

تعیین عیار حد بهینه معادن روباز با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

رامین رفیعی*^۱، محمد عطایی^۲، آذرفر^۳

- ۱- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
 ۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
 ۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود

(دریافت: بهمن ۱۳۹۳، پذیرش: خرداد ۱۳۹۵)

چکیده

هدف اساسی برنامه‌ریزی تولید بلند مدت، اتخاذ تدابیری جهت اجرای عیارهای حد استخراجی و برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت است. یکی از مهمترین پارامترها در طراحی معادن روباز، تعیین عیار حد بهینه است. عیار حد بهینه منجر به بیشینه نمودن سود و یا بیشینه نمودن ارزش خالص فعلی می‌شود. بیشینه نمودن ارزش خالص فعلی که در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است، یک مساله برنامه‌ریزی غیرخطی است. لین برای تعیین عیار حد بهینه با احتساب عواملی همچون ظرفیت‌های هر یک از قسمت‌های مختلف معدن (ظرفیت‌های استخراج از معدن، کارخانه تغلیظ، کارخانه تصفیه و بازار)، ارزش زمانی پول و توزیع عیار کانسار، الگوریتم خود را ارایه داده است. روند محاسبه عیار حد با استفاده از الگوریتم لین بسیار طولانی است. در این مقاله به منظور تعیین عیار حد بهینه از روش الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری، که در رده الگوریتم‌های هوشمند قرار می‌گیرد، استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تعیین عیار حد با استفاده از این روش از دقت و سرعت بالایی برخوردار است.

کلید واژه‌ها

عیار حد، عیار حد بهینه، بهینه‌سازی، ارزش خالص فعلی، الگوریتم رقابت استعماری

ارجاع به این مقاله:

رفیعی، ر.، عطایی، م.، آذرفر، الف. (۱۳۹۵)، تعیین عیار حد بهینه معادن روباز با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۶(۱۱)، ۸۹-۹۹.

۱- مقدمه

نهایت با یک روش گرافیکی یکی از این شش عیار حد را به عنوان عیار حد بهینه تعیین نمود [۱۰-۱۳]. در این روش برای تعیین سه عیار حد محدود کننده اقتصادی نیاز به مشتق گیری از تابع هدف است. علاوه بر این عیارهای حدی متعادل کننده نیز باید محاسبه شوند. بنابراین روند محاسبه عیار حد با استفاده از این روش بسیار طولانی بوده و امکان ایجاد خطا در این روش زیاد است. همچنین تولید توابعی که امکان مشتق گیری از آنها وجود ندارد و استفاده از فرضیات جهت ساده‌سازی مسئله نیز جز نقایص این روش محسوب می‌شود.

الگوریتم رقابت استعماری^۶ توسط آتشپز گرگری و لوکاس^۷ در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است که نه از یک پدیده طبیعی، بلکه از یک پدیده اجتماعی - انسانی الهام گرفته است [۱۴].

این الگوریتم روشی در حوزه محاسبات تکاملی است که به یافتن پاسخ بهینه مسائل مختلف بهینه‌سازی می‌پردازد. این الگوریتم با مدل‌سازی ریاضی فرایند تکامل اجتماعی - سیاسی، الگوریتمی برای حل مسائل ریاضی بهینه‌سازی ارائه می‌دهد. در این الگوریتم از آنجائیکه کشورها (مستعمرات) با یک زاویه معین به سمت استعمارگر حرکت می‌کنند، امکان گیر افتادن در دام بهینه محلی وجود دارد. از لحاظ کاربرد، این الگوریتم در دسته الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی همچون الگوریتم‌های ژنتیک^۸، بهینه‌سازی انبوه ذرات^۹، بهینه‌سازی کلونی مورچگان^{۱۰}، تبرید فلزات شبیه‌سازی شده^{۱۱} و ... قرار می‌گیرد.

اگر چه تنها پنج سال از ابداع این الگوریتم می‌گذرد اما تاکنون در مسائل زیادی مانند طراحی ساختار اسکلت [۱۵]، خوشه‌بندی داده‌ها [۱۶]، موتور القایی خطی [۱۷]، تعادل نش [۱۸] و سایر شاخه‌های مهندسی کنترل و ریانه جهت بهینه‌سازی استفاده شده است [۱۹-۲۲]. دلایل استقبال زیاد از این الگوریتم علاوه بر کارایی مناسب، سرعت همگرایی و توانایی بهینه‌سازی بالا در مقایسه با الگوریتم‌های موجود [۲۳]، بیشتر به جهت نوآوری و جذاب بودن آن برای متخصصین حوزه بهینه‌سازی است. الگوریتم رقابت استعماری با روند خاصی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، جواب‌های اولیه (کشورها) را به تدریج بهبود داده و در نهایت جواب مناسب مسئله بهینه‌سازی (کشور مطلوب) را در اختیار می‌گذارد. در این

عیار حدی که بر اساس تحلیل‌های سربه‌سری^۱ محاسبه می‌شود، عیار حد سربه‌سری نامیده می‌شود. این عیار، عیاری است که در آن هزینه‌های معدنکاری، کانه‌آرایی و تصفیه مربوط به هر تن از مواد معدنی با درآمد حاصل از هر تن برابر می‌شود. به عبارت دیگر درآمد حاصل از هر تن مواد، هزینه‌های معدنکاری، کانه‌آرایی و تصفیه مربوط به هر تن از مواد معدنی را بدون احتساب هزینه باطله‌برداری پوشش می‌دهد. عیار حد سربه‌سری برای تعیین محدوده نهایی مقدماتی یا اولیه^۲ معدن نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۲].

در محاسبه عیار حد سربه‌سری ارزش زمانی پول، توزیع عیار کانسار و ظرفیت‌های معدن، کارخانه تغلیظ، کارخانه تصفیه و بازار فروش در نظر گرفته نمی‌شود، در نتیجه عیار حد سربه‌سری منجر به بهینه‌سازی عملیات بهره‌برداری نخواهد شد. از این رو بهینه‌سازی عیار مورد توجه قرار گرفته است.

