بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی معدن

پایان‌نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن

گرایش استخراج

پیش‌بینی عقب‌زدگی ناشی از انفجار با استفاده از روش‌های رگرسیون ـ PSO و شبکه‌های عصبی مصنوعی

مؤلف :

حامد شمس‌الدینی

استاد راهنما:

دکتر محمد علی ابراهیمی فرسنگی

استاد مشاور:

دکتر حمید منصوری

شهریور۱۳۹۲

این پایان‌نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

گروه مهندسی معدن
دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی‌شود.

نام و نام خانوادگی	**امضاء**
دانشجو: حامد شمس‌الدینی	
استاد راهنما: دکتر محمد علی ابراهیمی فرسنگی	
استاد مشاور: دکتر حمید منصوری	
داور۱ : دکتر غلامرضا سعیدی رشک علیا	
داور۲ : دکتر رضا رحمان‌نژاد	
معاون آموزشی و پژوهشی دانشکده: دکتر غلامرضا کمالی	

حق چاپ محفوظ و مخصوص دانشگاه شهید باهنر است.

تقدیم با بوسه بر دستان پدر زحمتکشم

به او که نمی دانم از بزرگی اش بگویم یا از مردانگی، سخاوت و مهربانیش

به او که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه کنم

پدرم راه تمام زندگیست

پدرم دلخوشی همیشگی ست

تقدیم به مادر عزیزتر از جانم

به دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر

گنجینه جاودانی مادر است

چشمه سار مهربانی مادر است

و تقدیم به برادر و خواهرانم

که خنده ها و شادیشان طراوت بخش زندگی ام است.

خدایا:

خود می‌دانی که در شکارگاه شکرت صیادانی ناتوانیم. وه که چه ناچیز است چله کشیدن ما! تیر شکر را در کمان دعایت می‌گذاریم و اما نیک می‌دانیم که اگر بازوان آرش را هم داشته باشیم، باز فقط به اندازه مرز این کهن بوم، بر تیرمان کارگر است و تو اما لایزالی! از همین روست که هر گاه اکسیر عشقت را بر جام جانم ریخته‌ای، زبانم جز سکوت چیزی نگفت.

عهد ما با لب شیرین دهنان بست خدای ما همه بنده و این قوم خداوندانند

زیباترین مخلوقان خدا، بی شک اگر خدایی نبود آن‌ها را می‌پرستیدم. فقط می‌توانم بگویم پدر و مادرم!

هر چه هست، حاصل دلسوزی و شکیبایی بی بدیل شماست!

سپاسگذاری می‌کنم از استادان گرانقدرم، دکتر محمد علی ابراهیمی فرسنگی و دکتر حمید منصوری که در طول این دوره کوتاه تحصیلی از محضرشان بیش‌تر درس زندگی فرا گرفتم، هر چند حضورشان هماره علم افروز محافل دوستانه این کوتاه دوره بود.

در این جا لازم می‌دانم از کارکنان زحمتکش مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر، به ویژه جناب آقای مهندس اسحاق پور زمانی، مهندس سعید میرزایی و مهندس رضا آل‌نبی به خاطر راهنمایی‌ها و کمک‌های بی دریغشان در زمینه جمع‌آوری و فراهم آوردن اطلاعات تشکر نمایم.

حامد شمس‌الدینی

تابستان ۱۳۹۲

چکیده

عقب‌زدگی اثر جانبی ناخواسته عملیات انفجار در معادن روباز است. این پدیده می‌تواند باعث ناپایداری دیواره‌های معدن، سقوط ماشین آلات، خردایش ضعیف، ترقیق بالا، افزایش باطله-برداری و نهایتاً رشد هزینه‌های تولید شود. پارامترهای متعددی بر عقب‌زدگی تأثیر می‌گذارند، از جمله پارامترهای کنترل پذیر (مانند پارامترهای طراحی آتشکاری و ویژگی‌های مواد منفجره) و پارامترهای کنترل ناپذیر (مانند خصوصیات سنگ و ناپیوستگی‌ها). پیچیدگی پدیده عقب‌زدگی و عدم قطعیت آن از نظر پیامد پارامترهای مختلف، پیش‌بینی آن را بسیار دشوار می‌سازد.

