امکان سنجی کاربرد الگوریتم کشتل در تعیین محدوده نهایی معادن

سجاد رستمیان[۱]، مجید عطایی‌پور[۲]، مصطفی حاجی آقایی کشتلی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن گرایش استخراج، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه امیرکبیر؛ s.rostamian.uut@gmail.com

[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه امیرکبیر؛ map60@aut.ac.ir

[۳] استادیار، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران؛ mostafahagi@gmail.com

چکیده: برنامه ریزی و مراحل طراحی یک پروژه استخراجی معدن روباز پس از تعیین محدوده نهایی می‌تواند آغاز شود. حل مسئله تعیین محدوده‌نهایی معادن بزرگ با استفاده از روش‌های دقیق به علت افزایش سریع تعداد متغیرها و محدودیت‌ها با مشکل مواجه می‌شود. به همین دلیل استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی در حل این گونه از مسائل به کار گرفته می‌شود. در اینجا تلاش بر این است که با استفاده از الگوریتم کشتل محدوده نهایی معدن مورد محاسبه قرار گیرد برای این کار ابتدا در متلب محدودیت شیب استخراج ماده معدنی در نظر گرفته شده است. بعد از تعیین شیب استخراج ماده معدنی تعدادی محدوده قابل استخراج به صورت مخروطی در نظر گرفته می‌شود هر کدام از کشتل‌ها صاحب یکی از مخروط‌های مورد نظر می‌باشد هر کدام از کشتل‌ها که به جواب نهایی بهتری رسیده باشند به عنوان کشتل خوش‌شانس انتخاب می‌شوند آن مخروط به عنوان مخروط بهینه در آن تکرار انتخاب شده و سپس با استفاده از کشتل‌های در حال چرخش کشتل‌های خوش شانسی پیدا می‌شوند که محدوده‌ی بهینه نسبت به محدوده قبلی انتخاب کرده باشند به عنوان کشتل خوش‌شانس جدید انتخاب می‌شوند و این تکرار تا آنجا ادامه پیدا می‌کند که نتیجه یکسان و بهینه باشد و نیاز به تکرار متعدد نداشته باشد. در این پژوهش تعیین محدوده نهایی دوبعدی با استفاده از الگوریتم کشتل و لرچ گروسمن برای تعداد ۱۶*۷ بلوک فرضی به صورت دوبعدی انجام شده است. ارزش معدن در هردو روش برابر با ۱۶۸ به دست آمده است و تعداد ۶۹ بلوک داخل محدوده نهایی قرار گرفته است. نتایج الگوریتم کشتل نشان می‌دهد که این الگوریتم پس از ۴۰ تکرار به همگرایی رسیده است و بیانگر این است که الگوریتم کشتل برای انجام تعیین محدوده نهایی مناسب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تعیین محدوده نهایی، الگوریتم فراکاوشی، الگوریتم مرغابی(کشتلی)، بهینه سازی

۱- مقدمه

امروزه با توجه به پیشرفت علم و تکنولوژی نیاز داریم فعالیت‌های معدن‌کاری را بهینه نموده و با کمترین هزینه، بیشترین درآمد و استحصال فلز را انجام داده باشیم. عدم قطعیت‌ها در شرایط زمین شناسی، نوسانات قیمت بازار، ملزومات فنی و ... شرکت های معدنی را بر آن داشته تا پیوسته در حال توسعه پیشرفت های فنی برای دست یافتن به سود بیشتر، بهبود بهره برداری و تامین اهداف سرمایه گذارانشان باشند. یک بخش قابل توجه از این پیشرفت ها مربوط به طراحی بهینه فعالیت‌های معدنی است که شامل تعریف محدوده نهایی بهینه، طراحی پوش بک و سایر طراحی‌ها می‌باشد. محدوده نهایی معدن روباز محدوده‌ای است که اگر در زمان تعیین آن استخراج شود بیشترین سود را تولید خواهد کرد[۱].

روش‌های بهینه سازی به دو دسته روش های دقیق و جستجوگر تقسیم می شوند روش های دقیق برای بهینه سازی منجر به جواب بهینه برای مسائل خواهد شد اما این روش‌ها در مسائل بزرگ نیاز به زمان و کامپیوترهای بسیار قدرتمند هستند با توجه به این‌که روش‌های جستجوگر منجر به جواب بهینه برای مسئله نخواهد شد اما جواب آن با دقت مناسب و در زمانی معقول قادر به حل مسائل خواهند بود. مسئله تعیین محدوده نهایی معدن جزو مسائل np-hard طبقه بندی می شوند. هدف از نوشتن این مقاله بررسی بهینه کردن محدوده نهایی محدوده معدن، با استفاده از الگوریتم کشتل و مقایسه با الگوریتم‌های فراکاوشی می‌باشد. که بیشترین سود یا ارزش خالص فعلی (NPV) را برای ما داشته باشد. که برای این کار کاربرد الگوریتم مرغابی امکان سنجی شده و برای بهینه سازی استفاده خواهد شد. از اهداف بعدی این مقاله می‌توان به ارزیابی این الگوریتم و

کاربردهای آن در مسائل مختلف معدنی اشاره کرد.

تا به حال از الگوریتم‌های فراکاوشی زیادی برای تعیین محدوده نهایی در معادن استفاده شده است اما در بسیاری از این تحقیقات صورت گرفته بسیاری از محدودیت‌ها (مانند محدودیت شیب معدن) و عدم قطعیت‌ها (مانند عدم قطعیت قیمت و عیار) در آن ها بررسی نشده است برای همین محققین به دنبال روشها یا الگوریتم‌هایی انعطاف پذیری می‌گردند که بتواند همه‌ی این موارد ذکر شده و حتی بیشتر از آن را حل نماید و اگر در آینده در این زمینه متغیری اضافه یا کم شد بتوان تغییرات را با سهولت اعمال نمود.

در این پژوهش ابتدا تئوری الگوریتم کشتل و نحوه پیاده سازی این الگوریتم برای موضوع تعیین محدوده نهایی معادن مورد بحث قرار گرفته و در نهایت برای یک داده مدل بلوکی فرضی به صورت دوبعدی پردازش می‌شود و در نهایت ارزش آن با روش تعیین محدوده نهایی با الگوریتم لرچ و گروسمن مقایسه می‌شود. عملکرد این الگوریتم و ارزش نهایی آن نشان می‌دهد الگوریتم کشتل در انجام حل مسئله موفق بوده است.

