

## برآورد ارزش اقتصادی بلوک استخراجی برای طراحی پیشروی‌ها در معادن روباز، با در نظر گرفتن عدم قطعیت عیار، نمونه مطالعاتی: معدن سنگ آهن چادرملو

هادی مختاری<sup>۱\*</sup>، معین بهادری<sup>۲</sup>، جواد غلام نژاد<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۰۵	یکی از پارامترهای مؤثر در طراحی معادن روباز، پراکندگی داده‌ها و عدم قطعیت آنها در برآورد ارزش اقتصادی بلوک‌های استخراجی است. از آنجا که هدف از هر فعالیت اقتصادی دستیابی به سود حداکثر می‌باشد، عدم قطعیت به عنوان یک ارزش منفی، هم ارز تحمیل هزینه قلمداد می‌شود بطوریکه سایر پارامترهای معدن-کاری را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. در این مقاله به منظور بررسی تأثیر عدم قطعیت عیار در طراحی پیشروی‌های معدن چادرملو ابتدا الگوریتم ابتکاری غلام‌نژاد (۲۰۰۵)، تشریح شده و سپس با تصحیح این رابطه پارامتر فاصله داری عیار میانگین هر بلوک از عیار حد معدنکاری در روابط اقتصادی برآورد ارزش اقتصادی بلوک وارد شده است. بطوریکه علاوه بر در نظر داشتن عدم قطعیت عیار بعنوان یک پارامتر منفی، ارزش اقتصادی بلوک‌ها به شکل منطقی‌تر محاسبه گردد. در ادامه با استفاده از نرم افزار PLP و بر پایه محاسبات مخروط شناور سه-بعدی، نتایج برآوردهای اقتصادی ارزش خالص کاواک معدن محاسبه و دو دسته طراحی پیشروی برای کاواک نهایی معدن پیشنهاد شده است. بر اساس نتایج این مقاله برای سطوح اطمینان بالاتر از ۸۱ درصد یک دسته از پیشروی‌ها و برای مقادیر اطمینان کمتر از آن دسته‌ای دیگر طراحی و پیشنهاد می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که طراحی کاواک معدن با استفاده از رابطه جدید، علاوه بر در نظر گرفتن تأثیر منفی پراکندگی داده‌ها در برآورد ارزش اقتصادی هر بلوک، تأثیر مثبت فاصله‌داری عیار میانگین بلوک از عیار حد معدنکاری را در محاسبات اقتصادی منظور کرده و پیشروی‌ها و ارزش اقتصادی کاواک نهایی را ارتقاء می‌دهد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۰۲	
<b>واژگان کلیدی:</b> طراحی پیشروی‌ها، معدن چادرملو، ماکرو PLP، عدم قطعیت عیار.	

### ۱-مقدمه

این برنامه‌ریزی در مواقعی که به قسمت‌های کم عیار ذخیره برخورد می‌شود بحرانی‌تر خواهد شد. به طوری که توقف یا ادامه عملیات معدنی به آن وابسته است. موفقیت یک پروژه معدنی تا حد زیادی به برنامه‌ریزی تولید بلندمدت معدن

معدنکاری فعالیتی است با گستردگی و تنوع عملیات و از طرفی با توجه به عمر نسبتاً طولانی معادن، نیازمند برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت است. اهمیت

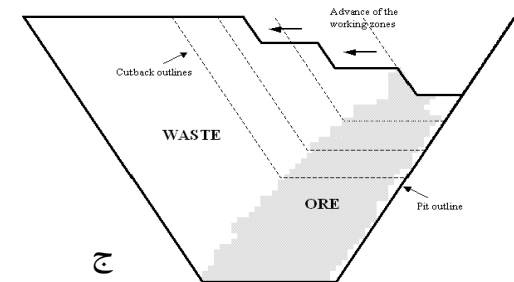
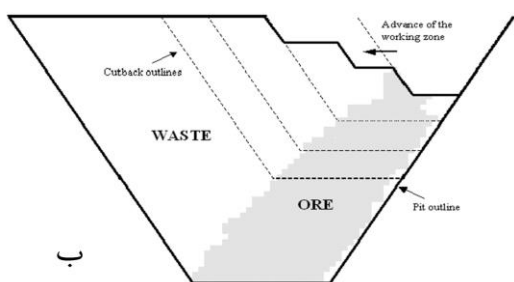
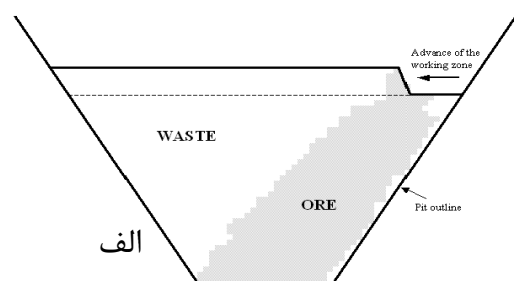
\*. پست الکترونیک نویسنده مسئول: mokhtari\_ie@yahoo.com

۱. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه کاشان

۲- دانشجوی دکتری تخصصی دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

۳-دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه یزد

اصلی در این روش‌ها بزرگ بودن ابعاد مدل در مسایل معدنی بوده است. برای حل این مشکل بعد از طراحی محدوده نهایی معدن، باید پیشروی‌ها<sup>۴</sup> طراحی شوند. پیشروی‌ها عبارتند از کاواک‌های حد واسطی که استخراج متوالی آن‌ها منجر به استخراج کاواک نهایی می‌شود [۸ و ۹]. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، بر این اساس استخراج پیشروی‌ها به سه روش ممکن صورت با عناوین بهترین، بدترین و روش حد واسط طراحی صورت می‌پذیرد [۸ و ۱۰ و ۱۱].



شکل ۱- روش‌های مختلف استخراج پیشروی‌ها در معادن روباز؛ الف: بدترین روش، ب: بهترین روش و ج: روش حد واسط [۱۱]

بستگی دارد در حالی که اگر طول افق برنامه‌ریزی تولید، یک تا شش ماهه باشد برنامه‌ریزی را میان مدت نامند. در بعضی موارد تفکیک برنامه‌ریزی میان مدت از برنامه‌ریزی کوتاه مدت دشوار است چرا که برنامه‌ریزی میان مدت وابسته به پیرودی است که برنامه‌ریزی کوتاه مدت و بلندمدت بر اساس آن صورت می‌گیرد [۱ و ۲]. در برنامه‌ریزی کوتاه-مدت طول افق‌های برنامه‌ریزی از یک روز تا یک ماه و حتی تا یک فصل نیز تعریف می‌شود. در این برنامه‌ریزی دسته وسیعی از اهداف مطرح می‌شود که از برآورده کردن نیازهای سایت اختلاط از نظر کیفیت مواد ارسالی برای پرپود، تا اطمینان یافتن از تأمین حداقل عرض لازم برای مانور شاول و کامیون در پله را در بر می‌گیرد. اگرچه هدف کلی از برنامه‌ریزی کوتاه مدت حداکثر شدن سود حاصله از معدنکاری است، اما اگر بتوان به همه اهداف ذکر شده دست یافت، می‌توان ادعا کرد که سود عملیات نیز حداکثر خواهد شد [۳-۷].

