

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی برای روش‌های تخریب در طبقات فرعی و

استخراج از طبقات فرعی

دانشجو:

وحید نیک‌بین

استاد راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

دکتر حسین میرزائی نصیرآباد

پایان‌نامه کارشناسی ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۲



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره: ۹۹۲۱۱۴۲

تاریخ: ۸/۷/۹۲

ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای وحید نیک‌بین رشته معدن گرایش استخراج معدن تحت عنوان بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری زیرزمینی برای روش‌های تخریب در طبقات فرعی و استخراج از طبقات فرعی

که در تاریخ ۱۳۹۲/۶/۲۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه : خوب - امتیاز ۱۷/۲۵) ☒ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	دانشیار	
۲- استاد راهنما	دکتر حسین میرزائی نصیرآباد	استادیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد کارآموزیان	استادیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر رضا خالوکاکایی	استاد	
۵- استاد ممتحن	دکتر محمد عطایی	استاد	

رئیس دانشکده:



پروردگارا

نه می‌توانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شده، سیاه کنم و نه برای دست‌های پینه بسته‌شان که ثمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم. پس توفیقم ده که هر لحظه شکرگزارشان باشم و ثانیه‌های عمرم را در عصای دست بودنشان بگذرانم.

تقدیم به پدر و مادرم

گفت استاد مبر درس از یاد یاد باد آنچه به من گفت استاد

با تقدیر و تشکر بی کران از زحمات اساتید بزرگوارم، جناب آقای دکتر جلالی و جناب آقای دکتر میرزایی که در طی مراحل انجام این پایان نامه از هیچ کمکی دریغ ننموده اند، امیدوارم که توانسته باشم شاگرد خوبی برای ایشان بوده باشم.

همچنین بر خود لازم می دانم از زحمات جناب آقای مهندس سعید مهدوری در دوره کارشناسی نیز تشکر ویژه نمایم.

تعهد نامه

اینجانب وحید نیک‌بین دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی برای روش‌های تخریب در طبقات فرعی و استخراج از طبقات فرعی تحت راهنمایی دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر حسین میرزائی نصیرآباد متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

حدود چهار دهه است که استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در طراحی معادن رواج یافته است. بیشتر این الگوریتم‌ها در زمینه‌ی مباحث مربوط به معدن‌کاری روباز بوده است و بر خلاف معدن‌کاری روباز، رشد این الگوریتم‌ها در زمینه‌ی معدن‌کاری زیرزمینی بدلایلی مانند متعدد بودن روش‌های استخراج زیرزمینی، پیچیدگی مدل‌سازی اقتصادی محدوده معدنی و استفاده از فرضیات ساده‌ساز در تهیه این الگوریتم‌ها، بسیار کند بوده است. در این تحقیق، به منظور تعیین محدوده بهینه کارگاه‌های استخراج، یک الگوریتم جزگرای جدید به نام SOA طراحی شده است که در یک طبقه استخراجی با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی تعریف شده، محدوده بهینه را تعیین می‌نماید. این الگوریتم توانایی در نظر گرفتن محدودیت‌هایی مانند حداقل و حداکثر طول کارگاه استخراج در دو جهت امتداد و ضخامت، حداقل و حداکثر ارتفاع کارگاه‌های استخراج، محدودیت هم‌ترازی و همچنین حداقل عرض لنگه جانبی را دارا است. پس از تدوین این الگوریتم، برای فراگیر نمودن عملیات طراحی، الگوریتم دیگری به نام MLOA تدوین و توسعه داده شده است. در این الگوریتم ابتدا تعداد و محل تمام طبقات محتمل، مشخص و سپس با فراخوانی الگوریتم SOA، تعداد، ابعاد و موقعیت کارگاه‌های استخراج در درون هر طبقه استخراجی مشخص می‌گردد؛ در نهایت با تعیین ارزش بدست‌آمده از مجموع ارزش طبقات محتمل و تعیین ارزش هر محدوده معدن‌کاری محتمل، این محدوده‌ها با یکدیگر مقایسه شده و یک چیدمان بهینه از تعداد و جانمایی طبقات، به همراه تعیین محدوده‌ی استخراج در هر طبقه استخراجی به عنوان خروجی الگوریتم MLOA انتخاب خواهد شد. یک برنامه کامپیوتری نیز در محیط نرم‌افزار MATLAB تدوین شده است که با کاربرد آن، پس از وارد نمودن مدل‌های بلوکی درآمدی و هزینه‌ای و دیگر پارامترهای فنی و اقتصادی، بر مبنای الگوریتم فراگیر MLOA، محدوده بهینه معدن‌کاری تعیین می‌شود و در نهایت یک تصویر سه‌بعدی از محدوده بهینه کارگاه‌ها و طبقات استخراجی به عنوان خروجی این برنامه نشان داده خواهد شد.

کلمات کلیدی: محدوده معدن کاری زیرزمینی، کارگاه محتمل، طبقه محتمل، الگوریتم SOA،

الگوریتم MLOA، بهینه سازی

فهرست

فصل اول (کلیات):	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- منطق الگوریتم‌های بهینه‌سازی	۳
۱-۳- نحوه عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی	۳
فصل دوم (پیشینه مطالعات):	۷
۱-۲- مقدمه	۸
۲-۲- الگوریتم ریدل	۸
۱-۲-۲- منطق الگوریتم ریدل	۹
۲-۲-۲- ویژگی‌های الگوریتم ریدل	۱۴
۳-۲- الگوریتم اوانیک	۱۵
۱-۳-۲- منطق الگوریتم اوانیک	۱۵
۲-۳-۲- ویژگی‌های الگوریتم اوانیک	۲۰
۴-۲- الگوریتم الیپس	۲۱
۱-۴-۲- منطق الگوریتم الیپس	۲۱
مدل پایه	۲۲
مدل کارگاه محتمل	۲۳
مدل کارگاه محتمل یکپارچه	۲۴
۲-۴-۲- ویژگی‌های الگوریتم الیپس	۲۸
۵-۲- الگوریتم گوما	۲۸
۱-۵-۲- منطق الگوریتم گوما	۲۸
۲-۵-۲- ویژگی‌های الگوریتم گوما	۴۳

۴۴	۶-۲- الگوریتم کارگاه شناور
۴۴	۶-۲-۱- منطق الگوریتم کارگاه شناور
۴۵	۶-۲-۲- ویژگی‌های الگوریتم کارگاه شناور
۴۶	۷-۲- الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی
۴۶	۷-۲-۱- منطق الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی
۵۰	۷-۲-۲- ویژگی‌های الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی
۵۱	۸-۲- الگوریتم دیمیتراکوپولوس
۵۱	۸-۲-۱- منطق الگوریتم دیمیتراکوپولوس
۵۳	۸-۲-۲- ویژگی‌های الگوریتم دیمیتراکوپولوس
۵۴	۹-۲- الگوریتم توپال
۵۴	۹-۲-۱- منطق الگوریتم توپال
۵۴	الف- یکسان‌سازی ابعاد بلوکها
۵۵	ب- بهینه‌سازی محدوده کارگاه
۵۶	ج- تصویرسازی کارگاه
۵۷	۹-۲-۲- ویژگی‌های الگوریتم توپال
۵۸	فصل سوم (الگوریتم بهینه‌ساز کارگاه‌های استخراج):
۵۹	۳-۱- مقدمه
۶۰	۳-۲- دامنه کاربرد الگوریتم
۶۲	۳-۲-۱- روش استخراج از طبقات فرعی
۶۴	۳-۲-۲- روش تخریب در طبقات فرعی
۶۵	۳-۳- مراحل اجرای الگوریتم
۸۰	۳-۴- محدودیت‌های مربوط به روشهای استخراج
۸۱	۳-۵- مثال عددی
۹۰	۳-۶- اعتبارسنجی الگوریتم

