

کاربرد الگوریتم مرغابی در برنامه‌ریزی تولید بلندمدت معادن روباز

سجاد رستمیان^۱، مجید عطایی پور^{۲*}، زینب جهانبانی^۳

۱. کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، s.rostamian.uut@gmail.com

۲. دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، map60@aut.ac.ir

۳. کاندیدای دکترا مهندسی استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، jahanbani1990@gmail.com

چکیده

تعیین محدوده نهایی بهینه و برنامه‌ریزی تولید معدن همواره یکی از چالش‌های اصلی حوزه فعالیت‌های معدنی بوده است. این دو مسئله، تعیین‌کننده مولفه‌های موثر در معدنکاری و تصمیم‌گیری‌های خرد و کلان پروژه معدنی به‌ویژه برنامه‌ریزی تولید است. مساله برنامه‌ریزی تولید معادن روباز با استفاده از روش‌های دقیق و روش‌های هوش مصنوعی قابل محاسبه می‌باشد. روش‌های دقیق معمولاً به نتیجه‌ای بهتر و بهینه خواهند رسید، اما در مسایل بزرگ با تعداد بلوک‌های زیاد ممکن است با زمان حل بسیار بالایی قادر به پاسخ‌گویی به مساله باشد. در این شرایط بهتر است از الگوریتم‌های هوش جمعی یا تکاملی برای تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید استفاده کرد. بهینه‌سازی مساله برنامه‌ریزی تولید شبیه به مسایل بهینه‌سازی دیگر بوده و با استفاده از یک منطق الگوریتمی در نرم‌افزار متلب قابل حل هستند. در این تحقیق از الگوریتم کشتل در متلب برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید استفاده شده است. ابتدا الگوریتم کشتل برای حل مساله دو بعدی و سه بعدی پیاده‌سازی شده و در نهایت معدن مس سونگون به عنوان مطالعه موردی انتخاب و نتایج حل مساله برنامه‌ریزی تولید با الگوریتم کشتل و نرم‌افزار NPV Scheduler مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم کشتل در مسئله برنامه‌ریزی تولید اختلاف ۱/۸ درصدی با نرم‌افزار NPV Scheduler دارد. مقایسه الگوریتم کشتل با نتایج الگوریتم گرشون و برنامه‌ریزی پویا در برنامه‌ریزی تولید دوبعدی و مقایسه نتایج حاصله از الگوریتم کشتل با نرم‌افزار NPV Scheduler در مسائل سه بعدی نشان‌دهنده کارایی مناسب آن در حل این مسائل است.

کلمات کلیدی

برنامه‌ریزی تولید، بهینه‌سازی، الگوریتم فراکاوشی کشتل (مرغابی)، معدن مس سونگون

تعیین محدوده نهایی بهینه و برنامه‌ریزی تولید^۱ معدن همواره یکی از چالش‌های اصلی حوزه فعالیت‌های معدنی بوده است. این دو مسئله، تعیین‌کننده مولفه‌های موثر در معدنکاری و تصمیم‌گیری‌های خرد و کلان پروژه معدنی به‌ویژه برنامه‌ریزی تولید است. برنامه‌ریزی تولید معدن روباز عبارت است از تعیین ترتیب استخراج بلوک‌های واقع در محدوده نهایی، به طوری که گردش فعلی معدن با توجه به محدودیت‌های موجود حداکثر باشد. با توجه به اینکه ارزش زمانی پول در دوران مختلف یکسان نیست و محدوده نهایی را نمی‌توان در یک سال عملیات، به اتمام رساند، به همین دلیل در برنامه‌ریزی تولید طوری عمل می‌شود که بیشترین سود حاصل معدن شود. بنابراین لازم است قسمت‌های پر ارزش محدوده در سال‌های اولیه استخراج شود. مشکل برنامه‌ریزی تولید معدن روباز شامل برنامه‌ریزی برای استخراج مواد در یک کانسار معدنی در افق چندین بازه زمانی است به طوری که ارزش خالص فعلی معدن به حداکثر برسد و انواع محدودیت‌های عملیاتی برآورده شود. این محدودیت‌ها بسته به سیستم استخراج و شرکت معدنکاری برای استخراج مواد متفاوت است [۱]. تا به حال برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید روش‌های جستجو محور و روش‌های ریاضی مختلفی مطرح شده است [۲]. روش‌های ریاضی عمدتاً بر پایه مبانی تحقیق در عملیات توسعه داده شده‌اند. الگوریتم‌های کاوشی و فراکاوشی اساس ریاضی نداشته و بر مبنای روش‌های جستجوگر پایه‌ریزی می‌شوند. ممکن است روش‌های جستجوگر به جوابی بهینه نرسند، اما جوابی بسیار نزدیک به روش ریاضی خواهند داشت. در سال‌های اخیر با گسترش و توسعه الگوریتم‌های الهام گرفته شده از طبیعت، طیف وسیعی از روش‌های بهینه‌سازی در راستای تحقق هرچه بیشتر این مهم پیش روی جامعه مهندسی معدن قرار گرفته است. برای حل این مسائل روش‌های مختلف جستجو، همواره مورد علاقه محققان فعال در حوزه بهینه‌سازی مسائل بزرگ و با زمان حل طولانی بوده است. اگر چه تاکنون روش‌های حل زیادی ارائه شده است، اما همواره قابلیت حل، زمان رسیدن به پاسخ و توانایی در رسیدن به بهترین پاسخ، مورد بحث بوده است. در مواجهه با مسائل در حوزه‌ها و اندازه‌های مختلف، این روش‌ها رفتارهای متفاوتی دارند و اغلب از تکنیک‌های تصادفی بهره می‌برند. روش‌های جستجو در بسیاری از مسائل علمی و مهندسی به کار گرفته می‌شوند و توانسته‌اند پاسخ‌های بهینه و یا نزدیک به بهینه را به دست آورند [۳]. تا به حال از الگوریتم‌های فراکاوشی زیادی برای حل مساله برنامه‌ریزی تولید در معادن استفاده شده است، اما در این تحقیقات صورت گرفته بسیاری از محدودیت‌ها و یا عدم قطعیت‌ها (مانند عدم قطعیت قیمت و عیار) بررسی نشده است. محققین به دنبال روش‌ها یا الگوریتم‌هایی انعطاف‌پذیر هستند تا بتواند تمامی موارد ذکر شده و حتی بیشتر از آن را حل نمایند و اگر در آینده در این زمینه تغییری اضافه یا کم شد، بتوان تغییرات را با سهولت اعمال نمود. یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی ارائه شده، الگوریتم کشتل^۲ است. این الگوریتم یکی از الگوریتم‌های هوشمند الهام گرفته شده از طبیعت است که از رفتار تغذیه نوعی مرغابی در برکه بهره می‌گیرد. در پژوهش حاضر کارایی این الگوریتم در مساله برنامه‌ریزی تولید معادن روباز امکان‌سنجی می‌شود.

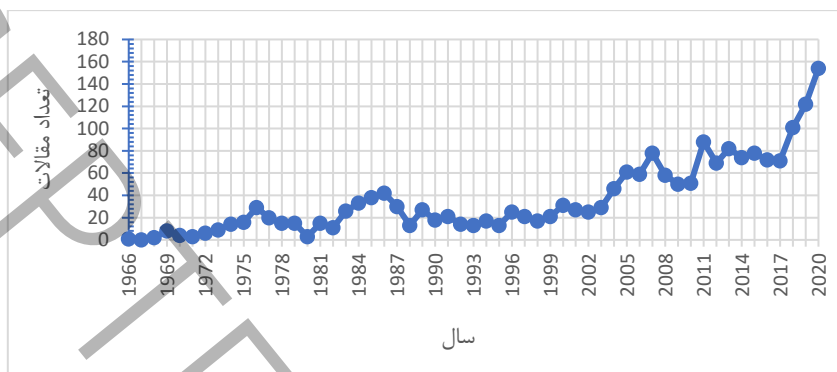
۲- پیشینه تحقیق

پس از تعیین محدوده نهایی معدن، مسئله برنامه‌ریزی تولید مطرح می‌شود. از دیرباز مطالعات فراوانی در زمینه برنامه‌ریزی تولید معادن انجام شده است. اهمیت موضوع برنامه‌ریزی تولید را می‌توان از روی رشد تحقیقات انجام شده براساس آمارهای به‌دست آمده نشان داد. براساس نمودار شکل ۱ روند رشد و تعداد تحقیقات انجام شده از سال ۱۹۶۶ تا ۲۰۲۰ بر روی موضوع برنامه‌ریزی تولید در معادن آورده شده

¹ Production Mine Planning

² Keshtel

است. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود، انجام تحقیقات با پیشرفت زمان از روند رو به رشدی برخوردار است و این امر می‌تواند نشان‌دهنده اهمیت موضوع مورد مطالعه در این پژوهش باشد.



شکل ۱. تعداد مقالات منتشر شده در هر سال [۴]

Figure 1: The number of published papers per year

برای انجام برنامه‌ریزی تولید معادن تاکنون روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی ارائه شده است. در جدول ۱، خلاصه‌ای از الگوریتم‌های ارائه شده در مسئله برنامه‌ریزی تولید اشاره شده است.

