بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی‌تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت

پایان نامه دکتری مهندسی استخراج معدن

بهینه‌سازی محدوده نهای‌ی معادن زیرزمینی در کانسارهای رگه‌ای

نگارش:

سید محمد اسماعیل جلالی

اساتید راهنما:

دکتر مجید عطایی‌پور **دکتر کوروش شهریار**

آبان‌ماه ۱۳۸۵

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

بسمه تعالی

فرم اطلاعات پایان‌نامه
کارشناسی - ارشد و دکترا

تاریخ:
شماره:

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی: **سید محمد اسماعیل جلالی** ◯ دانشجوی آزاد ● بورسیه ◯ معادل

شماره دانشجوئی: **۷۸۱۲۷۹۱۸** دانشکده: **معدن، متالورژی و نفت** رشته تحصیلی: **مهندسی معدن** گروه: **استخراج معدن**

مشخصات استاد راهنما:

نام و نام خانوادگی: **مجید عطائی پور** درجه و رتبه: **دکتری تخصصی - استادیار**

نام و نام خانوادگی: **کوروش شهریار** درجه و رتبه: **دکتری تخصصی - استادیار**

مشخصات استاد مشاور:

نام و نام خانوادگی: --- درجه و رتبه:

نام و نام خانوادگی: --- درجه و رتبه:

عنوان پایان‌نامه به فارسی : بهینه‌سازی محدوده نهایی معادن زیرزمینی در کانسارهای رگه‌ای

عنوان پایان‌نامه به انگلیسی: Optimization of Underground Mines Limits in Vein Type Deposits

نوع پروژه: کارشناسی ◯ ارشد ◯ دکتر ا ● سال تحصیلی: نیمسال اول ۸۵-۸۶

کاربردی ● بنیادی ◯ توسعه‌ای ● نظری ◯

تاریخ شروع : نیمسال دوم ۸۲-۸۳ تاریخ خاتمه : ۸۵/۸/۸ تعداد واحد : ۲۴ سازمان تأمین کننده اعتبار : _____

واژه‌های کلیدی به فارسی: استخراج زیرزمینی، محدوده معدنکاری، بهینه‌سازی، کانسار رگه‌ای

واژه‌های کلیدی به انگلیسی: Underground Mining, Mining Area, Optimization Algorithm, Vein Type Deposits

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات ۱۵۰	تصویر ● جدول ● نمودار ● نقشه ● واژه‌نامه ◯		تعداد مراجع ۳۳	تعداد صفحات ضمائم ___
زبان متن	فارسی ●	انگلیسی ◯	چکیده	فارسی ●	انگلیسی ●
یادداشت					

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه

استاد:

دانشجو:

امضاء اسناد راهنما: **تاریخ: ۸۷/۶/۲۳**

۱ : ارائه به معاونت پژوهشی به همراه یک نسخه الکترونیکی از پایان‌نامه و فرم اطلاعات پایان‌نامه بصورت PDF همراه چاپ چکیده (فارسی انگلیسی) و فرم اطلاعات پایان‌نامه

۲ : ارائه به کتابخانه دانشکده (شامل دو جلد پایان نامه به همراه نسخه الکترونیکی فرم در لوح فشرده طبق نمونه اعلام شده در صفحه خانگی کتابخانه مرکزی)

این رساله به عنوان یک تحقیق بدیع و اصیل به منظور دریافت درجه دکتری تخصصی مهندسی استخراج معدن در دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر تدوین شده و در بر گیرنده مطالبی است که پیش از این در دانشگاه یا موسسه دیگری ارائه نشده است.
بر اساس مطالعات انجام شده و یافته‌هایی که در مدت انجام این تحقیق بدست آمده است، مجموعه مقالات زیر به چاپ رسیده و یا با اخذ پذیرش قطعی در نوبت چاپ قرار دارند:

- جلالی، سید محمد اسماعیل و عطایی‌پور، مجید، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر، *"بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی با الگوریتم برنامه‌ریزی پویا"*، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، سال شانزدهم، شماره ج-۶۲، صفحات ۳۷-۴۸.

- Jalali S. E., Ataee-pour M., 2004, *"A 2D Dynamic Programming Algorithm to Optimise Stope Boundaries"*, 13th symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Rotterdam, Balkema, pp. 45-52.

- جلالی، سید محمد اسماعیل و عطایی‌پور، مجید، ۱۳۸۳، مجموعه مقالات اولین کنفرانس مهندسی ایران، *"بهینه‌سازی محدوده معدنکاری روباز با شیب دیواره کمتر از ۱:۱ با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی پویا"*، انجمن مهندسی معدن ایران، صفحات ۴۲۹-۴۳۹.

