

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

مدل سازی و بهینه سازی عیارهای حد در معدن شماره ۱ گل گهر

دانشجو : سجاد محمدی

اساتید راهنما :

دکتر محمد عطایی

دکتر رضا خالوکا کایی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۲



دانشگاه علمی کاربردی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:

تاریخ: ۱۳۹۲/۶/۲۳

ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند منعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سجاد محمدی رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان مدل سازی و بهینه سازی عیارهای حد در معدن شماره ۱ گل گهر که در تاریخ ۱۳۹۲/۶/۲۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> قبول (با درجه : خراب - امتیاز (۱۸ تا ۱۹))	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input type="checkbox"/> مردود
--	------------------------------------	--------------------------------

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۳- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

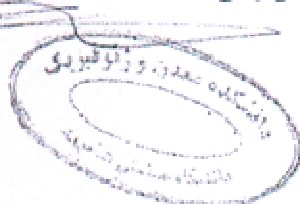
۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر محمد عطایی	استاد	
۲- استاد راهنما	دکتر رضا خالو کاکایی	استاد	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر فرهنگ سرشکی	دانشیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر محمد کارآموزیان	استادیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر بهزاد تخم چی	استادیار	

امضاء

رئیس دانشکده: دکتر رضا قوامی ریایی



تقدیم به پدر و مادرم

این دو معلم بزرگوالم که در تمام
عرصه های زندگی با ایثار و
فداکاری ، برای من یآوری
بی چشم داشت بوده اند و همواره بر
کوتاهی و درشتی من ، قلم عفو
کشیده و کریمانه از کنار
غفلت هایم گذشته اند.

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند و سلام و درود بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، آنان که وجودمان وامدار وجودشان است.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، والاتر از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی ایشان با زبان قاصر و دست ناتوان چیزی بنگارم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می‌کند و سلامت امانت‌هایی که به دستش سپرده‌اند را تضمین، بر حسب وظیفه و از باب « من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ»، از استاد فرهیخته جناب آقای **پروفسور محمد عطایی** که با وجود مشغله‌های فراوان در کمال سعه‌صدر راهنمای این حقیر بوده‌اند و همچنین استاد بزرگوار جناب آقای **پروفسور رضا خالوکاکایی** که با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه دریغ ننمودند، سپاسگزاری نموده و سلامتی ایشان را آرزومندم.

از شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر سیرجان و پژوهشکده‌ی سنگ آهن و فولاد گل‌گهر که پژوهش حاضر با حمایت مستقیم آن‌ها به انجام رسیده است کمال تشکر را دارم. همچنین از مشاور صنعتی پروژه، جناب آقای مهندس اسحاق پورزمانی سرپرست دفتر نظارت طراحی معدن گل‌گهر صمیمانه سپاسگزارم که بی‌شک انجام این تحقیق بدون راهنمایی‌ها و تلاش‌های مجدانه‌ی ایشان امکان‌پذیر نبوده است. در پایان لازم می‌دانم از جناب آقای مهندس مسعود عسکری در پژوهشکده سنگ آهن و فولاد گل‌گهر و جناب آقای مهندس رامین رفیعی برای حمایت‌های بی‌دریغشان تشکر نمایم.

تعهد نامه

اینجانب سجاد محمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل‌سازی و بهینه‌سازی عیارهای حد در معدن شماره ۱ گل‌گهر تحت راهنمایی دکتر محمد عطایی و دکتر رضا خالوکاکی متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه 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 پایان نامه 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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 .

فهرست مطالب

فصل اول - مقدمه و کلیات	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ ضرورت و اهداف تحقیق	۴
۳-۱ مجتمع سنگ آهن گل گهر سیرجان	۴
۴-۱ مشخصات کاواک نهایی معدن شماره ۱	۶
۵-۱ ساختار پایان نامه	۸
فصل دوم - مفاهیم و پیشینه‌ی تحقیق	۱۰
۱-۲ عیار حد	۱۱
۲-۲ بهینه‌سازی	۱۲
۳-۲ بهینه‌سازی عیار حد	۱۳
۴-۲ سابقه‌ی علمی موضوع در کانسارهای یک فلزی	۱۴
۵-۲ سابقه‌ی علمی موضوع در کانسارهای چند فلزی	۱۷
فصل سوم - تابع هدف کلی بهینه‌سازی عیار حد و روش‌های حل آن	۱۹
۱-۳ مقدمه	۲۰
۲-۳ مدل سازی مراحل معدن کاری	۲۰
۳-۳ تعریف معادلات اساسی مدل	۲۳
۴-۳ تابع هدف برای تعیین عیار حد با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی (NPV)	۲۴
۳-۴-۱ تابع هدف در صورتی که میزان استخراج از معدن محدودیت تعیین کننده باشد	۲۶
۳-۴-۲ تابع هدف در صورتی که کارخانه‌ی تغلیظ محدودیت تعیین کننده باشد	۲۷
۳-۴-۳ تابع هدف در صورتی که کارخانه‌ی تصفیه محدودیت تعیین کننده باشد	۲۷
۵-۳ تابع هدف در حالت کلی	۲۷
۶-۳ روش‌های بهینه یابی تابع هدف در بهینه‌سازی عیارهای حد	۲۸
۳-۶-۱ الگوریتم لین	۳۰
۳-۶-۲ روش حذفی جستجوی نسبت طلایی	۳۶
۳-۶-۳ الگوریتم فرا ابتکاری رقابت استعماری	۴۱
۳-۶-۴ شکل دهی امپراتوری‌های اولیه	۴۴

۴۷	..... ۲-۳-۶-۳ مدل سازی سیاست جذب: حرکت مستعمره ها به سمت امپریالیست
۴۹	..... ۳-۳-۶-۳ جابجایی موقعیت مستعمره و امپریالیست
۵۱	..... ۴-۳-۶-۳ قدرت کل یک امپراتوری
۵۱	..... ۵-۳-۶-۳ رقابت استعماری
۵۴	..... ۶-۳-۶-۳ سقوط امپراتوری های ضعیف
۵۵	..... ۷-۳-۶-۳ همگرایی
۵۸	فصل چهارم- توسعه‌ی مدل مطابق معدن شماره ۱ گل گهر
۵۹	..... ۱-۴ مقدمه
۵۹	..... ۲-۴ مدل سازی و تعریف روابط اساسی
۶۵	..... ۳-۴ تعیین تابع هدف بهینه سازی عیار حد معدن شماره ۱ گل گهر
۶۵	..... ۱-۳-۴ تابع هدف در صورتی که میزان استخراج از معدن محدودیت تعیین کننده باشد
۶۶	..... ۲-۳-۴ تابع هدف در صورتی که کارخانه‌ی تغلیظ محدودیت تعیین کننده باشد
۶۶	..... ۳-۳-۴ تابع هدف در صورتی که کارخانه‌ی گندله سازی محدودیت تعیین کننده باشد
۶۶	..... ۴-۳-۴ تابع هدف در حالت کلی
۶۸	فصل پنجم- بهینه سازی تابع هدف با استفاده از روش جستجوی نسبت طلایی
۶۹	..... ۱-۵ مقدمه
۶۹	..... ۲-۵ روش حل مساله
۷۰	..... ۳-۵ مراحل تعیین عیارهای حد بهینه با استفاده از برنامه
۶۹	..... ۱-۳-۵ اطلاعات ورودی
۷۲	..... ۲-۳-۵ محاسبات ذخیره
۷۲	..... ۳-۳-۵ فرآیند محاسبات
۷۵	..... ۴-۵ برنامه ریزی تولید
۷۸	فصل ششم- بهینه سازی تابع هدف با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری
۷۹	..... ۱-۶ مقدمه
۸۰	..... ۲-۶ روش حل مساله
۸۳	..... ۳-۶ نتایج بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ICA
۸۴	..... ۴-۶ برنامه ریزی تولید
۸۷	فصل هفتم- نتیجه گیری و پیشنهادها

۸۸	۷- نتیجه گیری
۹۰	۷-۲ پیشنهادها
۹۱	منابع و مراجع
۹۵	پیوست ۱- جزییات محاسباتی الگوریتم رقابت استعماری

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: موقعیت جغرافیایی معدن سنگ آهن گل‌گهر ۵
- شکل ۲-۱: نمایی از مجتمع سنگ آهن گل‌گهر ۵
- شکل ۳-۱: موقعیت نسبی ذخایر شش‌گانه‌ی مجتمع گل‌گهر ۶
- شکل ۴-۱: محدوده نهایی معدن شماره ۱ گل‌گهر سیرجان ۷
- شکل ۱-۳: مدل مورد استفاده برای تعیین عیار حد بهینه ذخایر یک فلزی ۲۱
- شکل ۲-۳: نمایش نموداری محاسبه‌ی ارزش خالص فعلی ۲۵
- شکل ۳-۳: نمونه‌ای از منحنی‌های v_e و v_r ، v_c ، v_m ۲۸
- شکل ۴-۳: عیارهای حد متعادل‌کننده‌ی بین ظرفیت واحدهای معدن، کارخانه تغلیظ و واحد تصفیه ۳۱
- شکل ۵-۳: روند نمای تعیین عیارهای حد بهینه ۳۵
- شکل ۶-۳: بنای مستطیل شکل با ابعاد b و d ۳۸
- شکل ۷-۳: نحوه اعمال روش جستجوی نسبت طلایی برای توابع یک متغیره ۳۹
- شکل ۸-۳: روندنمای روش جستجوی نسبت طلایی برای یافتن عیار حد بهینه ۴۰
- شکل ۹-۳: چگونگی شکل‌گیری امپراتوری‌های اولیه ۴۷
- شکل ۱۰-۳: شمای کلی حرکت مستعمرات به سمت امپریالیست ۴۸
- شکل ۱۱-۳: حرکت واقعی مستعمرات به سمت امپریالیست ۴۹
- شکل ۱۲-۳: جابجایی موقعیت استعمارگر و مستعمره در الگوریتم ۵۰
- شکل ۱۳-۳: شمای کلی رقابت استعماری: تصاحب مستعمرات امپراتوری‌های دیگر با احتمال بالاتر توسط امپراتوری‌های بزرگ‌تر ۵۲
- شکل ۱۴-۳: سقوط امپراتوری ضعیف؛ امپراتوری شماره ۴ ۵۵
- شکل ۱۵-۳: شمای کلی الگوریتم رقابت استعماری ۵۶
- شکل ۱۶-۳: روند نمای الگوریتم رقابت استعماری ۵۷
- شکل ۱-۴: نمودار روند عملیاتی معدن شماره ۱ گل‌گهر ۶۰
- شکل ۱-۵: منحنی تناژ-عیار حد و عیار متوسط-عیار حد پوش‌بک طرح ۵ ساله‌ی استخراجی کانسار ۷۲
- شکل ۲-۵: روند تغییرات عیار حد و ارزش خالص فعلی در طول سال‌های طرح ۷۵
- شکل ۱-۶: میانگین و کمینه هزینه‌ی امپراتوری‌ها در هر تکرار برای سال اول طرح ۸۱
- شکل ۲-۶: میانگین و کمینه هزینه‌ی امپراتوری‌ها در هر تکرار برای سال دوم طرح ۸۱
- شکل ۳-۶: میانگین و کمینه هزینه‌ی امپراتوری‌ها در هر تکرار برای سال سوم طرح ۸۲
- شکل ۴-۶: میانگین و کمینه هزینه‌ی امپراتوری‌ها در هر تکرار برای سال چهارم طرح ۸۲
- شکل ۵-۶: میانگین و کمینه هزینه‌ی امپراتوری‌ها در هر تکرار برای سال پنجم طرح ۸۳
- شکل ۶-۶: روند تغییرات عیار حد و ارزش خالص فعلی در طول سال‌های طرح ۸۴

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: نمونه‌ای از طبقه‌بندی روش‌های بهینه‌سازی ۱۲
- جدول ۲-۲: تلاش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی بهینه‌سازی عیار حد در کانسارهای یک فلزی ۱۴
- جدول ۳-۲: تلاش‌های انجام شده در بهینه‌سازی عیار حد در کانسارهای چند فلزی ۱۷
- جدول ۱-۳: متغیرهای به کار رفته در مدل بهینه‌سازی عیار حد کانسارهای یک فلزی ۲۱
- جدول ۱-۴: متغیرهای به کار رفته در مدل ۶۱
- جدول ۲-۴: حداکثر ظرفیت واحدهای مختلف ۶۲
- جدول ۱-۵: توزیع عیار - تناژ پوش‌بک طرح ۵ ساله‌ی اخیر معدن ۷۰
- جدول ۲-۵: مجموع ماده‌ی معدنی، باطله و کل مواد موجود در پوش‌بک طرح ۷۱
- جدول ۳-۵: پارامترهای اقتصادی و عملیاتی معدن شماره ۱ بر اساس ابتدای سال ۱۳۹۱ ۷۱
- جدول ۴-۵: مقادیر تناژ ماده‌ی معدنی، باطله و عیار متوسط بر اساس عیار حد ۷۲
- جدول ۵-۵: مقادیر تناژ ماده‌ی معدنی، تناژ باطله و عیار متوسط ماده‌ی معدنی برای اولین دو نقطه‌ی آزمایشی ۷۳
- جدول ۶-۵: مقدار سه تابع v_m ، v_c ، v_p و v_e در اولین دو نقطه‌ی آزمایشی ۷۳
- جدول ۷-۵: نتیجه‌ی بهینه‌سازی عیار حد معدن شماره ۱ گل‌گهر با روش حذفی جستجوی نسبت طلایی ۷۴
- جدول ۸-۵: مقدار استخراج سالیانه از بازه‌های عیاری در هر سال (تن) ۷۶
- جدول ۹-۵: مقادیر استخراجی باطله و ماده‌ی معدنی و نسبت باطله برداری ۷۶
- جدول ۱۰-۵: تناژ ارسالی به انباشت‌گاه مواد کم عیار (تن) ۷۷
- جدول ۱-۶: مقدار پارامترهای الگوریتم ۸۰
- جدول ۲-۶: نتیجه‌ی بهینه‌سازی عیار حد معدن شماره ۱ گل‌گهر با روش فرا ابتکاری رقابت استعماری ۸۳
- جدول ۳-۶: مقدار استخراج از بازه‌های عیاری در هر سال (تن) ۸۴
- جدول ۴-۶: مقادیر استخراجی باطله و ماده‌ی معدنی و نسبت باطله برداری ۸۴
- جدول ۵-۶: تناژ ارسالی به انباشت‌گاه مواد کم عیار (تن) ۸۵

چکیده

تعیین عیار حد بهینه در طول سال‌های عمر معدن از مسایل مهم و بنیادی در اقتصاد و طراحی معادن است. در دهه‌های اخیر این عملیات بهینه‌سازی با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اهمیت اقتصادی این پارامتر و طبیعت پویای آن، هدف از تحقیق حاضر محاسبه‌ی عیارهای حد بهینه‌ی معدن سنگ آهن شماره ۱ شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر سیرجان در پوش‌یک استخراجی طرح ۵ ساله‌ی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵ بوده است. در جامع‌ترین نظریه‌ی موجود در این که توسط لین ارائه شده تنها فروش یک محصول نهایی در نظر گرفته شده است. از این رو و با توجه به قابلیت فروش سه محصول (محصول دانه‌بندی شده، کنسانتره و گندله) در این معدن، در ابتدا مدل بهینه‌سازی بر اساس روند عملیاتی معدن، توسعه داده شده است. سپس با تعیین تابع هدف مساله، روش حذفی جستجوی نسبت طلایی و روش فرا ابتکاری رقابت استعماری برای حل آن به کار رفته است. برای این منظور از برنامه‌ی توسعه داده شده در نرم‌افزار MATLAB R2011a بهره گرفته شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار ارزش خالص فعلی با روش جستجوی نسبت طلایی برابر با ۱۸۴۸۶/۷۴ میلیارد ریال و با الگوریتم رقابت استعماری برابر با ۱۸۱۴۲/۴۹ میلیارد ریال حاصل گردیده است. برای حل مساله تعداد تکرارها در روش جستجوی نسبت طلایی برای هر ۵ سال برابر با ۱۸ و در روش رقابت استعماری کم‌تر از ۱۸ بوده است. هم چنین فرآیند محاسباتی و برنامه‌نویسی جستجوی نسبت طلایی بسیار ساده‌تر از الگوریتم رقابت استعماری بوده است. بنابراین در حالت کلی، روش جستجوی نسبت طلایی برای حل مساله در این پژوهش از اولویت بالاتری برخوردار بوده است. در انتها با بهره‌گیری از نتایج این بهینه‌سازی، برنامه ریزی تولید در معدن برای طرح ۵ ساله انجام گرفته است. در این برنامه با مد نظر قرار دادن قابلیت انباشت مواد کم عیار می‌توان ۱ سال مازاد بر سال‌های طرح، کارخانه‌ی تغلیظ را با حداکثر ظرفیت از طریق انباشت‌گاه خوراک دهی کرد.

کلمات کلیدی:

عیار حد، عیارهای حد بهینه، بهینه‌سازی، ارزش خالص فعلی (NPV)، روش جستجوی نسبت طلایی، الگوریتم رقابت استعماری (ICA)، معدن سنگ آهن گل‌گهر

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه

عیار حد که در معنای ساده مرز بین ماده‌ی معدنی و باطله را مشخص می‌کند، مقیاسی زمین‌شناسی و فنی است که توسط پارامترهای مختلفی مانند خصوصیات زمین‌شناسی، محدودیت‌های فنی عملیات، هزینه‌ها و قیمت ماده‌ی معدنی تعیین می‌شود. ماده‌ی معدنی دارای عیاری برابر و یا بزرگ‌تر از عیار حد است و مواد با عیار کم‌تر از عیار حد را باطله می‌نامند. این عیار همچنین تعیین‌کننده‌ی نحوه‌ی فرآوری ماده‌ی معدنی است و برجا گذاشتن باطله در محل و یا انتقال به انباشت‌گاه باطله را مشخص می‌کند. علت آن که از عیار حد به عنوان یک پارامتر مهم یاد می‌شود تعدد پارامترهای وابسته به آن است. بنابراین تعیین عیار حد مواد معدنی در دوره‌های مختلف طول عمر معدن مساله‌ای بنیادی در برنامه‌ریزی معدن و از مشکل‌ترین مسایل در عملیات معدن‌کاری است.

به دلیل این که در محاسبه‌ی عیار حد سربه‌سری که بر اساس تحلیل‌های سربه‌سری محاسبه می‌شود، ارزش زمانی پول، توزیع عیار کانسار و ظرفیت‌های واحدهای مختلف در نظر گرفته نمی‌شود، از سال ۱۹۵۴ مفهوم جدیدی در ادبیات فنی معدن‌کاری با عنوان بهینه‌سازی عیار حد به وجود آمده است. جامع‌ترین روش برای تعیین عیار حد بهینه کانسارهای یک فلزی با هدف بیشینه کردن ارزش

خالص فعلی توسط لین^۱ ارائه شده است. پس از ارایه‌ی نظریه‌ی لین برای محاسبه‌ی عیار حد بهینه، نظریه‌ی جامع دیگری ارائه نشده است و کارهای پژوهشگران دیگر معطوف به دو موضوع استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی بر مبنای اصول این الگوریتم و یا بررسی نقش عوامل مختلف در این مساله، بر اساس نظریه‌ی لین بوده است.

با توجه به اهمیت بهینه‌سازی عیار حد و طبیعت پویای آن به دلیل تغییرات سالانه‌ی ارقام هزینه‌ای، نیاز است تا در طول عمر معدن همواره این فرآیند بهینه‌سازی انجام و اصلاح شود. به این دلیل هدف از تحقیق پیش رو تعیین عیارهای حد بهینه‌ی ذخیره‌ی شماره‌ی ۱ شرکت معدنی و صنعتی گل گهر سیرجان در پوش‌بک طرح ۵ ساله‌ی در حال اجرا (۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵) است.

برای این منظور در ابتدا روند عملیاتی معدن مدل‌سازی شده و با استفاده از آن روابط هزینه، درآمد و سود به دست آمده و بر اساس آن تابع هدف مساله تعریف و تعیین شده است. در مرحله‌ی بعد برای بهینه‌سازی تابع هدف مساله، روش حذفی جستجوی نسبت طلایی^۲ و الگوریتم هوشمند رقابت استعماری^۳ مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر عیارهای حد بهینه، تولید واحدهای مختلف معدن، سود حاصل از عملیات و ارزش خالص فعلی برای این طرح محاسبه خواهد شد. برای این منظور، با توجه به پیچیدگی محاسبات، برای هر روش برنامه‌ای در نرم‌افزار MATLAB R2011a توسعه داده شده است. با استفاده از این برنامه‌ها عیارهای حد بهینه برای هر سال تعیین و بر اساس آن مقدار تولید واحدهای مختلف، سود و ارزش خالص فعلی حاصل از عملیات محاسبه شده است. در مرحله‌ی آخر با توجه به نتایج هر روش، برنامه‌ی تولید معدن ارائه شده است.

1 - Keneth F. Lane

2 - Golden Section Search Method

3 - Imperialist Competitive Algorithm

۲-۱ ضرورت و اهداف تحقیق

از آن جا که شرکت صنعتی و معدنی گل گهر سیرجان در راستای اهداف بلند مدت خود قصد دارد تا با توسعه‌ی افقی و عمودی صنعت سنگ آهن و فولاد، منطقه‌ی گل گهر را ظرف برنامه‌ی پنجم توسعه با سهم ۴۰ درصدی به قطب فولاد کشور تبدیل نماید، لذا پژوهشکده‌ی سنگ آهن و فولاد گل گهر به عنوان متولی امر پژوهش در این مجموعه، اقدام به تعیین اولویت‌های پژوهشی شرکت به عنوان پایان نامه‌های دوره کارشناسی ارشد نموده است.

در حال حاضر سال‌های زیادی از تهیه‌ی طرح نهایی آنومالی شماره‌ی ۱ مجموعه معادن گل گهر می‌گذرد و به همین دلیل اکثر پارامترهای مورد استناد در طراحی نهایی معدن تغییر یافته است. از این رو و با توجه به طبیعت پویای عیار حد و اهمیت اقتصادی بهینه‌سازی آن برای کل مجموعه و با عنایت به تعریف طرح بهینه‌ی معدن با اتمام اکتشافات تکمیلی و عمقی این ذخیره، بهینه‌سازی عیار حد این ذخیره به عنوان یکی از اولویت‌های پژوهشی سال ۱۳۹۱ مجموعه مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین هدف از تحقیق حاضر که در پژوهشکده‌ی سنگ آهن و فولاد شرکت معدنی و صنعتی گل گهر و با مشارکت بخش مدیریت امور معادن- دفتر نظارت طراحی انجام شده است، تعیین عیارهای حد بهینه‌ی ذخیره‌ی شماره ۱ مجتمع برای پوش‌بک استخراجی طرح ۵ ساله‌ی اخیر (۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵) با هدف پیشینه‌کردن ارزش فعلی خالص و گشودن راهی برای طراحی‌های آینده است.

۳-۱ مجتمع سنگ آهن گل گهر سیرجان

مجموعه معادن گل گهر که از جمله ذخایر عظیم، ارزشمند و استراتژیک ایران است، در استان کرمان و به طور تقریبی در مرکز مثلثی به رؤس کرمان، شیراز و بندر عباس واقع شده است. نزدیک‌ترین شهر به این معادن شهرستان سیرجان می‌باشد که در ۵۵ کیلومتری شمال شرقی آن قرار دارد (عطایی، ۱۳۷۷). شکل ۱-۱ موقعیت جغرافیایی معدن و شکل ۲-۱ نمایی از مجتمع سنگ آهن گل گهر سیرجان را نشان می‌دهد.



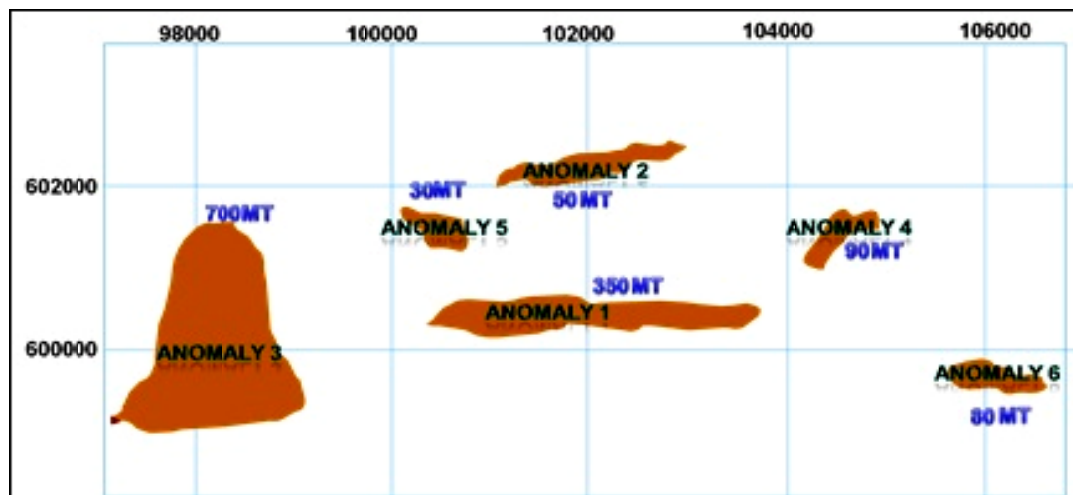
شکل ۱-۱: موقعیت جغرافیایی معدن سنگ آهن گل گهر (حکمت، ۱۳۸۲)



شکل ۱-۲: نمایی از مجتمع سنگ آهن گل گهر (بهادری فرد، ۱۳۹۰)

این مجموعه معادن دارای شش ذخیره است که با اعداد ۱ تا ۶ مشخص می‌شوند. موقعیت نسبی این ذخایر در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. سنگ آهن در این معدن بر اساس مقدار بازیابی وزن مغناطیسی^۱ (MWT)، عیار گوگرد و عیار آهن به سه نوع مگنتیت بالایی^۲، اکسید^۳ و مگنتیت پایینی^۴ تقسیم می‌شود.

- 1- Magnetic Weight Recovery
- 2- Top magnetite
- 3- Oxide Zone
- 4- Bottom magnetite

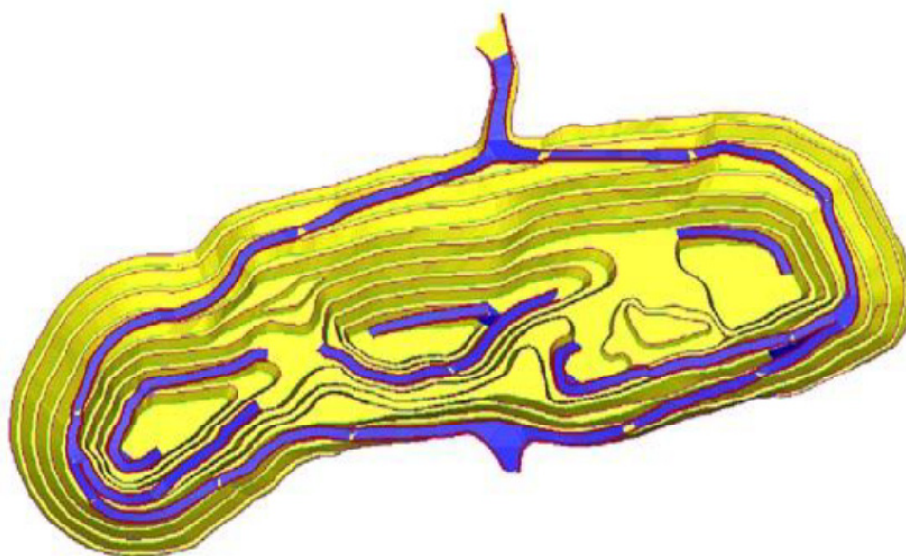
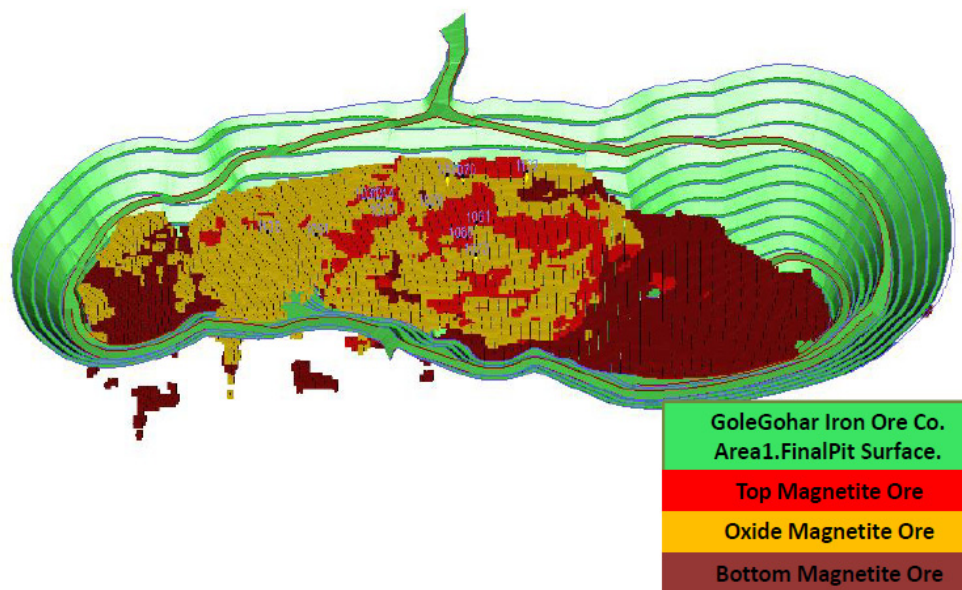


شکل ۱-۳: موقعیت نسبی ذخایر شش گانه‌ی مجتمع گل‌گهر (مدیریت امور معدن شرکت سنگ آهن گل‌گهر، ۱۳۹۰) ذخیره‌ی شماره ۱ به عنوان اولویت اول برای انجام مطالعات گسترده‌ی اکتشافی، طراحی، آماده‌سازی و استخراج قرار گرفته است. دلیل این امر نتایج اکتشافی مقدماتی امیدوارکننده‌تر و رخنمون ماده‌ی معدنی در سطح زمین بوده است (حمزه نژادی، ۱۳۸۶).