فصل چهارم (الگوریتم بهینه‌ساز محدوده معدنکاری زیرزمینی):	۹۷
۴-۱- مقدمه	۹۸
۴-۲- مدل‌سازی محدوده معدن کاری	۹۹
۴-۳-۱- مدل درآمدی (IM)	۱۰۰
۴-۳-۲- مدل هزینه‌ای مستقل از تعداد طبقات (LNICM)	۱۰۱
۴-۳-۳- هزینه‌های آماده‌سازی کارگاهی	۱۰۴
۴-۴- حداکثر تعداد طبقات	۱۰۶
۴-۵- طبقه محتمل	۱۰۷
۴-۶- محدوده معدن کاری محتمل	۱۰۸
۴-۷- مدل بلوکی اقتصادی	۱۱۰
۴-۷-۱- موقعیت مدل بلوکی اقتصادی	۱۱۱
۴-۷-۲- ارزش‌گذاری مدل بلوکی اقتصادی	۱۱۲
۴-۸- ویژگی‌های الگوریتم MLOA	۱۱۴
فصل پنجم (برنامه کامپیوتری بهینه‌سازی محدوده معدن کاری زیرزمینی):	۱۱۵
۵-۱- مقدمه	۱۱۶
۵-۲- معرفی برنامه کامپیوتری UMLO	۱۱۸
۵-۳- ورودی‌های برنامه کامپیوتری UMLO	۱۱۹
۵-۴- خروجی برنامه کامپیوتری UMLO	۱۲۵
۵-۵- نمایش گرافیکی محدوده بهینه معدن کاری	۱۲۵
۵-۶- ویژگی‌های برنامه کامپیوتری UMLO	۱۳۳
فصل ششم (نتیجه‌گیری و پیشنهادات):	۱۳۸
منابع و مأخذ:	۱۴۲

فهرست شکل‌ها:

- شکل ۲-۱: محدوده بهینه معدن‌کاری در دو مقطع قایم از یک مدل اقتصادی ۱۲
- شکل ۲-۲: نمایش بلوک‌های مجاور در روش معدن‌کاری روباز و تخریب توده‌ای ۱۳
- شکل ۲-۳: شکل عمومی تابع خطی شکسته ۱۷
- شکل ۲-۴: موقعیت و ارزش خالص هر بلوک در هر یک از سطرها ۱۸
- شکل ۲-۵: تابع ارزش تجمعی بلوک‌ها برای یک سطر از آنها ۱۸
- شکل ۲-۶: نمونه‌ای از مدل پایه از یک محدوده استخراجی ۲۳
- شکل ۲-۷: مدل کارگاه محتمل محدوده استخراج ۲۴
- شکل ۲-۸: مدل کارگاه محتمل یکپارچه ۲۶
- شکل ۲-۹: یک نمونه از مدل درآمدی برجا ۳۰
- شکل ۲-۱۰: یک نمونه از مدل هزینه موقعیت ۳۱
- شکل ۲-۱۱: شمای کلی اجزای یک طبقه استخراجی ۳۲
- شکل ۲-۱۲: تأثیر جانمایی طبقات استخراجی بر هزینه استخراج هر بلوک ۳۳
- شکل ۲-۱۳: یک نمونه از مدل بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر ۳۴
- شکل ۲-۱۴: تعداد و جانمایی طبقات محتمل ۳۶
- شکل ۲-۱۵: ارزش اقتصادی بلوک (BEV) در طبقاتی با جانمایی متفاوت و ارتفاع ۶ بلوک ۳۷
- شکل ۲-۱۶: محدوده‌های استخراج محتمل ۳۹
- شکل ۲-۱۷: محدوده بهینه استخراج در طبقات محتمل با ارتفاع ۶ بلوک ۴۱
- شکل ۲-۱۸: محدوده بهینه استخراج ۴۳
- شکل ۲-۱۹: مفهوم همسایگی با توجه به حداقل ابعاد کارگاه ۴۸
- شکل ۲-۲۰: همسایگی‌های محتمل بلوک B_4 برای مرتبه‌های همسایگی ۲، ۳ و ۴ ۴۸
- شکل ۲-۲۱: تصویر خروجی از برنامه کامپیوتری الگوریتم توپال ۵۶
- شکل ۳-۱: اجزای یک طبقه استخراجی ۶۳
- شکل ۳-۲: شمای کلی از یک طبقه استخراجی برای روشهای استخراج قایم ۶۳
- شکل ۳-۳: شمای کلی از استخراج یک کانسار به روش استخراج از طبقات فرعی ۶۴
- شکل ۳-۴: شمای کلی از استخراج یک کانسار به روش تخریب در طبقات فرعی ۶۵
- شکل ۳-۵: مدل بلوکی اقتصادی P ۶۶

- شکل ۳-۶: نمایش بلوک $P_{(i,j,k)}$ در مدل بلوکی اقتصادی P ۶۷
- شکل ۳-۷: نمایش یک کارگاه محتمل و حدود بالا و پایین آن در سه راستای X ، Y و Z ۶۹
- شکل ۳-۸: روندنمای تعیین ارزش هر کارگاه محتمل ۷۱
- شکل ۳-۹: بررسی محدودیت هم‌ترازی سقف بر یک محدوده استخراجی در جهت Z ۷۳
- شکل ۳-۱۰: موقعیت‌های مختلف قرارگیری کارگاه محتمل ۷۵
- شکل ۳-۱۱: بررسی محدودیت حداکثر ابعاد کارگاه استخراج ۷۷
- شکل ۳-۱۲: بررسی محدودیت حداقل عرض پایه‌های جانبی ۷۹
- شکل ۳-۱۳: روندنمای الگوریتم SOA ۸۰
- شکل ۳-۱۴: مدل بلوکی اقتصادی ماده معدنی ۸۲
- شکل ۳-۱۵: ایجاد مدل S در اولین مرحله از اجرای الگوریتم ۸۲
- شکل ۳-۱۶: ایجاد مدل T در اولین مرحله از اجرای الگوریتم ۸۳
- شکل ۳-۱۷: مدل T پس از انتخاب کارگاه شماره ۱۶ ۸۴
- شکل ۳-۱۸: مدل S پس از انتخاب کارگاه شماره ۱۶ ۸۴
- شکل ۳-۱۹: مدل T پس از انتخاب کارگاه‌های ۴ و ۱۶ ۸۵
- شکل ۳-۲۰: مدل S پس از انتخاب کارگاه‌های ۴ و ۱۶ ۸۶
- شکل ۳-۲۱: مدل T پس از انتخاب کارگاه‌های ۴، ۱۱ و ۱۶ ۸۷
- شکل ۳-۲۲: مدل S پس از انتخاب کارگاه‌های ۴، ۱۱ و ۱۶ ۸۷
- شکل ۳-۲۳: مدل T پس از انتخاب کارگاه‌های ۱، ۴، ۱۱ و ۱۶ ۸۸
- شکل ۳-۲۴: مدل S پس از انتخاب کارگاه‌های ۱، ۴، ۱۱ و ۱۶ ۸۸
- شکل ۳-۲۵: محدوده استخراجی تعیین شده با الگوریتم SOA و به ارزش ۳۱ واحد ۸۹
- شکل ۳-۲۶: محدوده استخراجی تعیین شده با الگوریتم آلپس و به ارزش ۳۲ واحد ۹۰
- شکل ۳-۲۷: مدل بلوکی اقتصادی دوبعدی ۹۱
- شکل ۳-۲۸: مقایسه محدوده‌های حاصل از سه الگوریتم ریدل، آلپس و SOA ۹۲
- شکل ۳-۲۹: مقطع قائم از مدل بلوکی اقتصادی در $Y=1$ ۹۴
- شکل ۳-۳۰: مقطع قائم از مدل بلوکی اقتصادی در $Y=2$ ۹۴
- شکل ۳-۳۱: مقطع قائم از مدل بلوکی اقتصادی در $Y=3$ ۹۴
- شکل ۳-۳۲: مقطع قائم از مدل بلوکی اقتصادی در $Y=4$ ۹۴
- شکل ۳-۳۳: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم توپال در $Y=1$ ۹۵

