه‌ی انفجار است که یکی از پدیده‌های نامطلوب ناشی از عملیات آتشکاری به‌شمار می‌آید [۲۶]. هنگامی که عملیات انفجار در حال انجام است، سنگ‌ها خرد شده و مواد خردایش یافته به سمت جلو حرکت می‌کنند. صرف نظر از این جابجایی مطلوب، در انفجار معادن روباز بعضی از این قطعه سنگ‌های خرد شده می‌توانند تا مسافت‌های طولانی حرکت کنند. معمولاً این حرکت غیر منتظره‌ی سنگ تحت عنوان پرتاب‌سنگ نامیده می‌شود [۱].

علت اصلی بروز پرتاب سنگ وجود هرگونه عدم انطباق میان توزیع انرژی ماده‌ی منفجره، مقاومت مکانیکی توده سنگ و محبوس بودن ماده‌ی منفجره می‌باشد [۲۷]. این بدان معناست که در فرایند پرتاب‌سنگ، مهمترین عوامل تأثیرگذار، نوع ماده‌ی منفجره‌ی مصرفی، طراحی الگوی انفجار و میزان خرج‌گذاری هستند. عدم توجه به هر کدام از این عوامل می‌تواند منجر به عدم انطباق انرژی ماده‌ی منفجره و مقاومت توده سنگ گردد.

۳-۲ - مکانیزم پرتاب سنگ

با توجه به شکل ۱-۲ به طور کلی سه مکانیزم اصلی برای پرتاب سنگ وجود دارد. آتشکاری ثانویه نیز به عنوان یک مکانیزم و منبع پرتاب سنگ شناخته می‌شود.

^۱Flyrock

^۲Institute of Makers of Explosives (IME)

۲-۳-۱- ایجاد حفره‌ی انفجاری^۱

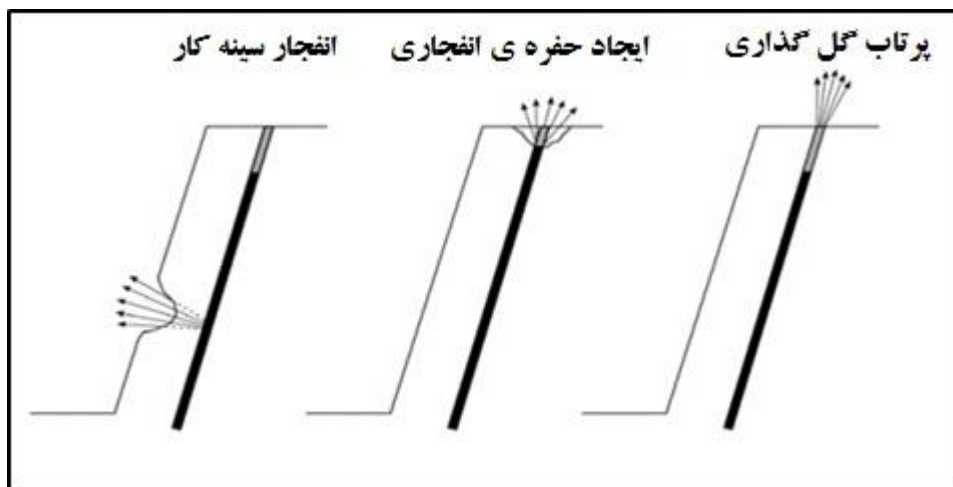
اگر نسبت گل‌گذاری به قطر چال خیلی کوچک باشد یا سنگ دهانه‌ی چال ضعیف باشد پرتاب‌سنگ از دهانه‌ی چال می‌تواند رخ دهد [۲۸].

۲-۳-۲- پرتاب گل‌گذاری به خارج^۲

گل‌گذاری نامناسب دهانه‌ی چال می‌تواند باعث پرتاب‌سنگ به شکل پرتاب مواد گل‌گذاری به خارج شود. استفاده از مواد نامناسب و ارتفاع ناکافی گل‌گذاری نیز سبب بروز این مکانیزم از پرتاب‌سنگ می‌گردد [۲۸].