نظر به اهمیت برنامه‌ریزی تولید معدن سه دیدگاه متفاوت برای آن ارائه شده است که در قدیمی‌ترین آن، نگرش سعی و خطا به برنامه‌ریزی تولید وجود دارد. اگرچه برنامه ارائه شده توسط این روش‌ها از نظر عملی قابل اجرا است اما الزاماً بهینه نیست. رویکرد دیگر استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی در بدست آوردن برنامه‌ریزی تولید بهینه است که غالباً از جنبه اجرایی ضعیف هستند. رویکرد سوم استفاده از روش‌های ابتکاری<sup>۳</sup> در برنامه‌ریزی تولید است. در این روش‌ها اگرچه ممکن است از روش‌های بهینه‌سازی استفاده شود اما با وارد کردن دانش عملی طراح در مورد فاکتورهای کنترل کننده، می‌توان به جوابی نزدیک به بهینه اما با هزینه کمتر رسید.

از سال ۱۹۶۸ میلادی روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی به طور فراگیر وارد مقوله برنامه‌ریزی تولید در معادن شد. در اکثر این روش‌ها از تکنیک‌های برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی عدد صحیح و برنامه‌ریزی پویا استفاده شده است. مشکل

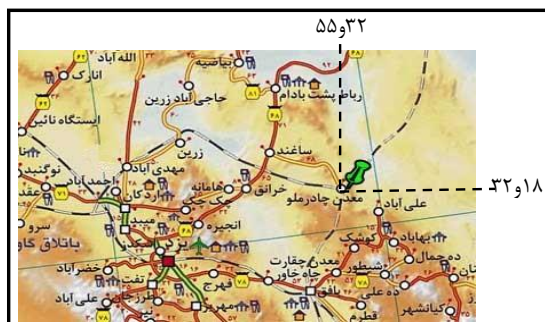
<sup>۴</sup> Push backs, Cut backs, Stages or Phases

<sup>۳</sup> Heuristic methods

باشد. این بدان معنی است که این پیشروی‌ها در بین همه پیشروی‌های هم اندازه، دارای کمترین نسبت باطله‌برداری خواهند بود [۷ و ۱۷ و ۱۸]. این محققین با توجه به روش‌ها و الگوریتم‌های ارائه شده، توانستند برنامه‌ریزی تولید بهینه یا حداقل نزدیک به بهینه‌ای را برای معادن روباز به دست آورند، به طوری که هر یک ثابت کردند که الگوریتم آنها قادر به ارائه  $NPV$  بهتری نسبت به الگوریتم‌های قبلی هستند. اما این بهینه بودن الگوریتم فقط روی کاغذ قابل وصول بود. تحقیقات محققین در این زمینه نشان داد که علت اصلی عدم کارایی این روش‌ها، وجود عدم قطعیت زمین‌شناسی (عدم قطعیت عیاری) در مورد کانسارها است. بنابراین از سال ۱۹۹۲ بحث عدم قطعیت زمین‌شناسی وارد مقوله برنامه‌ریزی تولید شد. این رویکرد برنامه‌ریزی، رویکرد مبتنی بر ریسک<sup>۱۳</sup> نام گرفت [۸ و ۱۵ و ۱۸ و ۲۲]. اما ایراداتی به این الگوریتم‌ها وارد است. یکی از جدیدترین نمونه‌های الگوریتم‌هایی که با رویکرد مبتنی بر ریسک ارائه شده، الگوریتم ابتکاری غلام‌نژاد (۲۰۰۵) است که در آن عدم قطعیت عیاری هر بلوک استخراجی به نوحی در برآورد ارزش اقتصادی آن دخالت داده می‌شود **Error!** *Reference source not found.* [۲۰]. مَنابده و همکاران (۲۰۰۷)، با گسترش رابطه ریاضی تلاش کرد تا از میان سناریوهای ممکن، سناریویی با حداکثر ارزش خالص فعلی ( $NPV^{14}$ ) و حداقل‌سازی عدم قطعیت را تعیین نماید. **Error! Reference source not found.** به منظور حداکثر کردن ارزش خالص فعلی و کاهش عدم قطعیت زمین‌شناسی، رمضان (۲۰۰۸) با استفاده از روش برنامه‌ریزی ارقام تصادفی ( $SIP^{15}$ ) در کنار بکارگیری شبیه‌سازی‌های تصادفی، روشی برای حداقل کردن پراش اهداف تولیدی در طول حیات معدن پیشنهاد کرده است [۲۵]. رمضان و دیمیتری کویپولوس (۲۰۱۳) با توسعه

گرشان (۱۹۷۸) الگوریتم ابداعی خود را برای برنامه‌ریزی بلند مدت بیان و با تکیه به مفاهیمی چون نرخ وزن محلی<sup>۵</sup> و تعریف شاخص مطلوبیت<sup>۶</sup> ارائه کرد. او مدعی است که در این الگوریتم ملاحظات کوتاه مدت و بلند مدت هر دو باهم در نظر گرفته شده است. [۵]. لرج و گراسمن<sup>۷</sup> (۱۹۶۵) برای اولین بار ایده روش پارامترسازی در طراحی معادن روباز را مطرح کردند [۹]. آنها به این نتیجه رسیدند که صرف داشتن محدوده نهایی کاواک، برای بهینه‌سازی آن کافی نیست، بلکه باید سکانس استخراج مطلوب، که منجر به استخراج کاواک بهینه می‌شود را در دست داشت. این الگوریتم را "الگوریتم کاواک‌های لانه‌ای"<sup>۸</sup> گفته می‌شود. به منظور طراحی کنترل شده پیشروی‌ها، ونگ و سویم<sup>۹</sup> (۱۹۹۲) یک الگوریتم ابتکاری برای برنامه‌ریزی بلندمدت معادن ارائه دادند. آنها از ایده مخروط رو به پایین گرشان در الگوریتم خود استفاده کردند [۱۲]. تولوینسکی<sup>۱۰</sup> (۱۹۹۵) روشی ارائه داد که بعدها در برنامه‌ریزی تولید نرم-افزار *NPV Scheduler* استفاده از آن استفاده شد. اگر چه پیشروی‌های طراحی شده در این روش از نظر عملی قابلیت اجرای بالایی دارد، اما به علت این که اساس آن تعیین کاواک‌های لانه‌ای لرج و گراسمن است نمی‌تواند منجر با رایه یک برنامه‌ریزی بهینه شود [۱۳ و ۱۴]. استفن<sup>۱۱</sup> (۱۹۹۷) اهداف برنامه‌ریزی تولید بلندمدت را شامل مواردی چون: حداکثر شدن ارزش خالص فعلی عملیات معدنی، حداقل شدن ریسک و حداکثر شدن عمر معدن می‌داند. البته این اهداف تا حدودی با یکدیگر متناقض اند [۱۵ و ۱۶]. رمضان و داگدلن<sup>۱۲</sup> (۱۹۹۸) معتقدند بهترین کانه، کانه‌ای است که علاوه بر این که بالاترین عیار را داشته باشد، در عملیات استحصال آن کمترین مقدار باطله‌برداری را نیاز داشته باشد. سپس آنها الگوریتمی ارائه کردند که در آن پیشروی‌های تولیدی دارای کمترین نسبت باطله‌برداری