- شکل ۳-۳۴: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم توپال در $Y=2$ ۹۵
- شکل ۳-۳۵: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم توپال در $Y=3$ ۹۵
- شکل ۳-۳۶: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم توپال در $Y=4$ ۹۵
- شکل ۳-۳۷: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم SOA در $Y=1$ ۹۶
- شکل ۳-۳۸: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم SOA در $Y=2$ ۹۶
- شکل ۳-۳۹: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم SOA در $Y=3$ ۹۶
- شکل ۳-۴۰: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم SOA در $Y=4$ ۹۶
- شکل ۴-۱: یک نمونه از مدل درآمدی ۱۰۱
- شکل ۴-۲: نمای قائم از یک کانسار فرضی متشکل از دو طبقه استخراجی ۱۰۳
- شکل ۴-۳: یک نمونه از مدل LNICM ۱۰۴
- شکل ۴-۴: تعداد و جانمایی طبقات محتمل ۱۰۸
- شکل ۴-۵: تعداد و جانمایی طبقات محتمل ۱۰۹
- شکل ۴-۶: موقعیت مدل P در درون هر طبقه محتمل ۱۱۱
- شکل ۵-۱: شناسنامه برنامه کامپیوتری UMLO ۱۲۱
- شکل ۵-۲: پنجره مربوط به Model Geometry ۱۲۰
- شکل ۵-۳: نمونه‌های از یک فایل ورودی از نوع txt ۱۲۱
- شکل ۵-۴: منوی مربوط به Mining Methods ۱۲۱
- شکل ۵-۵: منوی مربوط به Parameters ۱۲۲
- شکل ۵-۶: پنجره دریافت اطلاعات فنی ۱۲۳
- شکل ۵-۷: پنجره دریافت اطلاعات اقتصادی ۱۲۴
- شکل ۵-۸: پنجره دریافت اطلاعات هندسی ۱۲۴
- شکل ۵-۹: پنجره دریافت اطلاعات هندسی و اقتصادی تونل‌های موازی لایه ۱۲۵
- شکل ۵-۱۰: گزینه‌های نمایش محدوده بهینه معدن کاری ۱۲۶
- شکل ۵-۱۱: تصویر سه‌بعدی محدوده بهینه یک کانسار فرضی ۱۲۶
- شکل ۵-۱۲: ارزش بلوک‌های مقطع قائم از مدل درآمدی در $Y=1$ ۱۲۷
- شکل ۵-۱۳: ارزش بلوک‌های مقطع قائم از مدل درآمدی در $Y=2$ ۱۲۸
- شکل ۵-۱۴: ارزش بلوک‌های مقطع قائم از مدل درآمدی در $Y=3$ ۱۲۸

- شکل ۵- ۱۵: ارزش بلوک‌های مقطع قایم از مدل درآمدی در $Y=4$ ۱۲۹
- شکل ۵- ۱۶: ارزش بلوک‌های مقطع قایم از مدل درآمدی در $Y=5$ ۱۲۹
- شکل ۵- ۱۷: ارزش بلوک‌های مقطع قایم از مدل درآمدی در $Y=6$ ۱۳۰
- شکل ۵- ۱۸: ارزش بلوک‌های مقطع قایم از مدل LNICM در $Y=1$ ۱۳۰
- شکل ۵- ۱۹: ارزش بلوک‌های مقطع قایم از مدل LNICM در $Y=2$ ۱۳۱
- شکل ۵- ۲۰: ارزش بلوک‌های مقطع قایم از مدل LNICM در $Y=3$ ۱۳۱
- شکل ۵- ۲۱: ارزش بلوک‌های مقطع قایم از مدل LNICM در $Y=4$ ۱۳۲
- شکل ۵- ۲۲: ارزش بلوک‌های مقطع قایم از مدل LNICM در $Y=5$ ۱۳۲
- شکل ۵- ۲۳: ارزش بلوک‌های مقطع قایم از مدل LNICM در $Y=6$ ۱۳۳
- شکل ۵- ۲۴: محدوده بهینه تعیین شده بر اساس برنامه کامپیوتری UMLO ۱۳۶

فهرست جداول:

جدول ۳-۱: فهرست کارگاه‌های محتمل در شروع اجرای الگوریتم	۸۳
جدول ۳-۲: فهرست کارگاه‌های محتمل پس از انتخاب کارگاه ۱۶	۸۵
جدول ۳-۳: فهرست کارگاه‌های محتمل پس از انتخاب کارگاه ۴ و ۱۶	۸۶
جدول ۳-۴: فهرست کارگاه‌های محتمل پس از انتخاب کارگاه ۴، ۱۱ و ۱۶	۸۷
جدول ۳-۵: فهرست کارگاه‌های محتمل پس از انتخاب کارگاه ۱، ۴، ۱۱ و ۱۶	۸۹
جدول ۵-۱: ابعاد مدل‌های بلوکی در سه جهت X، Y و Z	۱۳۳
جدول ۵-۲: پارامترهای فنی معدن‌کاری	۱۳۴
جدول ۵-۳: پارامترهای اقتصادی معدن‌کاری	۱۳۴
جدول ۵-۴: پارامترهای هندسی معدن‌کاری	۱۳۵
جدول ۵-۵: مشخصات هندسی و اقتصادی تونل‌های موازی لایه و میانبرها	۱۳۵

فصل اول:

کلیات

۱-۱- مقدمه

روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، از اوایل دهه ۱۹۶۰ برای انواع مسایل و موضوعات معدنی مطرح شده‌اند. بعضی از آن‌ها توانسته‌اند، تغییرات اساسی و چشمگیری در زمینه‌ی طراحی و برنامه‌ریزی معادن روباز ایجاد نمایند. ولی بر خلاف معدن‌کاری روباز، روش‌ها و الگوریتم‌هایی که با هدف بهینه‌سازی معدن‌کاری زیرزمینی ارایه شده‌اند از رشد و استقبال قابل توجهی برخوردار نبوده‌اند. عمده دلایل آن‌را می‌توان در تعدد روش‌های استخراج زیرزمینی، پیچیدگی مدل‌سازی اقتصادی محدوده معدنی و بکارگیری فرضیات ساده‌ساز در تهیه این الگوریتم‌ها دانست [1,2].

از آنجاکه روش‌های استخراج زیرزمینی متنوع هستند و هر یک از این روش‌ها دارای محدودیت‌های فنی و پارامترهای اقتصادی مخصوص به خود است، ارایه یک الگوریتم جامع که پاسخگوی تمام روش‌های استخراج باشد به سادگی میسر نیست. از طرف دیگر، ساخت مدل اقتصادی بلوکی یکی از مهمترین عواملی است که موجب شده است الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری زیرزمینی رشد کمتری در مقایسه با معدن‌کاری روباز داشته باشند زیرا از یک سو ارزش اقتصادی هر بلوک تابع مشخصات هندسی کارگاه استخراج است که هرگونه تغییر در هندسه کارگاه استخراج، سبب تغییر در ارزش اقتصادی بلوک‌ها می‌شود و از سوی دیگر، تغییر در تعداد طبقات سبب کاهش یا افزایش

هزینه‌های آماده‌سازی می‌شود که این امر در نهایت بر روی ارزش اقتصادی هر بلوک تأثیر خواهد گذاشت. بنابراین در تعیین ارزش اقتصادی هر بلوک باید بتوان تأثیر همزمان دو عامل هندسه کارگاه و تعداد طبقات استخراجی را در نظر گرفت. به هر حال در مبحث طراحی یک معدن، محدودیت‌های فنی و پارامترهای اقتصادی زیادی تأثیرگذار هستند. بر این اساس، انتظار می‌رود که الگوریتم‌ها و برنامه‌های کامپیوتری که بر اساس این الگوریتم‌ها تهیه می‌شوند، قابلیت در نظر گرفتن تمام محدودیت‌های ممکن را داشته باشند. بدیهی است اگر این الگوریتم‌ها قابلیت‌های مذکور را نداشته باشند، نخواهند توانست انتظارات کاربران و طراحان معدن را برآورده سازند و در عمل استقبال چندانی از این الگوریتم‌ها صورت نخواهد گرفت [3].

۱-۲- منطق الگوریتم‌های بهینه‌سازی

به طور کلی الگوریتم‌های موجود برای بهینه‌سازی محدوده معدن کاری را از نظر منطق مورد استفاده در آن‌ها می‌توان به دو گروه الگوریتم‌های دارای منطق ریاضی^۱ و الگوریتم‌های دارای منطق ابتکاری^۲ تقسیم‌بندی کرد. الگوریتم‌های دارای منطق ریاضی به آن گروه از الگوریتم‌ها اشاره دارند که با توجه به محدودیت‌های بهینه‌سازی محدوده معدن کاری، همواره قادر به یافتن محدوده بهینه واقعی هستند. الگوریتم‌هایی که از منطق ابتکاری بهره می‌برند، هر چند قادر به یافتن و تضمین محدوده بهینه واقعی معدن کاری نیستند اما از عمومیت بیشتری برخوردارند و محدودیت‌های فنی بیشتری را می‌توانند در نظر بگیرند [4].