جدول ۱. خلاصه‌ای از الگوریتم‌های ارائه شده در حل مساله برنامه‌ریزی تولید

Table 1: A summary of the presented algorithms in solving the production mine planning problem

ردیف	توسعه دهنده‌گان	نام روش	سال ارائه	شماره منابع
۱	Dagdelen and Johnson	آزادسازی لاگرانژ	۱۹۸۶	[۵]
۲	Gershon	روش کاوشی برنامه‌ریزی پویا، تصادفی	۱۹۸۷	[۶]
۳	Denby and D. Schofield	الگوریتم ژنتیک	۱۹۹۸	[۷]
۴	L. Caccetta, P. Kelsey	آزادسازی لاگرانژ	۱۹۹۸	[۸]
۵	Akaike	تئوری گراف و آزادسازی لاگرانژ	۱۹۹۹	[۹]
۶	L. Caccetta and S. P. Hill	شاخه و برش	۲۰۰۳	[۱۰]
۷	Dimitrakopoulos & Ramazan	برنامه‌ریزی عدد صحیح	۲۰۰۴	[۱۱]
۸	Menabde & Froyland	برنامه‌ریزی عدد صحیح	۲۰۰۴	[۱۲]
۹	Kumral & Dowd	تبرید شبیه‌سازی شده	۲۰۰۵	[۱۳]
۱۰	Kawahata	آزادسازی لاگرانژ	۲۰۰۷	[۱۴]
۱۱	رمضان	برنامه‌ریزی عدد صحیح و روش تجمعی	۲۰۰۷	[۱۵]
۱۲	Boland et al	برنامه‌ریزی عدد صحیح و روش تجمعی	۲۰۰۹	[۱۶]
۱۳	Ferland, J. Amaya	گروه ذرات	۲۰۰۷	[۱۷]
۱۴	ستاروند	بهینه‌سازی کلونی مورچگان	۲۰۰۹	[۱۸]
۱۵	Bienstock and M. Zuckerberg,	آزادسازی لاگرانژ و تولید ستونی	۲۰۱۰	[۱۹]

ردیف	توسعه دهنده گان	نام روش	سال ارائه	شماره منابع
۱۶	Myburgh. C, Deb. K	الگوریتم پویا	۲۰۱۰	[۲۰]
۱۷	Moreno	روش کاوشی آزادسازی و برنامه ریزی خطی	۲۰۱۰	[۲۱]
۱۸	عسکری نسب و همکارانش	برنامه ریزی عدد صحیح و روش تجمعی	۲۰۱۱	[۲۲]
۱۹	عیوضی و عسکری نسب	شاخه و برش و روش تجمعی	۲۰۱۲	[۲۳]
۲۰	Chicoisne, R., Espinoza, D	سُرت مکانی روش کاوشی جستجوی محلی	۲۰۱۲	[۲۴]
۲۱	Dimitrakopoulos Lamghari &	جستجوی محلی	۲۰۱۲	[۲۵]
۲۲	Kawahata & Dagdelen	آزادسازی لاگرانژ	۲۰۱۳	[۱۴]
۲۳	L'Heureux, G., Gamache, M	برنامه ریزی عدد صحیح	۲۰۱۳	[۲۶]
۲۴	Kumral	تبرید شبیه سازی شده	۲۰۱۳	[۲۷]
۲۵	موسوی و همکارانش	برنامه ریزی عدد صحیح	۲۰۱۴	[۲۸]
۲۶	شیشوان و ستاروند	شبیه سازی کلونی مورچگان	۲۰۱۵	[۲۹]
۲۷	نوروزی و عطایی پور	الگوریتم زنبور	۲۰۱۷	[۳۰]
۲۸	O., Rivera Letelier et al.	برنامه ریزی عدد صحیح مختلط	۲۰۲۰	[۳۱]
۲۹	R., Lotfian et al.	بلاک کلاسترینگ	۲۰۲۱	[۳۲]
۳۰	J., Savolainen et al.	شبیه سازی	۲۰۲۲	[۳۳]
۳۱	G., Turan & A.H. Onur	روش تحلیل پارامتری	۲۰۲۳	[۳۴]

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می شود، محققان از دو دسته الگوریتم های دقیق و الگوریتم های تقریبی (هوشمند) برای حل مساله برنامه ریزی تولید بهره برده اند. الگوریتم های بهینه سازی دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند. اما در مورد مسائل بهینه سازی سخت کارایی ندارند و زمان حل آنها در این مسائل به صورت نمایی افزایش می یابد. به همین دلیل برای حل این گونه مسائل به روش های هوشمند روی آورده شده است. روش های هوشمند اغلب در بهینه سازی بر پایه جستجوی جواب های نزدیک به بهینه استوار هستند. این روش ها منجر به تعیین بهینه واقعی برای مسئله نخواهد شد، اما جواب با دقت کافی در زمانی معقول برای حل مسئله ارائه می دهند. روش های جستجوگر نیز به دو دسته الگوریتم های کاوشی و فراکاوشی تقسیم می شوند. الگوریتم های کاوشی برای حل مسائل بسیار حریص هستند و این بزرگ ترین عیب این گونه الگوریتم ها است. به طوری که این الگوریتم در بسیاری از مواقع در بهینه های محلی در دام می افتند؛ اما الگوریتم های فراکاوشی وابسته به مسئله نیستند و می توان از آنها در مسائل مختلف استفاده کرد و به طور کلی این الگوریتم ها به اندازه الگوریتم های کاوشی حریص نیستند و ممکن است به صورت موقت جواب مسئله بدتر شود، اما با این عمل باعث جست و جوی کامل فضای جواب می شوند. همچنین الگوریتم های فراکاوشی دارای مکانیزمی مانند جهش، انقلاب یا جابجایی برای فرار از بهینه های محلی می باشند. به عبارتی دو مشکل اصلی الگوریتم های کاوشی، قرار گرفتن آنها در بهینه های محلی و عدم قابلیت آنها برای کاربرد در مسائل مختلف است. الگوریتم های فراکاوشی برای حل این مشکلات مربوط به الگوریتم های کاوشی ارائه شده اند. در واقع الگوریتم های فراکاوشی، یکی از انواع الگوریتم های بهینه سازی تقریبی هستند که دارای مکانیزم های خروج از بهینه محلی می باشند و قابل کاربرد در طیف وسیعی از مسائل هستند. الگوریتم های فراکاوشی با الهام گیری از طبیعت به حل مسائل بهینه سازی می پردازند و جواب نزدیک به بهینه را در زمان مناسبی ارائه می دهند. این الگوریتم ها معمولا از قدرت حل بالایی برخوردارند و برای مسائل با ابعاد بزرگ نیز به جواب قابل قبولی می رسد [۳۰].

بررسی مطالعات نشان می‌دهد که اخیراً محققان از روش‌های فراکاوشی مانند الگوریتم ژنتیک، کلونی مورچگان، تجمع ذرات، زنبور، تبرید شبیه‌سازی شده و غیره، برای حل مساله برنامه‌ریزی تولید معادن روباز استفاده کرده‌اند. یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی ارائه شده، الگوریتم کشتل است. با وجود مطالعاتی که در زمینه برنامه‌ریزی تولید معادن و کاربرد روش‌های فراکاوشی برای حل آن انجام شده است، تاکنون پژوهشی در این زمینه با استفاده از الگوریتم کشتل، انجام نشده است و این امر نوآوری و اهمیت مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. از این‌رو، هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی کاربرد الگوریتم کشتل برای حل مساله برنامه‌ریزی تولید یا زمان‌بندی تولید معدن است به طوری که بیشترین سود یا ارزش خالص فعلی^۱ را به همراه داشته باشد. برای این منظور، کاربرد الگوریتم مرغابی امکان‌سنجی شده و برای بهینه‌سازی استفاده خواهد شد. برای پیاده‌سازی مساله برنامه‌ریزی تولید در این تحقیق، ابتدا از الگوریتم کشتل و مثال‌های فرضی استفاده می‌شود. در مرحله بعد، نتایج بهینه‌سازی دوبعدی با الگوریتم گرشون، برنامه‌ریزی پویا و نتایج بهینه‌سازی سه بعدی با نرم افزار NPV Scheduler مقایسه می‌شود. در نهایت الگوریتم کشتل بر روی داده‌های معدن مس سونگون پیاده‌سازی شده و با نتایج نرم‌افزار NPV Scheduler اعتبارسنجی می‌گردد.

۳- الگوریتم فراکاوشی کشتل (مرغابی)

الگوریتم کشتل یک الگوریتم فراکاوشی جدید است که از یک فرآیند موجود در طبیعت (رفتار نوعی مرغابی) الهام گرفته شده است. در ادامه مراحل اجرای این الگوریتم ارائه شده است [۳۵].

۳-۱- ایجاد جواب اولیه (فرود کشتل در برکه)

الگوریتم کشتل برای مسایل بهینه‌سازی پیوسته و گسسته کاربرد دارد. تابع هدف با $F(\vec{x})$ نشان داده می‌شود که $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$ است. فضای جواب موجه $\psi = \prod_{j=1}^{j=n} [L_j, U_j]$ است که L و U به ترتیب حدود بالا و پایین ناحیه جواب هستند [۱۸].

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، بنابراین از این پس این دو کلمه معادل هم هستند. نسل اولیه با تولید M کشتل (جواب) شروع می‌شود. این M جواب را به سه قسمت M_1 ، M_2 و M_3 تقسیم می‌کنیم به طوری که $M = M_1 + M_2 + M_3$ باشد.