هدف این مطالعه، پیش‌بینی عقب‌زدگی با استفاده از رویکردهای مختلف رگرسیون، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO) و شبکه‌های عصبی مصنوعی و ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف بر این پدیده است. برای این امر، پایگاه داده‌ای متشکل از ۶۰ انفجار انجام شده در معدن شماره یک مجتمع سنگ آهن گل‌گهر تهیه شد. ابتدا با استفاده از این پایگاه داده، معادله‌های تجربی مختلف برای پیش‌بینی عقب‌زدگی با استفاده از تحلیل رگرسیون چندگانه ارائه شد. سپس مدل‌های ساخته شده با استفاده از الگوریتم PSO بهینه شدند. مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل رگرسیون و رگرسیون ـ PSO نشان داد که الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات در اغلب موارد به نتایج بهتری در معیارهای کارایی مدل‌های مختلف می‌رسد. همچنین شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت پیش‌بینی عقب‌زدگی استفاده شد. نتایج حاصل از بکارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی نشان داد که شبکه عصبی ابزاری مناسب برای پیش‌بینی عقب‌زدگی است و با ضریب تعیین بالاتر (۰/۹۶ در مقایسه با ۰/۹۰) و جذر میانگین مربعات خطای کمتر (۰/۲۱ در مقایسه با ۰/۳۲) نتایج بهتری نسبت به مدل رگرسیونی ـ PSO بدست می‌دهد. در نهایت تحلیل حساسیت انجام شده نشان داد که طول گل-گذاری مهم‌ترین عامل کنترل عقب‌زدگی است.

واژه‌های کلیدی: عقب‌زدگی، رگرسیون چندگانه، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات، شبکه‌های عصبی مصنوعی، تحلیل حساسیت

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- بیان مسئله ۲

۱-۳- ضرورت و هدف از انجام تحقیق ۳

۱-۴- پیشینه تحقیق ۴

۱-۵- ساختار پایان‌نامه ۷

فصل دوم: عوامل و پارامترهای مؤثر بر عقب‌زدگی ۸

۲-۱- مقدمه ۹

۲-۲- چگونگی اثرگذاری پارامترهای قابل کنترل بر عقب‌زدگی ۹

۲-۲-۱- ضخامت بارسنگ ۹

۲-۲-۲- نسبت فاصله‌داری به بارسنگ ۱۰

۲-۲-۳- گل‌گذاری ۱۲

۲-۲-۴- خرج ویژه ۱۳

۲-۲-۵- خرج ویژه ردیف آخر نسبت به خرج ویژه کل ۱۳

۲-۲-۶- حداکثر خرج منفجر شده همزمان ۱۴

۲-۲-۷- ضریب سفتی ۱۴

۲-۲-۸- تأخیر زمانی ۱۵

۲-۲-۹- تعداد ردیف ۱۶

۲-۲-۱۰- قطر چال ۱۷

۲-۲-۱۱- شیب چال ۱۷

۲-۲-۱۲- سرعت انفجار ۱۸

۲-۳- نقش خصوصیات توده‌سنگ در بروز عقب‌زدگی ۱۹

فهرست مطالب(ادامه)