تا به حال برای تعیین محدوده نهایی روش های مختلفی ارائه شده است که به دو دسته روش های دستی و کامپیوتری تقسیم می شوند [۱۸]. در استفاده از هر روش باید مسائل اقتصادی در نظر گرفته شود. طراحی محدوده‌نهایی با روش های دستی زمان‌بر بوده و طراحی به وسیله آن نیازمند گروهی از مهندسان و طراحان با تجربه است. همچنین استفاده از این روش تنها در کانسارهای کوچک کاربرد دارد [۱]. برای تعیین محدوده نهایی معدن الگوریتم های مختلفی نیز ارائه شده است. این الگوریتم ها در یک تقسیم بندی به الگوریتم های با منطق ریاضی و جستجوگر تقسیم می شوند. گروهی از الگوریتم ها که در محدوده فرضیات اعمال شده در آنها، همواره قادر به یافتن جواب بهینه هستند را الگوریتم‌های دارای منطق ریاضی و الگوریتم هایی را که تنها قادر به یافتن جوابی نزدیک به بهینه هستند را الگوریتم‌های جستجوگر می‌گویند[۱۹]. روش های مبتنی بر منطق ریاضی همواره قادر به یافتن محدوده بهینه خواهند بود. اما این الگوریتم ها برای مسائل بزرگی دارای محدودیت می‌باشند چراکه زمان حل این الگوریتم‌ها برای مسائل بزرگ بسیار طولانی خواهد بود. روش‌های جستجوگر در دهه های ۶۰ و ۷۰ میلادی توسعه داده شدند و از علل گرایش به این الگوریتم‌ها می‌توان به تعداد کم تکنیک‌های ریاضی در آن زمان آشنایی کم معدنکاری با تکنیک‌های ریاضی و مهم تر از همه نبود کامپیوترهای قدرتمند برای حل مسئله محدوده نهایی اشاره کرد.

هر کدام از این روش‌های ارائه شده دارای مزایا و معایبی بوده‌اند. در این بخش سعی می‌شود توضیحی خلاصه در مورد روش‌ها و الگوریتم‌های ارائه شده پرداخته شود. ساده‌ترین راه حل را برای محدوده نهایی معادن روباز در سال ۱۹۶۵ توسط پانا ارائه شد[۶]. الگوریتم مخروط شناور، یک الگوریتم شبیه سازی است که در آن تعیین طرح محدوده نهایی معدن، تابع شبیه سازی استخراج آن است. عنصر اصلی در این شبیه سازی، مخروط باطله برداری حداقل است. یکی از عیب‌های این الگوریتم عدم استفاده از خاصیت ترکیب شدن بلوکها می‌باشد مخروط شناور۲ توسط رایت در سال ۱۹۹۹ مطرح و معرفی گردید [۷] روش دو بعدی لرچ و گروسمان در سال ۱۳۶۵ لرچ و گروسمن مقاله‌ای تحت عنوان "طراحی بهینه معادن روباز " منتشر کردند که در آن دو روش عددی الگوریتم برنامه نویسی پویا، برای کاواک با یک مقطع عمودی از یک معدن و الگوریتم نموداری، برای کاواک کلی سه بعدی ارائه شده بود[۹] الگوریتم کوروبوف توسط کوروبوف در سال ۱۹۷۴، بر اساس الگوریتم مخروط شناور مطرح و ابداع شد [۱۰] مدل جریان شبکه برای تعیین محدوده بهینه معدنکاری روباز، بر پایه تئوری حداکثر جریان شبکه و حداقل میزان برداشت، بنا شده است و نخستین بار این روش در سال ۱۹۶۸پیشنهاد شد همین نظریه توسط پیکارد[۱۰] تایید شد. در این روش شبکه‌ای با پایانه های ورودی و خروجی ساخته می‌شود. لرچ و گروسمن در سال ۱۹۶۵ الگوریتمی به نام نظریه نمودار برای حل مسئله تعیین محدوده نهایی، در حالت سه بعدی ارائه دادند [۹]. این الگوریتم از نظر ریاضی اثبات شده است که همواره به پاسخ بهینه منجر خواهد شد و در اکثر صنایع معدنی و نرم افزارها به کار گرفته شده است. الگوریتم هایی که تا به این جا مورد بحث و بررسی قرار گرفتند جزو الگوریتم های نسل یک به حساب می‌آیند الگوریتم هایی که در ادامه به آنها اشاره می‌شود جزو نسل دوم الگوریتم‌ها هستند که برای تعیین محدوده نهایی معدن استفاده شدند. الگوریتم ژنتیک[۲] برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ مطرح شد [۱۲] و بعدها توسط محققان مختلف توسعه یافت [۱۳][۱۴][۱۵]. ابزارهایی که در الگوریتم ژنتیک موجود است موجب تغییر ژن‌ها در کروموزوم‌ها شده و در نهایت کروموزوم بهینه که همان محدوده بهینه خواهد بود را ارائه می‌دهد. برای دست یابی سریع به جواب از ترکیب همین الگوریتم با الگوریتم مخروط شناور نیز استفاده شد که جوابی بهتر از خود الگوریتم ژنتیک ارائه داد. الگوریتم بهینه سازی مورچگان[۳] یکی از الگوریتم های فراکاوشی[۴] الهام گرفته شده از زندگی حیوانات اجتماعی است. این الگوریتم اولین بار در سال ۱۹۹۰ مطرح شد[۱۶]. در رشته مهندسی معدن نیز برای اولین بار از روش مورچگان برای تعیین محدوده نهایی استفاده شد[۵]. محدوده‌ی مورد بررسی به صورت دو بعدی بوده و روش های تطبیق

---

[۱] Jean-Claude Picard

[۲] Genetic Algorithm

[۳] Ant colony optimization

[۴] Meta heuristic

محدوده نهایی با الگوریتم مورچگان بررسی شده است. الگوریتم زنبور عسل مصنوعی[۵]یک راهکار بهینه‌سازی است که رفتار یک کلونی زنبور عسل را شبیه‌سازی می‌کند و برای اولین بار در سال ۲۰۰۵ برای بهینه‌سازی پارامتر واقعی ارائه شد [۱۷].

۲- کشتل[۶] و الگوریتم آن

کشتل نام محلی در مازندران است این اسم از خانواده نوعی غازسانان برداشته شده است که به این محل از مازندران مهاجرت می‌کنند. نام علمی این مرغابی آناس کلایپیتا[۷]است که در امریکای شمالی به نورثرن شاولر[۸]به معنی "پارو زننده‌ی شمالی" نامیده می شود. کلمه‌ی پارو زننده بدلیل شکل منقار این مرغابی و شمالی بدلیل اینکه این پرنده در نواحی شمال زمین بخصوص اوراسیا (اروپا-آسیا) زندگی می‌کند و در فصل زمستان به نواحی جنوبی قطب شمال از جمله امریکای شمالی، اروپا، جنوب روسیه و جنوب دریای مازندران مهاجرت می‌کند. الگوریتم کشتل از رفتار تغذیه این نوع مرغابی در برکه بهره می‌گیرد. الگوریتم کشتل یک الگوریتم فراکاوشی جدید که از یک فرایند موجود در طبیعت الهام گرفته شده است.

