

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج

پایان نامه کارشناسی ارشد

بهینه سازی محدوده نهایی و برنامه ریزی تولید در معادن روباز با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

شهاب الدین رافعی

اساتید راهنما

دکتر محمد عطایی

دکتر رضا خالوکاکایی

استاد مشاور

دکتر رامین رفیعی

دی ماه ۹۴

این تحقیق پیشکشی است به پدر و مادر عزیز و فداکارم و همسر مهربانم

که عاشقانه و صبور همیار و همراه زندگی‌ام هستند

،

معلمان بزرگوارم که اندرزشان مسیر

و

دوستانم که انتقادشان چراغ راهم است.

تشکر و قدردانی:

بر خود لازم می‌دانم از زحمات استادان عزیزم آقایان دکتر کاکایی و دکتر عطایی به عنوان اساتید راهنما که در تمامی مراحل این تحقیق مرا صمیمانه یاری کردند تشکر نمایم.

از همه دوستان و اساتیدی که در طی انجام این پروژه مرا از لطف خود بی‌بهره نگذاشتند، کمال تشکر را می‌نمایم و برای تمام عزیزان آرزوی موفقیت را دارم.

تعهد نامه

اینجانب **شهاب الدین رافعی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **بهینه سازی محدوده نهایی و برنامه ریزی تولید در معادن روباز با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری** تحت راهنمایی **دکتر محمد عطائی و دکتر رضا خالوکا کائی** متعهد می شوم.

- 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 می باشد 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 می گردد.
- 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 می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

از آغاز فعالیت معدنکاری نوین توسط بشر، لزوم توجه به پارامترهای دخیل در قیمت تمام شده و اقتصاد معدنکاری برای بالا بردن بهره‌وری و سودآوری این فعالیت اقتصادی به شدت احساس می‌شود. کاهش هزینه‌ی تمام شده استخراج و افزایش حجم استخراج در زمان مشخص، بهترین روش برای افزایش سود حاصل در این عرصه است. با توجه به این موارد لزوم وجود برنامه‌ریزی برای تولید در یک معدن امری ضروری به نظر می‌رسد.

در سده‌ی گذشته روش‌ها و مدل‌های مختلفی برای یافتن محدوده‌ی نهایی بهینه و همچنین بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید ابداع و ایجاد شده است که هر یک دارای مزایا و نواقصی بوده‌اند. عوامل زمین‌شناسی، اقتصادی، فنی و همچنین ماهیت مدل‌ها و روش‌های به کار رفته در توسعه‌ی مدل‌ها از جمله عواملی هستند که در تطبیق نتایج با شرایط واقعی مؤثرند.

در این تحقیق تلاش شده است تا با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری و هوشمند جدید تحت عنوان الگوریتم رقابت استعماری، اقدام به بهینه‌سازی محدوده‌ی نهایی معادن روباز و برنامه‌ریزی تولید آنها و نزدیک کردن نتایج به شرایط واقعی شود. الگوریتم رقابت استعماری الگویی است که با الهام از چرخه‌ی رشد اجتماعی سیاسی جوامع بشری اقدام به حل مسائل بهینه‌سازی می‌کند. مزیت این الگوریتم سادگی فهم و درک و سرعت زیاد در رسیدن به پاسخ مطلوب است.

استفاده از این روش برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید و محدوده‌ی نهایی معدنکاری، باعث سهولت در تولید یک برنامه کامپیوتری مرتبط و ایجاد تغییرات در پارامترهای اساسی در مواقع نیاز نیز می‌شود. همچنین در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها این روش دارای سرعت همگرایی بیشتری در حل مسائل با متغیرهای زیاد می‌باشد.

برای بهینه‌سازی این دو مسأله با الگوریتم رقابت استعماری، در این تحقیق از مدل بلوکی اقتصادی به عنوان ورودی استفاده شده است. سپس تعدادی محدوده به عنوان پارامترهای اولیه‌ی ورودی مسأله از درون مدل بلوکی اقتصادی انتخاب شده و عملیات بهینه‌سازی به روش الگوریتم رقابت استعماری بر روی آنها اعمال شده است. در نهایت پاسخ بدست آمده از اجرای الگوریتم رقابت استعماری همان پاسخ مسأله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید و محدوده نهایی است. در مورد مسأله محدوده نهایی بهینه روش ارائه شده در این تحقیق موفق شد نتایج قابل قبولی در مقایسه با دیگر روش‌های موجود بدست آورد و پاسخ‌های بدست آمده در اجراهای متعدد برنامه کامپیوتری نوشته شده در محدوده‌های متعدد نیز بسیار نزدیک به هم و نزدیک به پاسخ بهینه‌ی واقعی است. اما این امر در مورد مسأله برنامه ریزی تولید محقق نشد. علت این امر آن است که شیوه‌ی بهینه‌سازی در الگوریتم رقابت استعماری، برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید مناسب نبوده و الگوریتم در اجراهای متعدد پاسخ‌های متفاوتی تولید می‌کند. بنابراین این روش به کار رفته در این تحقیق برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید مناسب تشخیص داده نشد. البته در انتها پیشنهاداتی همچون اجرای مکرر و مقایسه‌ی نتایج برای انتخاب بهترین پاسخ ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی:

بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی تولید، محدوده نهایی، بهینه‌سازی هوشمند، الگوریتم رقابت استعماری.

فصل اول کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- تعریف مسأله.....	۳
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۵
۴-۱- اهداف تحقیق.....	۶
۵-۱- روش تحقیق.....	۶
۶-۱- سازماندهی پایان نامه.....	۷
فصل دوم طراحی محدوده نهایی و برنامه ریزی تولید در معادن روباز.....	۹
۱-۲- مقدمه.....	۱۰
۲-۲- طراحی محدوده نهایی بهینه.....	۱۰
۱-۲-۲- مفهوم محدوده نهایی.....	۱۰
۲-۲-۲- روشهای طراحی محدوده نهایی بهینه.....	۱۲
الف- روش مخروط شناور.....	۱۴
ب- روش مخروط شناور دو.....	۱۵
پ- روش مخروط شناور دو اصلاح شده.....	۱۶
ت- اصلاحیهی دوم مخروط شناور دو.....	۱۹
ث- روش برنامه ریزی پویا.....	۲۰
ج- تئوری گراف لرچ و گراسمن.....	۲۱
چ- روش تحلیل جریان شبکه.....	۲۲
ح- الگوریتم کروبوفا.....	۲۳
۳-۲- برنامه ریزی تولید.....	۲۴
۱-۳-۲- مفهوم برنامه ریزی تولید.....	۲۴
۲-۳-۲- ضرورت برنامه ریزی تولید.....	۲۵
۳-۳-۲- انواع برنامه ریزی تولید بر مبنای زمانبندی.....	۲۶
الف- برنامه ریزی تولید بلند مدت.....	۲۶
ب- برنامه ریزی تولید میان مدت.....	۲۷
پ- برنامه ریزی تولید کوتاه مدت.....	۲۸
۴-۳-۲- سابقه ی تحقیق.....	۲۹
فصل سوم الگوریتم رقابت استعماری.....	۳۵
۱-۳- مقدمه.....	۳۶
۲-۳- الگوریتم رقابت استعماری.....	۳۶
۱-۲-۳- مفاهیم پایه ای الگوریتم.....	۳۸
۳-۳- ساختار و کارکرد الگوریتم رقابت استعماری.....	۴۰
۱-۳-۳- شکل دهی امپراطوری های اولیه.....	۴۱

۴۲	سیاست جذب-۲-۳-۳
۴۴	انقلاب-۳-۳-۳
۴۵	جایابی احتمالی موقعیت مستعمره و استعمارگر-۴-۳-۳
۴۵	رقابت استعماری-۵-۳-۳
۴۷	سقوط امپراطوری‌های ضعیف-۶-۳-۳
۴۷	فلوچارت الگوریتم-۴-۳-۳
۴۹	الگوریتم رقابت استعماری فازی-۵-۳-۳
۵۰	مزایا و معایب استفاده از ICA در بهینه‌سازی-۶-۳-۳
۵۰	مزایا-۱-۶-۳
۵۱	معایب-۲-۶-۳
۵۱	جمع بندی-۷-۳-۳

فصل چهارم بهینه‌سازی محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز با استفاده از

الگوریتم رقابت استعماری.....۵۳

۵۴	مقدمه-۱-۴
۵۴	طراحی محدوده نهایی معادن روباز با استفاده از ICA-۲-۴
۵۴	کشور مدل شده برای مسأله محدوده بهینه نهایی-۱-۲-۴
۵۵	الف-روش اول
۵۷	ب-روش دوم
۵۷	پ-روش سوم
۵۸	ت-روش چهارم
۵۸	ث-روش پنجم
۵۹	جمعیت اولیه-۲-۲-۴
۶۰	انتخاب استعمارگر، تخصیص مستعمرات و ایجاد امپراطوری‌ها-۳-۲-۴
۶۱	سیاست جذب-۴-۲-۴
۶۲	انقلاب در کشورهای مستعمره-۵-۲-۴
۶۳	رقابت استعماری-۶-۲-۴
۶۳	پایان اجرای الگوریتم و بهینه‌سازی-۷-۲-۴
۶۴	پارامترهای کنترل کننده-۸-۲-۴
۶۶	حل یک مثال-۹-۲-۴
۶۶	الف-مدل کردن مسأله
۶۷	ب-جمعیت اولیه
۶۷	پ-انتخاب استعمارگر، تخصیص مستعمرات و ایجاد امپراطوری‌ها
۶۹	ت-اجرای سیاست جذب
۷۰	ث-اجرای فرآیند انقلاب
۷۱	ج-رقابت استعماری
۷۱	۱۰-۲-۴ نتایج برنامه‌ی کامپیوتری و مقایسه با مقدار واقعی
۷۳	الف-محدوده نهایی بهینه با روش مخروط شناور

ب- محدوده نهایی بهینه با روش برنامه‌ریزی پویا	۷۳
پ- محدوده نهایی بهینه با روش الگوریتم رقابت استعماری	۷۴
۳-۴- برنامه‌ریزی تولید معادن روباز با استفاده از ICA	۷۶
۱-۳-۴- بررسی معیارها و انتخاب معیار مناسب	۷۶
۲-۳-۴- مدل ارائه شده برای برنامه‌ریزی تولید	۷۷
۳-۳-۴- مدل کردن تابع هدف برای الگوریتم	۷۸
الف- ایجاد جمعیت اولیه	۷۸
ب- تابع هزینه	۷۹
پ- بهینه‌سازی با کمک الگوریتم	۷۹
ت- اعمال محدودیت‌های مسأله بر روی کشورهای تولید شده	۸۰
ث- پایان اجرای الگوریتم	۸۱
۴-۳-۴- پارامترهای کنترل کننده	۸۲
۵-۳-۴- نتایج برنامه کامپیوتری و مقایسه با روشهای دیگر	۸۲
الف- برنامه‌ریزی تولید با روش گرشون	۸۳
ب- برنامه‌ریزی تولید با روش ICA	۸۵
۴-۴- جمع بندی	۸۷
فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۸۹
۱-۵- نتیجه‌گیری	۹۰
۲-۵- پیشنهادات	۹۱
منابع و مراجع	۹۳
پیوست‌ها	۹۷

شکل ۱-۲- رابطه بین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید.....	۱۱
شکل ۲-۲- فلوشیت مخروط شناور ۲.....	۱۷
شکل ۳-۲- فلوشیت مخروط شناور ۲ اصلاح شده.....	۱۸
شکل ۴-۲- فلوشیت اصلاحیه دوم مخروط شناور ۲.....	۱۹
شکل ۱-۳- حرکت یک مستعمره به سمت استعمارگر بر روی تابع هدف.....	۳۹
شکل ۲-۳- متغیرهای اجتماعی تشکیل دهنده یک کشور.....	۴۱
شکل ۳-۳- تقسیم مستعمرات میان کشورهای استعمارگر.....	۴۲
شکل ۴-۳- اعمال سیاست جذب در الگوریتم رقابت استعماری.....	۴۳
شکل ۵-۳- اعمال سیاست انقلاب.....	۴۴
شکل ۶-۳- جابه جایی موقعیت مستعمره و استعمارگر.....	۴۵
شکل ۷-۳- رقابت استعماری بین امپراطوری‌ها.....	۴۶
شکل ۸-۳- حذف امپراطوری‌های فاقد مستعمره.....	۴۷
شکل ۹-۳- فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری.....	۴۸
شکل ۱-۴- یک مدل بلوکی دو بعدی نمونه.....	۵۵
شکل ۲-۴- الگوریتم پیشنهادی برای مدل سازی تعیین محدوده نهایی بهینه با ICA.....	۶۵
شکل ۳-۴- مدل بلوکی دو بعدی برای بررسی الگوریتم.....	۶۶
شکل ۴-۴- جمعیت اولیه ایجاد شده به صورت تصادفی.....	۶۸
شکل ۵-۴- نتیجه‌ی اجرای فرآیند مدل شده روی محدوده‌ی فرضی.....	۷۱
شکل ۶-۴- مدل بلوک اقتصادی فرضی.....	۷۲
شکل ۷-۴- محدوده نهایی به دست آمده با استفاده از مخروط شناور.....	۷۳
شکل ۸-۴- محدوده نهایی به دست آمده با استفاده از برنامه‌ریزی پویا.....	۷۳
شکل ۹-۴- نمودار نزدیک شدن بهترین پاسخ در هر اجرا به پاسخ نهایی.....	۷۵
شکل ۱۰-۴- محدوده نهایی به دست آمده با استفاده از ICA.....	۷۵
شکل ۱۱-۴- مدل بلوکی به همراه محدوده‌ی بهینه نهایی مشخص شده.....	۷۸
شکل ۱۲-۴- کشور تصادفی مدل شده برای مدل بلوکی شکل ۱۰-۴.....	۷۹
شکل ۱۳-۴- محدوده‌ی نهایی مدل بلوکی اقتصادی فرضی.....	۸۴
شکل ۱۴-۴- برنامه‌ریزی تولید با روش گرشنون برای مدل بلوکی فرضی.....	۸۴
شکل ۱۵-۴- برنامه‌ریزی تولید با روش ICA برای مدل بلوکی فرضی.....	۸۶

فهرست جدول‌ها

صفحه

جدول ۱-۲- الگوریتم‌های تعیین محدوده نهایی بهینه.....	۱۳
جدول ۳-۲- الگوریتم‌های ارائه شده برای برنامه‌ریزی تولید.....	۳۳
جدول ۱-۴- امپراطوری‌های اولیه‌ی تشکیل شده.....	۶۹
جدول ۲-۴- مستعمرات قبل و بعد از سیاست جذب.....	۶۹
جدول ۳-۴- مستعمرات قبل و بعد از اجرای فرآیند انقلاب.....	۷۰
جدول ۴-۴- استعمارگر برتر به دست آمده در هر فاز.....	۸۱

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

با آغاز قرن بیستم و شروع انقلاب علمی و تحولات اقتصادی عظیم در جوامع پیشرفته، لزوم رویکرد علمی در تمام زمینه‌های فعالیت‌های اقتصادی در دنیا امری ضروری و اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسید. لذا دانشمندان و مهندسان در عرصه‌های مختلف شروع به ایجاد و رشد روش‌هایی برای بهینه‌سازی و بهره‌وری حداکثری از منابع و امکانات موجود برای رشد و توسعه‌ی هرچه بیشتر اقتصادی جامعه بشری کردند.

معدن نیز به عنوان یکی از فعالیت‌های پایه و مؤثر در کلیه‌ی فرآیندهای اقتصادی از این قاعده مستثنی نبود. چراکه بهینه‌سازی فرآیندهای معدنی می‌توانست منجر به افزایش تولید و کاهش هزینه‌های پایه‌ی دیگر صنایع وابسته و به طور کلی موجبات رشد و شکوفایی جوامع بشری را فراهم آورد.

در راستای این امر تلاش‌هایی برای افزایش تولید و کاهش هزینه‌های معدنکاری صورت گرفت که در نهایت منجر به ایجاد مفاهیمی چون محدوده‌ی نهایی و برنامه‌ریزی تولید شد. بهینه‌سازی این دو مفهوم می‌تواند تأثیر زیادی بر اقتصادی بودن یک فعالیت معدنکاری بگذارد.

همچنین بررسی دقیق این دو مفهوم پیش از آغاز فعالیت استخراج در یک محدوده می‌تواند تعیین کند که اساساً آیا یک محدوده دارای ارزش اقتصادی برای شروع سرمایه گذاری می‌باشد، و همچنین این دو مفهوم به عنوان مفاهیم پایه برای مقایسه‌ی چند محدوده‌ی معدنی برای سرمایه گذاری و اولویت‌بندی این کار به شمار می‌رود. چراکه برای تعیین جریان نقدینگی و بیشترین ارزش خالص فعلی که از ملزومات یک تصمیم درست اقتصادی برای آغاز یک فعالیت می‌باشد، می‌بایست محدوده‌ی بهینه‌ی نهایی به دست آمده پیش از آغاز فعالیت تا آنجا که امکان دارد نزدیک به محدوده نهایی بهینه‌ی واقعی باشد.

پس هرگونه تلاش برای دستیابی به محدوده‌ی نهایی بهینه و برنامه‌ریزی تولید بهینه در طول عمر یک معدن، در حقیقت مترادف با تلاش برای افزایش ارزش اقتصادی و سودآوری حداکثری معدن، صنایع وابسته و به طور کلی پویایی اقتصادی خواهد بود.

۱-۲- تعریف مسأله

پس از اکتشاف معدن و تهیه‌ی مدل زمین‌شناسی از کانسار، در صورتی که روش روباز برای استخراج آن کانسار در نظر گرفته شود، باید برای معدن یک محدوده‌ی نهایی بهینه در نظر گرفته شود. سپس با توجه به ملاحظات فنی، اقتصادی و همچنین موانع و ظرفیت‌های موجود، برنامه‌ریزی تولید در معدن انجام شود. هدف از این برنامه‌ریزی، تعیین الگوی استخراج بهینه از معدن است به گونه‌ای که علاوه بر تأمین بالاترین سود اقتصادی، محدودیت‌های تولید نیز برآورده شود. این محدودیت‌ها شامل موارد زیر است (میرزایی، ۱۳۸۱):

- محدودیت ظرفیت استخراج
 - محدودیت ظرفیت کارخانه فرآوری
 - محدودیت مربوط به عیار/عیارهای کارخانه فرآوری
 - محدودیت شیب دیواره معدن
- زمان استخراج بلوک‌ها و مقصد آنها بعد از استخراج، نه تنها مقدار جریان نقدینگی معدن را در هر سال تعیین می‌کند، بلکه برنامه‌ریزی برای تولید در سال‌های آتی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. اما محدوده‌ی نهایی معدن با بالاترین ارزش اقتصادی، زمانی مشخص می‌شود که ارزش اقتصادی بلوک‌ها مشخص شده باشد، که این امر خود وابسته به زمان استخراج بلوک‌ها، زمان استخراج آن‌ها و محدوده‌ی نهایی معدن است. بنابراین فرآیند طراحی و برنامه‌ریزی معدن، یک فرآیند بهینه‌سازی چند

متغیره بوده و نیازمند حل همزمان است. پس از چند دهه تلاش مستمر، هنوز مسأله‌ی طراحی و برنامه‌ریزی تولید با در نظر گرفتن تمام جوانب به صورت همزمان، یک مسأله‌ی بدون جواب باقی مانده است.

روش معمول برای حل این مسأله بدین صورت است که با فرض یک عیار حد مشخص و تخصیص ارزش اقتصادی به هر بلوک، محدوده‌ی نهایی معدن با الگوریتم‌های کارا مانند الگوریتم لرچ و گروسمن یا جریان شبکه حل می‌شود. بعد از تعیین محدوده نهایی معدن، زمان استخراج بلوک‌ها مشخص خواهد شد. حال با استفاده از زمان به دست آمده برای استخراج بلوک‌ها در این مرحله، ارزش اقتصادی بلوک‌ها معین می‌شود و این فرآیند ادامه پیدا می‌کند تا پس از چند مرحله تکرار، طرح واحدی برای استخراج معدن مشخص شود (حسینی، ۱۳۸۷).

در سال‌های اخیر ابداع و توسعه‌ی الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند موجب راحتی و افزایش سرعت حل مسائل چند متغیره‌ی بهینه‌سازی شده است. مزیت این الگوریتم‌ها در نظر گرفتن همزمان تمامی پارامترهای دخیل در مسأله و حرکت همه جانبه به سمت یک نقطه‌ی بهینه است. همین امر موجب برتری این الگوریتم‌ها در حل مسائل پویا و دینامیک مانند برنامه‌ریزی تولید در معادن شده است. در صورت درست مدل کردن مسأله بر مبنای این الگوریتم‌ها، اغلب نتیجه‌ی حاصل بسیار نزدیک به نقطه‌ی بهینه‌ی واقعی به دست می‌آید. الگوریتم رقابت استعماری یکی از جدیدترین روش‌های بهینه‌سازی هوشمند موجود می‌باشد که بر مبنای رشد سیاسی و اجتماعی جوامع بشری در طول تاریخ ابداع شده است.

حل مسأله "بهینه‌سازی محدوده‌ی نهایی و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز" با الگوریتم رقابت استعماری می‌تواند باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌ی عملیات معدنکاری شده و سود حاصل از فعالیت معدنکاری را افزایش دهد.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

در معادن روباز دو مسأله "طراحی محدوده نهایی" و "برنامه‌ریزی تولید" از اساسی‌ترین مسائل مطرح در زمینه بهینه‌سازی است. در صورت بهینه‌سازی این دو مسأله می‌توان گفت قدم بزرگی در راستای بهینه‌سازی فرآیند استحصال کانی از معدن برداشته شده و گامی در جهت افزایش سود حاصل از فعالیت برداشته شده است.

برای حل این دو مسأله تلاش‌های بسیاری صورت گرفته است. در مورد مسأله طراحی محدوده بهینه نهایی در معادن روباز در حالتی که ارزش زمانی پول را در نظر نگیریم، این امر به بهترین شکل توسط تئوری گراف لرچ و گروسمن حل شده است و از نظر ریاضی ثابت شده که این پاسخ بهینه‌ی واقعی و پاسخ قطعی مسأله است (Gordon, 1996). ولی پیچیدگی روش و محاسبات زیاد برای دستیابی به پاسخ از معایب این روش است (کاکائی، ۱۳۸۴).

برای حل مسأله‌ی برنامه‌ریزی تولید نیز روش‌های مختلفی چون روش ابتکاری گرشون، روش ابتکاری ونگ و سویم، روش تحلیل پارامتری، روش برنامه‌ریزی خطی صحیح و ... ارائه شده که هرکدام با مزایا و معایبی همراه بوده و از حل بهینه‌ی این مسأله ناتوان هستند (رزمجو، ۱۳۹۳). با توجه به موارد ذکر شده استفاده از روش‌های جدید برای حل مسائل ذکر شده امری ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به اهمیت کاهش زمان و هزینه‌های بهینه‌سازی، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند و محاسبات تکاملی در تمامی حوزه‌های مهندسی به امری رایج تبدیل شده است. علت این امر نیز این است که این روش‌ها با سرعت بیشتر و نیاز به محاسبات کمتر و همچنین سادگی برنامه‌نویسی کامپیوتری، انعطاف بیشتری در مواجهه با مسائل بهینه‌سازی دارند.

در مورد حل مسأله "بهینه‌سازی محدوده‌ی نهایی و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز" نیز استفاده از الگوریتم رقابت استعماری، می‌تواند منجر به کاهش زمان و هزینه‌ی محاسبه و نیز انعطاف‌پذیری و

انطباق بهتر با تغییرات پارامترهای مسأله همچون قیمت ماده معدنی و عیار حد بهینه در طول عمر معدن شود.

۱-۴- اهداف تحقیق

در این پایان نامه سعی شده تا برای حل مسأله محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید با کمک الگوریتم رقابت استعماری تلاش شود و مدلی برای تهیه برنامه کامپیوتری ارائه شود.

برای حل مسأله‌ی "بهینه‌سازی محدوده‌ی نهایی و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز" با الگوریتم رقابت استعماری، تابع هدف تعیین کننده‌ی قدرت کشورها، ارزش اقتصادی محدوده‌ی مورد نظر است که به عنوان یک کشور تصادفی تولید شده است. در طی این فرآیند، الگوریتم مورد بحث باید موفق به شناسایی و تولید محدوده‌ای متشکل از تعدادی بلوک با بیشترین ارزش اقتصادی ممکن در کانسار شود. همچنین این الگوریتم باید قادر به مدیریت پارامترهای محدود کننده نظیر محدودیت مربوط به عیار و محدودیت زاویه شیب باشد. همچنین با توجه به قابلیت تطبیق‌پذیری بالای این الگوریتم، می‌توان با اجرای مداوم آن پس از هر سیکل استخراج و محاسبه‌ی مجدد بلوک‌های استخراجی، با توجه به محدودیت‌های موجود، اقتصادی‌ترین بلوک‌ها و به عبارتی برنامه‌ریزی تولید بهینه را به دست آورد. همچنین در طی مراحل اجرای این الگوریتم، می‌توان پارامترهایی نظیر قیمت ماده معدنی یا عیار حد بهینه را نیز متغیر در نظر گرفته و به این ترتیب نتایج حاصل از الگوریتم برای این مسأله تطبیق بهتری با واقعیت خواهد داشت.

۱-۵- روش تحقیق

در این پایان نامه به بررسی امکان استفاده از الگوریتم رقابت استعماری در مورد حل مسائل بهینه‌سازی محدوده نهایی معادن روباز و برنامه‌ریزی تولید به ترتیب زیر پرداخته شد:

۱- در ابتدا با جمع آوری و بررسی اطلاعات مربوط به روش‌های موجود برای حل این مسائل پرداخته شد.

۲- سپس با توجه به تعریف الگوریتم سعی شد تا راهی برای تبدیل مفاهیم این دو مسأله به مفاهیمی قابل هضم برای الگوریتم پرداخته شود.

۳- مدلی برای تعریف هر کانسار معدنی برای حل توسط الگوریتم رقابت استعماری ارائه شد.

۴- مدل ارائه شده از لحاظ نظری بررسی و کارکرد و درستی آن مورد بحث قرار گرفت.

۵- در نهایت مدل برای اعتبارسنجی بر روی یک مدل بلوکی دو بعدی مورد بررسی قرار گرفت.