بر اساس حفاری‌های اکتشافی انجام شده (تا کنون حفر ۲۵۲ چاه اکتشافی به متر ۳۲۶۵۴ متر) شکل کلی ذخیره‌ی شماره ۱ تقریباً به صورت یک عدسی کشیده با امتداد شمال غرب- جنوب شرق است (مدیریت امور معدن شرکت سنگ آهن گل‌گهر، ۱۳۹۰).

۴-۱ مشخصات کاواک نهایی معدن شماره ۱

کاواک نهایی معدن دارای ۲۲۰۰ متر طول و ۷۵۰ متر عرض می‌باشد و عمق نهایی آن به ۲۶۰ متر می‌رسد. ارتفاع پله‌ها ۱۵ متر و شیب کلی دیواره‌های معدن بین ۳۸ تا ۴۵ درجه است. رمپ‌های دسترسی به معدن با شیب ۸٪ و عرض ۲۵ متر طراحی شده‌اند. عرض پله‌های ایمنی ۱۰ متر بوده و به ازای هر دو پله (۳۰ متر) یک پله ایمنی در دیواره نهایی باقی خواهد ماند. در شکل ۴-۱ دو تصویر از محدوده نهایی معدن شماره ۱ نشان داده شده است (مدیریت امور معدن شرکت سنگ آهن گل‌گهر، ۱۳۸۰).



شکل ۱-۴: محدوده نهایی معدن شماره ۱ گل گهر سیرجان (مدیریت امور معدن شرکت سنگ آهن گل گهر، ۱۳۸۰)

عملیات استخراج معدن بر اساس طرح‌های دراز مدت، میان مدت و کوتاه مدت تنظیم می‌شود. طرح‌های دراز مدت شامل طرح نهایی معدن، طرح‌های ۵ ساله و سالیانه می‌باشد. در طرح‌های ۵ ساله مواردی نظیر محاسبه‌ی ماشین آلات مورد نیاز، برآورد مواد منفجره لازم، وضعیت آب‌های زیرزمینی و طرح زهکشی، نحوه پیشروی دیوهای خاک و باطله و ... مد نظر قرار می‌گیرد (حمزه نژادی، ۱۳۸۶). در حال حاضر طرح و برنامه‌ی پنج ساله‌ی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵ که توسط شرکت مشاور معدن (کوشا معدن) تهیه شده است به عنوان طرح استخراجی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵-۱ ساختار پایان نامه

پژوهش حاضر در ۷ فصل تدوین شده است:

فصل اول: در قسمت اول با بیان مقدمه‌ای به تعیین ضرورت و اهداف تحقیق پرداخته شده است. پس از آن با معرفی مجتمع سنگ آهن گل‌گهر سیرجان، شرایط و پارامترهای طراحی پیت ذخیره‌ی شماره‌ی ۱ این معدن آورده شده است.

فصل دوم: در ابتدا مفاهیم عیار حد، بهینه‌سازی و بهینه‌سازی عیار حد بیان شده و پس از آن سابقه‌ی علمی موضوع در ذخایر یک و چند فلزی آورده شده است.

فصل سوم: برای یک حالت کلی و ساده شده، مدل‌سازی معدن و روابط اساسی آن آورده شده که بر اساس آن‌ها تابع هدف کلی بهینه‌سازی عیار حد تعیین می‌شود. سپس الگوریتم لین به عنوان جامع‌ترین نظریه تشریح شده است. نظر به اینکه در پژوهش حاضر برای بهینه‌سازی از روش حذفی جستجوی طلایی و الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده، در ادامه‌ی فصل این دو روش توضیح داده شده‌اند.

فصل چهارم: بر اساس نحوه‌ی عملیات معدن ۱ روند عملیاتی معدن مدل شده و روابط اساسی آن حاصل شده است. سپس با استفاده از روابط اساسی، تابع هدف بهینه‌سازی عیار حد به دست آمده است.

فصل پنجم: به دلیل سهولت و زمان سریع‌تر دستیابی به نتیجه در روش نسبت طلایی، از این روش حذفی برای حل مساله با استفاده از برنامه‌ی تهیه شده در نرم‌افزار MATLAB R2011a مورد استفاده قرار گرفته است.

فصل ششم: با توجه به قابلیت‌های معرفی شده‌ی الگوریتم رقابت استعماری در حل مسایل بهینه‌سازی، این روش برای حل مساله استفاده شده است. برای این منظور نیز برنامه‌ی توسعه داده شده در نرم‌افزار MATLAB R2011a بکار گرفته شده است.

فصل هفتم: با ارزیابی نتایج به دست آمده، به مقایسه‌ی آن‌ها پرداخته شده است. در انتها پیشنهادهایی بر مبنای این پژوهش برای معدن و تحقیقات آتی عنوان شده است.

فصل دوم

مفاهیم و پیشینه تحقیق

۱-۲ عیار حد

عیار حد که بی گمان از مهم‌ترین پارامترهای طراحی معادن می‌باشد، مبنای تفکیک ماده به ماده‌ی معدنی و باطله است. مواد با عیار بزرگ‌تر یا مساوی عیار حد ماده‌ی معدنی و مواد با عیار کمتر از عیار حد به عنوان باطله محسوب می‌شوند. به علاوه این پارامتر تعیین کننده‌ی نوع عملیات است. مانند انتقال مواد به کارخانه‌ی تغلیظ و یا فرسویی، انتقال به انباشت‌گاه و یا دمپ باطله.

علت آن که از عیار حد به عنوان یک پارامتر مهم یاد می‌شود تعدد پارامترهای وابسته به آن است. تغییرات عیار حد بر روی عیار متوسط، تناژ ماده معدنی و محدوده نهایی معدن تاثیر گذاشته و در نتیجه پارامترهایی مانند هزینه‌ی سرمایه‌گذاری، هزینه‌های جایگزینی ماشین آلات، بازیابی و هزینه‌های عملیاتی دست‌خوش تغییر می‌شوند. بنابراین می‌توان گفت عیار حد تابعی از متغیرهای هزینه و قیمت فروش محصول معدنی است و از آن جا که هر دو متغیر به نوبه‌ی خود به زمان و مکان مربوط می‌شوند، لذا با گذشت زمان عیار حد یک معدن و یا بخشی از آن، می‌تواند تغییر کند. همچنین بروز هر نوع تغییراتی در عرضه و تقاضای یک محصول معدنی باعث نوساناتی در عیار حد خواهد شد (عطایی و حسینی، ۱۳۹۰-ب).

۲-۲ بهینه‌سازی

بهینه‌سازی عملیاتی برای رسیدن به بهترین نتیجه تحت شرایطی مشخص است. در طراحی، ساخت، تعمیر و نگهداری سیستم‌های مهندسی، مهندسين در مراحل مختلف مجبور به اتخاذ بسیاری از تصمیم‌های فنی و مدیریتی هستند که هدف نهایی این چنین تصمیماتی دستیابی به بیشترین منفعت مورد انتظار با حداقل استفاده از منابع است. از آن جایی که این منابع و منفعت مورد نیاز در هر موقعیت عملی می‌توانند توسط تابعی از متغیرهای تصمیم‌گیری تعریف شوند، لذا بهینه‌سازی را می‌توان به صورت فرآیند یافتن شرایطی که مقدار تابع مورد نظر را بیشینه و یا کمینه می‌کند، تعریف کرد. این جستجو برای یافتن مقدار بهینه به عنوان روش‌های برنامه‌ریزی ریاضیاتی هم شناخته می‌شود. این روش‌ها به صورت کلی در یکی از شاخه‌های ریاضی با عنوان پژوهش عملیاتی مورد مطالعه قرار می‌گیرند. به منظور حل کارآمد مسایل بهینه‌سازی، روش یکتایی وجود ندارد بلکه تعداد متنوعی از روش‌های بهینه‌سازی برای حل انواع مختلف مسایل گسترش یافته‌اند. جدول ۱-۲ نوعی طبقه‌بندی از روش‌های بهینه‌سازی را نشان می‌دهد (Rao, 2009).

جدول ۱-۲: نمونه‌ای از طبقه‌بندی روش‌های بهینه‌سازی (Rao, 2009)

روش‌های آماری	روش‌های فرآیندهای تصادفی	برنامه‌ریزی ریاضیاتی یا تکنیک‌های بهینه‌سازی
تحلیل رگرسیون، تحلیل خوشه‌ای، تشخیص الگو، طراحی آزمون‌ها، تحلیل تفریقی (تحلیل پارامتری)	نظریه تصمیم تصادفی، فرآیندهای مارکف، نظریه صف‌بندی، نظریه رینوال، روش‌های شبیه‌سازی، نظریه قابلیت اطمینان	روش‌های حسابی، حساب تغییرات، برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی هندسی، برنامه‌ریزی درجه دوم، برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی پویا، برنامه‌ریزی با اعداد صحیح، برنامه‌ریزی تصادفی، برنامه‌ریزی تفکیک‌پذیر، برنامه‌ریزی با چند هدف، روش‌های شبکه: CPM و PERT، نظریه بازی‌ها

روش‌های برنامه‌ریزی ریاضیاتی در یافتن مقدار کمینه‌ی تابع شامل چند متغیر و تحت مجموعه‌ای از محدودیت‌های تعیین شده کارآمد هستند. فرآیندهای تصادفی در تحلیل مسایل تعریف شده توسط مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی با توزیع احتمالاتی مشخص قابل کاربرد هستند. روش‌های آماری به منظور تحلیل داده‌های آزمایشی و ساخت مدل‌های تجربی برای دست یافتن به نمایش دقیق یک موقعیت فیزیکی به کار برده می‌شوند (Rao, 2009).

۳-۲ بهینه‌سازی عیار حد

در تعیین عیار حد سربه‌سری ظرفیت‌های مراحل مختلف (ظرفیت استخراج از معدن، ظرفیت کارخانه تغلیظ و ظرفیت کارخانه تصفیه)، نحوه توزیع عیار کانسار و ارزش زمانی پول مورد توجه قرار نمی‌گیرد، لذا این عیار نمی‌تواند عیار حد بهینه باشد. به همین دلیل محققین مختلف با در نظر گرفتن معیارهای مختلف، بهینه‌سازی عیار حد را مورد مطالعه قرار داده‌اند (عطایی، ۱۳۸۲). این مساله‌ی بهینه‌سازی می‌تواند به منظور پیشینه‌سازی سود و یا ارزش خالص فعلی. صورت پذیرد.

در سال‌های اخیر بیشترین تلاش در راستای توسعه‌ی مدل و روابطی انجام گرفته است که به موجب آن روابط می‌توان عیار حد بهینه را با هدف پیشینه‌کردن ارزش خالص فعلی محاسبه نمود. در این روابط علاوه بر منظور کردن عوامل اقتصادی، شرایطی چون ظرفیت تولید مواد معدنی، ظرفیت کارخانه‌ی تغلیظ، ظرفیت کارخانه‌ی ذوب، پالایش و ارزش زمانی پول نیز در نظر گرفته شده‌اند. مهم‌ترین مرجع در این زمینه کتاب کنت لین تحت عنوان «The Economic Definition of Ore: Cut-Off Grade in Theory and Practice» است که اولین بار در سال ۱۹۸۸ و سپس در سال ۱۹۹۱ تجدید چاپ شده است (اصانلو، ۱۳۸۹). بر اساس نظریه‌ی لین عملیات معدن‌کاری به سه قسمت استخراج، تغلیظ و تصفیه تقسیم می‌شود. سپس با تعیین ۶ عیار کاندیدا بر اساس محدود بودن ظرفیت هر یک از سه مرحله و یا تعادل دو به دوی آن‌ها، عیارهای حد بهینه‌ی هر سال محاسبه می‌شود (Lane, 1988).

۴-۲ سابقه‌ی علمی موضوع در کنسارهای یک فلزی

با توجه به اهمیت انتخاب صحیح عیار حد و تاثیر آن بر دیگر پارامترهای اساسی طراحی معدن، بدیهی است که فعالیت‌های پژوهشی بسیاری در این زمینه صورت گرفته شده باشد؛ اما از سال ۱۹۵۴ و با مطرح شدن مفهوم بهینه‌سازی عیار حد، تلاش محققین معطوف به این موضوع بوده است. تعداد زیاد مقالات علمی و کتب منتشر شده در این زمینه موید این نکته است.

در نگاهی اجمالی به کارهای انجام شده در ارتباط با این مساله می‌توان فهمید که در ابتدا دو دیدگاه مختلف توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است. گروهی عیار حد ثابتی را در طول عمر معدن مورد توجه قرار داده‌اند و عده‌ای دیگر عیارهای حد متغیری را برای کل عمر معدن در نظر گرفته‌اند. با ارایه‌ی نظریه‌ی جامع لین در سال ۱۹۸۴، الگوریتم جامع دیگری ارایه نشده و کارهای دیگر محقق‌ها معطوف به دو موضوع استفاده از روش‌های بهینه‌سازی دیگر بر مبنای این الگوریتم و یا بررسی نقش عوامل مختلف در این مساله بر اساس نظریه‌ی او بوده است. در جدول ۲-۲ قسمت اعظم تلاش‌های انجام شده در این زمینه، آورده شده است.

جدول ۲-۲: تلاش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی بهینه‌سازی عیار حد در کنسارهای یک فلزی^۱

ردیف	ارایه دهنده	سال	موضوع مورد تحقیق
۱	Callaway	۱۹۵۴	محاسبه عیار حد ثابت در طول عمر معدن
۲	Callaway	۱۹۵۸	ارتباط اقتصادی بین میزان معدن کاری و عیار کانسنگ
۳	Tessaro	۱۹۶۰	محاسبه عیار حد با بیشینه کردن NPV
۴	Vickers	۱۹۶۱	محاسبه عیار حد
۵	Henning	۱۹۶۳	تعیین عیار حد بهینه با بیشینه کردن سود
۶	Lane	۱۹۶۴	انتخاب عیار حد بهینه بر اساس سه محدودیت عملیاتی
۷	Hall et al.	۱۹۶۹	بهینه‌سازی ذخایر کانسنگ و اندازه کارخانه
۸	Noren	۱۹۷۰	مدل‌های تصمیم‌گیری بلند مدت در معدن کاری

۱- برای گردآوری پژوهش‌های آورده شده در این قسمت و در قسمت کنسارهای چند فلزی، برای موارد تا ابتدای سال ۲۰۰۲ از مرجع (عطایی، ۱۳۸۲) استفاده شده و برای دیگر پژوهش‌ها اکثراً منابع اصلی مورد استفاده قرار گرفته است.

تجدید نظر در روش لین	۱۹۷۰	Blackwell	۹
محاسبه عیار حد ثابت بهینه با پیشینه کردن NPV	۱۹۷۱	Douglass	۱۰
تئوری عیار حد	۱۹۷۲	Taylor	۱۱
استفاده از برنامه‌ریزی پویا برای نرخ تولید بهینه	۱۹۷۳	Roman	۱۲
تصمیم‌گیری در مورد عیار حد و نرخ تولید	۱۹۷۵	Elbrond, Dowd	۱۳
برنامه‌ریزی پویا و احتمال پذیر برای بهینه‌سازی عیار حد	۱۹۷۶	Dowd	۱۴
انتخاب عیار حد بهینه بر اساس ۳ محدودیت عملیاتی	۱۹۷۹	Rudenno	۱۵
مفاهیم بازرگانی عیار حد	۱۹۷۹	Lane	۱۶
عوامل موثر در محاسبه عیار حد	۱۹۷۹	Kelsey	۱۷
انتخاب عیار حد بهینه برای معادن زیرزمینی	۱۹۸۲	Nilsson	۱۸
تأثیر تغییرات قیمت و هزینه‌ها روی عیار حد	۱۹۸۳	Napier	۱۹
تئوری عیار حد به عنوان یک ابزار طراحی	۱۹۸۳	Schaap	۲۰
بهبود ذخیره قابل بازیابی با روش کریجینگ	۱۹۸۳	Akin	۲۱
انتخاب عیار حد بهینه	۱۹۸۴	Omer Mol	۲۲
محاسبه عیار حد برای معادن روباز	۱۹۸۴	John	۲۳
لزوم ایجاد انباشت‌گاه در بهینه‌سازی عیار حد	۱۹۸۵	Taylor	۲۴
عیار حد در مرحله طراحی و عملیات	۱۹۸۵	Pasieka	۲۵
پارامترهای موثر در تعیین عیار حد بهینه	۱۹۸۷	Taytiya	۲۶
تخمین آماری عیار حد	۱۹۸۷	Dogbert	۲۷
ساده‌سازی جواب با استفاده از تکنیک Hamiltonian	۱۹۸۸	Yi, Sturgul	۲۸
بررسی‌های اقتصادی ماده معدنی	۱۹۸۸	Lane	۲۹
گنجاندن عدم قطعیت قیمت در بهینه‌سازی عیار حد	۱۹۸۸	Krautkraemer	۳۰
بهینه‌سازی عیار حد	۱۹۹۲	Dagdalen	۳۱
تهیه نرم افزار برای انتخاب عیار حد بهینه	۱۹۹۵	Whittle, Wharton	۳۲
بهینه‌سازی عیار حد	۱۹۹۵	Whittle, Wharton	۳۳
محاسبه عیار حد بهینه در معادن زیرزمینی	۱۹۹۶	Taytiya	۳۴
بهینه‌سازی عیار حد برای افزایش سودآوری	۱۹۹۶	Wharton	۳۵
بهینه‌سازی عیار حد	۱۹۹۷	Hanson	۳۶
بررسی عیار حد تحت شرایط قیمت‌های قطعی و تصادفی	۱۹۹۸	Cairns, Van Quygen	۳۷
پیش‌بینی بازیابی و بهینه‌سازی عیار حد	۱۹۹۸	Whittle, Vassiliev	۳۸
محاسبه عیار حد بهینه در معادن زیرزمینی	۱۹۹۸	Taytiya	۳۹
بهینه‌سازی عیار حد و بهینه‌سازی توان عملیاتی کارخانه	۱۹۹۹	Wooler	۴۰
تعریف ذخیره باتابع توزیع نرمال برای بهینه‌سازی عیار حد	۲۰۰۰	Sagi	۴۱

بررسی عیار حد تحت شرایط قیمت‌های قطعی و تصادفی	۲۰۰۰	Shinkuma	۴۲
بررسی عیارهای حد در طول بهینه‌سازی معدن و پس از آن	۲۰۰۱	Baird, Stachwell	۴۳
تحلیل عیارهای حد بهینه در یک معدن طلا	۲۰۰۲	Wheeler, Rodrigues	۴۴
توسعه الگوریتم بهینه‌سازی عیار حد تعمیم یافته برای عملیات معدن کاری روباز	۲۰۰۲	Asad	۴۵
تعیین عیار حد در معدن کاری طلا	۲۰۰۴	Minnit	۴۶
استفاده از قیمت پویای فلز و تعدیل هزینه در بهینه‌سازی عیار حد	۲۰۰۵	Asad	۴۷
بهینه‌سازی عیار حد با تعریف فاکتور بهینه‌سازی	۲۰۰۷	Bascetin, Nieto	۴۸
ساخت مدلی با ملاحظات زیست محیطی برای بهینه‌سازی عیار حد به منظور کمینه کردن تراوشات اسیدی	۲۰۰۸	Rashidinejad et al.	۴۹
در نظر گرفتن هزینه‌های انباشت باطله در الگوریتم لین	۲۰۰۸	Gholamnejad	۵۰
روش عصبی-ژنتیک برای بهینه‌سازی عیار حد	۲۰۰۹	He et al.	۵۱
بررسی تاثیر روش تخمین مدل بلوکی بر عیار حد بهینه	۲۰۱۱	Bascetin et al.	۵۲
در نظر گرفتن توام اثر انباشت‌گاه مواد معدنی کم عیار، پارامترهای اقتصادی و تعدیلات بر بهینه‌سازی عیار حد	۲۰۱۱	Asad , Topal	۵۳
بهینه‌سازی تصادفی پویای عیار حد	۲۰۱۲	Barr	۵۴
تاثیر تغییرات قیمت ماده‌ی معدنی بر روی عیار حد بهینه	۲۰۱۲	Khodayari , Jafarnejad	۵۵
بهینه‌سازی عیار حد تحت قیمت‌های تصادفی	۲۰۱۲	Azimi et al.	۵۶
بهینه‌سازی عیار حد با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای	۲۰۱۲	Li , Yang	۵۷
اصلاح الگوریتم لین با در نظر گرفتن ظرفیت‌های متغیر واحدها در طول زمان	۲۰۱۲	Abdollahisharif et al.	۵۸

۵-۲ سابقه‌ی علمی موضوع در کنسارهای چند فلزی

ذخایر چند فلزی به ذخایری اطلاق می‌شود که حاوی بیش از یک فلز اصلی به عنوان منبع درآمد معدن می‌باشند به طوری که پس از استخراج و تغلیظ آن‌ها ممکن است چندین نوع کنسانتره تولید شود که هر یک از این کنسانتره‌ها ممکن است علاوه بر فلز اصلی حاوی محصولات جانبی دیگر نیز باشند (عطایی و حسینی، ۱۳۹۰-ب). محققین مختلف به منظور تشخیص کانسنگ از باطله در کنسارهای چند فلزی از روش‌های مختلفی همچون روش سطح بحرانی برای هر تن ماده‌ی معدنی، روش عیارهای معادل و روش ارزش خالص هر تن کنسانتره استفاده کرده‌اند (عطایی، ۱۳۸۲). در جدول ۳-۲ قسمت اعظم این تلاش‌ها آورده شده است.

جدول ۳-۲: تلاش‌های انجام شده در بهینه‌سازی عیار حد در کنسارهای چند فلزی

ردیف	ارائه دهنده	سال	موضوع مورد تحقیق
۱	Diehl, David	۱۹۸۲	روش عیارهای معادل
۲	Lane	۱۹۸۸	روش عیارهای معادل
۳	Annels	۱۹۹۱	استفاده از روش‌های سطح بحرانی برای هر تن ماده معدنی، ارزش خالص هر تن کنسانتره (NSR) و عیارهای معادل
۴	Staples	۱۹۹۵	روش عیارهای معادل
۵	Wharton	۱۹۹۶	روش عیارهای معادل
۶	Broder	۱۹۹۸	روش عیارهای معادل
۷	Liimatainen	۱۹۹۸	روش عیارهای معادل
۸	Zhang	۱۹۹۸	روش عیارهای معادل
۹	Dowd, Xu	۱۹۹۹	روش عیارهای معادل
۱۰	Baird, Satchwell	۲۰۰۱	استفاده از روش‌های عیارهای معادل و سطح بحرانی برای هر تن ماده معدنی
۱۱	Cetin, Dowd	۲۰۰۲	استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی عیارهای حد معادن چند فلزی

الگوریتم بهینه سازی عیار حد تعمیم یافته در کانسارهای دو فلزی	۲۰۰۳	Asad	۱۲
استفاده از روش های معادل سازی عیارها، جستجوی شبکه ای تکرار شونده، ترکیب روش جستجوی شبکه ای و الگوریتم ژنتیک و روش جستجوی نسبت طلایی در بهینه سازی عیارهای حد معادن چند فلزی	۲۰۰۳	Ataei , Osanloo	۱۳
تاثیر انباشتگاه مواد معدنی کم عیار بر بهینه سازی عیارهای حد معادن دو فلزی	۲۰۰۵	Asad	۱۴
بهینه سازی عیار معادن چند فلزی بزرگ مقیاس	۲۰۰۷	Daghdelen, Kawahata	۱۵
بهینه سازی عیار حد معادن چند فلزی با استفاده از روش ارزش چند نقطه ای	۲۰۱۱	Behrouz , Sayadi	۱۶
استفاده از بهینه سازی هوشمند ترکیبی در بهینه سازی عیارهای حد معادن چند فلزی	۲۰۱۱	Yu et al.	۱۷

فصل سوم

تابع هدف بهینه‌سازی عیار حد

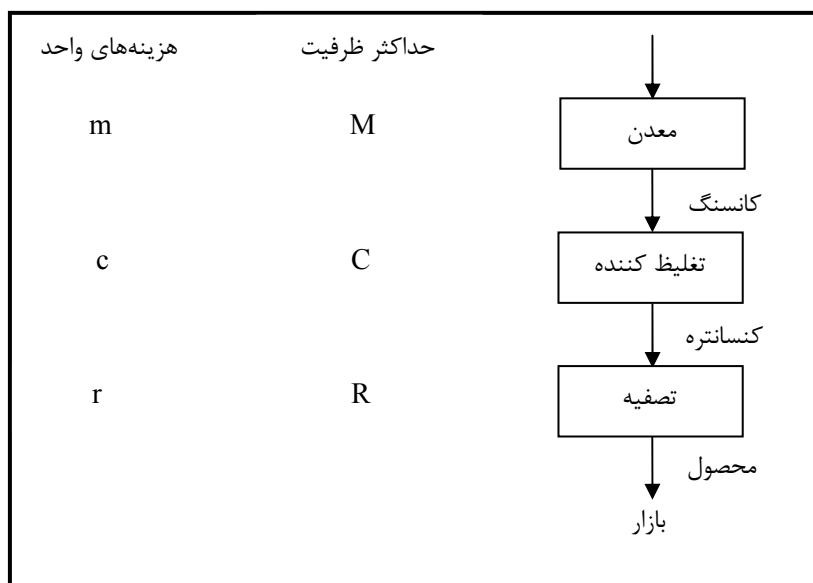
و روش‌های حل آن

۱-۳ مقدمه

در این فصل با مدل‌سازی روند عملیاتی یک معدن فرضی ساده، روابط اساسی آن تعریف و بر اساس آن تابع هدف بهینه‌سازی عیار حد تعیین می‌شود. پس از آن به بررسی روش‌های حل تابع هدف از جمله الگوریتم تحلیلی لین به عنوان جامع‌ترین نظریه، روش حذفی جستجوی نسبت طلایی و روش فرا ابتکاری رقابت استعماری پرداخته خواهد شد.

۲-۳ مدل‌سازی مراحل معدن‌کاری

برای دستیابی به معادلات اساسی که روابط بین مراحل مختلف معدن‌کاری، ظرفیت واحدها، پارامترهای اقتصادی و هزینه‌ها و سودهای حاصل را بیان می‌کنند، نیاز است تا در ابتدا مراحل مختلف معدن‌کاری با مدل ساده‌ای بیان شوند. به این منظور مدل نشان داده شده در شکل ۱-۳ مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۱: مدل مورد استفاده برای تعیین عیار حد بهینه ذخایر یک فلزی (Hustrulid and Kuchta, 1995)

متغیرهای به کار گرفته شده در این مدل در جدول ۳-۱ آورده شده است.

جدول ۳-۱: متغیرهای به کار رفته در مدل بهینه‌سازی عیار حد کانسارهای یک فلزی

نماد	تعریف	واحد
Q_m	میزان کل مواد قابل معدن کاری	ton
Q_c	مقدار ماده معدنی فرستاده شده به کارخانه تغلیظ	ton
Q_r	مقدار محصول نهایی	ton
M	ظرفیت استخراج	ton/year
C	ظرفیت تغلیظ	ton/year
R	ظرفیت تصفیه	ton/year
s	قیمت فروش محصول	\$/ton
m	هزینه استخراج	\$/ton
c	هزینه تغلیظ	\$/ton
r	هزینه تولید محصول نهایی	\$/ton
f	هزینه‌های ثابت	\$/ton
T	طول دوره تولید	year
y	بازیابی	%

در مورد پارامترهای تعریف شده توجه به موارد زیر ضروری است:

الف- هزینه استخراج m شامل ماده معدنی یا باطله است و از تقسیم‌بندی مواد به باطله و مواد معدنی صرف نظر شده است و شامل هزینه‌های چال زنی، انفجار، بارگیری، باربری و ... می‌شود.