۱-۳- نحوه عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی

الگوریتم‌های موجود برای بهینه‌سازی محدوده معدن کاری زیرزمینی از نظر نحوه عملکرد به دو گروه جزگرا و کل‌گرا تقسیم می‌شوند. در الگوریتم‌های جزگرا، پهنه‌بندی و یا تقسیم محدوده معدن کاری به

1-Rigorous

2-Heuristic

طبقات استخراجی، قبل از اجرای الگوریتم انجام می‌شود و ارزش اقتصادی هر بلوک در هر طبقه یا پهنه به عنوان یک مقدار ثابت منظور می‌شود. در الگوریتم‌های کل گرا ابتدا ارزش اقتصادی هر بلوک واقع در محدوده معدنی بدون در نظر گرفتن اینکه بلوک موردنظر در چه طبقه یا پهنه‌ای قرار خواهد گرفت، برآورد می‌گردد؛ سپس الگوریتم موردنظر برای تعیین محدوده بهینه معدن کاری بر روی مدل مذکور اجرا می‌شود. طبیعی است در این حالت پس از اجرای الگوریتم، محدوده بهینه بر اساس پارامترهای هندسی و مکانیکی روش استخراج به پهنه‌ها یا طبقات استخراجی تقسیم می‌گردد [5].

تا کنون الگوریتم‌های ریدل^۱ (RI)، اوانیک^۲، کارگاه شناور^۳ (FS)، با ارزش‌ترین همسایگی^۴ (MVN)، آلپس^۵، گوما^۶، دیمیتراکوپولوس^۷ و توپال^۸ برای بهینه‌سازی اقتصادی محدوده معدن کاری زیرزمینی ارائه شده‌اند که همه این الگوریتم‌ها بر روی مدل‌های بلوکی اقتصادی و یا عیاری اجرا می‌شوند. علاوه بر الگوریتم‌های فوق، الگوریتم‌های دیگری مانند الگوریتم تقسیم هشت‌گانه و رهیافت‌های زمین‌آماری نیز وجود دارند که بر روی نوع خاصی از مدل‌های بلوکی زمین‌شناسی محدوده معدن کاری تعریف شده‌اند [3].

در این مجموعه تنها الگوریتم‌هایی مورد بحث قرار می‌گیرند که بر روی مدل اقتصادی محدوده معدن کاری تعریف می‌شوند و بر اساس آن محدوده بهینه را جستجو و تعیین می‌نمایند.

۴-۱- هدف از انجام تحقیق

هدف از انجام این تحقیق، تعیین تعداد، ارتفاع و محل قرارگیری طبقات در روش‌های استخراج قایم است. همچنین در درون هر طبقه نیز باید تعداد، موقعیت و ابعاد کارگاه‌های استخراج به نحوی تعیین

1-Riddle Algorithm

2-Ovanic

3-Floating Stope

4-Maximum Value Neighbored

5-OLIPS (Optimum Limit Integrated Probable Stope)

6-GOUMA (Global Optimisation for Underground Mining Area)

7-Dimitracopolus

8-Topal

شود که علاوه بر دستیابی به بیشترین سود ممکن، بتوان پارامترهای فنی و هندسی را در طراحی این کارگاه‌ها لحاظ کرد. بعبارت دیگر هدف از انجام این تحقیق، تعیین محل و موقعیت طبقات و کارگاه‌های استخراج به منظور دستیابی به بیشترین سود ممکن و با در نظر گرفتن عوامل فنی تأثیرگذار بر یک معدن است.

۱-۵- ضرورت انجام تحقیق

با توجه به دلایلی مانند عمیق‌تر شدن معادن روباز و افزایش هزینه‌های استخراج (افزایش مسیر رفت و برگشت تجهیزات باربری که در نتیجه آن هزینه‌های حمل و نقل افزایش خواهد یافت)، اقتصادی نبودن ساخت تجهیزات بارگیری و باربری با ظرفیت‌های بالاتر برای معادن روباز، افزایش نرخ تولید معادن زیرزمینی و توانایی رقابت با معادن روباز، پیشرفت در ساخت و بکارگیری تجهیزات استخراج زیرزمینی و افزایش سطح دانش و مهارت این شیوه استخراج، تغییر نحوه استخراج معادن از شیوه روباز به شیوه زیرزمینی در چندین سال اخیر از روند و گسترش قابل توجهی برخوردار بوده است. به منظور طراحی معادن زیرزمینی، یکی از مهمترین مسایلی که در وهله اول مورد توجه قرار خواهد گرفت مسأله طراحی محدوده بهینه معدن کاری زیرزمینی است. بدلیل اینکه تا کنون الگوریتم‌ها و برنامه‌های کامپیوتری کمی در این زمینه ارایه شده است و این معدود برنامه‌های کامپیوتری دارای نواقص زیادی هستند لذا ضرورت تدوین برنامه‌ها و نرم‌افزارهای مبتنی بر الگوریتم‌های کارآمد بیشتر از گذشته احساس می‌شود.

در این تحقیق، به منظور تعیین محدوده بهینه کارگاه‌های استخراج، یک الگوریتم جزگرای جدید به نام 'SOA' طراحی شده است که در یک طبقه استخراجی با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی تعریف شده، محدوده بهینه را تعیین می‌نماید. این الگوریتم توانایی در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی زیادی از قبیل حداقل و حداکثر طول کارگاه استخراج در دو جهت امتداد و ضخامت، حداقل و حداکثر ارتفاع

کارگاه‌های استخراج، محدودیت‌های هم‌ترازی در سه بعد و همچنین حداقل فاصله بین دو کارگاه را دارا است.

پس از تدوین این الگوریتم، برای فراگیر نمودن عملیات طراحی، الگوریتم دیگری به نام MLOA¹ تدوین و توسعه داده شده است. در این الگوریتم ابتدا تعداد و محل تمام طبقات محتمل، مشخص و سپس با فراخوانی الگوریتم SOA، تعداد ابعاد و موقعیت کارگاه‌های استخراج در درون هر طبقه استخراجی مشخص می‌گردد؛ در نهایت با تعیین ارزش بدست آمده از مجموع ارزش طبقات محتمل و تعیین ارزش هر محدوده معدن کاری محتمل، این محدوده‌ها با یکدیگر مقایسه شده و یک چیدمان بهینه از تعداد و جانمایی طبقات به همراه تعیین محدوده‌ی استخراج در هر طبقه محتمل، به عنوان خروجی الگوریتم MLOA انتخاب خواهد شد.

به منظور استفاده آسان‌تر کاربران از الگوریتم‌های طراحی شده، یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار MATLAB تدوین شده است که پس از وارد نمودن مدل‌های بلوکی درآمدی و هزینه‌ای و دیگر پارامترهای فنی و اقتصادی، یک مدل اقتصادی بلوکی ساخته خواهد شد، سپس الگوریتم MLOA بر روی این مدل اقتصادی بلوکی اجرا می‌شود و در نهایت یک تصویر سه‌بعدی از محدوده بهینه کارگاه‌ها و طبقات استخراجی به عنوان خروجی این برنامه نشان داده خواهد شد.

فصل دوم:

پیشینه مطالعات

۲-۱- مقدمه

از بین الگوریتم‌هایی که تاکنون برای بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی ارائه شده‌اند، الگوریتم‌های ریدل (RI)، آوانیک (بر مبنای تکنیک شاخه و حد)، آلیپس و گوما دارای منطق ریاضی هستند که در ابتدای این فصل بیان می‌شوند سپس الگوریتم‌های کارگاه شناور (FS)، با ارزش‌ترین همسایگی (MVN)، الگوریتم ارائه شده توسط دیمیتراکوپولوس و همچنین الگوریتم ارائه شده توسط توپال و سنز که دارای ماهیت ابتکاری یا ابتکاری هستند در ادامه به تفصیل ذکر خواهند شد.

۲-۲- الگوریتم ریدل

این الگوریتم با انجام یک سری اصلاحات بر روی الگوریتم لرج و گراسمن^۱ (برنامه‌ریزی پویا) و به منظور تعیین محدوده معدنکاری زیرزمینی در سال ۱۹۷۷ توسط ریدل ارائه شده است. الگوریتم لرج و گراسمن (برنامه‌ریزی پویا) قدیمی‌ترین الگوریتمی است که برای بهینه‌سازی محدوده معدنکاری روباز بر روی یک مدل اقتصادی دویعدی به کار رفته است. الگوریتم ریدل برای بهینه‌سازی محدوده کارگاه استخراج در معادن زیرزمینی، و صرفاً برای روش استخراج تخریب توده‌ای^۲ تهیه شده است. اگرچه این الگوریتم حدود دو دهه زودتر از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده معدنکاری

1-Lerchs and Grossman

2-Block Caving

زیرزمینی ارایه شده است اما بدلیل محدودیت‌های کاربردی، مورد توجه چندانی قرار نگرفته و توسعه نیافته است [6].