رفتار این نوع مرغابی به گونه‌ای است که به محض رسیدن و پیدا کردن یک منبع غذائی خوب و مناسب، سَر خود را زیر آب کرده و تمامی بدن خود را مانند یک پرگار با مرکزیت منقار مرغابی، می‌چرخاند. به گونه‌ای که یک دایرهٔ متحرک با مرکز رونده و متحرک شکل می‌گیرد. این دایره هم حرکت وضعی و هم حرکت انتقالی دارد. به محض به وجود آمدن این دایره‌ی فرضی توسط این مرغابی، یعنی هنگامی که یک کشتل در حال جستجو و چرخیدن در آب با مرکزیت منقار خود است، کشتل‌های اطراف که به آن نزدیکتر هستند، یک به یک به این کشتل مورد نظر، که زودتر از همه منبع غذا را پیدا کرده است، نزدیک شده و به دور آن و هم جهت با آن می چرخند. به گونه‌ای که اولین کشتل در مرکز قرار می گیرد و سایر، در اطراف آن در حال چرخیدن در یک جهت موافق هستند. این دایرهٔ فرضی نیز مطابق با حرکت کشتلی که در وسط دایره قرار دارد، هم دارای حرکت چرخشی وضعی و هم دارای حرکت چرخشی انتقالی است[۳].

این حرکت دسته جمعی، همانند شکل۱ پیرامون منبع غذائی همواره به سمت منبع بیشتر و بهتر غذا، در حال مصرف و چرخش ادامه دارد تا جایی که منبع غذائی دیگری در آن منطقه باقی نماند. در این حالت کشتل ها متفرق می شوند[۳].

شکل ۱- حرکت دسته جمعی چرخشی کشتل ها به دور غذا [۳].

[۵] Artificial bee colony algorithm

[۶] Keshtel

[۷] Anas Clypeata

[۸] Northern Shoveller

۳- ماهیت و ساختار الگوریتم کشتل

همانند دیگر الگوریتم های فراکاوشی، الگوریتم کشتل، دارای دو قسمت مهم و اصلی است؛ تمرکز[۹] و تنوع:[۱] این دو قسمت به ترتیب به نامهای استخراج و اکتشاف نیز نامیده می‌شوند. تمرکز یا استخراج به معنی جستجوی محلی[۱۰] پیرامون نواحی‌ای که بصورت بالقوه انتظار می‌رود تا در آنجا جواب بهینه سراسری[۱۲] وجود داشته باشد، است. این عمل با تغییر اندکی در مشخصات یک جواب بالقوه، مانند عملگر جهش در الگوریتم ژنتیک، انجام می‌شود.

در الگوریتم کشتل، بخش استخراج که وظیفه جستجوی محلی را به عهده دارد، استخراج همان جذب شدن کشتل‌های اطراف کشتلی که در ابتدا غذا را پیدا می‌کند که کشتل خوش شانس نامیده می‌شود. نکته مهمی که در این الگوریتم وجود دارد، این است که برخلاف اکثر الگوریتم‌های موجود، به جای اینکه جواب بالقوه را حرکت دهیم، با استفاده از جواب‌های همسایه، بخصوص جوابی که به جواب بالقوه از همه نزدیکتر است، ناحیه‌ی بالقوه را بطور دقیق بررسی می‌کند (پارو[۱۳] می زند). رویکرد نوین دیگر این الگوریتم که در این قسمت انجام می‌شود، حرکت به سمت جواب‌های بهتر در جستجوی محلی است. کشتل یا همان جواب (چون موقعیت کشتل در اینجا همان موقعیت غذا می شود و همانطور که در قبل نیز اشاره شد، منحصر بفرد است و به عنوان یک موقعیت منحصر بفرد جغرافیائی است) بالقوه به همراه همسایگانش تا جایی این حرکت به سمت جواب بهتر را ادامه می دهند که دیگر هیچ غذا یا جوابی در آن ناحیه وجود نداشته باشد.

عملیات استخراج به برخی از کشتل‌ها اجازه می‌دهد تا برکه را ترک کرده و به برکه های اطراف پرواز کند و در مقابل به کشتل‌های دیگر نیز اجازهٔ فرود[۱۴] در این برکهٔ موجود را می‌دهد. این عمل منجر به تولید جواب های جدید در تکرار الگوریتم می شود. به طور موازی نیز، به بقیه کشتل‌های موجود در هر تکرار نیز اجازهٔ جابجایی در فضای برکه را می‌دهد. کشتل‌ها در برکه بسیار متحرک بوده و همواره در حال جابجایی هستند. یعنی خصوصیت رفتاری این پرنده در جستجوی غذا در برکه به نوعی حریصانه[۱۵] است. این رفتار، در مشاهداتی که صورت گرفته است، کاملاً مشهود است و پیش بینی می‌شود با اینگونه رفتار جستجوی حریصانه، و الگوریتمی که از رفتار این پرنده اقتباس شده است، الگوریتمی مناسب و کاربردی در مسائل بهینه سازی مختلف باشد[۳].

۳-۱- گام‌ها و عملگرها در الگوریتم

عملگرها و پارامترهای توسعه داده شده در الگوریتم مذکور در بخش‌های پیش رو، آمده است. سعی شده است تا با همزمانی توضیحات در فضای حل و فضای برکه و همچنین با مطرح نمودن کشتل و غذا از یک طرف و جواب در فضای حل از سوی دیگر، بطور همزمان هر دو محیط توضیح داده شود[۳].

۳-۲- ایجاد جواب اولیه (فرود کشتل در برکه)

الگوریتم کشتل برای مسائل بهینه سازی پیوسته و گسسته کاربرد دارد. تابع هدف با $F(\vec{x})$ نشان داده می‌شود که $\vec{x} = (x_1, x_2, ..., x_n) \in R^n$ است. فضای جواب موجه $\psi = \prod_{j=1}^{j=n} [L_j, U_j]$ است. که U و L به ترتیب حدود بالا و پائین ناحیه جواب هستند[۳].

