



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۴۷۵ تا ۴۸۹
Vol. 48, No. 4, Winter 2016, pp. 475-489



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

Amirkabir Journal of Science and Research
Civil and Environmental Engineering
(AJSR-CEE)

برنامه رایانه‌ای تعیین محدوده بهینه استخراج زیرزمینی-GOUMA_CP

سید محمد اسماعیل جلالی^{۱*}، مجید عطایی پور^۲، کورش شهریار^۳، ابراهیم الهی‌زینی^۴، وحید نیک‌بین^۵

- ۱- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود
- ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- ۳- استاد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- ۴- مربی، دانشکده فنی و مهندسی شهید نیکبخت (گروه معدن)، دانشگاه سیستان و بلوچستان
- ۵- دانشجوی دکتری، مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۱۳۹۳/۷/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۱۰)

چکیده

تاکنون تعداد معدودی الگوریتم برای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی ارائه شده است. بر این اساس، نرم‌افزارهای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی نیز رشد کمی داشته‌اند و تعداد این برنامه‌ها بسیار محدود است. یکی از الگوریتم‌های ارائه‌شده در زمینه بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی، الگوریتم فراگیر GOUMA بوده که بر روی مدل‌های بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر (VVEM) اجرا می‌شود و توانایی تعیین جانمایی بهینه کارگاه‌های استخراج را دارد. به منظور سهولت استفاده از الگوریتم GOUMA و بکارگیری آن برای حل مدل‌های بزرگ، یک برنامه کامپیوتری به زبان ++C به نام GOUMA-CP طراحی و تدوین شده است. در این برنامه پس از وارد نمودن مجموعه‌ای از اطلاعات فنی، هندسی و اقتصادی، محدوده بهینه استخراج تعیین شده و مجموعه‌ای از اطلاعات شامل آدرس (مختصات) و ارزش اقتصادی بلوک‌های واقع در محدوده استخراج به کاربر معرفی می‌شود. در این مقاله، پس از معرفی برنامه GOUMA-CP، از این برنامه به منظور طراحی محدوده بهینه استخراج در یک معدن طلای رگه‌ای در استرالیا (که به روش کند و آکند استخراج می‌شود)، استفاده شده است.

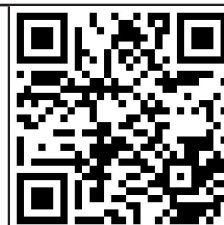
کلمات کلیدی:

مدلسازی، الگوریتم بهینه‌سازی، برنامه کامپیوتری، استخراج زیرزمینی، GOUMA-CP

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:
Jalali, S. E., Atae-pour, M., Shahrar, K., Elahi-Zeyni, E. and Nikbin, V., 2016. "Computer Based Optimization of Underground Mining Area". *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(4), pp. 475-489.
DOI: 10.22060/ceej.2015.369
URL: http://ceej.aut.ac.ir/article_369.html

نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات: E-mail: jalalisme@gmail.com



۱- مقدمه

تاکنون تعداد قابل توجهی نرم‌افزار برای بهینه‌سازی محدوده استخراج روباز ارائه شده است. اما تدوین چنین نرم‌افزارها و برنامه‌هایی برای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی به دلیل نبود الگوریتم‌های مناسب و فراگیر بسیار کم بوده است. نرم‌افزارهای معدودی که برای بهینه‌سازی محدوده بهینه استخراج زیرزمینی ارائه شده‌اند را می‌توان به دو گروه جزء‌گرا و کل‌گرا تقسیم کرد [۱].

گروه نخست شامل نرم‌افزارهایی است که با هدف بهینه‌سازی محدوده استخراج در یک پهنه و یا طبقه تدوین شده‌اند و مبتنی بر یکی از الگوریتم‌های جزء‌گرا مانند الگوریتم‌های ریدل^۱، شاخه و حد^۲ و الگوریتم OLIPS^۳ هستند. اولین برنامه در این گروه در سال ۱۹۷۷ بر اساس الگوریتم ریدل با زبان فرترن IV تدوین شده است [۳]. این برنامه، قدیمی‌ترین برنامه‌ای است که برای بهینه‌سازی محدوده استخراج در یک طبقه تدوین شده و تنها بر روی چند مدل اقتصادی دو بعدی فرضی اجرا گردیده است.

برای کاربرد الگوریتم شاخه و حد نیازی به تدوین نرم‌افزار انحصاری نیست. زیرا تاکنون تعداد زیادی نرم‌افزار برای حل مسائل ریاضی با استفاده از روش شاخه و حد ارائه شده است که مهمترین و متداول‌ترین آن‌ها، نرم‌افزارهای MPS و LINDO هستند [۴]. در سال ۱۹۹۹، نمونه‌ای از کاربرد نرم‌افزار MPS برای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی به روش استخراج از طبقات فرعی در معدن آهن پی‌ریج^۴ واقع در ایالت میسوری آمریکا با کاربرد الگوریتم شاخه و حد گزارش شده است [۵].

جلالی در سال ۱۳۸۵، یک الگوریتم دو بعدی و دارای منطق ریاضی به نام OLIPS را ارائه داد. این الگوریتم از منطق برنامه‌ریزی پویا بهره می‌برد و قادر است تا محدوده بهینه کارگاه‌های استخراج را در حوزه فرضیاتی که دارد، تعیین کند [۶]. یکی از مهمترین وجوه تمایز الگوریتم OLIPS با دیگر الگوریتم‌های موجود، اجرای آن بر روی نوع ویژه‌ای از مدل بلوکی اقتصادی به نام مدل کارگاه محتمل یکپارچه^۵ است که سبب می‌شود تا برخی از محدودیت‌های فنی و هندسی روش‌های استخراج از مجموعه قیود الگوریتم حذف شوند و به مدل اقتصادی محدوده استخراج انتقال یابند [۷].

بر مبنای این الگوریتم، یک برنامه به نام SBO^۶ توسط جلالی و همکاران در سال ۱۳۸۵ طراحی و تدوین شده است و نتایج حاصل از اعتبارسنجی آن بر روی مدل‌های فرضی نیز موفقیت‌آمیز بوده است [۸]. گروه دوم شامل برنامه‌هایی است که با هدف بهینه‌سازی کل محدوده

استخراج تدوین شده‌اند و مبتنی بر یکی از الگوریتم‌های کل‌گرا مانند الگوریتم‌های کارگاه شناور^۷، با ارزش‌ترین همسایگی^۸ و یا توپال^۹ هستند. بر اساس الگوریتم جستجوگر کارگاه شناور، نرم‌افزار دینامین^{۱۰} توسط یک شرکت نرم‌افزاری به همین نام ارائه شده است [۹]. این نرم‌افزار (که یک نرم‌افزار حرفه‌ای و تجاری است)، مهمترین و پرکاربردترین نرم‌افزار برای بهینه‌سازی کل‌گرای محدوده استخراج زیرزمینی به حساب می‌آید. بر اساس الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی نیز یک برنامه غیرتجاری به نام SLO^{۱۱} برای بهینه‌سازی کل‌گرای محدوده استخراج زیرزمینی بر روی مدل‌های سه‌بعدی فرضی ارائه شده است [۱۰]. اما گزارشی از کاربرد SLO بر روی مدل‌های دو و یا سه‌بعدی واقعی تاکنون منتشر نشده است. توپال نیز در سال ۲۰۱۰ پس از تدوین یک الگوریتم جدید به منظور بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی، برنامه‌ای مبتنی بر این الگوریتم را در محیط نرم‌افزار متلب^{۱۲} تدوین کرده است. برنامه ارائه‌شده توسط توپال مانند برنامه‌های مبتنی بر الگوریتم‌های کارگاه شناور و با ارزش‌ترین همسایگی، بر روی مدل‌های سه‌بعدی اجرا می‌شود و توانایی طراحی کارگاه‌های استخراج با ابعاد یکسان و متفاوت را دارد [۱۱].

برنامه GOUMA-CP که در این مقاله ارائه شده، بر اساس الگوریتم فراگیر GOUMA^{۱۳} تدوین شده است. ویژگی‌های الگوریتم GOUMA سبب شده است که این برنامه از پشتوانه‌ای قوی در تعیین محدوده بهینه استخراج زیرزمینی برخوردار باشد. از جمله ویژگی‌های الگوریتم GOUMA می‌توان به توانایی‌های آن در:

(الف) اجرا بر روی مدل‌های بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر،

(ب) فراخوانی الگوریتم دارای منطق ریاضی OLIPS به منظور

انجام فرایند بهینه‌سازی در هر طبقه استخراجی و

(ج) در نظر گرفتن تمامی حالت‌های ممکن برای جانمایی طبقات و

محدوده‌های استخراج محتمل

اشاره نمود.