عنوان	صفحه

۲-۳-۱- کیفیت توده‌سنگ ۱۹

۲-۳-۲- ناپیوستگی‌ها ۱۹

۲-۳-۲-۱- درزه‌های افقی نسبت به سینه‌کار ۲۰

۲-۳-۲-۲- درزه‌های غالب موازی با سینه‌کار ۲۰

۲-۳-۲-۳- درزه‌های عمود بر سینه‌کار ۲۱

۲-۳-۲-۴- درزه‌های زاویه‌دار نسبت به سینه‌کار ۲۱

۲-۳-۲-۵- درزه‌های با زاویه کمتر از ۳۰ درجه نسبت به سینه‌کار ۲۱

۲-۳-۲-۶- آتشکاری در جهت شیب و در خلاف جهت شیب ۲۲

۲-۴- جمع‌بندی ۲۳

فصل سوم: معرفی منطقه مورد مطالعه و نحوه جمع‌آوری داده‌ها ۲۴

۳-۱- مقدمه ۲۵

۳-۲- کانی‌شناسی ۲۵

۳-۲-۱- کانی‌های فلزی ۲۵

۳-۲-۲- کانی‌های غیر فلزی ۲۷

۳-۳- گسل‌های محدوده‌ی معدن شماره یک گل‌گهر ۲۷

۳-۴- مشخصات هندسی کاواک طراحی شده نهایی معدن ۲۸

۳-۵- جمع‌آوری داده‌ها ۲۸

۳-۶- جمع‌بندی ۳۱

فصل چهارم: کاربرد تحلیل رگرسیون در پیش‌بینی عقب‌زدگی ۳۲

۴-۱- مقدمه ۳۳

۴-۲- آمار توصیفی ۳۳

۴-۳- تحلیل رگرسیون خطی چندگانه ۳۴

فهرست مطالب(ادامه)