چکیده

تا کنون الگوریتم‌های متعددی برای بهینه‌سازی محدوده معدنکاری روباز ارائه شده است؛ اما تدوین چنین الگوریتم‌هایی با هدف بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی، بدلیل پیچیدگی مدل‌سازی اقتصادی محدوده معدنی و تعدد روش‌های استخراج زیرزمینی با موفقیت چشگیری همراه نبوده است. علاوه بر این، فرضیات و ساده‌سازی‌های اعمال شده در معدود الگوریتم‌های موجود باعث حذف بعضی از جنبه‌های ضروری بهینه‌سازی و سلب جامعیت از این الگوریتم‌ها شده و در نتیجه بستر لازم برای کاربرد عملی و فراگیر آنها در جامعه معدنکاران فراهم نیامده است.

در این تحقیق الگوریتم‌های موجود برای بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی از نظر نحوه عملکرد به دو گروه جزگرا و کل‌گرا تقسیم شده‌اند که هر دو گروه بر روی مدل‌های بلوکی اقتصادی با ارزش ثابت اجرا می‌شوند. در الگوریتم‌های جزگرا پهنه‌بندی و یا تقسیم محدوده معدنکاری به طبقات استخراجی قبل از اجرای الگوریتم انجام می‌شود و ارزش اقتصادی هر بلوک در هر طبقه یا پهنه به عنوان یک مقدار ثابت منظور می‌شود. در الگوریتم‌های کل‌گرا ابتدا ارزش اقتصادی هر بلوک واقع در محدوده معدنی بدون در نظر گرفتن اینکه بلوک مورد نظر در چه طبقه یا پهنه‌ای قرار خواهد گرفت، برآورد می‌گردد؛ سپس الگوریتم مورد نظر برای تعیین محدوده بهینه معدنکاری برروی مدل مذکور اجرا می‌شود. طبیعی است در این حالت پس از اجرای الگوریتم، محدوده بهینه بر اساس پارامترهای هندسی و مکانیکی روش استخراج به پهنه‌ها یا طبقات استخراجی تقسیم می‌گردد.

واقعیت این است که ارزش اقتصادی بلوک‌ها در محدوده معدنکاری زیرزمینی، ثابت نیست؛ زیرا از یک سو، ارزش اقتصادی یک بلوک به مشخصات هندسی کارگاه استخراج وابسته است و با تغییر مشخصات هندسی کارگاه استخراج تغییر می‌یابد و از سوی دیگر ارزش اقتصادی هر بلوک تابعی از جانمایی طبقه یا پهنه‌ای است که در آن واقع می‌شود.

در این تحقیق پس از تبیین کاستی‌های الگوریتم‌های موجود، به عنوان اولین گام، یک الگوریتم جزگرا با منطق ریاضی به نام الگوریتم OLIPS با انگیزه شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر مشخصات فنی و هندسی کارگاه‌های استخراج در روش‌های مختلف استخراج زیرزمینی ارائه شده است. الگوریتم OLIPS بر روی نوع ویژه‌ای از مدل بلوکی اقتصادی دو بعدی محدوده استخراج در یک طبقه یا پهنه تعریف می‌شود. برای ساخت این مدل، ابتدا مدل پایه که در واقع همان مدل اقتصادی مرسوم محدوده استخراج است با توجه به اطلاعات فنی و اقتصادی معدنکاری ساخته می‌شود؛ سپس طی دو مرحله با افزودن محدودیت‌های ابعادی کارگاه استخراج در دو جهت عمود بر هم، مدل کارگاه محتمل و مدل کارگاه محتمل یکپارچه که الگوریتم OLIPS بر روی آن اجرا می‌شود، تولید می‌گردد.

در الگوریتم OLIPS تعیین محدوده بهینه استخراج و ارزش اقتصادی متناسب با محدوده مذکور با استفاده از منطق برنامه‌ریزی پویا و از طریق یک تابع تکرار شونده انجام می‌پذیرد. تابع هدف در این الگوریتم، دست‌یابی به حداکثر ارزش اقتصادی بدون در نظر گرفتن ارزش زمانی پول است.

در مرحله بعد، برای عمومیت بخشیدن به موضوع و بهینه‌سازی همزمان تعداد، ابعاد و جانمایی پهنه‌ها یا طبقات، الگوریتم فراگیر بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی (GOUMA) ارئه شده است.

اعمال تغییر بر روی تعداد، ارتفاع و جانمایی پهنه‌ها یا طبقات، در حین بهینه‌سازی محدوده معدنکاری، سبب تغییر ارزش اقتصادی بلوک‌های مدل اقتصادی می‌شود. بنابراین مدل‌های بلوکی اقتصادی با ارزش ثابت، که تاکنون ارائه شده‌اند، نمی‌توانند پاسخگوی نیازهای مطرح شده باشند. برای رفع این کاستی، الگوریتم GOUMA بر مبنای یک مدل بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر، تدوین شده است که در آن ارزش اقتصادی هر بلوک با توجه به مشخصات هندسی و جانمایی پهنه یا طبقه‌ای که بلوک مورد نظر در آن قرار می‌گیرد، تغییر می‌نماید.