۲-۱-۲- منطق الگوریتم ریدل

منطق الگوریتم ریدل، منطق برنامه‌ریزی پویا^۱ است. این الگوریتم برای روش استخراج تخریب توده‌ای ارایه شده است و مبنای آن، الگوریتم معروف جانسون و شارپ^۲ است که در سال ۱۹۷۱ برای تعیین محدوده بهینه معدن کاری روباز ارایه شده است. الگوریتم جانسون و شارپ نیز بر اساس الگوریتم ارایه شده توسط لرچ و گراسمن در سال ۱۹۶۵ پایه‌گذاری شده است. در الگوریتم اخیر برای بهینه‌سازی محدوده نهایی معادن روباز در یک مدل بلوکی اقتصادی با I سطر و J ستون از رابطه ۱-۲ استفاده می‌شود [6].

$$\begin{cases} M_{ij} = \sum_{q=1}^i m_{qi} \\ P_{ij} = M_{ij} + \max\{P_{i+r,j-1}\} \end{cases} \quad (1-2)$$

که در آن، i و j اندیس‌هایی هستند که آدرس (شماره سطر و ستون) هر بلوک در مدل بلوکی دوبعدی را نشان می‌دهند، m_{qi} عبارتست از ارزش اقتصادی بلوکی که در سطر q و ستون i ام جانمایی شده است، M_{ij} ارزش اقتصادی تجمعی یک ستون از بلوک‌ها از بالاترین سطر مدل تا بلوکی که در سطر i ام و ستون j ام واقع است را نشان می‌دهد، r شمارنده‌ای برای رعایت شیب حداکثر محدوده بهینه معدن کاری و P_{ij} حداکثر ارزش محتمل ستون‌های ۱ تا j در هر محدوده محتمل است. برای تصحیح الگوریتم، به طوری که بتوان از آن برای بهینه‌سازی محدوده استخراج در روش تخریب توده‌ای استفاده نمود، باید رابطه بالا بر اساس محدودیت‌های خاص روش استخراج تخریب توده‌ای تصحیح شود [6].

سه تفاوت اساسی بین محدودیت‌های فنی الگوریتم‌های لرچ و گراسمن (برنامه‌ریزی پویا) و ریدل برای کاربرد آنها در معادن روباز و زیرزمینی روباز وجود دارد. نخست اینکه، معدن‌کاری روباز با برداشت یک از بلوک‌های مجاور سطح زمین (بالاترین سطر مدل اقتصادی) شروع شود؛ دومین تفاوت این است که در روباز (در صورتی که شیب دیواره نهایی معدن ۱:۱ فرض شود) با جابجایی از یک ستون به ستون دیگر تنها می‌توان به اندازه ارتفاع یک بلوک عمق معدن را کاهش یا افزایش داد؛ در صورتی که در استخراج زیرزمینی به روش تخریب توده‌ای، میزان کاهش یا افزایش ارتفاع کارگاه (با جابجایی از یک ستون به ستون دیگر) بستگی به ارتفاع کارگاه موجود دارد و معمولاً از ارتفاع یک بلوک بیشتر است. سومین تفاوت شایان ذکر بین کاربردهای این دو الگوریتم در بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری معادن روباز و تخریب توده‌ای این است که در روش تخریب توده‌ای، تحت شرایطی معین، می‌توان به منظور باقی‌گذاشتن بخشی از مدل اقتصادی که فاقد ارزش است، کارگاه‌های استخراج مجزایی را تعریف نمود [6].

شکل ۱-۲ مطالب فوق را بر دوی مقطع از یک مدل اقتصادی که محدوده بهینه معدن‌کاری در آنها با استفاده از الگوریتم‌های لرچ و گراسمن (برنامه‌ریزی پویا) و ریدل جستجو و تعیین شده است، نشان می‌دهد. در شکل ۱-۲ الف، محدوده بهینه معدن‌کاری روباز بر روی یک مدل اقتصادی دوبعدی با کاربرد الگوریتم لرچ و گراسمن (برنامه‌ریزی پویا) نشان داده شده است. در شکل ۱-۲ ب، محدوده بهینه معدن‌کاری زیرزمینی بر روی یک مدل اقتصادی که در واقع واژگون شده مدل اقتصادی شکل ۱-۱ الف است، مشاهده می‌شود [6].

		Columns									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3	4	5	-1	-1	-4	1	2	10	1	
2	1	3	3	-2	-1	-1	2	4	2	2	
3	1	-1	6	-1	-2	-2	2	6	1	3	
4	-2	-2	1	-1	1	1	4	8	1	0	
5	-1	5	0	0	2	0	-1	1	0	-2	

Open Pit Profit = 46

الف- محدوده بهینه معدن کاری روباز در یک مقطع قایم

5	-1 5 0 0 2 0						-1	1	0	-2
4	-2 -2 1 -1 1 1						4	8	1	0
3	1	-1	6	-1 -2 -2			2	6	1	3
2	1	3	3	-2 -1 -1			2	4	2	2
1	3	4	5	-1 -1 -4			1	2	10	1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Block-caving Profit = 76

ب- محدوده بهینه استخراج به روش تخریب توده‌ای در یک مقطع قایم

شکل ۲- ۱: محدوده بهینه معدن کاری در دو مقطع قایم از یک مدل اقتصادی [۶]

برای تصحیح الگوریتم لچ و گراسمن (برنامه‌ریزی پویا) به طوری که بتوان از آن برای بهینه‌سازی محدوده معدن کاری زیرزمینی به روش تخریب توده‌ای استفاده کرد، باید سه تغییر عمده زیر در آن اعمال گردد:

الف- تعمیم مفهوم متغیر r به طوری که بتوان با آن میزان تخلیه از یک ستون را با توجه به ستون‌های اطراف آن تعیین کرد.

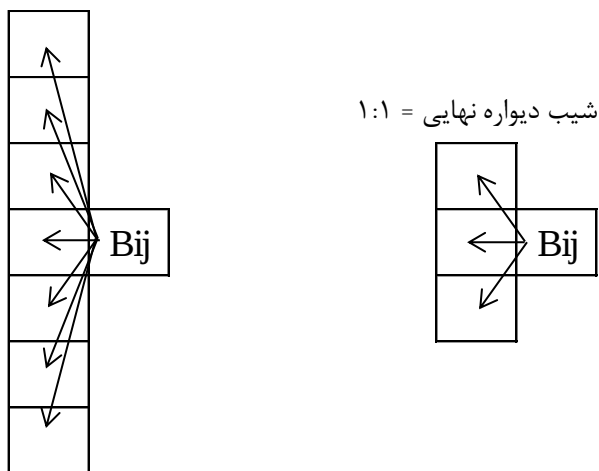
ب- در نظر گرفتن تمهیداتی که با استفاده از آن بتوان جابجا شدن بلوک آغازین نقاط تخلیه را در هر تراز، واقع بر زیر برش کارگاه توجیه نمود.

ج- یافتن راه‌حلی برای باقی گذاردن بلوک‌های بی‌ارزش (غیراقتصادی) به عنوان پایه‌ها مابین دو کارگاه استخراج.

در معادن روباز (در صورتی که شیب دیواره نهایی معدن ۱:۱ فرض شود) امکان جابجایی کارگاه از یک ستون به ستون مجاور فقط به اندازه ارتفاع یک بلوک امکان‌پذیر است. در نتیجه متغیر r تنها مقادیر صحیح $+1$ ، 0 و -1 را می‌پذیرد. اما در روش تخریب توده‌ای مقدار r تابعی از ضریب سطر است. ضریب سطر نشان‌دهنده ارتفاع کارگاه استخراج در هر تراز است و بر اساس آن عاملی بنام درصد کنترل تخلیه که بیانگر حداکثر اختلاف ارتفاع دو کارگاه مجاور است، تعریف می‌شود. اگر درصد کنترل تخلیه ده درصد باشد، بدان معناست که تغییرات ارتفاع کارگاه در نقاط تخلیه مجاور، نباید بیش از ده درصد ارتفاع تخلیه باشد. بنابراین اگر بلوکی در سطر ۱۵ در حال استخراج باشد و درصد کنترل تخلیه، بیست درصد در نظر گرفته شود، مقدار تغییرات r نباید بیش از سه بلوک (مثبت یا منفی) باشد [6].

در شکل ۲-۲ ارتباط بلوک‌های مجاور در معدن کاری روباز و تخریب توده‌ای نشان داده شده است.