۱-۶- سازماندهی پایان‌نامه

در فصل دوم مسائل طراحی محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید مورد بحث قرار گرفته است. روش‌ها و ضرورت طراحی محدوده نهایی و شیوهی بهینه‌سازی آن، همچنین مفهوم و ضرورت برنامه‌ریزی تولید و انواع آن در این فصل به تفصیل تشریح شده‌اند.

در فصل سوم به الگوریتم رقابت استعماری پرداخته شده است. مبانی این الگوریتم تشریح شده و روش بهینه‌سازی آن مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها به کارکرد و مزایا و معایب آن پرداخته شده است.

فصل چهارم که در حقیقت بخش اصلی این تحقیق را شامل می‌شود، به مدلسازی دو مسأله‌ی محدوده نهایی بهینه و برنامه‌ریزی تولید برای الگوریتم رقابت استعماری، اختصاص دارد. این فصل در دو قسمت کلی تدوین شده است. قسمت اول به مسأله‌ی محدوده نهایی و قسمت دوم به مسأله برنامه‌ریزی تولید پرداخته است. در هر قسمت روش‌هایی برای حل مسائل به کمک الگوریتم رقابت استعماری ارائه شده است.

در نهایت در فصل پنجم نتایج این تحقیق بررسی و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

فصل دوم

طراحی محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز

۲-۱- مقدمه

به طور کلی ذخایر معدنی به دو روش عمده‌ی روباز و زیرزمینی استخراج می‌شوند. روش‌های روباز به علت مزایایی از قبیل امکان استفاده از ماشین آلات بزرگتر، تولید بیشتر و ایمنی بیشتر در اغلب کانسارهای بزرگ معدنی دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرند. در معادن روباز پس از طی مراحل اکتشافی و مطالعات امکان سنجی و پیش از شروع فرآیند استخراج، دو طراحی مهم باید انجام گیرد. اول طراحی "محدوده بهینه نهایی" و دوم مشخص کردن "برنامه‌ریزی تولید". در این بخش به تفصیل به مفهوم، لزوم و سابقه‌ی این دو مسأله پرداخته خواهد شد.

۲-۲- طراحی محدوده نهایی بهینه

۲-۲-۱- مفهوم محدوده نهایی

محدوده‌ی نهایی نشان دهنده شکل معدن در آخر عمر آن است و گویای این امر است که استخراج به شکل روباز در خارج از این محدوده اقتصادی نیست. هدف از پیش بینی این محدوده پیش از شروع عملیات استخراج این است که سود کلی حاصل از عملیات معدنکاری در انتهای عمر معدن، بیشترین میزان ممکن باشد. به علت نیاز به سرمایه گذاری اولیه‌ی زیاد معادن روباز، بهینه‌سازی محدوده نهایی به دلایل زیر اهمیت می‌یابد (کاکائی، ۱۳۸۴):

۱- تعیین میزان ذخیره‌ی قابل برداشت و میزان باطله‌ای که باید برای آن برداشت شود

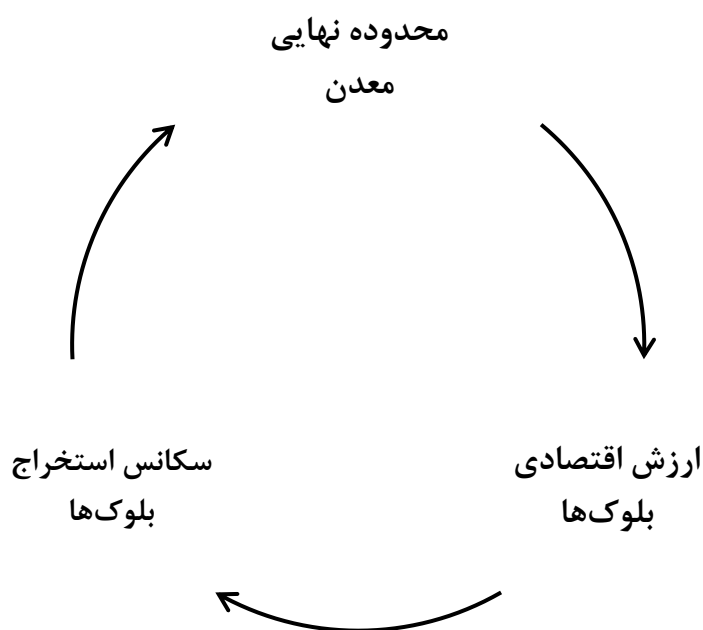
۲- تعیین محل دپوی باطله، کارخانجات فرآوری و تأسیسات مورد نیاز

۳- طراحی جاده‌های دسترسی

۴- برنامه‌ریزی تولید برای حداکثر کردن NPV حاصل از فعالیت معدنکاری

برای طراحی محدوده نهایی سه روش دستی، دستی کامپیوتری و بهینه وجود دارد. روش دستی پس از محاسبه‌ی نسبت باطله برداری سربه‌سری و سربه‌سری مجاز، با سعی و خطا تلاش می‌کند تا محدوده‌ای را بیابد که در آن این دو نسبت یکی باشند. روش دوم نیز بر همان اساس استوار است با این تفاوت که در این روش محاسبات، توسط کامپیوتر انجام می‌گیرد. اساس کار در روش‌های بهینه، بیشینه کردن سود معدن است (کاکائی، ۱۳۸۴).

البته بنابر معمای ویتل^۱ تعیین محدوده‌ی نهایی بهینه با بیشینه کردن NPV ناممکن به نظر می‌رسد. همانطور که در شکل (۱-۲) ملاحظه می‌شود علت این امر آن است که محدوده‌ی بهینه‌ی نهایی در یک سیکل بسته با NPV مرتبط است و هر یک نتیجه‌ی دیگری است. لذا این امر ناممکن می‌نماید (میرزایی، ۱۳۸۱).



شکل ۱-۲- رابطه بین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید

¹ Whittle

برای طراحی محدوده‌ی بهینه، اولین گام ساختن مدل بلوکی کانسار^۱ است. پس از این کار، اقدام به تخمین عیار تک‌تک بلوک‌های کانسار می‌شود. با این کار مدل بلوکی عیاری ساخته خواهد شد. در این مرحله اگر ارزش اقتصادی هر بلوک با توجه به عیار آن مشخص شود، مدل بلوکی اقتصادی^۲ به وجود خواهد آمد که مبنای طراحی اغلب روش‌های بهینه است (کاکائی، ۱۳۸۴).

۲-۲-۲- روش‌های طراحی محدوده نهایی بهینه

مهمترین روش‌های طراحی محدوده نهایی بهینه عبارتند از (کاکائی، ۱۳۹۲):

۱- روش مخروط شناور (Floating Cone Method)

۲- تئوری گراف لرچ و گراسمن (Graph Theory L & G)

۳- تئوری گراف زائو و کیم (Graph Theory Z & K)

۴- روش جریان شبکه جانسون (Network Flow Analysis)

۵- روش برنامه‌ریزی پویا (Dynamic Programing)

۶- الگوریتم کوروبوف (Korobov Algorithm)

۷- روش پارامتری کردن (Parameterization Technique)

در ادامه، ابتدا جدولی شامل الگوریتم‌های ارائه شده برای تعیین محدوده نهایی بهینه و ارائه دهندگان آنها آورده شده و سپس به تشریح مهمترین روش‌ها پرداخته می‌شود.

¹ Block Model

² Revenue Block Model

جدول ۱-۲- الگوریتم‌های تعیین محدوده نهایی بهینه (حسینی، ۱۳۸۷)

توسعه دهنده (گان)	نام روش	سال ارائه
Lerchs & Grossmann	لرچ - گراسمن	۱۹۶۵
Lerchs & Grossmann	برنامه‌ریزی پویا	۱۹۶۵
Carlson et. al.	مخروط شناور	۱۹۶۵
Johnson	شبکه و حداکثر جریان	۱۹۶۸
Liebcovic & Burgman	لیپکویچ - برگمن	۱۹۶۹
Philips	فیلیپس	۱۹۷۲
Korobov	کوروبوف	۱۹۷۴
Johnson & Shahrp	دو و نیم بعدی لرچ و گراسمن	۱۹۷۴
Matheron	پارامتری کردن	۱۹۷۵
Koenigsberg	سه بعدی کونیگسبرگ	۱۹۸۲
Wilke & Wright	سه بعدی ویکله - رایت	۱۹۸۴
Braticevic	براتیچویچ	۱۹۸۴
Wright	مسیر پویا	۱۹۸۷
Huttagosol et. al.	الگوریتم حمل و نقل	۱۹۹۲
Zhao & Kim	زائو و کیم	۱۹۹۲
Dowd & Onur	کوروبوف اصلاح شده	۱۹۹۳

ادامه جدول ۲-۲- الگوریتم‌های تعیین محدوده نهایی بهینه

توسعه دهنده(گان)	نام روش	سال ارائه
Denby et. al.	الگوریتم ژنتیک	۱۹۹۴
Frimpong & Achirco	شبکه‌های عصبی مصنوعی	۱۹۹۷
Tolwinski & Underwood	سیمپلکس دوگان	۱۹۹۸
Wright	مخروط شناور ۲	۱۹۹۹
کاکایی	لرچ و گراسمن با شیب‌های متغیر	۲۰۰۰
میرزایی	الگوریتم ژنتیک	۲۰۰۳
کاکایی	مخروط شناور ۲ اصلاحیه دوم	۲۰۰۴
جلالی و همکاران	زنجیرهای مارکوف	۲۰۰۶
رمضان	الگوریتم درخت پایه	۲۰۰۷
الهی زینی و همکاران	الگوریتم جستجوگر ستونی	۲۰۱۱

الف- روش مخروط شناور

یکی از ساده‌ترین و سریع‌ترین روش‌های طراحی محدوده نهایی روش مخروط شناور است. اساس این روش بر مبنای استخراج انتخابی بلوک‌هایی است که در صورت استخراج، مخروط استخراجی آنها دارای ارزش مثبت باشد (کاکائی، ۱۳۸۶).

روش کار در این الگوریتم این است که کار جستجوی بلوک از سطر اول مدل آغاز می‌شود. از یک سمت جستجو برای بلوک‌های دارای ارزش مثبت آغاز می‌شود. برای هر بلوک مثبت، مخروط استخراجی تشکیل شده و در صورتی که ارزش مخروط استخراجی مثبت باشد، آن بلوک به همراه

مخروط استخراجی اش جزء محدوده نهایی در نظر گرفته شده و استخراج می‌شود، سپس به سراغ بلوک‌های بعدی می‌رود. در صورتی که ارزش مخروط استخراجی بلوک مثبتی، صفر یا منفی شود، آن را رها کرده و جستجو ادامه می‌یابد. این کار تا بررسی تمامی بلوک‌های مثبت مدل بلوکی ادامه می‌یابد. در نهایت محدوده‌ی به دست آمده، محدوده‌ی نهایی بهینه محسوب می‌شود (کاکائی، ۱۳۸۴). در کنار مزیت سادگی و سرعت بالا، این روش معایبی نیز دارد. مهمترین عیب این روش این است که این روش بهینه واقعی نیست. همچنین در این روش اگر الگوریتم را از گوشه‌های متفاوتی شروع کنیم، پاسخ‌های متفاوتی حاصل خواهد شد. محدودیت اصلی این روش این است که دید جزء نگری دارد و نمی‌تواند ترکیب بلوک‌ها را باهم در نظر بگیرد. به عنوان مثال ممکن است در مدل بلوکی در صورتی که بلوک‌ها تک‌تک در نظر گرفته شوند، نتیجه حاصله محدوده نهایی کوچکی شود اما در صورتی که بلوک‌های مثبت باهم در نظر گرفته شوند، محدوده نهایی حاصله محدوده بزرگتری خواهد شد. در حقیقت این روش به همپوشانی مخروط استخراجی بلوک‌های مثبت مختلف، چه در یک طبقه و چه در طبقات مختلف توجه نمی‌کند و به همین علت محدوده‌ی بهینه نهایی حاصل از این روش ممکن است کوچکتر از محدوده بهینه واقعی باشد (Gordon, 1996).

ب- روش مخروط شناور دو

در سال ۱۹۹۹ روش مخروط شناور دو برای بر طرف کردن بعضی از معایب روش مذکور توسط رایت ارائه و ادعا شده است که این روش قادر به تعیین محدوده بهینه واقعی می باشد. گرچه این روش توانسته است بعضی از ضعف‌های روش مخروط شناور را بپوشاند و نتایج بهتری نسبت به آن بدست آورد ولی با توجه بررسی‌های مذکور این الگوریتم قادر نیست در بعضی از مدل‌ها محدوده بهینه واقعی را پیدا نماید (کاکائی، ۱۳۸۳).

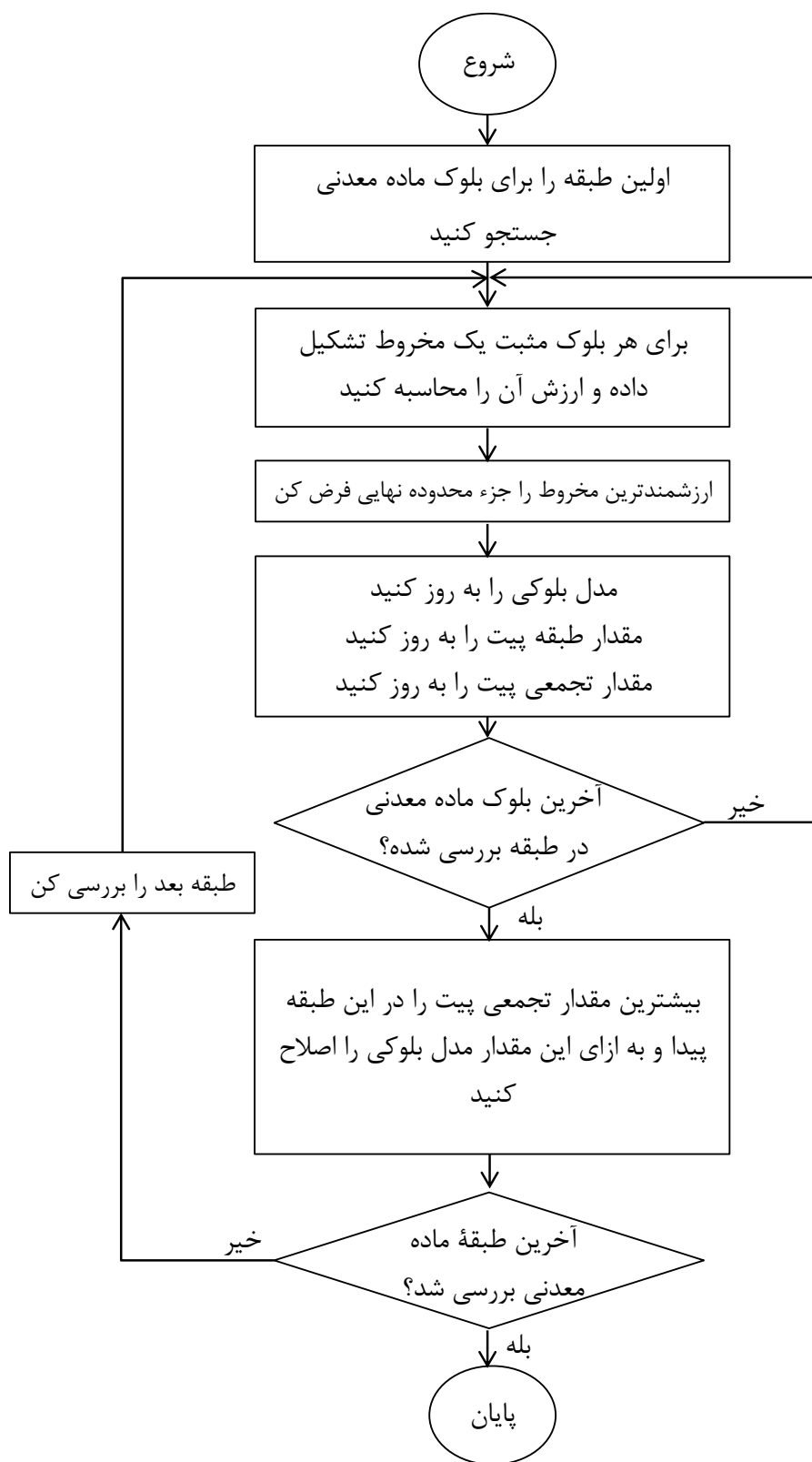
علت بهینه نبودن پاسخ این روش این است که همپوشانی مخروط استخراجی بلوک‌هایی را که در یک طبقه قرار دارند با هم مقایسه می‌کند و نمی‌تواند همپوشانی مخروط استخراجی بلوک‌هایی را که در طبقات مختلف قرار دارند در نظر بگیرد. همچنین این روش مقادیر بزرگتر را در نظر می‌گیرد و به این مسأله که این مقادیر مثبت یا منفی باشند توجهی ندارد، پس ممکن است که محدوده بهینه با مقدار منفی به دست آورد که اشتباه است (کاکائی، ۱۳۸۴).

در شکل (۲-۲) فلوشیتی درباره نحوه کارکرد این الگوریتم ارائه شده است.

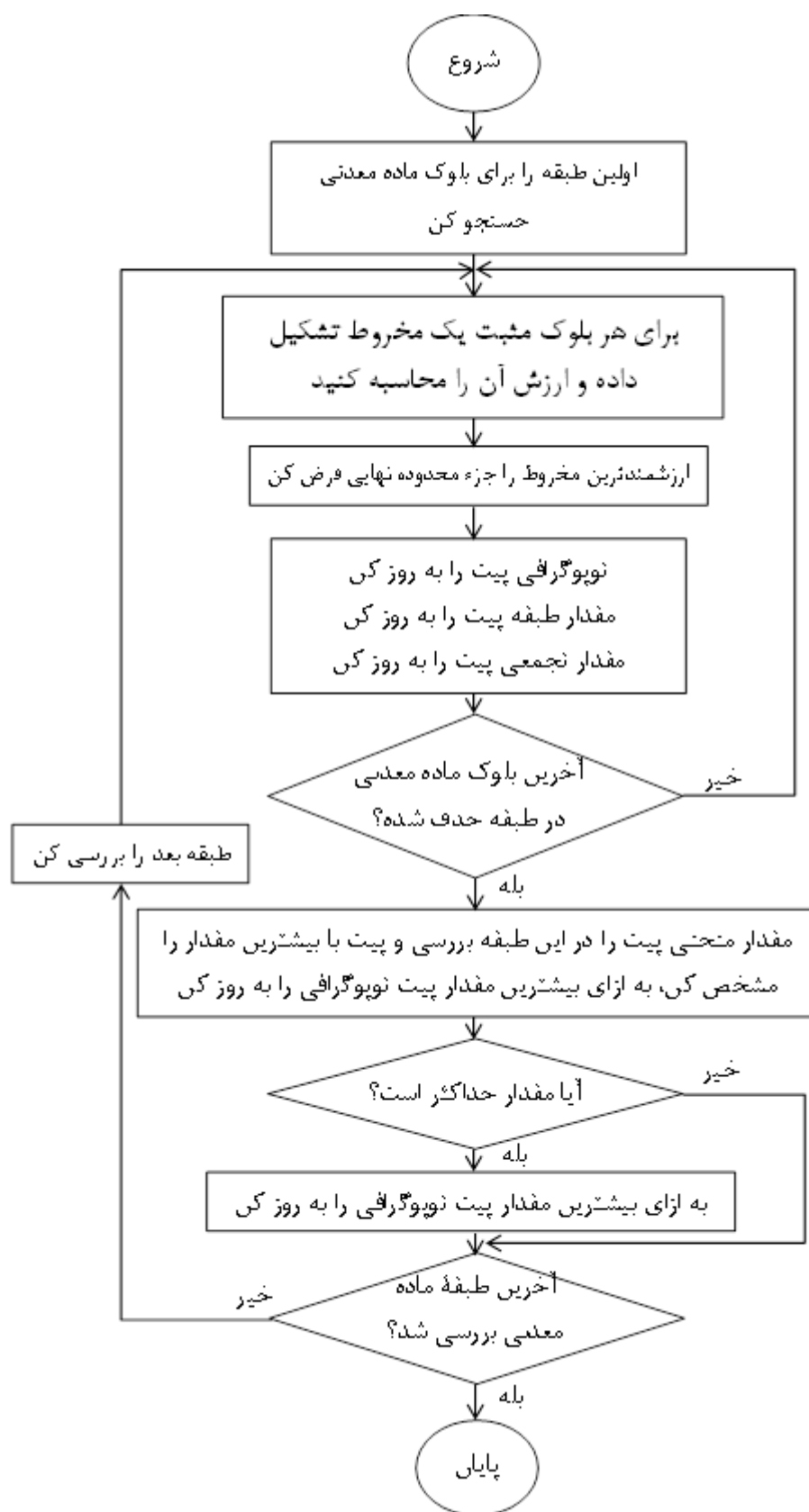
پ- روش مخروط شناور دو اصلاح شده

این روش که توسط دکتر کاکائی ارائه شده، همانند مخروط شناور دو است، با این تفاوت که در این روش پس از انجام مراحل مخروط شناور دو، بلوک با بالاترین ارزش تجمعی در هر طبقه پیدا شده و در صورتی که مقدار آن مثبت باشد، آن بلوک برداشته شده و الگوریتم به طبقه بعدی می‌رود. در صورت منفی بودن، الگوریتم به طبقه بعدی می‌رود و کاری با آن بلوک ندارد (کاکائی، ۱۳۸۶).

در شکل (۳-۲) فلوشیت این الگوریتم ارائه شده است.



شکل ۲-۲- فلو شیت مخروط شناور ۲ (کاکائی، ۱۳۸۶)

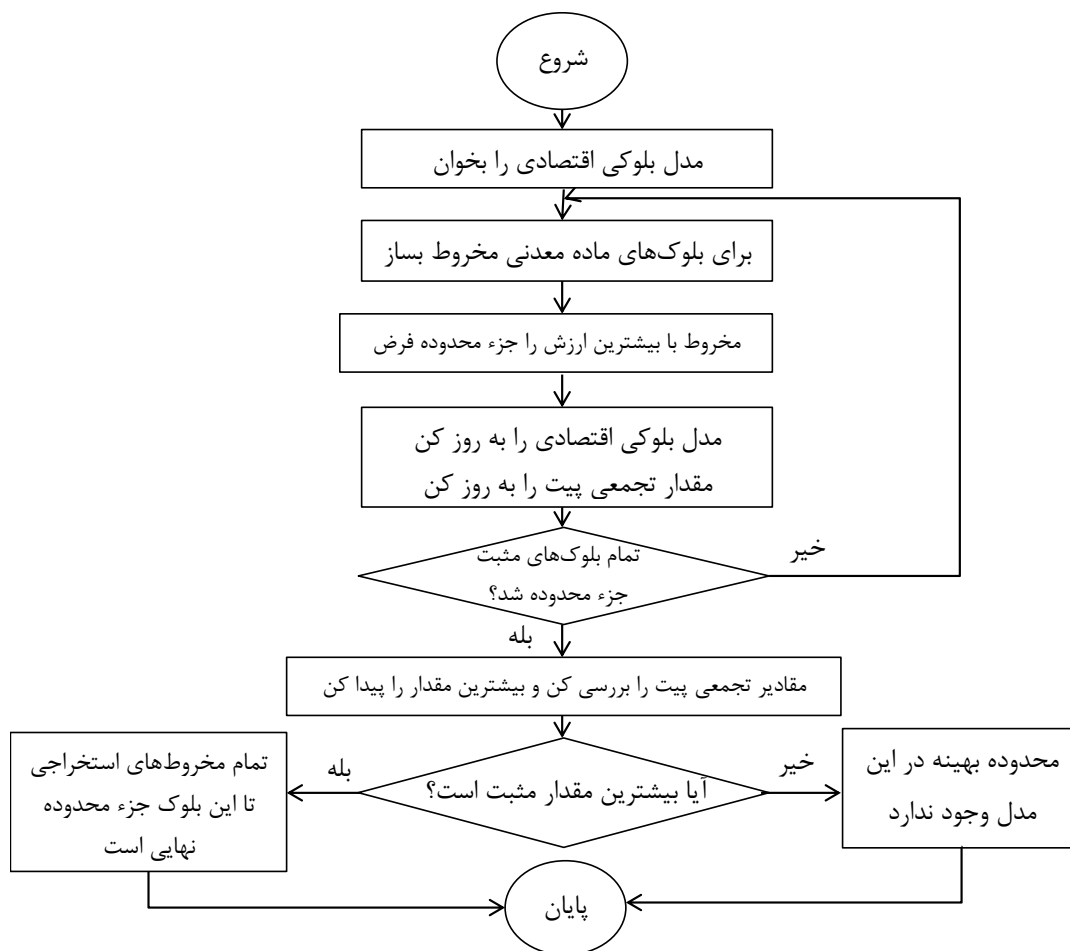


شکل ۲-۳- فلوشیت مخروط شناور ۲ اصلاح شده (کاکائی، ۱۳۸۶)

ت- اصلاحیه دوم مخروط شناور دو

در این روش ابتدا تمام مدل بلوکی بصورت یکجا توسط نرم افزار خوانده می شود. برای تمام بلوک های ماده معدنی، مخروط استخراجی تشکیل شده و از بین آنها، هر کدام که بیشترین ارزش را دارد جزء محدوده ی معدن فرض شده و حذف می شود. دوباره کل معدن بدون مخروط حذف شده در نظر گرفته و همین کار تکرار می شود. در هر مرحله ارزش ها در یک جدول قرار گرفته و هرکجا که ارزش حداکثر بود، تا آن مرحله عملیات استخراج انجام می گیرد (کاکائی، ۱۳۸۶).

در شکل (۴-۲) فلو شیت این الگوریتم ارائه شده است.



شکل ۴-۲- فلو شیت اصلاحیه دوم مخروط شناور ۲ (کاکائی، ۱۳۸۶)

ث- روش برنامه‌ریزی پویا

این روش در سال ۱۹۶۵ توسط لرچ و گراسمن ارائه شد. این روش در حالت دو بعدی پاسخ بهینه واقعی را ارائه می‌کند اما در حالت سه بعدی بهینه واقعی نیست. علت آن است که اساساً این روش برای حالت دو بعدی طراحی شده و در صورت استفاده سه بعدی باید ابتدا مدل را به بخش‌های دو بعدی تقسیم و پس از انجام محاسبات مخروط‌های حاصله را کنار هم قرار داده و محدوده نهایی بهینه سه بعدی را بیابیم. لذا این روش در حالت سه بعدی بهینه واقعی نیست (کاکائی، ۱۳۸۴).