<sup>۱۱</sup> Steffen<sup>۱۲</sup> Ramazan & Dagdelen<sup>۱۳</sup> Risk-based approach<sup>۱۴</sup> Net Present Value<sup>۱۵</sup> Stochastic Integer Programming<sup>۵</sup> Ranked Positional Weight<sup>۶</sup> Desirability Index<sup>۷</sup> Learchs & Grossman<sup>۸</sup> Nested pits algorithm<sup>۹</sup> Wang & Sevim<sup>۱۰</sup> Tolwinski



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به معدن سنگ آهن چادرملو

تولیدات اصلی شرکت کنسانتره، سنگ آهن دانه‌بندی شده (درشت‌دانه و ریزدانه) و کنسانتره آپاتیت است. مصرف کنندگان محصول سنگ آهن، مجتمع‌های فولادسازی، که به روش احیای مستقیم محصولات فولادی تولید می‌کنند، هستند. *Error! Reference source not found.*

### ۳- محاسبات اقتصادی بلوک‌های استخراجی

به طور کلی در هر برآورد اقتصادی مقدار سود از تفاضل درآمد و هزینه محاسبه می‌شود.

$$NV = I - K \quad (1)$$

که در آن  $NV$  ارزش خالص یا سود،  $I$  درآمد و  $K$  هزینه‌ها هستند. به منظور محاسبه ارزش اقتصادی هر بلوک استخراجی ابتدا لازم است میزان سود فروش کنسانتره حاصل از هر بلوک محاسبه شود. درآمد حاصل از فروش ماده معدنی در هر بلوک از رابطه (۲) محاسبه می‌شود. *Error! Reference source not found.*

$$I = TO \times \left( R_e \times R_{Fe} \times \frac{g_{Fe-O}}{g_{Fe-C}} \times P_{Fe} \right) \\ = \left( \frac{TO \times R_e \times R_{Fe} \times P_{Fe}}{g_{Fe-C}} \right) \times g_{Fe-O} \quad (2)$$

که در آن  $TO$  تناژ ماده معدنی موجود در هر بلوک،  $R_e$  راندمان استخراج،  $R_{Fe}$  درصد بازیابی در طی فرآیند تغلیظ،

روش پیشنهادی رمضان (۲۰۰۸) به شرایط انبارکردن محصول نهایی، ادعا کرده‌اند که با استفاده از این روش تعمیم‌یافته، ارزش خالص فعلی معدنکاری تا ۱۰ درصد افزایش خواهد یافت. لیته و دیمیتریکوپولوس (۲۰۱۴) نشان داده‌اند که استفاده از روش تعمیم‌یافته رمضان و دیمیتریکوپولوس (۲۰۱۳) برای بخش‌های کم‌عیار ذخیره یک معدن مس پورفیری، می‌توان ارزش خالص فعلی را تا ۲۹٪ افزایش داد [۲۶].

در این بررسی سعی شده که با تکامل الگوریتم‌های فوق، بتوان فرآیند برنامه‌ریزی را به گونه‌ای توسعه داد که برای شرایطی با حداقل ریسک، بالاترین ارزش خالص فعلی به دست آید. در این رهگذر به علت پیچیده بودن مدل برنامه‌ریزی تولید، از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی در کنار روش‌های ابتکاری و فوق‌ابتکاری<sup>۱۶</sup> استفاده شده است.

### ۲- موقعیت جغرافیایی و شرایط منطقه‌ای معدن چادرملو

کانسار چادرملو در سال ۱۳۱۹ توسط یک مهندس ایرانی به نام آقای مهندس سبحانی و تحت نظر زمین‌شناس آلمانی بنام کومل شناسایی شد. معدن سنگ آهن چادرملو در قلب کویر مرکزی ایران، در دامنه شمالی کوه‌های خاکستری رنگ چاه محمد در حاشیه جنوبی نمک زار ساغند به فاصله ۱۸۰ کیلومتری شمالی شرقی شهر یزد و ۳۰۰ کیلومتری جنوب طبس قرار گرفته است. چادرملو بواسطه موقعیت جغرافیایی کویری دارای آب و هوای خشک و سرد در زمستان و گرم در تابستان می‌باشد. معدن چادرملو، حدوداً ۴۰۰ میلیون تن سنگ آهن را در خود جای داده است. با توجه طرح استخراج فعلی ذخیره قابل استخراج معدن بالغ بر ۳۲۰ میلیون تن سنگ آهن خواهد بود و بر همین اساس و با توجه به ظرفیت فعلی تولید، عمر معدن ۵۰ سال پیش‌بینی می‌شود *Error! Reference source not found.* در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به معدن چادرملو نشان داده شده است.

<sup>۱۶</sup> Meta- heuristic methods.

یک پارامتر غیرقطعی است، پس ارزش اقتصادی بلوک بصورت غیر غیرقطعی محاسبه می‌شود. سایر پارامترها در این مدل، قطعی در نظر گرفته می‌شود بسته به آنکه مجموع ارزش اقتصادی پیشروی‌های بعدی که به لحاظ عملیاتی مستلزم استخراج پیشروی نام هستند، مثبت یا منفی شود، در مورد استخراج پیشروی نام با ارزش اقتصادی منفی تصمیم‌گیری خواهد شد **Error! Reference source not found.**

### ۳-۱ حل مدل برنامه‌ریزی در فضای عدم قطعیت عیاری با دخالت واریانس

نظر به تأثیر بالای عدم قطعیت عیار در برآوردهای اقتصادی، غلام‌نژاد (۲۰۰۵) یک الگوی ابتکاری ارائه کرد که در آن با بکارگیری یک منطق محاسباتی آماری، مقدار واریانس داده‌های آماری میانگین عیار هر بلوک را با یک ضریب از عیار متوسط کم می‌شود. بدین ترتیب در محاسبات اقتصادی مقدار جدیدی از عیار برای بلوک استخراجی منظور می‌شود. با توجه به این نکته که "بهترین کانه، کانه‌ای است با بالاترین عیار و حداقل عدم قطعیت" در الگوریتم ابتکاری غلام‌نژاد (۲۰۰۵) سعی شده تا میزان عدم قطعیت در داده‌های آماری حداقل ریسک را بر معدن-کار تحمیل نماید. به این ترتیب با نگرشی کلی به خطاها یا همان واریانس داده‌های آماری برای حفظ حاشیه اطمینان، مقداری از ارزش کل کاواک کاهش یافته و با کاهش نسبت باطله‌برداری، می‌توان کاواک نهایی را با ریسک کمتر استخراج نمود. در این الگوریتم، از تکنیکی با نام "روش پارامترسازی عیار با استفاده از واریانس" استفاده شد. این روش در واقع نه تنها یک روش طراحی پیشروی است، بلکه یک روش ابتکاری برای حل مدل ارزیابی شده تلقی می‌شود. فرم عمومی رابطه پیشنهادی غلام‌نژاد (۲۰۰۵) در محاسبه ارزش اقتصادی بلوک نام در مرحله lam به شکل رابطه (۸) است **Error! Reference source not found.**