درصد کنترل تخلیه = ۲۰ درصد
 شماره سطری که بلوک B_{ij} در آن قرار دارد = ۱۵



الف- روش استخراج روباز ب- روش استخراج تخریب توده ای
 شکل ۲-۲: نمایش بلوک های مجاور در روش معدن کاری روباز و تخریب توده ای [۶]

محدوده تغییرات مقدار r به عنوان یک عدد صحیح و تابعی از تعداد بلوک ها با رابطه ۲-۲ تعریف می شود:

$$-\max\{1, [D \times i]\} \leq r \leq \max\{1, [D \times i]\} \quad (2-2)$$

که در آن i ، عدد مربوط به سطری است که معدن کاری در آن انجام می شود، D درصد کنترل تخلیه و $[]$ علامت تابع جزء صحیح است.

برای اینکه بتوان جابجا شدن بلوک آغازین در هر افق را تعریف کرد، باید یک اندیس به پارامتر P_{ij} اضافه شود. بر این اساس رابطه اصلی برنامه ریزی پویا، به صورت رابطه ۳-۲ نوشته خواهد شد:

$$P_{ijs} = M_{ij} + \max\{P_{i+r,j-1}\} \quad (3-2)$$

که در آن، M_{ij} ارزش خالص تجمعی بلوک ها، r محدوده مشتمل بر بلوک های مجاور و P_{ijs} سود حاصل از استخراج بلوک واقع در سطر i ام، از نقطه تخلیه j ام که جابجا شدن آن در هر تراز با شروع از یک نقطه تخلیه توسط شمارش گر اندیسی s تعریف می شود [6].

برای باقی گذاردن بلوک‌های غیراقتصادی به عنوان پایه باید پس از تشکیل ماتریس P_{ij} که نشان‌دهنده مقادیر تمامی نقاط تخلیه در فضای استخراج است، ارزش نهایی محدوده معدن‌کاری در شرایط استخراج یا عدم استخراج هر بلوک از یک نقطه تخلیه، محاسبه و مقدار بهینه آن جستجو می‌شود [6].

با اعمال شرایط فوق، الگوریتم ریدل بر روی مدل اقتصادی نشان داده شده در شکل ۲-۱ ب اجرا شده و بلوک‌هایی که در محدوده کارگاه استخراج بهینه قرار می‌گیرند برابر با ۷۶ واحد بدست‌آمده است [6].

۲-۲-۲- ویژگی‌های الگوریتم ریدل

الگوریتم ریدل از منطق شناخته شده و قوی برنامه‌ریزی پویا برخوردار است و چون دارای منطق ریاضی است همواره قادر به یافتن محدوده معدن‌کاری بهینه واقعی برای مدل‌های دوبعدی می‌باشد. این الگوریتم تنها با شرایط فنی روش استخراج تخریب توده‌ای سازگار است و به همین دلیل از این الگوریتم برای بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری در سایر روش‌های استخراج زیرزمینی نمی‌توان استفاده کرد [3].

از آنجا که الگوریتم ریدل تنها بر روی مدل‌های اقتصادی دوبعدی قابل اجراست، برای کاربرد این الگوریتم در سه بعد باید مقاطع قائم کانسار بصورت متساوی الفاصله تهیه و بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری بر روی هر مقطع بصورت جداگانه انجام شود. در این شرایط ممکن است محدوده‌های بهینه شده در مقاطع متوالی از نظر فنی و هندسی با هم سازگاری نداشته باشند و نیاز به سازگار نمودن مقاطع احساس شود. طبیعی است که در چنین حالتی الگوریتم ریدل قادر به ارائه یک محدوده معدن‌کاری بهینه نخواهد بود. اجرای این الگوریتم بر روی مقاطع عمود بر هم از یک کانسار احتمالاً نتایج متفاوتی از محدوده بهینه معدن‌کاری ارائه خواهد نمود. به همین دلیل توصیه شده است الگوریتم مورد نظر یک‌بار بر روی مقاطع شرقی- غربی و بار دیگر بر روی مقاطع شمالی- جنوبی (یا

هر دو جهت عمود بر یکدیگر) اجرا شود و بر اساس قضاوت مهندسی از نتایج بدست آمده، محدوده بهینه معدن کاری مشخص گردد [6].

۲-۳- الگوریتم اوانیک (بر مبنای تکنیک شاخه و حد)

اوانیک و یانگ^۱ در سال ۱۹۹۵ بر مبنای تکنیک شاخه و حد الگوریتمی به منظور بهینه سازی محدوده استخراج زیرزمینی در یک پهنه یا طبقه ارایه داده اند. این الگوریتم بر روی مدل اقتصادی دوبعدی محدوده معدنی تعریف می شود و با اتکا به یک منطق ریاضی، محدوده استخراج در هر ردیف از مدل بلوکی بطور جداگانه مشخص می گردد [7].

روش اوانیک و یانگ بر اساس ترکیب برنامه ریزی اعداد صحیح^۲ (MIP) برای بهینه سازی محدوده کارگاه ارایه شده است. در این روش، نقاط بهینه شروع و پایان محدوده معدنی در یک ردیف از مدل بلوکی تعیین می شود بنابراین با این روش می توان محدوده بهینه کارگاه استخراج را برای یک پهنه معدنی بدست آورد. برای تعیین نقاط بهینه شروع و پایان هر پهنه از دو تابع تجمعی خطی^۳ استفاده شده است [7].

۲-۳-۱- منطق الگوریتم اوانیک

در الگوریتم شاخه و حد، بهینه سازی محدوده استخراج با جستجوی موقعیت بهینه برای نقاط شروع و پایان محدوده استخراج در هر سطر از بلوک های مدل اقتصادی دوبعدی انجام می شود. برای تعیین این دو موقعیت از دو تابع تجمعی خطی شکسته برای هر سطر استفاده می شود. اوانیک و یانگ از یک روش برنامه ریزی با اعداد صحیح به نام SOS2 برای بهینه سازی محدوده احداث کارگاه های استخراج استفاده کرده اند [7].

1-Ovanic and Young

2-Mixed-Integer Programming

3-Linear Cumulative Function

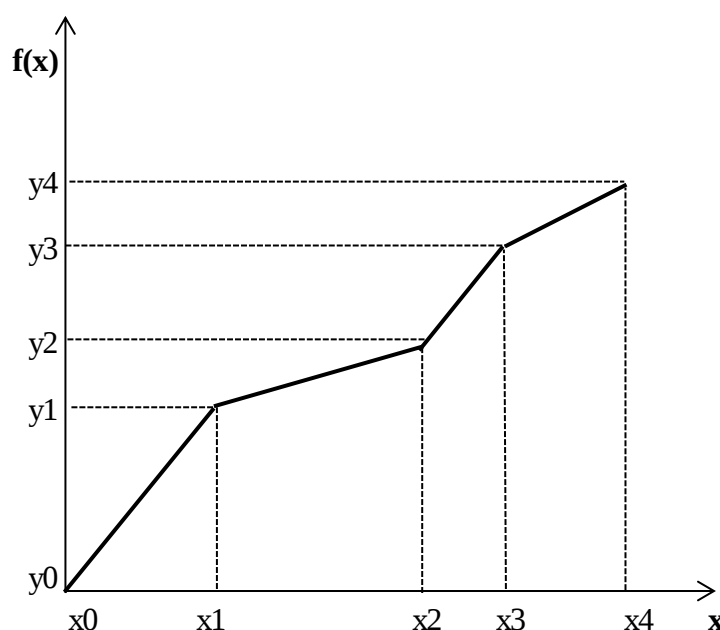
روش SOS2 به نوعی برنامه‌سازی تفکیک‌پذیر اشاره دارد که به عنوان یک مجموعه مرتب با متغیرهای خاص برای حل بیش از دو متغیر غیر صفر بکار می‌رود [7].

در شکل ۲-۳ یک تابع خطی شکسته، $y=f(x)$ ، که بین دو نقطه شکست مجاور خطی است و مقادیر مرجع (مقادیر x های) آن یکنواخت است، نشان داده شده است. هر نقطه مرجع از این تابع، را می‌توان به طور ساده به عنوان یک نقطه شکست در نظر گرفت. اگر جواب بین دو نقطه شکست باشد آنگاه جواب فقط از این دو نقطه شکست مجاور اثر می‌پذیرد. به عبارت دیگر سایر نقاط شکست تأثیری بر جواب ندارند [7].