در ابتدا، باید جواب‌های اولیه، در فضای حل ایجاد شود. هر کشتل، معادل هر جواب، به دلیل منحصر به فرد بودن موقعیت جغرافیایی هر دو است. لذا از این پس این دو کلمه معادل هم هستند. نسل اولیه با تولید M کشتل (جواب) شروع می شود. این M جواب را به سه قسمت M_1، M_2 و M_3 تقسیم می کنیم بطوری که $M=M_1+M_2+M_3$ باشد.

هر جواب می‌تواند به صورت ماتریس یا بردار، مانند کروموزوم در الگوریتم ژنتیک، بسته به نوع مسأله نمایش داده شود. هر جواب دارای n بُعد یا متغیر در فضای حل است. بنابراین:

$$\vec{x}_i^g = (x_{i,1}^g, x_{i,2}^g, ..., x_{i,n}^g)$$

M نشان دهنده تعداد جواب برای $i = 1, ..., M$، بطوریکه $g = 0,1, ..., g_{\max}$ نشاندهنده تکرار فعلی الگوریتم و g_{max} نشاندهنده بیشینه تعداد

---

[۹] Intensification
[۱۰] Diversification
[۱۱] Local Search
[۱۲] Global
[۱۳] Shovel
[۱۴] Landing
[۱۵] Greedy

تکرارهای الگوریتم است. ایجاد جواب اولیه با توزیع یکنواخت تصادفی برای پوشش کل فضای حل انجام می‌شود. بنابراین j-امین بُعد جواب i به صورت زیر ایجاد می‌شود[۳]:

$$x_{i,j} = L_j + Uniform(0,1) \times (U_j - L_j)$$

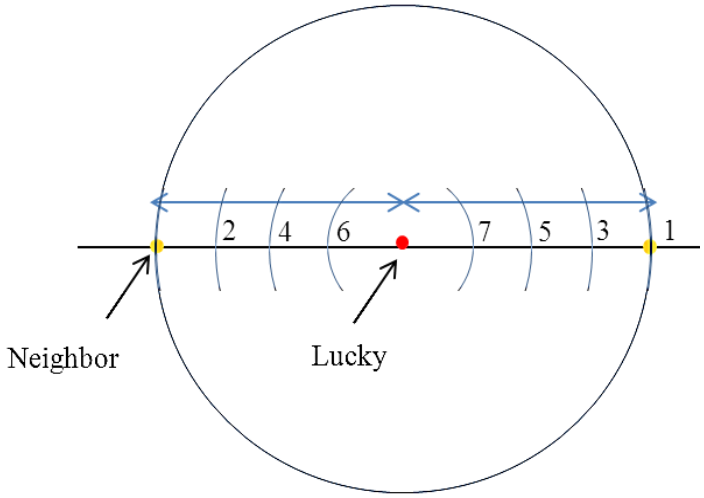
۳-۳- عملگر ماندگاری[۱۶] (K) حفظ و بهبود M1 جواب بهتر

در این گام، تعداد M_1 جواب که تابع هدف بهتری نسبت به بقیه جواب‌ها دارند، انتخاب می‌شود. تنظیم پارامترها از نکات مهم و قابل توجه هر الگوریتم فراکاوشی است که باید متناسب با نوع مسأله انجام شود. بنابراین مقدار M_1 باید با توجه به مسأله و توسط کاربر تعریف شود.

به صورت موازی، در برکه، به کشتل‌هایی که غذای بهتری پیدا کرده اند، کشتل‌های خوش شانس می‌گوئیم که معادل M_1 جواب بهتر است. در حقیقت مکانی که کشتل‌های خوش شانس در آن حضور دارند و غذای خوب را در آنجا پیدا کرده‌اند، به عنوان موقعیت جواب در نظر گرفته می‌شود[۳].

۳-۴- چرخش[۱۷]

به M_1 جواب بهتر که در مرحله‌ی قبلی شناسائی شده‌اند، اجازه می دهیم تا در اطراف خود بیشتر جستجو کنند. این مرحله، همان بخش تمرکز، یا استخراج، و یا همان جستجوی محلی در برخی الگوریتم‌های فراکاوشی است. برای هر یک از این M_1 جواب (کشتل‌های خوش شانس)، فرایند پیش رو را در نظر می گیریم. در برکه، کشتل‌ها زمانی که متوجه شوند یک کشتل که در نزدیکی آنها است غذایی یافته است، سمت آن نزدیک می شوند. این نزدیک شدن با یک حالت چرخشی رخ می‌دهد. نحوه‌ی نزدیک شدن و چرخش در شکل ۲ نمایش داده شده است[۳].



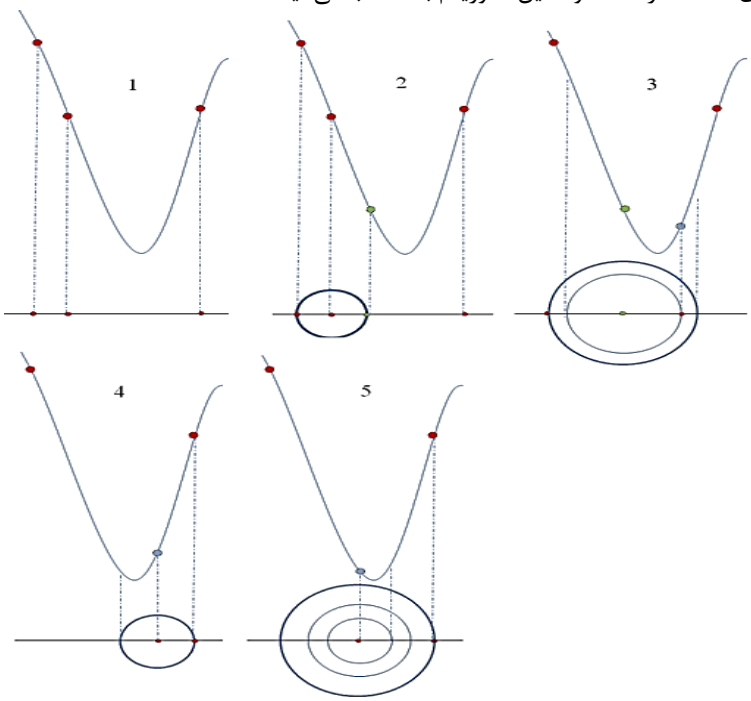
شکل ۲– ترتیب نقاطی که در اثر چرخش نقطه همسایه بوجود می آید[۳].