$g_{Fe-O}$  عیار متوسط آهن در هر بلوک،  $g_{Fe-C}$  عیار متوسط آهن در کنسانتره و  $P_{Fe}$  قیمت فروش هر تن کنسانتره آهن هستند. درصد بازیابی کنسانتره از رابطه (۳) محاسبه می‌شود **Error! Reference source not found.**

$$R_C = \frac{R_{Fe} \times g_{Fe-O}}{g_{Fe-C}} = \left( \frac{R_{Fe}}{g_{Fe-C}} \right) \times g_{Fe-O} \quad (۳)$$

که در آن  $R_C$  درصد بازیابی وزنی کنسانتره است. بر این اساس هزینه معدنکاری و تغلیظ هر بلوک را می‌توان با استفاده از رابطه برآورد نمود **Error! Reference source not found.**

$$K = TO \times \left( \left( R_e \times R_{Fe} \times \frac{g_{Fe-O}}{g_{Fe-C}} \times P_C \right) + MC_O \right) \quad (۴)$$

که در آن  $MC_O$  هزینه استخراج هر تن کانسنگ است. علاوه بر این هزینه باطله برداری بصورت ضرب وزن تناژ باطله موجود در هزینه واحد به‌ازای هر تن باطله به شکل رابطه (۵) محاسبه می‌شود **Error! Reference source not found.**

$$W = TW \times MC_W \quad (۵)$$

که در آن  $TW$  تناژ باطله موجود در هر بلوک استخراجی است. بنابراین با جایگذاری روابط اخیر در رابطه (۱) ارزش اقتصادی هر بلوک از رابطه (۶) محاسبه می‌شود **Error! Reference source not found.**

$$\begin{aligned} NV &= I - K = \\ &= TO \times \left( R_e \times R_{Fe} \times \frac{g_{Fe-O}}{g_{Fe-C}} \times P_{Fe} \right) \\ &\quad - TO \times \left( \left( R_e \times R_{Fe} \times \frac{g_{Fe-O}}{g_{Fe-C}} \right) - MC_O \right) \\ &= \left( \left( TO \times R_e \times R_{Fe} \times \frac{P_{Fe} - P_C}{g_{Fe-C}} \right) \times g_{Fe-O} \right) \\ &\quad - (TO \times MC_O) \end{aligned} \quad (۶)$$

که در آن  $P_C$  هزینه تغلیظ هر تن کنسانتره است و اگر بلوک باطله باشد، ارزش اقتصادی آن از رابطه (۷) برآورد می‌شود:

$$NV = 0 - (TW \times MC_W) = -TW \times MC_W \quad (۷)$$

که در آن  $MC_W$  هزینه استخراج هر تن باطله است. همانطور که در رابطه (۶) دیده می‌شود چون عیار بلوک

حول مقدار میانگین،  $P$  در آمد حاصل از فروش هر تن کانسنگ،  $P_C$  هزینه تغلیظ و فرآوری و  $TR$  هزینه استخراج هر تن کانسنگ و  $n_l$  یک ضریب آماری است که با تغییر مقدار آن در هر مرحله، ارزش اقتصادی جدیدی برای هر اقتصادی بلوک استخراجی کاسته شود. هرچند این فرآیند منجر به کاهش در ارزش‌های مثبت کاواک نهایی است، اما سطح اطمینان بالاتری را به دست می‌دهد.

### ۳-۳ تصحیح روابط اقتصادی

تاکنون با توجه به رابطه ابتکاری غلام‌نژاد (۲۰۰۵)، غالباً تأثیر منفی عدم قطعیت بر روی ارزش اقتصادی بلوک‌ها نشان داده شد. همان‌طور که ذکر شد، برای بدست آوردن ارزش اقتصادی بلوک می‌توان از رابطه (۶) استفاده کرد، اما در این تحقیق سعی بر آن است تا داده‌های آماری همچون واریانس داده‌های عیاری در محاسبات داخل شود. با دقت به **Error! Reference source not found.** می‌توان گفت در شرایط یکسان علاوه بر واریانس، مقدار فاصله‌داری عیار میانگین بلوک از عیار حد بعنوان یک پارامتر مثبت، ارزش اقتصادی مثبتی بر ارزش اقتصادی بلوک خواهد داشت.

به منظور دخالت دادن تأثیر همزمان واریانس آماری داده‌ها و همچنین فاصله‌داری عیار متوسط از عیار حد معدنکاری، محاسبات مختلفی صورت گرفته و پارامترهای متفاوتی منظور شد. اما پارامتر تعریف شده باید پاسخ‌گوی سوالات زیر باشد:

- (۱) پارامتر تعریف شده دارای اثر مثبت است یا منفی؟
  - (۲) این پارامتر باید شامل کدام کمیت‌ها باشد تا از لحاظ ابعدی فرمول محاسبه ارزش اقتصادی بلوک با مشکل مواجه نشود؟
  - (۳) با توجه به بعد تعریف شده برای پارامتر فوق، این پارامتر بایستی در کدام بخش از رابطه داخل گردد؟
- بر اساس بررسی‌های انجام شده، سوالات فوق به صورت زیر پاسخ داده می‌شوند:

$$BEV_i = [TO_i \times \bar{G} - n_l \delta_i \times R \times P] - (TO_i \times P_C) - (TO_i \times MC_O) \quad (8)$$

که در آن  $R$  حاصلضرب بازیابی در مراحل استخراج و تغلیظ،  $\bar{G}$  عیار میانگین بلوک استخراجی،  $\delta$  واریانس عیار بلوک بلوک به دست می‌آید. مقدار  $n_l$  باید به گونه‌ای انتخاب شود که عیارهای نسبت داده شده به هر بلوک در هر مرحله، یکی از عیارهایی باشد که انتظار می‌رود بلوک مفروض بعد از استخراج، آن عیار را داشته باشد. محدوده  $n_l$  به صورت زیر به دست می‌آید **Error! Reference source not found.**

$$n_l \in \left[ (0 \leq n_l \leq 1.96) \cap \left( n_l \leq \frac{\bar{G}_i}{\delta_i} \right) \right] \quad (9)$$

به عنوان مثال، اگر عیار متوسط یک بلوک (تخمین کریجینگ) ۵۴٪ و انحراف استاندارد آن ۱۲٪ باشد، در این صورت محدوده مجاز  $n_l$  به صورت زیر به دست می‌آید **Error! Reference source not found.**

$$n \in \left[ (0 \leq n \leq 1.96) \cap \left( n \leq \frac{54}{12} \right) \right] = [0 \leq n \leq 1.96) \cap (n \leq 4.5)] \Rightarrow 0 \leq n \leq 1.96$$