هر جواب به صورت ماتریس یا بردار، مانند کروموزوم در الگوریتم ژنتیک، بسته به نوع مساله نشان داده می‌شود. هر جواب دارای n بُعد یا متغیر در فضای حل است، بنابراین (رابطه ۱):

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

^۱ Net present value

M نشان دهنده تعداد جواب برای $i = 1, \dots, M$ است، به طوری که $g = 0, 1, \dots, g_{max}$ نشان دهنده تکرار فعلی الگوریتم و g_{max} نشان دهنده بیشینه تعداد تکرارهای الگوریتم است. ایجاد جواب اولیه با توزیع یکنواخت تصادفی برای پوشش کل فضای حل انجام می شود، بنابراین j امین بُعد جواب i به صورت رابطه (۲) ایجاد می شود.

$$x_{i,j} = L_j + Uniform(0,1) \times (U_j - L_j) \quad (2)$$

۲-۳- عملگر ماندگاری^۱ (K) حفظ و بهبود M_1 جواب بهتر

در این گام، تعداد M_1 جواب که تابع هدف بهتری نسبت به بقیه جواب ها دارند، انتخاب می شود. به صورت موازی، در برکه به کشتل هایی که غذای بهتری پیدا کرده اند، کشتل های خوش شانس می گوئیم که معادل M_1 جواب بهتر است. در حقیقت مکانی که کشتل های خوش شانس در آن حضور دارند و غذای خوب را در آنجا پیدا کرده اند، به عنوان موقعیت جواب در نظر گرفته می شود.

۳-۳- چرخش^۲

به M_1 جواب بهتر که در مرحله قبلی شناسایی شده اند، اجازه می دهیم تا در اطراف خود بیشتر جست و جو کنند. این مرحله، همان بخش تمرکز یا استخراج و یا همان جست و جوی محلی در برخی الگوریتم های فراکاوشی است. برای هر یک از این M_1 جواب (کشتل های خوش شانس)، فرآیند پیش رو را در نظر می گیریم. در برکه، کشتل ها زمانی که متوجه شوند یک کشتل که در نزدیکی آنها است غذایی یافته است، به سمت آن نزدیک می شوند. این نزدیک شدن با یک حالت چرخشی رخ می دهد. با شبیه سازی این رفتار، زمانی که یک جواب تابع هدف بهتری دارد (جزو M_1 جواب بهتر است)، نزدیک ترین همسایه اش را به سوی آن به طور چرخشی جذب می کنیم. از خصوصیات ویژه این مرحله این است که با توجه به اینکه منطق جذب و چرخش، به یک جستجوی مناسب و هدفمند محلی منجر می شود، اما در عین حال به کاربر این امکان را می دهد تا انواع ایده ها و روش های چرخش را متناسب با مساله خود تعریف و پیاده سازی کند که از نقاط قوت این الگوریتم به حساب می آید.

برای پیدا کردن نزدیک ترین جواب به جواب بهتر در فضای J بعدی نیز می توان از فرمول ۳ استفاده کرد:

$$d_i = \left(\sum_{j \in J} (Keshtel_j^{Lucky} - Keshtel_j^i)^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

M_1 جواب بهتر به وسیله فرآیند زیر (رابطه ۴) که حاصل چرخش است، در صورت امکان بهبود می یابند:

for $i = 1$ to M_1 do (4)

$S = 1$

While $S < S_{max}$

$y = Swirl(x_i^g)$

if $f(y) \leq f(x_i^g)$

¹ Keep

² Swirl

$$x_i^g \leftarrow y$$

$$S = 1$$

else

۴-۳- عملگر جایگزینی^۱ (R):

تعداد M_2 جواب تصادفی تولید شده جدید، به صورت زیر (رابطه ۵) جایگزین تعداد M_2 تا از جواب در هر تکرار از الگوریتم می‌شوند:

```

for i = 1 to M2 do
    for j = 1 to n do
        xi,jg = Lj + Uniform(0,1) × (Uj - Lj)
    end
end
end
    
```

(۵)

۵-۳- عملگر جابه‌جایی^۲ (M)

کشتل‌ها در برکه به قایق‌های موتوری معروف هستند. آنها هر لحظه به دنبال غذا می‌گردند. همین خاصیت حریمانه جستجو باعث شده تا از رفتار تغذیه آنها در بهینه‌سازی استفاده و شبیه‌سازی شود. تعداد M_3 جواب باقیمانده را در فضای حل جابه‌جا می‌کنیم تا مطمئن شویم که این مرحله به همراه مرحله قبلی که تولید جواب‌های تصادفی در فضای حل است، ماموریت اکتشاف را به خوبی انجام می‌دهند. البته سهم هر کدام را کاربر در تنظیم پارامترها و متناسب با نوع مساله مشخص می‌کند. در رابطه ۶، نوع دیگری از جابه‌جایی جواب‌ها نشان داده شده است:

```

for i = 1 to M3 do
    λ1 ← Uniform(0,1)
    λ2 ← Uniform(0,1)
    vig = λ1 × xr1g + (1 - λ1) × xr1g
    xig = λ2 × xig + (1 - λ2) × vig
end
    
```

(۶)

۶-۳- شرط توقف

معیار توقف در الگوریتم‌های کاوشی متفاوت است. کاربر می‌تواند متناسب با نوع مساله، این معیار یا معیارها را معرفی کند. معیارها می‌توانند تعداد تکرار، کیفیت بهترین جواب و یا زمان صرف شده باشند. البته می‌توان ترکیبی از آنها را با عملگرهای "و" و "یا" به همراه

¹ Replace

² Move

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 مساله تعیین محدوده نهایی تعداد تکرار و محاسبه زمان حل مساله در رسیدن به همگرایی است.

۴- برنامه‌ریزی تولید معادن روباز با استفاده از الگوریتم کشتل

بعد از تعیین محدوده نهایی با استفاده از الگوریتم کشتل در ادامه به ترتیب به برنامه‌ریزی تولید دو بعدی و سه بعدی پرداخته می‌شود. در ادامه، نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم آورده شده است.

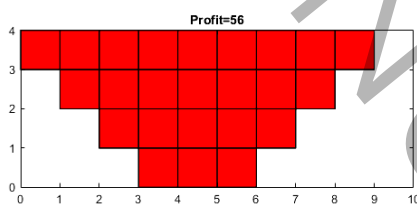
۴-۱- نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم کشتل در مساله برنامه‌ریزی تولید دو بعدی

برای انجام برنامه‌ریزی تولید دو بعدی معدن، داده‌های اقتصادی موجود در شکل ۲ (واحد اعداد موجود در شکل، واحد پول می‌باشند) و محدوده نهایی این مدل بلوکی (شکل ۳) مورد استفاده قرار گرفت. برای برنامه‌ریزی تولید دو بعدی، ابتدا تعداد بلوک‌های داخل محدوده نهایی محاسبه می‌شوند. در شکل ۳ تعداد بلوک‌های داخل محدوده نهایی برابر ۲۴ عدد بلوک می‌باشند. نرخ تنزیل در نظر گرفته شده برابر با ۱۰ درصد می‌باشد. در این مثال ظرفیت سالانه استخراج معدن نیز برابر با ۴ عدد بلوک در نظر گرفته شده است.

-1	6	2	5	6	-4	2	-2	4	-2
-1	1	3	8	-4	10	3	1	-3	1
1	2	-3	10	-3	-2	-10	-2	-1	-2
-1	1	-3	4	10	10	6	-1	2	-1

شکل ۲. ارزش‌های بلوک‌ها در موقعیت‌های مختلف از مدل بلوکی فرضی (واحد پول) [۳۶]

Figure 2: The value of blocks in different positions of the hypothetical block model



شکل ۳. محدوده نهایی بهینه مدل بلوکی فرضی

Figure 3: The optimal ultimate limit of the hypothetical block model

همانطور که در بخش ۳ نیز به آن اشاره شد، گام‌های الگوریتم کشتل شامل: الف) ایجاد جواب‌های اولیه، ب) عملگر ماندگاری، پ) چرخش، ج) جایگزینی، د) جابجایی و ه) توقف می‌باشد. در ادامه مراحل اجرای این الگوریتم برای حل مساله برنامه‌ریزی تولید در دو بعد آورده شده است.

الف- ایجاد جواب‌های اولیه

کشتل‌ها (راه‌حل‌ها) بر اساس ارزش خود مرتب می‌شوند. کشتلی که جواب بیشتری را دارد به عنوان کشتل خوش شانس انتخاب می‌شود. در این مثال کشتل شماره ۴ به عنوان کشتل خوش شانس انتخاب شده است.