اساس کار این روش این گونه است که ابتدا به مدل بلوکی دو بعدی، یک ردیف به ارزش صفر به عنوان بالاترین ردیف اضافه می‌گردد. سپس ارزش هر بلوک از مدل به این صورت تغییر می‌یابد که ارزش هر بلوک برابر ارزش تجمعی آن بلوک و بلوک‌های بالای آن است و مدل جدید، مدل بلوکی M نامیده می‌شود. سپس مدل بلوکی جدیدی به نام P ساخته خواهد شد. برای ساخت مدل P ، در مدل بلوکی M ، ستون اول از سمت چپ بدون تغییر باقی خواهد ماند. اعداد ستون بعدی به این شیوه تغییر خواهد کرد که عدد جدید برابر جمع جبری عدد متناظر بلوک از مدل M با ارزشمندترین بلوک از سه بلوک همسایه در ستون سمت راست است و از بلوک انتخاب شده پیکانی به سمت بلوک تغییر یافته رسم می‌شود. این کار تا انتهای مدل بلوکی ادامه می‌یابد تا در نهایت محدوده نهایی بهینه حاصل شود. در صورتی که پیکان‌ها از بزرگترین عدد ستون سمت راست تا انتهای سمت چپ مدل دنبال شود محدوده نهایی بهینه به دست می‌آید (کاکائی، ۱۳۸۴).

ج- تئوری گراف لرچ و گراسمن^۱

یکی از پیچیده‌ترین و مشکل‌ترین روش‌های طراحی محدوده نهایی روش لرچ و گراسمن است که در سال ۱۹۶۵ ارائه شد. این روش بر اساس نظریه تئوری گراف‌ها ابداع شده و اولین روش بهینه واقعی در طراحی محدوده نهایی می‌باشد (Lerchs & Grossmann, 1965).

در این روش مدل بلوکی اقتصادی به صورت یک گراف مستقیم وزن‌دار مدل می‌شود. هر بلوک با یک گره^۲ نشان داده شده و محدودیت‌های فنی توسط بردارها^۳ در نظر گرفته می‌شوند. گره‌ها توسط بردارها به گونه‌ای به یکدیگر متصل می‌شوند که محدودیت‌های فنی را تأمین کنند. در این گراف وزن هر گره برابر با ارزش اقتصادی بلوک متناظر آن گره در نظر گرفته می‌شود (Lerchs & Grossmann, 1965).

هر محدوده قابل اجرا را کلوزر^۴ می‌نامند. هر کلوزر از این گراف به عنوان مجموعه‌ای از گره‌ها تعریف می‌شود که اگر گره x عضوی از این مجموعه باشد و (x, y) برداری از این گراف باشد، در این صورت گره y نیز باید عضوی از مجموعه باشد. این تعریف تضمین می‌کند که هر کلوزر از این گراف همیشه نمایانگر یک محدوده قابل اجرا است. هر کلوزر دارای یک ارزش است که از مجموع ارزش گره‌های آن بدست می‌آید (Lerchs & Grossmann, 1965).

این الگوریتم با اصول و قواعد خاصی، بیشینه کلوزر را پیدا می‌کند. به این ترتیب که ابتدا یک درخت می‌سازد (یعنی یک گره ریشه به همراه شاخه‌ها)، سپس با استفاده از قواعدی این درخت به صورت شاخه‌های ضعیف و قوی تقسیم شده و در نهایت شاخه‌های قوی به عنوان بیشینه کلوزر یا همان محدوده نهایی بهینه پذیرفته می‌شود (Lerchs & Grossmann, 1965).

¹ Lerchs & Grossman

² Vertice

³ Arc

⁴ Closure

این روش سه عیب عمده دارد که در مقابل تنها مزیت آن یعنی محاسبه بهینه واقعی قرار گرفته است. این عیبه‌ها عبارتند از (کاکائی، ۱۳۸۴):

۱- بسیار زمان‌بر است و محاسبات بسیار زیادی دارد.

۲- پیچیدگی بالا

۳- استفاده از شیب‌های متغیر بسیار دشوار است.

چ- روش تحلیل جریان شبکه

این روش که در ابتدا در سال ۱۹۶۸ توسط جانسون^۱ پیشنهاد شد در نهایت توسط جیانینی^۲ و همکارانش در سال ۱۹۹۱ و یگولا و آریاس^۳ در سال ۱۹۹۲ و جیانگ^۴ در سال ۱۹۹۵ مستند شد. در این روش مدل بلوکی به شکل یک شبکه جریان مدل می‌شود. در ابتدا یک گره ورودی و یک گره خروجی در نظر گرفته می‌شود. بین گره ورودی و خروجی نیز ابتدا بلوک‌های ماده‌ی معدنی و سپس بلوک‌های باطله قرار می‌گیرد. سپس اتصالاتی با ظرفیتی معادل ارزش اقتصادی بلوک‌های متناظر، از گره ورودی به بلوک‌های ماده معدنی متصل می‌شود. در مرحله بعد اتصالاتی با ظرفیت معادل بلوک‌های باطله، از گره خروجی به گره‌های باطله متصل می‌شود. در نهایت اتصالاتی با ظرفیت نامحدود بلوک‌های ماده‌ی معدنی را طوری به بلوک‌های باطله متصل می‌کند که محدودیت‌های فنی برآورده شود. در صورت حل شدن شبکه جریان، بیشینه جریانی که می‌تواند از شبکه عبور کند پیدا می‌شود که همان ارزش کلی پیت بهینه است (میرزایی، ۱۳۸۱).

¹ Johnson

² Gianinie

³ Yegula & Arias

⁴ Jiang

ح- الگوریتم کروبووف

این الگوریتم نیز همانند روش مخروط شناور از ابتدای مدل بلوکی شروع به جستجوی بلوک‌های ماده معدنی می‌کند و برای آنها مخروط می‌سازد. جستجو از بالا و از یک سمت آغاز شده و برای اولین بلوک مثبت یک مخروط استخراجی ایجاد می‌شود. سپس مقادیر مثبت را به مقادیر منفی موجود در مخروط اختصاص می‌دهد. اینکار تا زمانی که یا هیچ بلوک مثبتی باقی نمانده باشد و یا هیچ بلوک منفی باقی نباشد ادامه می‌یابد. در انتها اگر ارزش بلوک مورد نظر مثبت باقی مانده باشد، بلوک به همراه مخروط استخراجی‌اش برداشته می‌شود. اگر ارزش بلوک صفر یا منفی شود به سراغ بلوک مثبت بعدی می‌رود. در صورتی که بلوکی برای استخراج مناسب تشخیص داده شود، آن بلوک استخراج شده و مقادیر باقی بلوک‌ها به مقادیر اولیه بازگشته و الگوریتم مجدداً از ابتدا آغاز می‌شود. این عمل تا بررسی کامل تمامی بلوک‌های مثبت ادامه می‌یابد (کاکائی، ۱۳۸۴).

الگوریتم کروبووف نیز بهینه‌ی واقعی نیست چراکه همپوشانی مخروط استخراج بلوک‌های مثبت در طبقات مختلف را در نظر نمی‌گیرد. همچنین این الگوریتم ممکن است محدوده‌هایی با ارزش صفر را نیز طراحی کند. البته در الگوریتم کروبووف اصلاح شده که در سال ۱۹۹۲ توسط داود و انور ابداع شد، ادعا شده این مشکلات حل شده و این الگوریتم قادر به یافتن محدوده‌ی نهایی بهینه‌ی واقعی است (میرزایی، ۱۳۸۱).

۲-۳- برنامه‌ریزی تولید

۲-۳-۱- مفهوم برنامه‌ریزی تولید

برنامه‌ریزی^۱ برای دسترسی به هدف خاص انجام می‌پذیرد. بدین منظور باید با به کارگیری کلیه زمینه‌های علمی، برنامه‌ای را ارائه داد که از میان برنامه‌های موجود مناسب‌ترین برنامه برای دسترسی به هدف باشد. برنامه‌ریزی در معادن پس از جمع‌آوری اطلاعات در زمینه‌های اکتشاف، ژئومکانیک، هیدرولوژی و اقتصادی انجام می‌پذیرد و هدف از برنامه‌ریزی در معادن روباز تعیین محدوده نهایی پیتی^۲ است که در زمان ارائه بیشترین ارزش خالص فعلی^۳ را تولید کند. با داشتن محدوده نهایی پیت است که می‌توان برنامه‌ریزی برای تولید را انجام داد (اصانلو، ۱۳۸۴).

هدف از برنامه‌ریزی تولید در معادن، تعیین الگوی استخراج بهینه از معدن است به گونه‌ای که علاوه بر این که بالاترین سود اقتصادی عاید معدن می‌شود، محدودیت‌های تولیدی موجود نیز ارضاء شود. این محدودیت‌ها شامل موارد زیر است (میرزایی، ۱۳۸۴):

۱- محدودیت ظرفیت استخراج

۲- محدودیت ظرفیت کارخانه فرآوری

۳- محدودیت‌های مربوط به عیار/عیارهای کارخانه فرآوری

۴- محدودیت زاویه شیب

زمان استخراج بلوک‌ها و مقصد آنها بعد از استخراج، نه تنها مقدار جریان نقدینگی معدن را در هر سال تعیین می‌کند، بلکه برنامه‌ریزی برای تولید در سال‌های بعد را نیز متأثر خواهد ساخت. پس تصمیمی

¹ Planning

² Pit

³ Net Present Value (NPV)

که امروز برای استخراج یک قسمت از معدن گرفته می‌شود، بر عملیات استخراج و بهره‌برداری از معدن در سال‌های آتی، تاثیر خواهد گذاشت (رزمجو، ۱۳۹۳).

فرآیند طراحی و برنامه‌ریزی معدن، یک فرآیند بهینه‌سازی چند متغیره بوده و نیازمند حل همزمان است. متأسفانه این مسأله به راحتی قابل حل نیست. بعد از چند دهه تلاش مستمر، هنوز مسأله طراحی و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز با در نظر گرفتن همه جوانب به صورت همزمان، یک مسأله حل نشده باقی مانده است. روش معمول برای حل این مسأله بدین صورت است که با فرض یک عیار حد مشخص و تخصیص ارزش اقتصادی به هر بلوک، محدوده نهایی معدن با الگوریتم‌های کارا مثل الگوریتم لرچ و گراسمن یا جریان شبکه حل می‌شود. بعد از تعیین محدوده نهایی معدن، سکانس استخراج بلوک‌ها مشخص خواهد شد. حال دوباره با استفاده از سکانس استخراج به دست آمده در مرحله قبل، ارزش اقتصادی بلوک‌ها به دست آورده شده و این فرآیند، تا زمانی ادامه می‌یابد که پس از دو مرحله تکرار به طرح واحدی برای استخراج برسیم. این برنامه، در واقع همان برنامه نهایی برای استخراج معدن است (رزمجو، ۱۳۹۳).

۲-۳-۲- ضرورت برنامه‌ریزی تولید

مطالعات انجام شده در سال ۲۰۰۳ میلادی نشان می‌دهد که جمعیت جهان از دو میلیارد نفر به حدود شش میلیارد نفر، رشد اقتصادی ۱۵ برابر، مصرف سوخت‌های فسیلی برای تأمین انرژی ۲۵ برابر، مصرف محصولات صنعتی ۴۰ برابر زیاده‌تر از چهل سال گذشته بوده است و در همین دوره مهندسين معدن به ازای هر یک نفر حدود یک متر مکعب سنگ استخراج کرده‌اند و در چهل سال آینده جمعیت جهان به دوازده میلیارد نفر، مصرف محصولات صنعتی چند برابر مصرف محصولات صنعتی در چهل سال گذشته و مصرف انرژی و رشد اقتصادی نیز رو به فزونی خواهد گذاشت. این در حالی است که ذخایر سهل الوصول در حال تهی شدن، عمق ذخایر به جا مانده زیاده‌تر، شرایط

استخراج پیچیده تر از گذشته و حجم سرمایه‌گذاری برای راه اندازی یک معدن روباز چند برابر حجم سرمایه‌گذاری برای یک معدن روباز در چهل سال گذشته خواهد بود. این امر داشتن یک برنامه‌ریزی دقیق که با شرایط واقعی نیز سازگار باشد را ضروری می‌سازد (اصانلو، ۱۳۸۴).

در سال ۲۰۰۰ آقای والی^۱ در مقاله منتشر شده خود ادعا کرده است که ۶۰ درصد معادن روبازی که مورد مطالعه قرار داده در سال‌های اولیه عمر خود فقط به ۷۰ درصد از اهداف تدوین شده در برنامه دسترسی حاصل کرده‌اند و مطالعات آقای تاتمن^۲ در سال ۲۰۰۱ نشان می‌دهد که از ۷۶ معدن زیرزمینی، ۱۶ معدن فاقد برنامه‌ریزی برای تولید و در ۶۰ درصد دیگر ۳۵ درصد به برنامه از پیش تعیین شده خود دست نیافته‌اند. در عدم موفقیت برنامه‌ریزی‌ها عواملی چون تغییر در ضخامت ذخایر، ژئومتری و عدم قطعیت قیمت فلز که در یک چرخه ۴ تا ۷ سال از تغییر اساسی برخوردارند و در نهایت نارسا بودن مدل‌ها نقش اساسی داشته‌اند (اصانلو، ۱۳۸۴).

۲-۳-۳- انواع برنامه‌ریزی تولید بر مبنای زمان‌بندی

برنامه‌ریزی تولید در معادن بسته به افق زمانی و اهداف در نظر گرفته شده می‌تواند بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت باشد (میرزایی، ۱۳۸۱).

الف- برنامه‌ریزی تولید بلند مدت

هدف اصلی در برنامه‌ریزی بلند مدت، تهیه نقشه‌های سالانه (یا چند ساله) پیشروی برای کل بلوک‌ها موجود در محدوده نهایی معدن است، اما همانطور که قبلاً نیز گفته شد، از آنجا که تعداد این

¹ Vallee

² Tatman

بلوک‌های خیلی زیاد است، نمی‌توان همه آن‌ها را با هم برای ارائه یک برنامه‌ریزی سالانه خوب در نظر گرفت. برای حل این مشکل، بعد از طراحی محدوده نهایی، باید پیشروی‌ها طراحی شوند. اهداف برنامه‌ریزی تولید بلند مدت عبارتند از:

- بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی پروژه
- کمینه‌سازی ریسک دستیابی به اهداف تولیدی
- بیشینه‌سازی عمر معدن

این اهداف تا حدودی با یکدیگر متناقض‌اند؛ مثلاً برنامه‌ای با حداکثر ارزش خالص فعلی، ممکن است با برنامه‌ای با حداقل ریسک، منطبق نباشد. در این حالت بسته به میزان ریسک‌پذیری و ریسک‌گریزی طراح، برنامه‌ای که ریسک آن کم و سود آن حداکثر باشد برای تولید در نظر گرفته می‌شود (Wittle, 1989).

ب- برنامه‌ریزی تولید میان مدت

طول افق برنامه‌ریزی تولید میان مدت یک تا ۱۰ سال است که این افق به تعدادی بازه یک تا شش ماهه تقسیم می‌شود. پلان‌های میان مدت در واقع اساس و پایه برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت در معادن است. هدف از تهیه این برنامه، پیش بینی میزان تولید، هزینه و درآمد می‌باشد. پارامترهایی که در تهیه این برنامه باید از قبل مشخص شوند به شرح زیر است (Wittle, 1989):

- میزان تولید و کارکرد شاول و کامیون و تجهیزات حفاری در بازه‌های یک تا شش ماهه
- عیارها، مقدار بازیابی و مشخصات فیزیکی و شیمیایی بلوک‌ها به منظور برنامه‌ریزی کوتاه

مدت تولید در مراحل بعدی

- پیش‌بینی کارهای ساخت و ساز و آماده‌سازی که نیاز است در سال‌های بعدی انجام گیرد (نظیر جاده‌ها، باز کردن ناحیه جدیدی از معدن، ساخت حوضچه آبکشی و غیره)
 - دمپ‌های باطله‌ای که می‌بایست در آینده برای انباشت باطله مورد استفاده قرار گیرد.
- بر این اساس، حجم عملیات معدنی مورد نیاز و تجهیزات لازم و همچنین لوازم یدکی مورد نیاز به طور دقیق محاسبه می‌شود (Wittle, 1989).

پ- برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت

طول افق برنامه‌ریزی در این حالت کمتر از یک سال بوده و پلان‌های کوتاه‌مدت در بازه‌های یک روز تا چند ماه تهیه می‌شوند. اهداف برنامه‌ریزی کوتاه مدت در معادن عبارت است از (Wittle, 1989):

- تأمین نیازهای اختلاط
- از نظر کیفیت مواد ارسالی به کارخانه در هر زمان. هدف از اختلاط، فرستادن کانسنگ با کیفیت ثابت به کارخانه فرآوری است. کنترل عیار مشکل‌ترین و مهمترین مرحله برنامه‌ریزی تولید است، زیرا وقتی کارخانه فرآوری با بالاترین بازدهی کار می‌کند که تغییرات در خوراک ورودی به کارخانه به حداقل برسد.
- تامین نیازهای کمی سایت اختلاط و کارخانه فرآوری به منظور فراهم آوردن تناژ مورد نیاز کارخانه فرآوری.
- حداکثر استفاده از ظرفیت تجهیزات معدنی. این مهم با به حداقل رساندن زمان بیکاری ماشین‌آلات و جلوگیری از جابه‌جایی بیش از حد آنها امکان‌پذیر است.
- به حداقل رساندن انحراف از برنامه‌ریزی تولید بلند مدت.
- اطمینان یافتن از این که در سال‌ها یا ماه‌های بعد بتوان به اهداف فوق دست یافت.

- برنامه‌ریزی تولید باید به گونه‌ای انجام شود که علاوه بر قابلیت کاربری آن در شرایط معمولی کانسار، بتوان آن را به سرعت در موارد اضطراری پیش بینی نشده نیز به کار برد.
 - برنامه‌ریزی باید از حداکثر قابلیت انعطاف برخوردار باشد، یعنی اینکه مهندس برنامه‌ریز امکان اعمال نظر در برنامه‌ریزی را از طریق حذف یکی از محدودیت‌های ذکر شده، داشته باشد.
 - اطمینان یافتن از این که برای استخراج کانسنگ در هر زمان، باطله برداری مربوط به آن قبلاً انجام شده باشد.
 - در نظر گرفتن زوایای شیب پایدار در نقاط مختلف معدن.
 - فراهم کردن جاده دسترسی به تمام پله‌های در حال کار معدن.
 - اطمینان یافتن از اینکه حداقل عرض لازم برای مانور شاول و کامیون در پله وجود دارد.
- اگر بتوان برنامه‌های کوتاه مدتی را برای تولید معدن تهیه کرد که به همه اهداف ذکر شده در فوق دست یافت، می‌توان ادعا کرد که سود عملیات نیز حداکثر خواهد شد. پس اقتصاد در این برنامه‌ریزی در اولویت نیست (Wittle, 1989).
- ذکر این نکته ضروری است که در برنامه‌ریزی کوتاه مدت، ظرفیت کلی تجهیزات در دسترس مدنظر قرار می‌گیرد، اما در این مرحله هیچ برنامه‌ای برای ماشین‌آلات تهیه نمی‌شود، یعنی به این مورد که کدام تجهیزات کی و کجا استفاده شوند، پرداخته نخواهد شد (اصانلو، ۱۳۸۴).

۲-۳-۴- سابقه‌ی تحقیق

اولین بار در سال ۱۹۰۹ میلادی هوور بیان داشت که “سرمایه‌گذاران نیاز دارند که سطح سرمایه‌گذاریشان با درآمدی که دریافت می‌کنند و نرخ بازگشت سرمایه سازگاری داشته باشد.”، هر

قدر سطح تولید پایین‌تر باشد نیاز به سرمایه‌گذاری کمتر، زمان دریافت درآمد طولانی‌تر و ریسک سرمایه‌گذاری نیز کمتر خواهد بود. در سال‌های ۱۹۵۵ و ۱۹۶۰ کارلیسل و تسارو^۱ بیان داشتند که برنامه‌ریزی برای تولید باید با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی بر اساس نرخ تنزیل داده شده صورت گیرد. در سال ۱۹۶۵ میلادی لرج و گراسمن بحث برنامه‌ریزی برای تولید بر اساس پارامترهای اقتصادی را مطرح کردند. آنها معتقد بودند که شناسایی محدوده نهایی پیت به تنهایی برای بهینه‌سازی معدن کافی نیست، بلکه باید سکانس استخراج مطلوب را نیز که منجر به استخراج پیت نهایی می‌شود را تعیین کرد. بنابراین آنها پیشنهاد کردند که مراحل استخراج یک پیت را می‌توان با استفاده از پیت‌های لانه‌ای مدل کرد. این پیت‌ها در اثر تغییر پارامترهای اقتصادی به دست می‌آیند. پارامتر مورد انتخاب آنها برای طراحی پیت‌های لانه‌ای در واقع عددی بود که از کسر ارزش اقتصادی بلوک بدست می‌آمد. اگر این عدد صفر شود استخراج به همان پیت نهایی رسیده است. نتیجه این تغییرات ایجاد تعدادی پیت لانه‌ای است که نشانگر سکانس استخراج می‌باشد. این الگوریتم را الگوریتم پیت‌های لانه‌ای^۲ می‌نامند (اصانلو، ۱۳۸۴).

گرشون^۳ در سال ۱۹۸۷ میلادی الگوریتمی برای برنامه‌ریزی بلند مدت ارائه کرد که مدعی است در آن ملاحظات برنامه‌ریزی میان مدت و کوتاه مدت نیز لحاظ شده است. در این روش مخروط به گونه‌ای ایجاد می‌شود که در راس آن بلوک کلیدی قرار گیرد (بلوک کلیدی به بلوکی اطلاق می‌شود که اگر استخراج شود، تعدادی بلوک زیر آن که توجیه اقتصادی دارند نیز استخراج می‌شوند). سپس مخروط با توجه به محدودیت شیب تشکیل و با جمع جبری بلوک‌های داخل مخروط ارزش نهایی را برای بلوک کلیدی در نظر می‌گیرند. همین روش برای سایر بلوک‌ها نیز عمل می‌شود. در نهایت هر

¹ Carlisle & Tessaro

² Nested Algorithm

³ Gershon

بلوک کلیدی دارای ارزش موضعی خواهد شد. سپس این بلوک‌های کلیدی را بر اساس ارزش اقتصادی طبقه‌بندی می‌کنند و طبیعتاً اولویت استخراج با بلوک کلیدی یا مخروطی است که بالاترین ارزش را دارا است (اصانلو، ۱۳۸۴).

در سال ۱۹۹۲ میلادی ونگ و سویم^۱ الگوریتمی ارائه نمودند که در آن برای برنامه‌ریزی تولید، نیاز به شناسایی محدوده نهایی نیست و از تکنیک گرشون نیز استفاده می‌شود. الگوریتم آنها بر این اساس استوار است که حداکثر ارزش خالص فعلی، مستلزم استخراج ماده معدنی پرعیار در سال‌های اولیه است. سپس پیشروی‌هایی^۲ در اولویت خواهند بود که نسبت به پیشروی‌های مشابه از ارزش یا فلز بیشتری برخوردارند. لذا پیت‌هایی با تعداد M بلوک کانسنگ از میان M+N بلوک کانسنگ که از مقدار فلز بیشتری برخوردارند انتخاب و N بلوک که از فلز کمتری برخوردارند به طور مقطعی حذف خواهند شد (اصانلو، ۱۳۸۴).

در سال ۱۹۹۲ الولی از تکنیک هوش مصنوعی برای برنامه‌ریزی برای تولید استفاده کرد. الگوریتم‌های فوق بر این اساس بودند که بهترین ماده معدنی، ماده‌ای است که بالاترین عیار را داشته باشد. در سال ۱۹۹۵ میلادی دنی و شفیلد^۳ بر مبنای الگوریتم ژنتیک مدلی برای برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز ارائه کردند که در آن ریسک زمین شناسی (عدم قطعیت زمین‌شناسی) نیز منظور شده بود. هدف از این مدل بیشینه کردن ارزش خالص فعلی و به حداقل رساندن ریسک با استفاده از یک تابع چند هدفه بود (اصانلو، ۱۳۸۴).

¹ Wang and Sevim

² Push Backs

³ Denby and Schofield

در سال ۱۹۸۸ آقایان داگدلن و رمضان^۱ بیان داشتند که بهترین ماده معدنی، ماده معدنی است که علاوه بر این که بالاترین عیار را داشته باشد، برای استخراج آن به کمترین مقدار باطله‌برداری نیاز باشد. این بدان معنی است که این پیشروی‌ها در میان سایر پیشروی‌های هم حجم دارای کمترین نسبت باطله‌برداری باشد (اصانلو، ۱۳۸۴).

در سال ۱۹۹۸ آقای تولوینسکی^۲ الگوریتمی را ارائه نموده که در نرم افزار NPV Scheduler مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس این الگوریتم برنامه‌ریزی، اهداف و محدودیت‌های مدل را بر اساس متغیرهای هدف تعریف کرده به طوری که این متغیرها تابعی از شاخصه‌های بلوک مثل تناز کانسنگ، عیار و امثالهم می‌باشد.

آکایک^۳ در سال ۱۹۹۹ الگوریتمی تحت عنوان آزاد سازی چهار بعدی شبکه‌ای^۴ ارائه کرد که در آن علاوه بر در نظر گرفتن عیار حد دینامیکی، انباشتگاه کانسنگ^۵ نیز در مدل برنامه‌ریزی تولید در نظر گرفته شده است. در این روش با استفاده از ضرایب لاگرانژ مسأله برنامه‌ریزی تولید به یک مسأله تعیین محدوده نهایی پیت تبدیل می‌شود (اصانلو، ۱۳۸۴).