### ۳-۲ حل مدل برنامه‌ریزی در فضای عدم قطعیت با دخالت واریانس و فاصله‌داری عیار میانگین از عیار حد معدن کاری

نکته باقی مانده در الگوی ابتکاری محاسبات غلام‌نژاد (۲۰۰۵)، آنست که آیا دو بلوک که در تمامی شرایط مانند وضعیت قرارگیری، مقدار روباره، ابعاد و تناژ و... در شرایط کاملاً یکسانی هستند و تنها در عیار میانگین و واریانس داده‌های آماری متفاوتند دارای ارزش یکسانند یا خیر؟ آیا می‌توان فرض نمود بلوکی با عیار میانگین کم اما با واریانس کوچک، ارزش اقتصادی بیشتری نسبت به بلوکی با واریانس و عیار میانگین بالاتر دارد؟ باید توجه داشت که تا زمانی که با داده‌های آماری دارای واریانس گسترده کار می‌شود، به علت عدم قطعیت ناشی از این واریانس، برای کاهش ریسک آن باید مقداری از ارزش

(۲) برای بدست آوردن تاثیر فاصله‌داری عیار میانگین بلوک از عیار حد معدن کاری پارامترهای متفاوتی مورد بررسی قرار گرفت. از جمله آنها می‌توان به ضریب تغییرات آماری  $CV^{۱۷}$  که عبارتست از خارج قسمت واریانس بر میانگین

$$BEV = \left[ \left( TO \times R_e \times R_{Fe} \times \frac{P_{Fe} - P_C}{g_{Fe-C}} \right) \times \left( g_{Fe-O} + n_l \left( \frac{\bar{G}_i}{g_{cut}} - \delta \right) \right) \right] - TO \times MC \quad (10)$$

در رابطه فوق مقدار  $\Pi_1$  همان مقدار تعریف شده در رابطه غلام‌نژاد (۲۰۰۵) است که البته باید تغییرات اخیر را در بر داشته باشد، به نحوی که با تغییر در مقدار جدید  $\Pi_1$  در هر مرحله، ارزش اقتصادی جدیدی برای هر بلوک به دست آید. همانطور که از مقایسه روابط (۱۰) و (۸) ملاحظه می‌شود، در رابطه پیشنهادی غلام‌نژاد (۲۰۰۵) تنها پارامتر پراش (واریانس) داده‌های عیاری بلوک استخراجی در محاسبات اقتصادی وارد شده در حالیکه در رابطه پیشنهادی (رابطه (۱۰)) علاوه بر این پارامتر، تأثیر فاصله‌داری میانگین عیاری بلوک از عیار حد معدنکاری به عنوان یک پارامتر مثبت در برآورد ارزش اقتصادی هر بلوک استفاده شده است. بنابراین، گام‌های پیشنهادی برای پیاده‌سازی این الگوریتم به شرح زیر است:

$$I=0 \quad (1)$$

(۲)  $\Pi_0$  مساوی صفر قرار داده شده و ارزش اقتصادی بلوک‌ها محاسبه می‌شوند.

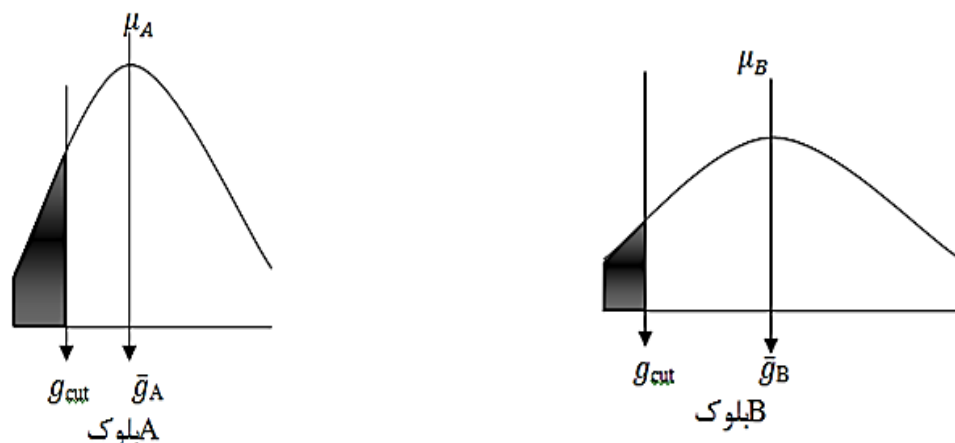
(۱) از آنجا که واریانس نشان‌دهنده پراکندگی داده‌های آماری بوده، پس بزرگی آن هم ارز عدم قطعیت عیاری و در نتیجه دارای ارزشی منفی است **Error! Reference source not found.** علاوه بر این مقدار فاصله‌داری میانگین عیاری بلوک از عیار حد، یک ارزش مثبت فرض و در روابط اقتصادی دخالت داده می‌شود.

داده‌های آماری؛ البته مقدار این پارامتر تنها جنبه مقایسه‌ای داشته و از نظر عددی بیانگر هیچ کمیت مشخصی نیست.

بر این اساس برای ارزش‌دهی به مقدار فاصله‌داری پارامتر  $\frac{\bar{G}_i}{g_{cut}}$  پیشنهاد و در محاسبات منظور شد، که تمام شرایط فوق را دارد. در این پارامتر تأثیر مثبت مورد نظر به وضوح در محاسبات وارد می‌شود.

(۳) پارامتر فوق از جنس عیار (صورت از جنس عیار و مخرج با توجه به ثابت بودن عیار حد معدن یک عدد بدون بعد) است. پس از نظر ابعادی این پارامتر باید در قسمت عیاری رابطه وارد شود. از آنجا که در این بررسی پارامترهای آماری داده‌های عیاری برای ۶۸۵۴ بلوک از معدن چادرمولو استفاده شده، می‌توان این پارامتر را با علامت مثبت از مقدار واریانس داده‌های عیاری بلوک‌ها که دارای علامت منفی است کسر کرد، تا نتیجه این محاسبات هر چه بیشتر به واقعیت نزدیک گردد. از تمامی مباحث ذکر شده رابطه برآورد ارزش اقتصادی نهایی به شکل رابطه (۱۰) ارائه می‌شود.

<sup>۱۷</sup> Coefficient Variable



شکل ۳- بلوک‌های A و B که در تمامی شرایط بجز واریانس و میانگین عیاری باهم یکسانند.