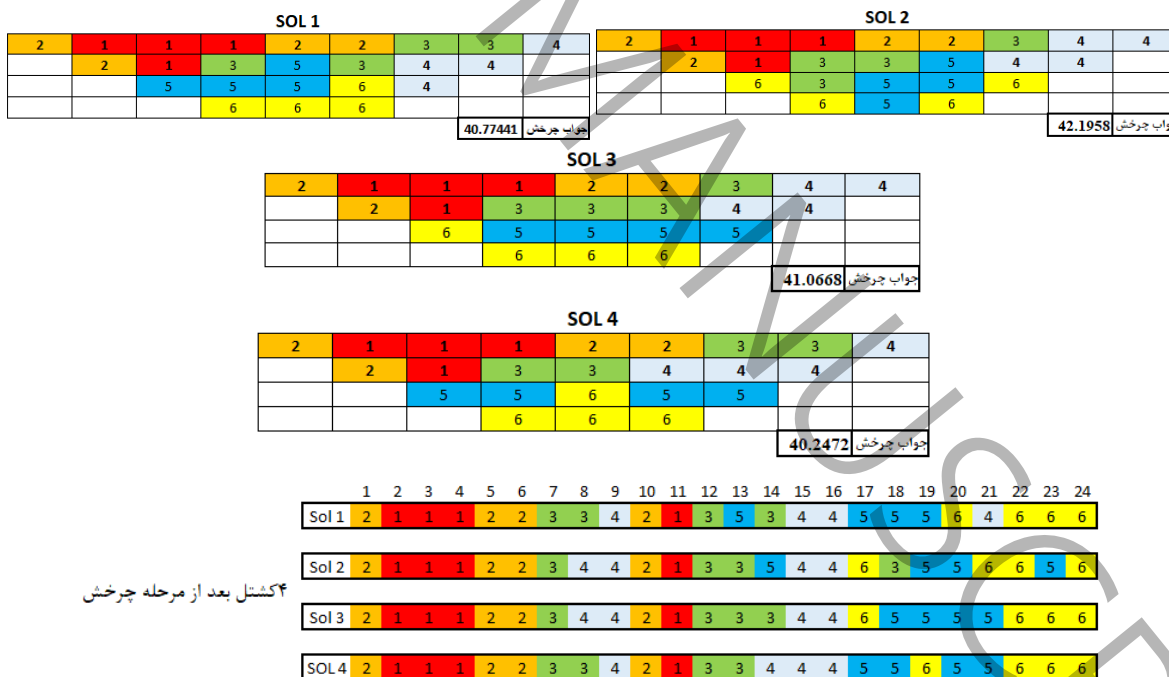
ب- عملگر ماندگاری

تعداد بلوک‌ها و ارزش کشتل شماره ۴ در بهترین کشتل^۱ ذخیره می‌شود (بر اساس واحد پول).

Best Keshtel1=40.24

پ- عملگر چرخش

در گام چرخش کشتل‌های بد شانس در اطراف کشتل خوش شانس چرخش انجام می‌دهند و اگر جوابی بهتر از بهترین کشتل پیدا کردند. در گام جایگزینی، کشتل خوش شانس جایگزین بهترین کشتل خواهد شد. برای چرخش در این مرحله کشتل‌ها تلاش می‌کنند به کشتل خوش شانس نزدیک شوند و در نهایت جواب آن‌ها در راه‌حل خود ذخیره می‌شود. سال یک در راه‌حل ۴ دارای جواب بهتری می‌باشد و ارزش آن برابر با ۱۴/۵۴ واحد می‌باشد در نتیجه کشتل‌ها به سمت کشتل ۴ حرکت می‌کنند. در این گام دو سال از بلوک‌های کشتل‌های بد شانس نظیر به نظیر برابر با کشتل خوش شانس می‌شود. این بلوک‌ها با اعداد یک و دو در SOL4 شکل ۴ نشان داده شده‌اند. کشتل‌ها در سال‌های سوم به بعد در بلوک‌های باقی مانده جواب تصادفی تولید می‌کنند. در شکل ۵ جواب کشتل‌ها بعد از چرخش کشتل‌ها نشان داده شده است. بعد از گام چرخش کشتل‌ها بر اساس ارزش خود مرتب می‌شوند. در این گام کشتل شماره ۲ ارزش بیشتری یافته است.



شکل ۵. موقعیت کشتل‌ها بعد از مرحله چرخش

Figure 5: The position of the Keshtels after swirl

به عنوان جواب هر تکرار حاصل خواهد شد. Best Keshtel در نظر گرفته می‌شود و بعد از اتمام یک تکرار، Best Keshtel برابر با Solution با ارزش ترین^۱

ج- عملگر جایگزینی

در این گام کشتل خوش شانس در گام چرخش با بهترین کشتل مورد مقایسه قرار می گیرد. در صورتی که مقدار بیشتری داشته باشد جایگزین آن می شود.

Best Keshtel2 = 42.19

د- جابجایی

برای اینکه الگوریتم در جواب های محلی گیر نکند گام جابجایی مورد استفاده قرار می گیرد. در این گام کشتل های بد شانس به صورت تصادفی جابجا می شوند و جواب تصادفی ایجاد می کنند. در مثال ذکر شده همانند ایجاد جواب اولیه عمل می شود. کشتل شماره ۲ در این گام برابر با گام چرخش خواهد بود. اما بقیه کشتل ها پاسخ های تصادفی جدیدی را به دست می آورند (شکل ۶). کشتل ها بر اساس ارزش خود مرتب می شوند. کشتل شماره ۳ به عنوان کشتل خوش شانس در این تکرار خواهد بود.

Best Keshtel3 = 43.65

SOL 1

2	1	1	1	1	3	3	4	4	
	2	2	2	3	5	4	4		
		6	3	5	5	5			
			6	6	6				
								42.21632	جواب جابجایی

SOL 2

2	1	1	1	2	2	3	4	4	
	2	1	3	3	5	4	4		
		6	3	5	5	6			
			6	5	6				
								42.1958	جواب جابجایی

SOL 3

5	3	1	1	1	2	2	4	4	
	5	3	1	2	2	4	4		
		5	3	3	6	6			
			5	6	6				
								43.6525	جواب جابجایی

SOL 4

4	3	2	1	1	1	2	3	5	
	4	3	2	1	2	3	5		
		4	4	6	5	5			
			6	6	6				
								40.7108	جواب جابجایی

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Sol 1	2	1	1	1	1	3	3	4	4	2	2	2	3	5	4	4	6	3	5	5	6	6	6	6
Sol 2	2	1	1	1	2	2	3	4	4	2	1	3	3	5	4	4	6	3	5	5	6	6	5	6
Sol 3	5	3	1	1	1	2	2	4	4	5	3	1	2	2	4	4	5	3	3	6	6	5	6	6
SOL 4	4	3	2	1	1	1	2	3	5	4	3	2	1	2	3	5	4	4	6	5	5	6	6	6

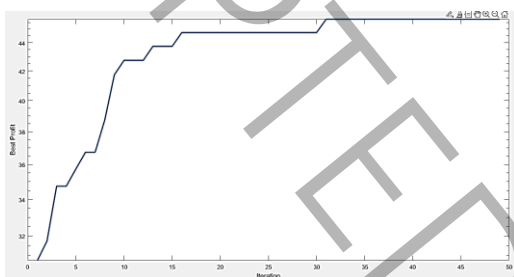
۴ کشتل بعد از مرحله جابجایی

شکل ۶. موقعیت کشتل ها در مرحله جابجایی

Figure 6: The position of the Keshtels in move step

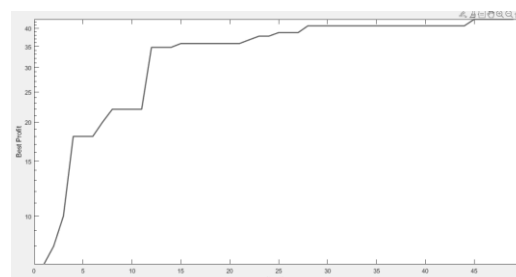
ه- توقف

یک تکرار از الگوریتم تا این گام پیاده‌سازی شد. دستور توقف در الگوریتم زمانی صادر می‌شود که الگوریتم به نتیجه بهینه رسیده باشد و بعد از تعدادی تکرار نتیجه آن تغییر نکند. برای بهبود جواب تعداد کشتل‌ها و تعداد تکرارها توسط کاربر افزایش می‌یابد و نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۷ و ۸ به ترتیب جواب نهایی الگوریتم با ۱۰ کشتل و ۳۰ کشتل آورده شده است. الگوریتم با ۱۰ کشتل به جواب بهینه نرسیده و پاسخی برابر با ۴۲/۷ بدست آورده است. دلیل بهینه نشدن مسئله می‌تواند تعداد کشتل کم یا تعداد تکرار کم باشد که با افزایش تعداد کشتل جواب آن بهبود یافته است. در شکل ۹ جواب نهایی برای داده‌ها ذکر شده است.



شکل ۸. جواب نهایی الگوریتم با ۳۰ کشتل

Figure 8: Final algorithm's answer with 10 Keshtels



شکل ۷. جواب الگوریتم با ۱۰ کشتل

Figure 7: Algorithm's answer with 10 Keshtels

4	2	1	1	1	3	2	4	2	
0	5	2	1	3	3	4	4	0	
0	0	6	3	5	5	6	0	0	
0	0	0	6	5	6	0	0	0	
								جواب نهایی	45.4764

شکل ۹. نتیجه الگوریتم کشتل برای برنامه‌ریزی تولید داده‌های مذکور ($NPV = 45.47$)

Figure 9: The result of Keshtel algorithm for production planning of the mentioned data ($NPV=45.47$)

۴-۱-۱- مقایسه الگوریتم کشتل با الگوریتم گرشون

در این بخش نتایج حاصل از اجرای الگوریتم گرشون و الگوریتم کشتل مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل ۹ نتیجه برنامه‌ریزی تولید دو بعدی با استفاده از الگوریتم کشتل نشان داده شد. شکل ۱۰ نیز نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم گرشون را نشان می‌دهد.