با شبیه سازی این رفتار، زمانی که یک جواب دارای تابع هدف بهتری است (جزو M_1 جواب بهتر است)، نزدیک‌ترین همسایه‌اش را به سوی آن به طور چرخشی جذب می‌کنیم. این نوع از حرکت، بطور مثال در فضای دو بعدی، این امکان را می‌دهد که جواب همسایه که ابتدا در طرف چپ جواب بهتر قرار دارد، بسته به ابعاد مسأله و ایده‌ی کاربر، می‌تواند توسط حرکت چرخشی، سمت راست، بالا و یا پایین و یا همهٔ آنها را جستجو کند. اگر در این نقاط جدید جواب بهتری یافت شد، جواب جدید به عنوان جواب بهتر تلقی می‌شود و با نزدیک‌ترین همسایه‌اش این فرایند تکرار می‌شود. اما اگر جواب بهتری یافت نشد، شعاع چرخش را کم کرده و دوباره به دور جواب بهتر با حرکت چرخشی می‌چرخد. این فرایند چرخش و جذب (کم کردن شعاع چرخش)، با توجه به تعریف کاربر ادامه پیدا می‌کند. بطور مثال اگر بعد از سه چرخش، جواب بهتری نسبت به جواب بهتر اولیه که در مرکز این دایره قرار دارد، یافت نشد، این فرایند متوقف می‌شود و تمامی این فرایند برای یکی دیگر از M_1 جواب بهتر تکرار می‌شود. تا جایی که اطراف همه M_1 جواب بررسی شود. حال به M_1 جواب بهتر جدید دست پیدا کرده‌ایم. یعنی در جستجوی محل، هرگاه در نزدیکی هر یک از M_1 جواب اولیه،

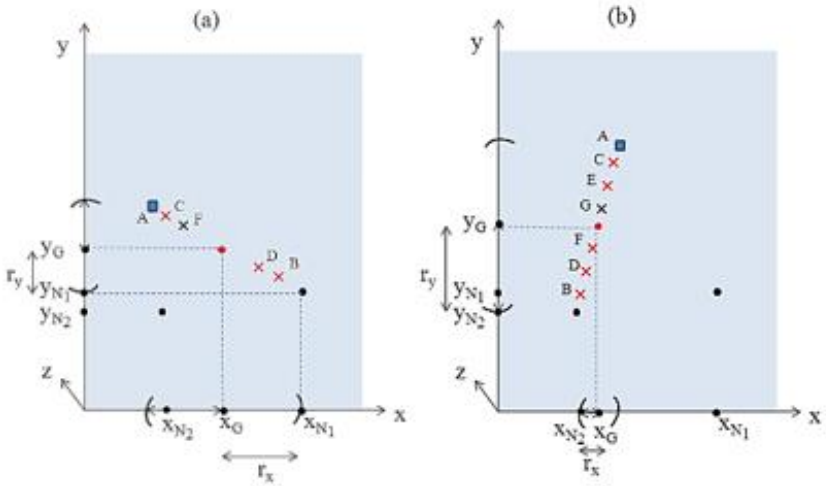
[۱۶] Keep
[۱۷] Swirl

با توجه به تعریف کاربر پیرامون نحوه‌ی چرخش و تعداد چرخش، جواب بهتری بیابیم، آن را جایگزین جواب بهتر اولیه می‌کنیم. شکل ۳ این فرایند را در یک فضای یک بعدی نمایش می‌دهد[۳].

در این شکل اگر تعداد بیشینه چرخش درصورت نرسیدن به جواب را S_{max}=۳ تعریف کنیم، تعداد ۵ (=۱−(۲×S_{max})) جواب همسایه‌ی جدید می‌توان تعریف کرد. همچنین شکل ۴ همین فرایند را در فضای دوبعدی نمایش می‌دهد. البته می‌توان در همین فضای دوبعدی، نحوه‌ی چرخش و یافتن همسایگان را به طور دیگری نیز تعریف کرد. از خصوصیات ویژه‌ی این مرحله این است که با توجه به اینکه منطق جذب و چرخش، منجر به یک جستجوی مناسب و هدفمند محلی می‌شود، اما در عین حال به کاربر این امکان را می‌دهد تا انواع ایده‌ها و روش‌های چرخش را متناسب با مسأله‌ی خود تعریف و پیاده‌سازی کند که از نقاط قوت این الگوریتم به حساب می آید[۳].



شکل ۳ – فرایند چرخش در یک فضای یک بعدی[۳].



شکل ۴ – فرایند چرخش در یک فضای دو بعدی[۳]

برای پیداکردن نزدیک‌ترین جواب به جواب بهتر در فضای J بعدی نیز می توان از فرمول زیر استفاده نمود:

$$d_i = \left(\sum_{j \in J} \left(Keshtel_j^{Lucky} - Keshtel_j^{i} \right)^2 \right)^{1/2} \qquad (۱-۶)$$

M_1 جواب بهتر توسط فرایند زیر که حاصل چرخش است، در صورت امکان بهبود می‌یابند:

$$
\begin{aligned}
&for\ \ i=1\ \ to\ \ M_1\ \ \ do\\
&S=1\\
&While\ \ S \prec S_{\max}\\
&y=Swirl(x_i^g)\\
&if\qquad f(y)\le f(x_i^g)\\
&\qquad\qquad x_i^g \longleftarrow y\\
&\qquad\qquad S=1\\
&\quad else
\end{aligned}
$$

۳-۵- عملگر جایگزینی[۱۸] (R):

تعداد M_2 جواب تصادفی تولید شده‌ی جدید، بصورت زیر جایگزین تعداد M_2 تا از جواب در هر تکرار از الگوریتم می‌شوند:

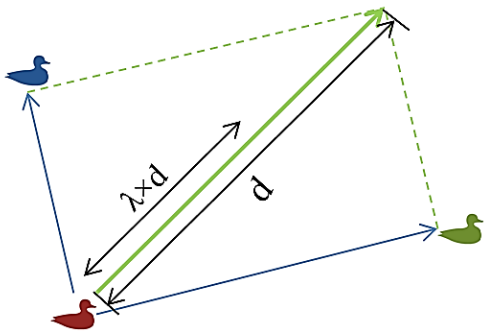
$$
\begin{aligned}
&for\ \ i=1\ \ to\ \ M_2\ \ \ do\\
&\qquad for\ \ \ \ j=1\ \ to\ \ n\ \ \ do\\
&\qquad\qquad x_{i,j}^g = L_j + Uniform(0,1)\times(U_j - L_j)\\
&\qquad end\\
&end\ .
\end{aligned}
$$

۳-۶- عملگر جابجائی[۱۹] (M)

کشتل‌ها در برکه به قایق‌های موتوری معروف هستند. آنها هر لحظه به دنبال غذا می‌گردند. همین خاصیت حریصانه‌ی جستجو باعث شده تا از رفتار تغذیه آنها در بهینه‌سازی استفاده و شبیه‌سازی شود. تعداد M_3 جواب باقیمانده را در فضای حل جابجا می‌کنیم تا مطمئن شویم که این مرحله به همراه مرحله‌ی قبلی که تولید جواب‌های تصادفی در فضای حل است، مأموریت اکتشاف را بخوبی انجام می‌دهند. البته سهم هرکدام را کاربر در تنظیم پارامترها و متناسب با نوع مسأله مشخص می‌کند.