(۳) با توجه به مدل بلوکی اقتصادی به دست آمده و استفاده از روش مخروط شناور سه بعدی، کاواک بهینه متناظر با مدل بلوکی، تعیین می‌شود. در این حالت چون  $n_0$  برابر صفر است، کاواک به دست آمده، همان کاواک نهایی معدن است.

$$P_r \left[ \bar{G}_i - 1.96 \left( \frac{\bar{G}_i}{g_{cut}} - \delta_i \right) \leq G_i \leq \bar{G}_i + 1.96 \left( \frac{\bar{G}_i}{g_{cut}} - \delta_i \right) \right] = 0.95 \quad (11)$$

بنابراین در رابطه جدید با احتمال ۰.۹۵ عیار واقعی بلوک

مورد مطالعه بزرگتر از  $\bar{G}_i + 1.96 \left( \frac{\bar{G}_i}{g_{cut}} - \delta_i \right)$  است. با

مقایسه دو رابطه اخیر می‌توان نتیجه گرفت که مقدار حداکثر  $n_l$  همان  $1/96$  است. از طرف دیگر عیار هیچ بلوکی نمی‌تواند منفی باشد. پس می‌توان رابطه زیر را تعریف کرد:

$$\bar{G}_i + n_l \left( \frac{\bar{G}_i}{g_{cut}} - \delta_i \right) \geq 0 \rightarrow n_l \leq \frac{\bar{G}_i}{\left( \delta_i - \frac{\bar{G}_i}{g_{cut}} \right)}$$

باید توجه داشت که رابطه فوق تا زمانی اعتبار دارد که مقدار عبارت داخل پرانتز - که همان فاکتور عدم قطعیت عیاری و لزوماً منفی است - کمتر از صفر باشد. یعنی:

$$\left( \frac{\bar{G}_i}{g_{cut}} - \delta_i \right) < 0$$

از سه رابطه اخیر می‌توان محدوده  $n_l$  را به صورت رابطه (۱۲) بازنویسی نمود:

(۴)  $n_1 = 1$

(۵)  $n_1$  به اندازه  $\Delta n_1$  افزایش داده شده و ارزش اقتصادی بلوک‌ها مجدداً محاسبه می‌شوند.

(۶) کاواک نهایی مربوطه به مدل اقتصادی جدید، به دست آورده می‌شود. این کاواک مطمئناً کوچکتر یا مساوی کاواک به دست آمده از مرحله قبل است.

(۷)  $l=1+1$  و بازگشت به مرحله پنجم، البته به این شرط که

$$\Delta n_l < \Delta n_{l+1}$$

(۸) شرط خاتمه: الگوریتم زمانی خاتمه می‌یابد که دیگر با افزایش  $\Delta n_1$ ، کاواک لانه‌ای جدیدی حاصل نشود.

همانطور که قبلاً نیز گفته شد مقدار  $n_l$  باید به گونه‌ای انتخاب شود که عیارهای نسبت داده شده به هر بلوک در هر مرحله از الگوریتم، یکی از عیارهایی باشد که انتظار می‌رود بلوک مفروض پس از استخراج آن عیار را داشته باشد.

برای تخمین این مقادیر منطقی از تئوری احتمالات بهره گرفته و فرض بر آن است که داده‌های آماری عیار بلوک‌های استخراجی از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند. با توجه به میانگین تخمین کریجینگ  $(G_i)$  و واریانس این تخمین



درصد، هزینه تغلیظ هر تن معادل ۲۴۰ هزار ریال و درآمد هر تن کنسانتره ۳۳۰ هزار ریال و با فرض عیار حد معادل ۵۰ درصد، اگر هزینه استخراج هر تن کنسانتره ۱۶ هزار ریال باشد (واریانس داده‌ها ۱۵ و  $n_i=1/32$ )، ارزش اقتصادی آن در حالت قطعی ۸۲ میلیون ریال محاسبه می‌شود. این درحالی است که در صورت استفاده از رابطه غلام-نژاد (۲۰۰۵) ارزش اقتصادی همین بلوک معادل ۱۷/۸ میلیون ریال و نیز اگر علاوه بر واریانس، مقدار فاصله‌داری عیار میانگین بلوک از عیار حد معدنکاری در محاسبات منظور شود، مقدار ارزش اقتصادی بلوک معادل ۲۱/۹ میلیون ریال برآورد می‌شود.

نهایی متفاوتی برای معدن محاسبه شده است. بر اساس آنالیز نتایج مختلف خروجی‌های بدست آمده از نرم‌افزار *PLP*، تنها دو حالت ممکن برای کاواک نهایی معدن سنگ آهن چادرمولو برآورد شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده، در حالت الف، به ازای تغییر در مقادیر  $n_i$  در بازه ۰ تا ۱/۳۲ (ضریب قطعیت ۰ تا ۸۱ درصد) یک کاواک نهایی با تعداد ۲۹۲۷ بلوک استخراجی و به ازای تغییر مقادیر  $n_i$  در بازه ۱/۳۲ تا ۱/۹۶ شکل دیگری از کاواک نهایی با تعداد ۲۷۶۶ بلوک استخراجی برآورد می‌شود. نتیجه آنکه با بالا بردن مقدار عددی فاکتور  $n_i$  (میزان قطعیت)، از ارزش نهایی هر کدام از بلوک‌های استخراجی کاسته شده، که اعمال این محافظه‌کاری، قطعیت بالاتر را برای معدن کار متضمن می‌شود.

از طرف دیگر هرچند بر اساس نقشه خروجی ترسیم شده از نرم‌افزار *PLP* تغییرات فاکتور  $n_i$  به دو دسته کلی تقسیم شد، اما خروجی این نرم‌افزار برای هر تغییر جزئی در مقدار فاکتور  $n_i$ ، یک ارزش نهایی جدید برای کاواک نهایی بدست می‌دهد.

$$n_i \in \left[ (0 \leq n_i \leq 1.96) \cap \left( n_i \leq \frac{\bar{G}_i}{\left[ \frac{\delta_i - \bar{G}_i}{g_{cut}} \right]} \right) \right] \quad (12)$$

حال اگر به‌عنوان مثال عیار متوسط یک بلوک (تخمین کریجینگ) ۵۰، انحراف استاندارد آن ۱۲ و عیار حد معدن-کاری را ۲۵ فرض شود، می‌توان نوشت:

$$n_i \in [(0 \leq n_i \leq 1.96) \cap (n_i \leq 5)] \\ \rightarrow n_i \in (0 \leq n_i \leq 1.96)$$

با استفاده داده‌های واقعی معدن چادرمولو، ارزش اقتصادی یک بلوک استخراجی به وزن ۵۰۰۰ تن، با عیار متوسط ۶۸ درصد، بازیابی استخراج ۹۰ درصد، و بازیابی تغلیظ ۵۴/۴

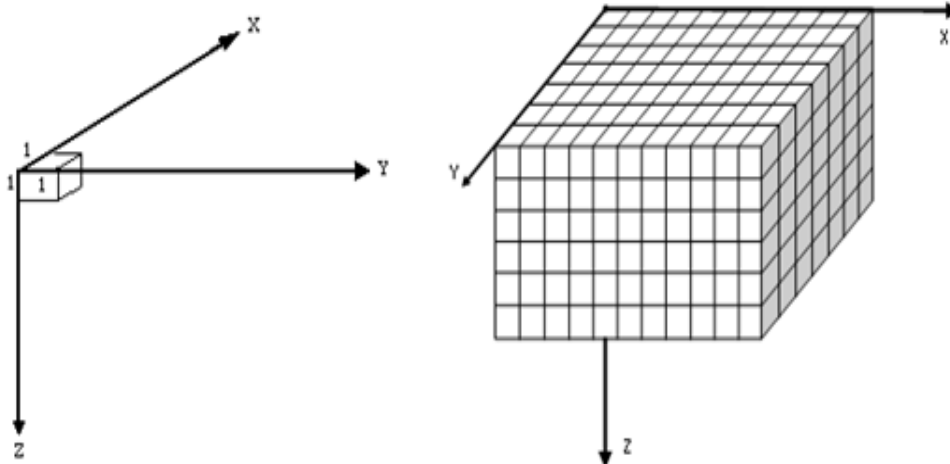
#### ۴- استفاده از نرم‌افزار *PLP* در طراحی