-1	6	2	5	6	-4	2	-2	4	
0	1	3	8	-4	10	3	1	0	
0	0	-3	10	-3	-2	-10	0	0	
0	0	0	4	10	10	0	0	0	
1	31	42	38	36	24	25	10	5	
	2	24	36	25	19	11	1		
		1	24	21	18	0			
			4	10	10				
6	2	1	1	1	2	2	4	5	
	6	3	1	2	3	4	5		
		6	3	3	4	5			
			6	4	5				
								جواب گرشون	43.93341

شکل ۱۰. نتیجه برنامه‌ریزی تولید دو بعدی با استفاده از الگوریتم گرشون

Figure 10: The result of two-dimensional production planning using Gershon algorithm

نتایج برنامه‌ریزی تولید با الگوریتم کشتل برابر با $45/47$ واحد و الگوریتم گرشون برابر با $43/93$ واحد می‌باشد. در جدول ۲ نتایج ارزش خالص فعلی دو الگوریتم به صورت سالانه آورده شده است.

جدول ۲. نتایج ارزش خالص فعلی الگوریتم کشتل و گرشون به صورت سالانه

Table 2: The amount of net present value per year using Keshtel and Gershon algorithms

	الگوریتم گرشون	الگوریتم کشتل
۱ سال	۱۹/۱	۱۹/۱
۲ سال	۰	۱۲/۴
۳ سال	۱۵/۰	۹/۰
۴ سال	۶/۱	۰/۷
۵ سال	۳/۱	۳/۷
۶ سال	۰/۶	۰/۶
NPV	۴۳/۹	۴۵/۵

۲-۴- حل سه بعدی مساله برنامه‌ریزی تولید با الگوریتم کشتل

برای انجام برنامه‌ریزی تولید سه بعدی معدن، داده‌های اقتصادی موجود در شکل ۱۱ (واحد اعداد موجود در شکل، واحد پول می‌باشند) و محدوده نهایی این مدل بلوکی (شکل ۱۲) مورد استفاده قرار گرفت. برای پیاده‌سازی برنامه‌ریزی تولید با نرخ تنزیل ۱۰ درصد، ابتدا تعداد بلوک‌های قابل استخراج مشخص می‌شوند. در این مثال بلوک‌های داخل محدوده نهایی برابر با ۱۰۱ عدد می‌باشد. اگر برای حل مسئله شش سال زمان در نظر گرفته شود. در هر سال تعداد ۱۷ بلوک قرار می‌گیرد. (تعیین ترتیب استخراج سالانه به این صورت است که تعداد بلوک به تعداد سال استخراجی تقسیم می‌شود و از تابع راند^۱ برای تعیین تعداد بلوک سال اول تا یک سال مانده به سال آخر استفاده می‌شود

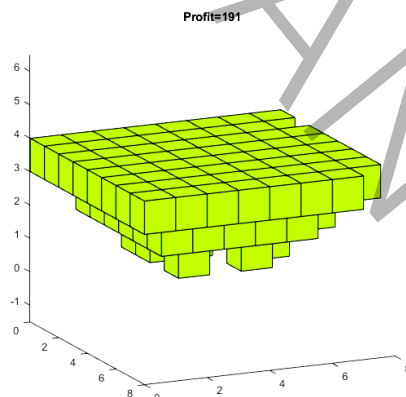
¹ Round

بلوک‌های مانده در آخر محدوده نهایی به سال آخر تعلق می‌گیرد. در ادامه مراحل اجرای این الگوریتم برای حل مساله برنامه‌ریزی تولید در سه بعد آورده شده است.



شکل ۱۱. ارزش بلوک‌ها در ۴ پله ۸*۸ (واحد اعداد=واحد پول) است

Figure 11: The value of blocks in 4 steps



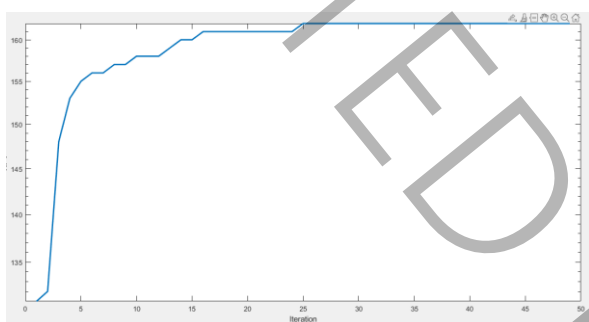
شکل ۱۲. نمایش محدوده نهایی بهینه مدل بلوکی فرضی

Figure 12: The optimal ultimate limit of the hypothetical block model

برای زمان‌بندی استخراج بلوک‌ها در مسائل سه بعدی، همانند روش دو بعدی برنامه‌ریزی تولید عمل می‌شود. در این بخش از تکرار گام‌های الگوریتم کشتل در مسائل سه بعدی پرهیز می‌شود و به صورت خلاصه نحوه پیاده‌سازی توضیح داده می‌شود. برای ایجاد جواب اولیه و تعیین ترتیب استخراج، هر کشتل از سال ۱ تا سال آخر به صورت تصادفی بلوک‌هایی را انتخاب می‌کنند. هر کشتل، ایجاد یک جواب اولیه

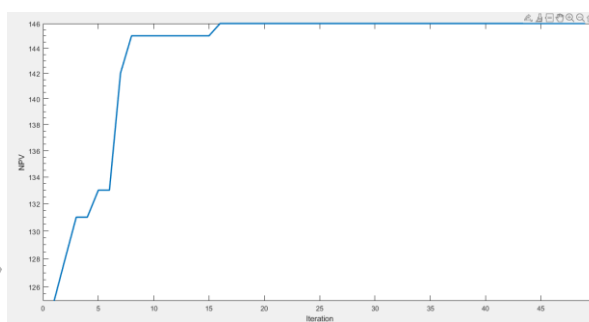
می‌کند. در گام ماندگاری کشتل خوش‌شانس (کشتل با ارزش بیشتر) با بلوک‌ها و ارزش خود در بهترین کشتل^۱ ذخیره می‌شود. در گام چرخش کشتل‌ها به سمت کشتل خوش‌شانس حرکت می‌کنند، در صورتی که ارزش بیشتری نسبت به بهترین کشتل داشته باشند. در گام جایگزینی کشتل‌ها مرتب شده و کشتل با ارزش بیشتر، جایگزین بهترین کشتل قبلی می‌شود. در گام جابجایی برای عبور از جواب بهینه محلی کشتل‌های بدشانس به صورت تصادفی ترتیب استخراج را مشخص می‌کنند. در نهایت بیشترین جواب به عنوان پاسخ تکرار اول مشخص می‌شود.

در شکل ۱۳ و ۱۴ به ترتیب جواب نهایی الگوریتم با ۱۵ کشتل و ۴۰ کشتل آورده شده است (الگوریتم با ۱۵ کشتل به جواب بهینه نرسیده است). در شکل ۱۵ جواب نهایی الگوریتم به صورت سه بعدی آورده شده است. ارزش خالص فعلی برای داده‌های ذکر شده برابر با ۱۶۲/۰۱ واحد می‌باشد.



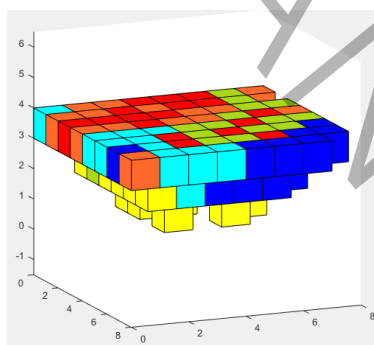
شکل ۱۴. نتایج الگوریتم کشتل با ۴۰ کشتل

Figure 14: Algorithm's answer with 40 Keshtels



شکل ۱۳. نتایج الگوریتم کشتل با ۱۵ کشتل

Figure 13: Algorithm's answer with 15 Keshtels

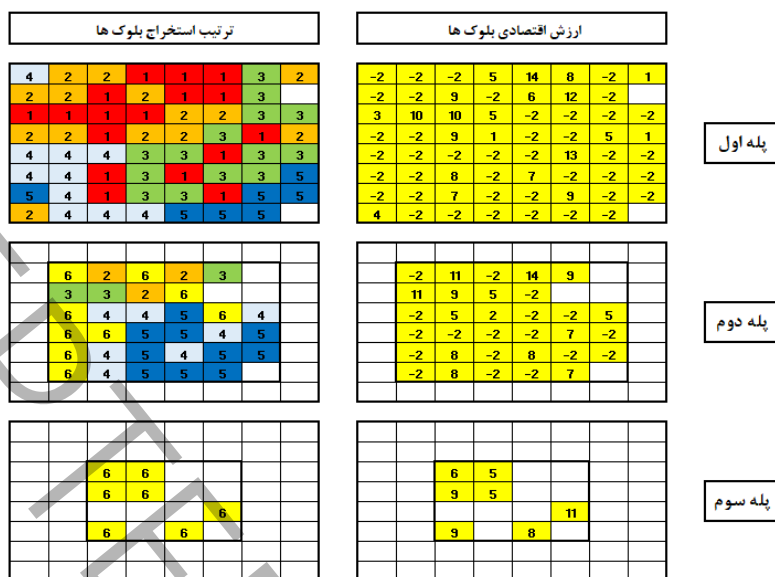


شکل ۱۵. نتایج الگوریتم کشتل در حل مسئله برنامه‌ریزی تولید

Figure 15: The results of Keshtel algorithm in solving the production mine planning problem

در شکل ۱۶ نتایج الگوریتم کشتل به صورت مقطعی از مدل بلوکی اقتصادی در ۳ پله نشان داده شده است.