به همین ترتیب، اگر جواب بر روی یک نقطه شکست باشد، فقط متأثر از آن نقطه است. در این شرایط به هر نقطه شکست بر روی تابع، $(x_i, f(x_i))$ ، یک متغیر خاص، λ_i نسبت داده می‌شود که نشان‌دهنده وزن آن نقطه در جواب نهایی است. بنابراین مجموعه متغیرهای خاص، λ_i ، را می‌توان با رابطه زیر تعریف کرد [7].

$$\sum_i \lambda_i = 1 \quad , \quad 0 \leq \lambda_i \leq 1 \quad (4-2)$$

همانطور که ذکر شد اگر جواب بر روی یکی از نقاط شکست باشد وزن آن نقطه، λ_i ، برابر یک است و وزن‌های اختصاص یافته به سایر نقاط صفر خواهد بود. به همین ترتیب چنانچه جواب بر روی نقطه‌ای واقع بر تابع و بین دو نقطه شکست باشد، اوزان دو نقطه مجاور غیر صفر و مجموع آنها برابر یک است و وزن همه نقاط دیگر صفر خواهد بود. بنابراین، موقعیت دقیق جواب به اوزان دو نقطه مجاور بستگی دارد و بصورت زوج مرتب $(x_i \lambda_i + x_{i+1} \lambda_{i+1}, f(x_i \lambda_i + x_{i+1} \lambda_{i+1}))$ نشان داده می‌شود [7].



شکل ۲-۳: شکل عمومی تابع خطی شکسته [۷]

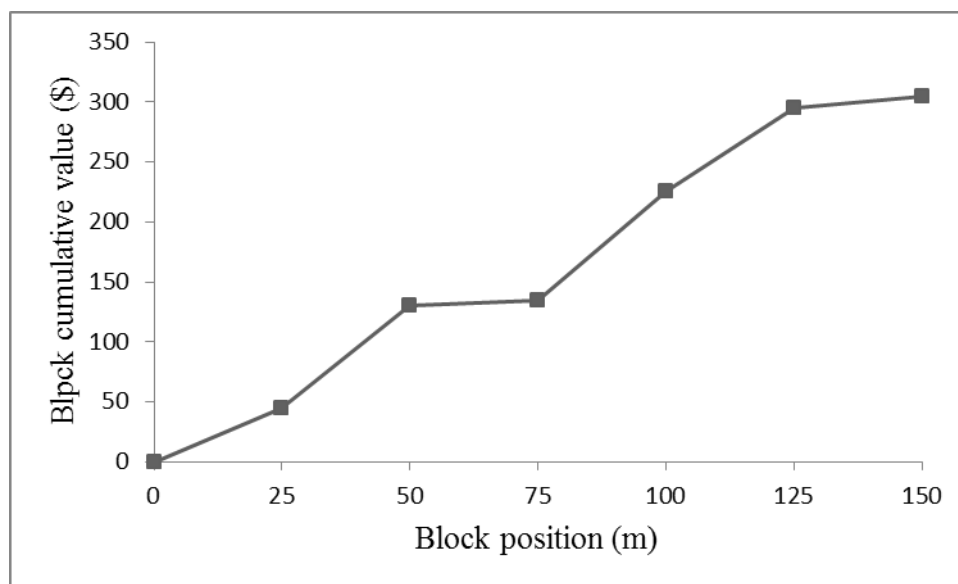
الگوریتم ارایه شده توسط اوانیک و یانگ تلاشی برای تلفیق SOS2 با یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی محدوده استخراج در هر طبقه یا پهنه معدن کاری است. بر اساس این الگوریتم، محدوده یک کارگاه استخراج را با بهینه‌سازی موقعیت‌های شروع و پایان (ابتدایی و انتهایی) آن می‌توان تعیین کرد. بنابراین دو مجموعه جداگانه برای دو نقطه ابتدایی و انتهایی کارگاه تعیین می‌شود. الگوریتم ارایه شده توسط اوانیک و یانگ تلاشی برای تلفیق SOS2 با یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی محدوده استخراج در هر طبقه یا پهنه معدن کاری است. بر اساس این الگوریتم محدوده یک کارگاه استخراج را با بهینه‌سازی موقعیت‌های شروع و پایان (ابتدایی و انتهایی) آن می‌توان تعیین کرد. بنابراین دو مجموعه جداگانه برای دو نقطه ابتدایی و انتهایی کارگاه تعیین می‌شود [7].

در شکل ۲-۴ یک سطر از بلوک‌های متوالی و ارزش خالص آنها نشان داده شده است. در این مدل، هدف عبارت است از یافتن محدوده بهینه استخراج طوری که ارزش اقتصادی هر سطر نشان داده شده از مدل اقتصادی به حداکثر برسد. برای استفاده از الگوریتم شاخه و حد، ارزش اقتصادی بلوک‌ها باید بصورت ارزش تجمعی مورد استفاده قرار گیرد. نقاط شکست نیز در این مدل‌سازی در ابتدا و انتهای

بلوک‌ها جانمایی می‌شوند. در شکل ۲-۵ یک نمونه از تابع ارزش تجمعی بلوک‌ها نشان داده شده است [7].

Block values						
i = 0	1	2	3	4	5	6
45	85	5	90	70	10	
0	25	50	75	100	125	150
Real block position (m)						

شکل ۲-۴: موقعیت و ارزش خالص هر بلوک در هر یک از سطرها [۷]



شکل ۲-۵: تابع ارزش تجمعی بلوک‌ها برای یک سطر از آنها [۷]

از خواص SOS2 برای اطمینان از اینکه نقطه ابتدایی و انتهایی محدوده استخراج بر روی نقاط شکست تابع ارزش تجمعی بلوک‌ها واقع باشد، استفاده می‌شود. اگر فقط یک متغیر خاص در جواب آشکار شود، جواب در یک نقطه شکست بر روی تابع تجمعی (در لبه بین دو بلوک) قرار می‌گیرد. به همین ترتیب وقتی دو متغیر خاص در جواب آشکار شود، جواب در یک نقطه بین دو نقطه شکست بر روی تابع تجمعی بلوک‌ها قرار خواهد گرفت [7].

بررسی تابع از سمت چپ به راست شروع می‌شود و دو مجموعه SOS2 تعریف می‌شود. مجموعه اول حد پایانی محدوده استخراج را تعریف می‌کند و توسط متغیر خاص، T_i ، مشخص می‌شود. در این

شرایط تابع هدف بعنوان اختلاف بین دو تابع تجمعی و منطبق با حدود پایانی و آغازین بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$SV = \sum_{i=0}^n \alpha_i L_i - \sum_{i=0}^n \alpha_i T_i \quad (5-2)$$

که در آن SV اختلاف بین ارزش‌های تجمعی بدست آمده برای حدود آغازین و پایانی (ارزش محدوده استخراج)، α_i ارزش اقتصادی تجمعی بلوک i ام، L_i متغیر خاص پایانی (که بین صفر و یک ارزش‌گذاری می‌شود)، T_i متغیر خاص آغازین (که بین صفر و یک ارزش‌گذاری می‌شود) و n تعداد بلوک‌ها است [7].

این بیشینه‌سازی تحت شرایط خاصی انجام می‌شود که در آن ارتباط بین متغیرهای خاص و موقعیت بلوک باید مورد توجه قرار گیرد. این رابطه توسط مجموعه خاص قیود، که تحت عنوان سطرهای مرجع نامیده می‌شوند، با معادله ۶-۲ تعریف می‌گردد [7].

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^n x_i L_i - B_l = 0 \\ \sum_{i=0}^n x_i T_i - B_t = 0 \end{cases} \quad (6-2)$$

که در آن، x_i موقعیت بلوک i ام (مقدار مرجع)، B_l متغیر موقعیت حد پایانی و B_t متغیر موقعیت حد آغازین است [7].

محدودیت دیگری نیز باید بر روی هر مجموعه $SOS2$ اعمال شود. این محدودیت بیانگر این است که جمع متغیرهای خاص در هر مجموعه باید برابر با یک باشد [7].

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^n L_i = 1 \\ \sum_{i=0}^n T_i = 1 \end{cases} \quad (7-2)$$

سایر شرایط، بیان‌کننده محدودیت‌های هندسی کارگاه استخراج است که به یک مقدار حداکثر و حداقل محدود می‌شود. به عنوان مثال، ملاحظات ژئومکانیکی، ممکن است حداکثر ابعاد کارگاه را محدود کند در حالی که اندازه تجهیزات معدنی انتخاب شده، محدود کننده حداقل ابعاد کارگاه استخراج است [7].