##### پیشروی‌های معدن چادرمولو

نرم‌افزار *PLP* یک ماکرو تحت اکسل است. قابلیت‌های این نرم افزار شامل آنالیز حساسیت محدوده نهایی معدن، طراحی محدوده نهایی معدن و رسم پلان مرکب آن و طراحی بزرگترین کاواک ممکن است **Error!** محاسبات این نرم-**Reference source not found.**

افزار بر پایه مخروط شناور سه‌بعدی بوده و خروجی آن متشکل از تعدادی کاربرگ اکسل است، که در هر کدام از آنها مقطعی از کانسار ترسیم می‌شود. همانطور که در مدل بلوکی عیاری شکل نشان داده شده،  $x=1$  متناظر با بلوک-های اولیه مقطع کانسار است. به این معنی که در مدل اقتصادی کانسار در نرم‌افزار *PLP*، کاربرگ اول مربوط به بلوک‌هایی است که مقدار  $x$  در آن‌ها برابر ۱ است. همچنین  $y$  شماره ستون هر بلوک و  $z$  عمق بلوک در در مدل بلوکی (شماره ردیف کاربرگ) را نشان می‌دهد.

با تغییر در ضریب  $n_i$  مقادیر مختلفی برای ارزش اقتصادی بلوک‌های استخراجی محاسبه و بر اساس آن، کاواک‌های

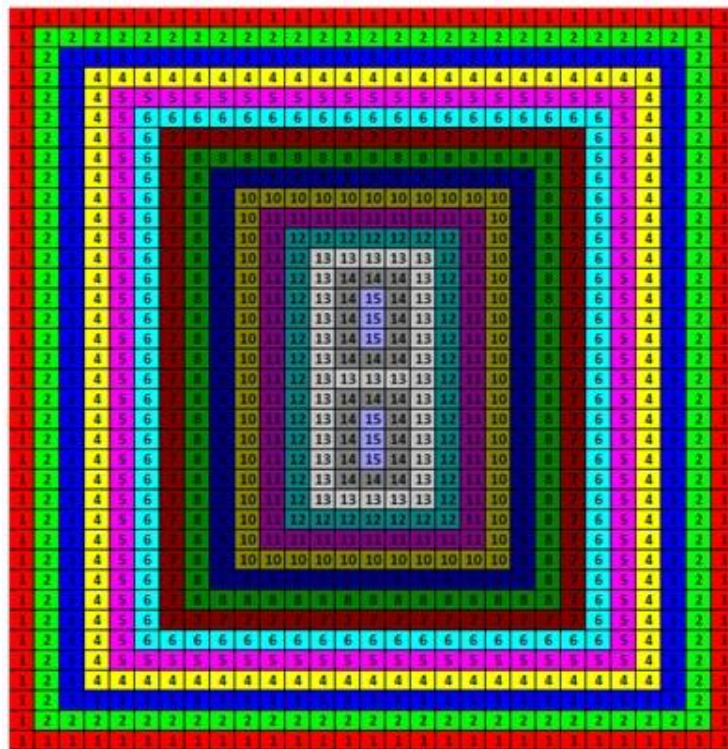


شکل ۴- مدل بلوکی (x شماره هر مقطع در کانسار فرض می شود و هر کاربرد اکسل نماینده یک مقطع از کانسار است).

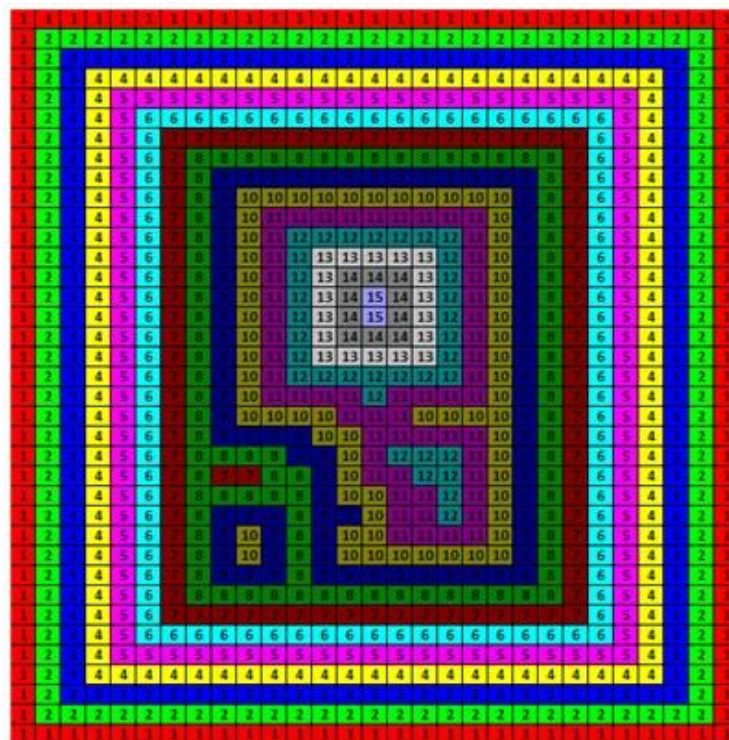
محاسبات اقتصادی منظور شده است. نتایج محاسبات اقتصادی حاصل از این رابطه به نرم‌افزار *PLP* وارد و به کمک منطق مخروط شناور سه‌بعدی پیشروی‌های معدن طراحی شد. بر اساس نتایج بدست آمده به‌ازای سطوح مختلف اطمینان، ارزش‌های اقتصادی مختلفی برای هر بلوک استخراجی و کاواک نهایی معدن بدست می‌آید، بطوریکه با افزایش سطح اطمینان ارزش اقتصادی کاواک نهایی کاهش یافته و برای سطوح اطمینان بالاتر از ۸۱ درصد تعداد بلوک‌های استخراجی از ۲۹۲۷ واحد تا ۲۷۶۶ واحد کاهش می‌یابد. ارزش خالص کاواک نهایی در سطح اطمینان ۸۱ درصد معادل ۴۴۷۰ میلیون ریال برآورد شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن منطق موجود برای ورود پارامترهای آماری در محاسبات اقتصادی بلوک‌های استخراجی و کاواک نهایی معدن می‌توان با سطح اطمینان بیشتر در مورد ارزش خالص کاواک نهایی و همچنین طراحی پیشروی‌ها معادن روباز ارائه داد.