ب- هزینه‌های تغلیظ شامل هزینه‌های سنگ شکنی^۱، آسیا کردن^۲، فلوتاسیون^۳، فروشویی^۴ و ... است.

ج- هزینه‌های تولید محصول و فروش شامل هزینه‌های ذوب^۵، تصفیه^۶، بسته‌بندی^۷، حمل^۸، بیمه^۹ و ... است.

د- هزینه‌های ثابت هزینه‌هایی از قبیل هزینه‌های اجاره، هزینه‌های اداری^{۱۰}، نگهداری^{۱۱} جاده‌ها و ساختمان‌ها را شامل می‌شود. این هزینه‌ها مستقل از مقدار تولید می‌باشند و تا زمانی که معدن فعال است، این هزینه‌ها وجود دارند. این هزینه‌ها به صورت یک هزینه ثابت در طول زمان تولید مورد نظر، مثلاً یک سال بیان می‌شود و هزینه‌های دیگر از قبیل هزینه‌های دفتر مرکزی^{۱۲}، استهلاک^{۱۳} و ... را شامل نمی‌شود.

-
- 1 - Crushing
 - 2 - Grinding
 - 3 - Floating
 - 4 - Leaching
 - 5 - Smelting
 - 6 - Refining
 - 7 - Packaging
 - 8 - Freight
 - 9 - Insurance
 - 10 - Administration
 - 11 - Maintenance
 - 12 - Head Office Charge
 - 13 - Depreciation

۳-۳ تعریف معادلات اساسی مدل

با توجه به پارامترهای اقتصادی و عملیاتی جدول بالا، هزینه هر بخش از مراحل را می‌توان محاسبه نمود که مجموع آن‌ها هزینه‌های کلی معدن را نشان می‌دهد. علاوه بر این چون این عملیات در دوره‌ی زمانی معینی انجام می‌شود، بنابراین هزینه‌های ثابت این دوره نیز باید در هزینه‌های کلی معدن منظور شود. در آمد معدن هم به صورت ضرب قیمت فروش در مقدار ماده‌ی معدنی تصفیه شده حاصل می‌شود. پس هزینه‌ی کلی عملیات، درآمد و سود حاصله از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$T_c = mQ_m + cQ_c + rQ_r + fT \quad (۱-۳)$$

$$R = sQ_r \quad (۲-۳)$$

$$P = R - T_c = sQ_r - (mQ_m + cQ_c + rQ_r + fT) \quad (۳-۳)$$

$$P = (s - r)Q_r - mQ_m - cQ_c - fT \quad (۴-۳)$$

ز آن جا که میزان محصول نهایی (مقدار ماده‌ی تصفیه شده Q_r) به مقدار ماده‌ی معدنی ارسالی به کارخانه‌ی کانه‌آرایی بستگی دارد و با توجه به مقدار و عیار متوسط مواد معدنی فرستاده شده به کارخانه‌ی کانه‌آرایی (\bar{g}) و درصد بازیابی، مقدار ماده‌ی تصفیه شده (Q_r) از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_r = \bar{g}yQ_c \quad (۵-۳)$$

با جایگزینی این مقدار در رابطه‌ی (۴-۳) سود حاصله برابر است با :

$$P = [(s - r)\bar{g}y - c]Q_c - mQ_m - fT \quad (۶-۳)$$

که در این رابطه تناژ ماده‌ی معدنی فرستاده شده به کارخانه‌ی تغلیظ (Q_c) و عیار متوسط مواد معدنی فرستاده شده به کارخانه‌ی کانه‌آرایی (\bar{g}) از روابط زیر محاسبه می‌شود (عطایی و حسینی، ۱۳۹۰-الف) :

$$Q_c = Q_m \int_{g_c}^{\infty} f(g) dg \quad (7-3)$$

$$\bar{g} = \frac{\int_{g_c}^{\infty} g f(g) dg}{\int_{g_c}^{\infty} f(g) dg} \quad (8-3)$$

که در این روابط $f(g)$ تابع توزیع عیار مواد و g_c عیار حد می‌باشد.

۴-۳ تابع هدف برای تعیین عیار حد با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی (NPV)

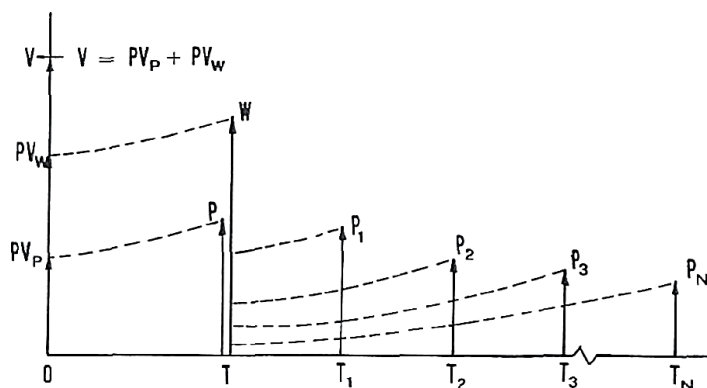
عیار حد را می‌توان با هدف بهینه بیشینه کردن سود و یا ارزش خالص فعلی بهینه کرد. در چند دهه‌ی اخیر به بهینه سازی با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی توجه ویژه‌ای شده است. از این رو در این قسمت تابع هدف برای تعیین عیار حد با این هدف تعریف خواهد شد.

فرض می‌شود که درست قبل از معدن کاری بخش Q_m (در شکل ۲-۳ برای سادگی در زمان $t=0$ نشان داده شده است) ارزش خالص فعلی تمام سودهای باقیمانده V باشد. پس از گذشت زمان T که Q_m تن از ذخیره استخراج شد، به اندازه‌ی P سود تحقق یافته است و مابقی سودها در آینده محقق خواهد شد. ارزش خالص فعلی تمام سودهای باقیمانده از دو جزء تشکیل شده است (عطایی و حسینی، ۱۳۹۰-الف):

$$1-PV_p, \text{ ناشی از سود } P \text{ تحقق یافته در زمان } T \text{ پس از معدن کاری مقدار } Q_m$$

$$2-PV_w, \text{ ناشی از سودهای تحقق یافته با معدن کاری مواد باقیمانده پس از زمان } T, \text{ این}$$

سودها به عنوان P_1 سود به دست آمده در زمان T_1 ، P_2 سود به دست آمده در زمان T_2 و ... در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. ارزش تمام این سودهای باقیمانده برای معدن کاری انجام شده پس از زمان $t=T$ در زمان T معادل W می‌باشد.



شکل ۳-۲: نمایش نموداری محاسبه‌ی ارزش خالص فعلی (Hustrulid, Kuchta, 1995)

ارزش فعلی W و P به ترتیب به صورت تنزیل شده در زمان $t=0$ از روابط زیر به دست می‌آید

(عطایی، ۱۳۹۰ - ب):

$$PV_W(t=0) = \frac{W}{(1+d)^T} \quad (۹-۳)$$

$$PV_P(t=0) = \frac{P}{(1+d)^T} \quad (۱۰-۳)$$

که در این روابط d نرخ تنزیل می‌باشد.

بنابراین ارزش فعلی در زمان $t=0$ برابر است:

$$V = PV_P + PV_W = \frac{P}{(1+d)^T} + \frac{W}{(1+d)^T} = \frac{P+W}{(1+d)^T} \quad (۱۱-۳)$$

$$W + P = V (1+d)^T \quad (۱۲-۳)$$

اگر عبارت $(1+d)^T$ بسط داده شود:

$$(1+d)^T = 1 + Td + \frac{T(T-1)d^2}{2!} + \frac{T(T-1)(T-2)d^3}{3!} + \dots \quad (۱۳-۳)$$

برای مقادیر کوچک d می‌توان از جملات دوم، سوم و ... بسط بالا صرف‌نظر کرد؛ یعنی:

$$(1+d)^T = 1 + Td \quad (۱۴-۳)$$

از ترکیب روابط (۱۲-۳) و (۱۴-۳) داریم:

$$W + P = V(1+d)^T = V + VTd \quad (۱۵-۳)$$

از آن جا که ارزش خالص ذخایر باقیمانده در زمان $t=T$ برابر W است، اختلاف بین ارزش فعلی

ذخایر باقیمانده در زمان‌های $t=0$ و $t=T$ برابر است با:

$$v = V - W \quad (۱۶-۳)$$

از ترکیب روابط (۱۵-۳) و (۱۶-۳) داریم:

$$v = V - W = V - [V + VTd - P] = P - VTd \quad (۱۷-۳)$$

از طرفی سود به دست آمده پس از معدن‌کاری Q_m در زمان، برابر است با:

$$P = [(s-r)\bar{g}y - c]Q_c - mQ_m - fT \quad (۱۸-۳)$$

با تلفیق روابط (۱۷-۳) و (۱۸-۳) تابع هدف برابر است با:

$$v = [(s-r)\bar{g}y - c]Q_c - mQ_m - (f + Vd)T \quad (۱۹-۳)$$

با توجه به این نکته که ظرفیت هر یک از مراحل استخراج، تغلیظ و یا تصفیه ممکن است

محدود کننده‌ی کل عملیات باشد، لذا مقادیر متفاوتی برای تابع هدف حاصل خواهد شد.

۳-۴-۱ تابع هدف در صورتی که میزان استخراج از معدن محدودیت تعیین کننده باشد

در این حالت، زمان لازم برای استخراج Q_m تن از مواد برابر است با:

$$T = \frac{Q_m}{M} \quad (۲۰-۳)$$

از روابط (۱۹-۳) و (۲۰-۳) داریم:

$$v_m = (s-r)Q_r - cQ_c - \left[m + \frac{f + Vd}{M} \right] Q_m \quad (۲۱-۳)$$

۳-۴-۲ تابع هدف در صورتی که کارخانه‌ی تغلیظ محدودیت تعیین کننده باشد

در این حالت، زمان لازم برای تغلیظ Q_c تن از مواد معدنی برابر است با:

$$T = \frac{Q_c}{C} \quad (22-3)$$

از روابط (۱۹-۳) و (۲۲-۳) داریم:

$$v_c = (s-r)Q_r - mQ_m - \left(c + \frac{f+Vd}{C}\right)Q_c \quad (23-3)$$

۳-۴-۳ تابع هدف در صورتی که کارخانه‌ی تصفیه محدودیت تعیین کننده باشد

در این حالت، زمان لازم برای تصفیه‌ی Q_r تن از مواد برابر است با:

$$T = \frac{Q_r}{R} = \frac{\bar{g}v_c Q_c}{R} \quad (24-3)$$

از روابط (۱۹-۳) و (۲۴-۳) داریم:

$$v_r = \left(s-r - \frac{f+Vd}{R}\right)Q_r - mQ_m - cQ_c \quad (25-3)$$

۳-۵ تابع هدف در حالت کلی

از آن جا که سه تابع v وجود دارد، بایستی سعی کرد که هر سه تابع هدف در حد ممکن

بهینه شوند؛ لذا قسمت مشترک سه تابع باید مورد توجه قرار گیرد و سپس بیشترین مقدار قسمت

مشترک سه تابع (۲۱-۳)، (۲۳-۳) و (۲۵-۳) تعیین شود. همان طور که در شکل ۳-۳ دیده می‌شود،

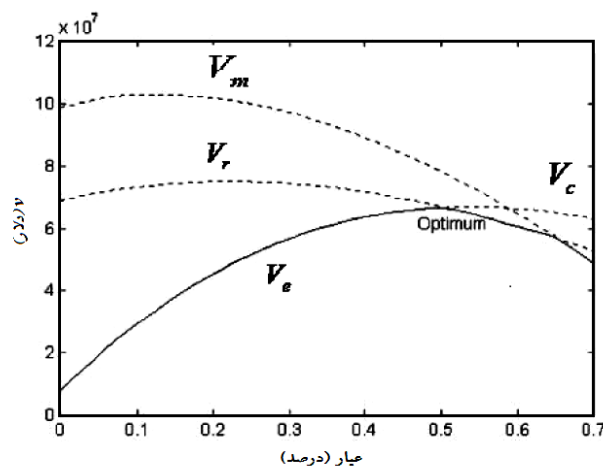
قسمت مشترک منحنی‌های فوق در محدوده‌های مختلف، کمترین مقدار v_m ، v_c و v_r خواهد بود به

عبارت دیگر باید عیاری که را باعث برآورده شدن تابع هدف ذیل می‌شود، تعیین کرد (عطایی و

حسینی، ۱۳۹۰-الف):

$$\max v_e = \max \left[\min (v_m, v_c, v_r) \right] \quad (26-3)$$

از آن جایی که مقدار عیار حد در هر یک از روابط (۳-۲۱)، (۳-۲۳) و (۳-۲۵) به مقدار V وابسته است و مقدار V نیز به تعیین عیار حد بهینه بستگی دارد، روش حل به صورت فرآیند تکرار است.



شکل ۳-۳: نمونه‌ای از منحنی‌های V_e و V_r ، V_c ، V_m (بهرز، ۱۳۸۹)

۶-۳ روش‌های بهینه‌یابی تابع هدف در بهینه‌سازی عیارهای حد

همان‌طور که گفته شد مساله تعیین عیار حد بهینه یک کانسار، یافتن عیاری است که باعث بهینه‌سازی سه تابع هدف می‌شود و برای این منظور می‌توان از انواع روش‌های تحلیلی^۱، جستجوی مستقیم^۲ و یا روش‌های بهینه‌سازی هوشمند^۳ (تکاملی^۴ و یا فرا ابتکاری^۵) بهره برد.

در روش‌های تحلیلی که برای توابع پیوسته و مشتق پذیر قابل استفاده می‌باشند، با استفاده از مشتق‌گیری از توابع، نقطه‌ی بهینه به دست می‌آید. این روش‌ها ممکن است برای مسایل معینی (از جمله کانسارهای ساده و با ذخیره کم) مناسب باشند اما از آن جا که برخی از مسایل واقعی دارای

1 - Analytical Methods
2 - Direct Search Methods
3 - Intelligence Optimization Methods
4 - Evolutionary
5 - Meta-Heuristic

تابع هدف ناپیوسته و یا مشتق ناپذیر هستند، این روش‌ها در عمل کاربرد محدودی دارند. از طرف دیگر اگر مساله بهینه‌سازی شامل تابع هدف و یا محدودیت‌هایی باشد که به طور مستقیم بر حسب متغیرها بیان نشود و یا این توابع پیچیده باشند، نمی‌توان آن‌ها را با روش‌های تحلیلی حل کرد (عطایی و اصائلو، ۱۳۸۲).

از دیگر روش‌های حل این مساله‌ی بهینه‌سازی، روش‌های عددی هستند. این روش‌ها خود به دو دسته‌ی روش‌های حذفی و درون یابی تقسیم می‌شوند. به دلیل یک کوهانه^۱ بودن تابع هدف بهینه‌سازی عیار حد می‌توان از انواع روش‌های حذفی برای تعیین عیار حد بهینه استفاده کرد. از جمله‌ی روش‌های حذفی می‌توان به روش جستجوی کامل^۲، روش دیکوتوماس^۳، روش فیبوناچی^۴ و روش جستجوی نسبت طلایی اشاره کرد.

دسته‌ی دیگر روش‌های بهینه‌سازی عیار حد استفاده از روش‌های هوشمند است. در روش‌های هوشمند همواره احتمال عدم دست یابی به مقدار بهینه وجود دارد.

در ادامه روش لین به عنوان جامع‌ترین نظریه‌ی بهینه‌سازی عیار حد که از جمله روش‌های تحلیلی است، تشریح می‌شود. پس از آن با توجه به این که در پژوهش حاضر از روش حذفی جستجوی طلایی و الگوریتم فرا ابتکاری رقابت استعماری برای بهینه‌سازی تابع هدف مساله استفاده شده است، این روش‌ها توضیح داده خواهند شد.

۱- تابع یک کوهانه (Unimodal) تابعی است که در یک فاصله‌ی داده شده، دارای تنها یک قله (بیشینه یا کمینه) است. بنابراین به یک تابع در صورتی یک کوهانه گویند که به ازای دو مقدار از متغیر که در یک طرف نقطه‌ی بهینه قرار دارند، مقادیر نزدیک‌تر به بهینه دارای مقدار هدف بهتری (در مسائل بیشینه سازی دارای هدف بزرگ‌تری) باشد (عطایی، ۱۳۸۲)

2 - Complete Search
3 - Dichotomous
4 - Fibonacci

۳-۶-۱ الگوریتم لین

لین در سال ۱۹۸۸ با تکمیل کارهای قبلی خود، نظریه‌ی جامع خود را ارائه کرد. بر این اساس نقطه‌ی بهینه‌ی تابع هدف یا بر نقطه‌ی بهینه یکی از منحنی‌های v_r و v_c ، v_m قرار دارد و یا بر روی سه نقطه‌ی حاصل از تقاطع هر زوج از منحنی‌ها (عیارهای حد متعادل کننده که بر اساس توزیع عیار کانسار هستند و بین هر زوج از مراحل تعادل برقرار می‌کند) منطبق است.

بر اساس نظریه‌ی لین ابتدا شش نقطه‌ی بهینگی برای نقطه‌ی بهینه‌ی نهایی تابع به دست می‌آید، از میان آن‌ها بر اساس روابط سه نقطه حاصل می‌شود و در نهایت مقدار میانی این سه نقطه عیار حد بهینه است. الگوریتم لین شامل مراحل زیر است:

- مرحله‌ی اول: تعیین نقطه‌ی بهینه‌ی هر یک از سه منحنی v_r و v_c ، v_m

برای این منظور باید از روابط v_r و v_c ، v_m (که در فصل قبل آورده شده است) نسبت به g مشتق گرفته و مشتق آن‌ها را معادل صفر قرار داد. بر این اساس سه عیار حد به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$g_m = \frac{c}{y(s-r)} \quad g_c = \frac{c + \frac{f+Vd}{C}}{y(s-r)} \quad g_r = \frac{c}{y\left(s-r - \frac{f+Vd}{R}\right)}$$

این عیارهای حد به طور مستقیم به قیمت و هزینه و به طور غیر مستقیم به توزیع عیار کانسار بستگی دارند.

- مرحله‌ی دوم: محاسبه‌ی عیارهای حد متعادل کننده عملیات

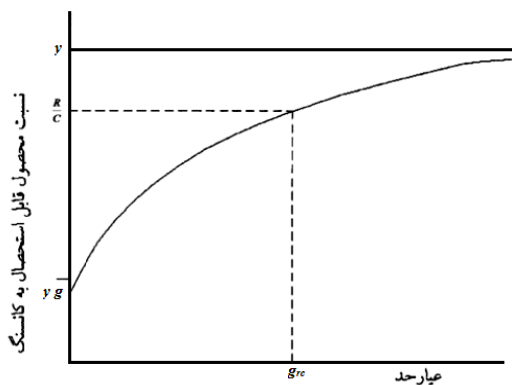
در این مرحله عیار حد بهینه بین هر یک از زوج مراحل باید محاسبه شود که شامل عیار حد متعادل کننده بین معدن-کارخانه‌ی تغلیظ، عیار حد متعادل کننده بین کارخانه‌ی تغلیظ - واحد

تصفیه و عیار حد متعادل کننده بین معدن - واحد تصفیه می‌باشد. برای این منظور باید هر زوج از روابط (۲۱-۳)، (۲۳-۳) و (۲۵-۳) را با یکدیگر مساوی قرار دهیم تا نقاط تلاقی دو به دوی آن‌ها حاصل شود. در نتیجه مقادیر زیر حاصل می‌شود:

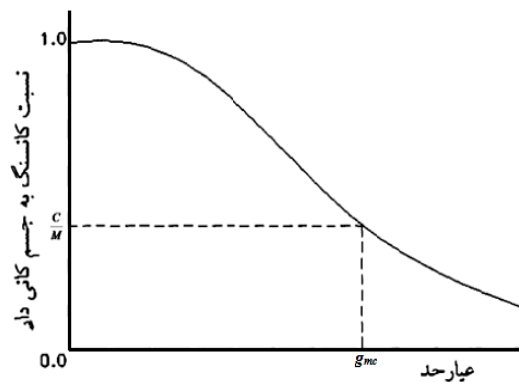
$$\frac{Q_r}{Q_m} = \frac{R}{M} \qquad \frac{Q_r}{Q_c} = \frac{R}{C} \qquad \frac{Q_c}{Q_m} = \frac{C}{M}$$

با رسم منحنی تغییرات عیار به ازای مقادیر مختلف $\frac{Q_r}{Q_m}$ ، $\frac{Q_r}{Q_c}$ و $\frac{Q_c}{Q_m}$ عیار متناظر نقاط بالا

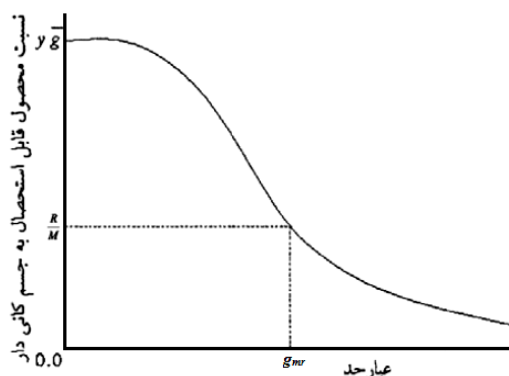
عیارهای حد متعادل کننده خواهند بود. این مطلب در شکل ۳-۴ الف، ب و ج نشان داده شده است.



ب- عیار حد متعادل کننده بین ظرفیت کارخانه تغلیظ - ظرفیت واحد تصفیه



الف- عیار حد متعادل کننده بین ظرفیت معدن - ظرفیت کارخانه تغلیظ



ج- عیار حد متعادل کننده بین ظرفیت معدن - ظرفیت واحد تصفیه

شکل ۳-۴: عیارهای حد متعادل کننده بین ظرفیت واحدهای معدن، کارخانه تغلیظ و واحد تصفیه (بهرروز، ۱۳۹۰)

- مرحله‌ی سوم: تعیین عیار حد بهینه از بین شش عیار حد به دست آمده

با در نظر گرفتن $\frac{Q_c}{Q_m} = \frac{C}{M}$ و با توجه به شکل ۳-۴- الف می‌توان به سادگی دریافت که به ازای

عیارهای حد کمتر از g_{mc} مؤلفه‌ی کارخانه‌ی تغلیظ عامل محدود کننده است، در صورتی که در مورد عیارهای حد بیشتر از g_{mc} سیستم تحت محدودیت مؤلفه‌ی استخراج قرار دارد. به عبارت دیگر حالت امکان‌پذیر V در مورد هر عیار حد، همواره بر منحنی پایین‌تر منطبق می‌باشد. عیار حد بهینه در این حالت g_{mc} خواهد بود. اما همیشه وضعیت به این گونه نیست بلکه دو حالت ویژه‌ی دیگر را نیز باید مورد توجه قرار داد. یک حالت این است که عیار حد متعادل کننده g_{mc} کمتر از g_m است. در این حالت g_m عیار حد بهینه خواهد بود. در حالت دیگر g_{mc} بزرگ‌تر از g_c است و g_c عیار حد بهینه خواهد بود (عطایی و حسینی، ۱۳۹۰- الف).

با توجه به مطالب بیان شده می‌توان نوشت:

$$G_{mc} = \begin{cases} g_m & \text{if } g_{mc} \leq g_m \\ g_c & \text{if } g_{mc} \geq g_c \\ g_{mc} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27-3)$$

روشی مشابه با در نظر گرفتن سایر مؤلفه‌ها خواهیم داشت:

$$G_{cr} = \begin{cases} g_r & \text{if } g_{cr} \leq g_r \\ g_c & \text{if } g_{cr} \geq g_c \\ g_{cr} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (28-3)$$

$$G_{mr} = \begin{cases} g_m & \text{if } g_{mr} \leq g_m \\ g_r & \text{if } g_{mr} \geq g_r \\ g_{mr} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (29-3)$$

اکنون می‌توان گفت که عیار بهینه‌ی نهایی یکی از سه مقدار G_{mr}, G_{cr}, G_{mc} است. این عیار

همواره برابر مقدار میانی بین سه مقدار G_{mr}, G_{cr}, G_{mc} می‌باشد.

با توجه به روابط ذکر شده به منظور بهینه‌سازی عیار حد باید مراحل زیر را انجام داد (عطایی،

: (۱۳۸۲)

مرحله ۱ : ورود اطلاعات

با توجه به توابع هدف، جهت تعیین عیارهای حد بهینه دو دسته اطلاعات زیر از هر پیت

بایستی در دسترس باشد (عطایی، ۱۳۸۲):

الف- اطلاعات مربوط به توزیع عیار کانسار: این دسته از اطلاعات شامل اطلاعاتی راجع به

تشریح هر پیت (توزیع عیار در آن‌ها و منحنی تناژ-عیار در آن‌ها)، محصولات تولید شده، ناخالصی‌های مهم، نوع سنگ‌ها و ... می‌باشند.

ب- اطلاعات اقتصادی و عملیاتی: این دسته از اطلاعات شامل هزینه‌ی استخراج هر تن از

مواد، هزینه‌ی تغلیظ هر تن ماده معدنی، هزینه‌ی تصفیه‌ی هر تن از فلز، هزینه‌های ثابت، قیمت هر تن از فلز، درصد بازیابی، نرخ بهره، ظرفیت واحد استخراج، ظرفیت واحد تغلیظ و ظرفیت واحد تصفیه می‌باشند.

مرحله ۲ : محاسبه‌ی ذخایر قابل دسترس در هر پیت

مرحله ۳ : محاسبه‌ی ذخایر قابل دسترسی در کانسار، اگر مقدار آن صفر باشد باید به مرحله

۱۲ و در غیر این صورت باید به مرحله بعد رفت.

مرحله ۴ : فرض می‌کنیم $V=NPV=0$

مرحله ۵ : محاسبه‌ی عیار حد بهینه

مرحله ۶ : بر اساس عیار حد بهینه به دست آمده بایستی تناژ ماده معدنی، تناژ باطله و عیار

متوسط کانسنگ را محاسبه کرد. هم چنین بایستی مقادیر Q_m ، Q_c و Q_r را کنترل و با توجه به

ظرفیت محدود کننده، ظرفیت‌های دیگر را تعیین کرد.

مرحله ۷: محاسبه‌ی سود سالانه

مرحله ۸: محاسبه‌ی عمر باقی مانده‌ی معدن و پس از آن محاسبه NPV ذخایر باقی مانده و مقایسه مقدار آن با مقدار V قبلی. در صورت اختلاف زیاد با آن به مرحله ۴ رفته و محاسبات با توجه به NPV جدید تکرار می‌شود. در غیر این صورت باید به مرحله بعد رفت.

مرحله ۹: با کسر کردن تناژ کانسنگ استخراج شده (Q_c) از محدوده‌های عیاری بالای عیار حد بهینه محاسبه شده و کسر کردن تناژ باطله ($Q_m - Q_c$) از محدوده‌های عیاری زیر عیار حد بهینه، بایستی منحنی تناژ-عیار ذخیره باقی مانده را محاسبه کرد. یعنی پس از هر سال بایستی تناژ را برای هر یک از محدوده‌های عیاری مجدداً محاسبه کرد.