نظریه‌های بسیاری در تعیین عیار حد بهینه وجود دارد. اما بیشتر تحقیقاتی که در سه دهه گذشته انجام شده نشان می‌دهد که تعیین عیار حد بهینه با موضوع پیشنه کردن ارزش خالص فعلی^۳ (NPV) روش مطمئن تری نسبت به سایر روش‌ها است [۳-۷]. در تعیین عیار حد بهینه چندین مسئله باید مد نظر قرار گیرد. ۱- عیار حد با گذر زمان تغییر می‌کند، ۲- توزیع عیار در قسمت‌های مختلف معدن متفاوت است و ۳- عیار حد ماهیت تصادفی و نامشخص دارد [۸].

برای محاسبه عیار حد بهینه^۴، مواد معدنی باید به گونه‌ای استخراج شوند که ارزش خالص فعلی عملیات پیشینه باشد. بدین منظور در طول سال‌های اولیه عمر معدن باید مواد معدنی با عیار بالاتر استخراج شوند. در نتیجه در سال‌های اولیه عمر معدن با استخراج مواد با عیار بالا درآمد بیشتری به دست خواهد آمد و ارزش خالص فعلی افزایش خواهد یافت [۹-۱۰].

لین^۵ عملیات معدنی را به سه مرحله معدنکاری، کارخانه تغلیظ و کارخانه تصفیه تقسیم و با توجه به ظرفیت هر یک از این مراحل، سه عیار حد محدود کننده اقتصادی و سه عیار حد متعادل کننده به دست آورد و در

مقاله نحوه تعیین عیار حد بهینه معدن به هدف بیشینه کردن NPV با توجه به محدودیت‌های معدنکاری، تغلیظ و تصفیه با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مشخص کردن تابع هدف

برای تعیین عیار حد بهینه بر اساس نظریه لین عملیات معدنی شامل سه مرحله استخراج، تولید کنسانتره، ذوب و تصفیه در نظر گرفته شده است. هر یک از این مراحل هزینه‌ای را به همراه دارد و هر کدام نیز دارای یک ظرفیت محدود هستند. علاوه بر این، هزینه‌های ثابت نیز منظور شده است. با توجه به هزینه‌ها و درآمدها در این عملیات، سود عملیات از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱]:

$$P = (s-r)Q_r - mQ_m - cQ_c - fT \quad (۱)$$

که در این رابطه T طول دوره تولید مثلاً یک سال، Q_m میزان مواد که باید معدنکاری شود، Q_c مقدار ماده معدنی فرستاده شده به کارخانه تغلیظ، Q_r مقدار محصول نهایی، f هزینه‌های ثابت در واحد زمان، s قیمت فروش محصول نهایی، m هزینه معدنکاری هر تن از مواد، c هزینه تغلیظ هر تن از مواد معدنی و r هزینه ذوب و تصفیه هر واحد محصول نهایی است. اگر d نرخ تنزیل باشد، اختلاف بین ارزش فعلی ذخایر باقیمانده در زمان‌های $t=0$ و $t=T$ پس از عملیات معدنکاری برابر است با [۱]:

$$V = (s-r)Q_r - mQ_m - cQ_c (f+Vd)T \quad (۲)$$

که در این رابطه V ارزش خالص فعلی ذخیره باقیمانده در شروع عملیات (زمان $t=0$) است که با استفاده از فرآیند تکرار به دست می‌آید. مقدار ماده تصفیه شده (Q_r) به مقدار ماده معدنی که به کارخانه فرآوری فرستاده می‌شود (Q_c) بستگی دارد. با توجه به مقدار و عیار متوسط مواد معدنی فرستاده شده به کارخانه کانه‌آرایی (\bar{g}) و درصد بازیابی (v)، مقدار ماده تصفیه شده (Q_r) برابر است با:

$$Q_r = \bar{g}yQ_c \quad (۳)$$

$$v = [(s-r)\bar{g}y - c]Q_c - mQ_m - (f+Vd)T \quad (۴)$$

به منظور بیشینه کردن NPV بایستی مقدار v را بیشینه نمود. در عملیات بیشینه‌سازی ممکن است ظرفیت هر یک از واحدهای معدن، کارخانه تغلیظ و کارخانه تصفیه عامل محدود کننده باشد. با توجه به اینکه کدام یک از این ظرفیت‌ها محدود کننده عملیات باشد، مقدار T در رابطه چهار تغییر خواهد کرد. اگر ظرفیت معدن (M) محدودیت تعیین کننده باشد، مقدار T مساوی $\frac{Q_m}{M}$ و اگر ظرفیت کارخانه تغلیظ (C) محدودیت تعیین کننده باشد، مقدار T مساوی $\frac{Q_m}{M}$ و اگر ظرفیت تصفیه (R) محدودیت تعیین کننده باشد مقدار T مساوی $\frac{\bar{g}yQ_c}{R} = \frac{Q_r}{R}$ خواهد بود. بنابراین برای هر یک از این محدودیت‌ها یک مقدار v به دست خواهد آمد:

$$v_m = [(s-r)\bar{g}y - c]Q_c - \left[m + \frac{f+Vd}{M} \right] Q_m \quad (۵)$$

$$v_c = \left[(s-r)\bar{g}y - \left(c + \frac{f+Vd}{C} \right) \right] Q_c - mQ_m \quad (۶)$$

$$v_r = \left[\left(s-r - \frac{f+Vd}{R} \right) \bar{g}y - c \right] Q_c - mQ_m \quad (۷)$$

در سه حالت بالا می‌توان v_m ، v_c ، v_r را به عنوان تابعی از عیار رسم نمود. تحذب همگی به سمت بالا است. این موضوع در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که گفته شد، هدف از به دست آوردن عیار حد بهینه، عیاری است که به ازای آن v بیشینه می‌شود. از آنجا که سه تابع v وجود دارد، باید سعی نمود که هر سه تابع هدف در حد ممکن بهینه شود. لذا قسمت مشترک سه تابع باید مورد توجه قرار گیرد و سپس بیشترین مقدار قسمت مشترک سه تابع تعیین شود. قسمت مشترک منحنی‌های فوق در محدوده‌های مختلف، کمترین مقدار v_m ، v_c ، v_r است. بنابراین برای یافتن عیار حد بهینه باید اولاً قسمت مشترک سه منحنی فوق را به دست آورد (v_e)، ثانیاً عیاری که این منحنی را بیشینه می‌کند، را به دست آورد. به عبارت دیگر، هدف به دست آوردن عیاری است که باعث برآورده شدن تابع زیر شود.