۲- معرفی الگوریتم GOUMA

این الگوریتم در سال ۱۳۸۵ توسط جلالی و همکاران تهیه شد و بر روی مدل‌های بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر^{۱۴} یا VVEM اجرا می‌شود. ارزش اقتصادی هر بلوک در مدل VVEM با توجه به مشخصات هندسی و جانمایی طبقه‌ای که بلوک مورد نظر در آن قرار می‌گیرد، تغییر می‌نماید. پس از ساخت سه مدل اقتصادی با ابعاد یکسان

⁷ Floating Stope

⁸ Maximum Value Neighborhood

⁹ Topal

¹⁰ Datamine

¹¹ Stope Limit Optimiser

¹² MATLAB

¹³ Global Optimisation for Underground Mining Area

¹⁴ Variable Value Economic Model

¹ Riddle

² Branch and Bound

³ Optimum Limit Integrated Probable Stope

⁴ Pea Ridge

⁵ Integrated Probable Stope Model

⁶ Stope Boundary Optimiser

استخراج محتمل از ترکیب این طبقات محتمل تشکیل می‌شود. در واقع یک محدوده استخراج محتمل، محدوده‌ای شامل یک یا ترکیبی از چند طبقه محتمل بدون همپوشانی است [۲].

پس از تعیین موقعیت و ارتفاع تمامی طبقات و محدوده‌های استخراج محتمل با کاربرد الگوریتم جزء‌گرای OLIPS، محدوده بهینه استخراج و ارزش اقتصادی متناظر با آن طبقه محتمل تعیین می‌شود. با تعیین محدوده بهینه استخراج در هر یک از طبقات محتمل و نیز برآورد ارزش اقتصادی متناظر با آن، ارزش اقتصادی محدوده‌های استخراج محتمل (که هر یک ترکیبی از یک یا چند طبقه محتمل است)، محاسبه می‌گردد. در نهایت محدوده بهینه استخراج، از میان محدوده‌های استخراج محتمل و با توجه به ارزش اقتصادی متناظر با هر محدوده جستجو می‌شود و محدوده‌ای که دارای بیشترین ارزش اقتصادی است به عنوان محدوده بهینه استخراج انتخاب می‌گردد [۲].

۳- برنامه GOUMA-CP

برنامه GOUMA-CP بر اساس الگوریتم فراگیر بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی^۸ (GOUMA) تدوین شده است. در الگوریتم GOUMA که مبنای تدوین برنامه قرار گرفته است، قیود و محدودیت‌های فنی تمامی روش‌های استخراج زیرزمینی متعارف برای استخراج کانسارهای صفحه‌ای^۹ از جمله محدودیت کمینه طول و ارتفاع کارگاه استخراج، کمینه عرض پایه‌های تاج بالایی و پایینی و محدودیت‌های هم‌ترازی حد بالایی و پایینی کارگاه استخراج اعمال شده است [۲]. بنابراین، از این برنامه می‌توان به منظور بهینه‌سازی محدوده استخراج در کانسارهای صفحه‌ای با مقیاس‌های واقعی با کاربرد هر یک از روش‌های استخراج زیرزمینی متعارف استفاده نمود.

برنامه GOUMA-CP با زبان ++C پیاده‌سازی شده و بر روی رایانه‌های شخصی معمولی و متعارف قابل اجرا است. این برنامه بر روی مدل‌های واقعی و بزرگ مقیاس به صورت موفقیت‌آمیز اجرا شده است.

۳-۱- ورودی‌های برنامه GOUMA-CP

این برنامه پس از اجرا، مجموعه‌ای از اطلاعات فنی، هندسی و اقتصادی استخراج به ترتیب شامل اطلاعات فایل‌های ورودی و خروجی^{۱۰}، مشخصات مدل^{۱۱}، مشخصات هندسی کارگاه‌ها و طبقات استخراجی^{۱۲} و هزینه‌های استخراج بلوک را دریافت می‌نماید. در شکل (۱) منوی اطلاعات دریافتی در برنامه GOUMA-CP مشاهده می‌شود.

فایل ورودی باید قبل از اجرای برنامه تولید شود. فایل مورد نظر شامل چهار ستون است که دو ستون ابتدایی آن به ترتیب معرف

به نام‌های مدل درآمدی برجا^۱ (IIM)، مدل هزینه موقعیت^۲ (PCM) و مدل هزینه استخراج^۳ (MCM)، مدل VVEM از تلفیق آن‌ها ساخته می‌شود [۲].

IIM یک مدل بلوکی با ارزش ثابت است که ارزش هر یک از بلوک‌های تشکیل‌دهنده آن، نشان‌دهنده درآمد بلوک برجا^۴ یا BII است. BII برای هر بلوک، معرف درآمدی است که برای ماده معدنی موجود در آن بلوک به صورت برجا و قبل از استخراج پیش‌بینی می‌شود [۲].

PCM یک مدل بلوکی با ارزش ثابت است که ارزش هر یک از بلوک‌های آن، هزینه نسبی مربوط به جانمایی بلوک مورد نظر در مدل بلوکی را نشان می‌دهد. ارزش هر یک از بلوک‌های واقع در مدل هزینه موقعیت (PCM) با BPC^۵ نشان داده می‌شود [۲].

MCM یک مدل بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر است که ارزش هر یک از بلوک‌های تشکیل‌دهنده آن، هزینه استخراج بلوک^۶ (BMC) مورد نظر را نشان می‌دهد [۲].

در مدل VVEM، ارزش اقتصادی هر بلوک^۷ (BEV) از جمع مقادیر بلوک‌های نظیر در سه مدل مذکور بدست می‌آید. به عبارت دیگر:

$$BEV = BII + BPC + BMC \quad (1)$$

مدل IIM و PCM دارای بلوک‌هایی با ارزش ثابت هستند. اما مدل MCM دربرگیرنده بلوک‌هایی با ارزش متغیر است که ارزش هر یک از بلوک‌های آن پس از مشخص شدن ارتفاع طبقات و جانمایی آن‌ها در محدوده مدل‌سازی شده، تعیین می‌شود. بنابراین، ارزش هر یک از بلوک‌های مدل VVEM نیز متغیر بوده و به ارتفاع طبقه و جانمایی طبقه‌ای که بلوک مورد نظر در آن واقع است، بستگی دارد [۲].

برای تعیین مقدار BEV به عنوان تابعی از جانمایی و ارتفاع طبقه، مجموعه‌ای از حالات متفاوت جانمایی طبقات با ارتفاع‌های مختلف (که معرف تمامی حالت‌های محتمل برای جانمایی طبقات باشد) در هر محدوده مدل‌سازی تعریف شده است. در ابتدا مقدار BMC برای بلوک‌های واقع در هر یک از این حالات محاسبه شده و سپس BEV متناظر با آن‌ها تعیین می‌شود [۲].

مجموعه‌ای از حالت‌های مختلف جانمایی طبقات با ارتفاع‌های متفاوت (که معرف تمامی حالات محتمل برای جانمایی طبقات باشد) تعریف شده و هر یک از اعضای این مجموعه، یک طبقه محتمل نامیده می‌شود. موقعیت و ارتفاع هر طبقه محتمل با یک زوج مرتب به صورت $PL_{(S,H)}$ نشان داده می‌شود که در آن، اندیس S معرف نقطه شروع و یا در واقع نشان‌دهنده جانمایی طبقه محتمل و H بیانگر ارتفاع طبقه است. پس از تعیین تعداد و موقعیت تمامی طبقات محتمل، محدوده‌های

¹ Insitu Income Model

² Position Cost Model

³ Mining Cost Model

⁴ Block Insitu Income

⁵ Block Position Cost

⁶ Block Mining Cost

⁷ Block Economic Value

⁸ Global Optimization for Underground Mining Area

⁹ Tabular or Vein Type Deposit

¹⁰ Input and Output Files

¹¹ Model Specifications

¹² Levels and Stopes Geometry

می‌دهد. در صورتی که مختصات بلوک‌ها در فایل ورودی منطبق با فاصله مرکز به مرکز بلوک‌ها در جهات امتدادی و شیبی نباشد، برنامه پیغام خطای مناسب را اعلام نموده و از کاربر می‌خواهد تا اطلاعات فایل ورودی را تصحیح و یا تکمیل نماید.

مهمترین ویژگی ویرایش فایل ورودی با استفاده از فاصله مرکز به مرکز بلوک‌ها در جهات امتدادی و شیبی، فراهم آوردن امکان استفاده از هر نوع سیستم مختصات اعم از سیستم مختصات جهانی^۱ (UTM) و یا محلی با استفاده از هر یک از واحدهای اندازه‌گیری طول است. طبیعی است در صورتی که آدرس بلوک‌ها در فایل ورودی بر حسب شماره بلوک در جهات امتدادی و شیبی ثبت شده باشد، فاصله مرکز به مرکز بلوک‌ها در دو جهت متعامد نیز برابر با یک واحد خواهد بود. در چنین شرایطی ممکن است که ابعاد بلوک در جهات امتدادی و شیبی با هم برابر نباشد. در مثال ارائه شده در مدل‌های اقتصادی IIM و PCM، آدرس بلوک‌ها در جهات متعامد بر حسب شماره بلوک بیان شده است. بنابراین، فاصله بلوک‌ها در دو جهت متعامد برابر با یک واحد منظور می‌شود.