وقتی کشتل‌ها در برکه به دنبال منبع غذائی حرکت می‌کنند (اکتشاف)، با درنظرگرفتن موقعیت مکانی همسایگان خود، نه صرفا نزدیکترین همسایه، به سمت فضای خالی بین آنها حرکت می‌کنند. به عبارتی دیگر، اگر در هر زمان بر روی یک محوطه از برکه خیره شویم، دیری نخواهد گذشت که در آن منطقه‌ی خالی، یک کشتل وارد خواهد شد. در شکل ۵ ورود یک کشتل به فضای بین کشتل‌های دیگر در فضای دوبعدی نمایش داده شده است. البته این حرکت می‌تواند توسط کاربر الگوریتم به گونه‌ای دیگر نیز، متناسب با نوع مسأله مورد مطالعه، تعریف شود. در این حرکت از پارامتر λ که از توزیع یکنواخت بین فاصله صفر و یک است، بهره گرفته می شود. تصادفی بودن مقدار λ، به دلیل لزوم تصادفی بودن ماهیت حرکات در الگوریتم‌های فراکاوشی است[۳].

[۱۸] Replace
[۱۹] Move



شکل ۵– حرکت یک کشتل به سمت فضای خالی اطرافش، $\lambda \sim U[0,1]$ [۴].

اما همانطور که بیان شد، الگوریتم‌های فراکاوشی ضمن اینکه در جستجو ماهیت تصادفی دارند، حتماً باید دارای منطق جستجو، بخصوص در بخش های اکتشاف و استخراج است که به مزیت‌های آن هم در بخش مربوطه اشاره شد. در نوشتار زیر، نوع دیگری از جابجائی جواب‌ها به نمایش گذاشته شده است:

$$
\begin{aligned}
&for\ i=1\ to\ M_3\ \ do\\
&\quad \lambda_1 \longleftarrow Uniform(0,1)\\
&\quad \lambda_2 \longleftarrow Uniform(0,1)\\
&\quad v_i^g = \lambda_1 \times x_{r1}^g + (1-\lambda_1)\times x_{r1}^g\\
&\quad x_i^g = \lambda_2 \times x_i^g + (1-\lambda_2)\times v_i^g\\
&end
\end{aligned}
$$

۳-۷- شرط توقف

معیار توقف در الگوریتم‌های کاوشی متفاوت است. کاربر می‌تواند متناسب با نوع مسأله، این معیار یا معیارها را معرفی کند. معیارها می‌توانند تعداد تکرار، کیفیت بهترین جواب و یا زمان صرف شده باشد. البته می‌توان ترکیبی از آنها را با عملگرهای "و" و "یا" به همراه ایده‌های جدید استفاده کرد. در بعضی مواقع نیز نیاز است تا پارامترهای معیار توقف، تنظیم شود که البته امری نادر در مقالات است. در این پژوهش شرط توقف الگوریتم کشتل برای حل مسئله تعیین محدوده نهایی تعداد تکرار و محاسبه زمان حل مسئله در رسیدن به همگرایی می‌باشد[۳].

۴- نحوه پیاده سازی الگوریتم کشتل در مسئله تعیین محدوده نهایی دو بعدی معادن روباز

مسئله محدوده نهایی بعد از تشکیل مدل بلوکی معدن مورد بحث قرار می‌گیرد این مسئله یکی از مسائل NpHard به حساب می‌آید در این پژوهش سعی شده است با استفاده از الگوریتم کشتل به حل آن پرداخته شود. در شکل ۶ ارزش بلوک‌ها در موقعیت‌های مختلف از مدل بلوکی به صورت یک ماتریس آورده شده است.

1	4	1	-1	1	4	0	0	0	0	0	0	4	5	5	3
4	4	2	2	2	6	5	0	2	1	0	-1	3	-1	7	5
-1	5	-1	2	-1	1	3	3	7	6	4	2	-1	1	5	1
7	1	6	5	5	3	5	4	-1	6	3	3	1	2	-1	5
-1	7	1	2	5	-1	-1	5	2	-1	2	7	7	4	7	3
7	1	3	5	1	6	5	2	-1	3	7	2	-1	5	-1	7
2	6	-1	2	7	4	1	1	7	-2	5	-1	1	3	5	1

شکل۶- ارزش بلوک‌ها در موقعیت‌های مختلف از مدل بلوکی

برای حل مسئله تعیین محدوده نهایی در متلب ابتدا مدل بلوکی به صورت یک ماتریس m*n به صورت یک عملگر به نرم افزار وارد می‌شود.

تعدادی کشتل را به عنوان جمعیت اولیه برای حل مسئله الگوریتم کشتل انتخاب می‌کنیم. هر یک از کشتل‌ها به عنوان جواب اولیه در نظر گرفته می‌شوند. تعداد کشتل‌های مدنظر به عنوان کشتل‌های خوش شانس(locky keshtel) و کشتل‌های بد شانس (bedKeshtel) تقسیم بندی می‌شوند. در مرحله دوم برای حل این مسئله، شیب محدوده نهایی ۱:۱ (۴۵درجه) برای مدل بلوکی در نظر گرفته می‌شود. تعداد جمعیت اولیه در نظر گرفته شده در متلب موقعیت کشتل‌ها به صورت احتمالی داخل محدوده نهایی به صورت شکل۸ به نمایش گذاشته می‌شود.