$$\max v_e = \max[\min(v_m, v_c, v_r)] \quad (۸)$$

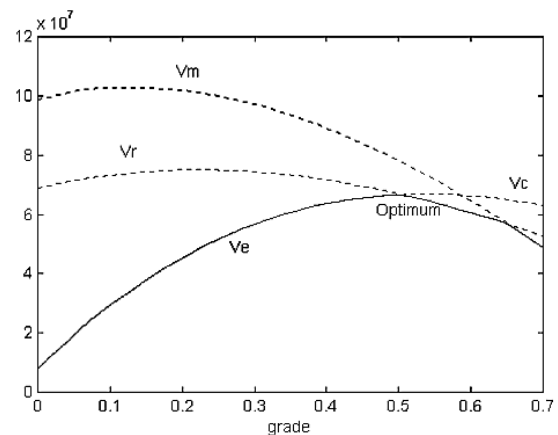
که به سمت تابع هدف بهبود می‌یابند [۲۴]. روش‌های عددی به نوبه خود به دو دسته روش‌های حذفی و روش‌های درون‌یابی^{۱۳} تقسیم می‌شوند.

در روش‌های بهینه‌سازی هوشمند که الگوریتم رقابت استعماری نمونه‌ای از این روش‌ها است، جستجو برای کشوری از نقاط انجام می‌شود و مقدار تابع هدف در این نقاط ارزیابی و با استفاده از عملگرهای خاص، کشور مطلوب‌تری از نقاط ایجاد می‌شود.

۴- الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری (ICA) یک الگوریتم جدید در زمینه محاسبات تکاملی است که بر مبنای تکامل اجتماعی - سیاسی انسان پایه گذاری شده است. روند این الگوریتم بدین صورت است که در مرحله اول با تعدادی جمعیت اولیه، که در این الگوریتم کشور نام دارند، شروع می‌شود و سپس مقدار تابع هدف طبق مسأله مورد بررسی برای هر کدام از کشورها به دست می‌آید. با مقایسه مقادیر تابع هدف همه کشورها، تعدادی از بهترین آنها انتخاب و کشورهای استعمارگر نامیده می‌شوند. سپس بقیه کشورها، کشورهای مستعمره (کلونی) نامیده می‌شوند. باید توجه کرد که در شرایط مساوی که چندین مقدار تابع هدف یکسان برای انتخاب کشورهای استعمارگر وجود دارد به تصادف از بین آنها، کشورهای استعمارگر انتخاب می‌شوند. حال، کشورهای مستعمره به کشورهای استعمارگر اختصاص می‌یابند تا امپراتوری‌ها (هر امپراتوری از یک کشور استعمارگر و چند کشور مستعمره تشکیل شده است) تشکیل شوند. باید توجه کرد که هر چه قدرت یک کشور استعمارگر بیشتر باشد (تابع هدف آن بهتر باشد) تعداد بیشتری کشورهای مستعمره به آن اختصاص می‌یابد. شمای کلی این الگوریتم در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۵].

همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است الگوریتم توسعه داده شده، همانند سایر روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، با تعدادی جمعیت اولیه شروع می‌شود (قسمت ۱ از شکل ۲).



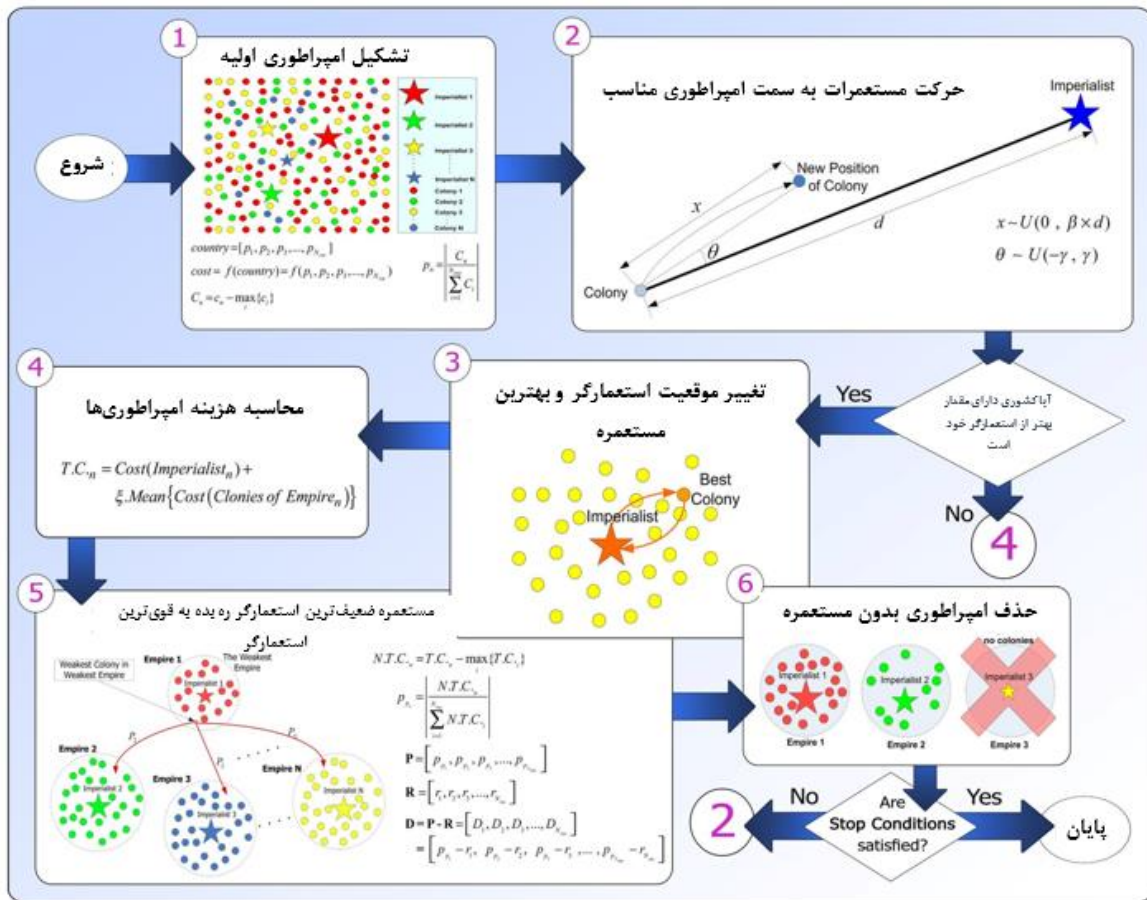
شکل ۱: منحنی V_e و V_r ، V_c ، V_m

۳- بیشینه کردن تابع هدف

همان طور که گفته شد مسأله تعیین عیار حد بهینه یک کانسار، یافتن عیاری است که باعث بهینه‌سازی سه تابع هدف می‌شود. برای این منظور می‌توان از انواع روش‌های بهینه‌سازی یک متغیره استفاده نمود. این روش‌ها به سه دسته روش‌های تحلیلی، روش‌های عددی و روش‌های بهینه‌سازی هوشمند^{۱۳} تقسیم می‌شوند.