در قسمت سوم برنامه، اطلاعات مربوط به مشخصات هندسی اجزای طبقات محتفل دریافت می‌شود. این گروه از اطلاعات عبارتند از: کمینه و بیشینه ارتفاع کارگاه استخراج، کمینه طول کارگاه استخراج، کمینه عرض پایه‌های تاج بالایی و پایینی کارگاه استخراج و نیز بیشینه محدودیت‌های هم‌ترازی حد بالایی و پایینی در کارگاه استخراج.

کمینه و بیشینه ارتفاع کارگاه استخراج در لیست اطلاعات ورودی، بر حسب تعداد بلوک وارد می‌شود. برنامه محدوده مجاز برای وارد کردن کمینه و بیشینه ارتفاع کارگاه استخراج در جهت شیبی را با توجه به ابعاد مدل بلوکی اقتصادی و ماتریس متناظر با آن به کاربر معرفی می‌نماید.

محدوده مجاز برای وارد کردن کمینه طول کارگاه استخراج نیز بر اساس ابعاد مدل بلوکی اقتصادی و ماتریس متناظر با آن در جهت امتدادی بر حسب تعداد بلوک تعیین و به کاربر معرفی می‌شود.

محدوده مجاز کمینه عرض پایه‌های تاج بالایی و پایینی کارگاه استخراج نیز با توجه به کمینه ارتفاع کارگاه استخراج شده و ابعاد مدل بلوکی اقتصادی در جهت شیبی تعیین و بر روی صفحه نمایش چاپ می‌شود.

محدوده مجاز برای وارد کردن محدودیت‌های هم‌ترازی حد بالایی و پایینی کارگاه استخراج نیز متناسب با کمینه و بیشینه ارتفاع کارگاه استخراج در طبقات محتفل، محاسبه و به کاربر اعلام می‌شود.

به عنوان مثال، با توجه به اطلاعاتی که برای بهینه‌سازی محدوده استخراج نشان داده شده در مدل‌های اقتصادی IIM و PCM استفاده شده است، کمینه و بیشینه ارتفاع کارگاه استخراج به ترتیب برابر با سه و پنج بلوک، کمینه طول کارگاه استخراج برابر با سه بلوک، کمینه عرض پایه‌های تاج بالایی و پایینی هر یک برابر با یک بلوک و محدودیت‌های هم‌ترازی حد بالایی و پایینی کارگاه استخراج نیز به ترتیب برابر با صفر و

<<INPUT AND OUTPUT FILES >>

Project Title: Numerical Example

Input File Name: Input.DAT

Output File Name: Output.DAT

<<MODEL SPECIFICATION>>

Strike Interval: 1

Dip Interval: 1

<<LEVELS AND STOPES GEOMETRY>>

Minimum Stope Height

In Block [0 - 13]: 3)

Maximum Stope Height

In Block [3 - 13]: 5)

Minimum Stope Length

In Block [1 - 15]: 3)

Minimum Width Of Upper Crown Pillar

In Block [0 - 10]: 1)

Minimum Width Of Under Crown Pillar

In Block [0 - 9]: 1)

Maximum Floor Level Variation Constraint

In Block [0 - 2]: 0)

Maximum Ceiling Level Variation Constraint

In Block [0 - 2]: 1)

<<MINING BLOCKS COSTS>>

BMC for 3 blocks stopes: -5.00

BMC for 4 blocks stopes: -4.00

BMC for 5 blocks stopes: -5.00

Optimisation Results of Undergroun Mining Area are recorded

.in <<Output.DAT>> file

Input Information and Modeling Data are recorded

.in <<Output.REP>> file

شکل (۱): اطلاعات ورودی برنامه GOUMA-CP

مختصه‌های x و y (یا شماره) هر بلوک و دو ستون بعدی به ترتیب بیانگر درآمد برجای بلوک (BII) و هزینه موقعیت آن (BPC) است.

یک نمونه از فایل ورودی برنامه که برگرفته از مدل‌های اقتصادی IIM و PCM بوده و با نام Input.DAT ذخیره شده، در جدول (۱) آمده است.

در بخش دوم از منوی ورودی برنامه، مدل‌های IIM و PCM به صورت ماتریس‌های دو بعدی با آرایش مستطیلی برای ساخت مدل VVEM تشکیل شده و در قسمت‌های بعدی برنامه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ماتریس‌های اقتصادی مذکور بر اساس اطلاعات ثبت‌شده در فایل ورودی برنامه تشکیل می‌شوند. اطلاعات مورد نیاز در این بخش برای ساخت ماتریس‌های مذکور شامل فاصله بلوک‌ها در جهت امتدادی و شیبی و یا در امتداد طول و ارتفاع کارگاه استخراج (جهت متعامد) است. پس از وارد کردن فاصله بلوک‌ها در دو جهت متعامد، برنامه بلافاصله بر روی اطلاعات فایل ورودی اجرا شده و ماتریس‌های اقتصادی را شکل

^۱ Universal Transverse Mercator

جدول (۱): یک نمونه از فایل ورودی برنامه GOUMA-CP

X	Y	BII	BPC	X	Y	BII	BPC	X	Y	BII	BPC
۱	۱	۴	-۲	۶	۱	۴	-۲	۱۱	۱	۶	-۲
۱	۲	۸	-۲	۶	۲	۴	-۲	۱۱	۲	۶	-۲
۱	۳	۸	-۱	۶	۳	۵	-۲	۱۱	۳	۶	-۲
۱	۴	۵	-۱	۶	۴	۴	-۱	۱۱	۴	۸	-۱
۱	۵	۴	-۱	۶	۵	۵	-۱	۱۱	۵	۸	-۱
۱	۶	۵	-۱	۶	۶	۶	-۱	۱۱	۶	۹	-۱
۱	۷	۶	-۱	۶	۷	۶	-۱	۱۱	۷	۷	-۱
۱	۸	۸	۰	۶	۸	۶	۰	۱۱	۸	۹	۰
۱	۹	۷	۰	۶	۹	۸	۰	۱۱	۹	۵	۰
۱	۱۰	۶	۰	۶	۱۰	۷	۰	۱۱	۱۰	۴	۰
۱	۱۱	۷	۰	۶	۱۱	۷	۰	۱۱	۱۱	۵	۰
۱	۱۲	۵	۰	۶	۱۲	۷	۰	۱۱	۱۲	۴	۰
۱	۱۳	۴	۰	۶	۱۳	۹	۰	۱۱	۱۳	۵	۰
۲	۱	۵	-۲	۷	۱	۷	-۲	۱۲	۱	۵	-۲
۲	۲	۷	-۲	۷	۲	۷	-۲	۱۲	۲	۷	-۲
۲	۳	۹	-۲	۷	۳	۷	-۲	۱۲	۳	۹	-۲
۲	۴	۸	-۱	۷	۴	۵	-۱	۱۲	۴	۸	-۱
۲	۵	۸	-۱	۷	۵	۷	-۱	۱۲	۵	۷	-۱
۲	۶	۷	-۱	۷	۶	۷	-۱	۱۲	۶	۹	-۱
۲	۷	۶	-۱	۷	۷	۶	-۱	۱۲	۷	۹	-۱
۲	۸	۹	۰	۷	۸	۸	۰	۱۲	۸	۸	۰
۲	۹	۷	۰	۷	۹	۶	۰	۱۲	۹	۷	۰
۲	۱۰	۷	۰	۷	۱۰	۷	۰	۱۲	۱۰	۶	۰
۲	۱۱	۶	۰	۷	۱۱	۶	۰	۱۲	۱۱	۸	۰
۲	۱۲	۶	۰	۷	۱۲	۶	۰	۱۲	۱۲	۶	۰
۲	۱۳	۵	۰	۷	۱۳	۵	۰	۱۲	۱۳	۵	۰
۳	۱	۵	-۲	۸	۱	۷	-۲	۱۳	۱	۶	-۲
۳	۲	۶	-۲	۸	۲	۹	-۲	۱۳	۲	۹	-۲
۳	۳	۸	-۲	۸	۳	۵	-۲	۱۳	۳	۸	-۲
۳	۴	۷	-۱	۸	۴	۷	-۲	۱۳	۴	۹	-۱
۳	۵	۹	-۱	۸	۵	۷	-۲	۱۳	۵	۹	-۱
۳	۶	۸	-۱	۸	۶	۷	-۱	۱۳	۶	۸	-۱
۳	۷	۷	-۱	۸	۷	۶	-۱	۱۳	۷	۷	-۱