در سال ۲۰۰۳ دیمیتراکوپولوس^۶ یک مدل برنامه‌ریزی خطی را برای برنامه‌ریزی تولید مبتنی بر ریسک در معدن ارائه داد. نکته قابل توجه در این مدل آن است که قسمت هایی از ذخیره که از قطعیت بیشتری برخوردارند در سال‌های اولیه از عمر معدن استخراج شده و مناطقی با قطعیت کمتر برای دوره‌های دورتر در نظر گرفته می‌شوند که اطلاعات کافی در مورد آن بخش‌ها به دست خواهد آمد (اصانلو، ۱۳۸۴).

¹ Dagdelen and Ramzan

² Tolwinski

³ Akaike

⁴ 4D Relaxation

⁵ Stockpile

⁶ Dimitrakopolos

جدول (۱-۲) الگوریتم‌های عمده ارائه شده برای برنامه‌ریزی تولید را نشان می‌دهند.

جدول ۲-۳- الگوریتم‌های ارائه شده برای برنامه‌ریزی تولید (اصانلو، ۱۳۸۴)

توسعه دهنده(گان)	نام روش	سال انتشار
Hover	-	۱۹۰۹
Frankois et. al.	پارامتری کردن لاگرانژی	۱۹۴۸
Carlisle	نرخ تنزیل داده شده	۱۹۵۵
Tessaro	نرخ تنزیل داده شده	۱۹۶۵
Lerchs & Grossmann	تحلیل پارامتری	۱۹۶۵
Matheron	پارامتری کردن	۱۹۷۵
Gershon	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	۱۹۷۸
Dagdelen-Johnson	پارامتری کردن لاگرانژی	۱۹۸۵
Vang-Sevim	روش ابتکاری	۱۹۹۲
Elvely	برنامه‌ریزی پویا	۱۹۹۲
Denby-Schofield	هوش مصنوعی	۱۹۹۵
Dagdelen-Ramazan	تئوری گراف	۱۹۹۸
Tolwinski & Underwood	روش آماری تصادفی و برنامه‌ریزی پویا	۱۹۹۸
Akaike	آزادسازی شبکه‌ای و استفاده از ضرایب لاگرانژ	۱۹۹۹
Dimitrakopolos	برنامه‌ریزی خطی	۲۰۰۳
میرزایی	الگوریتم ژنتیک	۲۰۰۳
Dimitrakopolos & Ramazan	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	۲۰۰۴
رمضان	الگوریتم درخت پایه	۲۰۰۷
ستاروند	الگوریتم کلونی مورچگان	۲۰۰۹
Dimitrakopolos	جستجوی ممنوع	۲۰۱۲
اسد و همکاران	الگوریتم روش‌های تصادفی	۲۰۱۴

فصل سوم

الگوریتم رقابت استعماری

۳-۱- مقدمه

به طور کلی، مسائل بهینه‌سازی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: ریاضی و ابتکاری. برخی روش‌های ریاضی بهینه‌سازی شامل روش بهینه‌سازی آنالیز، روش لاگرانژ، روش نلدر-مید و روش‌های بهینه‌سازی خطی و غیر خطی می‌شود. اغلب روش‌های ریاضی بر پایه‌ی گرادیان نقطه‌ی بهینه تابع متناظر استوار است. در توابع پیچیده، این روش ممکن است به پاسخ‌های بهینه‌ی محلی منجر شود. همچنین، گاهی اوقات تابع متناظر ممکن است کاملاً بر مسأله منطبق نبوده و دارای اختلاف باشد. این اشکالات استفاده از روش‌های ریاضی را محدود کرده است. روش‌های ابتکاری و محاسبات تکاملی در حل مشکلات مشترک از علوم مختلف استفاده می‌کنند. این روش‌ها تلاش دارند تا برای هر مشکل راه‌حلی ارائه دهند، بدون اینکه درک عمیقی از ساختار مشکل داشته باشند. به عبارت دیگر، هر مسأله برای این الگوریتم همانند یک جعبه سیاه است. این روش‌ها معمولاً بر پایه‌ی استفاده‌ی تصادفی از آمار به دست آمده توسط نمونه‌های یک فضای جستجو، یا بر پایه‌ی یک پدیده‌ی طبیعی و یا فرایندی فیزیکی عمل می‌کنند.

۳-۲- الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری^۱ ICA روشی در حوزه محاسبات تکاملی است که اقدام به یافتن پاسخ بهینه‌ی مسائل مختلف بهینه‌سازی می‌کند. این الگوریتم با مدل‌سازی ریاضی فرایند تکامل اجتماعی - سیاسی، الگوریتمی برای حل مسائل ریاضی بهینه‌سازی ارائه می‌دهد (Atashpaz-Gargari & Lucas, 2007). از لحاظ کاربرد، این الگوریتم در دسته الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی همچون

¹ Imperialist Competitive Algorithm - ICA

الگوریتم‌های ژنتیک^۱، GA، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۲، PSO، الگوریتم کلونی مورچگان^۳ و ... قرار می‌گیرد. همانند همه الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی، الگوریتم رقابت استعماری نیز مجموعه اولیه‌ای از پاسخ‌های احتمالی را تشکیل می‌دهد. این پاسخ‌های اولیه در الگوریتم ژنتیک تحت عنوان "کروموزوم"، در الگوریتم ازدحام ذرات تحت عنوان "ذره" و در الگوریتم رقابت استعماری نیز تحت عنوان "کشور" شناخته می‌شوند. الگوریتم رقابت استعماری با روند خاصی که در ادامه می‌آید، این پاسخ‌های اولیه (کشورها) را به تدریج بهبود داده و در نهایت جواب مناسب مسأله بهینه‌سازی (کشور مطلوب) را می‌یابد.

پایه‌های اصلی این الگوریتم را سیاست همسان‌سازی^۴، رقابت استعماری^۵ و انقلاب^۶ تشکیل می‌دهند. این الگوریتم با تقلید از روند تکامل اجتماعی، اقتصادی و سیاسی کشورها و با مدلسازی ریاضی بخش‌هایی از این فرایند، عملگرهایی را در قالب منظم به صورت الگوریتم ارائه می‌دهد که می‌توانند به حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی کمک کنند. در واقع این الگوریتم پاسخ‌های مسأله بهینه‌سازی را در قالب کشورها فرض کرده و سعی می‌کند در طی فرایندی تکرار پذیر این پاسخ‌ها را رفته‌رفته بهبود داده و در نهایت به پاسخ بهینه مسأله برساند (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).

الگوریتم رقابت استعماری، با سرعت همگرایی بیشتر در حل مسائل با متغیرهای زیاد، در مقایسه با PSO و GA است. در سال‌های اخیر، نتایج مطالعات متعددی به اثبات عملکرد ICA در حل مسائل بهینه‌سازی منجر شده است (Arish et al, 2014).

¹ Genetic Algorithms - GA

² Particle Swarm Optimization - PSO

³ Ant Colony Optimization

⁴ Assimilation

⁵ Imperialistic Competition

⁶ Revolution

۳-۲-۱- مفاهیم پایه‌ای الگوریتم

استعمار^۱، در لغت به سیاست توسعه قدرت و نفوذ یک کشور در حوزه خارج از قلمرو شناخته شده برای آن، اطلاق می‌شود. یک کشور می‌تواند کشور دیگر را به طور قانون‌گذاری مستقیم و یا از طریق روش‌های غیر مستقیم، مثل کنترل کالاها و مواد خام، کنترل کند. مورد اخیر اغلب استعمار نو خوانده می‌شود. استعمار یک پدیده ذاتی در تاریخ بوده است. استعمار در مراحل ابتدایی، به صورت نفوذ سیاسی- نظامی در کشورها و به صورت صرف استفاده از منابع زمینی، انسانی و سیاسی بوده است. بعضی مواقع نیز استعمار، به صرف جلوگیری از نفوذ کشور استعمارگر رقیب انجام می‌شد. به هر حال کشورهای استعمارگر رقابت شدیدی را برای به استعمار کشیدن مستعمرات همدیگر نشان می‌دادند (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).

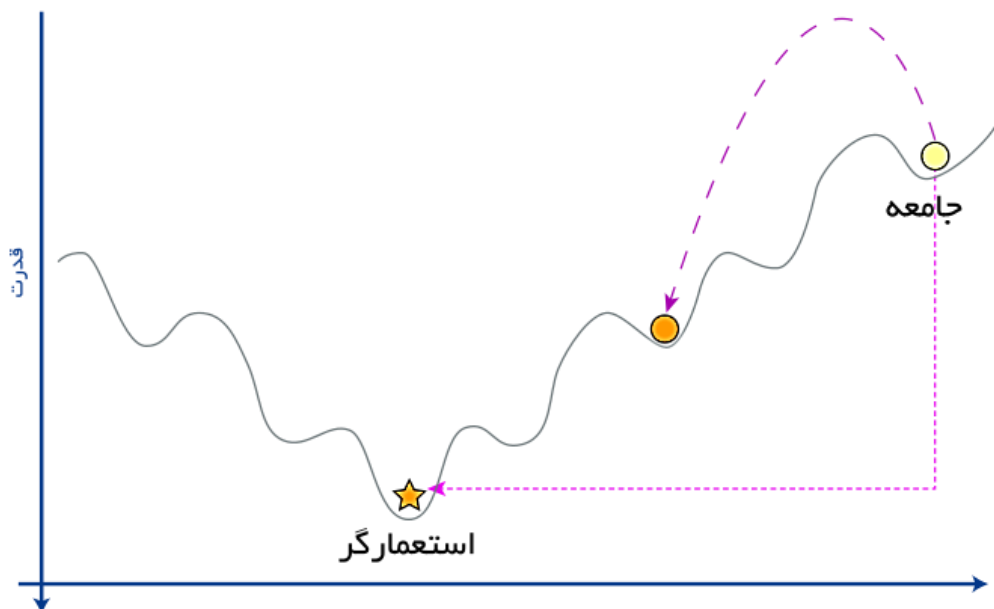
مستقل از اثرات و تبعات مثبت و منفی آن، استعمار به عنوان یک فرایند ذاتی در تاریخ بشر ایجاد شد، و در عین وارد کردن خسارت‌های جبران ناپذیر به زیربنای اساسی کشورهای مستعمره^۲ (خصوصاً زیربنای فرهنگی) در بعضی موارد اثرات مثبتی را نیز برای این کشورها داشت. از دید بهینه‌سازی، استعمار بعضی از کشورها را که دارای تمدنی معمولی بودند از حوزه خود خارج کرده و آنها را به یک حوزه دیگر برد که در بعضی موارد وضعیت این حوزه بهتر از موقعیت قبلی کشور مستعمره بود. اما به هر حال این حرکت مستلزم پیشروی مستعمره در راستای محورهای مختلف اقتصادی و فرهنگی به سمت یک استعمارگر قوی‌تر بود، یعنی از میان رفتن بعضی از ساختارهای فرهنگی و اجتماعی. شکل (۳-۱) حرکت یک مستعمره به سمت استعمارگر قوی را نشان می‌دهد.

^۱ Imperialism

^۲ Colony

این روند در الگوریتم رقابت استعماری در قالب سیاست جذب مدل‌سازی می‌شود. ادامه‌ی این روند می‌تواند منجر به جذب کامل کشور مستعمره توسط استعمارگر شود (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).

همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم، نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی شروع می‌شود، که در این الگوریتم هر کدام از آنها یک «کشور» نامیده می‌شوند. تعدادی از برترین عناصر جمعیت به عنوان استعمارگر انتخاب می‌شوند. باقی‌مانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره، در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگران، بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با یک روند خاص که در ادامه توضیح داده خواهد شد، به سمت خود می‌کشند. قدرت کل هر امپراطوری، به هر دو بخش تشکیل دهنده آن یعنی کشور استعمارگر (به عنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن، بستگی دارد. این وابستگی با تعریف قدرت امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور استعمارگر به اضافه درصدی از قدرت مستعمرات آن، مدل می‌شود (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷). میزان تأثیر گذاری قدرت مستعمرات در قدرت امپراطوری، بسته به نوع مسأله می‌تواند تغییر کند. به این معنی که هرچه میزان تأثیر کمتر باشد بیانگر اعتماد کمتر به مستعمرات و تأثیر بیشتر استعمارگران در پاسخ نهایی است.



شکل ۳-۱- حرکت یک مستعمره به سمت استعمارگر بر روی تابع هدف (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷)

با شکل‌گیری امپراطوری‌های اولیه، رقابت استعماری میان آن‌ها شروع می‌شود. هر امپراطوری‌ای که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید (و یا به صورت حداقلی، از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنه رقابت حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک امپراطوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراطوری‌های رقیب، و تحت کنترل در آوردن آنها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت‌های استعماری، به تدریج بر قدرت امپراطوری‌های بزرگتر افزوده شده و امپراطوری‌های ضعیف‌تر، حذف خواهند شد. امپراطوری‌ها برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).

به طور خلاصه این الگوریتم به استعمار به عنوان بخش تفکیک‌ناپذیر از سیر تکامل تاریخی بشر نگریسته شده و از چگونگی اثرگذاری آن بر کشورهای استعمارگر و مستعمره و نیز کل تاریخ، به عنوان منبع الهام یک الگوریتم کارا و نو در زمینه محاسبات تکاملی استفاده شده است.

۳-۳- ساختار و کارکرد الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری مانند هر الگوریتم بهینه‌سازی دیگر، نیازمند تعریف مراحل مختلفی است تا طی تکرار این مراحل موفق به بهینه‌سازی مسأله مورد نظر شود. در ادامه این مراحل به تفکیک و تفصیل شرح داده شده‌اند.

هدف نهایی این الگوریتم، حرکت تمامی کشورهای اولیه‌ی ساخته شده به سمت نقطه‌ی بهینه است. این حرکت تا جایی ادامه می‌یابد که تنها یک استعمارگر باقی بماند یا تمامی کشورها برهم و در حقیقت بر نقطه‌ی بهینه منطبق شوند.

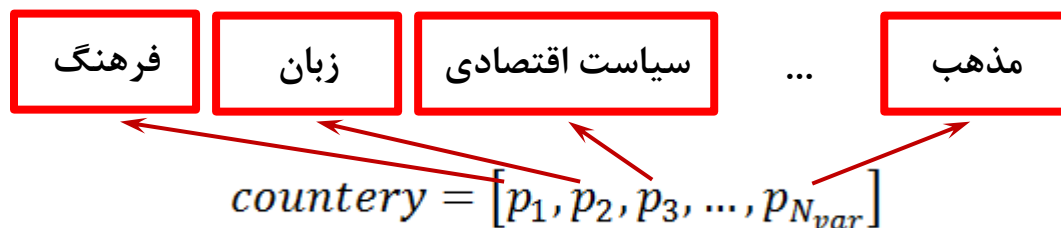
۳-۱-۳- شکل دهی امپراطوری‌های اولیه

در بهینه‌سازی، هدف یافتن یک جواب بهینه بر حسب متغیرهای مسئله است. برای این کار باید یک آرایه از متغیرهای مسئله که باید بهینه شوند، ایجاد شود. در الگوریتم ژنتیک این آرایه، کروموزوم^۱ نامیده می‌شود. در اینجا نیز آن را یک کشور می‌نامیم. در یک مسئله بهینه‌سازی N_{var} بعدی، یک کشور، یک آرایه به طول $1 \times N_{var}$ است. این آرایه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$country = [P_1, P_2, P_3, \dots, P_{N_{var}}] \quad (۱-۳)$$

مقادیر متغیرها 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 (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).

شکل (۲-۳) نحوه تناظر متغیرهای بهینه‌سازی مسئله با ویژگی‌های اجتماعی سیاسی را نشان می‌دهد.

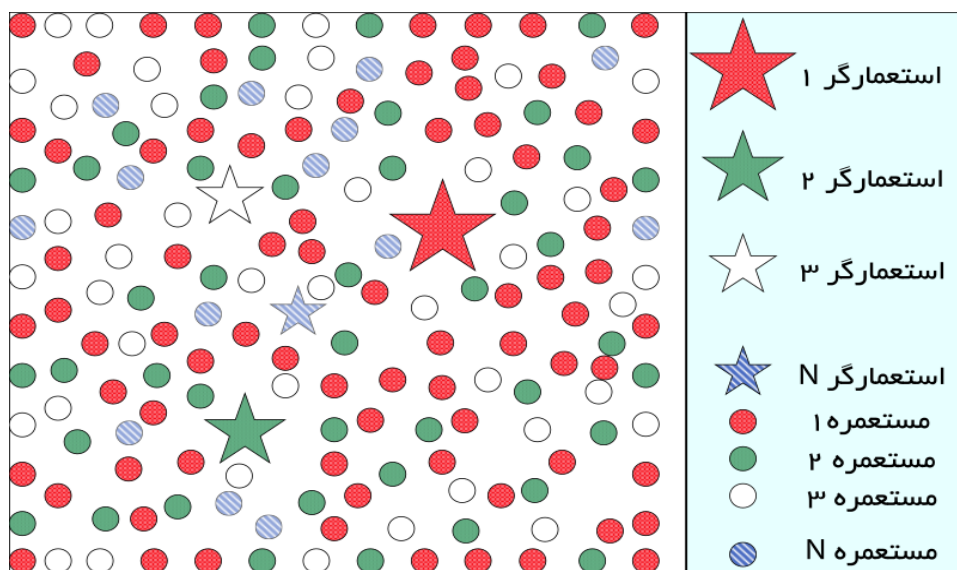


شکل ۲-۳- متغیرهای اجتماعی تشکیل دهنده یک کشور (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷)

در شکل (۲-۳) متغیرهای مجهول در حقیقت همان متغیرهای مجهول تابع هزینه مسئله هستند که هدف بهینه‌سازی قرار گرفته است.

¹ Chromosome

برای شروع الگوریتم، تعداد $N_{country}$ کشور اولیه ایجاد می‌شود تا N_{imp} از بهترین اعضای این جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) به عنوان استعمارگر انتخاب شود. باقی‌مانده N_{col} عدد از کشورها، مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هر کدام به یک امپراطوری تعلق دارند. برای تقسیم مستعمرات اولیه بین استعمارگران، به هر استعمارگر، تعدادی از مستعمرات، که این تعداد، متناسب با قدرت آن است، اختصاص داده می‌شود. در شکل (۳-۳) نحوه تقسیم مستعمرات، میان کشورهای استعمارگر به صورت نمادین نشان داده شده است (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).



شکل ۳-۳- تقسیم مستعمرات میان کشورهای استعمارگر (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷)

۳-۳-۲- سیاست جذب

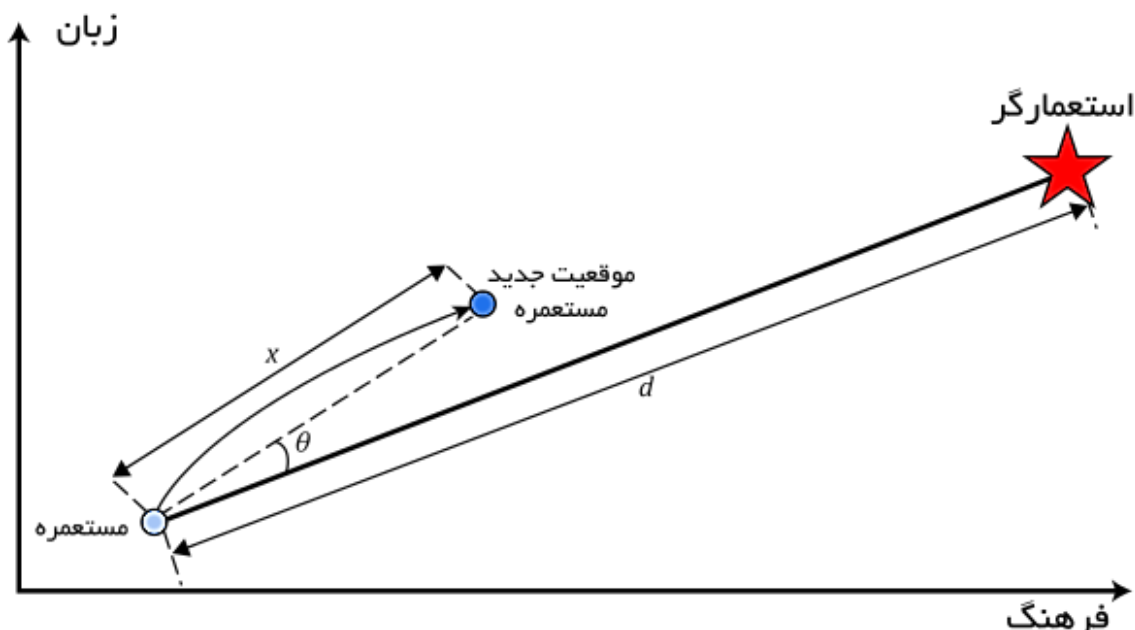
سیاست همگون‌سازی (جذب) با هدف تحلیل فرهنگ و ساختار اجتماعی مستعمرات در فرهنگ حکومت مرکزی انجام می‌گرفت. کشورهای استعمارگر، برای افزایش نفوذ خود، شروع به ایجاد عمران (ایجاد زیرساخت‌های حمل و نقل، تاسیس دانشگاه و ...) می‌کنند. به عنوان مثال کشورهای نظیر انگلیس و فرانسه با تعقیب سیاست همگون‌سازی در مستعمرات خود در فکر ایجاد انگلیس نو و فرانسه نو در مستعمرات خویش بودند. با در نظر گرفتن شیوه نمایش یک کشور در حل مسأله 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 فرایند استعمار در الگوریتم، به صورت حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر، مدل شده است (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).

در راستای این سیاست، کشور مستعمره، به اندازه x واحد در جهت خط واصل مستعمره به استعمارگر، حرکت کرده و به موقعیت جدید کشانده می‌شود (x عددی تصادفی با توزیع یکنواخت، یا هر توزیع مناسب دیگر) می‌باشد. اگر فاصله میان استعمارگر و مستعمره با d نشان داده شود و β عددی بزرگتر از یک و نزدیک به ۲ در نظر گرفته شود، معمولاً برای d داریم:

$$x \sim U(0, \beta \times d) \quad (2-3)$$

وجود ضریب $\beta > 1$ باعث می‌شود تا کشور مستعمره در حین حرکت به سمت کشور استعمارگر، از جهت‌های مختلف به آن نزدیک شود. همچنین در کنار این حرکت، یک انحراف زاویه‌ای کوچک نیز با توزیع یکنواخت به مسیر حرکت افزوده می‌شود. یک نمای گرافیکی از اعمال سیاست جذب در الگوریتم رقابت استعماری در شکل (۳-۴) نشان داده شده است (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).

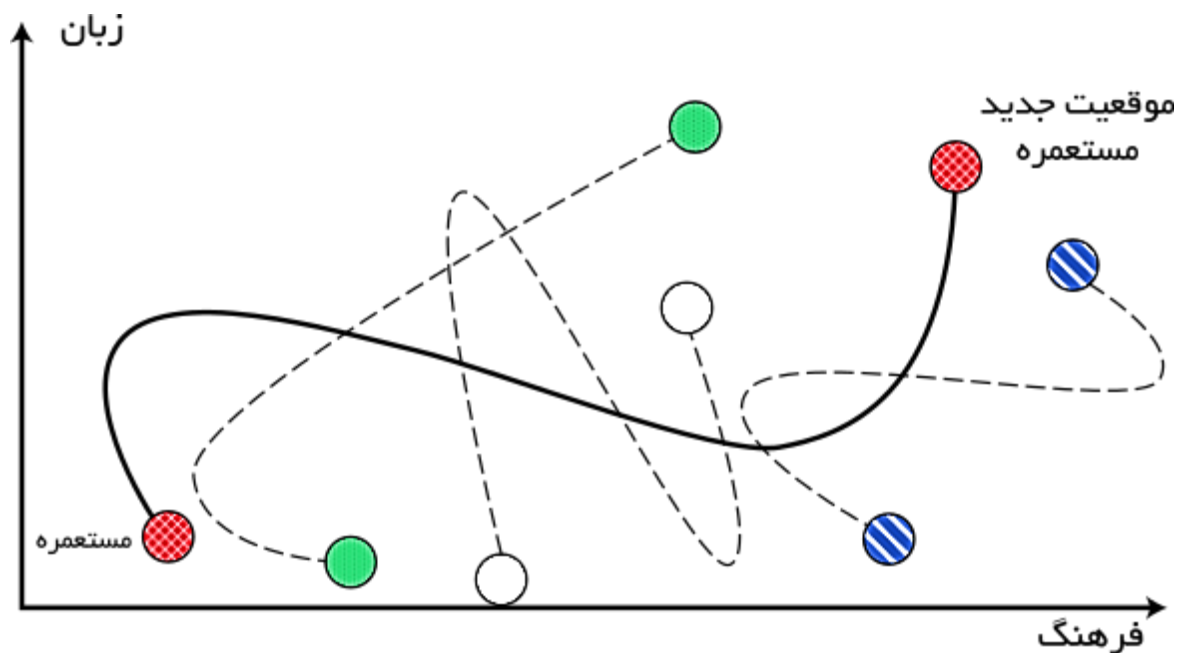


شکل ۳-۴ - اعمال سیاست جذب در الگوریتم رقابت استعماری (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷)

۳-۳-۳- انقلاب

طی تکرارهای متوالی فرآیند، ممکن است یک جواب بهینه‌ی محلی به وجود بیاید که به عنوان یک کشور استعمارگر، تمامی مستعمرات را به سمت خود جذب کند. برای گریز از این امر، الگوریتم رقابت استعماری فرآیندی به نام انقلاب را پیشنهاد می‌کند (اقدسی فام و همکاران، ۱۳۹۰).

بروز انقلاب تغییرات ناگهانی را در ویژگی‌های اجتماعی سیاسی یک کشور ایجاد می‌کند. در الگوریتم رقابت استعماری، انقلاب با جابجایی تصادفی یک کشور مستعمره به یک موقعیت تصادفی جدید مدلسازی می‌شود. انقلاب از دیدگاه الگوریتمی باعث می‌شود کلیت حرکت تکاملی از گیر کردن در دره‌های محلی بهینگی نجات یابد که در بعضی موارد باعث بهبود موقعیت یک کشور شده و آن را به یک محدوده بهینگی بهتری می‌برد (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).