روش‌های تحلیلی یا روش‌های حساب و دیفرانسیل برای توابع پیوسته و مشتق‌پذیر قابل استفاده هستند. در روش‌های مذکور از مشتق‌گیری تابع استفاده می‌شود و نقطه بهینه به دست می‌آید. در این روش‌ها محاسبه مقدار عددی تابع هدف، آخرین گام فرآیند است. زیرا مقدار بهینه تابع هدف پس از تعیین مقدار بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری محاسبه می‌شود. این روش‌ها ممکن است برای مسائل معینی (از جمله کانسارهای ساده با ذخایر کم) مناسب باشند. از طرف دیگر اگر مسئله بهینه‌سازی شامل توابع هدف و یا محدودیت‌هایی باشد که به طور مستقیم بر حسب متغیرها نباشد، و یا این توابع پیچیده باشند، نمی‌توان آنها را با روش‌های تحلیلی حل نمود.

در روش‌های عددی بر خلاف روش‌های تحلیلی رفتار می‌شود. یعنی ابتدا مقادیر تابع هدف به ازای مقادیر مختلفی از متغیرها محاسبه شده و آنگاه نتایج با توجه به جواب بهینه تعیین می‌شود. مبنای اغلب روش‌های بهینه‌سازی عددی بر تولید دنباله‌ای از مقادیر تقریبی است،



شکل ۲: شمای کلی الگوریتم رقابت استعماری [۲۵]

در این الگوریتم، هر عنصر جمعیت، یک کشور نامیده می‌شود. کشورها به دو دسته مستعمره و استعمارگر تقسیم می‌شوند. هر استعمارگر، بسته به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه خود درآورده و آنها را کنترل می‌کند در اینجا کشور استعمارگر قوی‌تر که با ستاره بزرگتر نشان داده شده است، دارای بیشترین تعداد کشور مستعمره با دایره‌های هم‌رنگ است و کشور استعمارگر از همه ضعیف‌تر که با ستاره کوچکتر نمایان است دارای کمترین کشورهای تحت نفوذ است. مرحله بعدی سیاست جذب و رقابت استعماری است که هسته اصلی این الگوریتم را تشکیل می‌دهند (قسمت ۲ از شکل ۲). در مرحله بعد هزینه‌ها محاسبه می‌شوند و اگر هزینه مستعمره نسبت به استعمارگر مربوطه کمتر شد با اعمال تابع انقلاب جای مستعمره و استعمارگر تغییر می‌کند (قسمت ۳ از شکل ۲). این عمل موجب می‌شود که کشور مستعمره در جهت همسان شدن با کشور استعمارگر حرکت کند. به عبارت دیگر هر کدام از کشورهای

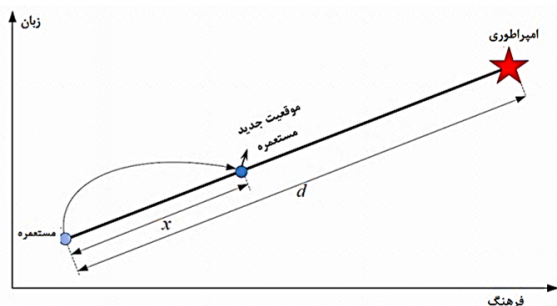
مستعمره، به ترتیب با استفاده از یک روال معین به کشور استعمارگر نزدیک می‌شوند. در این مرحله براساس روال طبیعی، بعضی از کشورهای مستعمره ممکن است انقلاب کنند و بتوانند قدرت امپراتوری را در دست بگیرند (عملگر انقلاب). بعد از اینکه توابع جذب و انقلاب انجام شد، در مرحله سوم تابع هدف هزینه کل امپراطوری‌ها محاسبه می‌شود (قسمت ۴ از شکل ۲). حال، برای هر کدام از امپراتوری‌ها اگر بهترین تابع هدف کشورهای مستعمره از تابع هدف کشور استعمارگر مقدار بهتری داشت، آنگاه جای آن دو کشور باهم عوض می‌شود. در ضمن، بعد از انجام این عمل برای تمامی امپراتوری‌ها بهترین جواب و مقدار همه کشورهای استعمارگر به عنوان بهترین جواب و مقدار جاری در این تکرار الگوریتم ذخیره می‌شود. در مرحله بعدی مستعمره‌ها از امپراطوری‌های ضعیف جدا شده و به امپراطوری‌های قوی‌تر ملحق می‌شوند (قسمت ۵ از شکل ۲). در نهایت امپراطورهای ضعیف حذف شده و با ادامه چرخه الگوریتم تنها یک امپراطوری باقی می‌ماند که

(کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) به عنوان استعمارگر انتخاب می‌شوند. باقیمانده N_{col} تا از کشورها، مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هر کدام به یک امپراطوری تعلق دارند. کشورهای استعمارگر با اعمال سیاست جذب (همگون‌سازی) در راستای محورهای مختلف بهینه‌سازی، کشورهای مستعمره را به سمت خود می‌کشند. استعمارگران با توجه به قدرتشان، این مستعمرات را، به سمت خود می‌کشند. قدرت کل هر امپراطوری، با محاسبه قدرت هر دو بخش تشکیل دهنده آن یعنی قدرت کشور استعمارگر، به اضافه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن، تعیین می‌شود [۲۰]:

$$T.C_n = cost(imperialist_n) + \{ \text{mean}\{cost(colonies\ of\ empire_n)\} \} \quad (11)$$