ادامه جدول (۱): یک نمونه از فایل ورودی برنامه GOUMA-CP

X	Y	BII	BPC	X	Y	BII	BPC	X	Y	BII	BPC
۳	۸	۹	۰	۸	۸	۷	-۱	۱۳	۸	۹	۰
۳	۹	۶	۰	۸	۹	۴	-۱	۱۳	۹	۹	۰
۳	۱۰	۴	۰	۸	۱۰	۴	-۱	۱۳	۱۰	۸	۰
۳	۱۱	۵	۰	۸	۱۱	۳	۰	۱۳	۱۱	۹	۰
۳	۱۲	۴	۰	۸	۱۲	۴	۰	۱۳	۱۲	۶	۰
۳	۱۳	۴	۰	۸	۱۳	۳	۰	۱۳	۱۳	۴	۰
۴	۱	۶	-۲	۹	۱	۶	-۲	۱۴	۱	۵	-۲
۴	۲	۶	-۲	۹	۲	۷	-۲	۱۴	۲	۷	-۲
۴	۳	۷	-۲	۹	۳	۶	-۲	۱۴	۳	۹	-۱
۴	۴	۶	-۱	۹	۴	۶	-۲	۱۴	۴	۹	-۱
۴	۵	۸	-۱	۹	۵	۷	-۱	۱۴	۵	۷	-۱
۴	۶	۹	-۱	۹	۶	۹	-۱	۱۴	۶	۹	-۱
۴	۷	۸	-۱	۹	۷	۷	-۱	۱۴	۷	۷	۰
۴	۸	۸	۰	۹	۸	۹	-۱	۱۴	۸	۹	۰
۴	۹	۶	۰	۹	۹	۵	-۱	۱۴	۹	۷	۰
۴	۱۰	۷	۰	۹	۱۰	۵	۰	۱۴	۱۰	۶	۰
۴	۱۱	۶	۰	۹	۱۱	۶	۰	۱۴	۱۱	۸	۰
۴	۱۲	۷	۰	۹	۱۲	۶	۰	۱۴	۱۲	۶	۰
۴	۱۳	۶	۰	۹	۱۳	۶	۰	۱۴	۱۳	۵	۰
۵	۱	۵	-۲	۱۰	۱	۵	-۲	۱۵	۱	۴	-۲
۵	۲	۷	-۲	۱۰	۲	۵	-۲	۱۵	۲	۸	-۲
۵	۳	۶	-۲	۱۰	۳	۷	-۲	۱۵	۳	۷	-۱
۵	۴	۶	-۱	۱۰	۴	۷	-۲	۱۵	۴	۸	-۱
۵	۵	۶	-۱	۱۰	۵	۹	-۱	۱۵	۵	۷	-۱
۵	۶	۶	-۱	۱۰	۶	۸	-۱	۱۵	۶	۷	-۱
۵	۷	۷	-۱	۱۰	۷	۸	-۱	۱۵	۷	۶	۰
۵	۸	۷	۰	۱۰	۸	۹	-۱	۱۵	۸	۷	۰
۵	۹	۷	۰	۱۰	۹	۷	۰	۱۵	۹	۷	۰
۵	۱۰	۶	۰	۱۰	۱۰	۶	۰	۱۵	۱۰	۸	۰
۵	۱۱	۸	۰	۱۰	۱۱	۵	۰	۱۵	۱۱	۶	۰
۵	۱۲	۸	۰	۱۰	۱۲	۷	۰	۱۵	۱۲	۵	۰
۵	۱۳	۵	۰	۱۰	۱۳	۶	۰	۱۵	۱۳	۴	۰

یک بلوک منظور شده است.

یکپارچه متناظر با هر طبقه محتمل، محدوده بهینه استخراج و در نهایت ارزش اقتصادی متناظر با محدوده بهینه استخراج در هر طبقه محتمل ثبت می‌شود. در آخرین قسمت از فایل خروجی فرعی نیز لیستی از تمامی طبقات محتمل و ارزش اقتصادی متناظر با هر یک ثبت می‌گردد.

در جدول (۲)، قسمت اول فایل خروجی اصلی برنامه GOUMA-CP با نام Output.DAT مشاهده می‌شود. در این جدول، لیست بلوک‌هایی که در محدوده استخراج قرار می‌گیرند، درج شده است.

در شکل (۲)، قسمت دوم فایل خروجی اصلی برنامه شامل محدوده معدنی و محدوده استخراج بهینه با آرایش ماتریسی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ارزش اقتصادی محدوده بهینه استخراج معادل با ۲۵۶ واحد برآورد شده است.

در جدول (۳)، قسمت آخر فایل خروجی فرعی (Output.REP) شامل لیست تمامی طبقات محتمل و ارزش اقتصادی متناظر با هر یک از آن‌ها درج شده است.

۳-۳- ویژگی‌های برنامه GOUMA-CP

اغلب نرم‌افزارهایی که تاکنون برای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی ارائه شده‌اند، با هدف حل عددی و اعتبارسنجی الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی بر روی مدل‌های اقتصادی کوچک مقیاس تدوین شده‌اند. این برنامه‌ها به دلیل استفاده نکردن از الگوریتم‌های مناسب و فراگیر بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی و نیز عدم جامعیت و عمومیت، به طور گسترده مورد توجه و اقبال عمومی قرار نگرفته‌اند. تفاوت اساسی برنامه GOUMA-CP با سایر برنامه‌ها و نرم‌افزارهای موجود، در الگوریتم مورد استفاده در آن است. این برنامه بر اساس الگوریتم فراگیر بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی (GOUMA) تدوین شده است. الگوریتم GOUMA از دو ویژگی مهم برخوردار بوده که سبب عمومیت برنامه شده است؛ نخست آن که بر روی مدل بلوکی با ارزش متغیر اجرا می‌شود و دیگر آن که در این الگوریتم قیود و محدودیت‌های فنی همه روش‌های استخراج زیرزمینی متعارف برای استخراج کانسارهای صفحه‌ای از جمله محدودیت کمینه طول کارگاه استخراج، کمینه و بیشینه ارتفاع کارگاه استخراج، کمینه عرض پایه‌های تاج بالایی و پایینی کارگاه استخراج و محدودیت هم‌ترازی حد بالایی و پایینی کارگاه استخراج اعمال شده است. بنابراین، از برنامه GOUMA-CP می‌توان برای بهینه‌سازی محدوده استخراج کانسارهای صفحه‌ای در مقیاس‌های واقعی با کاربرد هر یک از روش‌های استخراج زیرزمینی متعارف استفاده کرد. در جدول (۴)، برخی از شاخص‌های اصلی نرم‌افزارهای موجود با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۴- مطالعه موردی

برای معرفی قابلیت‌های برنامه GOUMA-CP، این برنامه بر روی داده‌های واقعی یک کانسار طلا واقع در استرالیا (که اطلاعات فنی

با توجه به کمینه و بیشینه ارتفاع کارگاه استخراج که توسط کاربر به برنامه داده می‌شود، تعداد کارگاه‌های محتمل بدون در نظر گرفتن جانمایی آن تعیین می‌شود و درخواست وارد کردن هزینه استخراج بلوک (BMC) در هر یک از کارگاه‌های استخراج محتمل با ارتفاع‌های متفاوت بر روی صفحه نمایش ظاهر می‌شود. این برنامه با دریافت هزینه استخراج بلوک، مدل هزینه استخراج (MCM) که از نوع مدل‌های اقتصادی با ارزش متغیر است را نیز تشکیل داده و با تلفیق آن با مدل‌های IIM و PCM، مدل VVEM را ایجاد می‌کند.

تمام هزینه‌ها باید با مقادیر منفی وارد شوند. به عنوان مثال، در این‌جا برای ساخت مدل اقتصادی VVEM بر اساس مدل‌های اقتصادی IIM و PCM، هزینه استخراج هر بلوک در کارگاه‌های استخراجی به ارتفاع ۳، ۴ و ۵ بلوک به ترتیب برابر با ۵، ۴ و ۵- واحد منظور شده است. در شکل (۱)، منوی اطلاعات ورودی چهار قسمتی که در آن نام فایل‌های ورودی و خروجی، مشخصات مدل، مشخصات هندسی کارگاه‌ها و طبقات استخراجی و همچنین هزینه‌های استخراج بلوک بر اساس داده‌های مفروض در این بخش وارد شده است، ملاحظه می‌شود.