در آن ذخیره می‌شود. این پارامترها در ابتدای فصل توضیح داده شده‌اند. Solution پارامتر یا انباشتگاه است که بیشترین Best Keshtel^۱



شکل ۱۶. نتایج الگوریتم کشتل در برنامه ریزی تولید سه بعدی (ارزش اقتصادی و ترتیب استخراج بلوک‌ها)

Figure 16: The results of Keshtel algorithm in three-dimensional production mine planning problem (economic values and the sequence of extracting the ore blocks)

در جدول ۳ ارزش خالص فعلی هر سال به صورت جداگانه آورده شده است. ارزش خالص فعلی سال اول بیشترین مقدار را دارد.

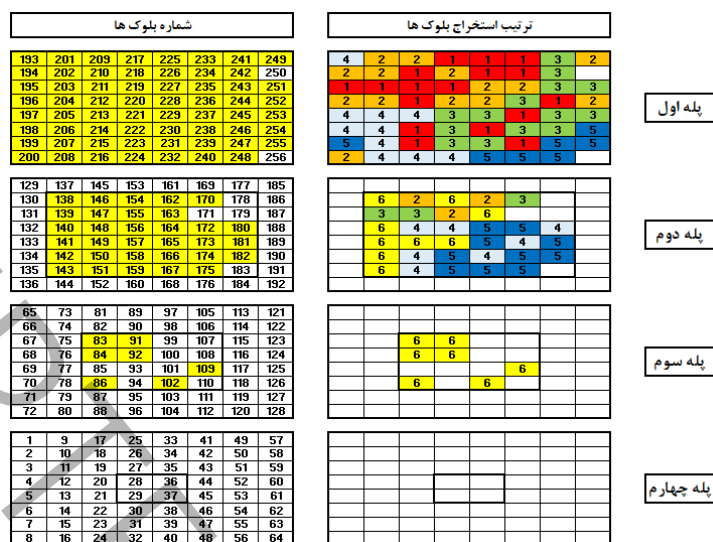
جدول ۳. ارزش خالص فعلی ترتیب استخراج شش سال با الگوریتم کشتل

Table 3: Extracting the ore blocks in 6 years and the amount of NPV per year using Keshtel algorithm

	الگوریتم کشتل
سال ۱	۱۱۰/۹
سال ۲	۱۴/۰۵
سال ۳	۰/۷۵
سال ۴	۱۵/۷۱
سال ۵	-۱۵/۵۲
سال ۶	۱۹/۷۵
NPV	۱۶۲/۰۱

۴-۲-۱- مقایسه نتایج الگوریتم کشتل با نرم‌افزار NPV Scheduler

در این بخش نتایج حاصل از اجرای الگوریتم کشتل و نرم‌افزار NPV Scheduler مورد مقایسه قرار گرفته است. محاسبات نشان می‌دهند که نتایج NPV در الگوریتم کشتل برای این تعداد از داده‌ها با نتایج نرم‌افزار NPV Scheduler برابر می‌باشد، با این تفاوت که بلوک شماره ۱۵۷ در نرم‌افزار NPV Scheduler، به سال ششم اختصاص داده شده است. شماره بلوک و ترتیب استخراج در شکل ۱۷ آورده شده است.



شکل ۱۷. نتایج نرم افزار NPV Scheduler برای داده‌های سه بعدی

Figure 17: The results of NPV Scheduler software for three-dimensional data

۵- اعتبارسنجی

۵-۱- مقدمه‌ای در مورد مدل‌سازی و بلوک‌بندی عیاری معدن مس سونگون

برای مدل‌سازی معدن مس سونگون از تعداد ۱۲۱ گمانه با متوسط عمق ۴۲۶ متر و ۲۰۹۸۳ نمونه عیاری استفاده شده است. هر یک از گمانه‌ها به صورت متوسط ۱۰۵ متر از هم فاصله دارند و شعاع تاثیر هر یک از گمانه‌ها ۶۰ متر در نظر گرفته شده است. به دلیل تعداد زیاد بلوک‌های محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید معدن سونگون، بهتر است برای افزایش سرعت محاسبات در نرم‌افزار متلب ارزش تعدادی از بلوک‌ها در یک بلوک گنجانده شود.

۵-۲- پارامترهای محاسبه تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید

مهم‌ترین پارامترهای تعیین محدوده نهایی شامل قیمت، عیار میانگین بلوک و عیار حد، حجم بلوک، وزن مخصوص، درصد بازیابی، هزینه استخراج ماده معدنی و باطله، هزینه فرآوری، هزینه ذوب، هزینه پالایش و فروش است. در جدول ۴ پارامترهای مورد نیاز برای تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید آورده شده است.

جدول ۴. پارامترهای محاسبه ارزش بلوک معدن مس سونگون [۳۷]

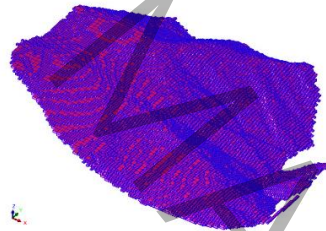
Table 4: The influential factors for calculating the block economic value of Songun Copper Mine

مقدار	توضیح	کلمات اختصاری	ردیف	مقدار	توضیح	کلمات اختصاری	ردیف
۸۲/۹	درصد بازیابی	R	۷	۱/۱ دلار بر تن	هزینه استخراج هر تن سنگ	C _o	۱
۷۰۰۰ دلار بر تن	قیمت هر تن کانسنگ	P	۸	۹ دلار بر تن	هزینه فرآوری یک تن کانسنگ	F	۲

۳	C_w	نرخ تنزیل در نظر گرفته شده	۱۰ درصد	۹	D_o	وزن مخصوص نسبی ماده معدنی	$۲/۵ + ۶/۴ * g$
۴	S	هزینه فروش	۲۰ دلار بر تن	۱۰	D_w	وزن مخصوص نسبی باطله	۲/۵
۵	g_c	عیار حد	۰/۱۷	۱۱	V_b	حجم یک بلوک	$۲۵ * ۲۵ * ۱۲/۵$
۶	Mc	ظرفیت استخراج سالانه	۵۶ میلیون تن در سال	۱۲	Mc	ظرفیت کارخانه فرآوری	۱۴ میلیون تن در سال

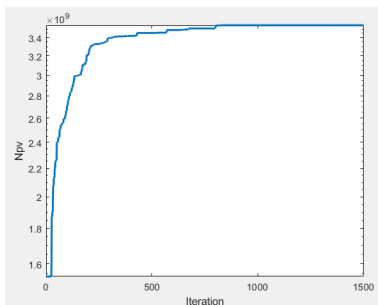
۳-۵- برنامه‌ریزی تولید معدن مس سونگون

محدوده نهایی معدن مس سونگون (شکل ۱۸) شامل ۸۱۰/۵۶۲ میلیون تن ماده معدنی و ۱/۲۰۵ میلیارد تن باطله می‌باشد (نسبت باطله‌برداری برابر با ۱/۴۸ است). اگر ظرفیت استخراج سالانه ۵۶ میلیون تن در نظر گرفته شود، عمر معدن برابر با ۳۶ سال خواهد بود. در این بخش ترتیب استخراج بلوک‌های داخل محدوده نهایی مشخص می‌شود و از مدل بلوکی محدوده نهایی حاصله از نرم افزار NPV Scheduler برای مقایسه ارزش خالص فعلی دو روش استفاده می‌شود. در شکل ۱۹ با تعداد ۴۰ کشتل و ۱۰۰۰ تکرار، نتیجه ۳۳۵۹۰۶۲۲۷۹ دلار از الگوریتم حاصل شده است. برای بهبود جواب از تعداد ۶۰ کشتل و ۱۵۰۰ تکرار استفاده شده است. در شکل ۲۰ محاسبه تعداد تکرار و نتایج الگوریتم نشان شده است.



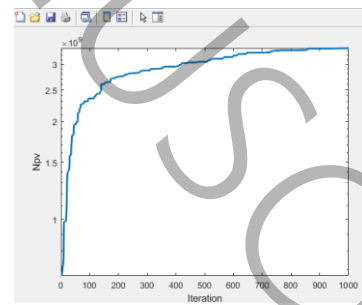
شکل ۱۸. محدوده نهایی سه بعدی معدن مس سونگون

Figure 18: The three-dimensional ultimate pit limit of Songun Copper mine



شکل ۲۰. برنامه‌ریزی تولید با استفاده از الگوریتم کشتل برای داده‌های معدن مس سونگون با ۶۰ کشتل (بهبود جواب)