کشور مستعمره، به اندازه x واحد در جهت خط واصل مستعمره به استعمارگر حرکت کرده و به موقعیت جدید، کشانده می‌شود. در شکل ۴، فاصله میان استعمارگر و مستعمره با d نشان داده شده است و x نیز عددی تصادفی با توزیع یکنواخت (و یا هر توزیع مناسب دیگر) است. یعنی برای x به شرح زیر است [۲۵]:

$$x \approx U(0, \beta \times d) \quad (12)$$



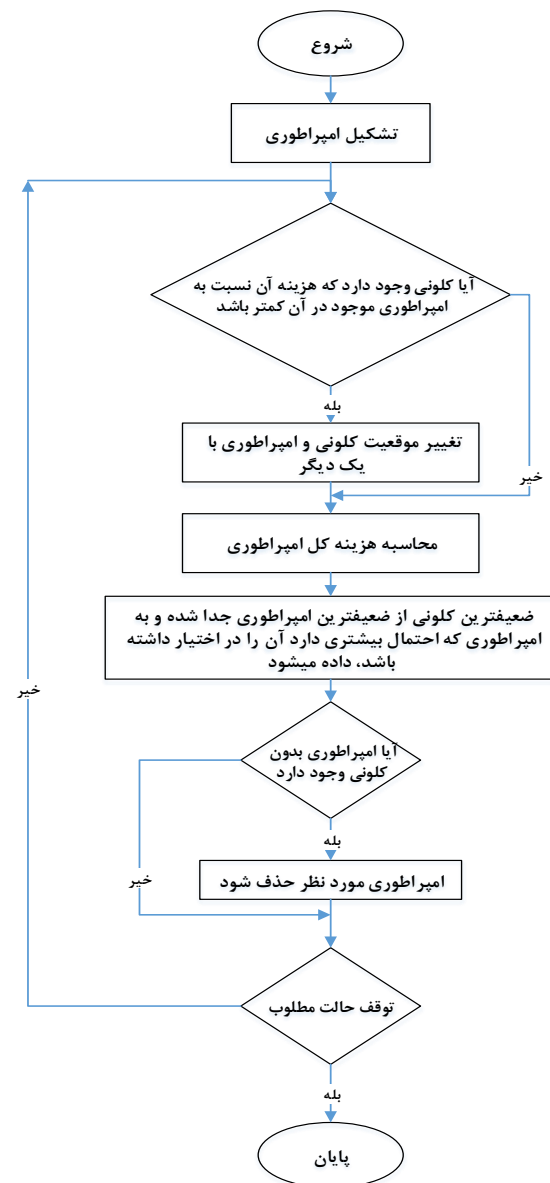
شکل ۴: حرکت مستعمرات به سمت استعمارگر در راستای محورهای فرهنگ و زبان (سیاست جذب) [۲۰]

که در آن β عددی بزرگتر از یک و نزدیک به ۲ است (یک انتخاب مناسب می‌تواند $\beta = 2$ باشد). همچنین زاویه حرکت به صورت توزیع یکنواخت زیر در نظر گرفته شده است.

$$\theta \approx U(-\gamma, \gamma) \quad (13)$$

در الگوریتم ICA ممکن است با یک انحراف احتمالی، مستعمره در مسیر جذب استعمارگر پیش می‌رود. این

همان "جواب بهینه" است (قسمت ۶ از شکل ۲). در شکل ۳ روندنمای این الگوریتم نشان داده شده است.



شکل ۳: روندنمای الگوریتم رقابت استعماری [۲۵]

۵- روند ریاضی الگوریتم رقابت استعماری

در مسائل بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تابع $f(x)$ سعی بر آن است تا آرگومان x به گونه‌ای یافته شود که هزینه متناظر با آن، هزینه یک کشور با ارزیابی تابع f به ازای متغیرهای $(P_1, P_2, P_3, \dots, P_{var})$ یافته می‌شود، بنابراین:

$$cost_i = f(country_i) = f(P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}, \dots, P_{ivar}) \quad (10)$$

در الگوریتم ICA برای شروع، تعداد $N_{country}$ کشور اولیه ایجاد و N_{imp} تا از بهترین اعضای این جمعیت

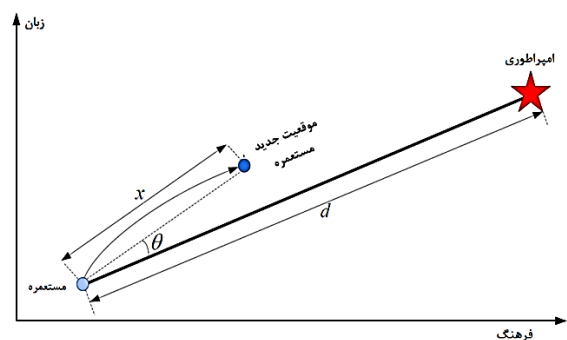
برای بررسی روش الگوریتم رقابت استعماری، عیار حد بهینه کانسار فرضی محاسبه می‌شود. در محدوده‌ی نهایی این معدن ۱۰۰ میلیون تن ماده معدنی با توزیع عیار مندرج در جدول ۱ وجود دارد. ظرفیت معدنکاری (استخراج کانسنگ و برداشت باطله) ۲۰ میلیون تن در سال، ظرفیت کارخانه کانه‌آرایی ۱۰ میلیون تن در سال و ظرفیت واحد تصفیه ۹۰ هزار تن در سال، هزینه معدنکاری ۰/۵ دلار بر تن، هزینه فراوری ۰/۶ دلار بر تن، هزینه ذوب و تصفیه ۵۰ دلار بر تن، هزینه ثابت ۴ میلیون دلار بر سال، قیمت فروش ماده معدنی ۵۵۰ دلار بر تن، بازیابی ۰/۹ (۹۰ درصد) و نرخ تنزیل ۱۵ درصد است.