۳-۲- خروجی‌های برنامه GOUMA-CP

پس از وارد کردن آخرین گروه اطلاعات ورودی، قسمت اصلی برنامه GOUMA-CP برای بهینه‌سازی محدوده استخراج بر روی مدل اقتصادی با ارزش متغیر (VVEM)، اجرا و دو فایل خروجی تشکیل می‌شود. اطلاعات ثبت‌شده در فایل خروجی اصلی از دو قسمت تشکیل شده است. در قسمت نخست لیستی از آدرس (مختصات) و ارزش اقتصادی بلوک‌هایی که در محدوده استخراج قرار می‌گیرند، به همراه ارزش اقتصادی محدوده استخراج ثبت می‌گردد و در قسمت دوم، محدوده مدلسازی شده با آرایش ماتریسی نمایش داده می‌شود. در این ماتریس، درایه‌هایی که با علامت "۱" مشخص شده‌اند، موقعیت بلوک‌هایی را نشان می‌دهند که در محدوده بهینه استخراج زیرزمینی واقع شده و باید استخراج شوند. درایه‌هایی که با علامت "۰" علامت‌گذاری می‌شوند، موقعیت بلوک‌هایی را بیان می‌کنند که خارج از محدوده بهینه استخراج واقع شده و نباید استخراج شوند. علاوه بر فایل اصلی، یک فایل فرعی برای گزارش نتایج تشکیل می‌شود. در قسمت اول این فایل، گزارشی شامل نام پژوهش، نام فایل ورودی، مشخصات مدل، مشخصات کارگاه‌ها و طبقات استخراجی و نیز هزینه استخراج بلوک در کارگاه‌های محتمل با ارتفاع‌های مختلف (با هدف کنترل آن بخش از اطلاعات ورودی که توسط کاربر و از طریق لیست ورودی برنامه وارد شده است)، ثبت می‌شود. در قسمت دوم برای فراهم‌آوردن امکان کنترل آن بخش از اطلاعات که از روی فایل ورودی برنامه خوانده شده است، مدل‌های اقتصادی IIM و PCM با آرایش ماتریسی تشکیل می‌شود. در قسمت سوم تمامی طبقات محتمل، مدل‌های اقتصادی پایه، کارگاه محتمل و کارگاه محتمل

جدول (۲): لیست بلوک‌های واقع در محدوده بهینه

List of Mineable Blocks								
X	Y	Value	X	Y	Value	X	Y	Value
۱	۲	۲	۱۲	۴	۳	۷	۹	۲
۲	۲	۱	۱۳	۴	۴	۸	۹	-۱
۳	۲	۰	۱۴	۴	۴	۹	۹	۰
۴	۲	۰	۱۵	۴	۳	۱۰	۹	۳
۵	۲	۱	۲	۵	۳	۱۱	۹	۱
۷	۲	۱	۳	۵	۴	۱۲	۹	۳
۸	۲	۳	۴	۵	۳	۱۳	۹	۵
۹	۲	۱	۵	۵	۱	۱۴	۹	۳
۱۰	۲	-۱	۷	۵	۲	۱۵	۹	۳
۱۱	۲	۰	۸	۵	۱	۱	۱۰	۲
۱۲	۲	۱	۹	۵	۲	۲	۱۰	۳
۱۳	۲	۳	۱۰	۵	۴	۳	۱۰	۰
۱۴	۲	۱	۱۱	۵	۳	۴	۱۰	۳
۱۵	۲	۲	۱۲	۵	۲	۵	۱۰	۲
۱	۳	۳	۱۳	۵	۴	۶	۱۰	۳
۲	۳	۳	۱۴	۵	۲	۷	۱۰	۳
۳	۳	۲	۱۵	۵	۲	۸	۱۰	-۱
۴	۳	۱	۱	۸	۴	۹	۱۰	۱
۵	۳	۰	۲	۸	۵	۱۰	۱۰	۲
۷	۳	۱	۳	۸	۵	۱۱	۱۰	۰
۸	۳	-۱	۴	۸	۴	۱۲	۱۰	۲
۹	۳	۰	۵	۸	۳	۱۳	۱۰	۴
۱۰	۳	۱	۶	۸	۲	۱۴	۱۰	۲
۱۱	۳	۰	۷	۸	۴	۱۵	۱۰	۴
۱۲	۳	۳	۸	۸	۲	۱	۱۱	۳
۱۳	۳	۲	۹	۸	۴	۲	۱۱	۲
۱۴	۳	۴	۱۰	۸	۴	۳	۱۱	۱
۱۵	۳	۲	۱۱	۸	۵	۴	۱۱	۲
۱	۴	۰	۱۲	۸	۴	۵	۱۱	۴
۲	۴	۳	۱۳	۸	۵	۶	۱۱	۳
۳	۴	۲	۱۴	۸	۵	۷	۱۱	۲
۴	۴	۱	۱۵	۸	۳	۹	۱۱	۲
۵	۴	۱	۱	۹	۳	۱۰	۱۱	۱
۷	۴	۰	۲	۹	۳	۱۱	۱۱	۱
۸	۴	۱	۳	۹	۲	۱۲	۱۱	۴
۹	۴	۰	۴	۹	۲	۱۳	۱۱	۵
۱۰	۴	۱	۵	۹	۳	۱۴	۱۱	۴
۱۱	۴	۳	۶	۹	۴	۱۵	۱۱	۲

Total Value=۲۵۶/۰۰

Optimized Layout of Underground Mining Area

<<1>>: mineable blocks

<<0>>: non-mineable blocks

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Optimized Probable Levels and it's values:

PL(1, 6)=161.00

PL(7, 6)=95.00

شکل (۲): آرایش ماتریسی محدوده بهینه استخراج

پر می‌شود. با توجه به ارزش قابل توجه ماده معدنی، پایه‌های تاج بالایی و پایینی طبقات استخراجی، بازیابی و مواد پرکننده جایگزین آن‌ها می‌شوند. بر اساس اظهارات BRC در این روش، افت کمی عملیات استخراج برابر با ۷ درصد و افت کیفی (کاهش عیار ماده معدنی به دلیل اختلاط با باطله) نیز صفر منظور شده است [۱۲]. مشخصات هندسی کارگاه استخراج در جدول (۷) مشاهده می‌شود.

بر اساس اطلاعات دریافتی از BRC، هزینه‌های استخراج به روش مذکور وابسته به ارتفاع طبقات بین ۳۹ تا ۴۸ دلار آمریکا بر تن متغیر بوده و مقادیر برآورد شده آن، در جدول (۸) آورده شده است. کانسنگ استخراج‌شده از این معدن برای تولید شمش طلا به یک مجتمع کانه‌آرایی، فرآوری و ذوب ارسال می‌شود. سایر اطلاعات از جمله مشخصات و هزینه‌های فرایند فرآوری، قیمت فروش شمش طلا و حقوق دولتی^۵ نیز در جدول (۹) درج شده است.

۳-۴- مدلسازی محدوده معدنی

مدل بلوکی محدوده معدنی با استفاده از نرم‌افزار دیتامین تولید شده است. این مدل در جهت امتدادی به ۴۴ بخش و در جهت شیبی به ۳۷ بخش تقسیم شده و بر این اساس، ۱۶۲۸ بلوک تولید شده است. در این مدل، ابعاد بلوک‌ها در جهت امتداد کانسار ۵ متر، در جهت شیب کانسار ۳ متر و در بعد سوم کانسار به اندازه ضخامت رگه منظور شده است [۱۲]. خروجی نرم‌افزار دیتامین شامل مختصات مرکز، وزن مخصوص و عیار متوسط هر بلوک است. بر اساس این اطلاعات و با استفاده از نرم‌افزار Surfer 7.0، توزیع عیار کانسار ترسیم و شمای کلی آن در شکل (۳) ارائه شده است.

و اقتصادی آن از مرکز تحقیقات برایان^۱ (BRC) اخذ گردیده، اجرا شده است.^۲ BRC مجموعه‌ای وابسته به دانشگاه کوئینزلند^۳ استرالیا بوده که مجری تعداد زیادی پژوهش در زمینه بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز و زیرزمینی است [۱۲].

۴-۱- مشخصات کانسار

کانسار طلای مورد نظر، یک کانسار رگه‌ای به ضخامت تقریبی ۳/۳ متر و شیب نزدیک به قائم است که در تراز ۹۰ تا ۲۰۰ متری از سطح دریا و در فاصله ۴۰ تا ۵۰ متری از سطح زمین واقع شده است. گسترش این کانسار در جهت امتدادی در حدود ۲۲۰ متر و در جهت شیبی بیش از ۱۱۰ متر است [۱۲]. در جدول (۵)، مشخصات هندسی کانسار مشاهده می‌شود. بر اساس برآوردهای دقیقی که پس از اکتشاف تفصیلی کانسار و با استفاده از نرم‌افزار دیتامین بدست آمده، فلز محتوی کانسار در حدود ۱۵۲۵ کیلوگرم و عیار متوسط آن ۷/۶۸ گرم بر تن برآورد شده است [۱۲]. مشخصات عیاری کانسار در جدول (۶) آمده است.

۴-۲- برآوردهای فنی و اقتصادی

با توجه به اطلاعات دریافتی از BRC، روش مرسوم کند و آکند برای استخراج کانسار طراحی شده است [۱۲]. در این روش، هر طبقه در جهت امتدادی به کارگاه‌های استخراجی با عرض کمینه ۱۵ متر تقسیم می‌شود. سپس یک زیربرش در تراز راهروی باربری احداث و از آن‌جا کانسنگ^۴ به صورت بالارو استخراج و فضای خالی با مواد پرکننده خشک

¹ Brayen Research Center

² Due to restrictions and responsibilities against the clients of research projects, BRC has requested the name and location of mine not be listed.