الگوریتم GOUMA بر اساس تفکر استفاده از الگوریتم جزگرا بر روی مدل اقتصادی با ارزش متغیر تدوین شده است. در این الگوریتم مساله جانمایی بهینه پهنه‌ها یا طبقات، همزمان با موضوع تعیین محدوده بهینه استخراج در هر پهنه یا طبقه، مورد توجه قرار گرفته است. اعتبارسنجی الگوریتم GOUMA با اجرای آن بر روی مدل‌های عددی مفروض بررسی شده است.

پس از تدوین این الگوریتم، یک برنامه کامپیوتری به نام GOUMA-CP با هدف فراهم کردن امکان اجرای الگوریتم بر روی مدل‌های اقتصادی واقعی و بزرگ مقیاس و نیز زمینه‌سازی برای استفاده گسترده از این الگوریتم، تدوین و با زبان C++ پیاده‌سازی شده است.

در مرحله پایانی این تحقیق، اطلاعات فنی و اقتصادی یک کانسار طلای رگه‌ای واقع در استرالیا کسب و پس از ساخت مدل اقتصادی متناظر با آن، بهینه‌سازی محدوده معدنکاری با استفاده از برنامه کامپیوتری GOUMA-CP انجام شده است.

کلمات کلیدی:

استخراج زیرزمینی، محدوده معدنکاری، بهینه‌سازی، کانسار صفحه‌ای

فهرست مطالب

عناوین شماره صفحه

مقدمه ۱

فصل اول: اصول و مبانی بهینه‌سازی محدوده معدنکاری ٦

۱-۱- مفاهیم و ملزومات اساسی بهینه‌سازی محدوده معدنکاری ۸

۱-۱-۱- مدل اقتصادی محدوده معدنی ۹

۱-۱-۲- الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده معدنکاری ۱۳

۱-۲- مقایسه الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده معدنکاری روباز و زیرزمینی ۱۵

فصل دوم: مروری بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی ۱۹

۲-۱- الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی ۲۰

۲-۱-۱- الگوریتم ریدل ۲۱

۲-۱-۱-۱- منطق الگوریتم ریدل ۲۱

۲-۱-۱-۲- ویژگی‌های الگوریتم ریدل ۲۵

۲-۱-۲- الگوریتم شاخه و حد (BB) ۲٦

۲-۱-۲-۱- منطق الگوریتم شاخه و حد ۲٦

۲-۱-۲-۲- ویژگی‌های الگوریتم شاخه و حد ۳۱

۲-۱-۳- الگوریتم کارگاه شناور (FS) ۳۱

۲-۱-۳-۱- منطق الگوریتم کارگاه شناور ۳۲

۲-۱-۳-۲- ویژگی‌های الگوریتم کارگاه شناور ۳۳

۲-۱-۴- الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی (MVN) ۳۵

۲-۱-۴-۱- منطق الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی ۳۵

۲-۱-۴-۲- ویژگی‌های الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی ۳۹
فصل سوم: روش تحـقیق ٤٠
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق ٤١
۳-۱-۱- پیچیدگی‌های مدل‌سازی اقتصادی محدوده معدنی ٤٢
۳-۱-۲- کاستی‌های الگوریتم‌های موجود ٤٢
۳-۱-۲-۱- کاستی‌های منطقی الگوریتم‌ها ٤٢
۳-۱-۲-۲- کاستی‌های الگوریتم‌ها از نظر نحوه عملکرد ٤٤
۳-۲- مفروضات و ملزومات تحقیق ٤٦
۳-۲-۱- مدل اقتصادی محدوده معدنی ٤٦
۳-۲-۲- شکل هندسی کانسار ٤٧
۳-۲-۳- تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی ٤٨
۳-۳- اهداف تحقیق ٤٩
۳-۴- مراحل انجام تحقیق ٥٠
فصل چهارم: الگوریتم جزگرای بهینه‌سازی محدوده استخراج (OLIPS) ٥٣
۴-۱- اجزای الگوریتم جزگرای بهینه‌سازی محدوده استخراج ٥٤
۴-۱-۱- مدل اقتصادی محدوده استخراج ٥٥
۴-۱-۱-۱- مدل پایه ٥٦
۴-۱-۱-۲- مدل کارگاه محتمل ٥٧
۴-۱-۱-۳- مدل کارگاه محتمل یکپارچه ٦٠
۴-۱-۲- منطق الگوریتم OLIPS ٦٦
۴-۲- مثال عددی ٦٧
۴-۳- ویژگی‌های الگوریتم OLIPS ٨٦
۴-۴- مثال مقایسه‌ای ٨٧