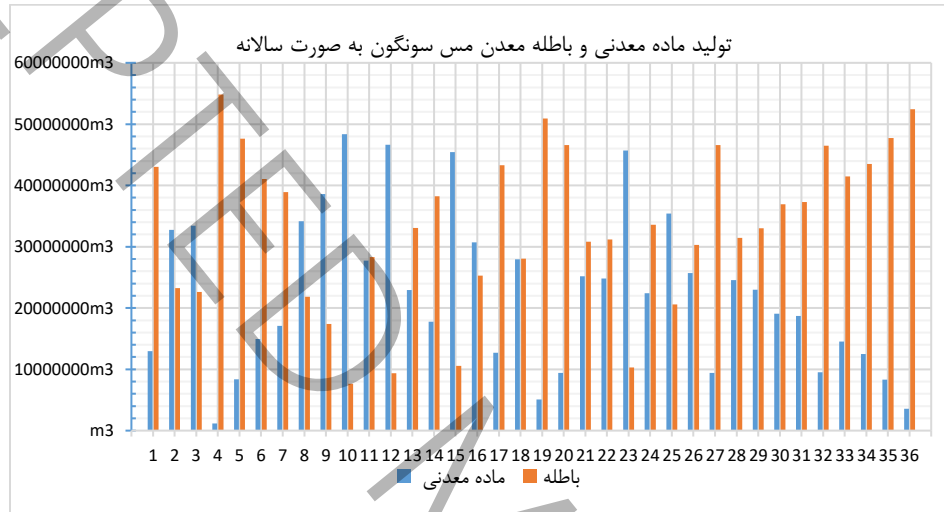
Figure 20: The production planning for Songun Copper mine data using Keshtel algorithm and convergence with 60 Keshtels (improve the answer)



شکل ۱۹. برنامه‌ریزی تولید با استفاده از الگوریتم کشتل برای داده‌های معدن مس سونگون و همگرایی با ۴۰ کشتل

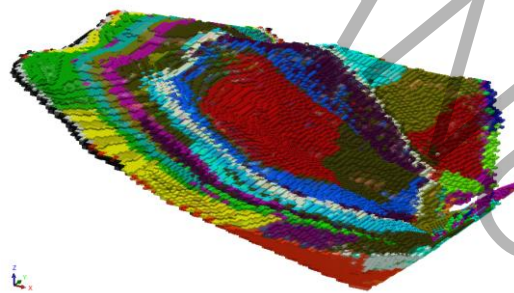
Figure 19: The production planning for Songun Copper mine data using Keshtel algorithm and convergence with 40 Keshtels

در جدول ۵ نتایج ارزش خالص فعلی و تناژ استخراجی به صورت سالانه با استفاده از الگوریتم کشتل و نرم افزار NPV Scheduler آورده شده است. در نمودار شکل ۲۱ نیز استخراج ماده معدنی و باطله برداری به تفکیک سال نمایش داده شده است. نتایج برنامه‌ریزی تولید با نرخ تنزیل ۱۰ درصد برای ۳۶ سال با استفاده از الگوریتم کشتل برابر با ۳۵۴۳۴۸۹۷۷۶ دلار و با استفاده از نرم‌افزار NPV Scheduler برابر با ۳۶۰۹۰۹۹۶۶۴ دلار می‌باشد. در شکل ۲۲ بلوک‌های برنامه‌ریزی تولید، نمایش داده شده است. در جدول ۶ نتایج تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید به وسیله نرم افزار NPV Scheduler و الگوریتم کشتل آورده شده است.



شکل ۲۱. نمودار تولید ماده معدنی و باطله معدن مس سونگون با استفاده از الگوریتم کشتل

Figure 21: The amount of ore and waste production in Songun Copper mine by year (using Keshtel algorithm)



شکل ۲۲. برنامه‌ریزی تولید معدن مس سونگون با استفاده از الگوریتم کشتل

Figure 22: The production planning of Songun Copper mine using Keshtel algorithm

جدول ۵. مقایسه نتایج دو روش در حل مسئله تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید

Table 5: Annual comparison of the net present value results of NPV Scheduler software with Keshtel algorithm

ردیف	شاخص	الگوریتم کشتل	NPV Scheduler	اختلاف (درصد)
۱	ارزش محدوده نهایی بهینه (میلیون دلار)	۱۴۵۰۱	۱۴۵۷۰	۰/۴۷
۲	ارزش خالص فعلی (میلیون دلار)	۳۵۴۳	۳۶۰۹	۱/۸

۰/۵۱	۳۹۵۸۰	۳۹۷۸۱	تعداد بلوک‌های ماده معدنی در مرحله تعیین محدوده نهایی	۳
۱/۵۳	۶۱۷۲۱	۶۲۶۶۴	تعداد بلوک‌های باطله در مرحله تعیین محدوده نهایی	۴

جدول ۶. مقایسه سالانه ارزش خالص فعلی نتایج نرم افزار NPV Scheduler با الگوریتم کشتل

Table 6: Comparison the results of two approaches in determining the ultimate pit limit and production mine planning

نرم افزار NPV Scheduler			الگوریتم کشتل			سال
ماده معدنی	باطله	NPV	ماده معدنی	باطله	NPV	
12708594	43292406	133027789	12944922	43056078	144422182	1
32805469	23194531	544240940	32741016	23258984	539251741	2
33592188	22437813	466352551	33420313	22609688	477213546	3
1178516	54821484	-38160250	1178516	54821484	-41160359	4
8360938	47639063	24268551	8360938	47639063	22278543	5
12715625	43287375	38747309	14950781	41052219	38557313	6
24671094	31328906	165297099	17105859	38894141	166277087	7
31397656	24602744	216127138	34142188	21858213	184127138	8
39337500	16662500	266719060	38614453	17385547	225617059	9
44296094	11703906	318644513	48341016	7658984	334564657	10
40312109	15688191	211278483	27712891	28287409	192168452	11
45281641	10718359	226165406	46648047	9351953	219155450	12
13829688	42170533	62236516	22918359	33081861	62236599	13
18182813	37817188	41373400	17760938	38239063	41365409	14
42453125	13546875	182141711	45442188	10557813	179151721	15
33042188	22957813	83167175	30702734	25297266	82967147	16
20000781	35999219	51919735	12713281	43286719	51839245	17
19730078	36269929	53050947	27928516	28071491	49040959	18
4803125	51196875	1926126	5072266	50927734	2026135	19
9216797	46783203	11220671	9423828	46576172	11450886	20
21931641	34068359	43648639	25202734	30797266	44668742	21
36290625	19709379	90487384	24821094	31178910	91597572	22
42503516	13496484	97577534	45712500	10287500	99577534	23
18198047	37801953	41225178	22421484	33578516	41225272	24
34843359	21156641	58829674	35423047	20576953	60925684	25
20806641	35198409	19272190	25692578	30307422	20281190	26
18487891	37512109	22076902	9419922	46580078	22156000	27
22362500	33637800	20120126	24554688	31450663	20140533	28
22669922	33330078	17121664	22982813	33017188	19441667	29
16583984	39416116	15652847	19047656	36952444	16651843	30
17928906	38071094	9732377	18715625	37284375	9834488	31
14181641	41818359	7127210	9544141	46455859	7228819	32

13498438	42501563	5686039	14512891	41487109	5722240	33
10972656	45027344	99499350	12504688	43495313	100099345	34
7805078	48204922	937275	8302093	47707907	1037334	35
3581641	52418759	360402	3581501	52418899	350600	36
810562500	1205488281	3609099664	810562500	1205488281	3543489776	مجموع

همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است، مقادیر ارزش محدوده نهایی بهینه، ارزش خالص فعلی، تعداد بلوک‌های باطله و ماده معدنی در مرحله تعیین محدوده نهایی با استفاده از الگوریتم کشتل و نرم‌افزار NPV Scheduler، بسیار نزدیک به هم بوده و از اختلاف بسیار کمی برخوردار هستند. نتایج نشان داده شده در شکل ۶ نیز نشان می‌دهد که مقادیر سالانه ارزش خالص فعلی به دست آمده از نرم‌افزار NPV Scheduler با الگوریتم کشتل اختلاف کمی دارند. بنابراین مطابق نتایج به دست آمده از اجرا و اعتبارسنجی این مدل جستجوگر جدید، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم کشتل ابزاری کارآمد برای تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید در حل مسائل دو بعدی و سه بعدی معدنکاری است.

۶- نتیجه‌گیری

مسئله تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید معادن نیز با توجه به تعداد مولفه‌ها و متغیرهای زیاد، جزو مسائل NP Hard طبقه‌بندی می‌شود. این گونه از مسائل با استفاده از دو روش قطعی و جستجوگر قابل حل می‌باشند. روش‌های قطعی به جواب نهایی بهینه می‌رسند، اما این روش‌ها در حل مسائل بزرگ مقیاس دچار مشکل شده و ممکن است زمان حل آن‌ها به صورت لگاریتمی افزایش یابد. با توجه به وجود عدم قطعیت‌ها در مسائل مهندسی معدن برای کاربردی کردن روش‌های قطعی، ناچاراً کاهش بعد، کاهش تعداد متغیرها، حذف عدم قطعیت‌ها و غیره، استفاده می‌شود. اما روش‌های جستجوگر به دلیل سرعت حل بالا، قابلیت افزایش تعداد متغیرها و خلاقیت‌های مهندسی را دارند و جوابی نزدیک به جواب بهینه خواهند داشت. از این‌رو، در این پژوهش از الگوریتم کشتل، که یکی از روش‌های فراکاوشی جدید است، برای اولین بار در حل مسئله برنامه‌ریزی تولید دو بعدی و سه بعدی امکان‌سنجی شد. برای انجام تحقیق، ابتدا تعداد 4×10 بلوک فرضی برای حل مساله دوبعدی و تعداد $4 \times 8 \times 8$ بلوک فرضی برای حل مساله سه بعدی استفاده شد. در مرحله بعد برای حل مساله برنامه‌ریزی تولید دو بعدی و سه بعدی، از الگوریتم کشتل استفاده و خروجی‌های آن با پاسخ نرم‌افزار NPV Scheduler مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهند که پاسخ‌های حاصل از اجرای الگوریتم کشتل و نرم‌افزار NPV Scheduler تقریباً مشابه می‌باشند. در نهایت برای ارزیابی الگوریتم کشتل از داده‌های معدن مس سونگون استفاده شد. نتایج هم‌چنین نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم کشتل در حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن مس سونگون اختلاف $1/8$ درصدی با نرم‌افزار NPV Scheduler دارد. مقایسه الگوریتم کشتل با نتایج الگوریتم گرشون و برنامه‌ریزی پویا در برنامه‌ریزی تولید دوبعدی و مقایسه نتایج حاصله از الگوریتم کشتل با نرم‌افزار NPV Scheduler در مسائل سه بعدی، نشان‌دهنده کارایی مناسب آن در حل این مسائل می‌باشد.