عنوان **صفحه**

۴-۴- تحلیل رگرسیون غیر خطی چندگانه ۳۷

۴-۵- آنالیز حساسیت ۴۲

۴-۶- جمع‌بندی ۴۳

فصل پنجم: پیش‌بینی عقب‌زدگی با استفاده از مدل رگرسیون ـ PSO ۴۴

۵-۱- مقدمه ۴۵

۵-۲- مروری بر روش عملکرد PSO ۴۷

۵-۳- پارامترهای الگوریتم PSO ۵۰

۵-۴- پیاده‌سازی الگوریتم و نتایج حاصل از آن ۵۲

۵-۵- پیش‌بینی عقب‌زدگی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی ۵۶

۵-۵-۱- مؤلفه‌های اساسی شبکه عصبی ۵۶

۵-۵-۲- توابع انتقال ۵۷

۵-۵-۳- مجموعه داده‌های آموزش و آزمون ۵۷

۵-۵-۴- توابع آموزش ۵۸

۵-۶- طراحی مدل پیش‌بینی عقب‌زدگی ۵۸

۵-۷- جمع‌بندی ۶۱

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۶۲

۶-۱- نتایج ۶۳

۶-۲- پیشنهادها ۶۴

منابع ۶۵

پیوست‌ها ۶۹

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: عواقب کم یا زیاد بودن بارسنگ ۱۰
جدول ۲-۲: درصد همپوشانی انرژی در الگوهای حفاری مختلف..... ۱۲
جدول ۲-۳ : تغییرات خرج ویژه بر اساس نوع سنگ..... ۱۳
جدول ۲-۴: تأخیر بین ردیف‌ها و نتایج حاصله ۱۶
جدول ۲-۵: عمق آسیب برای مواد منفجره مختلف ۱۸
جدول ۳-۱: مشخصات برخی از الگوهای انفجاری ثبت شده ۲۹
جدول ۴-۱: توصیف آماری ۶۰ انفجار برداشت شده از معدن گل‌گهر ۳۳
جدول ۴-۲: ماتریس ضرایب همبستگی پیرسون برای پارامترهای مؤثر بر عقب‌زدگی ۳۴
جدول ۴-۳: ضرایب رگرسیون و هم خطی متغیرهای مدل ۳۶
جدول ۴-۴: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس ۳۷
جدول ۴-۵: مقادیر بدست آمده‌ی شاخص‌های ارزیابی برای مدل‌های مختلف ۴۱
جدول ۴-۶: میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای ورودی بر عقب‌زدگی ۴۳
جدول ۵-۱: مقایسه نتایج حاصل از رگرسیون و رگرسیون ـ PSO ۵۴
جدول ۵-۲: نمونه‌ای از مدل‌های ساخته شده توسط شبکه عصبی ۵۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: پدیده عقب‌زدگی ناشی از عملیات انفجار در معدن سنگ آهن گل‌گهر ۳
شکل ۲-۱: زون خردشده ناشی از نسبت S/B کوچک ۱۱
شکل ۲-۲: ایجاد فاصله هوایی داخل چال به منظور بهبود نتایج انفجار ۱۲
شکل ۲-۳: عقب‌زدگی به علت H/B<۲ ..... ۱۵
شکل ۲-۴: شرایط خمش پله ۱۵
شکل ۲-۵: حرکت سنگ خردشده ردیف جلو به اندازه یک سوم بارسنگ ۱۵
شکل ۲-۶ : ایجاد کردن سطح آزاد برای ردیف‌های عقب ۱۶
شکل ۲-۷: مقایسه چال‌های مایل و قائم ۱۷
شکل ۲-۸: حالات مختلف جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به سینه‌کار ۲۰
شکل ۲-۹: درزه‌های غالب موازی با سینه‌کار (نمای افقی) ۲۰
شکل ۲-۱۰: درزه‌ها عمود بر سینه‌کار ۲۱
شکل ۲-۱۱: درزه‌های زاویه‌دار نسبت به سینه‌کار ۲۱
شکل ۲-۱۲: درزه‌ها با یک زاویه تند نسبت به سینه‌کار ۲۲
شکل ۲-۱۳: آتشکاری در جهت شیب (الف) و در خلاف جهت شیب (ب) ۲۲
شکل ۳-۱: موقعیت جغرافیایی مجتمع سنگ آهن گل‌گهر ۲۵
شکل ۳-۲: گسل‌های محدوده‌ی معدن یک گل‌گهر ۲۷
شکل ۳-۳: محدوده‌ی نهایی معدن شماره یک گل‌گهر ۲۸
شکل ۳-۴: موقعیت برخی از انفجارهای ثبت شده ۳۰
شکل ۴-۱: توزیع فراوانی خطاها ۳۶
شکل ۴-۲: نمودار همگنی واریانس‌ها ۳۶
شکل ۴-۳: ارتباط بین عقب‌زدگی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای مدل خطی ۳۸
شکل ۴-۴: ارتباط بین عقب‌زدگی اندازه گیری شده و پیش بینی شده برای مدل چند جمله‌ای .. ۳۹
شکل ۴-۵: ارتباط بین عقب‌زدگی اندازه گیری شده و پیش بینی شده برای مدل توانی ۳۹
شکل ۴-۶: ارتباط بین عقب‌زدگی اندازه گیری شده و پیش بینی شده برای مدل نمایی ۳۹
شکل ۴-۷: ارتباط بین عقب‌زدگی اندازه گیری شده و پیش بینی شده برای مدل لگاریتمی ۴۰
شکل ۴-۸: ارتباط بین عقب‌زدگی اندازه گیری شده و پیش بینی شده برای داده‌های تست ۴۰

فهرست شکل‌ها (ادامه)

عنوان	صفحه

شکل ۵-۱: اشکال مختلف همسایگی ۵۰
شکل ۵-۲: نحوه‌ی همگرایی ذرات در تکرارهای مختلف برای مدل نمایی ۵۴
شکل ۵-۳: مقایسه عقب‌زدگی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای داده‌های آموزش ۵۵
شکل ۵-۴: مقایسه عقب‌زدگی اندازه‌گیری شده و پیش بینی شده برای مدل نمایی..... ۵۵
شکل ۵-۵: نتایج شبکه عصبی بهینه برای کل داده‌ها ۶۰
شکل ۵-۶: نتایج شبکه عصبی بهینه برای داده‌های آزمون ۶۰

فهرست علائم و اختصارات

عنوان	نماد
الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات	PSO
شبکه‌های عصبی مصنوعی	ANN
سیستم‌های مهندسی سنگ	RES
بارسنگ	B
فاصله ردیفی چال‌ها	S
ارتفاع پله	H
شاخص کیفیت سنگ	RQD
سیستم طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ	Q
قطر چال	D
طول گل‌گذاری	ST
خرج ویژه ردیف آخر	PF
حداکثر خرج منفجر شده همزمان	MC
متوسط عقب‌زدگی	BB
تعداد ردیف	NR
ضریب تورم واریانس	VIF
جذر میانگین مربعات خطا	RMSE
شاخص عملکرد	VAF
میانگین درصد خطای مطلق	MAPE
ضریب تعیین	R^2
آنالیز حساسیت میدان کسینوسی	CAM
تعداد اعضای جمعیت	n_{pop}
ضریب شتاب فردی	c_1
ضریب شتاب اجتماعی	c_2
وزن اینرسی	W