فصل پنجم: الگوریتم فراگیر بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی (GOUMA) ۸۹
۵-۱- مدل‌سازی محدوده معدنکاری ۹۱
۵-۱-۱- مدل درآمدی برجا (IIM) ۹۱
۵-۱-۲- مدل هزینه موقعیت (PCM) ۹۳
۵-۱-۳- مدل هزینه معدنکاری (MCM) ۹٤
۵-۲- مدل بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر (VVEM) ۹۹
۵-۲-۱- طبقه محتمل ۱۰۰
۵-۲-۲- ارزش‌گذاری طبقات محتمل ۱۰۱
۵-۲-۳- محدوده‌های معدنکاری محتمل ۱۰٦
۵-۳- الگوریتم فراگیر بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی (GOUMA) ۱۰۷
۵-۳-۱- بهینه‌سازی طبقات محتمل ۱۰۸
۵-۳-۲- ارزش‌گذاری محدوده‌های معدنکاری محتمل ۱۱۲
۵-۳-۳- محدوده بهینه معدنکاری ۱۱۳
۵-۴- ویژگی‌های الگوریتم GOUMA ۱۱۳
فصل ششم: برنامه کامپیوتری بهینه‌سازی فراگیر محدوده معدنکاری زیرزمینی (GOUMA-CP) ۱۱۵
۶-۱- معرفی برنامه کامپیوتری GOUMA-CP ۱۱۷
۶-۲- ورودی‌های برنامه کامپیوتری GOUMA-CP ۱۱۸
۶-۲-۱- فایل‌های ورودی و خروجی ۱۱۸
۶-۲-۲- مشخصات مدل ۱۲۳
۶-۲-۳- مشخصات هندسی کارگاه‌ها و طبقات استخراجی ۱۲٤
۶-۲-۴- هزینه‌های معدنکاری بلوک ۱۲۵
۶-۳- خروجی‌های برنامه کامپیوتری GOUMA-CP ۱۲٦
۶-۴- ویژگی‌های برنامه کامپیوتری ۱۳۱

۶-۵- مثال واقعی ۱۳۲
۶-۵-۱- مشخصات کانسار ۱۳۲
۶-۵-۲- برآوردهای فنی-اقتصادی ۱۳۳
۶-۵-۳- مدل‌سازی محدوده معدنی ۱۳۵
۶-۵-۳-۱- مدل درآمدی برجا (IIM) ۱۳۶
۶-۵-۳-۲- مدل هزینه موقعیت (PCM) ۱۳۶
۶-۵-۴- اطلاعات ورودی برنامه کامپیوتری GOUMA-CP ۱۳۷
۶-۵-۵- خروجی برنامه کامپیوتری GOUMA-CP ۱۳۷
فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۴۲
۷-۱- نتیجه‌گیری ۱۴۳
۷-۲- پیشنهادات ۱۴۶
مراجع: ۱۴۸

فهرست اشکال

عناوین شماره صفحه

شکل ۱-۱: نمونه‌ای از مدل بلوکی در یک محدوده معدنی ۱۱
شکل ۱-۲: مدل اقتصادی کانسار با توجه به مدل بلوکی شکل ۱-۱ ..... ۱۲
شکل ۱-۳: محدودیت‌های هندسی برای استخراج بلوک B_{ij} با روش‌های معدنکاری روباز و زیرزمینی ۱۶
شکل ۱-۴: چهار نمونه از انتخاب‌های محتمل برای احداث کارگاه و استخراج بلوک B_{ij} ۱۷
شکل ۱-۵: مقایسه ارتباط بین بلوک‌ها در معدنکاری روباز و زیرزمینی ۱۸
شکل ۲-۱: محدوده بهینه معدنکاری در دو مقطع قائم از یک مدل اقتصادی ۲۳
شکل ۲-۲: نمایش بلوک‌های مجاور در روش معدنکاری روباز و تخریب توده‌ای ۲۴
شکل ۲-۳: شکل عمومی تابع خطی شکسته ۲۷
شکل ۲-۴: موقعیت و ارزش خالص هر بلوک در یک سطر از بلوک‌ها ۲۸
شکل ۲-۵: تابع ارزش تجمعی بلوک‌ها برای یک سطر از آنها ۲۸
شکل ۲-۶: مثالی از کاربرد الگوریتم شاخه و حد ۳۱
شکل ۲-۷: پوش‌های خارجی و داخلی برای یک بلوک مشخص در مدل هندسی دو بعدی ۳۳
شکل ۲-۸: هم‌پوشانی الگوریتم‌های مخروط متحرک و کارگاه شناور از نظر هم‌پوشانی بلوک‌ها ۳۵
شکل۲-۹: مفهوم همسایگی با توجه به حداقل ابعاد کارگاه ۳۶
شکل ۲-۱۰: همسایگی‌های محتمل بلوک B4 برای مرتبه‌های همسایگی ۲،۳ و۴ ..... ۳۷
شکل ۳-۱: تفاوت بهینه‌سازی محدوده معدنکاری با کاربرد الگوریتم‌های جزگرا و کل‌گرا ۴۵
شکل ۳-۲: شمای ترتیب انجام مراحل اصلی تحقیق ۵۲
شکل ۴-۱: نمونه‌ای از مدل پایه از یک محدوده استخراجی ۵۶
شکل ۴-۲: موقعیت کارگاه‌های محتمل با حداقل ارتفاع سه بلوک در ستون xام ۵۸