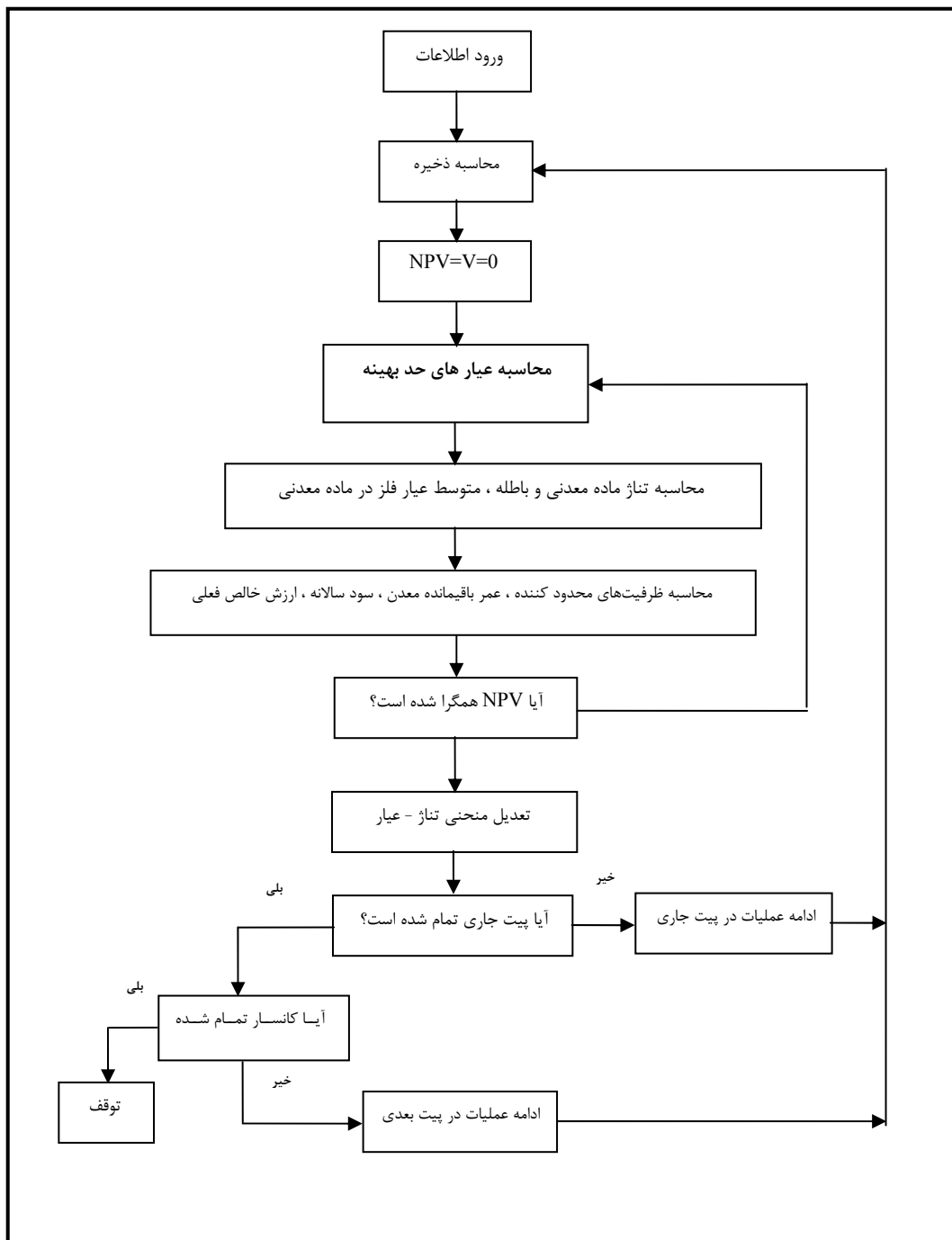
مرحله ۱۰: اگر ذخیره‌ی پیت جاری تمام شده باشد به مرحله بعد رفته در غیر این صورت باید به مرحله ۲ رفت.

مرحله ۱۱: اگر ذخیره‌ی تمام پیت تمام شده باشد به مرحله ۳ رفته و در غیر این صورت به مرحله ۲ رفته و پیت بعدی را باید مورد مطالعه قرار داد.

مرحله ۱۲: اگر اولین مرحله‌ی فرآیند تکرار است، سود سالانه را محاسبه و ارزش خالص فعلی سالانه را به سال اول تنزیل داده و فرآیند به مرحله‌ی بعد می‌رود. اگر دومین مرحله‌ی فرآیند تکرار است، توقف می‌شود.

مرحله ۱۳: از NPV به دست آمده در مرحله ۱۲ به عنوان NPV اولیه‌ی هر سال برای تکرار دوم استفاده می‌شود. عیارهای حد به دست آمده از این تکرار عیارهای حد بهینه برای عمر معدن است. بنابراین مقادیر Q_r ، Q_c ، Q_m ، عیار حد بهینه، سود سالانه و NPV ذخایر باقی مانده را برای هر سال محاسبه و در پرونده‌ی خروجی درج می‌شود.

مراحل فوق به طور مفهومی در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵: روند نمای تعیین عیارهای حد بهینه (عطایی، ۱۳۸۲)

۳-۶-۲ روش حذفی جستجوی نسبت طلایی

روش‌های حذفی که از انواع روش‌های عددی به حساب می‌آیند از سریع‌ترین روش‌ها در پیدا کردن نقطه‌ی بهینه‌ی توابع یک کوهانه هستند. در اولین مرحله از این روش‌ها فضای عدم قطعیت مساله (بازه و یا فضایی که جواب بهینه می‌تواند در آن قرار بگیرد) حدس زده می‌شود. در مرحله‌ی بعد، با تعیین نقاطی در این فضا، مقدار تابع در نقاط آزمایشی ارزیابی و با یکدیگر مقایسه شده و بر اساس نتیجه‌ی مقایسه، قسمتی از بازه حذف می‌شود. این روند کاهشی تکرار می‌شود تا زمانی که فاصله‌ی عدم قطعیت از هر سمت کمتر از مقدار مشخص و مثبت ε شود. ε دقت مورد نظر برای تعیین عیار حد بهینه است (Ataei and Osanloo, 2003).

در روش حذفی فیبوناچی، با استفاده از دنباله‌ی اعداد فیبوناچی محل آزمون‌ها در بازه‌ی مورد نظر تعیین می‌شود. در این روش تعداد آزمون‌های مورد نظر برای حصول مقدار بهینه با دقت مطلوب قبل از شروع محاسبات به دست می‌آید و بنابر همین تعداد آزمون‌ها، محل دو آزمون ابتدایی مشخص می‌شود.

اساس روش نسبت طلایی نیز همانند روش فیبوناچی می‌باشد با این اختلاف که نیازی نیست تا در ابتدا تعداد آزمون‌ها تعیین شود و با فرض این که تعداد آزمون‌ها بسیار زیاد است محاسبات آغاز می‌شود. البته در طی محاسبات می‌توان در مورد تعداد آزمون‌ها تصمیم‌گیری کرد (عطایی، ۱۳۸۲).

فاصله‌ی عدم قطعیت باقی مانده در پایان تعداد زیادی آزمون از طریق رابطه‌ی زیر قابل

محاسبه است (Rao, 2009):

$$L_2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{F_{N-1}}{F_N} L_0 \quad (30-3)$$

$$L_3 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{F_{N-2}}{F_N} L_0 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{F_{N-2}}{F_{N-1}} \frac{F_{N-1}}{F_N} L_0 \approx \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{F_{N-1}}{F_N} \right)^2 L_0 \quad (31-3)$$

با تعمیم این نتیجه به دست خواهد آمد:

$$L_k = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{F_{N-1}}{F_N} \right)^{k-1} L_0 \quad (32-3)$$

با استفاده از رابطه‌ی جمله‌ی عمومی در دنباله‌ی فیبوناچی که به صورت زیر است:

$$F_N = F_{N-1} + F_{N-2} \quad (33-3)$$

و تقسیم هر دو طرف رابطه به F_{N-1} داریم:

$$\frac{F_N}{F_{N-1}} = 1 + \frac{F_{N-2}}{F_{N-1}} \quad (34-3)$$

با تعریف γ به صورت زیر:

$$\gamma = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{F_{N-1}}{F_N} L_0 \quad (35-3)$$

می‌توان رابطه‌ی (34-3) را به این صورت باز نویسی کرد:

$$\gamma \simeq \frac{1}{\gamma} + 1 \quad (36-3)$$

و بنابراین خواهیم داشت:

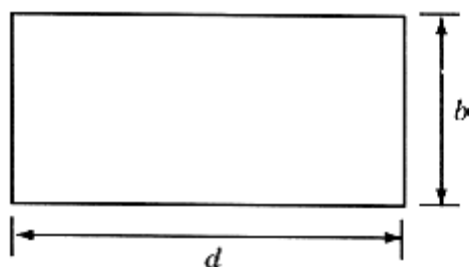
$$\gamma \simeq \frac{1}{\gamma} + 1 \quad (37-3)$$

ریشه‌ی معادله‌ی (37-3) برابر با $\gamma = 0.618$ است. از این مقدار با عنوان عدد طلایی یاد می‌شود

و دارای پیشینه‌ی تاریخی است. معمارهای یونان باستان بر این باور بوده‌اند که بنایی با ابعاد d و b که

در شکل ۳-۶ نشان داده شده است، اگر در رابطه‌ی زیر صدق کند دارای بهترین ویژگی‌هاست:

$$\frac{d+b}{d} = \frac{d}{b} = \gamma \quad (38-3)$$



شکل ۳-۶: بنای مستطیل شکل با ابعاد d و b (Rao, 2009)

منشأ این نام گذاری (روش نسبت طلایی) را هم چنین می‌توان در هندسه‌ی اقلیدسی پیدا کرد. در هندسه‌ی اقلیدسی هنگامی که یک پاره خط به دو قسمت نامساوی تقسیم می‌شود که نسبت کل به قسمت بزرگ برابر با نسبت قسمت بزرگ به کوچک است، این تناسب، نسبت طلایی نامیده می‌شود.

حال با توجه به رابطه‌ی (۳-۳۲) خواهیم داشت:

$$L_k = \left(\frac{1}{\gamma}\right)^{k-1} L_0 = (0.618)^{k-1} L_0 \quad (3-39)$$

برای مقادیر بزرگ N نسبت‌های F_{N-1}/F_N و F_{N-2}/F_{N-1} به یک عدد همگرا می‌شوند. این فرض را می‌توان در زیر ملاحظه کرد:

مقدار N	نسبت F_{N-1}/F_N
∞	۰/۶۱۸
۱۰	۰/۶۱۸۴
۹	۰/۶۱۸۱
۸	۰/۶۱۷۷
۷	۰/۶۱۹
۶	۰/۶۱۵۶
۵	۰/۶۲۵
۴	۰/۶
۳	۰/۶۶۷
۲	۰/۵

محل دو آزمون اول روش نسبت طلایی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

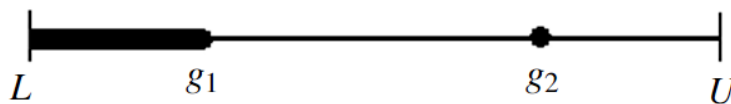
$$L_2^* = \frac{F_{N-2}}{F_{N-1}} \frac{F_{N-1}}{F_N} L_0 = \frac{L_0}{\gamma^2} = 0.382 L_0 \quad (3-40)$$

و عملیات مانند روش فیبوناچی تا رسیدن به دقت مورد نظر ادامه می‌یابد (Rao, 2009).

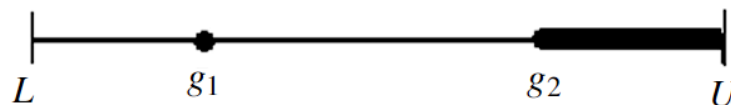
در شکل ۷-۳ چگونگی عملیات این روش برای توابع یک متغیره نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود بازه‌ی $[L, U]$ به عنوان فاصله‌ی عدم قطعیت جواب ممکن در نظر گرفته شده است. در اولین مرحله دو نقطه برای ارزیابی تابع تعیین می‌شود که از رابطه‌های زیر قابل محاسبه هستند:

$$g_1 = L + (U - L) \times 0.382 \quad (41-3)$$

$$g_2 = L + (U - L) \times 0.618 \quad (42-3)$$



$$f(g_1) < f(g_2)$$



$$f(g_1) > f(g_2)$$

شکل ۷-۳: نحوه اعمال روش جستجوی نسبت طلایی برای توابع یک متغیره (Ataei and Osanloo, 2003)

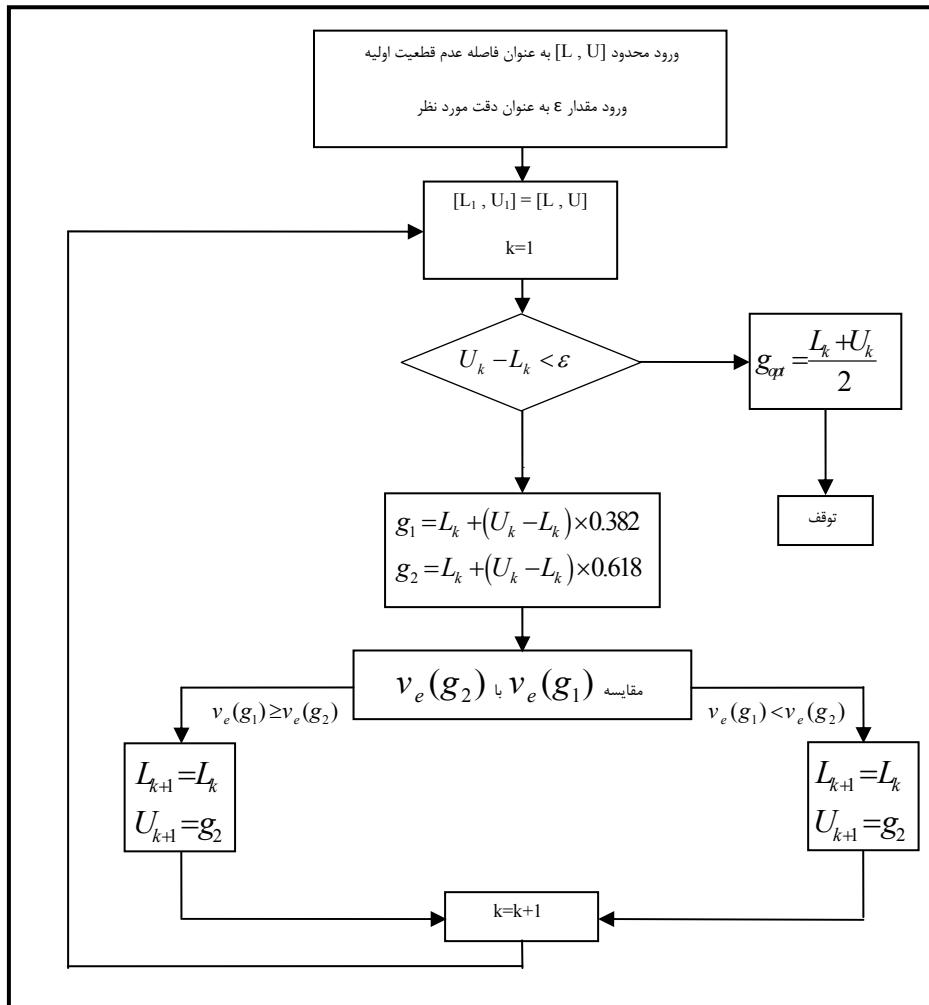
در مرحله‌ی بعد تابع هدف در نقاط g_1 و g_2 ارزیابی می‌شود. بر اساس مقدار تابع هدف در این نقاط، طول بازه‌ی عدم قطعیت جدید به صورت متوالی در هر تکرار کم می‌شود. با فرض این عملیات برای یک مساله‌ی حداکثر یابی، نتیجه‌ی مقایسه مقدار تابع و تغییر حدود بازه که به کاهش آن منجر می‌شود به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{if } f(g_1) < f(g_2) \Rightarrow L = g_1 \quad U = U \quad (43-3)$$

$$\text{if } f(g_1) > f(g_2) \Rightarrow L = L \quad U = g_2$$

همان طور که گفته شد از مرحله‌ی اول به بعد تنها یک نقطه‌ی جدید تعیین شده و با ارزیابی تابع در آن و مقایسه با نقطه‌ی قبلی موجود در بازه، کاهش بازه تا رسیدن به دقت مورد نظر ادامه می‌یابد.

در روند نمای شکل ۳-۸ مراحل اجرای این روش برای یافتن عیار حد بهینه آورده شده است.



شکل ۳-۸: روند نمای روش جستجوی نسبت طلایی برای یافتن عیار حد بهینه (عطایی، ۱۳۸۲)

همان طور که در توضیح روش‌های حذفی بحث شده است، در این روش‌ها دیگر نیازی به مشتق‌گیری از توابع و تعیین عیارهای متعادل کننده نیست بلکه با ارزیابی تابع در چند نقطه از بازه‌ی ممکن برای جواب، با دقت و سرعت بالا عیارهای حد تعیین می‌شوند. همچنین در روش‌های

حذفی در میان روش‌های حذفی، نسبت کاهش (نسبت فاصله‌ی باقی مانده پس از فرآیند حذف قسمتی از بازه به طول بازه‌ی اولیه) روش جستجوی نسبت طلایی بهینه و برابر با $0/618$ (عدد طلایی) است. در این روش نسبت طول حذف شده در هر قسمت به طول اولیه برابر با $0/382$ خواهد بود. به علاوه بر اساس الگوریتم جستجوی نسبت طلایی، در هر مرحله به جز مرحله‌ی اول نیاز به تعیین یک نقطه و ارزیابی تابع در آن می‌باشد (Ataei and Osanloo, 2003). مزیت دیگر روش جستجوی نسبت طلایی در عدم نیاز به تعریف تعداد آزمون‌ها در ابتدا است. با توجه به این مزایا، معمولاً این روش کاربرد گسترده‌تری دارد. به همین دلیل روش حذفی جستجوی نسبت طلایی برای بهینه‌یابی تابع هدف مساله مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۶-۳ الگوریتم فرا ابتکاری رقابت استعماری

در کنار روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی که منجر به یافتن جواب دقیق بهینه می‌شوند، روش‌های بهینه‌سازی هوشمند که اکثراً با الهام از پدیده‌های طبیعی به وجود آمده‌اند، موفقیت خوبی از خود نشان داده‌اند. علت توسعه‌ی این روش‌ها زمان محاسباتی بسیار بالای روش‌های کلاسیک در مسائل پیچیده است. روش‌های هوشمند که به عنوان الگوریتم‌های ابتکاری^۱ و یا تکاملی^۲ نیز شناخته می‌شوند، اگرچه هیچ تضمینی در یافتن جواب بهینه‌ی قطعی ندارند اما بر اساس پژوهش‌های انجام شده، به طور متوسط بهترین تقابل کیفیت و زمان حل مساله را به همراه داشته‌اند.

مزایای الگوریتم‌های تکاملی را می‌توان به صورت زیر عنوان کرد (Rajabioun, 2009):

۱- قدرت در برابر تغییرات پویا: روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی در برابر تغییرات پویای محیط، دارای قدرت چندانی نیستند و برای رسیدن به هدف در صورت وجود تغییرات، نیازمند شروع مجدد

1 - Heuristic

2 - Evolutionary

محاسبات می‌باشند. بر خلاف این روش‌ها، محاسبات تکاملی می‌توانند برای تطبیق جواب‌ها با توجه به تغییر شرایط به کار برده شوند.

۲- قابلیت اجرای وسیع: الگوریتم‌های تکاملی می‌توانند برای هر مساله که بتوان آن را برای بهینه‌سازی فرموله کرد به کار برده شوند مانند خطی و یا غیر خطی و یک یا چند متغیره.

۳- قابلیت استفاده توأم با دیگر روش‌ها: این الگوریتم‌ها می‌توانند با اکثر روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک ترکیب شوند.

۴- حل مسایل بدون جواب بهینه‌سازی: مزیت الگوریتم‌های تکاملی غلبه بر مسایلی است که برای حل آن‌ها هیچ گونه تخصص انسانی وجود ندارد. حتی در مواردی که این تخصص برای حل این گونه مسایل وجود دارد، این تخصص‌ها اغلب برای حل این مسایل با یک رویه‌ی مشخص نامناسب هستند.

در حالت کلی این الگوریتم‌ها را به بخش می‌توان تقسیم بندی کرد:

۱- الگوریتم‌هایی که بر ویژگی‌های ساختاری مساله و ساختار جواب متمرکز می‌شوند و با استفاده از آن‌ها الگوریتم‌های سازنده یا جستجوی محلی تعریف می‌کنند. این الگوریتم‌ها به عنوان ابتکاری شناخته می‌شوند.

۲- الگوریتم‌هایی که بر هدایت ابتکاری یک الگوریتم سازنده یا جستجوی محلی متمرکز می‌شوند، به گونه‌ای که آن الگوریتم بتواند بر شرایط حساس (مانند فرار از بهینه‌ی محلی) غلبه کند. به این الگوریتم‌ها، فرا ابتکاری^۱ گفته می‌شود.

۳- الگوریتم‌هایی که بر ترکیب یک چارچوب یا مفهوم ابتکاری با گونه‌هایی از برنامه‌ریزی

ریاضی (معمولاً روش‌های دقیق) متمرکز می‌شوند. این روش‌ها به نام فوق فرا ابتکاری^۱ هستند.

روش‌های ابتکاری قابلیت عمل کرد خوبی دارند (گاهی اوقات تا حد بهینگی) اما احتمال توقف در جواب‌های با کیفیت پایین (بهینه‌های محلی) در آن‌ها بالا است. برای بهبود این الگوریتم‌ها از اواسط دهه هفتاد میلادی، موج تازه‌ای از رویکردها در این زمینه آغاز شد که منجر به توسعه‌ی الگوریتم‌های فرا ابتکاری گردید. این الگوریتم‌ها صریحاً یا به صورت ضمنی تقابل بین ایجاد تنوع جستجو (وقتی علایمی وجود دارد که جستجو به سمت مناطق بد فضای جستجو می‌رود) و تشدید جستجو (با این هدف که بهترین جواب در منطقه مورد بررسی را پیدا کند) را مدیریت می‌کنند. از میان این الگوریتم‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (مرجع الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، مرداد ۱۳۹۲):

الگوریتم ژنتیک^۲، بازیخت شبیه‌سازی شده^۳، جستجوی ممنوع^۴، الگوریتم ازدحام ذرات^۵، بهینه‌سازی کلونی مورچگان^۶، الگوریتم کرم شب‌تاب^۷، الگوریتم زنبور عسل^۸، الگوریتم جستجوی هارمونی^۹ و الگوریتم بهینه‌سازی فاخته^{۱۰}.

الگوریتم‌های نام برده شده در این جا عمدتاً الهام گرفته از فرآیندهای طبیعی می‌باشند و در اراییه‌ی این الگوریتم‌ها به سایر نمودهای تکاملی انسان توجه نشده است. از این رو در سال ۱۳۸۷ اسماعیل آتش‌پز با الهام از یک پدیده‌ی اجتماعی - انسانی الگوریتم رقابت استعماری را اراییه کرد. الگوریتم وی با الهام از فرآیند استعمار به عنوان مرحله‌ای از تکامل اجتماعی - سیاسی بشر و با استفاده از مدل‌سازی ریاضی این پدیده تاریخی، توسعه یافته است.

1 - Hyper-Heuristic

2 - Genetic Algorithm (GA)

3 - Simulated Annealing (SA)

4 - Tabu Search (TA)

5 - Particle Swarm Optimization (PSO)

6 - Ant Colony Optimization (ACO)

7 - Firefly Algorithm (FA)

8 - Bee Algorithm (BA)

9 - Harmony Search (HS)

10 - Cuckoo Optimization Algorithm (COA)

این الگوریتم برای حل مسایل بسیاری در حوزه‌ی بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش‌ها درباره‌ی قابلیت این الگوریتم، در این پژوهش برای بهینه‌سازی عیار حد علاوه بر روش جستجوی نسبت طلایی، از الگوریتم رقابت استعماری هم استفاده شده است. در ادامه به تشریح این الگوریتم پرداخته شده است.

مراحل مختلف این الگوریتم به صورت زیر است که در ادامه هر بخش تشریح خواهد شد^۱:

۱- شکل‌دهی امپراتوری‌های اولیه

۲- مدل‌سازی سیاست جذب

۳- جابجایی موقعیت مستعمره و امپریالیست

۴- تعیین قدرت هر امپراتوری

۵- رقابت استعماری

۶- سقوط امپراتوری‌های ضعیف

۷- باقی ماندن فقط یک امپراتوری (همگرایی)

۱-۳-۶-۳ شکل‌دهی امپراتوری‌های اولیه

در بهینه‌سازی، هدف یافتن یک جواب بهینه بر حسب متغیرهای مساله است. برای این منظور باید آرایه‌هایی از متغیرهای مساله را که باید بهینه شوند، ایجاد شوند. در الگوریتم‌های تکاملی به مجموعه‌ی این آرایه‌ها جمعیت گفته می‌شود. الگوریتم رقابت استعماری نیز همانند دیگر الگوریتم‌های

۱- در این بخش از منبع (آتش‌پز، ۱۳۸۷) که مرجع اصلی این روش می‌باشد و همچنین مرجع اینترنتی (محاسبات تکاملی و الگوریتم رقابت استعماری، مرداد ۱۳۹۲) استفاده شده است.

ابتکاری با یک جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آن‌ها یک کشور نامیده می‌شوند، شروع می‌شود. در یک مسئله بهینه‌سازی N_{var} بعدی، یک کشور، یک آرایه $1 \times N_{var}$ است. این آرایه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$country = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{var}}] \quad (44-3)$$

مقادیر متغیره‌ها در یک کشور، به صورت اعداد اعشاری نمایش داده می‌شوند. از دیدگاه تاریخی- فرهنگی، اجزای تشکیل دهنده یک کشور را می‌توان ویژگی‌های اجتماعی- سیاسی آن کشور، همچون فرهنگ، زبان، ساختار اقتصادی و سایر ویژگی‌ها در نظر گرفت. متغیرهای مجهول تابع هزینه $(p_1, p_2, \dots, p_{N_{var}})$ که در طی فرآیند بهینه‌سازی دنبال می‌شوند، در نگاه اجتماعی- سیاسی ویژگی‌هایی تاریخی و فرهنگی هستند که یک کشور را به نقطه کمینه تابع هزینه رهنمون می‌سازند. در حقیقت در حل یک مساله بهینه‌سازی توسط این الگوریتم، بهترین کشور (کشوری با بهترین ویژگی‌های اجتماعی- سیاسی) جستجو می‌شود. یافتن این کشور در حقیقت معادل یافتن بهترین پارامترهای مساله است که کمترین مقدار تابع هزینه را تولید می‌کنند.

برای شروع الگوریتم، از $N_{country}$ کشور اولیه ایجاد شده، تعداد N_{imp} از بهترین اعضای این جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) به عنوان استعمارگر¹ و باقیمانده تعداد کشورها یعنی N_{col} به عنوان مستعمراتی² که هر کدام به یک امپراتوری تعلق دارند، انتخاب می‌شوند. برای تقسیم مستعمرات اولیه بین امپریالیست‌ها، به هر امپریالیست، تعدادی از مستعمرات را که این تعداد متناسب با قدرت آن است اختصاص داده می‌شود. برای انجام این کار، با داشتن هزینه همه امپریالیست‌ها، هزینه نرمالیزه آن‌ها به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$C_n = \max_i \{c_i\} - c_n \quad (45-3)$$

1 - Imperialist
2 - Colony

که در آن c_n ، هزینه امپریالیست نام، $\max\{c_i\}$ بیشترین هزینه میان امپریالیست‌ها و C_n ، هزینه نرمالیزه شده این امپریالیست، می‌باشد. هر امپریالیستی که دارای هزینه بیشتری باشد (امپریالیست ضعیف‌تری باشد)، دارای هزینه نرمالیزه کمتری خواهد بود. با داشتن هزینه نرمالیزه، قدرت نسبی نرمالیزه‌ی هر امپریالیست، به صورت زیر محاسبه شده و بر مبنای آن، کشورهای مستعمره بین امپریالیست‌ها تقسیم می‌شوند.

$$p_n = \left| \frac{C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} C_i} \right| \quad (46-3)$$

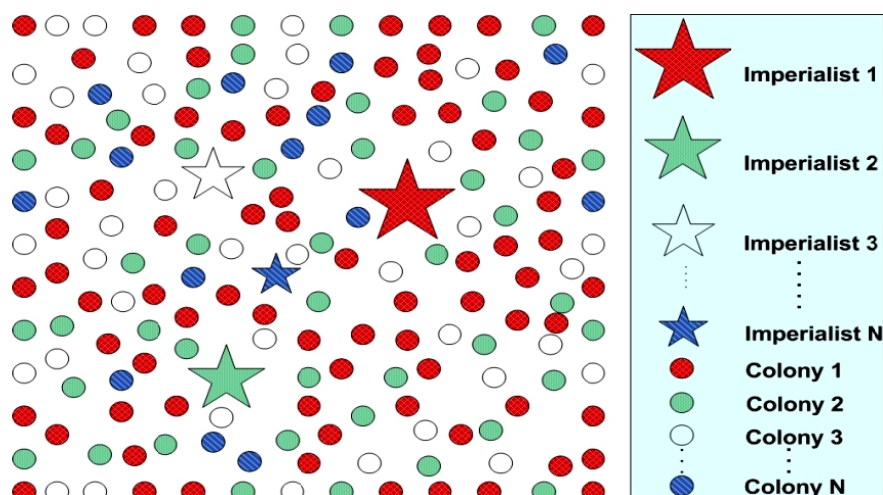
از یک دید دیگر، قدرت نرمالیزه شده یک امپریالیست، نسبت مستعمراتی است که توسط آن امپریالیست اداره می‌شود. بنابراین تعداد اولیه‌ی مستعمرات یک امپریالیست برابر خواهد بود با:

$$N.C_n = \text{round}\{p_n \cdot (N_{col})\} \quad (47-3)$$

که در آن $N.C_n$ ، تعداد اولیه مستعمرات یک امپراتوری و N_{col} نیز تعداد کل کشورهای مستعمره موجود در جمعیت کشورهای اولیه است. round نیز تابعی است که نزدیک‌ترین عدد صحیح به یک عدد اعشاری را می‌دهد. با در نظر گرفتن $N.C_n$ برای هر امپراتوری، به این تعداد از کشورهای مستعمره اولیه را به صورت تصادفی انتخاب کرده و به امپریالیست نام داده می‌شود. با داشتن حالت اولیه تمام امپراتوری‌ها، الگوریتم رقابت استعماری شروع می‌شود. روند تکامل در یک حلقه قرار دارد که تا برآورده شدن یک شرط توقف، ادامه می‌یابد.