1	4	1	-1	1	4	0	0	0	0	0	0	4	5	5	3
4	4	2	2	2	6	5	0	2	1	0	-1	3	-1	7	5
-1	5	-1	2	-1	1	3	3	7	6	4	2	-1	1	5	1
7	1	6	5	5	3	5	4	-1	6	3	3	1	2	-1	5
-1	7	1	2	5	-1	-1	5	2	-1	2	7	7	4	7	3
7	1	3	5	1	6	5	2	-1	3	7	2	-1	5	-1	7
2	6	-1	2	7	4	1	1	7	-2	5	-1	1	3	5	1

شکل ۷- در نظر گرفتن شیب ۱:۱ (۴۵درجه) به مدل بلوکی

1	4	1	-1	1	4	0	0	0	0	0	0	4	5	5	3
4	4	2	2	2	6	5	0	2	1	0	-1	3	-1	7	5
-1	5	-1	2	-1	1	3	3	7	6	4	2	-1	1	5	1
7	1	6	5	5	3	5	4	-1	6	3	3	1	2	-1	5
-1	7	1	2	5	-1	-1	5	2	-1	2	7	7	4	7	3
7	1	3	5	1	6	5	2	-1	3	7	2	-1	5	-1	7
2	6	-1	2	7	4	1	1	7	-2	5	-1	1	3	5	1

شکل ۸- در نظر گرفتن موقعیت احتمالی برای کشتل‌ها (جواب‌های اولیه)

هر یک از کشتل‌های در نظر گرفته شده در شکل ۸ می‌تواند یک جواب برای مسئله تعیین محدوده نهایی باشد. اما لزوما ممکن است یک کشتل نتواند محدوده نهایی بهینه را تحویل دهد. به همین دلیل مجموعه این کشتل‌ها می‌تواند یک محدوده‌ای بهینه را تحویل می‌دهند. برای اینکه بتوانیم یک محدوده نهایی بهینه دو بعدی داشته باشیم بعد از مشخص کردن موقعیت احتمالی کشتل‌ها در داخل محدوده نهایی وارد حلقه اصلی الگوریتم می‌شویم موارد ذکر شده در قسمت ذیل را برای ادامه حل مسئله تعیین محدوده نهایی اجرا می‌کنیم.

الف- عملگر ماندگاری برای تعیین محدوده نهایی دو بعدی

در این مرحله از الگوریتم کشتل، کشتل‌های خوش شانسی که جواب بهتری نسبت به بقیه کشتل‌ها داشته باشند بر اساس مقدار ارزش خود مرتب می‌شوند. ارزش مجموعه بلوک‌های آن کشتل بیشتر از بقیه کشتل‌ها خواهد بود.

ب- چرخش

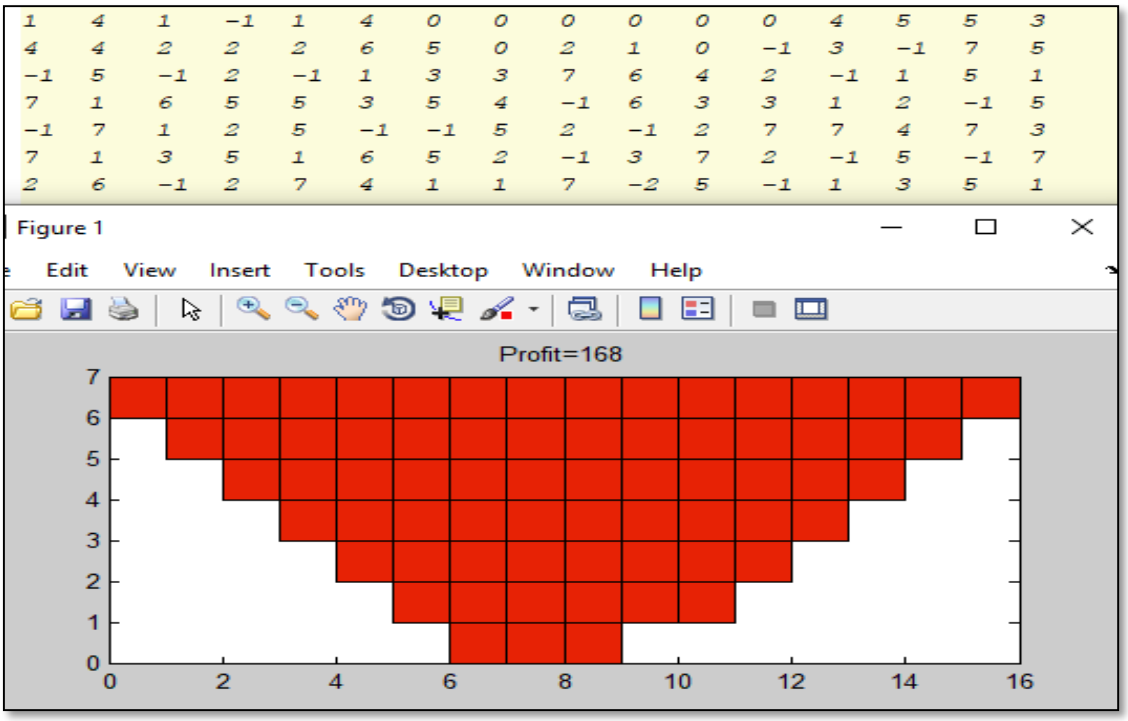
در این مرحله به کشتل‌ها فرصت چرخش در اطراف کشتل‌های خوش شانس داده می‌شود تا جواب‌های محلی بهینه شود.

پ- جابجایی

در این مرحله از الگوریتم کشتل‌هایی که در محلی کم ارزش قرار گرفته‌اند به صورت احتمالی از محل خود حرکت کرده و به محلی دیگر جابجا می‌شوند در صورتی که ارزش بیشتری نسبت به کشتل‌های خوش شانس پیدا کرده باشند به عنوان کشتل خوش شانس معرفی می‌شوند و با کشتل‌های خوش شانس مقایسه شده و در صورتی که این کشتل ارزش بیشتری نسبت به کشتل‌های خوش شانس قبلی داشته باشد یا کشتلی که بهترین ارزش یا جواب بهینه را داشته باشد به عنوان جواب بهینه انتخاب خواهد شد.

ت- شرایط توقف

در مسئله تعیین محدوده نهایی شرط توقف رسیدن به پاسخی با کمترین هزینه یا بیشترین سود ارزش خالص فعلی می باشد. بعد از نهایی شدن محاسبات تعیین محدوده نهایی با استفاده از الگوریتم کشتل به یک محدوده نهایی بهینه شکل ۹ می‌رسیم.



شکل ۹- نتیجه حل مسئله تعیین محدوده نهایی بهینه با استفاده از الگوریتم کشتل در نرم افزار متلب

۵- ارزیابی و مقایسه الگوریتم کشتل با الگوریتم لرچ و گروسمن

در این بخش سعی شده است مسئله تعیین محدوده نهایی را با استفاده از روش لرچ گروسمن محاسبه نموده و با نتایج الگوریتم کشتل مورد مقایسه قرار بگیرد. در مرحله یک از الگوریتم لرچ و گروسمن ابتدا ارزش مدل بلوکی را در اکسل به صورت دو بعدی وارد نموده و هر مولفه‌ای از ماتریس را به سطر بالای آن جمع می‌کنیم. در مرحله سوم از سمت چپ داده‌ها شروع کرده و برای هر مولفه سه مولفه سمت چپ را مقایسه کرده مولفه‌ای که مقدار بیشتری داشته باشد را جمع میشود و در نهایت مدل بلوکی به صورت شکل ۱۰ حاصل می‌شود. نتیجه دو الگوریتم کشتل و الگوریتم لرچ و گروسمن برابر بوده و مقدار کل درآمد(Profit) برابر ۱۶۸ می‌باشد. در مقایسه دو الگوریتم لرچ و گروسمن و الگوریتم کشتل به نتایجی یکسان رسیده ایم و این نشان دهنده کارایی الگوریتم در مسئله تعیین محدوده نهایی می‌باشد.