شکل ۴-۳: مدل کارگاه محتمل محدوده استخراج ۵۹
شکل ۴-۴: مدل کارگاه محتمل یکپارچه ٦۵
شکل ۴-۵: مقادیر $P_{(f,c),5}$ به همراه محدوده بهینه استخراج ۷۱
شکل ۴-۶: مقادیر $P_{(f,c),6}$ به همراه محدوده بهینه استخراج ۷۳
شکل ۴-۷: مقادیر $P_{(f,c),7}$ به همراه محدوده بهینه استخراج ۷۵
شکل ۴-۸: مقادیر $P_{(f,c),8}$ به همراه محدوده بهینه استخراج ۷۷
شکل ۴-۹: مقادیر $P_{(f,c),9}$ به همراه محدوده بهینه استخراج ۷۸
شکل ۴-۱۰: مقادیر $P_{(f,c),10}$ به همراه محدوده بهینه استخراج ۸۰
شکل ۴-۱۱: مقادیر $P_{(f,c),11}$ به همراه محدوده بهینه استخراج ۸۲
شکل ۴-۱۲: مقادیر $P_{(f,c),12}$ به همراه محدوده بهینه استخراج ۸٤
شکل ۴-۱۳: محدوده‌های استخراج و ارزش اقتصادی متناظر با آنها با کاربرد الگوریتم **OLIPS** ۸۵
شکل ۴-۱۴: مدل پایه محدوده استخراج ۸۷
شکل ۴-۱۵: مقایسه محدوده‌های بهینه استخراج ۸۸
شکل ۵-۱: یک نمونه از مدل درآمدی برجا ۹۲
شکل ۵-۲: یک نمونه از مدل هزینه موقعیت ۹٤
شکل ۵-۳: شمای کلی اجزای یک طبقه ۹۵
شکل ۵-۴: تاثیر جانمایی طبقات استخراجی بر هزینه معدنکاری هر بلوک ۹٦
شکل ۵-۵: تأثیر ارتفاع طبقه بر هزینه‌های معدنکاری بلوک ۹٦
شکل ۵-۶: هزینه معدنکاری بلوک در سه طبقه با ارتفاع‌های متفاوت ۹۷
شکل ۵-۷: مدل هزینه معدنکاری با احداث طبقاتی به ارتفاع ۶ و۷ بلوک ۹۸
شکل ۵-۸: مدل هزینه معدنکاری با احداث دو طبقه متوالی به ارتفاع ۶ بلوک ۹۸
شکل ۵-۹: مدل بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر ۹۹
شکل ۵-۱۰: تعداد و جانمایی طبقات محتمل ۱۰۰

شکل ۵-۱۱: ارزش اقتصادی بلوک (BEV) در طبقاتی با جانمایی متفاوت و ارتفاع ۵ بلوک ۱۰۳
شکل ۵-۱۲: ارزش اقتصادی بلوک (BEV) در طبقاتی با جانمایی متفاوت و ارتفاع ۶ بلوک ۱۰٤
شکل ۵-۱۳: ارزش اقتصادی بلوک (BEV) در طبقاتی با جانمایی متفاوت و ارتفاع ۷ بلوک ۱۰۵
شکل ۵-۱۴: محدوده‌های معدنکاری محتمل ۱۰٦
شکل ۵-۱۵: محدوده بهینه استخراج در طبقات محتمل با ارتفاع ۵ بلوک و ارزش اقتصادی متناظر با آن ۱۰۹
شکل ۵-۱۶: محدوده بهینه استخراج در طبقات محتمل با ارتفاع ۶ بلوک و ارزش اقتصادی متناظر با آن ۱۱۰
شکل ۵-۱۷: محدوده بهینه استخراج در طبقات محتمل با ارتفاع ۷ بلوک و ارزش اقتصادی متناظر با آن ۱۱۱
شکل ۵-۱۸: ارزش اقتصادی محدوده‌های معدنکاری محتمل ۱۱۲
شکل ۵-۱۹: محدوده بهینه معدنکاری ۱۱۳
شکل ۶-۱: شناسنامه برنامه GOUMA-CP ۱۱۸
شکل ۶-۲: منوی اطلاعات ورودی برنامه کامپیوتری GOUMA-CP ۱۱۹
شکل ۶-۳: اطلاعات ورودی برنامه کامپیوتری GOUMA-CP ۱۲٦
شکل ۶-۴: آرایش ماتریسی محدوده بهینه معدنکاری ۱۳۰
شکل ۶-۵: شمای کلی روش استخراج در معدن طلا ۱۳۳
شکل ۶-۶: شمای کلی توزیع عیار در کانسار طلا ۱۳۵
شکل ۶-۷: منوی اطلاعات ورودی برنامه کامپیوتری GOUMA-CP برای معدن طلا ۱۳۷
شکل ۶-۸: محدوده بهینه معدنکاری در معدن طلا (قسمتی از فایل AU-Output.DAT) ۱۳۹
شکل ۶-۹: ارزش اقتصادی بلوک‌ها و محدوده بهینه معدنکاری در معدن طلا ۱٤۰