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

آتشکاری به عنوان یکی از مهم‌ترین و اولین مراحل استخراج معادن روباز نقش اساسی در راندمان تولید، برنامه‌ریزی تولید بلند مدت و کوتاه مدت، هزینه‌های استخراج و نیز مسائل زیست محیطی دارد. عموماً عملیات آتشکاری در معادن به دو بخش کلی تقسیم می‌شود:

الف) طراحی الگوی آتشکاری

ب) پیاده‌سازی طرح و انجام عملیات آتشکاری

واضح است که دستیابی به نتایج مناسب مرحله دوم به طور کامل وابسته به طراحی مناسب و با رعایت اصول مهندسی است. لذا طراحی مناسب سیستم حفاری و انفجار جهت موفقیت‌آمیز بودن عملیات معدن لازم و ضروری است. طراحی بهینه الگوی آتشکاری باعث افزایش بازدهی سیستم بارگیری، باربری و سنگ‌شکنی، افزایش ایمنی معدن، کاهش اثرات نامطلوب (لرزش زمین[1]، انفجار هوا[2]، پرتاب سنگ[3]، عقب‌زدگی[4] و ...)، خردایش مطلوب و در نتیجه، کاهش هزینه‌های کلی و بیشینه کردن ارزش تولید نهایی می‌شود. در این فصل ابتدا به تعریف موضوع پژوهش، ضرورت و هدف از انجام آن پرداخته می‌شود. سپس مروری بر پیشینه تحقیق آورده شده و در پایان خلاصه‌ای در مورد فصول مختلف این پژوهش بیان می‌شود.

۱-۲- بیان مسئله

با وجود پیشرفت‌های مهمی که در زمینه مهندسی انفجار صورت گرفته، اما همچنان بخشی از انرژی مواد منفجره (۲۰- ۱۵ درصد) صرف شکستن سنگ و جابجا کردن توده‌سنگ هدف می‌شود. باقیمانده انرژی به شکل پدیده‌های ناخواسته تخریبی مانند لرزش زمین، انفجار هوا، پرتاب سنگ و عقب‌زدگی هدر می‌رود [۱]. علت اصلی اتلاف انرژی در عملیات انفجاری عدم تطابق و هماهنگی بین پارامترهای طراحی انفجار و خصوصیات ماده منفجره و توده‌سنگ است [۲]. آثار منفی انفجار غیرقابل اجتناب هستند و نمی‌توان آن‌ها را به طور کامل بر طرف کرد، اما قطعاً می‌توان آن‌ها را تا سطح قابل قبولی کاهش داد تا از آسیب رساندن به محیط اطراف جلوگیری شود. در میان این تأثیرات منفی، عقب‌زدگی در معادن روباز از دغدغه‌های مهم طراحان، برنامه‌ریزان و متخصصان محیط زیست است.

---

[1] Ground Vibration
[2] Air Blast
[3] Flyrock
[4] Backbreak

عقب‌زدگی، شکستگی‌های ناخواسته‌ای که در حین انفجار در پشت آخرین ردیف چال‌ها منتشر می‌شوند، تعریف می‌شود (شکل ۱-۱)؛ اگر این گونه شکستگی‌ها در طرفین محل انفجار رخ دهند، کنارزدگی تعبیر می‌شوند [۳].

شکل ۱-۱: پدیده عقب‌زدگی ناشی از عملیات انفجار در معدن سنگ آهن گل‌گهر

۱-۳- ضرورت و هدف از انجام تحقیق

اگر عقب‌زدگی کنترل نشود، زاویه شیب پله‌ها کمتر از مقدار واقعی در نظر گرفته می‌شود و در نتیجه کاهش قابل ملاحظه‌ای به صورت تحمیلی در شیب نهایی کاواک رخ می‌دهد. این امر موجب افزایش باطله‌برداری و نهایتاً رشد هزینه‌های تولید می‌شود.