³ Queensland

⁴ Ore

⁵ Royalty

جدول (۳): طبقات محتمل و ارزش اقتصادی آن‌ها

Optimised Probable Levels and its Value	
PL(۰,۵)	۵۲/۰۰
PL(۱,۵)	۶۲/۰۰
PL(۲,۵)	۸۳/۰۰
PL(۳,۵)	۸۱/۰۰
PL(۴,۵)	۸۳/۰۰
PL(۵,۵)	۶۰/۰۰
PL(۶,۵)	۵۸/۰۰
PL(۷,۵)	۴۲/۰۰
PL(۸,۵)	۲۷/۰۰
PL(۰,۶)	۱۳۱/۰۰
PL(۱,۶)	۱۶۱/۰۰
PL(۲,۶)	۱۵۶/۰۰
PL(۳,۶)	۱۶۵/۰۰
PL(۴,۶)	۱۶۰/۰۰
PL(۵,۶)	۱۲۶/۰۰
PL(۶,۶)	۱۱۷/۰۰
PL(۷,۶)	۹۵/۰۰
PL(۰,۷)	۱۲۰/۰۰
PL(۱,۷)	۱۲۰/۰۰
PL(۲,۷)	۱۲۳/۰۰
PL(۳,۷)	۱۲۴/۰۰
PL(۴,۷)	۱۱۳/۰۰
PL(۵,۷)	۷۷/۰۰
PL(۶,۷)	۶۵/۰۰

۴-۳-۱- مدل درآمدی برجا (IIM)

ارزش اقتصادی بلوک‌های مدل درآمدی برجا (BII) با توجه به اطلاعات عیاری کانسار، در جدول‌های (۸) و (۹) آمده و با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$BII = V \times \gamma \times (1 - L_m) \times (g \times I \times R_e \times (1 - R_o) - C_p) \quad (2)$$

که در آن، V حجم بلوک (حاصلضرب ابعاد بلوک در سه جهت متعام بر حسب متر مکعب)، γ جرم حجمی بلوک (بر حسب تن بر متر مکعب)، g عیار متوسط بلوک (بر حسب گرم بر تن)، I قیمت فروش شمش طلا (بر حسب دلار آمریکا بر گرم)، L_m افت عملیات استخراج (بر حسب درصد)، R_e بازیابی عملیات کانه‌آرایی، فرآوری و ذوب (بر حسب درصد)، R_o حقوق دولتی (بر حسب درصد) و C_p هزینه‌های عملیات کانه‌آرایی، فرآوری و ذوب (بر حسب دلار بر تن) است.

به عنوان مثال، مقدار BII برای بلوکی که در موقعیت $x=55.012/5$ و $y=199/5$ قرار دارد، با توجه به مقادیر عددی زیر از رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$V = 3/38 \times 5 \times 3 = 50/7 \text{ m}^3$$

$$\gamma = 2/49 \text{ ton/m}^3$$

$$g = 6/54 \text{ gr/ton}$$

$$L_m = 7\%$$

$$I = 17/68 \text{ USD/gr}$$

$$R_e = 86\%$$

$$R_o = 2/5\%$$

$$C_p = 20 \text{ USD/ton}$$

$$BII = V \times \gamma \times (1 - L_m) \times (I \times R_e \times (1 - R_o) - C_p)$$

$$BII = 8868 \text{ USD}$$

۴-۳-۲- مدل هزینه موقعیت (PCM)

به دلیل آن که اطلاعات کافی از روش باز کردن، آماده‌سازی و

جدول (۴): مقایسه شاخص‌های اصلی نرم‌افزارهای موجود

ردیف	نام برنامه کامپیوتری	ابعاد مدل بلوکی	نوع مدل بلوکی	الگوریتم مورد استفاده	روش استخراج	نوع استفاده	نحوه بهینه‌سازی	اجرا روی مدل واقعی
۱	ریدل	دو بعدی	ارزش ثابت	برنامه‌ریزی پویا	تخریب توده‌ای	غیرتجاری	جزء‌گرا	خیر
۲	MPS and LINDO	یک بعدی	ارزش ثابت	شاخه و حد	اغلب روش‌ها	تجاری و عمومی	جزء‌گرا	بله
۳	SBO	دو بعدی	ارزش ثابت	OLIPS	همه روش‌ها	غیرتجاری	جزء‌گرا	خیر
۴	SLO	سه بعدی	ارزش ثابت	با ارزش‌ترین همسایگی	همه روش‌ها	غیرتجاری	کل‌گرا	خیر
۵	DATAMINE	سه بعدی	ارزش ثابت	کارگاه شناور	همه روش‌ها	تجاری	کل‌گرا	بله
۶	توپال	سه بعدی	ارزش ثابت	توپال	همه روش‌ها	غیرتجاری	کل‌گرا	بله
۷	GOUMA-CP	دو بعدی	ارزش متغیر	GOUMA	همه روش‌ها	غیرتجاری	فراگیر	بله

جدول (۵): مشخصات هندسی کانسار طلا [۱۲]

ردیف	شرح	مقدار تقریبی	واحد
۱	گسترش امتدادی	۲۲۰	متر
۲	گسترش شیبی	۱۱۰	متر
۳	ضخامت متوسط	۳/۳	متر
۴	شیب متوسط	۷۵	درجه
۵	تراز بالایی کانسار	۲۰۰	متر از سطح دریا
۶	تراز پایینی کانسار	۹۰	متر از سطح دریا
۷	فاصله کانسار تا سطح زمین	۴۵	متر

جدول (۹): مشخصات و هزینه‌های فرآیند فرآوری، قیمت فروش محصول نهایی و حقوق دولتی [۱۲]

ردیف	شرح	مقدار	واحد
۱	هزینه کانه‌آرایی، فرآوری و تولید شمش	۲۰	دلار بر تن
۲	قیمت فروش شمش طلا	۱۷/۶۸	دلار بر گرم
۳	عیار حد	۳/۹۸	گرم بر تن
۴	بازیابی عملیات کانه‌آرایی و فرآوری	۸۶	درصد
۵	حقوق دولتی	۲/۵	درصد

شرایط محیطی کانسار در دسترس نیست، بنابراین هزینه موقعیت بلوک (BPC) برای تمام بلوک‌ها برابر با صفر منظور شده است.

جدول (۶): مشخصات عیاری کانسار طلا [۱۲]

ردیف	شرح	مقدار تقریبی	واحد
۱	ذخیره کانسار	۲۰۰،۰۰۰	تن کانسنگ
۲	فلز محتوی	۱،۵۲۵	کیلوگرم
۳	عیار متوسط	۷/۶۸	گرم بر تن

۴-۴-۴- اطلاعات ورودی

فایل ورودی برنامه GOUMA-CP بر اساس مقادیر BII و BPC تنظیم و تدوین شده و با نام AU-Input.TXT ذخیره شده است.

مقادیر سایر اطلاعات ورودی که از طریق منوی ورودی برنامه توسط کاربر وارد می‌شود، در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول (۷): مشخصات هندسی روش استخراج [۱۲]

ردیف	شرح	مقدار (متر)
۱	کمینه ارتفاع کارگاه استخراج	۴۸
۲	بیشینه ارتفاع کارگاه استخراج	۵۷
۳	کمینه طول کارگاه استخراج	۱۵
۴	عرض پایه تاج (Crown Pillar)	صفر
۵	عرض پایه‌های جانبی (Rib Pillar)	صفر

۴-۵- خروجی برنامه

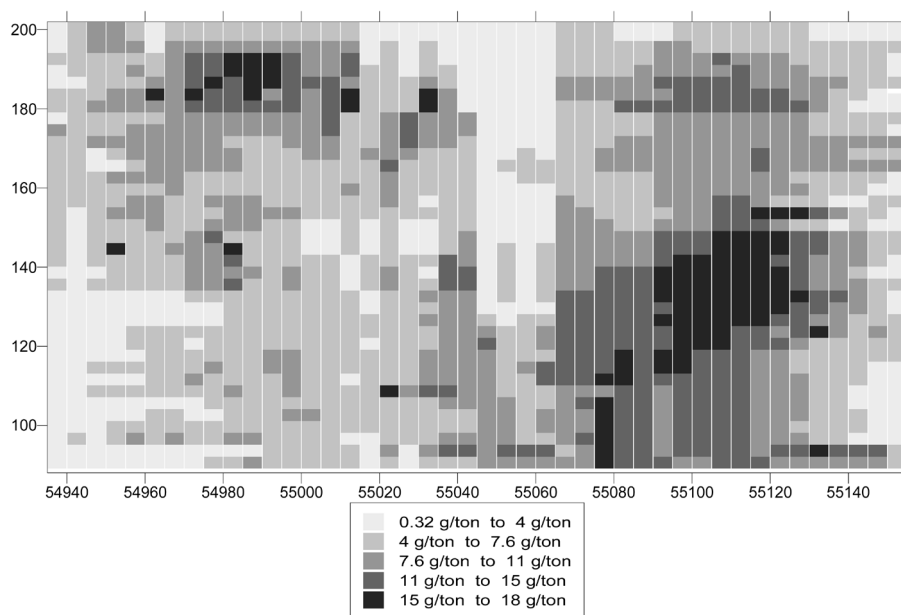
دو فایل خروجی اصلی و فرعی پس از اجرای برنامه (اولی به نام AU-Output.DAT و دیگری به نام AU-Output.REP) ایجاد می‌شود. در فایل اصلی، آدرس و ارزش اقتصادی بلوک‌هایی که در محدوده بهینه استخراج قرار می‌گیرند همراه با جانمایی محدوده بهینه استخراج بر روی مدل پایه (که دارای آرایش ماتریسی است)، ثبت می‌شود. در فایل فرعی نیز گزارشی از اطلاعات ورودی، آرایش ماتریسی مدل‌های IIM و PCM و نیز اطلاعات مربوط به طبقات محتمل ثبت می‌شود.