فهرست جداول

عناوین شماره صفحه

جدول ۴-۱: مقایسه ویژگی‌های الگوریتم‌های جزگرای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی ۸۶

جدول ۶-۱: یک نمونه از فایل ورودی برنامه GOUMA-CP ۱۲۱

جدول ۶-۲: لیست بلوک‌های واقع در محدوده بهینه معدنکاری ۱۲۸

جدول ۶-۳: طبقات محتمل و ارزش اقتصادی آنها ۱۳۰

جدول ۶-۴: مقایسه شاخص‌های اصلی برنامه‌های کامپیوتری و نرم‌افزارهای موجود ۱۳۱

جدول ۶-۵: مشخصات هندسی کانسار طلا ۱۳۲

جدول ۶-۶ : مشخصات عیاری کانسار طلا ۱۳۳

جدول ۶-۷: مشخصات هندسی روش استخراج ۱۳۴

جدول ۶-۸: هزینه‌های معدنکاری در کارگاه استخراج با ارتفاع متفاوت ۱۳۴

جدول ۶-۹: مشخصات و هزینه‌های فرآیند فرآوری، قیمت فروش محصول نهایی و حقوق دولتی ۱۳۵

جدول ۶-۱۰: طبقات محتمل و ارزش اقتصادی آنها ۱۴۱

مقدمه

فرایند طراحی محدوده معدنکاری زیرزمینی و بهینه‌سازی آن، سه نسل متمایز را پشت سر گذارده و توسعه و تکامل یافته است. نسل اول طراحی که از آن به عنوان طراحی دستی یاد می‌شود تا سال‌های پایانی دهه هفتاد میلادی تنها روش طراحی محدوده معدنکاری زیرزمینی بوده و حتی امروزه نیز در طراحی معادن کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرایند طراحی دستی که بر روی مدل‌های زمین‌شناسی از مقاطع قائم یا افقی کانسار انجام می‌شود همواره با دو مشکل ذاتی و شناخته شده همراه بوده است. نخست اینکه فرایند مذکور بسیار وقت‌گیر و پرحجم است و بطور قابل ملاحظه به تجارب، توانایی و قضاوت مهندسی طراح بستگی دارد؛ بنابراین طبیعی است که در این روش برای تحلیل حساسیت و بازنگری طرح به اعمال تغییرات زیاد یا انجام طراحی مجدد نیاز خواهد بود. دوم این که، جانمایی محدوده معدنکاری معمولاً بدون توجه به موضوع بهینه‌سازی، تنها با اعمال محدودیت‌های فنی و هندسی روش استخراج انجام می‌شود؛ سپس به منظور حصول اطمینان از اقتصادی بودن طرح، برآوردهای اقتصادی بر روی محدوده طراحی شده به عمل می‌آید و در صورت لزوم براساس قضاوت مهندسی طراحان، برخی اصلاحات هندسی برای دست‌یابی به سود بیشتر بر روی محدوده مورد نظر انجام می‌شود.

بدیهی است که با کاربرد روش‌های طراحی نسل اول، عملاً بهینه‌سازی اقتصادی محدوده معدنکاری به ویژه در معادن بزرگ و کانسارهایی با ساختار پیچیده غیرممکن است.

نسل دوم طراحی محدوده معدنکاری زیرزمینی در سال‌های آغازین دهه هشتاد میلادی با ورود فراگیر کامپیوترهای پرسرعت به عرصه محاسبات مهندسی و ابداع روش‌های دستی- کامپیوتری که از آنها با عناوین CAD[1] یا AM[1] نام می‌برند، مطرح گردید[۱]. در این روش‌ها، ذخیره‌سازی و دسته‌بندی

1 - Computer-Aided Design (CAD)

اطلاعات، انجام محاسبات تکراری و وقت‌گیر و نیز تولید و ترسیم نقشه‌ها، مقاطع و طرح‌های مربوط به جانمایی محدوده معدنکاری با کمک کامپیوتر انجام می‌شود. با ظهور این روش‌ها انجام محاسبات وقت‌گیر و خسته‌کننده که معمولاً با خطاهای زیادی همراه است از مسیر طراحی محدوده معدنکاری زیرزمینی حذف و در پی آن دقت و سرعت طراحی افزایش یافت[۲و۳]. با کاربرد روش‌های نسل دوم طراحی، امکان بررسی اقتصادی محدوده معدنکاری و تحلیل حساسیت آن نسبت به تغییر روش استخراج، تغییر پارامترهای هندسی کارگاه استخراج و نیز تغییر پارامترهای اقتصادی محدوده معدنی تنها از طریق تولید طرح‌های معدنکاری متعدد و در نهایت انتخاب بهینه نسبی از میان آنها فراهم گردید[۴]. به هر حال ورود روش‌های دستی-کامپیوتری به عرصه طراحی محدوده معدنکاری زیرزمینی به معنی حل نسبی گروه نخست از مشکلات ذاتی روش‌های طراحی دستی است.