1	4	1	-1	1	4	0	0	0	0	0	0	4	5	5	3
	4	2	2	2	6	5	0	2	1	0	-1	3	-1	7	
		-1	2	-1	1	3	3	7	6	4	2	-1	1		
			5	5	3	5	4	-1	6	3	3	1			
				5	-1	-1	5	2	-1	2	7				
					6	5	2	-1	3	7					
						1	1	7							

شکل ۱۰- نتیجه تعیین محدوده نهایی با استفاده از روش لرچ و گروسمن

نتایج محاسبه ارزش محدوده نهایی معدن با استفاده از الگوریتم کشتل و روش لرچ و گروسمن برابر ۱۶۸دلار می‌باشد زمان مورد نیاز برای برآورد آن برابر **۲/۰۸ ثانیه** می‌باشد. و الگوریتم در ۴۵ تکرار به همگرایی رسیده است.

۶- نتیجه و جمع بندی

امروزه با توجه به پیشرفت علم و تکنولوژی نیاز داریم فعالیت‌های معدن‌کاری را بهینه نموده و با کمترین هزینه، بیشترین درآمد و استحصال فلز را انجام داده باشیم. عدم قطعیت‌ها در شرایط زمین شناسی، نوسانات قیمت بازار، ملزومات فنی و ... شرکت های معدنی را بر آن داشته تا پیوسته در حال توسعه پیشرفت های فنی برای دست یافتن به سود بیشتر، بهبود بهره برداری و تامین اهداف سرمایه گذارانشان باشند. با استفاده از الگوریتم کشتل محدوده نهایی معدن با تعداد بلوک ۱۶*۷ فرضی محاسبه شده و در نهایت تعداد ۶۹ عدد بلوک داخل محدوده نهایی معدن قرار می‌گیرد. ارزش کل محدوده نهایی محاسبه شده با الگوریتم کشتل برای معدن برابر با پاسخ نهایی روش لرچ و گروسمن (۱۶۸ دلار) می‌باشد. زمان مورد نیاز

برای برآورد آن برابر ۲/۰۸ ثانیه می‌باشد و الگوریتم کشتل در ۴۵ تکرار به هگرایی رسیده است. نتایج نشان می‌دهد این الگوریتم برای انجام تعیین محدوده نهایی مناسب می‌باشد.

مراجع

[۱] م. اصانلو، "روش های استخراج معدن سطحی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر" ,vol جلد اول، ۱۳۹۳.

[۲]ع. علی، "روش مدلسازی بلوک های اقتصادی یک معدن روباز برای یافتن محدوده نهایی با کمک الگوریتم کولونی مورچگان،" تألیف *اولین کنفرانس فناوری های معدنکاری ایران*، یزد، ۱۳۹۱.

[۳] م. حاج آقایی کشتلی، "زمان بندی یکپارچه تولید و حمل ریلی در زنجیره تامین" رساله دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر سال ۱۳۹۴.

[4] M. Hajiaghaei-Keshteli, M. Aminnayeri, " Solving the integrated scheduling of production and railtransportation problem by Keshtel algorithm" Applied Soft Computing 25 (2014) 184–203.

[5] J. Whittle, "Beyond optimization in open pit design," in Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industries, 1988, pp. 331-337: Balkema.

[6] P. M ،"The simulation approach to open pit design تألیف "،*Proceeding of the ۵th symposium on the application of the computers and operations research in the mineral industries (APCOM)1965.* Arizona USA

[7] E. A. Wright ،"MOVING CONE II - A Simple Algorithm for Optimum Pit Limits Design تألیف "،*Proceedings of the ۲۸th Symposium on the application of computers and operations research in the mineral industries (APCOM1)1999.* ،Colorado USA

[8] J. R. T. a. N. A. B. Reed ،"Simulation of biological evolution and machine learning: I. Selection of self-reproducing numeric patterns by data processing machines, effects of hereditary control, mutation type and crossing." Journa "،Journal of theoretical biology ،۳ رقم ،۱۷ المجلد ،pp. ۱۹٦۷ ،۳٤۲-۳۱۹.

[9] H. a. G. I. F. Lerchs ،"Optimumm design of open pit Mine "،*CIM Bulletin* ،۵۸ المجلد ،pp. ۱۳۶۵ ،۵۴-۴۷.

[10] J. Picard ،"Maximal closure of a graph and applications to combinatorial problems . "،J. Manag. Sci ،۲۲ المجلد ،p. ۱۲۶۸–۱۹۷۶ ،۱۲۷۲

[11]A. S. Fraser ،"Simulation of Genetic Systems by Automatic Digital Computers. I. Introduction "،Australian Journal of Biological Sciences ،۱۰ المجلد ،p. ۴۸۴–۱۹۵۷ ،۴۹۱

[12] H. J. Bremermann ،"Optimization through evolution and recombination "،Self-organizing systems.۱۹۶۲ ،۹۳ المجلد ،

[13]"Optimization through evolution and recombination "،*Self-organizing systems*.۱۹۶۲ ،۹۳ المجلد ،

[14] J. R. T. a. N. A. B. Reed ،"Simulation of biological evolution and machine learning: I. Selection of self-reproducing numeric patterns by data processing machines, effects of hereditary control, mutation type and crossing." Journa "*Journal of theoretical biology* ،۳ رقم ،۱۷ المجلد ،pp. ۱۹۶۷ ،۳۴۲-۳۱۹.

[15] J. H. Holland ،Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence.۱۹۷۵ ،

[16] M. Dorigo تألیف ،*Optimization, Learning and Natural Algorithms* ،PhD thesis, Politecnico di Milano, Italy.۱۹۹۲ ،

[17] D.Karaboga ،"An idea based on honey bee swarm for numerical optimization "،TR-۰۶, October ۲۰۰۵

[18] D. Espinoza, M. Goycoolea, E. Moreno, and A. Newman, "MineLib: a library of open pit mining problems," Annals of Operations Research, vol. 206, no. 1, pp. 93114, 2013.

[19] Y. C. Kim, "Ultimate pit limit design methodologies using computer models-The state of the art," Mining engineering, vol. 30, no. 10, pp. 1454-1459, 1978.