در شکل (۵)، قسمت دوم فایل خروجی اصلی (به نام AU-Output.DAT) که در آن محدوده بهینه استخراج با یک آرایش ماتریسی مشابه با مدل پایه نشان داده شده است، ملاحظه می‌شود. در جدول (۱۰)، بر اساس اطلاعات ثبت‌شده در قسمت انتهایی فایل خروجی فرعی برنامه (به نام AU-Output.REP)، تمامی طبقات محتمل و ارزش اقتصادی هر یک درج شده است.

بر اساس اطلاعات مندرج در فایل خروجی اصلی، محدوده معدنی به دو طبقه $PL_{(۳,۱۷)}$ و $PL_{(۲,۱۷)}$ تقسیم شده است. طبقه اول از سطر شماره ۳۴ در مدل محدوده معدنی آغاز می‌شود و ۱۷ سطر را دربر می‌گیرد. بنابراین، طبقه اول با ارتفاع ۵۱ متر در محدوده‌ای بین ترازهای ۱۳۹/۵ تا ۱۹۰/۵ متری واقع می‌شود. ارزش اقتصادی این طبقه معادل با ۴۱۷۱ هزار دلار برآورد شده است. طبقه دوم از سطر شماره ۱۷ در مدل محدوده

جدول (۸): هزینه‌های استخراج در کارگاه استخراج با ارتفاع متفاوت

ردیف	شرح	مقدار تقریبی (دلار بر تن)
۱	متوسط هزینه استخراج در کارگاه‌هایی با ارتفاع ۴۸ متر	۴۵
۲	متوسط هزینه استخراج در کارگاه‌هایی با ارتفاع ۵۱ متر	۳۹
۳	متوسط هزینه استخراج در کارگاه‌هایی با ارتفاع ۵۴ متر	۴۳
۴	متوسط هزینه استخراج در کارگاه‌هایی با ارتفاع ۵۷ متر	۴۸



شکل (۳): شمای کلی توزیع عیار در کانسار طلا

معدنی آغاز می‌شود و ۱۷ سطر را شامل می‌شود. این طبقه نیز با ارتفاع ۵۱ متر بلافاصله پس از طبقه اول و در محدوده‌ای بین ترازهای ۹۱/۵ تا ۱۳۹/۵ واقع می‌شود. ارزش اقتصادی طبقه دوم معادل با ۴۹۵۷ هزار دلار برآورد شده است. بنابراین، ارزش کل محدوده استخراج زیرزمینی برابر با ۱۰۲۸۴ هزار دلار پیش‌بینی می‌شود.

در شکل (۶)، مدل محدوده معدنی که در آن ارزش اقتصادی هر بلوک درج‌شده (BEV) همراه با محدوده بهینه استخراج نشان داده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

کند بودن روند ارائه الگوریتم‌های مناسب و فراگیر به منظور بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی، سبب شده است تا برنامه‌های رایانه‌ای نیز در این حوزه رشد کمی داشته باشند. پس از تدوین الگوریتم GOUMA، یک برنامه رایانه‌ای به نام GOUMA-CP و با هدف فراهم‌آوردن امکان اجرای الگوریتم بر روی مدل‌های اقتصادی واقعی و بزرگ‌مقیاس و نیز زمینه‌سازی برای استفاده گسترده از این الگوریتم، تدوین و با زبان C++ پیاده‌سازی شده است. این برنامه بر روی اطلاعات فنی و اقتصادی یک کانسار طلای رگه‌ای واقع در استرالیا اجرا و با استفاده از آن محدوده بهینه استخراج و ارزش متناظر با آن تعیین شده است.

از برنامه GOUMA-CP می‌توان برای بهینه‌سازی محدوده استخراج کانسارهای صفحه‌ای در مقیاس‌های واقعی با کاربرد هر یک از روش‌های استخراج زیرزمینی متعارف استفاده نمود. در ارتباط با برنامه GOUMA-CP می‌توان ورودی‌ها و خروجی‌های آن را (که دارای ساختار غیرگرافیکی است)، بهبود بخشید.

<< INPUT AND OUTPUT FILES >>

Project Title: GOLDMINE OPTIMISATION
Input File Name: AU- Input.TXT
Output File Name: AU-Output.DAT

<< MODEL SPECIFICATION >>

Strike Interval: 5
Dip Interval: 3

<< LEVELS AND STOPES GEOMETRY >>

Minimum Stope Height
(In Block [0 - 13]): 16
Maximum Stope Height
(In Block [3 - 13]): 19
Minimum Stope Length
(In Block [1 - 15]): 3
Minimum Width Of Upper Crown Pillar
(In Block [0 - 10]): 0
Minimum Width Of Under Crown Pillar
(In Block [0 - 9]): 0
Maximum Floor Level Variation Constraint
(In Block [0 - 2]): 1
Maximum Ceiling Level Variation Constraint
(In Block [0 - 2]): 1

<< MINING BLOCKS COSTS >>

BMC for 16 blocks stopes: -5.48
BMC for 17 blocks stopes: -4.75
BMC for 18 blocks stopes: -5.24
BMC for 19 blocks stopes: -5.85

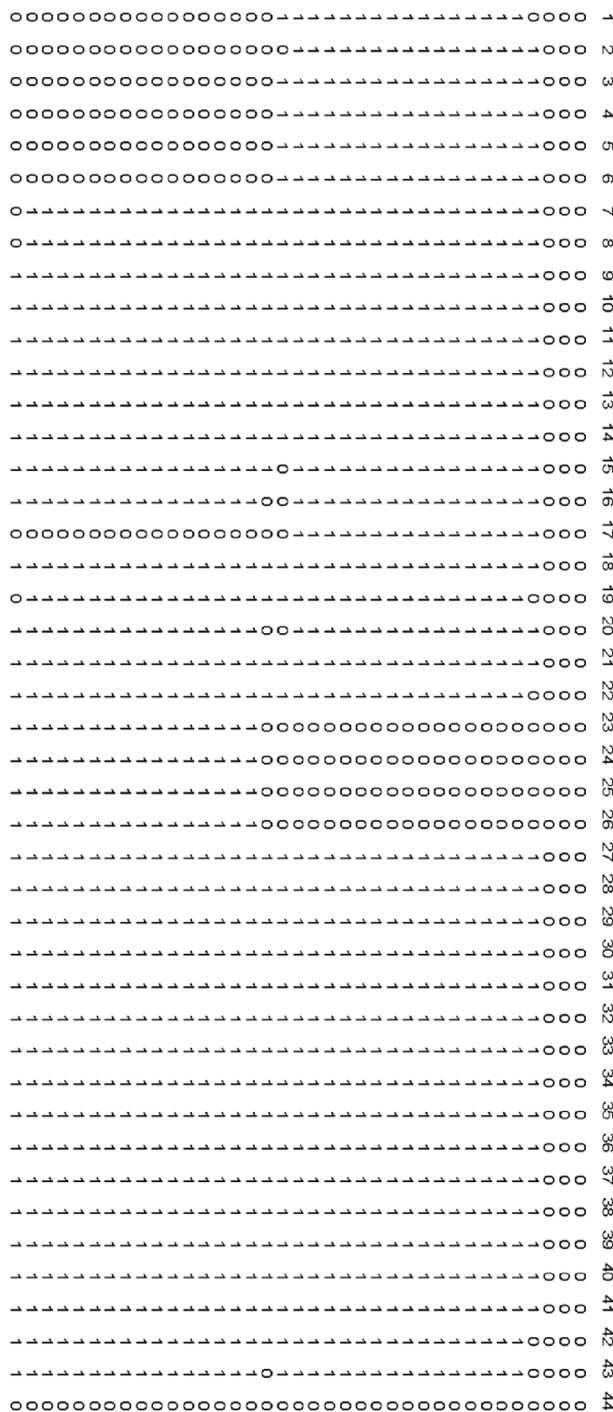
Optimisation Results of Undergroun Mining Area are recorded in <<AU-Output.DAT>> file.
Input Information and Modeling Data are recorded in <<AU-Output.REP>> file.