وجه مشترک روش‌های طراحی محدوده معدنکاری زیرزمینی در نسل‌های اول و دوم، این است که هر دو بر روی محدوده‌ها یا مدل‌های زمین شناسی اجرا می‌شوند و از آنجا که مبتنی بر یک الگوریتم خاص برای جستجوی محدوده معدنکاری زیرزمینی نیستند، قادر به بهینه‌سازی محدوده معدنکاری نمی‌باشند.

پس از مشخص شدن نقاط ضعف روش‌های طراحی نسل دوم توجه معدنکاران زیرزمینی در مبحث طراحی محدوده معدن عمدتاً به حل گروه دوم از مشکلات ذاتی روش‌های طراحی نسل اول و دوم یعنی بهینه‌سازی اقتصادی محدوده معدنکاری زیرزمینی معطوف گردید.

در سال‌های پایانی قرن گذشته، نسل سوم روش‌های طراحی با اولویت دادن به نگرش اقتصادی در طراحی محدوده معدنکاری زیرزمینی معرفی گردید. روش‌های طراحی نسل سوم، دو تفاوت اساسی با روش‌های مورد استفاده در نسل‌های پیشین دارند. نخست آنکه روش‌های اخیر مبتنی بر تفکر بهینه‌سازی برروی مدل‌های بلوکی به ویژه از نوع اقتصادی هستند و دیگر آنکه، در این روش‌ها محدوده معدنکاری زیرزمینی بدون دخالت طراح و با کاربرد الگوریتم‌هایی که در آنها هدف بهینه‌سازی اقتصادی محدوده معدنکاری است، تعیین می‌شود. این الگوریتم‌ها زیربناهای لازم را برای تهیه برنامه‌های کامپیوتری یا نرم‌افزارهای طراحی محدوده معدنکاری فراهم می‌آورند.

در دوره تدوین و تکمیل روش‌های طراحی نسل سوم تعداد معدودی الگوریتم، برنامه‌های کامپیوتری و نرم‌افزار برای بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی ارائه شده است؛ اما شمار این الگوریتم‌ها در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده معدنکاری روباز، بسیار اندک و توسعه و تکمیل آنها نسبتاً کند و وابسته به چگونگی توسعه و تکامل الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده معدنکاری روباز بوده است. به طوری که اغلب الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی

---

1 - Automated Mapping (AM)

با الگوبرداری و یا اعمال تصحیحاتی بر روی الگوریتم‌های متناظر در مبحث معدنکاری روباز و با فاصله زمانی نسبتاً کمی تدوین و یا تکمیل شده‌اند. علل عمده تفاوت‌های فوق را می‌توان در سه عامل زیر جستجو کرد:

الف- روش‌های استخراج معادن زیرزمینی بسیار متعدد و از نظر فنی کاملاً متفاوت هستند، بنابراین بسط یک الگوریتم به طوری که پاسخگوی تمام محدودیت‌های فنی روش‌های متعدد استخراج زیرزمینی باشد، بسیار مشکل است.

ب- ساخت مدل اقتصادی محدوده معدنی و محاسبه پارامترهای اقتصادی در محدوده معدنکاری زیرزمینی، که عامل اصلی تصمیم‌گیری در تعیین محدوده بهینه معدنکاری است، به علت وابستگی به عوامل متعددی همچون روش استخراج، موقعیت هندسی و جانمایی کارگاه‌های استخراج با پیچیدگی زیادی همراه است.

ج- تاکنون بستر مناسب برای استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی به نحو مناسب فراهم نشده است. برای استفاده از این الگوریتم‌ها، فرهنگ‌سازی عمومی در بین طراحان معادن زیرزمینی ضروری است؛ زیرا آنها، اغلب با اتکا به تجارب خود تمایل دارند طراحی معدن را با روش‌های دستی و یا دستی‌کامپیوتری و با ترسیم مقاطع قائم و افقی در محدوده کانسار، بدون توجه به اصل "بهینه‌سازی همزمان با طراحی محدوده معدنکاری"، انجام دهند.

با توجه به دلایل فوق هیچ یک از معدود الگوریتم‌هایی که تا کنون با هدف بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی ارائه شده‌اند، دارای جامعیت و گستردگی کاربرد الگوریتم‌های متناظر برای بهینه‌سازی محدوده معدنکاری روباز نیستند. در هر یک از این الگوریتم‌ها صرفاً برخی از محدودیت‌های فنی و هندسی کارگاه استخراج وابسته به یک یا چند روش استخراج خاص برای بهینه‌سازی محدوده استخراج در یک طبقه یا پهنه و یا کل محدوده معدنکاری در نظر گرفته شده که قطعاً برای بیان شرایط واقعی بسیاری از روش‌های استخراج زیرزمینی کافی نیست.