از دیگر اثرات منفی عقب‌زدگی می‌توان به اختلاط ماده معدنی و باطله در ناحیه تماس در معادن فلزی، اخلال در برنامه‌ریزی تولید به علت افزایش ناخواسته سنگ خرد شده، افزایش هزینه-های بارگیری و باربری، لزوم پایداری و تقویت سنگ باقیمانده، افزایش جریان آب راه یافته به داخل منطقه به علت باز شدن و امتداد یافتگی شکستگی‌ها و درزه‌های توده‌سنگ و همچنین کاهش کیفیت خردایش اشاره نمود [۴].

پیش‌بینی دقیق عقب‌زدگی به طراحی الگوی بهینه آتشکاری و جلوگیری از تأثیرات مضر عقب‌زدگی کمک می‌کند. پارامترهای متعددی بر عقب‌زدگی تأثیر می‌گذارند بنابراین بدیهی است که پدیده مزبور بسیار پیچیده باشد. در این موقعیت‌ها از رویکردهای تجربی استفاده می‌شود که داده‌های سابقه موردی همراه با رویه‌های مبتنی بر آمار را در ارائه معادلات پیش‌بینی برای پدیده‌های پیچیده‌ای چون عقب‌زدگی به کار می‌گیرند.

در این مطالعه، هدف، پیش‌بینی عقب‌زدگی و ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف بر این پدیده در معدن شماره یک سنگ آهن گل‌گهر است. بدین منظور از رویکردهای مختلف رگرسیون، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات[1] (PSO) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)[2] استفاده شده است. جنبه نوآوری تحقیق در استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات است. الگوریتم PSO به دلیل داشتن ماهیت جستجوگر در فضای مسئله و همچنین استفاده از هوش جمعی[3] برای رسیدن به بهترین جواب، قادر خواهد بود در بهینه‌سازی مدل‌ها و دستیابی به پیش‌بینی دقیق‌تر مورد استفاده قرار گیرد.

۱-۴- پیشینه تحقیق

به منظور شناسایی پارامترهایی که ممکن است وقوع عقب‌زدگی را تحت تأثیر قرار دهند، مطالعاتی توسط محققان مختلف صورت گرفته است. مروری بر مقالات مرتبط نشان دهنده تأثیر پارامترهای مختلفی در ایجاد عقب‌زدگی است. این پارامترها را می‌توان در سه گروه طبقه‌بندی کرد: (۱) پارامترهای هندسی طراحی انفجار، (۲) خصوصیات مواد منفجره و (۳) خصوصیات سنگ و ناپیوستگی‌ها.

از گروه اول پارمترهای بارسنگ، گل‌گذاری، خرج ویژه، زمان تأخیر و نسبت سفتی بیشترین تأثیر را بر عقب‌زدگی دارند [۵]. «کونیا» و «والتر[4]» (۱۹۹۱) نشان دادند که نسبت سفتی بالاتر سبب کاهش عقب‌زدگی می‌شود [۶]. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش بارسنگ و گل‌گذاری، عقب‌زدگی افزایش می‌یابد. «بلر» و «آرمسترانگ[5]» (۲۰۰۱) مطالعه تجربی و مدل-سازی مفصلی انجام داده و نشان دادند که لرزش زمین (که گفته می‌شود با عقب‌زدگی ارتباط دارد) مستقل از بارسنگ است [۷]. آن‌ها اثبات کردند که لرزش زمین به درجه شکستگی سنگ اطراف چال انفجاری در زمان آغاز انفجار بستگی دارد. «گیت» و همکاران[6] (۲۰۰۵) دریافتند که زمان تأخیر ناکافی عامل اصلی عقب‌زدگی است [۸]. همچنین آن‌ها اظهار کردند که با افزایش ردیف‌ها، احتمال عقب‌زدگی نیز افزایش می‌یابد. استفاده از الگوی آتشکاری کنترل شده مانند حفاری خطی[7]، پیش شکافی[8]، انفجار بالشتکی و خرج‌گذاری منقطع هوایی در آخرین ردیف چال

[1] Particle Swarm Optimization
[2] Artificial Neural Network
[3] Swarm Intelligence
[4] Konya and Walter
[5] Blair and Armstrong
[6] Gate et al
[7] Line Drilling
[8] Pre-Splitting