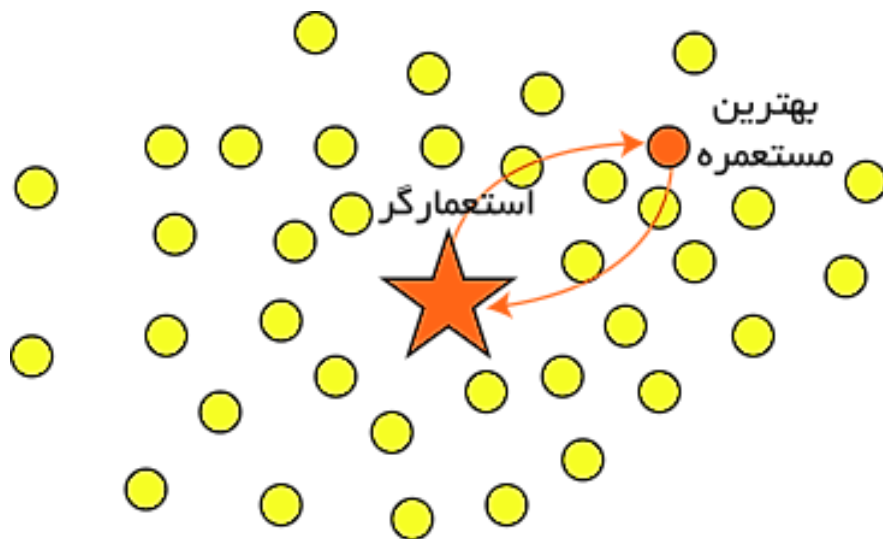


شکل ۳-۵- اعمال سیاست انقلاب (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷)

۳-۳-۴- جابجایی احتمالی موقعیت مستعمره و استعمارگر

در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر، ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیتی برسند که از موقعیت استعمارگر آن امپراطوری بهتر باشد (به نقاطی در تابع هزینه برسند که هزینه کمتری را نسبت به مقدار تابع هزینه در موقعیت استعمارگر، تولید می‌کنند). در این حالت، جایگاه کشور استعمارگر و کشور مستعمره، با یکدیگر عوض خواهد شد و الگوریتم با کشور استعمارگر در موقعیت جدید ادامه خواهد یافت و این بار، این کشور استعمارگر جدید است که شروع به اعمال سیاست همگون‌سازی و جذب بر مستعمرات خود می‌کند (Atashpaz-Gargari & Lucas, 2007).

شکل (۳-۶) به خوبی گویای این موضوع است.

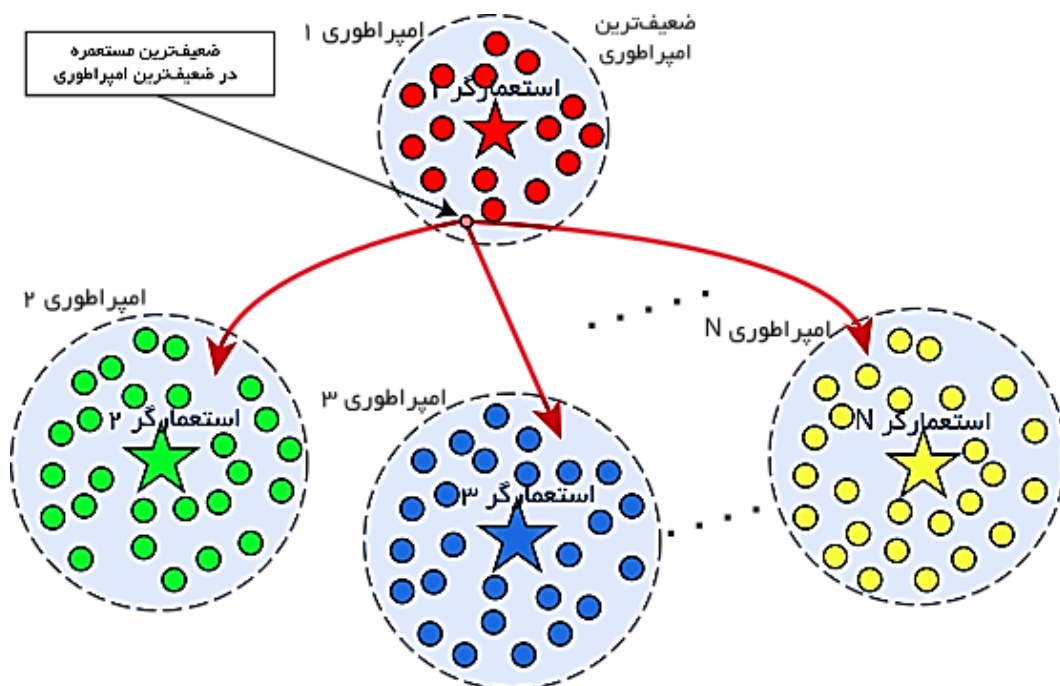


شکل ۳-۶- جابه جایی موقعیت مستعمره و استعمارگر (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷)

۳-۳-۵- رقابت استعماری

قدرت یک امپراطوری به صورت قدرت کشور استعمارگر، به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن تعریف می‌شود.

هر امپراطوری‌ای که نتواند بر قدرت خود بیفزاید و قدرت رقابت خود را از دست بدهد، در جریان رقابت‌های استعماری، حذف خواهد شد. این حذف شدن، به صورت تدریجی صورت می‌پذیرد. بدین معنی که به مرور زمان، امپراطوری‌های ضعیف، مستعمرات خود را از دست داده و امپراطوری‌های قویتر، این مستعمرات را تصاحب کرده و بر قدرت خویش می‌افزایند. این فرآیند به این صورت مدل شده است که در هربار اجرای فرآیند ضعیف‌ترین مستعمره از ضعیف‌ترین استعمارگر انتخاب شده و بین باقی استعمارگران به رقابت گذاشته خواهد شد. در الگوریتم رقابت استعماری، امپراطوری در حال حذف، ضعیف‌ترین امپراطوری موجود است. مستعمرات مذکور، لزوماً توسط قویترین امپراطوری، تصاحب نخواهند شد، بلکه امپراطوری‌های قویتر، احتمال تصاحب بیشتری دارند. رقابت استعماری میان چندین استعمارگر برای جذب مستعمرات همدیگر در شکل (۷-۳) به خوبی نشان داده شده است (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).



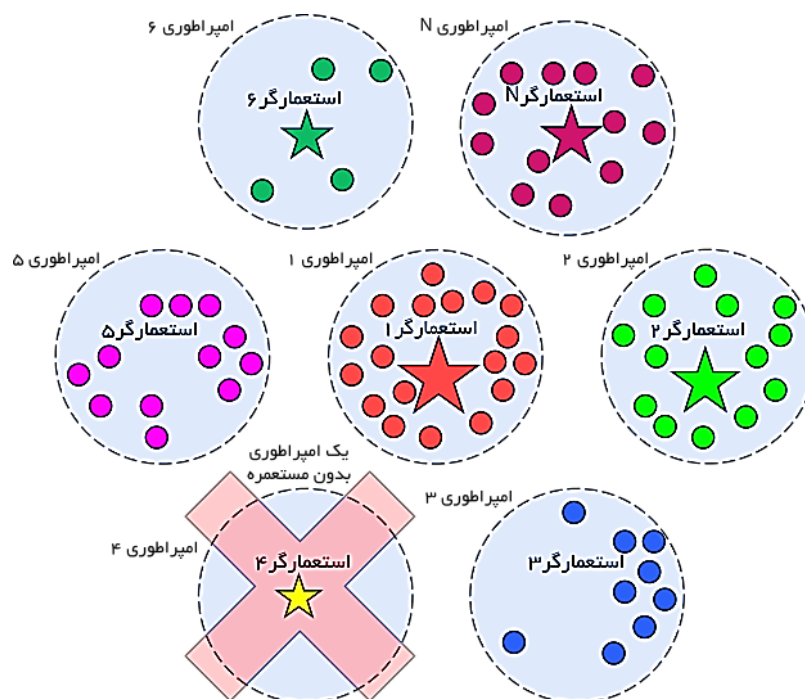
شکل ۷-۳- رقابت استعماری بین امپراطوری‌ها (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷)

۳-۳-۶- سقوط امپراطوری‌های ضعیف

در جریان رقابت‌های استعماری، خواه ناخواه، امپراطوری‌های ضعیف به تدریج سقوط کرده و مستعمراتشان به دست امپراطوری‌های قوی‌تر می‌افتد. شروط متفاوتی را می‌توان برای سقوط یک امپراطوری در نظر گرفت. در الگوریتم پیشنهاد شده، یک امپراطوری زمانی حذف شده تلقی می‌شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).

به زبان ساده‌تر اگر در طی فرآیند رقابت استعماری، کشورهای استعمارگری ایجاد شود که با از دست دادن تمامی مستعمرات خود مواجه شود، در این مرحله آن کشور استعمارگر خود تبدیل به مستعمره دیگر استعمارگران می‌شود (Arish et al, 2014).

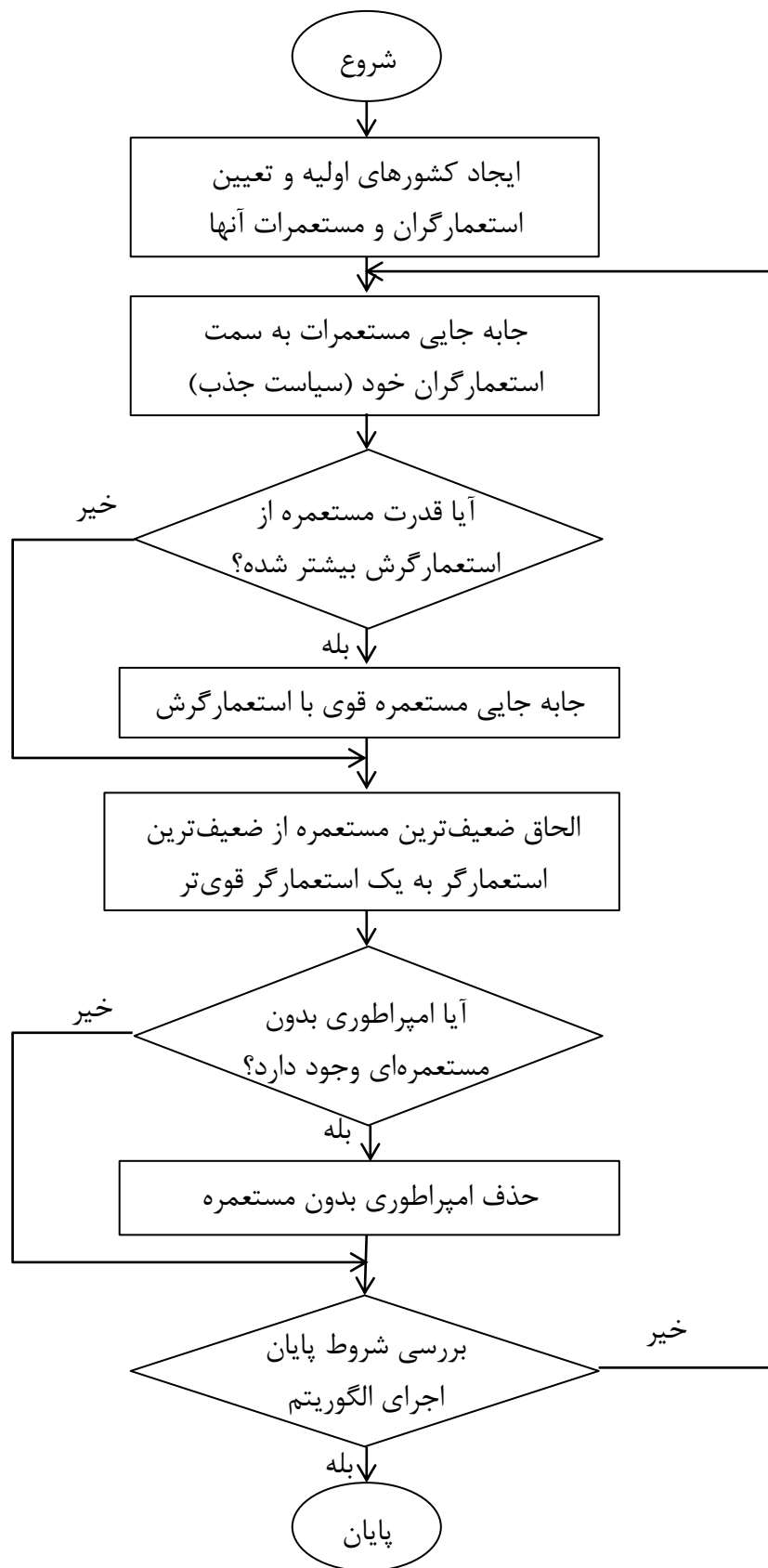
شکل (۳-۸) یک نمای کلی از سقوط امپراطوری‌ها در روند چرخه الگوریتم، ارائه می‌دهد.



شکل ۳-۸- حذف امپراطوری‌های فاقد مستعمره (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷)

۳-۴- فلوچارت الگوریتم

در شکل (۳-۹) فلوچارت کلی الگوریتم رقابت استعماری رسم شده است.



شکل ۳-۹- فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری

۳-۵- الگوریتم رقابت استعماری فازی^۱

با وجود تمام مطالعات موفق در بهبود عملکرد ICA، همچنان برخی از مسائل چالش برانگیز وجود دارد، از جمله (Arish et al, 2014):

۱. وجود نقاط بهینه محلی
 ۲. سرعت همگرایی کم در برخی از مسائل
 ۳. پیچیدگی زیاد محاسباتی در مواقع وجود تعداد زیادی از متغیرهای مستقل
- برای مقابله با چالش‌های بالا، الگوریتم رقابت استعماری فازی (FICA) ارائه شده است. با استفاده از این الگوریتم، هر مستعمره موجود در واقع متعلق به همه استعمارگرها است که با درجه عضویت مشخص در نظر گرفته شده است (Arish et al, 2014).
- در نسخه‌ی فازی این الگوریتم در مقایسه با نسخه استاندارد ICA، در الگوریتم پیشنهادی، کشورهای قدرتمند همانند قبل به عنوان استعمارگر در هر مرحله انتخاب می‌شوند. با توجه به تابع عضویت فازی، کشورهای دیگر به مستعمرات امپراطوری تبدیل می‌شوند. در سیاست جذب، بر اساس تابع عضویت فازی، مستعمرات به سمت استعمارگرها حرکت می‌کنند. در این الگوریتم، هیچ امپراطوری حذف نخواهد شد. به جای آن، در طول اجرای الگوریتم، امپراطوری‌ها به سمت یک نقطه حرکت می‌کنند. مراحل دیگر الگوریتم شبیه به ICA استاندارد است (Arish et al, 2014).
- مستعمره‌ها با توجه به تابع عضویت در مسیری حرکت می‌کنند که حاصل جمع بردارهای جذب استعمارگرهای مختلف است. به عبارت دیگر استعمارگری با قدرت بیشتر می‌تواند باعث ایجاد درجه

¹ - Fuzzy Imperialist Competitive Algorithm (FICA)

عضویت بزرگتری در مستعمره‌ها شده و تأثیر بیشتری در زمان فرآیند جذب بر روی آنها بگذارد (Arish et al, 2014).

این عمل باعث می‌شود تا تمام مستعمره‌ها مستقیماً به سمت نقطه‌ی بهینه حرکت کنند و سرعت بهینه‌سازی با توجه به این حرکت مستقیم افزایش یابد. گرچه این عمل موجب افزایش سرعت جستجوی نقطه‌ی بهینه می‌شود اما خطر یافتن نقاط بهینه‌ی محلی را افزایش می‌دهد. در الگوریتم رقابت استعماری فازی، هیچ استعمارگری حذف نمی‌شود بلکه تمام استعمارگرها به سمت یک استعمارگر بهینه و نهایی حرکت کرده و تبدیل به یک استعمارگر می‌شوند، که همان نقطه‌ی بهینه است (Arish et al, 2014).

۳-۶- مزایا و معایب استفاده از ICA در بهینه‌سازی

۳-۶-۱- مزایا

الگوریتم رقابت استعماری نسبت به سایر روش‌های الهام گرفته شده از طبیعت مزایای زیادی دارد. از جمله:

۱- نو بودن ایده

۲- مبتنی بر رفتار اجتماعی انسان که هوشمندانه‌تر از رفتارهای بیولوژیکی اوست

۳- سرعت همگرایی بالا

۴- توانایی بهینه‌سازی توابعی با تعداد متغیرهای بسیار زیاد

۵- درک کلی راحت‌تر الگوریتم و همه فهم بودن و ملموس بودن آن

۶- راحتی برنامه نویسی کامپیوتری برای الگوریتم

۳-۶-۲- معایب

الگوریتم رقابت استعماری اگر چه الگوریتمی بسیار قدرتمند برای بهینه‌سازی توابع چند متغیره است اما ایراداتی نیز دارد که از آن جمله موارد زیر قابل ذکر است:

۱- ضعف در جستجوی کامل محیط: وقتی ابعاد مساله بسیار زیاد شود، الگوریتم از جستجوی کامل فضای حالت عاجز خواهد شد.

۲- همگرایی بسیار سریع: الگوریتم، بسیار سریع به نقاط بهینه‌ی محلی میل می‌کند و بنابراین باید بارها دوباره اجرا شود.

۳- قفل کردن: گاهی وضعیتی بوجود می‌آید که تغییراتی که توسط عملگر الگوریتم اتفاق می‌افتد (جا به جایی کشورها بین امپراطوری‌ها) در یک حلقه‌ی بسته بارها و بارها تکرار می‌شود و تنها راه حل این خواهد بود که الگوریتم دوباره اجرا شود.

۳-۷- جمع بندی

الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتمی ساده، سریع، کارا و انعطاف پذیر در حل مسائل بهینه‌سازی است که در صورت ایجاد تغییراتی متناسب با هر مسأله در پارامترهایی نظیر احتمال انقلاب یا احتمال جذب، می‌تواند پاسخی قابل قبول تولید کند. همچنین این قابلیت به کاربر الگوریتم این امکان را می‌دهد تا تعاملی بهتر با الگوریتم برقرار کند و با کسب تجربه‌ی لازم، پاسخ‌های بهتری را به دست آورد.

فصل چهارم

بهینه‌سازی محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز با

استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

۴-۱- مقدمه

با توجه به مطالبی که در فصول گذشته طرح شد، در این فصل اقدام به ارائه‌ی روش‌هایی برای تعریف مسائل محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید خواهد شد. این روش‌ها باید به گونه‌ای باشند که این مسائل را به طور کامل به صورتی تعریف کنند که برای الگوریتم رقابت استعماری قابل فهم باشد. همچنین این روش‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که پاسخ‌های مسئله به پاسخ‌های واقعی تا حد ممکن نزدیک باشند. ایده‌ی اولیه‌ی این روش‌ها بر مبنای پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد دکتر میرزایی با عنوان «طراحی محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید معادن روباز با استفاده از الگوریتم ژنتیک» طراحی شده است.

۴-۲- طراحی محدوده نهایی معادن روباز با استفاده از ICA

۴-۲-۱- کشور مدل شده برای مسئله محدوده بهینه نهایی

اگر کانسار به صورت مدل بلوکی سه بعدی مدل شود، با این فرض که مخروط استخراجی برای هر بلوک، مجموعه بلوک‌هایی باشد که برای دسترسی به بلوک مورد نظر بایستی متناسب با شیب لازم برداشت شود، بنابراین محدوده نهایی قطعاً حاصل مخروط‌های استخراجی بلوک‌های مثبت است. پس برای بهینه‌سازی محدوده نهایی باید با ارزش‌ترین مجموعه از این مخروط‌های استخراجی را پیدا کرد. با این وصف، کشورهای این مسئله عبارت از آرایه‌ای از اعداد صحیح با طول معین است. برای تعیین طول این آرایه و همچنین مقادیر عددی آن روش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه در مورد هر یک توضیحاتی ارائه و در مورد ویژگی‌های آنها بحث خواهد شد.

الف- روش اول

در ابتدا روشی مدنظر قرار گرفت که در آن کشور به صورت آرایه‌ای از اعداد صحیح به طول تعداد بلوک‌های موجود در مدل بلوکی اقتصادی بود که هر عضو آرایه شماره یکی از بلوک‌های مدل در نظر گرفته شده بود. محدوده نهایی بهینه در این روش عبارت از مخروط‌های استخراجی بلوک‌های موجود در استعمارگر برتر نهایی است. در ادامه با ذکر یک مثال به شرح جزئیات و بررسی روش پرداخته می‌شود. در شکل (۴-۱) یک مدل بلوکی با ۴ سطر و ۷ ستون حاوی ۲۸ بلوک در نظر گرفته شده است.

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
-۱	+۱	+۱	-۱	-۱	-۱	-۱
۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
-۱	-۱	-۱	-۱	+۲	+۱	-۱
۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱
-۱	-۱	+۲	-۱	+۳	-۱	-۱
۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸
-۱	-۱	-۱	+۱	-۱	-۱	-۱

شکل ۴-۱- یک مدل بلوکی دو بعدی نمونه

در این مدل بلوکی اقتصادی با در نظر گرفتن محدودیت شیب ۴۵ درجه، بلوک‌های شماره ۸، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۷ و ۲۸ به علت قرار گرفتن مخروط استخراجی آنها در خارج از محدوده مدل بلوکی، به عنوان بلوک‌های غیرقابل استخراج در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین ۱۶ بلوک باقی مانده قابل استخراج می‌باشند. حال با توجه به روش مدنظر برای تعریف کشور، هر کشور یک آرایه‌ی ۱۶ عضوی است که هر عضو آن شماره یکی از بلوک‌های قابل استخراج می‌باشد.

اما این روش دارای معایب بزرگی است که عملاً در همان ابتدای امر آن را ناکارآمد و از بررسی بیشتر معاف می‌کند.

اولین عیب این روش این است که در آن تعداد کشورهای تعریف شده بسیار زیاد خواهد بود. به عنوان مثال در مدل بلوکی اقتصادی فوق تعداد کل حالات برای کشورها 16^{16} مورد است که عدد فوق‌العاده بزرگی است و در صورت بزرگتر شدن مدل بلوکی این عدد به شکل وحشتناکی افزایش خواهد یافت. این عیب، مانع بزرگی بر سر راه محاسبات بعدی بوده و دامنه‌ی جستجو را فوق‌العاده گسترده خواهد کرد.

عیب دیگر این روش این است که در آن کشورهای تکراری به تعداد زیاد ایجاد خواهد شد و این امر بر روی عملگرهای انقلاب و سیاست جذب تأثیر منفی می‌گذارد و عملاً آنها را بی‌اثر خواهد کرد که این امر موجب ایجاد پاسخ‌های بهینه‌ی محلی و شکست بهینه‌سازی خواهد شد.

همچنین ایراد دیگر این روش این است که تعداد زیادی از کشورهای به وجود آمده در این روش شاید از نظر ریاضی با یکدیگر متفاوت باشند اما از لحاظ نتیجه کاملاً یکسان خواهند بود، به عنوان مثال در مدل بلوکی شکل (۴-۱) در صورتی که شماره ۲۵ در یک آرایه موجود باشد عملاً به معنای استخراج تمامی بلوک‌های قابل استخراج در مدل بلوکی است، چراکه مخروط استخراجی این بلوک شامل کلیه‌ی بلوک‌های قابل استخراج است. تعداد آرایه‌هایی که عدد ۲۵ در آنها موجود است برابر $16^{16} - 15^{16}$ (تعداد کل کشورها منهای تعداد کشورهای فاقد عضو ۲۵) است که این به معنی کشورهای تکراری از لحاظ نتیجه است. این امر سبب میشود که تعداد زیادی محاسبه و سیکل بهینه‌سازی که عملاً هیچ حاصلی ندارند انجام گیرد.

این عیب‌های عمده که حتی در چنین مدل بلوکی کوچکی می‌تواند تا این اندازه دردسر ایجاد کند، ثابت می‌کند که این روش کارآمد نیست. بنابراین روش دومی ارائه می‌شود.

ب- روش دوم

برای کم کردن تعداد کشورهای ایجاد شده و رفع عیوب روش قبل این بار روشی پیشنهاد شد که در آن کشور به صورت آرایه‌ای از اعداد صحیح به طول تعداد بلوک‌های مثبت موجود در مدل بلوکی بود که هر عضو آرایه شماره یکی از بلوک‌های مثبت واقع در مدل بلوکی در نظر گرفته شده بود.

برای مدل بلوکی در نظر گرفته شده در شکل (۴-۱) با توجه به اینکه تعداد بلوک‌های مثبت ۷ عدد می‌باشد، بنابراین در این روش کشورهای ساخته شده یک آرایه‌ی ۷ عضوی و تعداد کشورها 7^7 می‌باشد. این روش در مقایسه با روش قبل بسیار بهتر است اما همچنان برای مدل بلوکی به این کوچکی مقدار زیادی محسوب می‌شود.

این روش نیز با وجود اصلاحات انجام شده دارای همان معایب روش اول است، بنابراین این روش نیز ناکارآمد بوده و باید روش دیگری پیشنهاد شود.

پ- روش سوم

در روش پیشنهادی سوم، کشور به صورت آرایه‌ای از اعداد صحیح به طول تعداد ستون‌های دارای بلوک مثبت موجود در مدل بلوکی بود که هر عضو آرایه شماره یکی از بلوک‌های مثبت مدل بلوکی در نظر گرفته شده، خواهد بود.

در مورد مثال شکل (۴-۱) اگر از این روش استفاده شود، با توجه به اینکه تعداد ستون‌های دارای بلوک مثبت ۵ ستون است، هر کشور یک آرایه‌ی ۵ عضوی است. با توجه به اینکه در مجموع ۷ بلوک مثبت در این مدل بلوکی موجود است بنابراین تعداد کشورهای ایجاد شده 7^5 کشور است. به طور مشخص این روش در مقایسه با دو روش قبل دارای دامنه‌ی جستجوی بسیار کوچکتر و نیازمند محاسبات کمتر است، اما همچنان مشکلات همچون تعدد کشورهای تکراری در این روش نیز وجود دارد.

این روش اگرچه در مدل‌های بلوکی کوچک پاسخ قابل قبولی خواهد داشت، اما در مدل‌های بلوکی بزرگ مسلماً با مشکلاتی مواجه خواهد شد، لذا در ادامه به اصلاح روش و ارائه‌ی روش چهارم پرداخته خواهد شد.

ت- روش چهارم

در روش پیشنهادی چهارم، کشور به صورت آرایه‌ای از اعداد صحیح به طول تعداد ستون‌های دارای بلوک مثبت موجود در مدل بلوکی است که هر عضو آرایه شماره یکی از بلوک‌های مثبت واقع در همان ستون متناظر در مدل بلوکی خواهد بود.