جدول ۱: توزیع عیار در کانسار

عیار	مقدار
۰-۰/۱۵	۱۴۴۰۰۰۰۰
۰/۱۵-۰/۲	۴۶۰۰۰۰۰
۰/۲-۰/۲۵	۴۴۰۰۰۰۰
۰/۲۵-۰/۳	۴۳۰۰۰۰۰
۰/۳-۰/۳۵	۴۲۰۰۰۰۰
۰/۳۵-۰/۴	۴۱۰۰۰۰۰
۰/۴-۰/۴۵	۳۹۰۰۰۰۰
۰/۴۵-۰/۵	۳۸۰۰۰۰۰
۰/۵-۰/۵۵	۳۷۰۰۰۰۰
۰/۵۵-۰/۶	۳۶۰۰۰۰۰
۰/۶-۰/۶۵	۳۴۰۰۰۰۰
۰/۶۵-۰/۷	۳۳۰۰۰۰۰
۰/۷-۱/۵۶	۴۲۳۰۰۰۰۰
جمع	۱۰۰۰۰۰۰۰۰

برای حل مسئله ابتدا تعداد ۴۰ کشور اولیه‌ی (عیار) مورد استفاده برای بهینه‌سازی به صورت تصادفی انتخاب شده است. ۶ کشور به عنوان امپریالیست انتخاب شده و با کنترل بقیه‌ی ۳۴ کشور امپراطوری‌های اولیه تشکیل شده است. امپریالیست‌ها در رنگ‌های مختلف با علامت ★ نشان داده شده‌اند و مستعمرات هر امپراطوری نیز به همان رنگ امپریالیست و با علامت 0 مشخص شده‌اند (شکل ۶). در مرحله بعد سیاست همگون‌سازی و جذب پیاده می‌شود و مستعمرات با توجه به قدرت هر امپراطوری جذب امپراطوری‌ها می‌شوند (تمامی محاسبات در نرم‌افزار متلب انجام شده است).

انحراف با زاویه θ نشان داده شده است که θ به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت انتخاب می‌شود (شکل ۵).



شکل ۵: حرکت واقعی مستعمرات به سمت امپریالیست [۲۵]

در این رابطه γ پارامتری دلخواه است که افزایش آن باعث افزایش جستجوی اطراف امپریالیست شده و کاهش آن نیز باعث می‌شود تا مستعمرات تا حد ممکن، به بردار واصل مستعمره به استعمارگر، نزدیک حرکت کنند. با در نظر گرفتن واحد رادیان برای θ ، عددی نزدیک به $\pi/4$ در اکثر پیاده‌سازی‌ها، انتخاب مناسبی بوده است [۲۵].

در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر، ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیتی بهتر از استعمارگر برسند. در این حالت، کشور استعمارگر و کشور مستعمره، جای خود را با هم عوض می‌کنند. برای مدل‌سازی این رقابت، ابتدا احتمال تصاحب مستعمرات توسط هر امپراطوری با در نظر گرفتن هزینه کل امپراطوری به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۵].

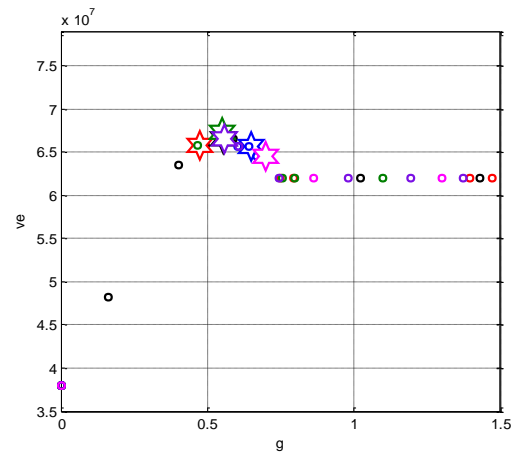
$$N.T.C_n = \max_i \{T.C_i\} - T.C_n \quad (14)$$

در این رابطه $T.C_n$ هزینه کل امپراطوری n ام و $N.T.C_n$ هزینه کل نرمالیزه شده آن امپراطوری است. احتمال تصاحب مستعمره، توسط هر امپراطوری به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{pn} = \frac{N.T.C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} N.T.C_i} \quad (15)$$

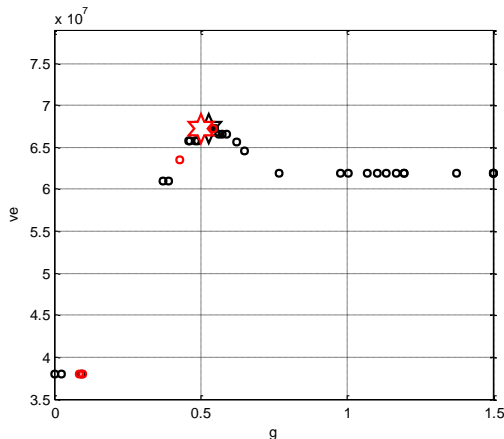
۶- پیاده‌سازی الگوریتم رقابت استعماری برای تعیین عیار حد بهینه

قطبی به دست آمده است؛ دنیایی که کل آن، یک امپراطوری واحد را تشکیل می‌دهد و همه‌ی مستعمرات و حتی خود امپریالیست از موقعیت یکسانی برخوردار هستند. این امپراطوری همان جواب بهینه مسئله است. با استفاده از روش الگوریتم رقابت استعماری محاسبات تعیین عیار حد بهینه برای کانسار مورد نظر انجام شده که نتایج در جدول ۲ درج شده است.

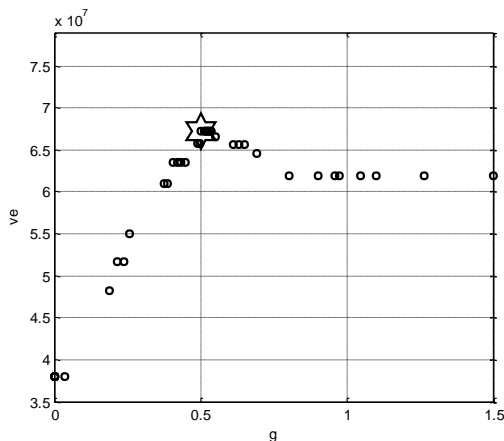


شکل ۶: امپراطوری‌های اولیه؛ هر رنگ نمایش دهنده‌ی یک امپراطوری است

با ادامه الگوریتم امپراطوری‌های ضعیف‌تر حذف و مستعمرات آنها به بین امپراطوری‌های دیگر تقسیم می‌شوند. در شکل ۷ در طی فرایند چرخش پس از گذشت ۵ نسل ۲ امپراطوری حذف شده و مستعمرات با توجه به رابطه ۱۵ بین چهار امپراطوری باقیمانده تقسیم می‌شوند. با ادامه الگوریتم، روند مذکور ادامه پیدا می‌کند و امپراطوری‌های ضعیف مستعمرات خود را از دست داده و از چرخه رقابت حذف می‌شوند. پس از گذشت ۱۰ نسل تنها دو امپراطوری باقیمانده است و رقابت بین این دو امپراطوری برای کسب مستعمرات بیشتر ادامه پیدا می‌کند. یکی از این دو امپراطوری جزء جواب بهینه خواهد بود (شکل ۸).