شکل ۳-۹ چگونگی شکل‌گیری امپراتوری‌های اولیه را نشان می‌دهد. همان گونه که در این

شکل نشان داده شده است، امپراتوری‌های بزرگ‌تر تعداد بیشتری مستعمره دارند.

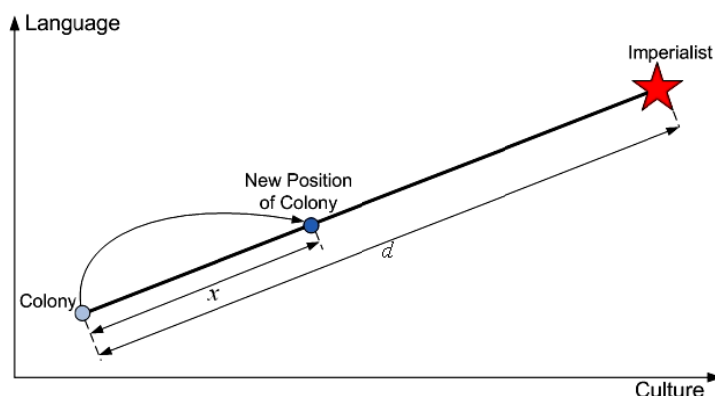


شکل ۳-۹: چگونگی شکل‌گیری امپراتوری‌های اولیه

۲-۳-۶-۳ مدل‌سازی سیاست جذب: حرکت مستعمره‌ها به سمت امپریالیست

بر اساس عملکرد کشورهای استعمارگر، سیاست همگون‌سازی^۱ (جذب) با هدف تحلیل فرهنگ و ساختار اجتماعی مستعمرات در فرهنگ حکومت مرکزی انجام می‌گرفت. با در نظر گرفتن شیوه نمایش یک کشور در حل مساله بهینه‌سازی، در حقیقت این حکومت مرکزی با اعمال سیاست جذب سعی دارد تا کشور مستعمره را در راستای ابعاد مختلف اجتماعی-سیاسی به خود نزدیک کند. این بخش از فرآیند استعمار در الگوریتم بهینه‌سازی، به صورت حرکت مستعمرات به سمت کشور امپریالیست، مدل شده است. شکل ۳-۱۰ شمای کلی این حرکت را نشان می‌دهد.

1- Assimilation



شکل ۳-۱۰: شمای کلی حرکت مستعمرات به سمت امپریالیست

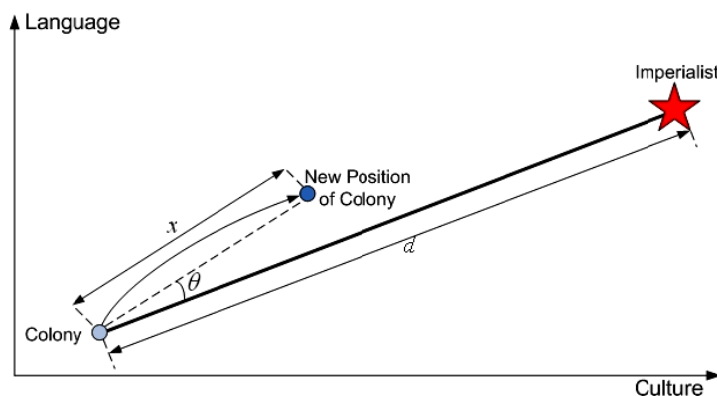
مطابق این شکل کشور امپریالیست کشور مستعمره را در راستای محورهای فرهنگ و زبان به سمت خود جذب می‌کند. همان گونه که در این شکل نشان داده شده است، کشور مستعمره به اندازه x واحد در جهت خط واصل مستعمره به استعمارگر حرکت کرده و به موقعیت جدید (New Position of Colony) کشانده می‌شود. در این شکل فاصله میان استعمارگر و مستعمره با d نشان داده شده است. x نیز عددی تصادفی با توزیع یکنواخت (و یا هر توزیع مناسب دیگر) می‌باشد. یعنی برای x داریم:

$$x \sim U(0, \beta \times d) \quad (48-3)$$

که در آن β عددی بزرگ‌تر از یک و نزدیک به ۲ می‌باشد. یک انتخاب مناسب می‌تواند $\beta=2$ باشد. وجود ضریب $\beta > 1$ باعث می‌شود تا کشور مستعمره در حین حرکت به سمت کشور استعمارگر، از جهت‌های مختلف به آن نزدیک شود.

با بررسی تاریخی پدیده همگون‌سازی، یک حقیقت آشکار در این زمینه این است که علی‌رغم اینکه کشورهای استعمارگر به طور جدی پیگیر سیاست جذب بودند، اما وقایع به طور کامل مطابق سیاست اعمال شده آن‌ها پیش نمی‌رفت و انحرافات در نتیجه کار وجود داشت. در الگوریتم معرفی شده، این انحراف احتمالی با افزودن یک زاویه تصادفی به مسیر جذب مستعمرات، انجام می‌گیرد.

بدین منظور، در حرکت مستعمرات به سمت استعمارگر، زاویه‌ی تصادفی کوچکی نیز به جهت حرکت مستعمره، اضافه می‌شود. شکل ۱۱-۳ این حالت را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۳: حرکت واقعی مستعمرات به سمت امپریالیست

بدین منظور این بار به جای حرکت به اندازه α به سمت کشور استعمارگر و در جهت بردار واصل مستعمره به استعمارگر، به همان میزان، ولی با انحراف θ در مسیر، به حرکت خود ادامه می‌دهیم. θ را به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت در نظر گرفته می‌شود (اما هر توزیع دلخواه و مناسب دیگر نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد):

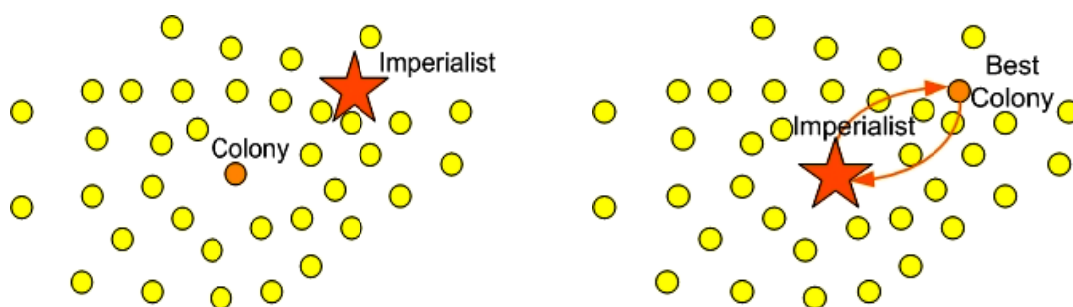
$$\theta \sim U(-\gamma, \gamma) \quad (49-3)$$

در این رابطه، γ پارامتری دلخواه می‌باشد که افزایش آن باعث افزایش جستجوی اطراف امپریالیست شده و کاهش آن نیز باعث می‌شود تا مستعمرات تا حد ممکن، به بردار واصل مستعمره به استعمارگر، نزدیک حرکت کنند. با در نظر گرفتن واحد رادیان برای θ ، عددی نزدیک به $\pi/4$ در اکثر پیاده‌سازی‌ها، انتخاب مناسبی بوده است.

۳-۳-۶-۳ جابجایی موقعیت مستعمره و امپریالیست

سیاست جذب در عین نابودی ساختارهای اجتماعی-سیاسی کشور مستعمره در بعضی موارد نتایج مثبتی را نیز برای آن‌ها در پی داشت. بعضی از کشور در نتیجه اعمال این سیاست به نوعی از

خودباوری عمومی دست یافتند و پس از مدتی همان تحصیل‌کردگان (به عبارت دیگر جذب شدگان فرهنگ استعماری) بودند که به رهبری ملت خود برای رهایی از چنگال استعمار پرداختند. نمونه‌های فراوانی از این موارد را می‌توان در مستعمرات انگلیس و فرانسه یافت. از سوی دیگر نگاهی به فراز و نشیب چرخش قدرت در کشورها به خوبی نشان می‌دهد که کشورهایی که زمانی در اوج قدرت سیاسی - نظامی بودند، پس از مدتی سقوط کردند و در مقابل کشورهایی سکان قدرت را در دست گرفتند که زمانی هیچ قدرتی در دست نداشتند. در مدل‌سازی این واقعه تاریخی در الگوریتم معرفی شده به این صورت عمل شده است که در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر، ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیتی بهتر از امپریالیست برسند (به نقاطی در تابع هزینه برسند که هزینه کمتری را نسبت به مقدار تابع هزینه در موقعیت امپریالیست، تولید می‌کنند) در این حالت کشور استعمارگر و کشور مستعمره جای خود را با همدیگر عوض کرده و الگوریتم با کشور استعمارگر در موقعیت جدید ادامه یافته و این بار این کشور امپریالیست جدید است که شروع به اعمال سیاست همگون‌سازی بر مستعمرات خود می‌کند. تغییر جای استعمارگر و مستعمره، در شکل ۳-۱۲-الف نشان داده شده است. در این شکل، بهترین مستعمره‌ی امپراتوری، که هزینه‌ای کمتر از خود امپریالیست دارد، به رنگ تیره‌تر نشان داده شده است. شکل ۳-۱۲-ب کل امپراتوری را پس از تغییر موقعیت‌ها نشان می‌دهد.



ب- کل امپراتوری، پس از تغییر موقعیت‌ها

الف- تغییر جای استعمارگر و مستعمره

شکل ۳-۱۲: جابجایی موقعیت استعمارگر و مستعمره در الگوریتم

۴-۳-۶-۳ قدرت کل یک امپراتوری

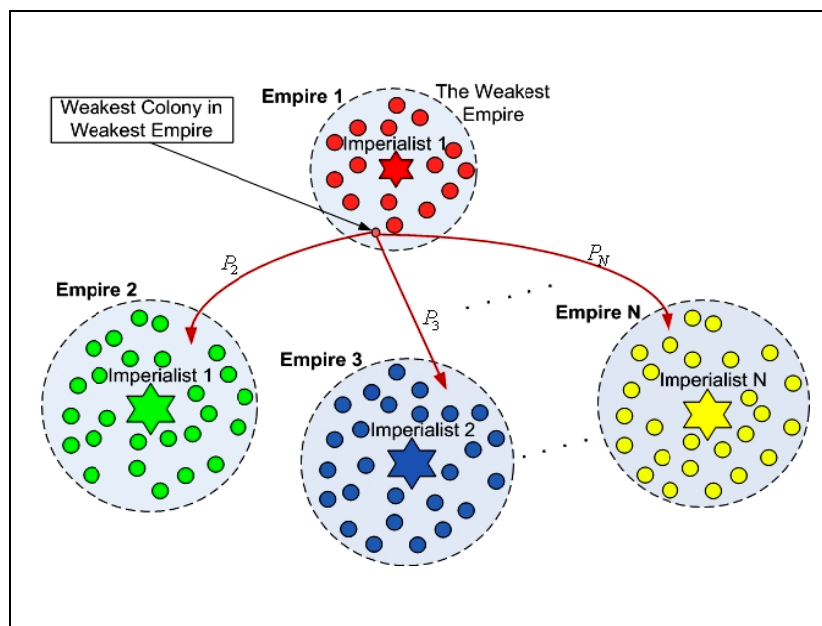
قدرت یک امپراتوری برابر است با قدرت کشور استعمارگر، به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن. بدین ترتیب برای هزینه کل یک امپراتوری داریم:

$$T.C_n = Cost(imperialist_n) + \xi \text{ mean}\{Cost(colonies\ of\ empire_n)\} \quad (50-3)$$

که در آن $T.C_n$ هزینه کل امپراتوری n ام و ξ عددی مثبت است که معمولاً بین صفر و یک و نزدیک به صفر در نظر گرفته می‌شود. کوچک در نظر گرفتن ξ ، باعث می‌شود که هزینه کل یک امپراتوری، تقریباً برابر با هزینه حکومت مرکزی آن (کشور امپریالیست)، شود و افزایش ξ نیز باعث افزایش تاثیر میزان هزینه مستعمرات یک امپراتوری در تعیین هزینه کل آن می‌شود. در حالت نوعی $\xi = 0.05$ در اکثر پیاده‌سازی به جواب‌های مطلوبی منجر شده است.

۵-۳-۶-۳ رقابت استعماری

همان‌گونه که قبلاً نیز بیان شد، هر امپراتوری‌ای که نتواند بر قدرت خود بیفزاید و قدرت رقابت خود را از دست بدهد، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، حذف خواهد شد. این حذف شدن، به صورت تدریجی صورت می‌پذیرد. بدین معنی که به مرور زمان، امپراتوری‌های ضعیف، مستعمرات خود را از دست داده و امپراتوری‌های قوی‌تر، این مستعمرات را تصاحب کرده و بر قدرت خویش می‌افزایند. برای مدل کردن این واقعیت، فرض شده است که امپراتوری در حال حذف، ضعیف‌ترین امپراتوری موجود می‌باشد. بدین ترتیب در تکرار الگوریتم، یکی یا چند تا از ضعیف‌ترین مستعمرات ضعیف‌ترین امپراتوری را برداشته و برای تصاحب این مستعمرات، رقابتی میان کلیه امپراتوری‌ها ایجاد می‌شود. مستعمرات مذکور، لزوماً توسط قوی‌ترین امپراتوری، تصاحب نخواهند شد، بلکه امپراتوری‌های قوی‌تر، احتمال تصاحب بیشتری دارند. شکل ۳-۱۳ شمای کلی این بخش از الگوریتم را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۳: شمای کلی رقابت استعماری: تصاحب مستعمرات امپراتوری‌های دیگر با احتمال بالاتر توسط امپراتوری‌های بزرگ‌تر

برای مدل‌سازی رقابت میان امپراتوری‌ها برای تصاحب این مستعمرات، ابتدا احتمال تصاحب هر امپراتوری (که متناسب با قدرت آن امپراتوری می‌باشد) با در نظر گرفتن هزینه کل امپراتوری، به ترتیب زیر محاسبه می‌شود. برای این منظور در ابتدا با توجه به هزینه کل امپراتوری، هزینه کل نرمالیزه شده آن تعیین می‌شود:

$$N.T.C._n = \max_i \{T.C._i\} - T.C._n \quad (51-3)$$

در این رابطه $T.C._n$ ، هزینه کل امپراتوری n ام و $N.T.C._n$ نیز، هزینه کل نرمالیزه شده آن امپراتوری می‌باشد. هر امپراتوری که $T.C._n$ کمتری داشته باشد $N.T.C._n$ بیشتری خواهد داشت. در حقیقت $T.C._n$ معادل هزینه کل یک امپراتوری و $N.T.C._n$ معادل قدرت کل آن می‌باشد. امپراتوری با کمترین هزینه، دارای بیشترین قدرت است. با داشتن هزینه کل نرمالیزه شده، احتمال (قدرت) تصاحب مستعمره رقابت، توسط هر امپراتوری، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{p_n} = \left| \frac{N.T.C._n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} N.T.C._i} \right| \quad (52-3)$$

با داشتن احتمال تصاحب هر امپراتوری، مکانیزمی همانند چرخه رولت^۱ در الگوریتم ژنتیک مورد نیاز است تا مستعمره مورد رقابت را با احتمال متناسب با قدرت امپراتوری‌ها در اختیار یکی از آن‌ها قرار دهد. در کنار امکان استفاده از چرخ رولت موجود، در این نوشتار مکانیزم جدیدی برای پیاده‌سازی این فرآیند معرفی شده است که نسبت به چرخه رولت دارای هزینه محاسباتی بسیار کمتری می‌باشد. زیرا عملیات نسبتاً زیاد مربوط به محاسبه تابع توزیع جمعی احتمال^۲ را که در چرخه رولت مورد نیاز است را حذف می‌کند و فقط به داشتن تابع چگالی احتمال^۳ نیاز دارد. در ادامه مکانیزم مطرح شده برای اختصاص متناسب با احتمال مستعمره مورد رقابت به امپراتوری‌های رقیب توضیح داده می‌شود.

با داشتن احتمال تصاحب هر امپراتوری، برای اینکه مستعمرات مذکور به صورت تصادفی، ولی با احتمال وابسته به احتمال تصاحب هر امپراتوری، بین امپراتوری‌ها تقسیم شود؛ بردار \mathbf{P} از روی مقادیر احتمال فوق، به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$\mathbf{P} = [p_{p_1}, p_{p_2}, p_{p_3}, \dots, p_{p_{N_{imp}}}] \quad (53-3)$$

بردار \mathbf{P} دارای سایز $1 \times N_{imp}$ می‌باشد و از مقادیر احتمال تصاحب امپراتوری‌ها تشکیل شده است. سپس بردار تصادفی \mathbf{R} ، هم سایز با بردار \mathbf{P} را تشکیل می‌دهیم. آرایه‌های این بردار، اعدادی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0,1]$ می‌باشند.

$$\mathbf{R} = [r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N_{imp}}] \quad (54-3)$$

$$r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N_{imp}} \sim U(0,1)$$

1 - Roulette Wheel

2 - Cumulative Distribution Function (CDF)

3 - Probability Density Function (PDF)

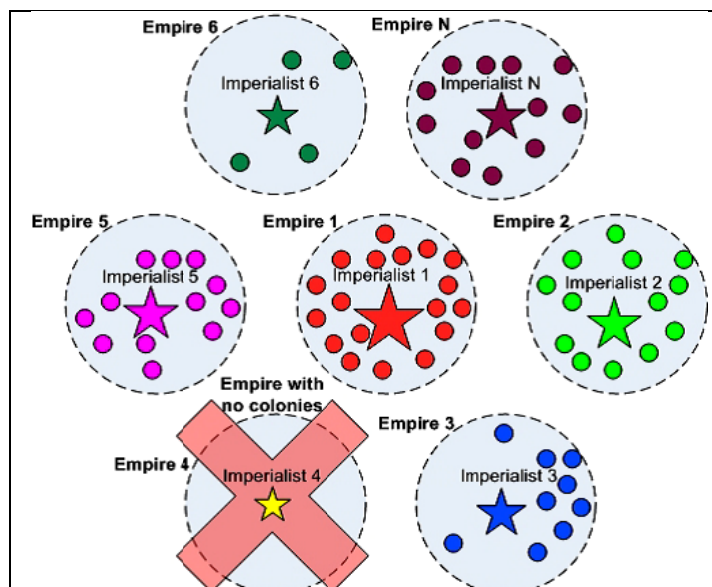
سپس بردار \mathbf{D} را به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \mathbf{P} - \mathbf{R} = [D_1, D_2, D_3, \dots, D_{N_{imp}}] \\ &= [p_{p_1} - r_1, p_{p_2} - r_2, p_{p_3} - r_3, \dots, p_{p_{N_{imp}}} - r_{N_{imp}}] \end{aligned} \quad (55-3)$$

با داشتن بردار \mathbf{D} ، مستعمرات مذکور به امپراتوری‌ای داده می‌شود که اندیس مربوط به آن در بردار \mathbf{D} بزرگ‌تر از بقیه می‌باشد. امپراتوری‌ای که بیشترین احتمال تصاحب را داشته باشد، با احتمال بیشتری اندیس مربوط به آن در بردار \mathbf{D} ، بیشترین مقدار را خواهد داشت. عدم نیاز به محاسبه CDF باعث می‌شود که این مکانیزم نسبت به چرخه رولت با سرعت به مراتب بیشتری عمل کند. مکانیزم جدید مطرح شده نه تنها می‌تواند در اختصاص مستعمره به امپراتوری بر حسب احتمال تصاحب آن‌ها مفید باشد، بلکه به عنوان یک مکانیزم انتخاب بر حسب احتمال می‌تواند جایگزین چرخه رولت در الگوریتم ژنتیک برای انتخاب والدین شود و سرعت اجرای عملیات در آن را تا حد زیادی افزایش دهد. با تصاحب مستعمره توسط یکی از امپراتوری‌ها، عملیات این مرحله از الگوریتم نیز به پایان می‌رسد.

۳-۳-۶ سقوط امپراتوری‌های ضعیف

در جریان رقابت‌های امپریالیستی، خواه نا خواه، امپراتوری‌های ضعیف به تدریج سقوط کرده و مستعمراتشان به دست امپراتوری‌های قوی‌تر می‌افتد. شروط متفاوتی را می‌توان برای سقوط یک امپراتوری در نظر گرفت. در الگوریتم پیشنهاد شده، یک امپراتوری زمانی حذف شده تلقی می‌شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد. شکل ۳-۱۴ این مساله را به خوبی نشان می‌دهد. در این شکل، امپراتوری شماره ۴ به علت از دست دادن کلیه مستعمراتش، دیگر قدرتی برای رقابت ندارد و باید از میان بقیه امپراتوری‌ها حذف شود.



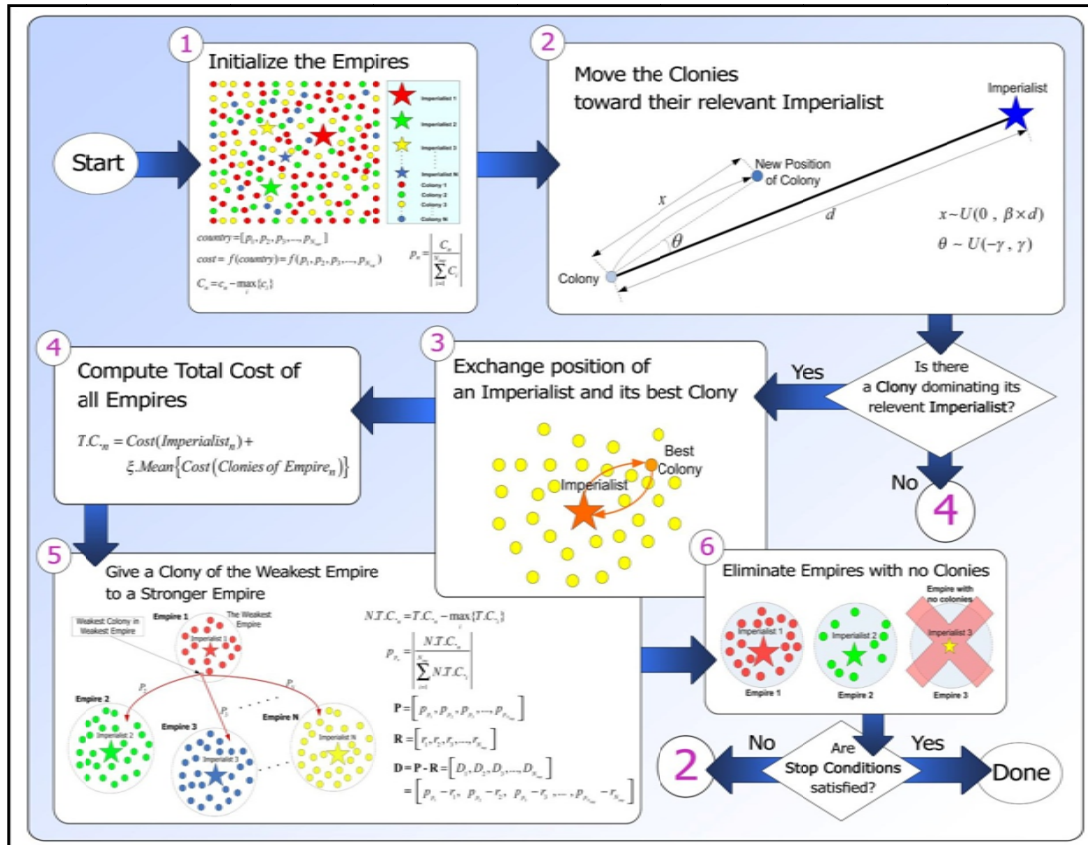
شکل ۳-۱۴: سقوط امپراتوری ضعیف؛ امپراتوری شماره ۴

همگرایی ۷-۳-۶-۳

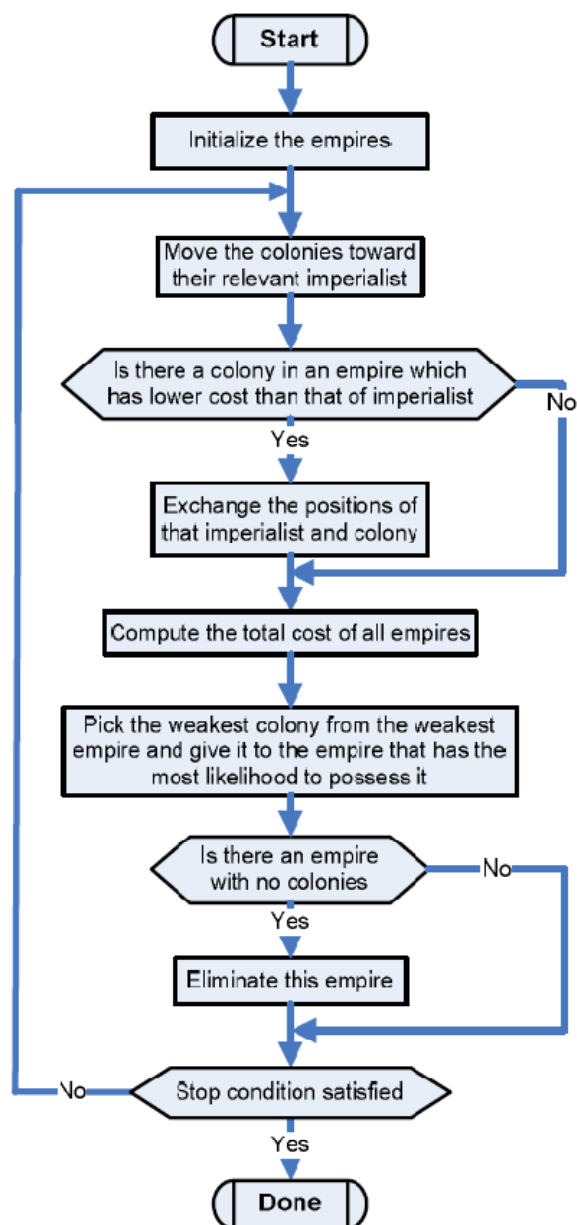
الگوریتم مورد نظر تا برآورده شدن یک شرط همگرایی، و یا تا اتمام تعداد کل تکرارها، ادامه می‌یابد. پس از مدتی همه‌ی امپراتوری‌ها سقوط کرده و تنها یک امپراتوری باقی خواهد ماند و مابقی کشورها تحت کنترل این امپراتوری واحد، قرار می‌گیرند. در این دنیای ایده‌آل جدید، همه‌ی مستعمرات، توسط یک امپراتوری واحد اداره می‌شوند و موقعیت‌ها و هزینه‌های مستعمرات، برابر با موقعیت و هزینه کشور امپریالیست است. در این دنیای جدید، تفاوتی، نه تنها، میان مستعمرات، بلکه میان مستعمرات و کشور امپریالیست، وجود ندارد. به عبارت دیگر، همه‌ی کشورها، در عین حال، هم مستعمره و هم استعمارگر هستند. در چنین موقعیتی رقابت امپریالیستی به پایان رسیده و به عنوان یکی از شروط توقف الگوریتم متوقف می‌شود.

در شکل ۳-۱۵ شمای کلی این الگوریتم و در شکل ۳-۱۶ روند نمای این الگوریتم نشان داده

شده است.



شکل ۳-۱۵: شمای کلی الگوریتم رقابت استعماری



شکل ۳-۱۶: روند نمای الگوریتم رقابت استعماری (Atashpaz and Lucas, 2007)

به منظور بهینه‌سازی عیار حد مطابق با روند عملیاتی معدن شماره ۱ گل‌گهر، در ابتدا نیاز است تا تابع هدف برای تعریف شود. از این رو در فصل آینده با مدل‌سازی عملیات در این معدن، تابع هدف بهینه‌سازی برای آن تعریف و تعیین شده است.