تفاوت این روش با روش قبلی این است که در روش قبلی هر عضو درایه می‌توانست شماره‌ی هریک از بلوک‌های مثبت مدل بلوکی اقتصادی باشد اما در این روش هر عضو درایه تنها می‌تواند شماره‌ی یکی از بلوک‌های مثبت ستون متناظر با همان عضو درایه باشد. به این ترتیب تعداد کشورهای ایجاد شده بسیار کمتر خواهد شد.

اما ایراد بزرگ این روش این است که یک حالت مهم را پوشش نمی‌دهد. در این روش اگر ستونی دارای بلوک مثبت باشد باید حداقل دارای یک مخروط استخراجی باشد و حالتی برای عدم وجود مخروط استخراجی در یک ستون دارای بلوک مثبت وجود ندارد.

لذا حالت پنجمی با اصلاح این روش توسعه می‌یابد که این ایراد را نداشته باشد.

ث- روش پنجم

در نهایت در مدل پیشنهادی پنجم، کشور به صورت آرایه‌ای از اعداد صحیح به طول تعداد ستون‌های دارای بلوک مثبت موجود در مدل بلوکی است که هر عضو آرایه عبارت است از تعداد بلوک مثبت ستون متناظری که ممکن است استخراج شود. به عنوان مثال برای ستونی با ۳ بلوک مثبت امکان دارد ۰، ۱، ۲ و یا هر ۳ بلوک مثبت استخراج شود. بنابراین در ستونی با n بلوک مثبت $n+1$

حالت وجود خواهد داشت. همچنین در این روش شمارش از بالا به پایین خواهد بود به این معنا که عدد n در جایگاه m یک آرایه به معنای انتخاب n مین بلوک مثبت از m مین ستون است. آرایه‌ای که عدد متناظر با ستونی صفر شود به این معنا است که از آن ستون هیچ بلوکی استخراج نمی‌شود مگر در مخروط استخراجی بلوک‌های دیگر ستون‌ها قرار گیرد. برای درک واضح‌تر مطلب با یک مثال به توضیح خواهیم پرداخت.

در صورت استفاده از این مدل در مثال شکل (۴-۱) در این مدل بلوکی تعداد ۵ ستون دارای بلوک مثبت است که به ترتیب در ستون ۲، یک بلوک مثبت و دارای ۲ حالت، در ستون ۳، دو بلوک مثبت و دارای ۳ حالت، در ستون ۴، یک بلوک مثبت و دارای ۲ حالت، در ستون ۵، دو بلوک مثبت و دارای ۳ حالت و در ستون ۶، یک بلوک مثبت و دارای ۲ حالت قرار دارد.

بنابراین تعداد کل حالات موجود برابر:

$$72 = 2 \times 3 \times 2 \times 3 \times 2 = \text{موجود حالات کل تعداد}$$

این عدد در مقایسه با مدل‌های قبلی بسیار معقول به نظر می‌رسد.

در این مرحله میتوان به راحتی قدرت کشور تولید شده را نیز محاسبه کرد. به این صورت که قدرت کشور برابر مجموع ارزش بلوک‌های واقع در مخروط‌های استخراجی بلوک‌های کشور است. همچنین این عدد بیانگر ارزش محدوده نهایی متناظر با آن کشور می‌باشد.

۴-۲-۲- جمعیت اولیه

حال که نحوه‌ی نمایش یک کشور در این مسأله مشخص شد، برای ایجاد یک جمعیت اولیه از تعداد مشخصی کشور برای آغاز الگوریتم و یافتن کشور بهینه اقدام می‌شود. برای این کار بسته به گستردگی مدل بلوکی موجود و تعداد کل کشورهای موجود (که طبق تعاریف ارائه شده برای کشور، تعداد آن برای هر مدل بلوکی مشخص است)، تعداد مشخصی کشور به صورت تصادفی تولید می‌شود.

تعداد این جمعیت اولیه‌ی انتخابی تأثیر مستقیمی بر روی میزان دقت و زمان انجام الگوریتم و یافتن پاسخ بهینه نهایی دارد. در صورتی که جمعیت اولیه بسیار بزرگ در نظر گرفته شود افزایش حجم و تعداد محاسبات موجب اتلاف وقت خواهد شد. اگر جمعیت اولیه بسیار کوچک در نظر گرفته شود احتمال ایجاد پاسخ‌های بهینه محلی افزایش یافته و دقت پاسخ‌های احتمالی نیز کاهش خواهد یافت، همچنین تفاوت در پاسخ‌های به وجود آمده در اجراهای مکرر نیز بیشتر خواهد شد. تعداد بهینه‌ی جمعیت اولیه، با توجه به ماهیت الگوریتم، کاملاً به تجربه‌ی کاربر بستگی دارد و پس از اجرای متوالی الگوریتم توسط کاربر، دید کلی نسبت به این مقدار حاصل خواهد شد. در اینجا با توجه به توصیه‌ی الگوریتم ICA اصلی، مقداری در حدود ۱۰ درصد کل کشورهای موجود در مسأله به عنوان تعداد جمعیت اولیه در نظر گرفته می‌شود.

ایجاد کشورهای تصادفی در این مسأله بسیار ساده است. کافی است با توجه به مدل بلوکی طول آرایه مشخص شود، سپس در هر عضو آرایه به صورت اتفاقی یکی از مقادیر مجاز با توجه به تعریف مدل قرار گیرد تا در نهایت کشور اتفاقی اولیه مورد نظر ایجاد شود. این عمل باید به تعداد کشورهای در نظر گرفته شده برای جمعیت اولیه تکرار شود.

۴-۲-۳- انتخاب استعمارگر، تخصیص مستعمرات و ایجاد امپراطوری‌ها

در این مرحله تعدادی از کشورهای تصادفی ایجاد شده به عنوان استعمارگر انتخاب می‌شود. برای این کار پیشنهاد می‌شود ارزش تمامی کشورهای تصادفی ایجاد شده محاسبه و سپس ۱۵ درصد بالایی که دارای ارزش بیشتری هستند به عنوان استعمارگر انتخاب شوند. البته این عدد بسته به تجربه‌ی حاصل از نتایج اجرای الگوریتم در هر مدل بلوکی می‌تواند تغییر کند، اما به عنوان یک مقدار پیش فرض ۱۵ درصد مناسب به نظر می‌رسد. کشورهای باقی مانده نیز مسلماً مستعمرات این استعمارگران خواهند بود.

حال با توجه به مقدار قدرت هر استعمارگر تعداد مشخصی مستعمره به هر یک تعلق می‌گیرد. اگر T را تعداد کل مستعمرات موجود، m را تعداد استعمارگران و P_n را قدرت استعمارگر n ام در نظر بگیریم، این مقدار را می‌توان از رابطه (۴-۱) محاسبه کرد:

$$\text{تعداد مستعمرات استعمارگر } n\text{ام} = \left[\frac{P_n}{\sum_{n=1}^m P_n} \times T \right] \quad (۴-۱)$$

در نهایت آخرین استعمارگر تعداد مستعمرات باقی مانده را به خود اختصاص خواهد داد. حال با توجه به تعداد مستعمره لازم برای هر استعمارگر، تخصیص مستعمرات به استعمارگران به صورت اتفاقی انجام می‌شود. در این مرحله هر استعمارگر به همراه مستعمرات خود تشکیل یک امپراطوری را خواهد داد. قدرت هر امپراطوری نیز از مجموع قدرت هر استعمارگر به علاوه‌ی قدرت مستعمرات خود، به دست می‌آید.

بنابراین در این مرحله، تعدادی محدوده‌نهایی دارای بیشترین ارزش به عنوان استعمارگر وجود دارد که هر یک دارای تعدادی محدوده‌نهایی به عنوان مستعمره هستند.

۴-۲-۴- سیاست جذب

در این مرحله نوبت به اجرای سیاست جذب و حرکت مستعمرات به سمت استعمارگران می‌رسد. برای شبیه‌سازی این مرحله در این مسأله باید به این نکته توجه کرد که هدف از این کار حرکت مستعمره به سمت استعمارگر در جهتی اتفاقی و مقداری اتفاقی است، که در اینجا احتمال جذب نامیده می‌شود، تا در نهایت کشور مستعمره به استعمارگر نزدیک شود. برای ارضاء شرط تصادفی بودن مقدار حرکت در هر مرحله از اجرای فرآیند جذب، به ازای هر مستعمره یک عدد تصادفی از بازه‌ی $[0,1]$ تولید می‌شود و R نامیده می‌شود. اگر تعداد اعضای آرایه‌های معرف کشورها i در نظر گرفته شود،

بنابر رابطه (۲-۴) تعداد j عضو از اعضای آرایه‌ی مستعمره انتخاب شده و با عضو متناظر از آرایه‌ی استعمارگر جایگزین می‌شود.

$$j = [R \times i] + 1 \quad (2-4)$$

اگر این j عضو به صورت اتفاقی از بین i عضو انتخاب شود، تصادفی بودن جهت حرکت که مورد نظر الگوریتم است نیز برآورده شده است. در هر مرحله از اجرای فرآیند جذب، برای تمام مستعمرات از تمام امپراطوری‌ها این عمل یک بار انجام می‌گیرد.

در پایان این مرحله تمامی مستعمرات موجود تغییر کرده و به کشورهای جدیدی تبدیل شده‌اند، که در مورد این مسأله در حقیقت محدوده‌های نهایی جدیدی تولید شده که دارای ارزش متفاوتی از محدوده‌های قبلی هستند.

در هر بار اجرای الگوریتم، ارزش تمام کشورهای هر امپراطوری محاسبه می‌شود. اگر مستعمره‌ای دارای قدرت بیشتر از استعمارگر خود بود جای استعمارگر و مستعمره تعویض می‌شود.

۴-۲-۵- انقلاب در کشورهای مستعمره

برای جلوگیری از پیدایش جواب‌های بهینه‌ی محلی، این الگوریتم فرآیندی تحت عنوان انقلاب را پیشنهاد می‌کند. برای اجرای این فرآیند در این مسأله، در هر مرحله از اجرای الگوریتم، برای هر مستعمره یک عدد تصادفی از بازه‌ی $[0, 1]$ تولید می‌شود. حال اگر این عدد تولیدی کمتر از 0.3 بود مستعمره مورد نظر برای انقلاب انتخاب می‌شود (انتخاب عدد 0.3 تنها یک پیشنهاد است که به معنی آن است که احتمال وقوع انقلاب در مستعمرات کمتر از 30% درصد در نظر گرفته شده، در صورت اجراهای متعدد الگوریتم در مورد این مسأله و داشتن دید مهندسی مناسب می‌توان این عدد را برای پاسخ‌های بهتر اصلاح کرد).

برای شبیه سازی فرآیند انقلاب در این مسأله، به صورت تصادفی یکی از اعداد آرایه‌ی مستعمراتی که برای انقلاب انتخاب شده بودند، با عدد مجاز دیگری برای آن جایگاه تعویض می‌شود. حال یک مستعمره جدید ایجاد شده است که دارای ارزش متفاوتی با مستعمره قبلی است و همچنین این تغییر هیچگونه ارتباطی با استعمارگر امپراطوری ندارد.

۴-۲-۶- رقابت استعماری

در هر مرحله اجرای الگوریتم پس از محاسبه‌ی ارزش تمام کشورها و امپراطوری‌ها مطابق توضیحات قبلی، ضعیف‌ترین مستعمره از ضعیف‌ترین امپراطوری انتخاب شده و به یک امپراطوری دیگر منتقل می‌شود. این امر سبب می‌شود تا سرعت نزدیک شدن پاسخ‌ها به پاسخ بهینه افزایش یابد. ممکن است در تکرارهای متوالی الگوریتم، یکی از استعمارگران تمام مستعمرات خود را از دست بدهد. در صورت بروز چنین حالتی مطابق الگوریتم آن استعمارگر خود به مستعمره تبدیل شده و به صورت اتفاقی به یکی از امپراطوری‌های دیگر تعلق می‌گیرد. مراحل بالا در صورت اجرای کامل یک سیکل اجرای الگوریتم را شامل می‌شود. پس از اجرای تعداد سیکل‌های مشخص در نهایت الگوریتم به پاسخ بهینه مورد نظر خواهد رسید.

۴-۲-۷- پایان اجرای الگوریتم و بهینه‌سازی

برای این امر از دو معیار کلی می‌توان استفاده کرد:

- ۱- اگر الگوریتم پس از تکرار تعداد مشخصی سیکل، بدون تغییر در ارزش بهترین کشور که همان محدوده نهایی است ادامه یابد، بهینه‌سازی متوقف شود. این امر کاملاً به کاربر بستگی و همچنین اندازه‌ی مدل بلوکی بستگی دارد. در این حالت بهترین کشور همان پاسخ بهینه است.

۲- الگوریتم تا زمانی ادامه یابد که تنها یک امپراطوری باقی بماند که در این حالت استعمارگر

موجود به عنوان پاسخ بهینه مدنظر قرار می گیرد.

همچنین می توان از هردوی این شرطها به صورت همزمان بهره برد.

در شکل (۲-۴) فلوچارت پیشنهادی برای حل مسئله بهینه سازی محدوده نهایی با ICA نشان داده شده است.

۴-۲-۸- پارامترهای کنترل کننده

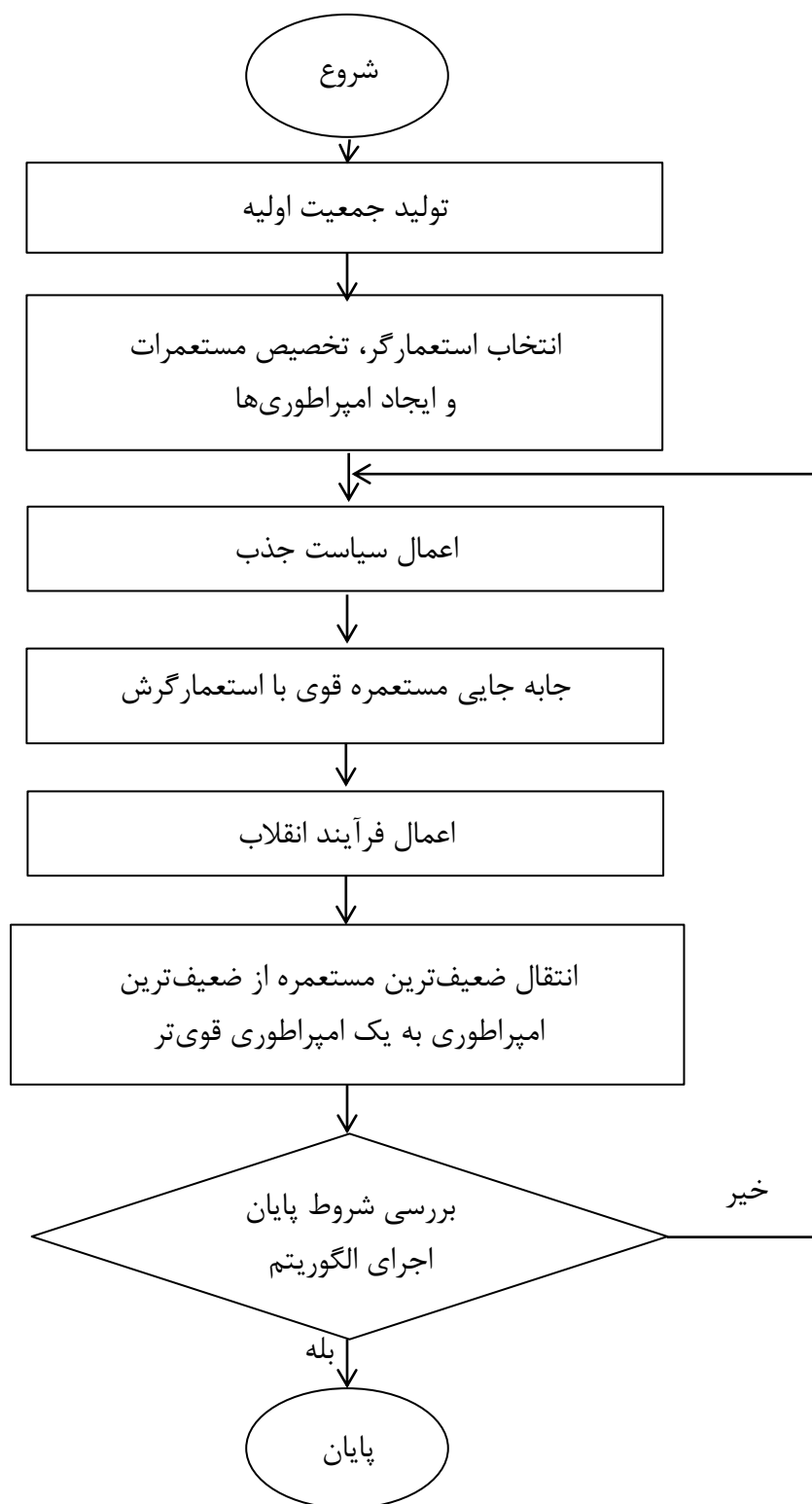
پارامترهایی که عملکرد این الگوریتم را در این مسئله کنترل می کنند عبارتند از:

۱- اندازه ی جمعیت اولیه

۲- تعداد استعمارگرها

۳- احتمال جذب

۴- احتمال انقلاب



شکل ۴-۲- الگوریتم پیشنهادی برای مدل سازی تعیین محدوده نهایی بهینه با ICA

۴-۲-۹- حل یک مثال

برای درک بهتر موضوع، مسأله‌ی یافتن محدوده‌ی بهینه نهایی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری را برای مدل بلوکی دو بعدی شکل (۳-۴) بررسی می‌شود و مرحله به مرحله توضیح داده می‌شود. در این مثال محدودیت شیب ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است.

۱ -۱	۲ +۱	۳ +۱	۴ -۱	۵ -۱	۶ -۱	۷ -۱
۸ -۱	۹ -۱	۱۰ -۱	۱۱ -۱	۱۲ +۲	۱۳ +۱	۱۴ -۱
۱۵ -۱	۱۶ -۱	۱۷ +۲	۱۸ -۱	۱۹ +۳	۲۰ -۱	۲۱ -۱
۲۲ -۱	۲۳ -۱	۲۴ -۱	۲۵ +۱	۲۶ -۱	۲۷ -۱	۲۸ -۱

شکل ۳-۴- مدل بلوکی دو بعدی برای بررسی الگوریتم

الف- مدل کردن مسأله

همانطور که پیش از این گفته شد در این مسأله از روش پنجم که در رابطه با آن بحث شد استفاده می‌شود. با توجه به شکل (۳-۴) آرایه‌ی عددی معرف کشورها در این مدل بلوکی اقتصادی، دارای ۵ عضو است که در ستون ۲، یک بلوک مثبت و دارای ۲ حالت، در ستون ۳، دو بلوک مثبت و دارای ۳ حالت، در ستون ۴، یک بلوک مثبت و دارای ۲ حالت، در ستون ۵، دو بلوک مثبت و دارای ۳ حالت و در ستون ۶، یک بلوک مثبت و دارای ۲ حالت است، بنابر این عضو اول ۰ یا ۱، عضو دوم ۰، ۱ یا ۲، عضو سوم ۰ یا ۱، عضو چهارم ۰، ۱ یا ۲ و عضو پنجم ۰ یا ۱ است.

ب- جمعیت اولیه

در این مثال با توجه به اینکه تعداد کل کشورهای موجود ۷۲ کشور است، با توجه به در نظر گرفتن حدود ۱۰ درصد کشورها به عنوان جمعیت اولیه، جمعیت اولیه ۱۰ کشور در نظر گرفته می‌شود. این ۱۰ کشور با جایگذاری اتفاقی اعداد مجاز در جایگاه‌های آرایه ایجاد می‌شود. شکل (۴-۴) نشان‌گر جمعیت اولیه ایجاد شده به صورت تصادفی است.

پ- انتخاب استعمارگر، تخصیص مستعمرات و ایجاد امپراطوری‌ها

طبق الگوی تعریف شده در بخش‌های قبل، ابتدا ۱۵ درصد از جمعیت اولیه به عنوان تعداد استعمارگران انتخاب می‌شود. در این مثال به علت کم بودن جمعیت اولیه، سه کشور به عنوان استعمارگر اولیه انتخاب می‌شود.

با توجه به جمعیت کشورهای شماره ۲، ۳ و ۴ به ترتیب با قدرت‌های ۲، ۲+ و ۳+ به عنوان سه کشور قدرتمندتر به عنوان سه استعمارگر مورد نظر برگزیده می‌شوند.

حال با توجه به رابطه‌ی (۴-۱) تعداد مستعمرات هر یک محاسبه می‌شود که در نهایت به کشور ۲، دو مستعمره، به کشور ۳، دو مستعمره و به کشور ۴، سه مستعمره تعلق می‌گیرد. مستعمرات به صورت تصادفی و به تعداد معین به استعمارگران اختصاص داده می‌شود.

ردیف	نمایش دنباله ای جمعیت اولیه	نمایش جمعیت اولیه بر روی مدل بلوکی	مخروط استخراجی جمعیت اولیه	ارزش محدوده نهایی					
۱	<table><tr><td>۰</td><td>۱</td><td>۰</td><td>۱</td><td>۰</td></tr></table>	۰	۱	۰	۱	۰			صفر
۰	۱	۰	۱	۰					
۲	<table><tr><td>۱</td><td>۱</td><td>۱</td><td>۱</td><td>۰</td></tr></table>	۱	۱	۱	۱	۰			+۲
۱	۱	۱	۱	۰					
۳	<table><tr><td>۰</td><td>۱</td><td>۱</td><td>۰</td><td>۰</td></tr></table>	۰	۱	۱	۰	۰			+۲
۰	۱	۱	۰	۰					
۴	<table><tr><td>۱</td><td>۰</td><td>۰</td><td>۲</td><td>۱</td></tr></table>	۱	۰	۰	۲	۱			+۳
۱	۰	۰	۲	۱					
۵	<table><tr><td>۰</td><td>۲</td><td>۱</td><td>۰</td><td>۰</td></tr></table>	۰	۲	۱	۰	۰			+۲
۰	۲	۱	۰	۰					
۶	<table><tr><td>۱</td><td>۲</td><td>۰</td><td>۲</td><td>۰</td></tr></table>	۱	۲	۰	۲	۰			+۲
۱	۲	۰	۲	۰					
۷	<table><tr><td>۱</td><td>۰</td><td>۰</td><td>۰</td><td>۰</td></tr></table>	۱	۰	۰	۰	۰			+۱
۱	۰	۰	۰	۰					
۸	<table><tr><td>۱</td><td>۱</td><td>۰</td><td>۱</td><td>۰</td></tr></table>	۱	۱	۰	۱	۰			+۱
۱	۱	۰	۱	۰					
۹	<table><tr><td>۰</td><td>۲</td><td>۰</td><td>۲</td><td>۱</td></tr></table>	۰	۲	۰	۲	۱			+۲
۰	۲	۰	۲	۱					
۱۰	<table><tr><td>۰</td><td>۰</td><td>۰</td><td>۰</td><td>۱</td></tr></table>	۰	۰	۰	۰	۱			-۲
۰	۰	۰	۰	۱					

شکل ۴-۴- جمعیت اولیه ایجاد شده به صورت تصادفی

حال سه امپراطوری تولید شده که با اسامی امپراطوری ۱، امپراطوری ۲ و امپراطوری ۳ نام‌گذاری شده است. در جدول (۱-۴) به تفکیک مستعمرات و قدرت های امپراطوری ها درج شده است.

جدول ۱-۴- امپراطوری‌های اولیه‌ی تشکیل شده

نام امپراطوری	استعمارگر	مستعمرات	قدرت امپراطوری
۱	۲	۹ و ۱۰	+۲
۲	۳	۱ و ۵	+۴
۳	۴	۶ و ۷ و ۸	+۷

ت- اجرای سیاست جذب

در جدول (۲-۴) برای هر یک از مستعمرات یک عدد تصادفی تولید و با توجه به رابطه (۲-۴) تعداد اعضای آرایه‌ی مستعمره که باید با اعداد متناظر استعمارگر جایگزین شوند مشخص شده است. اعضای مورد نظر به صورت تصادفی انتخاب و در ستون آخر کشورهای جدید تولید شده پس از اعمال سیاست جذب نمایش داده شده است.

جدول ۲-۴- مستعمرات قبل و بعد از سیاست جذب

مستعمره هدف	عدد تصادفی	تعداد اعضای که جایگزین می‌شوند	مستعمره قبل از اعمال سیاست جذب	مستعمره پس از اعمال سیاست جذب
۱	۰/۷۷	۴	۰ ۱ ۰ ۱ ۰	۰ ۱ ۱ ۰ ۰
۵	۰/۰۲	۱	۰ ۲ ۱ ۰ ۰	۰ ۲ ۱ ۰ ۰
۶	۰/۲۵	۲	۱ ۲ ۰ ۲ ۰	۱ ۲ ۰ ۲ ۱
۷	۰/۲۱	۲	۱ ۰ ۰ ۰ ۰	۱ ۰ ۰ ۰ ۱
۸	۰/۶۵	۴	۱ ۱ ۰ ۱ ۰	۱ ۱ ۰ ۲ ۱
۹	۰/۸۴	۵	۰ ۲ ۰ ۲ ۱	۱ ۱ ۱ ۱ ۰
۱۰	۰/۷۸	۴	۰ ۰ ۰ ۰ ۱	۱ ۰ ۱ ۱ ۰

کشورهای جدید تولید شده از نظر ارزش بررسی می‌شوند که اگر ارزش آنها از استعمارگر آن امپراطوری بیشتر باشد، جای مستعمره و استعمارگر عوض شود.

ث- اجرای فرآیند انقلاب

پس از اجرای سیاست جذب، مجدداً برای هر یک از مستعمرات یک عدد تصادفی جدید تولید شده و در صورتی که عدد تولید شده کمتر از $0/3$ باشد، یکی از اعداد آرایه به صورت اتفاقی با یک عدد مجاز جایگزین خواهد شد.