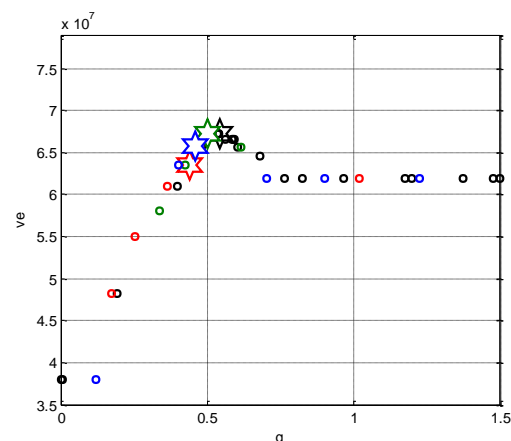
شکل ۸: امپراطوری‌ها در نسل ۱۰ام؛ ۲ امپراطوری باقی مانده است



شکل ۹: امپراطوری‌ها در نسل ۱۵ام؛ ۱ امپراطوری باقی مانده است

۷- اعتبارسنجی مدل

برای بررسی اعتبار مدل ارایه شده، مقدار عیار حد بهینه فرض شده با استفاده از روش حذفی دیکوتوماس محاسبه شد. نتایج به دست آمده از این روش در جدول ۳ نشان داده شده است. در روش دیکوتوماس نیز فرض شده است که عیار حد بین صفر تا ۰/۷ درصد قرار دارد و سپس



شکل ۷: امپراطوری‌ها در نسل ۵ام؛ ۴ تا از امپراطوری‌ها باقی مانده‌اند

با ادامه الگوریتم در نسل ۱۵ (شکل ۹)، همه امپراطوری‌ها به جز یکی، سقوط کرده و یک دنیای تک

در دو نقطه به فاصله $1/0000$ درصد از مرکز محدوده، تابع هدف ارزیابی گردید. برای تعیین عیار حد بهینه با استفاده از این روش ۲۰ آزمون انجام شد. همانطور که مشاهده

می‌شود نتایج مدل ارایه شده هم‌خوانی خوبی با روش حذفی دیکوتوماس دارد.

جدول ۲: عیار حد بهینه، تولید واحدهای مختلف در سال‌های مختلف عمر معدن توسط روش آگوریتیم رقابت استعماری

سال	عیار حد بهینه (%)	مواد استخراج شده (تن)	ماده معدنی ارسال شده به کارخانه تغلیظ (تن)	محصول تولید شده (تن)	ارزش خالص فعلی (دلار)
۱	۰/۵۰۱	۱۹۱۲۲۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۸۸۴۰۱	۸۶۹۴۲۰۰۰
۲	۰/۴۵۱	۱۸۱۸۲۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۸۶۸۰۹	۷۵۶۷۰۰۰۰
۳	۰/۴۲	۱۶۶۶۷۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۸۳۸۵۰	۶۵۰۳۹۰۰۰
۴	۰/۳۸۴	۱۵۲۸۵۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۸۰۸۳۳	۵۵۲۷۸۰۰۰
۵	۰/۳۲۱	۱۴۲۸۶۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۷۷۸۳۷	۳۸۵۸۹۰۰۰
۶	۰/۲۴۸	۱۳۳۳۳۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۷۴۸۵۷	۲۲۹۵۳۰۰۰
۷	۰/۱۸۶	۳۹۶۵۰۰۰	۳۳۷۰۲۵۰	۲۳۳۵۶	۶۲۴۰۰۰
۸			مجموع ارزش خالص فعلی		۳۴۵۰۹۵۰۰۰

جدول ۳: عیار حد بهینه، تولید واحدهای مختلف در سال‌های مختلف عمر معدن توسط روش حذفی دیکوتوماس

سال	عیار حد بهینه (%)	مواد استخراج شده (تن)	ماده معدنی ارسال شده به کارخانه تغلیظ (تن)	محصول تولید شده (تن)	ارزش خالص فعلی (دلار)
۱	۰/۵۰۳	۱۷۸۳۵۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۸۹۹۶۸	۹۴۴۰۸۰۰۰
۲	۰/۴۹۳	۱۷۵۸۶۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۸۹۳۴۲	۸۲۷۲۵۰۰۰
۳	۰/۴۶۰	۱۶۸۶۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۸۷۴۲۵	۶۹۸۶۹۰۰۰
۴	۰/۴۱۲	۱۵۸۵۷۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۸۴۵۶۱	۵۵۷۴۰۰۰۰
۵	۰/۳۶۱	۱۴۸۷۹۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۸۱۴۸۹	۴۰۱۸۶۰۰۰
۶	۰/۲۹۴	۱۳۷۲۷۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۷۷۴۵۵	۲۳۱۴۶۰۰۰
۷	۰/۲۲	۳۲۵۷۰۰۰	۲۵۶۸۰۰۰	۱۸۸۳۴	۵۲۸۰۰۰
۸			مجموع ارزش خالص فعلی		۳۶۶۶۰۲۰۰۰

محدودیت‌های موجود عیار حد بهینه با ارزش خالص فعلی بیشینه محاسبه شد.