فصل چهارم

توسعه‌ی مدل مطابق معدن

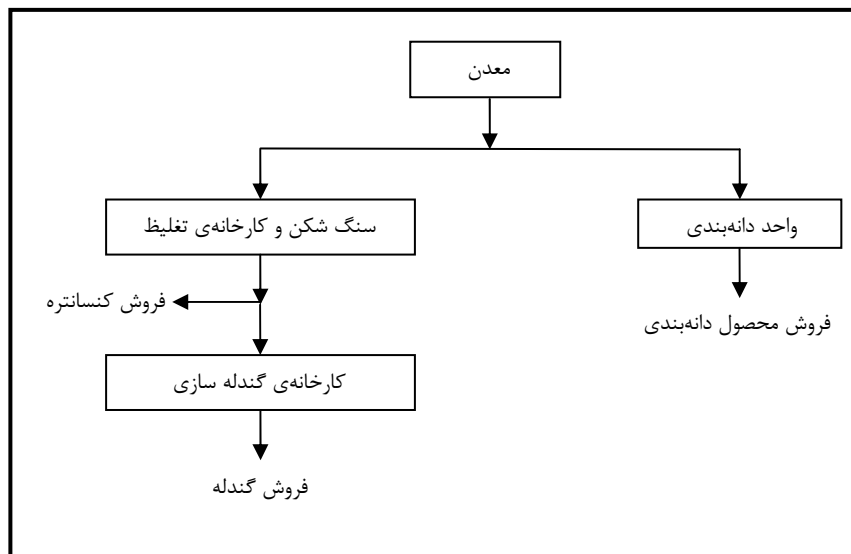
شماره ۱ گل گهر

۱-۴ مقدمه

به منظور بهینه‌سازی عیار حد در معدن شماره ۱ گل‌گهر نیاز است تا تابع هدف این مساله بهینه‌سازی تعریف شود. بنابراین بایستی در ابتدا روند عملیاتی معدن مدل‌سازی شود و بر اساس آن روابط اساسی حاصل گردد. از این رو در فصل حاضر با مدل‌سازی روند عملیاتی معدن، به تعریف و تعیین تابع هدف بهینه‌سازی عیار حد در آن پرداخته شده است.

۲-۴ مدل‌سازی و تعریف روابط اساسی

روند عملیاتی معدن شماره ۱ به صورت شکل ۴-۱ می‌باشد. همان طور که در شکل دیده می‌شود معدن قابلیت فروش سه نوع محصول دانه بندی (با ابعاد ۰ - ۶، ۶ - ۱۲، ۱۲ - ۲۵ میلی‌متر)، کنسانتره و گندله را دارا است. با توجه به این که در الگوریتم لین تنها فروش یک محصول در نظر گرفته شده است، بنابراین نیاز است تا روابط اساسی هزینه، درآمد و سود برای این معدن با توجه به روند آن تعریف شود. قابل ذکر است که در مدل‌سازی عملیات معدن مانند آن چه در شکل آورده شده، ساده‌سازی‌هایی اعمال گردیده است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به حذف دپوهای مواد معدنی، ادغام دو کارخانه‌ی فرآوری مربوط به خوراک معدن ۱، حذف مسیر و دپوی باطله و هم‌چنین ادغام سنگ شکن و کارخانه‌ی تغلیظ اشاره کرد.



شکل ۴-۱: نمودار روند عملیاتی معدن شماره ۱ گل‌گهر

همان طور که در شکل ۴-۱ ملاحظه می‌شود و قبلاً هم ذکر شد معدن قابلیت فروش سه نوع محصول از معدن ۱ را دارا است اما این امر مستلزم فراهم بودن شرایطی است. بنابراین شرایط در انتخاب مسیر مواد به سنگ شکن و کارخانه‌ی تغلیظ و یا واحد دانه‌بندی، اولویت با تأمین خوراک حداکثر برای کارخانه‌ی تغلیظ است. در صورت تأمین این خوراک، مواد معدنی در صورت دارا بودن متوسط عیار ۵۷٪ به واحد دانه‌بندی ارسال خواهند شد. البته واحد دانه‌بندی نیز دارای حداکثر ظرفیت ۱۰۰۰۰۰۰ تن در سال است که خود یک عامل محدود کننده و تعیین کننده برای نوع محصول فروشی است. از سوی دیگر برای مواد خروجی از کارخانه‌ی تغلیظ نیز چنین شرایطی وجود دارد. بر این اساس از میان فروش کنسانتره‌ی خروجی از کارخانه‌ی تغلیظ و یا ارسال مواد به کارخانه‌ی گندله‌سازی، اولویت با تأمین خوراک حداکثری برای کارخانه‌ی گندله‌سازی است و مقدار مواد اضافه بر این ظرفیت به صورت کنسانتره به فروش خواهند رسید.

به منظور مشخص کردن تابع هدف بهینه‌سازی عیار حد منطبق با مدل و شرایط عملیاتی این معدن در ابتدا نیاز است تا معادلات اساسی هزینه، درآمد و سود، تعریف و مشخص شود. در جدول ۴-۱ پارامترهای به کار رفته در این مدل سازی آورده شده است.

جدول ۴-۱: متغیرهای به کار رفته در مدل

نماد	تعریف	واحد
Q_m	میزان کل مواد قابل معدن کاری	ton
Q_c	مقدار ماده معدنی فرستاده شده به کارخانه تغلیظ یا واحد دانه‌بندی	ton
Q_{con}	مقدار کنسانتره تولید شده	ton
Q_p	مقدار گندله‌ی تولیدی	ton
Q_{gr}	مقدار ماده‌ی معدنی دانه‌بندی شده	ton
M	ظرفیت استخراج	ton/year
C	ظرفیت تغلیظ	ton/year
V_p	ظرفیت گندله	ton/year
α	درصد کل مواد معدنی استخراجی فرستاده شده به کارخانه تغلیظ	%
β	درصد کل کنسانتره ارسالی به کارخانه‌ی گندله سازی	%
P_p	قیمت فروش گندله با کسر هزینه‌های فروش	ریال/ton
P_c	قیمت فروش کنسانتره با کسر هزینه‌های فروش	ریال/ton
P_{gr}	قیمت فروش محصول دانه‌بندی با کسر هزینه‌های فروش	ریال/ton
m	هزینه استخراج	ریال/ton
c	هزینه تغلیظ	ریال/ton
p	هزینه گندله سازی	ریال/ton
C_{gr}	هزینه دانه‌بندی	ریال/ton
f	هزینه‌های ثابت	ریال/ton
T	طول دوره تولید	year
y_c	بازیابی کارخانه‌ی تغلیظ	%
y_p	بازیابی کارخانه‌ی گندله سازی	%
d	نرخ تنزیل	%

تعیین مسیر مواد که منجر به تولید و فروش نوع خاصی از محصول می‌شود بر اساس شرایطی از پیش تعریف شده تعیین می‌گردد. پارامترهای ظرفیت حداکثری هر یک از واحدها از تأثیرگذارترین محدودیت‌ها و عوامل شرایطی است. بنابراین در جدول ۴-۲ بیشینه ظرفیت هر یک از واحدها آورده شده است. در این جا ذکر این نکته ضروری است که این ظرفیت‌ها برای مدت استخراجی، به صورت ثابت فرض شده‌اند.

جدول ۴-۲: حداکثر ظرفیت واحدهای مختلف

واحد	ظرفیت (تن)
استخراج	۴۰۰۰۰۰۰
تغلیظ	۱۲۰۰۰۰۰۰
گندله	۴۲۰۰۰۰۰
دانه‌بندی	۱۰۰۰۰۰۰

به منظور تعیین تابع هدف بهینه‌سازی نیاز است تا با استفاده از روابط درآمدی هزینه، رابطه‌ی

سود حاصل از عملیات محاسبه شود. با توجه به شرایط عملیاتی معدن برای محاسبه‌ی هزینه‌ها داریم:

$$T_1 = m Q_m \quad (1-4)$$

$$T_2 = c \alpha Q_c \quad (2-4)$$

$$T_3 = p Q_p \quad (3-4)$$

$$T_4 = C_{gr} (1-\alpha) Q_c \quad (4-4)$$

$$T_5 = f T \quad (5-4)$$

که در رابطه‌ی مذکور T_1 هزینه‌ی معدن‌کاری، T_2 هزینه‌ی تغلیظ، T_3 هزینه‌ی گندله‌سازی،

T_4 هزینه‌ی دانه‌بندی و T_5 هزینه‌ی ثابت سالیانه است.

با توجه به قابلیت معدن برای فروش محصول به سه شکل مختلف، درآمدهای حاصل به صورت

زیر قابل محاسبه است:

$$R_1 = P_p Q_p \quad (6-4)$$

$$R_2 = P_{gr} (1-\alpha) Q_c \quad (7-4)$$

$$R_3 = P_c (1-\beta) Q_{con} \quad (8-4)$$

که رابطه‌ی R_1 در آمد حاصل از فروش محصول به صورت گندله، R_2 در آمد حاصل از فروش

محصول دانه‌بندی و R_3 در آمد ناشی از فروش کنسانتره است.

از آن جا که مقدار کنسانتره‌ی خروجی از کارخانه‌ی تغلیظ به تناژ ورودی، مقدار بازیابی و عیار متوسط مواد ورودی بستگی دارد، می‌توان رابطه‌ی زیر را برای آن‌ها در نظر گرفت:

$$Q_{con} = \bar{g} \alpha y_c Q_c \quad (9-4)$$

بنابراین R_3 برابر خواهد شد با:

$$R_3 = P_c(1-\beta)\bar{g} \alpha y_c Q_c \quad (10-4)$$

همچنین با استفاده از رابطه‌ی (۹-۴) مقدار Q_p برابر خواهد بود با:

$$\begin{aligned} Q_p &= y_p \beta Q_{con} \\ Q_p &= y_c y_p \bar{g} \alpha \beta Q_c \end{aligned} \quad (11-4)$$

با بازنویسی روابط (۳-۴) و (۶-۴) داریم:

$$T_3 = b y_c y_p \bar{g} \alpha \beta Q_c \quad (12-4)$$

$$R_1 = P_p y_c y_p \bar{g} \alpha \beta Q_c \quad (13-4)$$

از آن جا که بازیابی کارخانه‌ی گندله سازی ۱۰۰٪ است یعنی $y_b=1$ ، بنابراین در معادلات برای سادگی این پارامتر حذف شده است.

مقدار سود حاصل از عملیات در حالت کلی از طریق رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$P = \sum_{i=1}^3 R_i - \sum_{i=1}^5 T_i \quad (14-4)$$

با جایگذاری روابط هزینه و درآمد در معادله‌ی بالا خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} P &= [P_p Q_p + P_{gr}(1-\alpha)Q_c + P_c(1-\beta)Q_{con}] - \\ & [m Q_m + c \alpha Q_c + p Q_p + C_{gr}(1-\alpha)Q_c + f T] \end{aligned} \quad (15-4)$$

با استفاده از رابطه‌های (۱۰-۴)، (۱۲-۴) و (۱۳-۴) و فاکتور گیری از پارامترهای مشترک، رابطه‌ی (۱۵-۴) به صورت زیر در خواهد آمد:

$$P = (P_p - p) \beta \alpha \bar{g} y_c Q_c + (P_{gr} - C_{gr})(1 - \alpha) Q_c + [(1 - \beta) \bar{g} \alpha y_c P_c - \alpha c] Q_c - m Q_m - f T \quad (16-4)$$

با ساده سازی، رابطه‌ی نهایی سود حاصل از عملیات به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$P = [\bar{g} \alpha y_c ((P_p - p) \beta + (1 - \beta) P_c) + (1 - \alpha)(P_{gr} - C_{gr}) - \alpha c] Q_c - m Q_m - f T \quad (17-4)$$

چنان که در جدول ۱-۴ گفته شده است α درصدی از مواد معدنی است که به کارخانه‌ی تغلیظ فرستاده خواهد شد و مقادیر باقی مانده در صورت دارا بودن شرایط به واحد دانه‌بندی ارسال می‌شوند. با توجه به جدول ۲-۴ و ظرفیت واحدها، برای محاسبه‌ی α می‌توان از ضابطه‌ی زیر استفاده کرد:

$$\begin{cases} 0 < Q_c - 12000000 \leq 1000000, g_i \geq 57\% & \alpha = \frac{12000000}{Q_c} \\ otherwise & \alpha = 1 \end{cases} \quad (18-4)$$

که مقدار عددی α به صورت $0 < \alpha \leq 1$ حاصل خواهد شد. برای پارامتر β هم که در جدول ۱-۴ به صورت درصدی از کنسانتره‌ی تولید شده که به واحد گندله سازی ارسال می‌شود تعریف شده است، با توجه به شرایطی که قبلاً بیان شد، ضابطه‌ی زیر را برای آن قابل تعریف است:

$$\begin{cases} Q_{con} > 5000000 & \beta = \frac{4200000}{Q_{con}} \\ otherwise & \beta = 1 \end{cases} \quad (19-4)$$

و بنابراین مقدار عددی β به صورت $0 < \beta \leq 1$ به دست می‌آید.

۳-۴ تعیین تابع هدف بهینه‌سازی عیار حد معدن شماره ۱ گل‌گهر

بر اساس استدلال به کار رفته در مدل لین برای تعریف تابع هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی، رابطه‌ای که اختلاف بین ارزش فعلی ذخایر باقیمانده در زمان‌های $t=0$ و $t=T$ را نشان می‌دهد برابر است با:

$$v = V - W \quad (20-4)$$

که به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$v = V - W = V - [V + VTd] - P = P - VTd \quad (21-4)$$

با جایگذاری رابطه‌ی (۱۷-۴) در رابطه‌ی (۲۱-۴) تابع هدف کلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v = \left[\bar{g} \alpha y_c \left((P_p - p) \beta + (1 - \beta) P_c \right) + (1 - \alpha) (P_{gr} - C_{gr}) - \alpha c \right] Q_c - m Q_m - (f + Vd) T \quad (22-4)$$

با توجه به این نکته که ظرفیت هر یک از مراحل استخراج، تغلیظ و یا گندله سازی ممکن است محدود کننده‌ی کل عملیات باشد، لذا مقادیر متفاوتی برای تابع هدف حاصل خواهد شد.

۳-۴-۱ تابع هدف در صورتی که میزان استخراج از معدن محدودیت تعیین کننده باشد

در این حالت، زمان لازم برای استخراج Q_m تن از مواد برابر است با:

$$T = \frac{Q_m}{M} \quad (23-4)$$

از ترکیب روابط (۲۲-۴) و (۲۳-۴) داریم:

$$v_m = (P_p - p) Q_p + [(P_{gr} - C_{gr})(1 - \alpha) - c \alpha] Q_c + (1 - \beta) P_c Q_{con} - \left(m + \frac{f + Vd}{M} \right) Q_m \quad (24-4)$$

۲-۳-۴ تابع هدف در صورتی که کارخانه‌ی تغلیظ محدودیت تعیین کننده باشد

در این حالت، زمان لازم برای تغلیظ Q_c تن از مواد معدنی برابر است با:

$$T = \frac{Q_c}{C} \quad (25-4)$$

از ترکیب روابط (۲۲-۴) و (۲۵-۴) داریم:

$$v_c = (P_p - p) + (1 - \beta) P_c Q_{con} + \left[(P_{gr} - C_{gr})(1 - \alpha) - c\alpha - \frac{f + Vd}{C} \right] Q_c - mQ_m \quad (26-4)$$

۳-۳-۴ تابع هدف در صورتی که کارخانه‌ی گندله سازی محدودیت تعیین کننده باشد

در این حالت، زمان لازم برای تولید Q_p تن گندله برابر است با:

$$T = \frac{Q_p}{V_p} \quad (27-4)$$

از ترکیب روابط (۲۲-۴) و (۲۷-۴) داریم:

$$v_p = \left(P_p - p - \frac{f + Vd}{V_p} \right) Q_p + (1 - \beta) P_c Q_{con} + \left[(P_{gr} - C_{gr})(1 - \alpha) - \alpha c \right] Q_c - mQ_m \quad (28-4)$$

۴-۳-۴ تابع هدف در حالت کلی

در اینجا نیز با توجه به آن که سه تابع v وجود دارد، بایستی سعی کرد که هر سه تابع هدف

در حد ممکن بهینه شوند؛ بنابراین همان طور که در فصل قبل بحث شده است، تابع هدف در حالت

کلی به صورت زیر خواهد بود:

$$\max v_e = \max \left[\min (v_m, v_c, v_p) \right] \quad (29-4)$$

و از آن جا که در اینجا نیز مقدار به v وابسته است و محاسبه‌ی مقدار v مستلزم تعیین عیار

حد است، بنابراین حل مساله از طریق فرآیند تکرار خواهد بود.

برای بهینه‌یابی تابع (۴-۲۹) می‌توان هر یک از روش‌های قابل استفاده (تحلیلی، جستجوی مستقیم و هوشمند) را به کار برد. در فصل بعد با تشریح روش نسبت طلایی و با استفاده از برنامه‌ی نوشته شده در محیط نرم‌افزار MATLAB R2011a بهینه‌سازی عیار حد صورت گرفته است.

فصل پنجم

بهینه‌سازی تابع هدف با استفاده

از روش جستجوی نسبت طلایی

۱-۵ مقدمه

برای بهینه‌سازی عیار حد در معدن شماره ۱ مجموعه معادن شرکت سنگ آهن گل‌گهر سیرجان، در فصل گذشته روابط اساسی هزینه، درآمد و سود با توجه به شرایط معدن به دست آمده و بر اساس آن‌ها تابع هدف بهینه‌سازی تعریف شده است. همان‌طور که قبلاً هم بحث شد به منظور بهینه‌سازی این تابع هدف می‌توان از انواع روش‌های تحلیلی، عددی و یا هوشمند بهره برد. در این فصل با استفاده از روش حذفی جستجوی نسبت طلایی، عیارهای حد بهینه معدن در پوش‌بک در نظر گرفته شده برای طرح ۵ ساله‌ی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵، محاسبه و بر اساس آن‌ها تولید واحدهای مختلف، سود و ارزش خالص فعلی و همچنین برنامه‌ی تولید به دست خواهد آمد.

۲-۵ روش حل مساله

با توجه به پیچیدگی‌های تابع هدف مساله و نیاز به فرآیند تکرار در حل آن عملاً انجام محاسبات به صورت دستی امکان‌پذیر نیست. بنابراین از برنامه‌ی کامپیوتری نوشته شده در محیط نرم‌افزار MATLAB R2011a بهره برده شده است. روند نمای این برنامه‌ی کامپیوتری بر مبنای روند نمای شکل ۳-۵ است. در قسمت تعیین عیارهای بهینه‌ی این روند نما نیز الگوریتم جستجوی نسبت طلایی مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۵ مراحل تعیین عیارهای حد بهینه با استفاده از برنامه

۱-۳-۵ اطلاعات ورودی

در اولین مرحله از حل مساله نیاز است تا اطلاعات ورودی به برنامه وارد شوند. اطلاعات ورودی مورد نیاز به دو دسته تقسیم می‌شوند:

الف- توزیع عیار- تناژ کانسار: برای این منظور پوش‌بک در نظر گرفته شده برای طرح استخراجی ۵ ساله مورد استفاده قرار گرفته است. در اینجا فرض بر این است که برای دسترسی به هر مقدار ماده‌ی معدنی با هر عیاری، محدودیتی وجود ندارد. با توجه به تجارب حاصل شده از استخراج و نیز نمونه‌گیری‌های انجام شده، مقدار اختلاط باطله با ماده‌ی معدنی در عملیات استخراجی و بارگیری به طور متوسط ۱۰٪ می‌باشد. با اعمال این مقدار ترقیق، جدول ۱-۵ توزیع عیار- تناژ استفاده شده را نشان می‌دهد. همچنین در این طرح مقدار ۱۰۹۳۰۵۰۰۰ تن برداشت باطله در نظر گرفته شده که در فایل توزیع عیار- تناژ ورودی به برنامه با عیار متوسط ۰٪ و در بازه‌ی عیاری ۴۰/۵ - ۰٪ گنجانده شده است. جدول ۲-۵ مجموع تناژ ماده‌ی معدنی، باطله و کل مواد استخراجی موجود در پوش‌بک مساله آورده شده است.

جدول ۱-۵: توزیع عیار- تناژ پوش‌بک طرح ۵ ساله‌ی اخیر معدن (شرکت مهندسیین مشاور کوشا معدن، ۱۳۹۱)

عیار متوسط (٪)	تناژ (تن)	عیار (٪)
۰	۱۰۹۳۰۵۰۰۰	۰ - ۴۰/۵
۴۳/۷۵	۶۱۳۷۳۳۵	۴۰/۵ - ۴۵
۴۷/۵۳	۲۷۳۴۶۶۴۳	۴۵ - ۴۹/۵
۵۱/۵۲	۳۳۲۵۴۹۵۶	۴۹/۵ - ۵۴
۵۵/۳۴	۱۱۲۵۸۳۹۸	۵۴ - ۵۸/۵
۵۸/۸۹	۴۳۸۰۹۸	۵۸/۵ - ۶۳

جدول ۲-۵: مجموع ماده‌ی معدنی، باطله و کل مواد موجود در پوش‌بک طرح

مواد	تناژ (تن)
ماده‌ی معدنی	۷۸۴۳۵۴۳۰
باطله	۱۰۹۳۰۵۰۰۰
مجموع	۱۸۷۷۴۰۴۳۰

ب- اطلاعات اقتصادی و عملیاتی: این اطلاعات شامل بیشینه ظرفیت واحدهای مختلف، هزینه‌های واحدها و هزینه‌ی ثابت سالانه، قیمت فروش محصولات، نرخ تنزیل و درصد بازیابی می‌باشد که در جدول ۳-۵ آورده شده است.

جدول ۳-۵: پارامترهای اقتصادی و عملیاتی معدن شماره ۱ بر اساس ابتدای سال ۱۳۹۱ (دفتر نظارت طراحی، ۱۳۹۱)

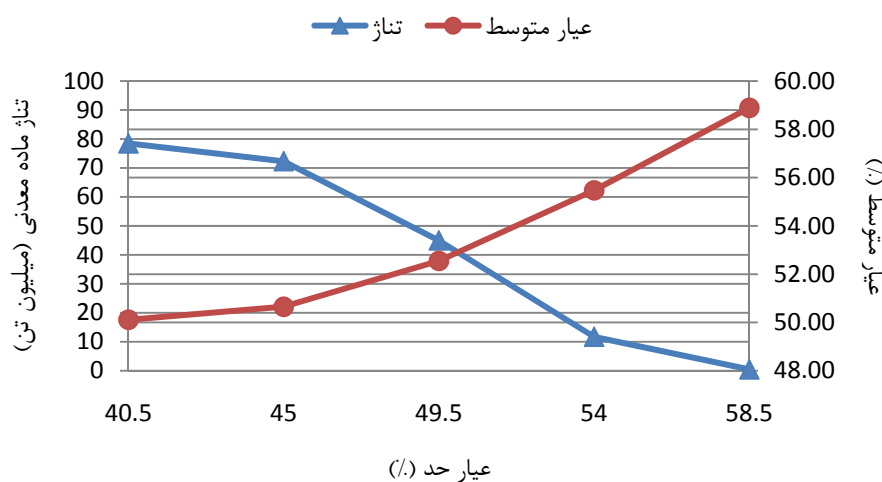
پارامتر	واحد	مقدار
ظرفیت استخراج	تن بر سال	۴۰۰۰۰۰۰۰
ظرفیت کارخانه تغلیظ	تن بر سال	۱۲۰۰۰۰۰۰
ظرفیت گندله	تن بر سال	۴۲۰۰۰۰۰۰
ظرفیت دانه بندی	تن بر سال	۱۰۰۰۰۰۰۰
هزینه استخراج	ریال بر تن	۳۲۰۰۰۰
هزینه تغلیظ	ریال بر تن	۴۱۲۰۰۰
هزینه تولید دانه بندی	ریال بر تن	۵۰۰۰۰۰
هزینه گندله	ریال بر تن	۴۰۰۰۰۰۰
هزینه‌های ثابت	ریال	۴۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰
قیمت فروش دانه بندی با کسر هزینه‌های فروش	ریال بر تن	۲۵۷۵۰۰۰
قیمت فروش کنسانتره با کسر هزینه‌های فروش	ریال بر تن	۸۷۴۰۰۰
قیمت فروش گندله با کسر هزینه‌های فروش	ریال بر تن	۲۶۰۰۰۰۰۰
بازیابی	درصد	٪۶۷
نرخ تنزیل	درصد	٪۲۱

۵-۳-۲ محاسبات ذخیره

در مرحله‌ی اول اجرای برنامه، بر اساس عیارهای حد مختلف مقادیر تناژ ماده‌ی معدنی، تناژ باطله و عیار متوسط تعیین می‌شود. در جدول ۴-۵ این محاسبات ذخیره و در شکل ۵-۱ نمودار تناژ و عیار متوسط بر حسب عیار حد برای این پوش‌بک آورده شده است.

جدول ۴-۵: مقادیر تناژ ماده‌ی معدنی، باطله و عیار متوسط بر اساس عیار حد

عیار حد (%)	تناژ ماده معدنی (تن)	تناژ باطله (تن)	عیار متوسط (%)
۴۰/۵	۷۸۴۳۵۴۳۰	۱۰۹۳۰۵۰۰۰	۵۰/۱۱
۴۵	۷۲۲۹۸۰۹۵	۱۱۵۴۴۲۳۳۵	۵۰/۶۵
۴۹/۵	۴۴۹۵۱۴۵۲	۱۴۲۷۸۸۹۷۸	۵۲/۵۵
۵۴	۱۱۶۹۶۴۹۶	۱۷۶۰۴۳۹۳۴	۵۵/۴۷
۵۸/۵	۴۳۸۰۹۸	۱۸۷۳۰۲۳۳۲	۵۸/۸۹



شکل ۵-۱: منحنی تناژ-عیار حد و عیار متوسط-عیار حد پوش‌بک طرح ۵ ساله‌ی استخراجی کانسار

۵-۳-۳ فرآیند محاسبات

از آن جا که تعیین عیار حد بهینه مستلزم دانستن مقدار ارزش خالص فعلی ناشی از آن عیار است و ارزش خالص فعلی بر اساس عیار حد بهینه تعیین می‌شود، لذا باید از فرآیند تکرار برای مساله بهره برد. در اینجا در ابتدا فرض می‌شود که مقدار $V=NPV=0$ است. در این قسمت مقدار دقت مورد

نظر برای الگوریتم جستجوی نسبت طلایی برابر با $0/01$ و بازه‌ی ممکن برای عیار حد بهینه $58/5\% - 40/5\%$ در نظر گرفته شده است. در این حالت بازه‌ی عدم قطعیت برابر با طول بازه‌ی تعریف شده (U-L) یعنی ۱۸ خواهد بود. بنابراین دو نقطه‌ی اولین آزمون، بر اساس روابط (۳-۴۱) و (۳-۴۲) به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$g_1 = L + (U - L) \times 0.382 = 40.5 + 18 \times 0.382 = 47.376$$

$$g_2 = L + (U - L) \times 0.618 = 58.5 + 18 \times 0.618 = 51.624$$

برای این دو نقطه‌ی آزمایشی، با توجه به جدول توزیع عیار- تناژ پوش‌بک و با استفاده از درون‌یابی خطی تناژ ماده‌ی معدنی (T_{ore})، تناژ باطله (T_{waste})، عیار متوسط (\bar{g}) به دست می‌آید که نتایج آن در جدول ۵-۵ درج شده است.

جدول ۵-۵: مقادیر تناژ ماده‌ی معدنی، تناژ باطله و عیار متوسط ماده‌ی معدنی برای اولین دو نقطه‌ی آزمایشی

عیار آزمایشی (%)	تناژ ماده معدنی (تن)	تناژ باطله (تن)	عیار متوسط ماده معدنی (%)
۴۷/۳۸	۵۷۸۵۹۰۶۸	۱۲۹۸۸۱۳۶۳	۵۱/۶۵
۵۱/۶۲	۲۹۲۵۵۱۱۳	۱۵۸۴۸۵۳۱۸	۵۳/۹۳

بر اساس تناژ ماده‌ی معدنی، تناژ باطله و عیار متوسط ماده‌ی معدنی حاصل شده هر یک از مقادیر Q_m ، Q_{gr} ، Q_c و Q_{con} تعیین و بر این اساس مقادیر توابع هدف محاسبه می‌شود. این مقادیر در جدول ۶-۵ درج شده است.