۲-۳-۳- انفجار سینه کار^۳

این پدیده هنگامی رخ می‌دهد که خرج‌های انفجاری در نزدیکی ساختارهای زمین‌شناسی یا زون‌های ضعیف قرار گرفته باشند. گازهای با فشار بالای ماده‌ی منفجره به نواحی ضعیف (مسیر کم مقاومت) وارد می‌شوند و تولید صدا، انفجار هوا و پرتاب‌سنگ می‌کنند [۲۲].



شکل ۲-۱: مکانیزم‌های اصلی ایجاد پرتاب سنگ [۲۸]

۲-۳-۴- آتشکاری ثانویه^۴

گاهی انفجارهای معادن، منجر به ایجاد قطعات بسیار درشت سنگ و یا باقی ماندن پاشنه در مقابل

¹Cratering

²Rifling

³Face Burst

⁴Secondary blasting

پله می‌شود. در اینصورت نیاز به عملیات آتشکاری ثانویه برای رفع این نواقص می‌باشد. به طور کلی دو روش برای انجام آتشکاری ثانویه وجود دارد. در روش نخست ماده‌ی منفجره بر روی محل مورد نظر قرار می‌گیرد و روی آن با خاک و مواد مناسب پوشانده می‌شود. این روش به دلیل محبوس بودن نامناسب ماده‌ی منفجره و همچنین نیاز به ماده‌ی منفجره‌ی زیاد، مناسب نمی‌باشد. در روش دوم در قطعه سنگ‌های درشت یا پاشنه‌ی مورد نظر چال‌هایی حفر شده، داخل آن‌ها خرج گذاری و در نهایت گل گذاری می‌شود. به طور معمول آتشکاری ثانویه نسبت به آتشکاری اصلی، منبع مخاطرات بیشتری است. وجود چهار سطح آزاد در قطعات درشت سنگ، همچنین وجود چال‌های کم عمق و اغلب نبود سطح آزاد کافی در پاشنه، باعث بروز پرتاب‌سنگ شدید می‌شود. در این شرایط توانایی پیش‌بینی و کنترل پرتاب سنگ بسیار پایین است [۲۹]. در میان معادن روباز انگلستان از میان ۲۳ حادثه‌ی مطالعه شده‌ی مربوط به پرتاب سنگ، تنها چهار مورد مربوط به عملیات انفجار اصلی بوده است، حال آن‌که عامل اصلی بیش از ۸۰ درصد حوادث، آتشکاری ثانویه گزارش شده است [۳۰].

هر کدام از مکانیزم‌های پرتاب‌سنگ دارای ویژگی‌های مربوط به خود هستند که در جدول ۱-۲ به اختصار آورده شده اند.

جدول ۱-۲: ویژگی‌های مکانیزم‌های پرتاب‌سنگ و نواحی آسیب‌پذیر [۲۹]

مکانیزم پرتاب سنگ	جهت پرتاب (نواحی آسیب پذیر)	نیروی رانش برای پرتاب	زاویه پرتاب
پرتاب گل گذاری	در صورت قائم بودن در تمام جهات	پالس آزاد شدن گل گذاری ^۱ (SRP)	قائم یا برابر با شیب چال
ایجاد حفره انفجاری	در تمام جهات (۳۶۰ درجه)	پالس آزاد شدن گاز ^۲ (GRP)	زیر قائم
انفجار سینه کار	در جلوی سینه کار	پالس آزاد شدن گاز (GRP)	نزدیک به افق
آتشکاری ثانویه	هندسه نا معلوم	ماده منفجره در ارتباط مستقیم با پرتاب	بین ۰ تا ۱۸۰ درجه (غیر قابل پیش بینی)

۴-۲- عوامل بروز پرتاب سنگ

به طور کلی عوامل مؤثر بر نتایج انفجار به دو دسته‌ی قابل کنترل و غیر قابل کنترل تقسیم

^۱Stemming release pulse

^۲Gas release pulse