جدول ۴-۳- مستعمرات قبل و بعد از اجرای فرآیند انقلاب

مستعمره هدف	عدد تصادفی	مستعمره قبل از اعمال سیاست جذب	مستعمره پس از اعمال سیاست جذب
۱	۰/۶۸	۰ ۱ ۱ ۰ ۰	۰ ۱ ۱ ۰ ۰
۵	۰/۳۱	۰ ۲ ۱ ۰ ۰	۰ ۲ ۱ ۰ ۰
۶	۰/۲۵	۱ ۲ ۰ ۲ ۱	۱ ۱ ۰ ۲ ۱
۷	۰/۵۹	۱ ۰ ۰ ۰ ۱	۱ ۰ ۰ ۰ ۱
۸	۰/۶۶	۱ ۱ ۰ ۲ ۱	۱ ۱ ۰ ۲ ۱
۹	۰/۳۶	۱ ۱ ۱ ۱ ۰	۱ ۱ ۱ ۱ ۰
۱۰	۰/۳۱	۱ ۰ ۱ ۱ ۰	۱ ۰ ۱ ۱ ۰

مجدداً ارزش مستعمره‌ها بررسی شده و اگر ارزش یک مستعمره از یک امپراطوری بیشتر از ارزش استعمارگر خود بود، جایگزین خواهد شد.

ج- رقابت استعماری

پس از ۵۰ بار تکرار مراحل بالا، با توجه به اینکه در نهایت دو امپراطوری حذف شده و تمامی کشورها به یکدیگر همگرا شدند، شروط توقف الگوریتم برقرار است. کشور نهایی به وجود آمده در حقیقت همان کشور شماره چهار با ارزش ۳+ است.

بنابراین نتیجه‌ی اجرای این الگوریتم برای مدل ارائه شده محدوده‌ای با ارزش ۳+ است.

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
-۱	+۱	+۱	-۱	-۱	-۱	-۱
۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
-۱	-۱	-۱	-۱	+۲	+۱	-۱
۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱
-۱	-۱	+۲	-۱	+۳	-۱	-۱
۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸
-۱	-۱	-۱	+۱	-۱	-۱	-۱

شکل ۴-۵- نتیجه‌ی اجرای فرآیند مدل شده روی محدوده‌ی فرضی

۴-۲-۱۰- نتایج برنامه‌ی کامپیوتری و مقایسه با مقدار واقعی

برای بررسی کارآمدی این الگوریتم در حل مسأله بهینه‌سازی محدوده نهایی، یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم افزار MATLAB برای این مسأله نوشته شد. برنامه‌ی فوق قادر به محاسبه‌ی محدوده‌ی بهینه‌ی یک مدل بلوکی دو بعدی است.

ورودی این برنامه به صورت یک ماتریس $m \times n$ است که درایه‌های ماتریس، ارزش اقتصادی بلوک‌های مدل بلوکی اقتصادی است. سپس با توجه به فرآیند شرح داده شده در این فصل و با در نظر گرفتن

فرضیات زیر برای مسأله، مدل بلوکی اقتصادی توسط برنامه کامپیوتری اجرا و محدوده نهایی محاسبه شد.

جمعیت اولیه : ۲۰

استعمارگران : ۴

احتمال جذب : ۰/۱۵

احتمال انقلاب : ۰/۳

تعداد تکرار : ۲۵۰

برنامه کامپیوتری به گونه‌ای طراحی شده تا در هر مرحله از تکرار الگوریتم، بهترین پاسخ به دست آمده را ذخیره کرده و پس از پایان اجرای برنامه، مقادیر را روی یک نمودار رسم کند تا در انتها نموداری به وجود بیاید که روند نزدیک شدن پاسخ در هر مرحله، به پاسخ نهایی را نشان دهد. در هر مرحله تکرار الگوریتم، برنامه کشورهای موجود را (که هر بار دارای مقادیر جدیدی هستند) به صورت یک آرایه عددی به همراه ارزش اقتصادی آن محدوده به عنوان خروجی چاپ می‌کند. در انتها، نرم افزار بهترین استعمارگر و ارزش محدوده متناظر آن را به عنوان آخرین خروجی چاپ می‌کند.

مدل بلوکی اقتصادی شکل (۴-۶) برای بررسی برنامه کامپیوتری مورد استفاده قرار گرفته است.

-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1
-2	+1	+1	-2	+1	+1	-1	-2	-2	-2
-3	-3	+1	+1	+1	-3	+3	-3	-3	-3
-4	-4	-4	-4	+2	+1	-4	-4	-4	-4
-5	-5	-5	-5	+2	-5	-5	-5	-5	-5

شکل ۴-۶-مدل بلوک اقتصادی فرضی

الف - محدوده نهایی بهینه با روش مخروط شناور

ابتدا مدل بلوکی اقتصادی شکل (۴-۶) مورد بررسی قرار گرفت و محدوده نهایی آن با روش مخروط شناور به دست آمد که در شکل (۴-۷) نشان داده شده است. ارزش محدوده نهایی بهینه بدست آمده در این روش ۵+ است.

-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1
-2	+1	+1	-2	+1	+1	-1	-2	-2	-2
-3	-3	+1	+1	+1	-3	+3	-3	-3	-3
-4	-4	-4	-4	+2	+1	-4	-4	-4	-4
-5	-5	-5	-5	+2	-5	-5	-5	-5	-5

شکل ۴-۷ - محدوده نهایی به دست آمده با استفاده از مخروط شناور

ب - محدوده نهایی بهینه با روش برنامه‌ریزی پویا

در این بخش محدوده‌ی نهایی بهینه‌ی مدل بلوکی اقتصادی شکل (۴-۶) با روش برنامه‌ریزی پویا به دست آمد که در شکل (۴-۸) نشان داده شده است و ارزش آن ۶+ است. محدوده نهایی به دست آمده در روش برنامه‌ریزی پویا برای مدل‌های بلوکی اقتصادی دو بعدی، محدوده بهینه‌ی واقعی است.

-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1
-2	+1	+1	-2	+1	+1	-1	-2	-2	-2
-3	-3	+1	+1	+1	-3	+3	-3	-3	-3
-4	-4	-4	-4	+2	+1	-4	-4	-4	-4
-5	-5	-5	-5	+2	-5	-5	-5	-5	-5

شکل ۴-۸ - محدوده نهایی به دست آمده با استفاده از برنامه‌ریزی پویا

پ- محدوده نهایی بهینه با روش الگوریتم رقابت استعماری

برنامه‌ی کامپیوتری الگوریتم رقابت استعماری برای این مدل بلوکی با توجه به فرضیات عنوان شده، اجرا شد. برای اجرای این برنامه ابتدا مدل بلوکی اقتصادی به شکل یک ماتریس 5×10 که با ماتریس A نشان داده شده، در آمد.

$$A = \begin{bmatrix} -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 \\ -2 & +1 & +1 & -2 & +1 & +1 & -1 & -2 & -2 & -2 \\ -3 & -3 & +1 & +1 & +1 & -3 & +3 & -3 & -3 & -3 \\ -4 & -4 & -4 & -4 & +2 & +1 & -4 & -4 & -4 & -4 \\ -5 & -5 & -5 & -5 & +2 & -5 & -5 & -5 & -5 & -5 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

سپس این ماتریس به عنوان داده‌ی ورودی به برنامه داده شد و پس از اجرای برنامه خروجی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. خروجی‌های برنامه، شامل: جمعیت اولیه، ارزش هر کشور از جمعیت اولیه، امپراطوری‌های هر مرحله اجرای الگوریتم، استعمارگران و کلونی‌های آنها و بهترین استعمارگر و ارزش آن در هر مرحله، در پیوست ۱ به تفصیل آورده شده است.

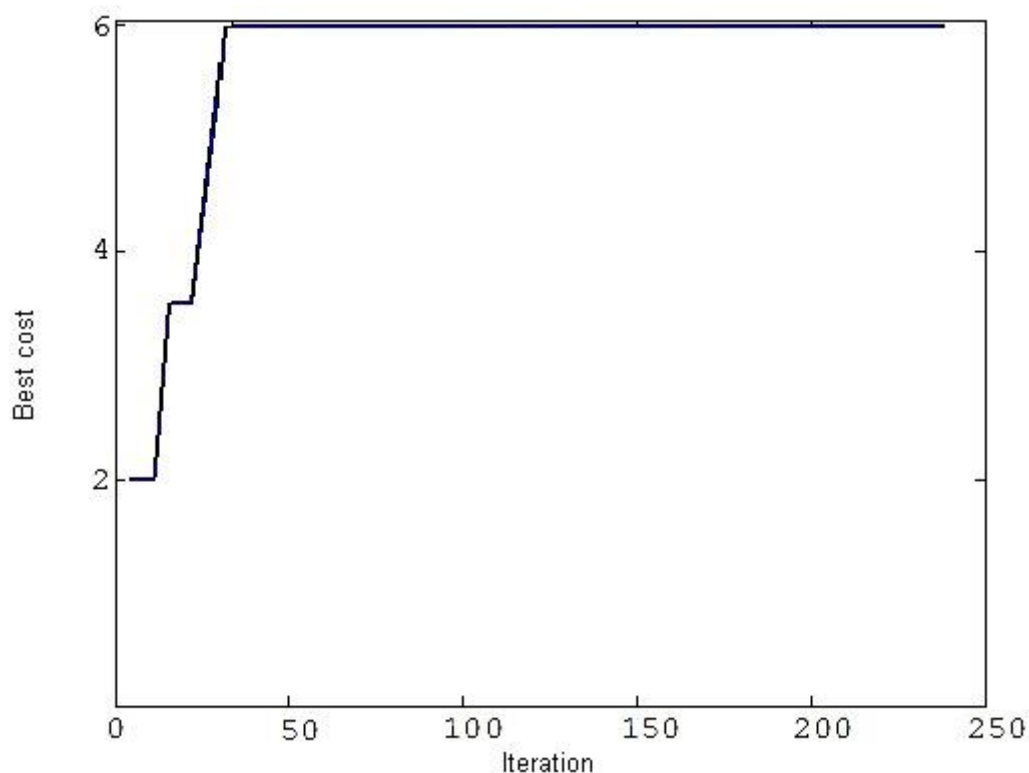
ماتریس زیر نشان دهنده‌ی پاسخ بهینه‌ی حاصل از ۲۵۰ مرتبه اجرای الگوریتم توسط برنامه کامپیوتری است. ارزش محدوده‌ی متناظر نیز که توسط نرم افزار محاسبه شده در ادامه آمده است.

$$Imp.Position = [2 \quad 2 \quad 1 \quad 4 \quad 2 \quad 0 \quad 1 \quad 1] \quad (4-4)$$

$$Imp.Cost = 6$$

شکل (۹-۴) نیز بیانگر بهترین پاسخ بدست آمده در هر مرحله اجرای الگوریتم توسط نرم افزار است. همانطور که در نمودار مشخص است، برنامه پس از حدود ۴۰ اجرا موفق به یافتن محدوده نهایی بهینه شده است. محدوده‌ی نهایی بهینه به دست آمده توسط این روش نیز در شکل (۱۰-۴) نمایش داده شده است.

برنامه‌ی نوشته شده بر پایه‌ی الگوریتم رقابت استعماری در حل مسأله‌ی بهینه‌سازی محدوده نهایی موفق عمل کرد و توانست محدوده‌ی بهینه‌ای را پیدا کند که کاملاً بر محدوده‌ی بهینه‌ی نهایی واقعی منطبق است.



شکل ۹-۴- نمودار نزدیک شدن بهترین پاسخ در هر اجرا به پاسخ نهایی

-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1
-2	+1	+1	-2	+1	+1	-1	-2	-2	-2
-3	-3	+1	+1	+1	-3	+3	-3	-3	-3
-4	-4	-4	-4	+2	+1	-4	-4	-4	-4
-5	-5	-5	-5	+2	-5	-5	-5	-5	-5

شکل ۱۰-۴- محدوده نهایی به دست آمده با استفاده از ICA

۴-۳- برنامه‌ریزی تولید معادن روباز با استفاده از ICA

برای محاسبه کردن برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز با الگوریتم رقابت استعماری، ابتدا باید معیاری برای این امر تعریف شده و سپس بر مبنای معیار تعریف شده این مسأله پاسخ داده شود.

۴-۳-۱- بررسی معیارها و انتخاب معیار مناسب

پس از بررسی روش‌های مختلف برنامه‌ریزی تولید، این نتیجه حاصل شد که برای برنامه‌ریزی بلند مدت، از سه معیار می‌توان استفاده کرد (میرزایی، ۱۳۸۱):

- ۱- جدا کردن با ارزش‌ترین فاز به عنوان فاز اول و ادامه این روند تا فازبندی کامل محدوده.
 - ۲- جدا کردن کم ارزش‌ترین فاز به عنوان فاز آخر و ادامه این روند تا فازبندی کامل محدوده.
 - ۳- جدا کردن هم‌زمان فازها بر مبنای NPV.
- از سه معیار گفته شده، معیار سوم معیار اصلی بوده و در صورت استفاده مناسب، پاسخ بهینه را خواهد یافت. ولی به هنگام استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری، به خاطر ماهیت بررسی لحظه‌ای این روش‌ها، در عمل نیاز به روش‌های تصحیح و نرمال سازی برای رسیدن به پاسخ خواهد بود که این امر از کارایی این روش‌ها کاسته و عملاً برتری این روش‌ها را نسبت به دیگر روش‌ها را از بین خواهد برد (میرزایی، ۱۳۸۱).

در این تحقیق از روشی که بر مبنای روش گرشون طراحی شده، استفاده شده است. البته روش گرشون بر مبنای مدل بلوکی عیاری کار می‌کند که در اینجا برای راحتی مقایسه‌ی روش‌ها، این روش به استفاده از ارزش اقتصادی بلوک‌ها تعمیم داده شده است. هدف این روش حداکثر سازی ارزش خالص فعلی است که انجام آن مستلزم استخراج بلوک‌های با ارزش بیشتر در سال‌های اولیه است. لذا در اینجا از معیار اول یعنی جدا کردن با ارزش‌ترین فاز به عنوان فاز اول و ادامه این روند تا فازبندی

کامل محدوده، استفاده شده است. برای انجام این کار ابتدا با توجه به مطالب بخش قبل، محدوده‌ی نهایی بهینه محاسبه شده و سپس عملیات برنامه‌ریزی تولید روی این محدوده انجام می‌شود. در ابتدا با توجه به محدودیت‌های استخراج شامل شیب مجاز دیواره و ظرفیت استخراج سالانه، تعداد مشخصی بلوک که دارای بیشترین ارزش هستند انتخاب و استخراج می‌شوند. این عمل مجدداً برای بلوک‌های باقی مانده‌ی محدوده انجام میشود و آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا هیچ بلوکی در محدوده باقی نماند. همچنین باید به این نکته توجه شود که تعداد بلوک‌های انتخاب شده در هر فاز به همراه بلوک‌هایی که در مخروط استخراجی آنها قرار می‌گیرد ملاک محاسبه‌ی ظرفیت استخراج سالانه است.

۴-۳-۲- مدل ارائه شده برای برنامه‌ریزی تولید

در ابتدا برای مدل کردن این مسأله و حل آن توسط الگوریتم رقابت استعماری لازم است مفهومی به نام "بلوک کاندیدا" توضیح داده شود. همچنین تابع هدف در این مسأله جدا کردن تعداد معینی بلوک، مطابق با محدودیت‌های از پیش طراحی شده مسأله، می‌باشد که دارای ارزش بیشینه باشند.

بلوک کاندیدا

بلوک کاندیدا بلوکی است که مطابق با فرضیات و محدودیت‌های مسأله برنامه‌ریزی تولید، قابلیت استخراج در فاز مورد نظر را دارد. به عنوان مثال اگر محدودیت مسأله، استخراج ۴ بلوک در هر دوره‌ی زمانی مدنظر باشد، بلوک کاندیدا بلوکی است که حداکثر دارای ۴ بلوک در مخروط استخراجی خود باشد.

به عنوان مثال در مدل بلوکی شکل (۴-۱۰)، در محدوده‌ی نهایی بهینه مشخص شده در بخش قبل، با توجه به محدودیت استخراج ۴ بلوک در هر بازه زمانی، به جز بلوک شماره ۱۹، تمامی بلوک‌ها، بلوک کاندیدا هستند. همانطور که ملاحظه می‌شود در مخروط استخراجی تمامی بلوک‌های واقع در

محدوده حداکثر ۴ بلوک جای دارد به جز بلوک ۱۹ که در مخروط استخراجی خود ۹ بلوک دارد که محدودیت را نقض می‌کند.

۱ -۱	۲ +۱	۳ +۱	۴ -۱	۵ -۱	۶ -۱	۷ -۱
۸ -۱	۹ -۱	۱۰ -۱	۱۱ -۱	۱۲ +۲	۱۳ +۱	۱۴ -۱
۱۵ -۱	۱۶ -۱	۱۷ +۲	۱۸ -۱	۱۹ +۳	۲۰ -۱	۲۱ -۱
۲۲ -۱	۲۳ -۱	۲۴ -۱	۲۵ +۱	۲۶ -۱	۲۷ -۱	۲۸ -۱

شکل ۱۱-۴- مدل بلوکی به همراه محدوده‌ی بهینه نهایی مشخص شده

۴-۳-۳- مدل کردن تابع هدف برای الگوریتم

الف- ایجاد جمعیت اولیه

همانند مدل ارائه شده برای محدوده نهایی، در اینجا نیز برای تعریف کشورها از یک آرایه استفاده می‌شود. طول این آرایه به تعداد ستون‌های دارای بلوک کاندیدا در هر فاز بستگی دارد. یعنی برای هر ستون در مدل بلوکی، که دارای بلوک کاندیدا باشد یک عدد در آرایه اختصاص داده می‌شود. همانند بخش قبل در اینجا نیز در هر جایگاه آرایه یک عدد صحیح قرار خواهد گرفت که در حقیقت گویای این است که چندمین بلوک کاندیدای آن ستون به عنوان بلوک مورد نظر برای استخراج برگزیده شده است.

برای درک بهتر اگر شکل (۴-۱۰) در نظر گرفته شود، آرایه‌ی معرف کشورها در الگوریتم دارای ۶ عضو خواهد بود. در جایگاه‌های اول، دوم و ششم چون ستون متناظر دارای یک بلوک کاندیدا است دو

حالت صفر و یک قرار خواهد گرفت، در جایگاه‌های سوم تا پنجم آرایه نیز چون دو بلوک کاندیدا داریم اعداد صفر، یک و دو قرار خواهد گرفت. شکل (۴-۱۱) یک کشور تصادفی مجاز برای مدل بلوکی شکل (۴-۱۰) است.

۰	۰	۱	۲	۰	۱
---	---	---	---	---	---

شکل ۴-۱۲- کشور تصادفی مدل شده برای مدل بلوکی شکل ۴-۱۰

در این مرحله با توجه به آرایه‌ی معرف کشورهای تولید شده، هر کشور در مدل بلوکی عبارت است از مجموع بلوک‌هایی که در مخروط استخراجی بلوک‌های کاندیدای آن کشور قرار می‌گیرد.

ب- تابع هزینه

برای انجام رقابت استعماری نیاز به تابعی است که بر مبنای آن کشورها با یکدیگر به رقابت استعماری بپردازند. در این مسأله این تابع ارزش مجموع بلوک‌هایی است که در مخروط استخراجی بلوک‌های تشکیل دهنده‌ی کشور وجود دارد. همانطور که پیشتر گفته شد، هرچه این مقدار بیشتر باشد، کشور مورد نظر قدرتمندتر است. هدف نهایی الگوریتم یافتن قدرتمندترین کشور ممکن در هر فاز استخراج است.

پ- بهینه‌سازی با کمک الگوریتم

مراحل دیگر اجرای الگوریتم دقیقا مشابه حل مسأله‌ی محدوده‌ی بهینه‌ی نهایی است که در بخش قبل به تفصیل مورد بحث قرار گرفت.

ت- اعمال محدودیت‌های مسأله بر روی کشورهای تولید شده

دو محدودیت عمده‌ای که این مسأله با آن روبرو است، محدودیت شیب و محدودیت ظرفیت استخراج است. در مورد محدودیت شیب باید گفت که استخراج مخروط استخراجی هر بلوک، در حقیقت پاسخی برای این محدودیت است. به این صورت این محدودیت در شکل نوع مدل تأمین شده است.

اما برای پاسخ به محدودیت ظرفیت استخراج دو راهکار وجود دارد.

راهکار اول آن است که پس از تولید هر کشور تعداد بلوک‌های آن شمرده شده و در صورت تجاوز از محدودیت، آن کشور حذف شود. اما این راهکار ایرادات عمده‌ای دارد. ایراد اول این است که در صورت اجرای این راهکار احتمال ایجاد پاسخ‌های بهینه‌ی محلی با حذف تعدادی از کشورها و کم شدن جمعیت کشورهای رقابت کننده در الگوریتم افزایش می‌یابد. همچنین ممکن است در طی این اجرای این راهکار، با حذف کشورهای نزدیک به نقطه‌ی بهینه واقعی، عملاً مسیر بهینه‌سازی مختل شده پاسخ حاصله از بهینه‌ی واقعی فاصله داشته باشد.

اما راهکار دوم این است که با اعمال مفاهیمی همچون جریمه و پاداش در الگوریتم، کشورها به حرکت به سمت ارضای محدودیت تشویق شوند. به این صورت که اگر تعداد بلوک‌های کشوری از محدودیت مورد نظر مسأله بیشتر بود، قدرت کشور در عددی بین ۰ و ۱ ضرب شود تا کوچکتر گردد، اگر تعداد بلوک‌ها کمتر از تعداد مورد نظر بود، قدرت کشور تغییری نمی‌کند و اگر تعداد این بلوک‌ها دقیقاً برابر با تعداد مورد نظر بود، قدرت کشور در عددی بین ۱ و ۲ ضرب گردد تا بزرگتر شود. در نهایت این مقدار به دست آمده، به عنوان قدرت محاسبه شده‌ی کشورها در اجرای الگوریتم در نظر گرفته می‌شود.

این کار باعث میشود تا شانس حرکت الگوریتم به سمت نقطه‌ی بهینه‌ای که محدودیت را ارضا میکند افزایش یابد. انتخاب ضرایب عددی برای پاداش و جریمه به دید مهندسی کاربر از مسأله بستگی دارد و بسته به ابعاد مسأله متغیر است. ممکن است با تغییر این ضرایب پاسخ به دست آمده متفاوت شود.

ث- پایان اجرای الگوریتم

پس از هربار اجرای کامل الگوریتم و به دست آمدن پاسخ بهینه، بلوک‌های متناظر استعمارگر نهایی از مدل بلوکی حذف می‌شود و الگوریتم از ابتدا برای بلوک‌های باقی مانده اجرا می‌شود. این فرآیند تا زمانی که هیچ بلوکی در محدوده‌ی بهینه‌ی نهایی موجود نباشد ادامه می‌یابد. ترتیب استعمارگران برتر نهایی به دست آمده در واقع همان برنامه‌ریزی تولید بهینه‌ای است که هدف طرح این مسأله بود. در مورد مدل بلوکی شکل (۴-۱۰) که در این بخش به عنوان مثال مطرح شد، پس از هربار اجرای الگوریتم و پیدا کردن استعمارگر برتر نهایی، این استعمارگر به عنوان محدوده‌ی انتخاب شده برای استخراج در آن فاز، در جدول (۴-۴) ثبت شده است.

جدول ۴-۴- استعمارگر برتر به دست آمده در هر فاز

فاز اجرای الگوریتم	ارزش محدوده‌ی به دست آمده	آرایه‌ی نظیر استعمارگر برتر						
۱	صفر	<table><tr><td>۱</td><td>۱</td><td>۰</td><td>۰</td><td>۱</td><td>۱</td></tr></table>	۱	۱	۰	۰	۱	۱
۱	۱	۰	۰	۱	۱			
۲	+۱	<table><tr><td>۰</td><td>۰</td><td>۰</td><td>۲</td><td>۱</td><td>۰</td></tr></table>	۰	۰	۰	۲	۱	۰
۰	۰	۰	۲	۱	۰			
۳	+۲	<table><tr><td>۰</td><td>۰</td><td>۱</td><td>۱</td><td>۰</td><td>۰</td></tr></table>	۰	۰	۱	۱	۰	۰
۰	۰	۱	۱	۰	۰			

با این فرض که نرخ بهره ۳۰ درصد باشد، مقدار NPV برای این برنامه‌ریزی تولید نیز در ادامه محاسبه شده است.

$$NPV = \frac{0}{(1.3)^1} + \frac{+1}{(1.3)^2} + \frac{+2}{(1.3)^3} = +1.5 \quad (۴-۵)$$

۴-۳-۴- پارامترهای کنترل کننده

پارامترهایی که عملکرد این الگوریتم را در این دو مسأله کنترل می کنند عبارتند از:

۱- اندازه‌ی جمعیت اولیه

۲- تعداد استعمارگرها

۳- احتمال جذب

۴- احتمال انقلاب

۵- نرخ پاداش و جریمه

۴-۳-۵- نتایج برنامه کامپیوتری و مقایسه با روش های دیگر

برای بررسی کارآمدی این الگوریتم در حل مسأله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید، یک برنامه‌ی کامپیوتری در محیط نرم افزار MATLAB نوشته شد. ورودی این برنامه شامل دو ماتریس $m \times n$ است. ماتریس اول مانند بخش قبل ماتریسی است که درایه‌های آن، ارزش اقتصادی بلوک‌های مدل بلوکی اقتصادی است و ماتریس دوم ماتریسی است که در آن درایه‌های متناظر با بلوک‌هایی که درون محدوده‌ی بهینه‌ی نهایی قرار دارند، برابر ۱ و باقی درایه‌ها برابر صفر هستند. در حقیقت ماتریس دوم با توجه به خروجی برنامه‌ی نوشته شده برای بخش قبل بدست می‌آید. کاربرد این ماتریس صرفاً برای این است که تنها بلوک‌هایی که در محدوده‌ی بهینه‌ی نهایی قرار دارند، در برنامه‌ریزی تولید لحاظ شوند.

ابتدا دو ماتریس شرح داده شده به عنوان ورودی به برنامه داده می‌شود. برنامه با در نظر گرفتن محدودیت‌های مسأله و فرآیند شرح داده شده در این بخش، قدرتمندترین کشور را پیدا میکند. این کشور در حقیقت همان محدوده‌ی مجازی است که با توجه به محدودیت‌های مسأله دارای بیشترین ارزش اقتصادی است. سپس این محدوده استخراج (از مدل بلوکی اقتصادی حذف) می‌شود و برنامه

دوباره با مدل بلوکی اقتصادی جدید اجرا می‌شود. این عمل آنقدر ادامه می‌یابد تا هیچ بلوک استخراج نشده‌ای در محدوده‌ی نهایی بهینه باقی نماند. قدرتمندترین کشور به دست آمده در هر مرحله، همان محدوده‌ای است که در آن فاز باید استخراج شود و ترتیب این محدوده‌ها، برنامه‌ریزی تولید مورد نظر مسأله است. در پایان برنامه با توجه به فرضیات مسأله NPV را محاسبه کرده و به همراه فازبندی استخراج بلوک‌ها به عنوان خروجی در اختیار می‌گذارد.