انفجاری، روش مؤثری برای کاهش آسیب به دیواره و عقب‌زدگی در معادن روباز است [۵]. «گوستاوسون[1]» (۱۹۷۳)، «لانجفورس و کیهلستروم[2]» (۱۹۷۸)، «هاسترولید[3]» (۱۹۹۹)، «هاگان و بالو[4]» (۲۰۰۰) و «هاسترولید و لو[5]» (۲۰۰۲) روش‌های آتشکاری کنترل شده را برای کاهش عقب-زدگی و آسیب دیواره کاواک مطرح کردند [۹,۱۰,۱۱,۱۲,۱۳]. «جنوار و جتوا[6]» (۲۰۰۰) از خرج‌گذاری منقطع هوایی در معدن روباز زغال‌سنگ استفاده کرده و دریافتند که این روش در تقلیل عقب‌زدگی بسیار مفید است [۱۴]. «آقاجانی بزازی» و همکاران (۲۰۰۶) از آتشکاری کنترلی پیش‌شکافی با قطر چال زیاد برای کاهش عقب‌زدگی در معدن مس سرچشمه استفاده کردند [۱۵]. همچنین «سینگ» و همکاران[7] (۲۰۱۰) از روش آتشکاری کنترل شده در یک معدن روباز هند برای کاهش عقب‌زدگی استفاده کردند [۱۶].

گروه دوم پارامترهای تأثیرگذار، ویژگی‌های مواد منفجره شامل نوع ماده منفجره، دانسیته، قدرت و نسبت جفت‌شدگی[8] (نسبت قطر خرج به قطر چال) است، که همگی کنترل‌پذیر هستند. مواد منفجره مختلف، فشار چال انفجاری متفاوتی را تولید می‌کنند؛ برای مثال، فشار چال انفجاری تولید شده از آنفو و سایر مواد منفجره مجاز چند بار کمتر از دینامیت است. مواد منفجره با دانسیته پایین، فشارهای چال انفجاری کمی تولید می‌کنند؛ بررسی‌های «بهاندری[9]» (۱۹۹۷) نشان داده است که هر چه فشار چال انفجاری کمتر باشد، میزان آسیب ناشی از عقب‌زدگی کمتر است [۱۷]. «ویلسون و موکسون[10]» (۱۹۸۸) با آزمایش‌هایی که انجام دادند، عنوان کردند که نمک و خاک اره سبب کاهش قدرت آنفو می‌شوند [۱۸]. «فیروزادژ» و همکاران[11] (۲۰۰۶) و «عنایت‌اللهی» و «آقاجانی بزازی» (۲۰۱۰) از مخلوط نمک و آنفو به عنوان مواد منفجره برای کنترل آتشکاری و کاهش عقب‌زدگی استفاده کردند [۴,۱۹]. یکی از مؤثرترین پارامترها بر شدت عقب‌زدگی، نسبت جفت‌شدگی است که درجه تماس مستقیم ماده منفجره با دیواره‌های چال انفجاری را نشان می‌دهد. «آیورسون» و همکاران[12] (۲۰۱۰) اخیراً گستره آسیب آتشکاری، ناشی از خرج انفجاری

[1] Gustafsson
[2] Langefors and Kihlstrom
[3] Hustrulid
[4] Hagan and Bulow
[5] Lu
[6] Jhanwar and Jethwa
[7] Singh et al
[8] Coupling Ratio
[9] Bhandari
[10] Wilson and Moxon
[11] Firouzadj et al
[12] Iverson et al

کاملاً جفت‌شده را ارزیابی کرده و نشان دادند که عقب‌زدگی را می‌توان با کاهش جفت‌شدگی خرج کاهش داد [۲۰].

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ و ناپیوستگی‌ها گروه سوم پارامترها را تشکیل می‌دهند که عبارتند از دانسیته، تخلخل، مقاومت فشاری دینامیکی، مقاومت کششی دینامیکی و مقاومت برشی سنگ و جهت‌داری، مقاومت، زبری و خصوصیات ماده پرکننده ناپیوستگی‌ها. تمام این پارامترها کنترل ناپذیر هستند و بر آسیب سنگ ناشی از آتشکاری تأثیر حیاتی دارند.