جدول ۶-۵: مقدار سه تابع v_m ، v_c ، v_p و v_e در اولین دو نقطه‌ی آزمایشی

عیار آزمایشی (%)	v_m	v_c	v_p	v_e
۴۷/۳۸	$9/29 \times 10^{12}$	$9/27 \times 10^{12}$	$9/66 \times 10^{12}$	$9/27 \times 10^{12}$
۵۱/۶۲	$2/75 \times 10^{12}$	$3/69 \times 10^{12}$	$3/85 \times 10^{12}$	$2/75 \times 10^{12}$

از آن جا که مقدار تابع هدف برابر با بیشینه مقدار حاصل شده برای v_e است، بنابراین بر طبق روش جستجوی نسبت طلایی قسمتی از فاصله‌ی عدم قطعیت $(\frac{.58}{.5} - \frac{.51}{.62})$ حذف می‌شود. پس حدود بازه‌ی جدید و نقاط آزمایشی جدید به صورت زیر خواهد بود:

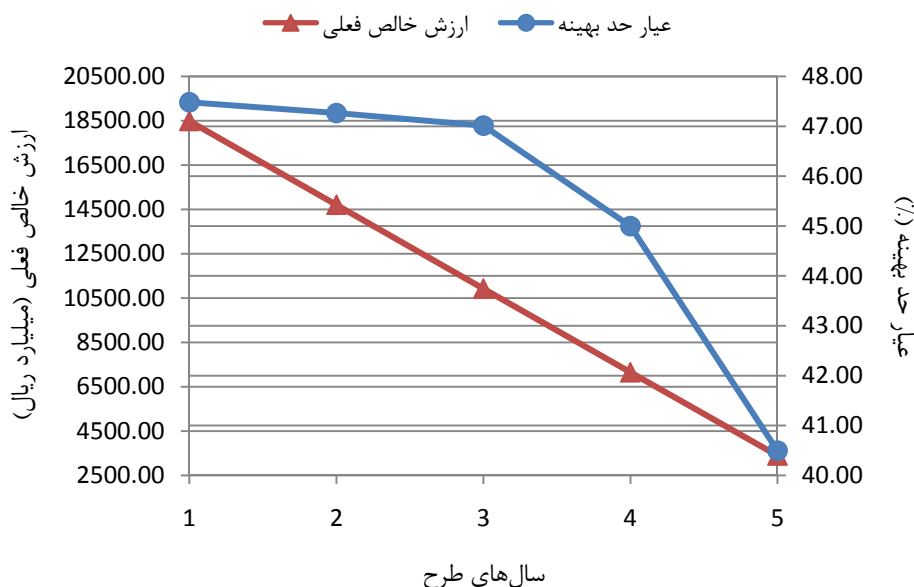
$$\begin{aligned} l &= 40.5 & u &= 51.62 \\ g_1 &= 44.75 & g_2 &= 47.38 \end{aligned}$$

این روند کاهش فاصله‌ی عدم قطعیت تا رسیدن به دقت مورد نظر ($\varepsilon = 0.01$) ادامه می‌یابد. پس از این مقدار ارزش خالص فعلی به دست آمده برای سال اول با مقدار V مقایسه می‌شود. در صورتی که اختلاف آن‌ها کمتر از $0/5$ باشد ($NPV - V > 0.5$) محاسبات سال اول پایان می‌یابد در غیر این صورت بار دیگر $V = NPV$ قرار داده شده و مراحل بالا تکرار می‌شود. با برآورده شدن این شرط، جدول عیار- تناژ با توجه به مقادیر حاصل شده برای سال اول به روز رسانی شده و محاسبات برای سال دوم مانند فرآیند بالا ادامه می‌یابد. با اتمام کل ذخیره، محاسبات پایان می‌گیرد. نتایج حاصل از این عملیات در جدول ۷-۵ درج شده است. قابل ذکر است تعداد آزمون‌های مورد نیاز در روش جستجوی نسبت طلایی برای تمامی سال‌ها برابر با ۱۸ بوده است.

جدول ۷-۵: نتیجه‌ی بهینه‌سازی عیار حد معدن شماره ۱ گل‌گهر با روش حذفی جستجوی نسبت طلایی و با اعمال بازه‌ی عدم قطعیت $0/5$ تا $58/5$

سال	بهره	عیار حد	استخراجی کل مواد (تن)	تغلیظ (تن)	ارسالی به ماده‌ی معدنی (تن)	دانه بندی ماده‌ی معدنی (تن)	فروشی (تن)	کنسانتره (تن)	تولیدی (تن)	گندله	سود (میلیارد ریال)	هزینه (میلیارد ریال)	ارزش خالص فعلی (میلیارد ریال)
۱	۴۷/۴۸	۴۰۰۰۰۰۰۰	۱۱۹۷۴۵۶۵	۹۵۰۵۶۶	۳۰۱۱۶۵۱	۴۲۰۰۰۰۰	۷۶۵۸/۸۴	۱۸۴۸۶/۷۴					
۲	۴۷/۲۷	۳۹۹۳۷۷۳۲	۱۲۰۰۰۰۰۰	۹۲۸۰۲۷	۲۱۸۸۱۵۲	۴۲۰۰۰۰۰	۶۸۷۳/۷۱	۱۴۷۱۰/۱۱					
۳	۴۷/۰۲	۳۹۹۴۳۵۱۶	۱۲۰۰۰۰۰۰	۹۰۰۳۶۱	۱۳۴۵۴۲۱	۴۲۰۰۰۰۰	۶۰۶۷/۱۲	۱۰۹۲۵/۵۳					
۴	۴۵	۳۴۱۶۹۷۸۴	۱۲۰۰۰۰۰۰	۷۳۹۱۹۹	۶۶۹۵۶۳	۴۲۰۰۰۰۰	۵۲۵۴/۲۴	۷۱۵۲/۷۷					
۵	۴۰/۵	۳۳۶۸۹۳۹۸	۱۱۹۹۳۳۵۱	۶۷۲۷۴۴	۰	۴۰۱۶۰۸۴	۴۱۱۴/۷۴	۳۴۰۰/۶۱					

در شکل ۲-۵ روند تغییرات عیار حد بهینه و ارزش خالص فعلی حاصل از عملیات بر اساس نتایج به دست آمده آورده شده است.



شکل ۲-۵: روند تغییرات عیار حد و ارزش خالص فعلی در طول سال‌های طرح

همان طور که در شکل ۲-۵ ملاحظه می‌شود هم عیار حد بهینه و هم ارزش خالص فعلی در طول سال‌های طرح دارای روند نزولی هستند. این موضوع به دلیل آن است که ارزش خالص فعلی پروژه را می‌توان با افزایش جریان‌های نقدی سال‌های اولیه پروژه افزایش داد. این امر مستلزم استخراج مواد با عیار بالا در سال‌های ابتدایی است. بنابراین هم عیار حد بهینه و هم ارزش خالص فعلی در طول عمر طرح باید روندی نزولی را طی کنند.

۴-۵ برنامه‌ریزی تولید

با استفاده از جدول توزیع عیار- تناژ حاصله در پایان هر سال می‌توان مقدار استخراج سالیانه از هر یک از بازه‌ها را محاسبه نمود. نتایج این محاسبات در جدول ۵-۸ درج شده است.

جدول ۵-۸: مقدار استخراج سالیانه از بازه‌های عیاری در هر سال (تن)

سال	باطله	۴۵٪ - ۴۰/۵٪	۴۹/۵٪ - ۴۵٪	۵۴٪ - ۴۹/۵٪	۵۸/۵٪ - ۵۴٪	۶۳٪ - ۵۸/۵٪
۱	۲۲۶۲۹۵۹۸	۱۲۷۰۶۲۳	۵۹۰۴۰۱۹	۷۵۴۲۷۹۵	۲۵۵۳۵۹۲	۹۹۳۶۸
۲	۲۲۸۱۲۴۷۷	۱۲۸۰۸۹۱	۵۸۹۰۳۷۱	۷۳۶۳۹۳۵	۲۴۹۳۰۴۵	۹۷۰۱۲
۳	۲۳۱۲۲۵۵۶	۱۲۹۸۳۰۲	۵۸۶۵۴۱۱	۷۱۴۴۴۰۴	۲۴۱۸۷۲۳	۹۴۱۲۰
۴	۲۰۰۴۴۳۲۲	۱۱۲۵۴۶۳	۵۰۷۱۳۸۱	۵۸۶۵۵۵۷۰	۱۹۸۵۷۷۷	۷۷۲۷۳
۵	۲۰۶۹۶۰۴۷	۱۱۶۲۰۵۶	۴۶۱۵۴۶۱	۵۳۳۸۲۵۳	۱۸۰۷۲۵۵	۷۰۳۲۶

با کسر مقدار باطله از مقدار استخراج سالیانه، مقدار استخراج کل ماده‌ی معدنی به دست می‌آید و با توجه به این میزان می‌توان نسبت باطله برداری سالانه را برای سال‌های مختلف طرح محاسبه کرد. در جدول ۵-۹ مقادیر استخراج کل، استخراج باطله و ماده‌ی معدنی و نسبت باطله برداری سالانه آورده شده است.

جدول ۵-۹: مقادیر استخراجی باطله و ماده‌ی معدنی و نسبت باطله برداری

سال	کل مواد استخراجی (تن)	باطله استخراجی (تن)	ماده معدنی استخراجی (تن)	نسبت باطله برداری
۱	۴۰۰۰۰۰۰۰	۲۲۶۲۹۵۹۸	۱۷۳۷۰۴۰۲	۱/۳۰
۲	۳۹۹۳۷۷۳۲	۲۲۸۱۲۴۷۷	۱۷۱۲۵۲۵۴	۱/۳۳
۳	۳۹۹۴۳۵۱۶	۲۳۱۲۲۵۵۶	۱۶۸۲۰۹۶۰	۱/۳۷
۴	۳۴۱۶۹۷۸۴	۲۰۰۴۴۳۲۲	۱۴۱۲۵۴۶۳	۱/۴۲
۵	۳۳۶۸۹۳۹۸	۲۰۶۹۶۰۴۷	۱۲۹۹۳۳۵۱	۱/۵۹
مجموع	۱۸۷۷۴۰۴۳۰	۱۰۹۳۰۵۰۰۰	۷۸۴۳۵۴۳۰	۱/۴۰

همان طور که ملاحظه می‌شود میزان استخراج ماده‌ی معدنی در تمام سال‌های طرح بیش از مجموع ظرفیت کارخانه‌ی تغلیظ و واحد دانه‌بندی بوده است. این اختلاف در ۴ سال اول طرح که عیار حد بهینه بیش از کمینه عیار موجود بوده است، تناژ مربوط به عیارهای بین عیار حد بهینه و کمینه عیار موجود یعنی ۴۰/۵٪ می‌باشد. اما در سال ۵ام که عیار حد بهینه با مقدار کمینه‌ی عیار برابر است، این تناژ همان دارای عیار بیش از ۴۰/۵٪ می‌باشد. بنابراین با کسر مقدار باطله برداری، تناژ ارسالی به کارخانه‌ی تغلیظ و واحد دانه‌بندی، تناژ ماده‌ی معدنی با عیار کمتر از عیار حد حاصل

می‌شود. با در نظر گرفتن قابلیت انباشت مواد معدنی کم عیار، در جدول ۵-۱۰ تناژ مواد ارسالی به انباشت‌گاه مواد کم عیار آورده شده است.

جدول ۵-۱۰: تناژ ارسالی به انباشت‌گاه مواد کم عیار (تن)

سال	ماده معدنی ارسالی به انباشت‌گاه مواد کم عیار (تن)
۱	۴۴۴۵۲۷۲
۲	۴۱۹۷۲۲۷
۳	۳۹۲۰۵۹۹
۴	۱۳۸۶۲۶۵
۵	۳۲۷۲۵۶
مجموع	۱۴۲۷۶۶۱۹

همان طور که در جدول ۵-۱۰ ملاحظه می‌شود مجموع تناژ مواد ارسالی به انباشت‌گاه مواد کم عیار بیشتر از حداکثر ظرفیت کارخانه‌ی تغلیظ است. همچنین از آن جایی که کمینه عیار مواد موجود در پوش‌بک برابر با کمینه مقدار عیار حد بهینه می‌باشد که در سال ۵ام طرح حاصل شده است (۰/۴۰/۵)، بنابراین هم از لحاظ عیار و هم از لحاظ تناژ انباشت‌گاه مواد کم عیار می‌تواند ۱ سال دیگر به کارخانه‌ی تغلیظ خوراک دهی کند. وجود این انباشت‌گاه باعث کاهش ریسک عملیات اقتصادی معدن به دلیل توقف‌های احتمالی در استخراج می‌شود. با فرض این موضوع می‌توان طرح را به صورت ۶ ساله اجرا کرد که در سال آخر مقدار استخراج باطله و ماده‌ی معدنی صفر بوده و خوراک دهی به کارخانه‌ی تغلیظ با حداکثر ظرفیت از طریق انباشت‌گاه صورت می‌گیرد.

در فصل آتی تابع هدف مساله با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری بهینه‌سازی شده و نتایج آن آورده شده است.

فصل ششم

بهینه‌سازی تابع هدف با استفاده

از الگوریتم رقابت استعماری

۱-۶ مقدمه

در این فصل به منظور بهینه‌سازی تابع هدف به دست آمده در فصل چهارم، از روش تکاملی رقابت استعماری استفاده شده است. روند نمای این الگوریتم در شکل ۳-۱۶ آورده شده است.

به منظور بهینه‌سازی عیارهای حد پوش یک طرح استخراجی ۵ ساله معدن شماره سنگ آهن گل‌گهر با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری از روند نمای شکل ۳-۵ استفاده شده که در قسمت تعیین عیارهای حد بهینه، الگوریتم ICA به کار رفته است. برای این امر نرم‌افزاری در محیط MATLAB R2011a توسعه داده شده است.

۲-۶ روش حل مساله

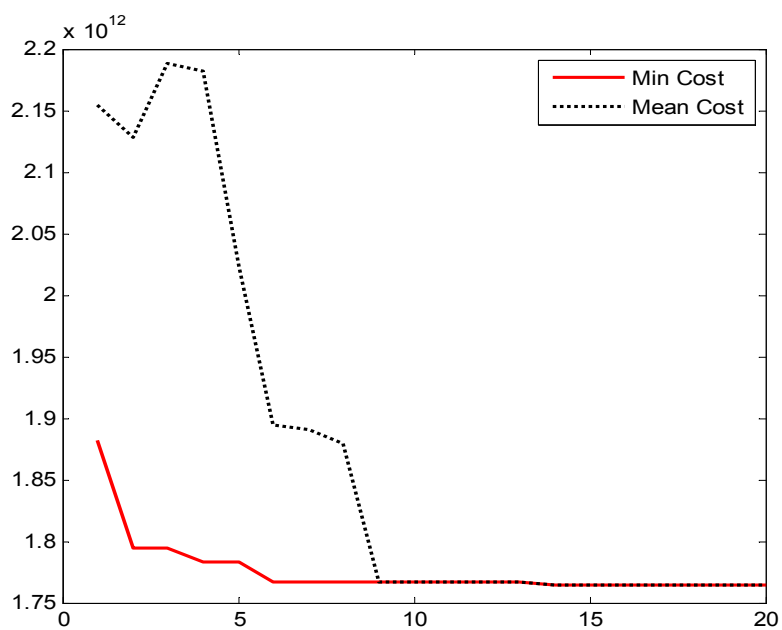
فرآیند محاسباتی نرم افزار توسعه داده شده بر اساس الگوریتم ICA همانند نرم‌افزار تهیه شده برای استفاده از روش جستجوی نسبت طلایی است. در این برنامه ورودی‌ها شامل جدول توزیع عیار-تناژ و پارامترهای عملیاتی و اقتصادی است که در فصل پنجم آورده شده است. برای توقف تکرارها در هر سال می‌توان از شرط همگرایی استفاده کرد و یا اجازه داد تمام تکرارهای در نظر گرفته پایان یابند. از آنجایی که در اجراهای مختلف برنامه مشخص شد که در الگوریتم در تکرارهای کمتر از ۲۰ به همگرایی می‌رسد و میانگین و کمینه هزینه‌ی امپراتوری‌ها در تکرارهای بالاتر ثابت هستند؛ لذا

به همگرایی می‌رسد و میانگین و کمینه هزینه‌ی امپراتوری‌ها در تکرارهای بالاتر ثابت هستند؛ لذا برای توقف الگوریتم شرط رسیدن به ۲۰ تکرار انتخاب شده است. در جدول ۶-۱ مقادیر پارامترهای الگوریتم آورده شده است. در هر بار اجرای الگوریتم رقابت استعماری، تمامی کشورها عیارهای کاندیدای بهینگی و امپراتوری نهایی نشان‌دهنده‌ی عیار حد بهینه است. با اجرای برنامه عیار حد بهینه برای سال اول تعیین و بر اساس آن مقادیر تولید واحدهای مختلف محاسبه و جدول توزیع عیار - تناژ به روز رسانی می‌شود. در مرحله‌ی بعد جدول توزیع عیار- تناژ جدید بار دیگر به الگوریتم ICA وارد شده و بر اساس آن عیار حد بهینه برای سال دوم محاسبه می‌شود. این روند تا اتمام کل ذخیره ادامه می‌یابد. قابل ذکر است از آن جایی که این الگوریتم بهینه‌سازی از نوع کمینه یابی است، تابع هدف مساله با ضریب منفی در آن لحاظ شده است.

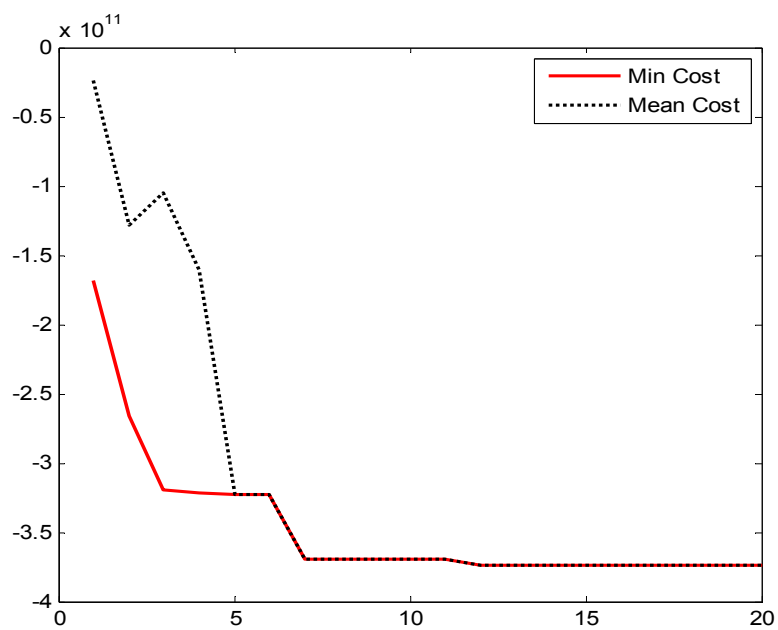
جدول ۶-۱: مقدار پارامترهای الگوریتم

مقدار	پارامتر
۰/۴۰۵	حد پایین جواب
۰/۵۸۵	حد بالای جواب
۴۰	تعداد کشورهای اولیه
۵	تعداد استعمارگرهای اولیه
۳۵	تعداد مستعمرات اولیه
۲	β
۰/۵	γ
۰/۰۲	ξ

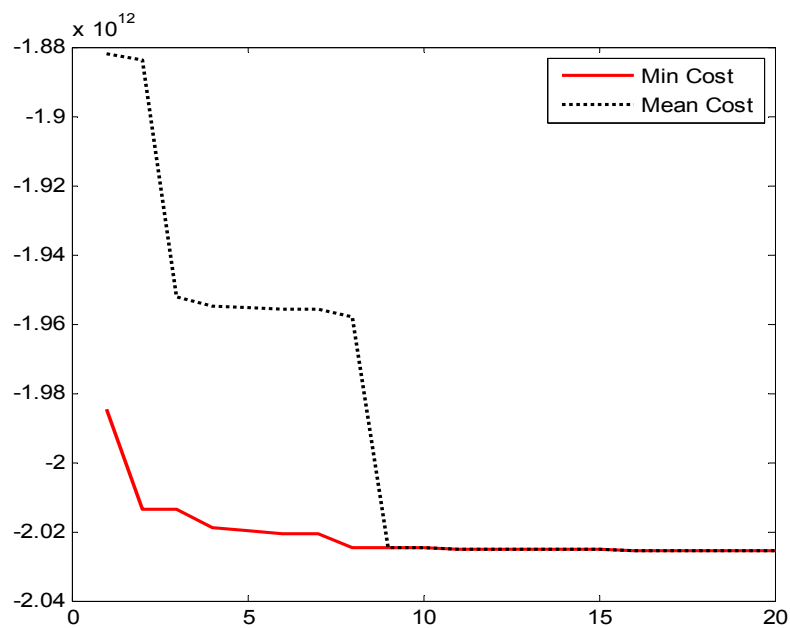
در شکل ۶-۱ تا شکل ۶-۵ نمودار کمینه و میانگین هزینه‌ی امپراتوری‌ها در هر تکرار برای هر سال از طرح آورده شده است. هم‌چنین در پیوست ۱ کشورهای ایجاد شده در هر سال و امپراتور نهایی (عیار حد بهینه‌ی آن سال) آورده شده است.



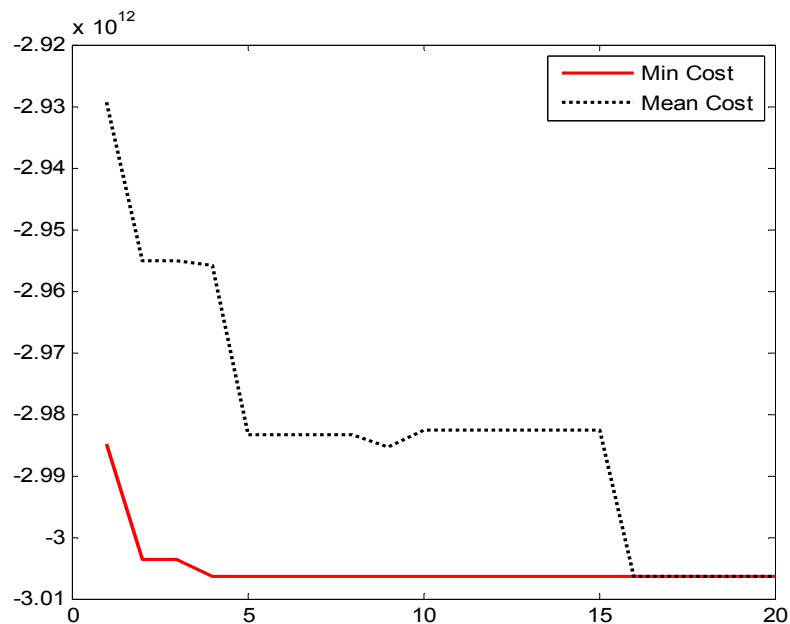
شکل ۶-۱: میانگین و کمینه هزینه‌ی امپراتوری‌ها در هر تکرار برای سال اول طرح



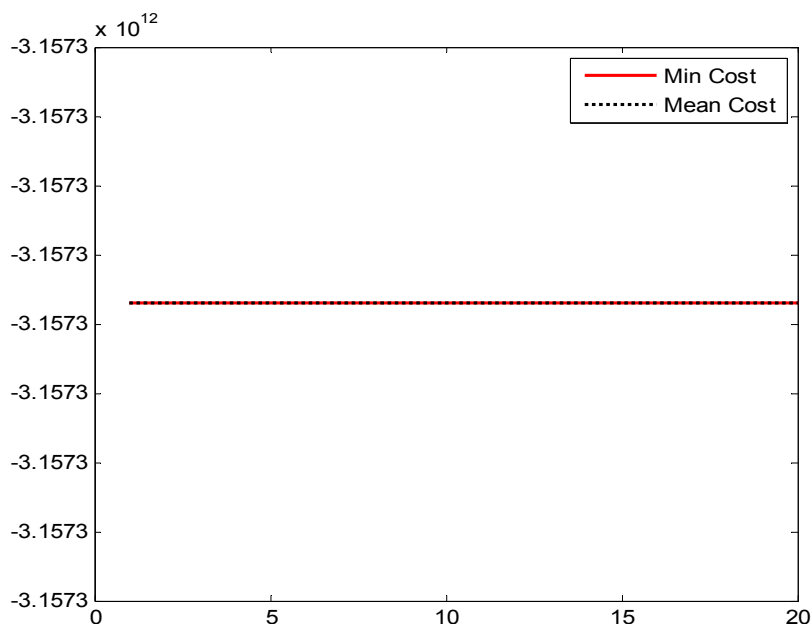
شکل ۶-۲: میانگین و کمینه هزینه‌ی امپراتوری‌ها در هر تکرار برای سال دوم طرح



شکل ۳-۶: میانگین و کمینه هزینه‌ی امپراتوری‌ها در هر تکرار برای سال سوم طرح



شکل ۴-۶: میانگین و کمینه هزینه‌ی امپراتوری‌ها در هر تکرار برای سال چهارم طرح



شکل ۵-۶: میانگین و کمینه هزینه‌ی امپراتوری‌ها در هر تکرار برای سال پنجم طرح

۳-۶ نتایج بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ICA

با اجرای برنامه برای هر سال با استفاده از الگوریتم ICA عیار حد بهینه تعیین و بر اساس آن

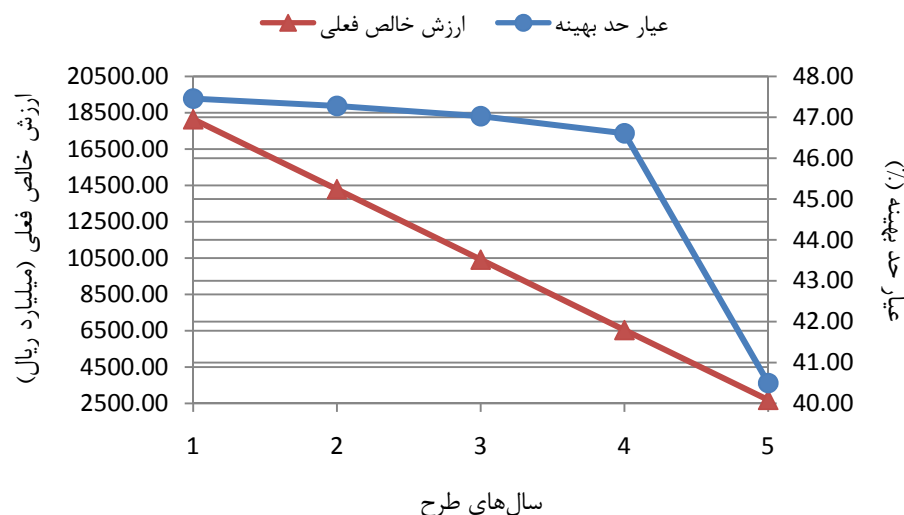
مقادیر تولید واحدهای مختلف محاسبه شده است. نتایج حاصل شده از این نرم‌افزار در جدول ۲-۶

درج شده است.

جدول ۲-۶: نتیجه‌ی بهینه‌سازی عیار حد معدن شماره ۱ گل‌گهر با روش فرا ابتکاری رقابت استعماری

سال	عیار حد بهینه	عیار حد (تن)	استخراجی کل مواد	تفلیظ (تن)	ارسالی به ماده‌ی معدنی	دانه بندی ماده‌ی معدنی (تن)	فروشی کنسانتره	تولیدی گندله	سود (میلیارد ریال)	هزینه (میلیارد ریال)	ارزش خالص فعلی (میلیارد ریال)
۱	۴۷/۴۶	۳۹۹۸۱۲۱۱	۴۰۰۰۰۰۰	۱۲۰۰۰۰۰۰	۹۵۰۰۰۰۹	۳۰۲۷۴۸۸	۴۲۰۰۰۰۰	۷۶۶۱/۳۱	۱۸۱۴۲/۴۹		
۲	۴۷/۲۸	۳۹۹۸۸۷۵۵	۴۰۰۰۰۰۰	۱۲۰۰۰۰۰۰	۹۲۹۲۳۱	۲۱۸۵۲۶۸	۴۲۰۰۰۰۰	۶۸۷۲/۵۹	۱۴۲۹۱/۱۰		
۳	۴۷/۰۳	۴۰۰۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰۰۰	۱۱۹۹۸۹۶۲	۹۰۱۶۰۰۹	۱۳۴۱۷۷۱	۴۲۰۰۰۰۰	۶۰۶۵/۷	۱۰۴۱۹/۶۴		
۴	۴۶/۶۱	۳۹۹۸۷۴۶۰	۴۰۰۰۰۰۰۰	۱۲۰۰۰۰۰۰	۸۵۹۰۰۰۰	۴۹۶۸۴۹	۴۲۰۰۰۰۰	۵۲۱۹/۸۲	۶۵۴۲/۰۷		
۵	۴۰/۵۰	۲۷۷۸۳۰۰۸	۲۷۷۸۳۰۰۸	۹۷۴۳۸۴۳	۵۵۰۹۶۸	۰	۳۲۶۱۱۷۶	۳۲۶۲/۲۶	۲۶۹۶/۰۸		

در شکل ۶-۶ روند تغییرات عیار حد بهینه و ارزش خالص فعلی حاصل از عملیات بر اساس نتایج به دست آمده آورده شده است.