مدل بلوکی اقتصادی شکل (۴-۱۲) برای بررسی برنامه‌ی کامپیوتری مورد استفاده قرار گرفته است. فرضیات زیر نیز به عنوان فرضیات مسأله در نظر گرفته شده است.

جمعیت اولیه	:	۱۰
استعمارگران	:	۳
احتمال جذب	:	۰/۱۵
احتمال انقلاب	:	۰/۳
تعداد تکرار	:	۵۰
محدودیت استخراج سالانه	:	۴
شیب مجاز دیواره	:	۴۵°
نرخ بهره	:	۲۰٪

الف- برنامه‌ریزی تولید با روش گرشون

ابتدا برنامه ریزی تولید برای محدوده‌ی بهینه نهایی مدل بلوکی اقتصادی شکل (۴-۱۲) با روش گرشون و با در نظر گرفتن محدودیت استخراج سالانه ۴ بلوک و شیب مجاز دیواره ۴۵ درجه به صورت دستی محاسبه شد. برای اینکار از ارزش اقتصادی بلوک‌ها به جای عیار استفاده شد. روش کار به این صورت است که با در نظر گرفتن محدودیت‌های استخراج، ۴ بلوک که مجموعاً دارای ارزش اقتصادی بیشتری هستند در فاز اول قرار گرفته و از مدل بلوکی حذف می‌شوند. سپس این عمل بار

دیگر برای بلوک‌های باقی‌مانده انجام می‌شود. اینکار تا زمانی که هیچ بلوکی در محدوده‌ی بهینه‌ی نهایی باقی نماند ادامه پیدا می‌کند. ترتیب فازهای استخراج شده، برنامه‌ریزی تولید مورد نظر مسأله است.

-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1
-2	+1	+1	-2	+1	+1	-1	-2	-2	-2
-3	-3	+1	+1	+1	-3	+3	-3	-3	-3
-4	-4	-4	-4	+2	+1	-4	-4	-4	-4
-5	-5	-5	-5	+2	-5	-5	-5	-5	-5

شکل ۴-۱۳- محدوده‌ی نهایی مدل بلوکی اقتصادی فرضی

نتیجه‌ی برنامه‌ریزی تولید با روش گرشون در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است. در این شکل اعداد بلوک‌های مدل بلوکی نشانگر فاز استخراج بلوک است. همچنین در ادامه ارزش فازهای استخراجی به تفصیل ارائه شده است.

3	1	3	2	1	2	2	1	1	-
-	4	3	4	3	2	5	5	-	-
-	-	4	5	4	6	5	-	-	-
-	-	-	-	6	6	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

شکل ۴-۱۴- برنامه‌ریزی تولید با روش گرشون برای مدل بلوکی فرضی

فازهای استخراجی یک تا شش به ترتیب دارای ارزش‌های اقتصادی +۴، صفر، صفر، +۱، +۱ و صفر هستند. NPV حاصل با نرخ بهره ۳۰ درصد این برنامه‌ریزی تولید نیز در ادامه محاسبه شده است.

$$NPV = \frac{+4}{(1.3)^1} + \frac{0}{(1.3)^2} + \frac{0}{(1.3)^3} + \frac{+1}{(1.3)^4} + \frac{+1}{(1.3)^5} + \frac{0}{(1.3)^6} = 3.7 \quad (۴-۶)$$

ب- برنامه‌ریزی تولید با روش ICA

برنامه‌ی کامپیوتری الگوریتم رقابت استعماری برای این مدل بلوکی اقتصادی با توجه به فرضیات عنوان شده، اجرا شد. برای اجرای این برنامه ابتدا مدل بلوکی اقتصادی به شکل ماتریس A و محدوده‌ی بهینه‌ی نهایی به دست آمده از بخش قبل به صورت ماتریس B، به عنوان ورودی به برنامه داده شد. برنامه به گونه‌ای طراحی شده است که ابتدا تمام بلوک‌های کاندیدا را در نظر می‌گیرد، سپس با توجه به این بلوک‌های کاندیدا و تعداد کل کشورهای ممکن، جمعیت اولیه‌ی را تولید می‌کند. در این مرحله، برنامه قدرت کشورهای تولید شده، که معادل ارزش اقتصادی بلوک‌های نظیر اعضای آرایه‌ی معرف کشورها به همراه ارزش بلوک‌های واقع در مخروط استخراجی آنها است را محاسبه می‌کند.

در مرحله بعد برنامه تعداد بلوک‌های موجود در محدوده‌ی استخراجی هر کشور را شمارش می‌کند. در صورتی که تعداد این بلوک‌ها بیشتر از ۴ عدد باشد، قدرت کشور در عدد ۰/۵ ضرب می‌شود و در صورتی که تعداد بلوک‌ها برابر ۴ باشد، قدرت در عدد ۱/۵ ضرب می‌شود. کشورهایی که تعداد بلوک‌های آنها کمتر از چهار باشد تغییر قدرتی نخواهند داشت.

سپس برنامه اقدام به اجرای الگوریتم رقابت استعماری روی این کشورها می‌کند و در هر مرحله پس از اجرای فرآیندهای جذب و انقلاب و تولید کشورهای جدید موارد بالا را برای محاسبه‌ی قدرت کشورها انجام می‌دهد. در انتها استعمارگر برتر به عنوان اولین فاز برنامه‌ی تولید نشان داده شده و درایه‌های متناظر آن در ماتریس B به صفر تغییر داده می‌شود.

در این مرحله این برنامه بار دیگر از ابتدا با مقادیر جدید برای ماتریس B اجرا می‌شود. این کار تا زمانی که تمام درایه‌های ماتریس B صفر شود ادامه پیدا می‌کند. در نهایت استعمارگر برتر هر اجرا به

ترتیب چاپ می‌شود. این ترتیب استعمارگران برتر همان برنامه‌ریزی تولید برای محدوده‌ی نهایی مورد نظر است.

$$A = \begin{bmatrix} -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 \\ -2 & +1 & +1 & -2 & +1 & +1 & -1 & -2 & -2 & -2 \\ -3 & -3 & +1 & +1 & +1 & -3 & +3 & -3 & -3 & -3 \\ -4 & -4 & -4 & -4 & +2 & +1 & -4 & -4 & -4 & -4 \\ -5 & -5 & -5 & -5 & +2 & -5 & -5 & -5 & -5 & -5 \end{bmatrix} \quad (۷-۴)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۸-۴)$$

در نهایت برای این مثال برنامه پس از ۶ بار تکرار الگوریتم، فاز استخراج تمامی بلوک‌های موجود در محدوده‌ی بهینه نهایی را مشخص کرد. شکل (۱۴-۴) نشان دهنده‌ی فازهای استخراج مربوط به هر بلوک است.

4	1	4	2	1	2	1	1	2	-
-	4	4	5	2	3	3	3	-	-
-	-	5	5	5	6	3	-	-	-
-	-	-	-	6	6	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

شکل ۴-۱۵- برنامه‌ریزی تولید با روش ICA برای مدل بلوکی فرضی

فازهای استخراجی یک تا شش به ترتیب دارای ارزش‌های اقتصادی ۴+، صفر، ۱+، صفر، ۱+ و صفر هستند. NPV حاصل این برنامه‌ریزی تولید نیز در ادامه محاسبه شده است.

$$NPV = \frac{+4}{(1.3)^1} + \frac{0}{(1.3)^2} + \frac{+1}{(1.3)^3} + \frac{0}{(1.3)^4} + \frac{+1}{(1.3)^5} + \frac{0}{(1.3)^6} = 3.8 \quad (9-4)$$

لازم به ذکر است که اجراهای متعدد برنامه منجر به تولید پاسخ‌های مختلفی شد که دارای مقادیر NPV متفاوت بود.

به علت ماهیت نوع تعریف کشورها در این روش، الگوریتم قادر نیست پاسخ بهینه را به دست آورد، چراکه الگوریتم در هر مرحله از میان کشورها با ارزش‌های مختلف کشوری با بیشترین ارزش را انتخاب می‌کند و توجهی به نتیجه‌ای که این انتخاب در مراحل بعدی خواهد گذاشت ندارد. همچنین الگوریتم در هر مرحله، در صورت وجود دو کشور با ارزش برابر، یکی را به صورت تصادفی انتخاب میکند در حالی که این انتخاب در فازهای بعدی می‌تواند بسیار تاثیر گذار باشد.

به طور کلی در صورت استفاده از این روش برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید، پیشنهاد می‌شود برنامه به دفعات اجرا شده و نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه شوند و در انتها پاسخی که بیشترین مقدار NPV را بدست آورد به عنوان پاسخ بهینه ارائه شود.

۴-۴- جمع بندی

در این فصل سعی شد تا روش‌هایی برای تبدیل مسائل "محدوده نهایی بهینه" و "برنامه‌ریزی تولید" به مسائلی قابل حل برای الگوریتم ICA و سپس حل آنها با استفاده از این الگوریتم ارائه شود. در هر بخش مثال‌هایی ساده برای بررسی کارایی الگوریتم ارائه و پاسخ‌ها توسط الگوریتم، بهینه‌سازی شد. در انتهای هر بخش مثال دیگری ارائه و توسط برنامه‌ی کامپیوتری تهیه شده، مورد بررسی قرار گرفت. پس از بررسی پاسخ‌ها و مقایسه‌ی آنها با مقادیر به دست آمده از روش‌های دیگر این نتیجه به دست

آمد که مقادیر بدست آمده از این روش، برای بهینه‌سازی محدوده نهایی تا حد زیادی قابل قبول است. اگرچه روش پیشنهادی این تحقیق برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید چنان که باید موفق ظاهر نشد و نتوانست انتظارات را برآورده کند.

۵ فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری

الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند اگرچه دارای ضعف‌های زیادی هستند، اما مهمترین مزیت آنها دید کل نگر و سرعت نزدیک شدن به پاسخ بهینه است. الگوریتم رقابت استعماری نیز به عنوان یک الگوریتم هوشمند از این امر مستثنا نیست. از این رو استفاده از این الگوریتم در بهینه‌سازی مسائلی همچون "محدوده نهایی" و "برنامه‌ریزی تولید"، که به علت وابستگی به عوامل اقتصادی، بسیار متغیر هستند، امری اجتناب ناپذیر است. چراکه به علت ماهیت منعطف و سریع آن، در صورت ایجاد تغییرات در متغیرها می‌توان به سرعت پاسخ‌های بهینه‌ی جدید تولید کرد. همچنین انعطاف پذیری زیاد این الگوریتم در برخورد با مسائل مختلف به کاربر این امکان را می‌دهد تا با کسب تجربه و دستکاری پارامترهای کنترل، پاسخ‌های بهتری تولید کند.

با استفاده از این روش برای بهینه‌سازی "محدوده نهایی" و "برنامه‌ریزی تولید"، کاربر امکان مانور بیشتری بر روی فرضیات مسأله و اعمال محدودیت‌ها روی آن دارد.

نتایج به دست آمده برای مسأله بهینه‌سازی محدوده نهایی با روش ICA با پاسخ‌های به دست آمده از روش‌های مخروط شناور و برنامه‌ریزی پویا مقایسه شد. الگوریتم در این بخش موفق شد پاسخی بهتر از روش مخروط شناور به دست آورد. همچنین پاسخ الگوریتم کاملاً منطبق با پاسخ بدست آمده از روش برنامه‌ریزی پویا بود که در مورد مدل‌های بلوکی دو بعدی، پاسخ بهینه‌ی واقعی است. بنابراین الگوریتم رقابت استعماری در حل مسأله‌ی بهینه‌سازی محدوده نهایی، موفق عمل کرده و می‌تواند پاسخ بهینه را بدست آورد.

نتایج به دست آمده برای مسأله برنامه‌ریزی تولید با روش ICA، نزدیک به پاسخ‌های به دست آمده با دیگر روش‌ها است. اما الگوریتم در این بخش نتوانست قابل قبول ظاهر شود و نیازمند بررسی بیشتر در این زمینه است.

مزیت استفاده از ICA در برنامه‌ریزی تولید این است که به علت سهولت کار، می‌توان الگوریتم را به دفعات متعدد برای تولید پاسخ اجرا کرد و در نهایت از میان پاسخ‌های ایجاد شده بهترین را برگزید. در مورد هر دو مسأله بهینه‌سازی "محدوده نهایی" و "برنامه‌ریزی تولید"، می‌توان الگوریتم را به صورت سالانه، ماهانه، روزانه و یا هر دوره‌ی زمانی مدنظر با تغییر در شرایطی چون شرایط اقتصادی، اجرا و روند معدنکاری را متناسب با پاسخ‌های جدید اصلاح کرد.

ماهیت ICA مانند دیگر روش‌های بهینه‌سازی هوشمند به گونه‌ای است که تضمین نمی‌کند پاسخ بهینه را دقیقاً پیدا کند. ولی اگر این الگوریتم به درستی به کار برده شود و پارامترهای مؤثر در آن به طور دقیق انتخاب شوند، پاسخ‌های به دست آمده تا حد قابل قبولی به پاسخ بهینه واقعی نزدیک است.

به علت ماهیت تولید تصادفی پاسخ‌ها در الگوریتم ICA، پاسخ‌های تولید شده در اجراهای متعدد الگوریتم با یکدیگر متفاوت است. اما در صورت انتخاب درست پارامترهای مؤثر، این پاسخ‌ها تا حد قابل قبولی به یکدیگر نزدیک می‌شوند.

۵-۲- پیشنهادات

با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق و مقایسه‌ی نتایج با دیگر روش‌ها پیشنهادات زیر برای افزایش کارایی این الگوریتم در بهینه‌سازی "محدوده نهایی" و "برنامه‌ریزی تولید" ارائه می‌شود.

ارائه‌ی روشی برای بررسی مدل‌های بلوکی اقتصادی سه بعدی با ICA.

بررسی تاثیر تغییرات در پارامترهای کنترل مسأله بر روی پاسخ‌های بهینه نهایی.

بررسی تاثیر عدم قطعیت داده‌ها بر روی پاسخ‌های بهینه نهایی در اجراهای مختلف الگوریتم.

بررسی و ایجاد روشی برای حل فازی مسائل بهینه‌سازی "محدوده نهایی" و "برنامه‌ریزی تولید" با کمک ICA.

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.
- اصلانو، م. (۱۳۸۴)، «اهمیت برنامه ریزی تولید بلند مدت در معادن روباز»، دومین کنفرانس معادن روباز ایران.
- اقدسی فام، م، بکران گیلان ده، ف، جمیری، ع. (۱۳۹۰)، «حل مساله درخت پوشای کمینه با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری»، اولین کنفرانس ملی دانش پژوهان کامپیوتر و فناوری اطلاعات.
- الهی زینی، ا، جلالی، م، ا، کاکائی، ر. (۱۳۹۰)، «ارائه الگوریتم جستجوگر ستونی برای تعیین محدوده بهینه معادن روباز»، نشریه علمی - پژوهشی مهندسی معدن، دوره ششم - شماره دوازدهم، صفحه ۹۶ - ۸۷.
- حسینی، م، ع. (۱۳۸۷)، پایان نامه کارشناسی ارشد: «تعیین محدوده بهینه‌ی نهایی و برنامه‌ریزی تولید آنومالی A سنگ آهن سنگان»، دانشکده معدن نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- کاکائی، ر. (۱۳۸۳)، «طراحی محدوده بهینه نهایی در معادن روباز با روش مخروط شناور دو و مقایسه آن با روش لرج و گروسمن»، اولین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، صفحه ۴۶۶ - ۴۵۱.
- کاکائی، ر. (۱۳۸۴)، «بررسی روش‌های مختلف طراحی محدوده بهینه نهایی در معادن روباز»، مجله علوم و فنون دانشگاه صنعتی شاهرود، شماره‌های ششم و هفتم، صفحه ۳۱ - ۱۹.
- کاکائی، ر. (۱۳۸۶)، «طراحی محدوده بهینه نهایی در معادن روباز با روش‌های اصلاح شده‌ی مخروط شناور دو»، نشریه دانشکده فنی، دانشگاه تهران، جلد ۴۱، شماره ۳، صفحه ۳۰۷ - ۲۹۷.
- کاکائی، ر. (۱۳۹۲)، «استخراج روباز پیشرفته»، جزوه درسی دوره کارشناسی ارشد، دانشکده معدن نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- رافعی، ش، ا. (۱۳۹۳)، «مسیر دسترسی بهینه به نقاط اصلی معدن با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری»، سمینار کارشناسی ارشد، دانشکده معدن نفت و ژئوفیزیک.
- رزمجو، ب. (۱۳۹۳)، پایان نامه کارشناسی ارشد: «برنامه‌ریزی تولید کانسارهای سنگ آهن مروارید زنجان»، دانشکده معدن نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- عظیمی، ع. (۱۳۸۹)، پایان نامه کارشناسی ارشد: «تعیین محدوده نهایی معادن روباز با کمک روش بهینه‌سازی الگوریتم کلونی مورچگان»، دانشکده معدن نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- عظیمی، ع، کاکائی، ر. (۱۳۸۸)، «معرفی یک مکانیزم جدید در بهینه‌سازی به روش کولونی مورچگان»، چهارمین کنفرانس ریاضی کشور، تهران، دانشگاه صنعتی شریف.

- عظیمی، ع، کاکائی، ر. (۱۳۸۸)، «مدل‌سازی بلوک‌های اقتصادی یک معدن روباز به منظور تعیین محدوده نهایی با کمک روش بهینه‌سازی کولونی مورچگان»، چهلمین کنفرانس ریاضی کشور، تهران، دانشگاه صنعتی شریف.
- میرزایی نصیر آباد، ح. (۱۳۸۱)، پایان نامه کارشناسی ارشد: «طراحی محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید معادن روباز با استفاده از الگوریتم ژنتیک»، دانشکده معدن نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- میرزایی نصیرآباد، ح، کاکائی، ر. (۱۳۸۴)، «برنامه ریزی تولید معادن روباز با استفاده از الگوریتم ژنتیک»، مجموعه مقالات دومین کنفرانس معادن روباز ایران، صفحه ۶۷-۵۹.
- میرزایی نصیرآباد، ح، کاکائی، ر. (۱۳۸۷)، «طراحی محدوده بهینه نهایی در معادن روباز با استفاده از الگوریتم ژنتیک»، دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تهران.
- Arish, S., Amiri, A., Noori, KH. (2014), **FICA: fuzzy imperialist competitive algorithm**. J Zhejiang Univ-Sci C (Comput & Electron) ,15(5):363-371.
- Atashpaz-Gargari, E., Lucas, C., (2007), **Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition**. IEEE Congress on Evolutionary Computation, 4661-4667.
- Carlson, T. R., Erickson, J. D., O'Brain D. T. and Pana, M. T. (1966), **Computer techniques in mine planning**. Mining Engineering, Vol. 18, No. 5, PP. 53-56.
- Dowd, P. A. (1995), **Bjrkdal gold-mining project, northern Sweden**. Transaction Institution Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry, No. 104, PP. A149-A163.
- Dowd, P. A. and Onur, A. H. (1993), **Open pit optimization - part 1: optimal open pit design**. Transaction Institution Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry, No. 102, PP. A95-A104.
- Gordon, S.T, (1996), **Pit Optimization and Mine Production Scheduling- the way ahead**, Technical Proc, 26th APCOM, 221-228
- Khalokakaie, R., Dowd, P.A. and Fowell, R.J., (2000), **Lerchs-Grossmann algorithm with variable slope angles**. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Vol. 109, A77-A85.
- Koenigsberg, E. (1982), **The optimum contours of an open pit mine: an application of dynamic programming**. Proceedings of the 17th Symposium on the

- application of computers and operations research in the mineral industries (APCOM), (New York: AIME), PP. 247-287.
- Lerchs, H. and Grossmann, I. F., (1965), **Optimum design of open pit mines**, CIM Bulletin, No. 58, p.p. 47-54.
- Seyed Mohammad Ali Hosseini, Reza Kakaie and Mohammad Ataei, (2008), **Long Term Production Scheduling of Open Pit Mines**, A Review of old And New Algorithms , 8th International Scientific Conference on Modern Management of Mine Producing and Environmental Protection (SGEM2008), 15-20, Albena Complex, Bulgaria, PP. 477-485.
- Wilke, F. L. and Wright, E. A. (1984), **Determining the optimal ultimate pit design for hard rock open pit mines using dynamic programming**. Erzmetall, No. 37, PP. 139-144.
- Whittle J. (1989), **The Facts and Fallacies of Open Pit Optimization**. Whittle Programming Pty., Ltd., North Balwyn, Victoria, Australia.
- Wright, E. A. (1999), **MOVING CONE II – A simple algorithm for optimum pit limits design**. Proceedings of the 28th Symposium on the application of computers and operations research in the mineral industries (APCOM),(Colorado USA), pp. 367-374.
- Zhao, Y. and Kim, Y. C. (1992), **A new optimum pit limit design algorithm**. Proceedings of the 23rd Symposium on the application of computers and operations research in the mineral industries (APCOM) (Littleton, Colorado: AIME), PP. 423-434.

پیوست‌ها ۷

پیوست شماره یک

خروجی برنامه نوشته شده در MATLAB برای تعیین محدوده نهایی بهینه

After one Round

Country Position	Country Cost	Select As Imperialist
3 0 1 1 4 1 2 4 2 4	-5	
2 5 5 3 5 4 4 5 3 0	1	
2 3 1 4 2 1 1 1 2 3	3	Yes
0 3 1 3 2 2 4 0 5 3	-10	
1 3 2 2 5 4 5 2 0 0	-7	
2 4 4 5 0 5 2 5 2 1	-3	
2 3 0 2 0 4 0 2 4 0	1	Yes
2 3 5 4 4 3 3 4 2 4	0	
4 2 3 5 5 5 3 0 2 1	-10	
1 2 0 2 1 1 5 1 5 3	-9	
2 0 4 1 2 0 1 4 4 3	0	
3 3 4 3 3 1 5 0 5 0	2	Yes
5 2 0 5 3 0 4 4 5 5	-12	
5 4 1 4 1 4 0 2 0 5	-1	
3 3 4 3 4 5 5 1 4 3	2	Yes
1 5 4 3 3 1 3 0 1 3	1	
5 4 2 1 0 5 0 1 0 0	-7	
5 5 0 1 5 0 2 1 4 4	-3	
4 4 2 4 3 3 0 4 4 5	-8	
2 3 3 3 4 3 4 3 5 3	0	

Imp: [**1**×1 struct]

Col: [1×4 struct]

nCol: 4

Totalcost: 2.1000

Imp: [**2**×1 struct]

Col: [1×4 struct]

nCol: 4

Totalcost: 1.1000

Imp: [**3**×1 struct]

Col: [1×2 struct]

nCol: 2

Totalcost: 1.3000

Imp: [**4**×1 struct]

Col: [1×7 struct]

nCol: 7

Totalcost: 0.1714

After 250 Round

Country Position	Country Cost	Select As Imperialist
1 5 5 3 3 1 2 0 0 2	4	
1 5 5 3 3 1 3 0 0 2	2	
2 3 4 3 2 5 3 1 0 2	4	
1 5 5 3 3 1 3 0 0 2	2	
2 2 4 4 1 5 2 0 0 2	1	
2 3 1 4 2 1 1 1 2 3	3	
0 2 2 1 4 2 0 1 1 0	6	Yes
2 3 1 4 2 1 1 1 2 3	3	
1 5 5 3 3 1 2 0 0 2	4	
1 5 5 3 3 1 3 0 0 2	2	
2 2 4 4 1 5 2 0 0 2	1	
2 2 4 4 1 5 2 0 0 2	1	
1 5 5 3 3 1 2 0 0 2	4	Yes
1 5 5 3 3 1 3 0 0 2	2	
0 2 2 1 4 2 0 1 1 0	6	
2 3 1 4 2 1 1 1 2 3	3	
1 5 5 3 3 0 5 0 0 2	0	
2 3 4 3 2 5 3 1 0 2	4	
0 2 2 1 4 2 0 1 1 0	6	
1 5 5 3 3 1 2 0 0 2	4	

Imp: [1x1 struct]
Col: [1x14 struct]
nCol: 14
Totalcost: 6.5600

Imp: [2x1 struct]
Col: [1x6 struct]
nCol: 6
Totalcost: 4.4000

Iteration: 250
Best cost = 6
Best Position: [0 2 2 1 4 2 0 1 1 0]

Abstract

Since the beginning of modern mining activities by mankind, attention to economic parameters of mining to raise the productivity and profitability of this economic activity was necessary. Reduce the cost of extracting and increase the volume of extraction within the specified time is the best way to increase profits in this field. Because of this, planning for production at a mine seem necessary.

While controlling the geology, economic and technical factor is possible, but to develop a method for control and optimize pit limit and production schedule is impossible. In this study, we tried to use a new Algorithm named Imperialist Competitive Algorithm, to optimize the pit and planning production. Imperialist competitive algorithm is an algorithms inspired from

Cycle of socio-political development of human society is to solve optimization problems. The advantage of this algorithm is easy to understand and achieve optimal response is fast.

Use this method to optimized production planning and final pit limit, which facilitates the production of a computer program and make changes in basic parameters will also be needed. Compared with other algorithms, this method also has problems with variables is more convergence speed.

To optimize these two issues with the Imperialist competitive algorithm, in this study the economic block model was used as input. The number of entries as the initial parameters of the problem of the economic block model selection and optimization operations on them by Imperialist competitive algorithm is applied. Finally, the answers obtained from the imperialist competitive algorithm to optimize the planning of production and final pit limit answers to problems.

Keywords:

Optimization, production planning, the final pit limit, intelligent optimization algorithms, imperialist competitive algorithm.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

**Optimization of final pit limit and production
schedule in open pit mining using imperialist
competitive algorithm**

Shahab Rafei

Supervisors:

Dr. Mohammad Ataei

Dr. Reza Khalokakaie

Advisor:

Dr. Ramin Rafiee

Feb 2016