بهاندری (۱۹۹۷) اظهار داشت که سنگ همگن با خصوصیات مقاومت فشاری و کششی بالا به اندازه سنگ با مقاومت پایین در اطراف چال انفجاری خرج‌گذاری شده، خرد نمی‌شود [۱۷]. ناپیوستگی‌های بسته یا پرشده نسبت به ناپیوستگی‌های باز به عقب‌زدگی کمتری منجر می‌شوند. جهت‌داری ناپیوستگی‌ها تأثیر عمده‌ای بر نتایج آتشکاری برای سینه‌کار نهایی و وجود سنگ معلق در سینه‌کار دارد. «بهاندری» و «بادال[1]» (۱۹۹۴) اظهار داشتند که هنگامی آتشکاری در جهت شیب ناپیوستگی‌ها باشد، عقب‌زدگی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد [۲۱]. «جیا» و همکاران[2] (۱۹۹۸) از مدل‌سازی عددی استفاده کرده و نتیجه گرفتند که درزه‌های با زاویه شیب بزرگ‌تر از زاویه اصطکاک را می‌توان به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل عقب‌زدگی در نظر گرفت [۲۲].

در سال‌های اخیر برخی محققان تلاش کرده‌اند تا مدل‌های پیش‌بینی کننده جدیدی را با استفاده از تحلیل رگرسیون چندگانه (منجزی و همکاران[3]، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲؛ اسماعیلی و همکاران[4]، ۲۰۱۲) و تکنیک‌های هوش مصنوعی[5] (AI) مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (کرمی وهمکارن[6]، ۲۰۰۶؛ منجزی و دهقانی، ۲۰۰۸؛ منجزی و همکاران، ۲۰۱۲؛ اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۲)، نظریه مجموعه فازی[7] (منجزی و همکاران، ۲۰۱۲)، رویکرد عصبی- ژنتیک (منجزی و همکاران، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲)، سیستم استنتاجی عصبی- فازی تطبیقی (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۲) و ماشین‌های بردار پشتیبان[8] (خاندلوال و منجزی[9]، ۲۰۱۳)، ارائه دهند [۲۳,۲۴,۲۵,۲۶,۲۷,۲۸]. «فرامرزی» و

[1] Bhandari and Badal
[2] Jia et al
[3] Monjezi et al
[4] Esmaeili et al
[5] Artificial Intelligence
[6] Karami et al
[7] Fuzzy Set Theory
[8] Support Vector Machines
[9] Khandelwal and Monjezi

همکاران[1] (۲۰۱۲) مدل جدیدی را برای ارزیابی ریسک و پیش‌بینی عقب‌زدگی در آتشکاری پله-ای بر مبنای مفهوم سیستم‌های مهندسی سنگ[2] (RES) ارائه دادند [۲۹]. همچنین «مهمت ساری» و همکاران[3] (۲۰۱۳) اخیراً به بررسی پیش‌بینی عقب‌زدگی با استفاده از رویکرد مدل‌سازی احتمالاتی پرداخته‌اند [۵].

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه به صورت زیر تنظیم شده است:

پس از فصل اول که به مقدمه اختصاص دارد، در فصل دوم، پارامترهای مؤثر بر عقب-زدگی و چگونگی اثرگذاری آن‌ها بر این پدیده شرح داده خواهد شد.

در فصل سوم، به معرفی منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است و در ادامه نحوه‌ی جمع-آوری داده‌ها شرح داده شده است.

در فصل چهارم، پیش‌بینی عقب‌زدگی با استفاده از مدل‌سازی آماری انجام شده و مدل‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است.

در فصل پنجم، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات که اساس این پایان‌نامه است، به تفصیل توضیح داده شده است. سپس نتایج حاصله از الگوریتم توسط روش‌های مختلف عملکرد، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه این فصل از شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز برای پیش‌بینی عقب-زدگی استفاده شده است.

در فصل ششم، نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای کارهای آینده آورده شده است.

[1] Faramarzi et al
[2] Rock Engineering Systems
[3] Mehmet Sari et al