## ۵- نتیجه‌گیری

به منظور بررسی بررسی تأثیر عدم قطعیت عیار بر ارزش اقتصادی بلوک‌های استخراجی معدن سنگ آهن چادرملو، یک رابطه ریاضی ارائه شد. این در حالی است که تا پیش از این دو رابطه برای محاسبات اقتصادی بلوک ارائه شده بود. در رابطه اول تمامی فاکتورها در حالت قطعی منظور شده و تأثیر عدم قطعیت عیار در آن دیده نمی‌شود. در رابطه دوم تأثیر واریانس داده‌های اندازه‌گیری عیار میانگین بلوک بعنوان یک عامل با ارزش منفی از عیار بلوک کم می‌شود. در رابطه پیشنهادی جدید، علاوه بر در نظر گرفتن پارامتر واریانس آماری داده‌های عیاری به عنوان یک ارزش منفی، پارامتر فاصله‌داری عیار میانگین هر بلوک از عیار حد معدنکاری به عنوان یک ارزش مثبت در بطور همزمان



الف



ب

شکل ۵ - خروجی نرم افزار PLP در مورد کانسار چادرملو برای دو بازه تغییرات nl (الف: ۱/۳۲ تا ۱/۳۲؛ ب: ۱/۳۲ تا ۱/۹۶)

## ۶- مراجع

- [۱] Smith, M. L., (1998). Optimization short-term production schedules in surface mining: Integrating mine modeling software with AMLP/CPLEX. *International journal of surface mining, reclamation and environmental*, 149-155.
- [۲] Wilke, F. L., & Reimer, T., (1979). Optimizing the short-term production schedule for an open-pit iron ore mining system. *Computer methods for the 80's in the mineral industry. society of mining engineers of A.I.M.E.*
- [۳] Johnson, T. B., (1969). Optimum Production Scheduling. *Proceedings. 8th International Symposium on Computers and Operations research* (pp. 539-562). Salt Lake City: Utah.
- [۴] Williams, C. E., (1974). Computerized year-by- year open pit mine scheduling. *Society of Mining Engineers, AIME, Transactions*.
- [۵] Gershon, M. E., (1987). An open pit production scheduler: algorithm and implementation. *Mining Engineering*, (pp. 793-796).
- [۶] Eleveli, B., (1995). Open pit mine design and extraction sequencing by use of OR and AI concept. *International journal of surface mining, reclamation and environmental*, (pp. 149-153).
- [۷] Dagdelen, K., & Johnson, T. B., (1986). Optimum Open Pit Mine Production Scheduling by Lagrangian Parametrization. *Proceeding of the 19th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry* (pp. 127-142). Pennsylvania: Pennsylvania State University.
- [۸] Froyland, G., Menabde, M., Stone, P., & Hodson, D., (2004). The value of additional drilling to open pit mining projects, in: *Orebody Modelling and Strategic Mine Planning-Uncertainty and Risk Management*. Perth: The Australian Institute of Mining and Metallurgy.
- [۹] Johnson, T. B., & Barnes, J., (1988). Application of Maximal Flow Algorithm to Ultimate Pit Design. *Engineering Design: Better Results through Operations Research Methods*, (pp. 518-531). North Holland.
- [۱۰] Lerchs, H., & Grossman, F., (1965). Optimum design of open-pit mines. *Transaction CIM*, 58, 47-54.
- [۱۱] Dagdelen, K., (2000). Open pit optimization- Strategies for improving economics of mining projects through mine planning. *Application Computers for Mining Industry*, 125-129.
- [۱۲] Wang, Q. and Sevim, H., (1992). Enhanced production planning in open pit mining through intelligent dynamic search. In Y. Kim, editor, *23rd APCOM, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*, chapter 46. (pp. 461-471). Inc., Littleton, CO.
- [۱۳] Tolwinski, B., (1998). Scheduling production for open pit mines. *APCOM'98, Institute of mining and metallurgy*, (pp. ۶۰۱-۶۶۲). London, United Kingdom.
- [۱۴] Tolwinski, B., & Golosinski, T. S., (1995). Long term open pit scheduler. *Proceeding of international symposium on Mine Planning and Equipment Selection* (pp. ۲۰۶-۲۶۲). Balkema, Rotterdam.
- [۱۵] Steffan, O. H., (1997). Planning of open pit mines on a risk basis. *The journal of the South African institute of mining and metallurgy*, ۴۷-۵۶.
- [۱۶] Fytas, K., & Calder, P. N., (1986). A computerized model of open pit short and long range production scheduling. *Proceeding of Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*, (pp. ۱۰۹-۱۱۹).
- [۱۷] Bernabe, D., & Dagdelen, K., (2002). A comprehensive analysis of open pit mine scheduling techniques for strategic mine planning of the TINTAYA copper mine in Peru. In *SME Annual meeting* (pp. 25-27). Arizona, Preprint ۰۲-۱۲۰.: Phpenix.
- [۱۸] Dimitrakopoulos, R., & Ramazan, S., (2003). Managing risk and waste mining in long-term production scheduling of open pit mine. *SME Annual meeting & exhibit*, (pp. ۰۲-۱۰۱). Cincinnati Ohio.
- [۱۹] Johnson, T. B., Dagdelen, K., & Ramazan, S., (2002). Open pit mine scheduling based on fundamental tree algorithm. *Proceeding of the 30th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry* (pp. ۱۴۷-۱۵۹). SME: Littleton.
- [۲۰] غلام‌نژاد، ج.، (۱۳۸۵). رسالهٔ دکتری، طراحی پیشروی‌ها با عدم قطعیت عیاری. تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

- [۲۱] حسنی پاک، ع.ا.، (۱۳۷۹). پروژه ارزیابی مجدد معدن سنگ آهن چادرملو، گزارش فاز اول: برنامه‌ریزی بلند مدت در توده شمالی. یزد، اردکان: شرکت معدنی و صنعتی چادرملو.
- [۲۲] Dimitrakopoulos, R., Farrelly, T., & Gody, M., (2002). Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open pit design. Transaction of the IMM, A<sup>۸۲</sup>-A<sup>۸۸</sup>.
- [۲۳] Menabde, M., Froyland, G., Stone, P., and Yeates, G. 2007. Mining schedule optimisation for conditionally simulated orebodies, in Proc. Orebody Modelling and Strategic Mine Planning Spectrum Series, ۱۴, (ed. R. Dimitrakopoulos), ۳۷۹-۳۸۴, Burwood, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- [24] Ramazan, S. and Dimitrakopoulos, R. (2013). Production scheduling with uncertain supply: A new solution to the open pit mining problem, Optimization and Engineering, 14(2), 361-380.
- [25] Leite, A., and Dimitrakopoulos, R. (2014). Stochastic optimization of mine production scheduling with uncertain ore/metal/waste supply: application at a copper deposit, J. Min. Sci. Technol., In Press.
- [۲۶] زارع، ح.، (۱۳۸۷). پروژه کارشناسی ارشد، طراحی ماکروها برای تحلیل ریسک و طراحی کاواک معدن. یزد: دانشگاه یزد.