شکل (۴): منوی اطلاعات ورودی برنامه کامپیوتری GOUMA-CP

جدول (۱۰): طبقات محتمل و ارزش اقتصادی آن‌ها

Optimised Probable Levels and its Values:			
PL(۰,۱۶)	۳۱۳۱/۵۴	PL(۱۹,۱۷)	۴۹۸۹/۰۰
PL(۱,۱۶)	۳۲۷۲/۱۴	PL(۲۰,۱۷)	۴۹۵۷/۲۰
PL(۲,۱۶)	۳۳۷۵/۷۶	PL(۰,۱۸)	۳۷۳۴/۶۲
PL(۳,۱۶)	۳۳۹۷/۷۶	PL(۱,۱۸)	۳۹۵۳/۲۹
PL(۴,۱۶)	۳۴۴۵/۵۸	PL(۲,۱۸)	۴۰۹۸/۶۸
PL(۵,۱۶)	۳۴۴۶/۵۴	PL(۳,۱۸)	۴۱۹۴/۵۶
PL(۶,۱۶)	۳۴۱۰/۷۶	PL(۴,۱۸)	۴۲۵۸/۸۶
PL(۷,۱۶)	۳۴۰۴/۷۰	PL(۵,۱۸)	۴۲۷۸/۱۰
PL(۸,۱۶)	۳۴۶۵/۱۰	PL(۶,۱۸)	۴۱۹۹/۸۲
PL(۹,۱۶)	۳۵۱۰/۳۰	PL(۷,۱۸)	۴۱۳۹/۴۲
PL(۱۰,۱۶)	۳۵۹۲/۱۸	PL(۸,۱۸)	۴۲۱۰/۱۶
PL(۱۱,۱۶)	۳۶۵۷/۱۰	PL(۹,۱۸)	۴۲۴۵/۲۴
PL(۱۲,۱۶)	۳۷۰۰/۵۰	PL(۱۰,۱۸)	۴۲۵۹/۱۵
PL(۱۳,۱۶)	۳۸۱۲/۹۳	PL(۱۱,۱۸)	۴۳۱۴/۷۵
PL(۱۴,۱۶)	۳۹۳۰/۳۰	PL(۱۲,۱۸)	۴۳۷۰/۰۱
PL(۱۵,۱۶)	۴۰۷۷/۰۸	PL(۱۳,۱۸)	۴۴۹۲/۴۹
PL(۱۶,۱۶)	۴۰۹۵/۹۷	PL(۱۴,۱۸)	۴۵۸۲/۴۷
PL(۱۷,۱۶)	۴۱۸۹/۹۶	PL(۱۵,۱۸)	۴۶۵۶/۵۹
PL(۱۸,۱۶)	۴۱۹۹/۲۶	PL(۱۶,۱۸)	۴۷۰۸/۰۳
PL(۱۹,۱۶)	۴۲۳۴/۴۹	PL(۱۷,۱۸)	۴۸۴۲/۴۹
PL(۲۰,۱۶)	۴۲۶۰/۵۴	PL(۱۸,۱۸)	۴۹۴۱/۱۳
PL(۲۱,۱۶)	۴۱۹۶/۲۷	PL(۱۹,۱۸)	۴۹۴۳/۷۳
PL(۰,۱۷)	۳۸۰۰/۶۵	PL(۰,۱۹)	۳۶۰۳/۰۵
PL(۱,۱۷)	۴۰۰۴/۶۵	PL(۱,۱۹)	۳۸۱۷/۶۰
PL(۲,۱۷)	۴۱۲۹/۳۰	PL(۲,۱۹)	۳۹۹۳/۰۰
PL(۳,۱۷)	۴۱۷۱/۴۵	PL(۳,۱۹)	۴۰۹۵/۷۰
PL(۴,۱۷)	۴۲۶۲/۱۰	PL(۴,۱۹)	۴۱۸۷/۳۵
PL(۵,۱۷)	۴۲۶۷/۲۰	PL(۵,۱۹)	۴۱۸۲/۴۰
PL(۶,۱۷)	۴۲۲۳/۶۹	PL(۶,۱۹)	۴۰۹۴/۷۰
PL(۷,۱۷)	۴۱۲۴/۵۰	PL(۷,۱۹)	۳۹۸۴/۳۰
PL(۸,۱۷)	۴۱۸۶/۹۵	PL(۸,۱۹)	۴۰۵۸/۵۰
PL(۹,۱۷)	۴۲۵۷/۲۵	PL(۹,۱۹)	۴۰۸۹/۵۰
PL(۱۰,۱۷)	۴۲۹۶/۶۰	PL(۱۰,۱۹)	۴۱۱۹/۴۵
PL(۱۱,۱۷)	۴۳۳۸/۷۹	PL(۱۱,۱۹)	۴۱۵۱/۶۵
PL(۱۲,۱۷)	۴۴۰۴/۶۴	PL(۱۲,۱۹)	۴۲۱۴/۴۰
PL(۱۳,۱۷)	۴۵۲۰/۰۴	PL(۱۳,۱۹)	۴۳۱۶/۲۰
PL(۱۴,۱۷)	۴۶۵۵/۰۵	PL(۱۴,۱۹)	۴۴۰۳/۸۵
PL(۱۵,۱۷)	۴۷۴۲/۵۵	PL(۱۵,۱۹)	۴۴۹۷/۴۵
PL(۱۶,۱۷)	۴۷۶۸/۱۵	PL(۱۶,۱۹)	۴۵۸۸/۰۰
PL(۱۷,۱۷)	۴۸۶۱/۹۰	PL(۱۷,۱۹)	۴۸۶۲/۵۵
PL(۱۸,۱۷)	۴۹۰۴/۶۵	PL(۱۸,۱۹)	۴۷۹۰/۲۵

افزودن امکانات گرافیکی به برنامه و یا بازنویسی برنامه با C++ و همچنین بهبود بخشیدن نحوه دریافت اطلاعات ورودی و نتایج خروجی برنامه می‌تواند کمک شایانی در جهت استفاده بیشتر از این برنامه و به طور کلی ترویج فرهنگ استفاده از الگوریتم‌ها و برنامه‌های رایانه‌ای برای بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی باشد. علاوه بر این، طراحی



شکل (۵): محدوده بهینه استخراج در معدن طلا (قسمتی از فایل AU-Output.DAT)

- [6] Jalali, S. E. and Ataee-pour, M.; "A 2D Dynamic Programming Algorithm to Optimize Stope Boundaries," *Proceedings of the 13th Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, (eds. Hardygora, M. et al.), Rotterdam, Balkema, pp. 45–52, 2004.
- [7] Jalali, S. E.; Ataee-pour, M. and Shahriar, K.; "Rigorous Algorithms to Optimise Stope Boundaries; Capabilities, Restrictions and Applications," *Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection (SGEM 2007)*, Albena, Bulgaria, 2007.
- [8] Jalali, S. E.; Ataee-pour, M.; Shahriyar, K. and Elahi-Zeyni, E.; "A Computer Program to Optimize Stope Boundaries Using Probable Stope Algorithm," *Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)*, Vol. 2, No. 3, pp. 7–14, 2007.
- [9] DATAMINE Mining Software; "Floating Stope Optimiser–User Guide," *Mineral Industries Limited*, pp. 1–20, 1995.
- [10] Ataee-pour, M.; "A Heuristic Algorithm to Optimise Stope Boundaries," *Ph.D. Thesis*, University of Wollongong, 2000.
- [11] Topal, E. and Sens, J.; "A New Algorithm for Stope Boundary Optimization," *Journal of Coal Science and Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 113–119, 2010.
- [12] Brayan Research Center; "Datamine Results for a Gold Mine," *Queensland University*, Queensland, Australia, 2006.

الگوریتم‌های فراگیری که قابلیت اجرا بر روی مدل‌های سه‌بعدی را داشته باشند و تدوین برنامه‌های رایانه‌ای مبتنی بر این الگوریتم‌ها، می‌تواند فرآیند بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی را ارتقاء دهد.

۶- مراجع

- [1] Jalali, S. A. and Hosseini, H.; "Optimization of Extraction Range in Underground Mining Using a Greedy Algorithm," *Journal of Science and Research in Mining Engineering*, Vol. 4, No. 7, pp. 1–11, 2009 (in Persian).
- [2] Ataeeipour, M. and Jalali, S. A.; "Optimum Selection of Mining Range and Placement of Workshops Extraction in Underground Mining," *Journal of Science and Research in Mining Engineering*, Vol. 8, No. 20, pp. 73–89, 2013 (in Persian).
- [3] Riddle, J.; "A Dynamic Programming Solution of a Block-caving Mine Layout," *14th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, Society for Mining, Metallurgy and Exploration*, Colorado, pp. 767–780, 1977.
- [4] Venkataraman, P.; "Applied Optimization with MATLAB Programming," *John Wiley and Sons*, New York, pp. 239–241, 2001.
- [5] Ovanic, J. and Young, D.; "Economic Optimization of Stope Geometry Using Separable Programming with Special Branch and Bound Techniques," *3rd Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Balkema Rotterdam, pp. 129–135, 1995.