- [1] M. Samavati, D. Essam, M. Nehring, R. Sarker, Production planning and scheduling in mining scenarios under IPCC mining systems, *Computers & Operations Research*, 115 (2020) 104714.
- [2] K. Tolouei, E. Moosavi, A.H.B. Tabrizi, P. Afzal, A.A.J.J.o.C.S.U. Bazzazi, Improving performance of open-pit mine production scheduling problem under grade uncertainty by hybrid algorithms, 27(9) (2020) 2479-2493.
- [3] A.A. Mousavi Noghli, Optimisation of open pit mine block sequencing, Queensland University of Technology, 2015.
- [4] M.A.-p. Sajjad Rostamian, Mostafa Hajiaghahi Keshteli, Application the Keshtel algorithm for long term production planning in open pit mines, Amirkabir University of Technology, Tehran, 2021.
- [5] K.J.P.o.t.t.A. Dagdelen, Optimum open pit mine production scheduling by Lagrangian parameterization, (1986) 127-142.
- [6] M.J.I.J.o.M. Gershon, G. Engineering, Heuristic approaches for mine planning and production scheduling, 5(1) (1987) 1-13.
- [7] B.D.a.D. Schofield, Open-pit design and scheduling by use of genetic algorithms, *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section A. Mining Industry*, vol. 103, 1994 (1994).
- [8] P.K. L. Caccetta, Open pit mine production scheduling, in *APCOM 98: Computer Applications in the Mineral Industries International Symposium*, (1998) pp. 65-72.
- [9] A. Akaike, "Strategic planning of Long term production schedule using 4D network relaxation method," PhD Dissertation, Colorado School of.
- [10] L. Caccetta, S.P.J.J.o.g.o. Hill, An application of branch and cut to open pit mine scheduling, 27(2) (2003) 349-365.
- [11] S. Ramazan, R.J.S.T. Dimitrakopoulos, Recent applications of operations research and efficient MIP formulations in open pit mining, 316 (2004).
- [12] M. Menabde, G. Froyland, P. Stone, G. Yeates, Mining schedule optimisation for conditionally simulated orebodies, in: *Advances in applied strategic mine planning*, Springer, 2018, pp. 91-100.
- [13] M. Kumral, P.J.J.o.t.O.R.S. Dowd, A simulated annealing approach to mine production scheduling, 56(8) (2005) 922-930.
- [14] M.P. Fontes, Influência do nível freático no sequenciamento de lavra aplicado ao planejamento estratégico de lavra, (2016).
- [15] S.J.E.J.o.O.R. Ramazan, The new fundamental tree algorithm for production scheduling of open pit mines, 177(2) (2007) 1153-1166.
- [16] N. Boland, I. Dumitrescu, G. Froyland, A.M.J.C. Gleixner, O. Research, LP-based disaggregation approaches to solving the open pit mining production scheduling problem with block processing selectivity, 36(4) (2009) 1064-1089.
- [17] J.A. Ferland, J. Amaya, M.S. Djuimo, Application of a particle swarm algorithm to the capacitated open pit mining problem, in: *Autonomous robots and agents*, Springer, 2007, pp. 127-133.
- [18] S. Javad, Long-term open-pit planning by ant colony optimization, Doctoral dissertation, University Heidelberg, 2009.
- [19] D. Bienstock, M. Zuckerberg, Solving LP relaxations of large-scale precedence constrained problems, in: *International Conference on Integer Programming and Combinatorial Optimization*, Springer, 2010, pp. 1-14.
- [20] C. Myburgh, K. Deb, Evolutionary algorithms in large-scale open pit mine scheduling, in: *Proceedings of the 12th annual conference on genetic and evolutionary computation*, 2010, pp. 1155-1162.
- [21] E. Moreno, D. Espinoza, M.J.E.n.i.d.m. Goycoolea, Large-scale multi-period precedence constrained knapsack problem: a mining application, 36 (2010) 407-414.
- [22] H. Askari-Nasab, Y. Pourrahimian, E. Ben-Awuah, S.J.J.o.M.S. Kalantari, Mixed integer linear programming formulations for open pit production scheduling, 47(3) (2011) 338-359.
- [23] H. Eivazy, H.J.I.J.o.M. Askari-Nasab, M. Engineering, A hierarchical open-pit mine production scheduling optimisation model, 4(2) (2012) 89-115.
- [24] R. Chicoisne, D. Espinoza, M. Goycoolea, E. Moreno, E.J.O.R. Rubio, A new algorithm for the open-pit mine production scheduling problem, 60(3) (2012) 517-528.
- [25] A. Lamghari, R.J.E.J.o.O.R. Dimitrakopoulos, A diversified Tabu search approach for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty, 222(3) (2012) 642-652.
- [26] G. L'Heureux, M. Gamache, F.J.M.T. Soumis, Mixed integer programming model for short term planning in open-pit mines, 122(2) (2013) 101-109.
- [27] M.J.A.S.C. Kumral, Optimizing ore-waste discrimination and block sequencing through simulated annealing, 13(8) (2013) 3737-3744.

- [28] A. Mousavi, E. Kozan, S.J.I.e.n.-t.a.i.i.s. Liu, Integrated approach to optimize open-pit mine block sequencing, (2014) 83-98.
- [29] M.S. Shishvan, J.J.E.J.o.O.R. Sattarvand, Long term production planning of open pit mines by ant colony optimization, 240(3) (2015) 825-836.
- [30] A. Noruzi, M. Ataee-pour, Feasibility study of the application of artificial bee colony algorithm in mine production planning, Amirkabir University of Technology, 2017 (in Persian).
- [31] O. Rivera Letelier, D. Espinoza, M. Goycoolea, E. Moreno, G. Muñoz, Production scheduling for strategic open pit mine planning: a mixed-integer programming approach, *Operations Research*, 68(5) (2020) 1425-1444.
- [32] R. Lotfian, J. Gholamnejad, Y. Mirzaeian Lardkeyvan, Effective solution of the long-term open pit production planning problem using block clustering, *Engineering Optimization*, 53(7) (2021) 1119-1134.
- [33] J. Savolainen, R. Rakhsha, R. Durham, Simulation-based decision-making system for optimal mine production plan selection, *Mineral Economics*, 35(2) (2022) 267-281.
- [34] G. Turan, A.H. Onur, Optimization of open-pit mine design and production planning with an improved floating cone algorithm, *Optimization and Engineering*, 24(2) (2023) 1157-1181.
- [35] M.H.-A. Keshtli, Integrated scheduling of rail production and transportation in the supply chain, Amirkabir University of Technology, 2015.
- [36] W.A. Hustrulid, M. Kuchta, R.K. Martin, Open pit mine planning and design, two volume set & CD-ROM pack, CRC Press, 2013.
- [37] V. Dadi, J. Sattarvand, Effects of the volatility of input parameters on cut-off grade optimisation, a case study of Sungun copper mine, *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 7(1) (2016) 64-77.

Application of Keshtel algorithm for long term production planning in open pit mines

Sajjad Rostamian^a, Majid Ataee-pour^{b*}, Zeinab Jahanbani^c

^a Master of Science, Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, s.rostamian.uut@gmail.com

^b Associate Professor, Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, map60@aut.ac.ir

^c Ph. D Candidate, Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, jahanbani1990@gmail.com

ABSTRACT

Ultimate pit limit optimization and production mine planning have always been the main challenges in the field of mining activities. The production mine planning can be determined through accurate methods and artificial intelligence techniques. While exact methods provide better and optimal results, they may require significant time to answer the problem due to the large number of blocks involved. In such cases, it is more suitable to use collective algorithms or a planned approach to determine the production mine planning. Production mine planning is similar to other optimization problems that can be addressed using logical algorithms in MATLAB software. In this study, Keshtel's algorithm, implemented in MATLAB, is utilized to optimize the production mine planning. Initially, Keshtel's algorithm is employed to solve the two-dimensional and three-dimensional problems. Subsequently, the Songun Copper Mine is chosen as a case study and the results of determining the production mine planning by Keshtel's algorithm are compared with the findings of NPV Scheduler software. The outcomes show that Keshtel's algorithm, used to determine the production mine planning of the Songun Copper Mine, differs by only 1.8%, when compared to the NPV Scheduler software. Moreover, the comparison of Keshtel's algorithm with the results of Gershon in two-dimensional production mine planning, as well as the comparison with NPV Scheduler software in three-dimensional problems, demonstrates its efficiency in solving these issues effectively.

KEYWORDS

Production Mine Planning, Optimization, Keshtel Algorithm, Songun Copper Mine