در الگوریتیم رقابت استعماری برای محاسبه احتمال تصاحب هر امپراطوری، به جای استفاده از مکانیزم چرخه رولت که در الگوریتیم ژنتیک مورد استفاده قرار گرفته، از مکانیزم جدیدی برای پیاده‌سازی این فرایند استفاده شده است که نسبت به چرخه رولت دارای هزینه محاسباتی بسیار کمتری است. در این مکانیزم، عملیات نسبتاً زیاد مربوط به محاسبه تابع توزیع تجمعی احتمال (CDF) را که در چرخه رولت مورد نیاز است حذف می‌شود و فقط به داشتن تابع چگالی احتمال (PDF) نیاز دارد. در نتیجه این الگوریتیم با سرعت بیشتری به جواب بهینه همگرا می‌شود و در اکثر کاربردها نتایج بهتری هم ارایه کرده است.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله از الگوریتیم رقابت استعماری برای تعیین عیار حد بهینه با هدف بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی استفاده شده است. یکی از مهمترین پارامترها در برنامه‌ریزی تولید معدن روباز، عیار حد بهینه است. برای این منظور باید عیار حد بهینه را برای سال‌های مختلف عمر معدن، به منظور بهینه نمودن سود یا ارزش خالص فعلی تعیین نمود. بهینه‌سازی عملیات با هدف بیشینه نمودن ارزش خالص فعلی در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور یک کانسار فرضی با عیارهای مختلف در نظر گرفته شد. سپس الگوریتیم رقابت استعماری پیاده‌سازی و در هر سال با توجه به

مراجع

- [13]. Lane K.F., (1988), "The economic definition of ore –cutoff grade in theory and practice", mining journal books limited, London.
- [14]. Atashpaz-Gargari E. & Lucas C., (2007), "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. Evolutionary Computation", CEC 2007. IEEE Congress on, IEEE, 4661-4667.
- [15]. Kaveh, A., & Talatahari, S. (2010). Optimum design of skeletal structures using imperialist competitive algorithm. *Computers & Structures*, 88(21), 1220-1229.
- [16]. Niknam, T., Fard, E. T., Pourjafarian, N., & Rousta, A. (2011). An efficient hybrid algorithm based on modified imperialist competitive algorithm and K-means for data clustering. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(2), 306-317.
- [17]. Lucas, C., Nasiri-Gheidari, Z., & Tootoonchian, F. (2010). Application of an imperialist competitive algorithm to the design of a linear induction motor. *Energy conversion and management*, 51(7), 1407-1411.
- [18]. Rajabioun, R., Atashpaz-Gargari, E., & Lucas, C. (2008). Colonial competitive algorithm as a tool for Nash equilibrium point achievement. In *Computational science and its applications-iccsa 2008* (pp. 680-695). Springer Berlin Heidelberg.
- [20]. Gargari, E. A., Hashemzadeh, F., rajabioun, R. & Lucas, C., (2008), "Colonial competitive algorithm: a novel approach for PID controller design in MIMO distillation column process". *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 337-355.
- [21]. Nourmohammadi, A., Zandieh, M. & Tavakkoi-moghaddam R, (2013), "An imperialist competitive algorithm for multi-objective U-type assembly line design". *Journal of Computational Science*, 4, pp 393-400.
- [22]. Enayatifar, R., Sadaei, H. J., Abdullah, A. H. & Gangi, A., (2013), "Imperialist competitive algorithm combined with refined high-order weighted fuzzy time series (RHWFTS-ICA) for short term load forecasting". *Energy Conversion and Management*, 76, 1104-1116.
- [23]. Khabbazi, A., Atashpaz-Gargari, E., & Lucas, C. (2009). Imperialist competitive algorithm for minimum bit error rate beamforming. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 1(1-2), 125-133.
- [24]. Rardin, R. L., (1998), "Optimization in operations research", Prentice Hall New Jersey
- [1]. Ustrulid, W. A., Kuchta, M., & Martin, R. K. (2013). *Open Pit Mine Planning and Design*, Two Volume Set & CD-ROM Pack: CRC Press.
- [2]. Taylor, H.K., (1985) "Cutoff grade- some further reflection", *Trans. Inst. Min. Metall (Sect. A: Min. industry)*, A204-A216.
- [3]. Bascetin, A. & Nieto, A., (2007) "Determination of optimal cut-off grade policy to optimize NPV using a new approach with optimization factor", *Journl South African institute of mining and metallurgy*, 107, 87.
- [4]. Minnitt, R., (2004), "Cut-off grade determination for the maximum value of a small Wits-type gold mining operation", *Journl South African institute of mining and metallurgy*, 104, 277-284.
- [5]. Osanloo, M. & Ataei, M., (2003), "Using equivalent grade factors to find the optimum cut-off grades of multiple metal deposits". *Minerals Engineering*, 16, 771-776.
- [6]. Osanloo, M., Rashidinejad, F. & Reza .B., (2008), "Incorporating environmental issues into optimum cut-off grades modeling at porphyry copper deposits", *Resources Policy*, 33, 222-229.
- [7]. Wang, Q., Deng, J., Zhao, J., Liu, H., Wan, L. & Yang, L., (2010), "Tonnage-cutoff model and average grade-cutoff model for a single ore deposit", *Ore Geology Reviews*, 38, 113-120.
- [8]. Li, S. & Yang, C., (2012) "an optimum algorithm for cut-off grade calculation using multistage stochastic programming". *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 45
- [9]. Barid B.K. and Satchwell P.C., (2001) "Application of economic parameters and cutoffs during and after pit optimization", *Mining Engineering*.
- [10]. Tatiya R.R., (1996), "Cutoff-grade decisions in relation to an Indian copper-mining complex", *Trans. Inst. Min. Metall., Section A*, Vol. 81, pp. A 127-131.
- [11]. Lane K.F., (1964), "Choosing the optimum cut-off grade", *Colorado School of Mines Quarterly*, Vol. 59, pp. 811-829.
- [12]. Lane K.F., (1979), "Commercial computer aspects of choosing cutoff grades" 16th international symposium Application of computer and Mathematics in the Mineral Industries, Chapter 27, pp. 280-285.

[25]. Atashpaz-Gargari E., (2009), "Imperialist Competitive Algorithm development and it is applications", M.S. Thesis, University of Tehran (in Persian).

-
- 1- Break-even Cutoff grade
 - 2- Preliminary Pit Limits
 - 3- Net Present Value
 - 4- Optimum cutoff grade
 - 5- Lane
 - 6- Imperialism Competitive Algorithm
 - 7- Lucas
 - 8- Genetic Algorithms
 - 9- Particle Swarm Optimization
 - 10- Ant Colony Optimization
 - 11- Simulated Annealing
 - 12- Intelligence Optimization Method
 - 13- Interpolation Methods