شکل ۶-۶: روند تغییرات عیار حد و ارزش خالص فعلی در طول سال‌های طرح

همان طور که در شکل ۶-۶ ملاحظه می‌شود، بر اساس نتایج این روش نیز، هم عیار حد بهینه و هم ارزش خالص فعلی در طول سال‌های طرح دارای روند نزولی هستند.

۴-۶ برنامه‌ریزی تولید

در این نرم‌افزار با استفاده از جدول توزیع عیار- تناژ در پایان هر سال می‌توان مقدار استخراج از هر یک از بازه‌های عیاری را محاسبه کرد. در جدول ۳-۶ این مقادیر استخراج سالیانه برای هر یک از بازه‌های عیاری آورده شده است.

جدول ۳-۶: مقدار استخراج از بازه‌های عیاری در هر سال (تن)

سال	باطله	۴۵-٪۴۰/۵	۴۹/۵-٪۴۵	۵۴-٪۴۹/۵	۵۸/۵-٪۵۴	۶۳-٪۵۸/۵
۱	۲۲۶۱۷۸۳۸	۱۲۶۹۹۶۲	۵۹۰۳۶۴۴	۷۵۳۸۳۶۱	۲۵۵۲۰۹۷	۹۹۳۱۰
۲	۲۲۸۴۳۲۱۱	۱۲۸۲۶۱۷	۵۸۹۶۰۱۹	۷۳۷۳۴۹۰	۲۴۹۶۲۸۰	۹۷۱۳۸
۳	۲۳۱۵۶۹۵۶	۱۳۰۰۲۳۳	۵۸۷۲۱۷۲	۷۱۵۴۳۱۱	۲۴۲۲۰۷۷	۹۴۲۵۰
۴	۲۳۶۴۷۸۳۳	۱۳۲۷۷۹۵	۵۷۹۷۳۶۶	۶۸۱۶۸۳۵	۲۳۰۷۸۲۶	۸۹۸۰۴
۵	۱۷۰۳۹۱۶۱	۹۵۶۷۲۷	۳۸۷۷۴۴۳	۴۳۷۱۹۵۹	۱۴۸۰۱۱۸	۵۷۵۹۶

با کسر مقدار باطله برداری سالانه از مقدار استخراج حاصل شده از بهینه‌سازی، مقدار استخراج ماده‌ی معدنی قابل محاسبه است و با استفاده از آن می‌توان نسبت باطله برداری سالانه را تعیین کرد. این موارد در جدول ۴-۶ آورده شده است.

جدول ۴-۶: مقادیر استخراجی باطله و ماده‌ی معدنی و نسبت باطله برداری

سال	کل مواد استخراجی (تن)	باطله استخراجی (تن)	ماده معدنی استخراجی (تن)	نسبت باطله برداری
۱	۳۹۹۸۱۲۱۱	۲۲۶۱۷۸۳۸	۱۷۳۶۳۳۷۴	۱/۳۰
۲	۳۹۹۸۸۷۵۵	۲۲۸۴۳۲۱۱	۱۷۱۴۵۵۴۴	۱/۳۳
۳	۴۰۰۰۰۰۰۰	۲۳۱۵۶۹۵۶	۱۶۸۴۳۰۴۴	۱/۳۷
۴	۳۹۹۸۷۴۶۰	۲۳۶۴۷۸۳۳	۱۶۳۳۹۶۲۶	۱/۴۵
۵	۲۷۷۸۳۰۰۸	۱۷۰۳۹۱۶۱	۱۰۷۴۳۸۴۳	۱/۵۹
مجموع	۱۸۷۷۴۰۴۳۰	۱۰۹۳۰۵۰۰۰	۷۸۴۳۵۴۳۰	۱/۴۱

با در نظر گرفتن قابلیت انباشت مواد کم عیار، بر اساس نتایج به دست آمده از این روش برای بهینه‌سازی عیار حد، می‌توان تناژ مواد ارسالی به انباشت‌گاه مواد کم عیار را به دست آورد. در جدول ۵-۶ مقادیر ارسالی به انباشت‌گاه برای سال‌های مختلف طرح آورده شده است.

جدول ۵-۶: تناژ ارسالی به انباشت‌گاه مواد کم عیار (تن)

سال	ماده معدنی ارسالی به انباشت‌گاه مواد کم عیار (تن)
۱	۴۴۱۳۳۶۵
۲	۴۲۱۶۳۱۳
۳	۳۹۴۲۴۷۳
۴	۳۴۸۰۵۴۷
۵	۴۴۹۰۳۲
مجموع	۱۶۵۰۱۷۲۸

در این جا نیز همانند نتایج حاصل شده از روش بهینه‌سازی جستجوی نسبت طلایی، مجموع تناژ مواد ارسالی به انباشت‌گاه مواد کم عیار بیشتر از حداکثر ظرفیت کارخانه‌ی تغلیظ است. همچنین کمینه عیار مواد موجود در پوش‌بک برابر با کمینه مقدار عیار حد بهینه می‌باشد که در سال ۱۵ام طرح حاصل شده است (۴۰/۵٪). بنابراین هم از لحاظ عیار و هم از لحاظ تناژ انباشت‌گاه مواد کم عیار می‌تواند ۱ سال دیگر به کارخانه‌ی تغلیظ خوراک دهی کند. با فرض این موضوع می‌توان طرح را به صورت ۶ ساله اجرا کرد که در سال آخر مقدار استخراج باطله و ماده‌ی معدنی صفر بوده و خوراک دهی به کارخانه‌ی تغلیظ با حداکثر ظرفیت از طریق انباشت‌گاه صورت می‌گیرد.

فصل هفتم

نتیجه گیری و پیشنهادها

۱-۷ نتیجه‌گیری

بهره‌برداری بهینه از ذخایر معدنی همواره مورد توجه طراحان و مهندسان بوده است. مهم‌ترین مبنایی که برای این عملیات مد نظر قرار گرفته، به حداکثر رساندن ارزش خالص فعلی حاصل شده از عملیات است. از این رو اگرچه از سال ۱۹۵۴، بهینه‌سازی عیار حد که پارامترهای متعدد اقتصادی و عملیاتی به آن وابسته است، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته، اما در دهه‌های اخیر تلاش‌ها معطوف به پیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی به واسطه‌ی تعیین این عیار بوده است. اساسی‌ترین نظریه در این زمینه توسط لین ارایه شده است. وی از طریق تقسیم عملیات معدنی در کانسار یک فلزی به سه قسمت معدن، کارخانه‌ی تغلیظ و واحد تصفیه و تعیین شش عیار کاندیدا، عیار حد بهینه را با هدف حداکثر ساختن ارزش خالص فعلی برای سال‌های مختلف عمر معدن محاسبه می‌کند.

با توجه به اهمیت اقتصادی و عملیاتی عیار حد بهینه، در تحقیق حاضر تعیین این عیار در معدن سنگ آهن شماره ۱ شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر سیرجان برای پوش‌بک طرح استخراجی حاضر (۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵) مد نظر قرار گرفته است. برای این منظور از آن جایی که معدن مذکور قابلیت فروش محصول به سه شکل دانه‌بندی شده، کنسانتره و گندله را دارا می‌باشد و الگوریتم لین برای فروش یک محصول ارایه شده است، اولین گام توسعه‌ی مدلی منطبق با روند عملیاتی این معدن بوده است. با تعیین روابط اساسی هزینه، درآمد و سود، در مرحله‌ی بعد تابع هدف مساله تعریف شده است.

با توجه به این که این مساله‌ی بهینه‌سازی از نوع غیر خطی است، می‌توان از انواع روش‌های بهینه‌سازی تحلیلی، عددی و یا هوشمند برای حل آن بهره برد. با مد نظر قرار دادن قابلیت استفاده از انواع روش‌های حذفی با توجه به یک کوهانه بودن تابع هدف و مزیت‌های این روش‌ها از جمله عدم نیاز به مشتق‌گیری، سهولت و سرعت در پیدا کردن مقدار بهینه، از روش جستجوی نسبت طلایی برای حل مساله استفاده شده است. این روش به دلیل سرعت زیاد در یافتن مقدار بهینه و همچنین سهولت محاسبات دارای کاربرد گسترده‌تری نسبت به دیگر روش‌های حذفی است. روش دیگر مورد استفاده قرار گرفته در این تحقیق، الگوریتم رقابت استعماری بوده است. این الگوریتم که از جمله روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری می‌باشد تا کنون قابلیت‌های بسیار بالایی برای حل مسایل بهینه‌سازی از خود نشان داده است.

به منظور تعیین عیارهای حد با استفاده از این روش‌ها برای هر روش یک برنامه در نرم‌افزار MATLAB R2011a توسعه داده شده است که با استفاده از آن‌ها مقدار عیار حد بهینه، تولید واحدهای مختلف، سود و ارزش خالص فعلی محاسبه گردیده است. بر این اساس مقدار ارزش خالص فعلی در روش جستجوی نسبت طلایی برابر با $18486/74$ میلیارد ریال و در الگوریتم رقابت استعماری برابر با $18142/49$ میلیارد ریال بوده است. تعداد تکرارها در روش جستجوی نسبت طلایی برای هر ۵ سال برابر با ۱۸ و در روش رقابت استعماری کم‌تر از ۱۸ بوده است. از طرفی دیگر فرآیند محاسباتی و برنامه نویسی روش جستجوی نسبت طلایی بسیار ساده‌تر از الگوریتم تکاملی رقابت استعماری است. بنابراین به طور کلی، در تحقیق حاضر روش جستجوی نسبت طلایی دارای برتری و اولویت نسبت به ICA بوده است.

با تعیین عیارهای حد در هر دو روش، برنامه استخراج سالیانه نیز تعیین شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از هر دو روش با در نظر گرفتن قابلیت انباشت مواد کم عیار، می‌توان یک سال مازاد بر سال‌های طرح کارخانه‌ی تغلیظ را به وسیله‌ی انباشت‌گاه با حداکثر ظرفیت خوراک دهی کرد.

۲-۷ پیشنهادها

- از آن جایی که بهینه‌سازی عیار حد مقدم بر تعیین برنامه‌ی استخراجی و تدوین طرح‌های معدن است، پیشنهاد می‌شود برای تمام سال‌های باقیمانده از عمر این ذخیره و هم چنین دیگر ذخایر مجموعه، این عملیات بهینه‌سازی صورت بگیرد و هر ساله اصلاح شود. سپس با استفاده از نتایج حاصل از آن، برنامه تولید سالیانه و طرح‌های استخراجی تدوین شوند.
- اگرچه الگوریتم لین جامع‌ترین نظریه در زمینه‌ی بهینه‌سازی عیار حد است اما با کاستی‌هایی همراه می‌باشد. در سال‌های اخیر پژوهشگران هر یک ضعف‌های این الگوریتم را به تنهایی مورد بررسی قرار داده و بر مبنای آن روشی را ارایه کرده‌اند. از جمله‌ی این تلاش‌ها می‌توان به در نظر گرفتن انباشت‌گاه‌ها در الگوریتم و استفاده از نظریه‌ی گزینه‌های واقعی^۱ (برای غلبه بر ضعف عدم توجه به طبیعت پویای قیمت‌ها در الگوریتم لین) اشاره کرد. اگرچه هر یک از این روش‌ها به تنهایی تنها یک نقص الگوریتم لین را مورد توجه قرار داده‌اند اما پیشنهاد می‌شود بهینه‌سازی عیار حد در معدن شماره ۱ و هم چنین دیگر ذخایر مجموعه، با استفاده از این روش‌ها نیز صورت پذیرد و با مقایسه‌ی نتایج حاصل شده بهترین استراتژی انتخاب شود.
- با توجه با ضعف‌های الگوریتم لین و تلاش‌های پژوهشگران، پیشنهاد می‌شود الگوریتمی با هدف پوشش دادن بیش از یک نقص الگوریتم لین در این زمینه توسعه داده شود.

1 - Real Options

منابع و مراجع

- آتش‌پز گرگری ا، (۱۳۸۷)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "توسعه الگوریتم بهینه‌سازی اجتماعی و بررسی کارایی آن"، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران.
- اصانلو م، (۱۳۸۹)، "عیار حد و نقش آن در طراحی معدن"، انتشارات دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، تهران.
- بهادری فرد س، (۱۳۹۰)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "طبقه‌بندی سنگ آهن گل‌گهر بر اساس قابلیت انفجار و طراحی الگوی چالزنی و انفجار مناسب"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- بهروز ع، (۱۳۸۹)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "بهینه‌سازی عیار حد معادن چند فلزی با استفاده از روش ارزش نقطه‌ای"، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
- حکمت آ، (۱۳۸۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "پیش‌بینی بازدهی سیستم بارگیری (شاول) بر اساس سنگ‌های منفجر شده بزرگ مقیاس در معدن سنگ آهن"، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- حمزه نژادی ا، (۱۳۸۶)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "تعیین محدوده نهایی بهینه و برنامه‌ریزی دراز مدت تولید معدن شماره (۱) گل‌گهر با استفاده از نرم افزارهای Whittle Four-X و NPVS+MFO"، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- مدیریت امور معدن شرکت سنگ آهن گل‌گهر، (۱۳۸۰)، "گزارش عملکرد مدیریت امور معدن در سال ۸۰"،.
- مدیریت امور معدن شرکت سنگ آهن گل‌گهر، (۱۳۹۰)، "گزارش آشنایی با معدن سنگ آهن گل‌گهر"،.
- شرکت مهندسیین مشاور کوشا معدن، (۱۳۹۱)، "طرح استخراج پنج ساله معدن از سال ۱۳۹۱ تا انتهای سال ۱۳۹۵"، مدیریت امور معدن شرکت سنگ آهن گل‌گهر.
- دفتر نظارت طراحی، (۱۳۹۱)، "گزارش عملکرد سالیانه"، مدیریت امور معدن شرکت سنگ آهن گل‌گهر.
- عطایی م، (۱۳۷۷)، "طرح پژوهشی تعیین مدل توزیع عیار در آنومالی شماره ۳ معدن سنگ آهن گل‌گهر"، شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر سیرجان.
- عطایی م، (۱۳۸۲)، رساله دکتری، "مدل‌سازی عیار حد بهینه برای ذخایر چند فلزی با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی"، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- عطایی م و اصانلو م، (۱۳۸۲)، "تعیین عیار حد بهینه معادن روباز با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی با استفاده از روش‌های حذفی"، مجله بین‌المللی علوم مهندسی، جلد ۱۴، شماره ۳، ص ۱۴۱ تا ۱۵۱.

عطایی م و حسینی س م ع، (۱۳۹۰)، "طراحی محدوده و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز"، انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیر کبیر، تهران.

عطایی م و حسینی س م ع، (۱۳۹۰)، "عملیات و تحلیل‌های اقتصادی در معادن روباز"، انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیر کبیر، تهران.

محاسبات تکاملی و الگوریتم رقابت استعماری، اینترنت، تاریخ مشاهده: مرداد ۱۳۹۲، قابل دسترسی از آدرس
<www.icasite.info>

مرجع الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، اینترنت، تاریخ مشاهده: مرداد ۱۳۹۲، قابل دسترسی از آدرس
<www.coasite.ir>

Abdolahisharif J., Bakhtavar E. and Anemangely M., (2012), "Optimal Cut-Off Grade Determination Based on Variable Capacities in Open-Pit Mining", **The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, Vol. 112, pp. 1065-1069.

Asad M. W. A., (2002), "Development of generalized cutoff grade optimization algorithm for open pit mining operations", **Journal of Engineering & Applied Sciences (ISSN: 1023-862)**, Vol. 21, No. 2.

Asad M. W. A., (2003), "Generalized cutoff grades optimization algorithm in two minerals case", **Journal of Engineering & Applied Sciences (ISSN: 1023-862)**, Vol. 22, No. 1.

Asad M. W. A., (2005), "Cutoff grade optimization algorithm with stockpiling option for open pit mining operations of two economic minerals", **International Journal of Surface Mining, Reclamation, and Environment**, Vol. 19, Issue 3.

Asad M.W.A., (2005), "Cutoff Grade Optimization Algorithm with Consideration of Dynamic Metal Price and Cost Escalation During Mine Life", **Proceedings of 32nd International Symposium on Computer Application in Minerals Industry**, Tucson, Arizona, USA.

Asad M.W.A., and Topal E., (2011), "Net Present Value Maximization Model for Optimum Cut-Off Grade Policy of Open Pit Mining Operations", **The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, Vol. 11, pp. 741-750.

Ataei M. and Osanloo M., (2003), "Determination of Optimum Cutoff Grades of Multiple Metal Deposits by Using The Golden Section Search Method", **The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, pp. 493-499.

Atashpaz-Gargari E. and Lucas C., (2007), "Imperialist Competitive Algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialist Competition", **IEEE Congress on Evolutionary Computing**, pp. 4661-4667.

Azimi Y., Osanloo M. and Esfahanipour A., (2012), "selection of The Open Pit Mining Cut-Off Grade Strategy Under Price Uncertainty Using a Risk Base Multi-Criteria Ranking System", **Arch. Min. Sci.**, Vol. 57, No.3, pp. 741-768.

Barr D., (2012), Master of Applied Science Thesis, "Stochastic Dynamic Optimization of Cut-Off Grade in Open Pit Mines", Department of Mining Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

Bascetin A. and Nieto A., (2007), "Determination of optimal cut-off grade policy to optimize NPV using a new approach with optimization factor", **The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, Vol. 107, pp. 87-94.

Bascetin A., Tuylu S. and Nieto A., (2011), "Influence of the ore block model estimation on the determination of the mining cutoff policy for sustainable mine production", **Environ Earth Sci. Springer-verlag**, Vol. 64, pp. 1409-1418.

Daghdelen K., Kawahata K., (2007), "opportunities in Multi-Mine Planning through Large Scale Mixed Integer Linear Programming Optimization, 33rd International Symposium on Computer Application in the Minerals Industry (APCOM), Santiago, Chile.

- Gholamnejad J., (2008), "Determination of the Optimum Cutoff Grade Considering Environmental Cost", **J. Int. Environmental Application & Science**, Vol. 3 (3), pp. 186-194.
- He Y., Zhu K., Gao S., Liu T. and Li Y., (2009), "Theory and Method of Genetic - Neural Optimization Cut-Off Grade and Grade of Crude Ore", **The Journal of Expert Systems with Applications**, Vol. 36, Issue 4, pp. 7617-7623.
- Hustrulid W. and Kuchta, M., (1995), "**Open-pit mine planning and design**", Vol. 1, Rotterdam: A.A. Balkama.
- Khodayari A.A., Jafarnejad A., (2012), "The Effect of Price Changes on Optimum Cut-Off Grade of Different Open-Pit Mines", **Journal of Mining & Environment (JME)**, Vol. 3, No.1, pp. 61-68.
- Lane K.F., (1988), "The Economic Definition of Ore - Cut Off Grade in Theory and Practice", **Mining Journal Books Limited**, London.
- Li S. and Yang C., (2012), "An Optimal Algorithm for Cut-Off Grade Calculation Using Multistage Stochastic Programming", **Journal of Theoretical and Applied Information Technology**, Vol. 45, No.1, pp. 117-122.
- Minnitt R. C. A., (2004), "Cut-off grade determination for the Maximum value of small wits-type gold mining operation", **The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, pp. 278-283.
- Rajabioun R., (2011), "Cuckoo Optimization Algorithm", **Journal of Applied soft Computing**, Vol. 11, pp. 5508-5518.
- Rao S.S., (2009), "Engineering Optimization (Theory and Practice) ", **John Wiley & Sons.Inc**, 4th, New Jersey.
- Rashidinejad F., Osanloo M. and Rezai, B., (2008), "An Environmental Oriented Model for Optimum Cut Off Grades in Open Pit Mining Projects to Minimize Acid Mine Drainage", **Int. J. Environ. Sci. Tech.**, 5 (2), pp. 183-194.
- Xiao-wei G., Qing W., Dao-zhong C and Bin Z., (2010), "Dynamic optimization of cutoff grade in underground metal mining", **Central South University Press and Springer**, Verlag Berlin Heidelberg.
- Yi R. and Sturgul J. R., (1987), "Analysis of cutoff grades using optimum control theory", APCOM 87. Proceedings of the Twentieth International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries, Vol. 3: Geostatistics, Johannesburg, SAIMM, pp. 263-269.
- Yu S., Zhu K. and He Y., (2011), "A hybrid intelligent optimization method for multiple metal grades optimization", **Neural Compute & Applic. Springer-Verlag London**.

پیوست ۱

جزئیات محاسباتی الگوریتم

رقابت استعماری

کشورهای تصادفی ایجاد شده در هر سال و مستعمرات استعمارگر نهایی (عیار حد بهینه)

1st Year		
No.	Initial Countries	Final Empire's Colony
1	0.4795	0.5337
2	0.4701	0.5014
3	0.4842	0.4774
4	0.4844	0.4747
5	0.4846	0.4050
6	0.4852	0.4576
7	0.4881	0.4515
8	0.4895	0.5609
9	0.4909	0.5478
10	0.4944	0.5033
11	0.4980	0.4908
12	0.4608	0.4826
13	0.4605	0.4967
14	0.4566	0.4745
15	0.5128	0.4744
16	0.5139	0.4747
17	0.5139	0.5019
18	0.4538	0.4795
19	0.5176	0.4784
20	0.4490	0.4050
21	0.4354	0.4746
22	0.4288	0.4050
23	0.4285	0.4690
24	0.4279	0.4751
25	0.4258	0.4839
26	0.5300	0.5029
27	0.5317	0.4353
28	0.4188	0.4056
29	0.5326	0.4877
30	0.4090	0.5850
31	0.4058	0.4717
32	0.5453	0.4175
33	0.5456	0.4481
34	0.5697	0.4843
35	0.5699	0.4986
36	0.5708	0.4746
37	0.5717	0.4783
38	0.5720	0.4612
39	0.5740	0.5052
40	0.5749	Final Empire = 0.4746

2nd Year		
No.	Initial Countries	Final Empire's Colony
1	0.4749	0.4731
2	0.4710	0.4725
3	0.4706	0.5076
4	0.4689	0.5240
5	0.4689	0.5074
6	0.4785	0.4050
7	0.4795	0.5850
8	0.4847	0.4646
9	0.4895	0.4735
10	0.4568	0.4726
11	0.4999	0.5048
12	0.5029	0.5789
13	0.5043	0.5680
14	0.5050	0.5073
15	0.4434	0.4829
16	0.4431	0.4679
17	0.4353	0.5850
18	0.4326	0.4764
19	0.4319	0.4723
20	0.4286	0.5309
21	0.4281	0.4546
22	0.4280	0.4288
23	0.4255	0.4615
24	0.5127	0.4847
25	0.4203	0.4729
26	0.4195	0.4728
27	0.4194	0.4999
28	0.4162	0.4482
29	0.4138	0.4743
30	0.5191	0.4050
31	0.5209	0.4050
32	0.5260	0.4738
33	0.5275	0.4745
34	0.5329	0.5061
35	0.5372	0.4050
36	0.5378	0.4415
37	0.5568	0.4728
38	0.5632	0.4050
39	0.5652	0.4728
40	0.5765	Final Empire = 0.4728

3rd Year		
No.	Initial Countries	Final Empire's Colony
1	0.4688	0.5371
2	0.4743	0.4050
3	0.4746	0.4278
4	0.4774	0.4439
5	0.4787	0.4050
6	0.4576	0.4889
7	0.4849	0.4912
8	0.4518	0.4509
9	0.4880	0.4703
10	0.4440	0.5556
11	0.4425	0.4840
12	0.4896	0.4050
13	0.4393	0.4400
14	0.4367	0.4664
15	0.4915	0.4702
16	0.4315	0.4050
17	0.4294	0.4619
18	0.4927	0.5193
19	0.4931	0.4050
20	0.4943	0.4803
21	0.4206	0.4703
22	0.4956	0.4472
23	0.4170	0.4722
24	0.4155	0.4703
25	0.4964	0.4611
26	0.4073	0.5173
27	0.4052	0.4703
28	0.5091	0.4725
29	0.5141	0.4691
30	0.5169	0.4449
31	0.5192	0.4050
32	0.5250	0.4834
33	0.5252	0.4695
34	0.5264	0.4719
35	0.5368	0.4899
36	0.5447	0.4163
37	0.5642	0.4837
38	0.5647	0.4706
39	0.5774	0.4310
40	0.5828	Final Empire = 0.4703

4th Year		
No.	Initial Countries	Final Empire's Colony
1	0.4611	0.5241
2	0.4668	0.4703
3	0.4604	0.4941
4	0.4594	0.5845
5	0.4591	0.4077
6	0.4551	0.4657
7	0.4538	0.4663
8	0.4518	0.4649
9	0.4482	0.4676
10	0.4420	0.4575
11	0.4706	0.4612
12	0.4278	0.5526
13	0.4133	0.4322
14	0.4128	0.4548
15	0.4746	0.4663
16	0.4774	0.5060
17	0.4822	0.4658
18	0.4869	0.4050
19	0.4906	0.5586
20	0.4920	0.4050
21	0.4934	0.4980
22	0.4963	0.5502
23	0.4976	0.4840
24	0.5036	0.4661
25	0.5074	0.4910
26	0.5096	0.4146
27	0.5102	0.4681
28	0.5187	0.4280
29	0.5245	0.4192
30	0.5284	0.4442
31	0.5315	0.4735
32	0.5324	0.4050
33	0.5340	0.4661
34	0.5430	0.4682
35	0.5470	0.4665
36	0.5472	0.4665
37	0.5534	0.4661
38	0.5669	0.4441
39	0.5697	0.4554
40	0.5829	Final Empire = 0.4661

5th Year		
No.	Initial Countries	Final Empire's Colony
1	0.416	0.405
2	0.417	0.405
3	0.424	0.405
4	0.425	0.429
5	0.426	0.405
6	0.428	0.405
7	0.432	0.405
8	0.441	0.405
9	0.441	0.405
10	0.446	0.405
11	0.447	0.405
12	0.452	0.543
13	0.453	0.405
14	0.462	0.405
15	0.465	0.405
16	0.468	0.405
17	0.470	0.405
18	0.485	0.562
19	0.485	0.405
20	0.493	0.405
21	0.496	0.405
22	0.501	0.405
23	0.503	0.405
24	0.503	0.468
25	0.507	0.405
26	0.508	0.417
27	0.508	0.405
28	0.509	0.405
29	0.510	0.405
30	0.515	0.405
31	0.520	0.405
32	0.537	0.438
33	0.538	0.405
34	0.552	0.405
35	0.556	0.405
36	0.562	0.405
37	0.563	0.405
38	0.569	0.405
39	0.584	0.493
40	0.585	Final Empire = 0.4050

Abstract

Determination of optimum cut off grade during the mine life, is one of the important and fundamental issues in economy and design of mine. In the recent decades maximizing net present value in this problem is taken into consideration. According to economic importance of this parameter and its dynamic nature, the aim of present study has been calculated optimum cut off grades in mine No.1 of Gol-e-Gohar iron ore mine for recent 5-years mining plan's pushback. In most comprehensive theory on this field that presented by Lane, one saleable product has been considered. Hence and according to this mine has 3 saleable products (grading product, concentrate and pellet), optimization model based on the operation of the mine has been developed. Then by determination of objective function, Golden Section Search method and Imperialist Competitive Algorithm have been used to solve it. For this purpose, software developed in MATLAB R2011a. Based on the results, the net present value has been obtained by Golden section Search method equal to 18486.84 billion rial and by Imperialist Competitive Algorithm equal to 18142.49 billion rial. To solving the problem number of iterations in Golden Section Search method for each year was equal 18 and in Imperialist Competitive Algorithm was less than 18. In addition, computing and programming process of Golden Section Search method was easier than Imperialist Competitive algorithm. So in general, the Golden Section Search method on this study has a higher priority. Finally by using results of this optimizing operation, production scheduling has been done for 5-years mining plan. Also by considering Stockpiling low grade ore, can feeding concentrate plant in maximum capacity for 1 year addition to primary plan.

Keywords: Cut off Grade, Optimum Cut off Grades, Optimizing, Net Present Value (NPV), Golden Section Search Method, Imperialist Competitive Algorithm (ICA), Gol-e-Gohar Iron Ore Mine



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

**Modeling and Optimizing Cutt-off Grades in
Gol-e-Gohar Iron Ore Mine-Mine NO. 1**

Sadjad Mohammadi

Supervisors:

Prof. M. Ataei

Prof. R. Khalokakaie

September 2013