از سوی دیگر الگوریتم‌های موجود برای بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی، بر روی مدل‌های اقتصادی ثابت اجرا می‌شوند، در حالی که در معدنکاری زیرزمینی روند تغییر ارزش اقتصادی بلوک‌ها در یک مدل اقتصادی بلوکی، برخلاف معدنکاری روباز، ثابت نیست و در واقع ارزش اقتصادی هر بلوک تابعی از شماره طبقه یا پهنه‌ای است که در آن واقع می‌شود. طبیعی است که در معدنکاری زیرزمینی با کاهش یا افزایش ابعاد کارگاه استخراج، ممکن است تعداد پهنه‌ها یا طبقات استخراجی تغییر یابد و یک بلوک از یک پهنه یا طبقه به پهنه یا طبقه دیگر منتقل شود. در این شرایط، هزینه‌های معدنکاری بلوک مورد نظر و به دنبال آن ارزش اقتصادی بلوک، بطور غیر قابل اغماضی تغییر می‌نماید.

پیچیدگی‌های مدل‌سازی اقتصادی محدوده معدنی، وجود کاستی‌هایی همچون عدم جامعیت و محدودیت دامنه کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی و بالاخره کمبود برنامه‌های کامپیوتری یا نرم‌افزارهایی که امکان استفاده عملی از الگوریتم‌های موجود را به صورت فراگیر فراهم آورند، زمینه و انگیزه‌های لازم و کافی را برای تدوین الگوریتم‌ها و برنامه‌های کامپیوتری جدید و یا تکمیل و تصحیح الگوریتم‌های موجود رقم زده است.

در این تحقیق با فرض موجود بودن مدل اقتصادی بلوکی مرسوم محدوده معدنی، الگوریتمی مبتنی بر منطق ریاضی ارائه شده و سپس بر اساس آن یک برنامه کامپیوتری تدوین شده است.

برای ارائه این الگوریتم که با کاربرد آن می‌توان تا اندازه قابل قبولی مشکلات الگوریتم‌های موجود را حل نمود، ابتدا مهمترین الگوریتم‌هایی که تاکنون تدوین شده است به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته و نقاط ضعف و قوت آنها بصورت مجزا و مقایسه‌ای مشخص شده است.

در مرحله بعد با مشخص شدن توانایی‌ها و ناکارآمدی‌های الگوریتم‌های موجود، یک الگوریتم جدید به منظور بهینه‌سازی محدوده استخراج در یک طبقه یا پهنه ارائه شده است.در تدوی‌ن ای‌ن الگوریتم مشخصات فنی و هندسی کارگاه‌های استخراج در روش‌های استخراج مختلف، مد نظر قرار گرفته است. ای‌ن الگوری‌تم بر روی نوع ویژه‌ای از مدل بلوکی اقتصادی اجرا می‌شود که در آن بعضی از محدودیت‌های فنی و هندسی روش‌های استخراج زیرزمینی از مجموعه قیود الگوریتم حذف و به مدل اقتصادی محدوده استخراجی انتقال ی‌افته است.

در تدوین این الگوریتم، موضوع ارائه تضمین مناسب برای یافتن محدوده بهینه استخراج در هر طبقه ی‌ا پهنه با استفاده از منطق ریاضی برنامه‌ریزی پویا مورد توجه قرار گرفته و با اجرا بر روی چند مدل مفروض عددی اعتبارسنجی شده است.

در گام بعدی، با ارائه یک روش جدید برای مدل‌سازی اقتصادی محدوده معدنی که در آن ارزش اقتصادی بلوک‌ها بر خلاف مدل‌های پیشین متغیر است، یک الگوریتم فراگیر ارائه شده است. در الگوریتم فراگیر، مساله جانمایی بهینه طبقات یا پهنه‌ها همزمان با موضوع تعیین محدوده بهینه استخراج در هر طبقه یا پهنه مورد توجه قرار گرفته است. اعتبارسنجی الگوریتم فراگیر نیز با اجرای آن بر روی مدل‌های عددی مفروض بررسی شده است.

پس از تدوین الگوریتم فراگیر، با هدف فراهم کردن امکان اجرای الگوریتم بر روی مدل‌های اقتصادی واقعی و بزرگ مقیاس و نیز زمینه‌سازی برای استفاده گسترده از الگوریتم جدید، یک برنامه کامپیوتری تدوین و با زبان C++ پیاده‌سازی شده است.

در مرحله پایانی تحقیق، اطلاعات فنی و اقتصادی یک معدن طلای رگه‌ای کسب و پس ساخت مدل اقتصادی متناظر با آن، بهینه‌سازی محدوده نهایی معدن مورد نظر با برنامه کامپیوتری تدوین شده، انجام شده است.

فصل اول

اصول و مبانی بهینه‌سازی محدوده معدنکاری