ابعاد کارگاه استخراج با اختلاف بین موقعیت واقعی آغازین و پایانی کارگاه طبق رابطه ۸-۲ محدود می‌شود [7].

$$S_m \leq B_l - B_t \leq S_M \quad (8-2)$$

که در آن S_M و S_m به ترتیب نشان‌دهنده حداکثر و حداقل ابعاد کارگاه است [7]. برای کاربرد تابع SOS2، ترکیب برنامه‌ریزی با اعداد صحیح و الگوریتم شاخه و حد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، یک تابع SOS2 برای هر شاخه انتخاب می‌شود و با کاربرد الگوریتم شاخه و حد مجموع مقادیر خاص (L_i, T_i) در شاخه‌ها محاسبه می‌شود. انجام کار در هر شاخه با در نظر گرفتن دو زیر مجموعه انجام می‌شود. اولین زیرمجموعه به همه متغیرها از آغاز مجموعه تا اولین متغیری که مرجع آن بزرگتر از مقدار محاسبه شده است، دلالت دارد. مجموعه دوم به متغیرهایی از انتهای مجموعه تا اولین متغیری که مرجع آن کمتر از مقدار محاسبه شده است، اشاره دارد. در واقع، الگوریتم شاخه و حد انتخاب از میان زیرمجموعه کوچک و کوچکتر را محدود می‌سازد تا زمانی که یک عدد صحیح بدست آید [7].

۲-۳-۲- ویژگی‌های الگوریتم اوانیک

یکی از امتیازات برجسته این روش نسبت به سایر روش‌های دیگر، عدم نیاز آن به هندسه و مشخصات بلوک است. اما از آنجا که این الگوریتم فقط در یک ردیف از مدل بلوکی، عمل بهینه‌سازی را انجام می‌دهد لذا دارای ماهیت تک‌بعدی است و این یکی از معایب آن می‌باشد. همچنین از کاربرد این الگوریتم بر روی مدل‌های بلوکی سه‌بعدی گزارشی داده نشده است [2].

۲-۴- الگوریتم اُلیپس^۱

جلالی و همکاران در سال ۲۰۰۵ یک الگوریتم جدید به نام اُلیپس را برای بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری در کانسارهای رگه‌ای ارائه داده‌اند. این الگوریتم دارای منطق برنامه‌ریزی پویا است و از آنجاکه بر روی مدل اقتصادی بلوکی خاصی اجرا می‌شود لذا بعضی از محدودیت‌های ابعادی کارگاه استخراج را رفع می‌نماید [10].

الگوریتم اُلیپس یک الگوریتم جزگرا و با منطق ریاضی است که به منظور شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر مشخصات فنی و هندسی کارگاه‌های استخراج در روش‌های مختلف معدن‌کاری زیرزمینی، ارائه شده است و بر روی نوع ویژه‌ای از مدل بلوکی اقتصادی دوبعدی محدوده استخراج تعریف می‌شود. با ساخت چنین مدلی، بعضی از محدودیت‌های فنی و هندسی روش‌های استخراج زیرزمینی از مجموعه قیود الگوریتم حذف و به مدل اقتصادی محدوده استخراج انتقال می‌یابند [10].

۲-۴-۱- منطق الگوریتم اُلیپس

یکی از مهمترین تفاوت‌های الگوریتم اُلیپس با سایر الگوریتم‌های دیگر، تفاوت در مدل بلوکی اقتصادی است که این الگوریتم بر روی آن اجرا می‌شود. برای ساخت این مدل بلوکی، ابتدا مدل پایه که در واقع همان مدل اقتصادی مرسوم دوبعدی محدوده استخراج است با توجه به اطلاعات فنی و اقتصادی، ساخته می‌شود. سپس در دو مرحله، محدودیت حداقل ابعاد کارگاه استخراج در دو جهت عمود بر هم به مدل پایه اضافه می‌شود. در این الگوریتم آن بعد از کارگاه استخراج که در امتداد راهروهای اصلی پهنه یا طبقه است، طول کارگاه و بعد دیگر که در جهت عمود بر راهروهای اصلی قرار می‌گیرد، ارتفاع کارگاه نامیده می‌شود [3].

در مرحله نخست، با در نظر گرفتن محدودیت ارتفاع کارگاه استخراج در هر یک از ستون‌های مدل پایه، تمام حالات ممکن برای جانمایی کارگاه‌هایی با ارتفاع‌های متفاوت که هر یک از آنها یک کارگاه

محتمل^۱ (PS) نامیده می‌شوند، تعیین می‌شود. در واقع هر کارگاه محتمل، بخشی از یک کارگاه استخراج واقع در یک ستون را تعریف می‌نماید. پس از تعیین کارگاه‌های محتمل، ارزش اقتصادی تمام کارگاه‌های محتمل محاسبه و با چیدمان ویژه‌ای در یک مدل اقتصادی به نام مدل کارگاه محتمل^۲ (PSM) جانمایی می‌شوند. در نهایت با اعمال شرط حداقل طول کارگاه استخراج و از کنار هم قرار دادن و یکپارچه کردن کارگاه‌های محتمل در ستون‌های مجاور، کارگاه‌هایی که دارای شرایط ارتفاع مجاز و حداقل طول هستند، تولید و ارزش اقتصادی آنها محاسبه می‌شود. ارزش اقتصادی این کارگاه‌ها در یک مدل اقتصادی به نام کارگاه محتمل یکپارچه^۳ (IPSM) که الگوریتم آلیپس بر روی آن اجرا می‌شود، جای داده می‌شود [10].

مدل‌سازی محدوده کارگاه استخراج، برای اجرای الگوریتم آلیپس، در سه مرحله با ساخت مدل‌های پایه، کارگاه محتمل و کارگاه محتمل یکپارچه انجام می‌شود [10].

مدل پایه

مدل پایه را می‌توان به صورت یک ماتریس دوبعدی تعریف نمود. هر یک از درایه‌های این ماتریس، $m_{y,x}$ ، ارزش اقتصادی یک بلوک که در ستون x ام و سطر y ام واقع است را نشان می‌دهد. تعداد ستون‌های این ماتریس، X ، نشان‌دهنده تعداد بلوک‌ها در جهت امتدادی و تعداد سطرهای آن، Y ، بیان‌کننده تعداد بلوک‌های مدل پایه در جهت شیبی است [10].

در شکل ۲-۶ نمونه‌ای از مدل پایه یک محدوده استخراج نشان داده شده است.

1-Probable Stope
2-Probable Stope Model
3-Integrated Probable Stope Model

4	-1	1	1	0	-1	-1	-1	-1	1	1
3	0	1	2	1	-1	-1	2	0	2	2
2	2	2	0	2	0	1	1	2	1	1
1	1	1	-1	1	-1	1	0	1	2	1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

شکل ۲- ۶: نمونه ای از مدل پایه از یک محدوده استخراجی [۱۰]

مدل کارگاه محتمل

مدل کارگاه محتمل نیز یک مدل بلوکی اقتصادی است که به منظور انتقال محدودیت ارتفاعی کارگاه استخراج به مدل پایه محدوده استخراجی و حذف آن از محدودیت‌ها، ساخته می‌شود. برای ساخت مدل کارگاه محتمل، باید در هر ستون از مدل پایه، تمام حالات ممکن برای جانمایی کارگاه‌هایی با ارتفاع‌های مختلف بررسی و ارزش اقتصادی تمام کارگاه‌های مورد نظر در هر ستون محاسبه شود. موقعیت هر یک از کارگاه‌های استخراج محتمل در هر ستون، x ، با یک کد به صورت $SL_{(f,c),x}$ مشخص می‌شود که در آن اندیس (f,c) زوج مرتبی است که عضو اول آن، موقعیت حد پایینی کارگاه استخراج و عضو دوم آن، موقعیت حد بالایی کارگاه استخراج در ستون x ام را نشان می‌دهد [10].

ارزش اقتصادی هر کارگاه در هر ستون را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$M_{(f,c),x} = \sum_{y=f}^c m_{y+1,x} \quad (9-2)$$

تحت شرایط:

$$1 \leq x \leq X$$

$$0 \leq f \leq Y-h$$

$$h \leq c \leq Y$$

برای مدل پایه نشان داده شده در شکل ۲-۷، مدل کارگاه محتمل به صورت زیر بدست می‌آید:

M(0,4)	2	5	2	4	-3	0	2	2	6	5
M(1,4)	1	4	3	3	-2	-1	2	1	4	4
M(0,3)	3	4	1	4	-2	1	3	3	5	4
M(0,0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

شکل ۲-۷: مدل کارگاه محتمل محدوده استخراج [۱۰]

ارزش اقتصادی کارگاه‌های مجازی، واقع در پایین‌ترین سطر مدل اقتصادی کارگاه محتمل، برابر با صفر است و این سطر صرفاً به منظور تسهیل در کاربرد الگوریتم آلیس اضافه شده است. به عبارت دیگر:

$$M_{(0,0),x} = 0 \quad , \quad 1 \leq x \leq X \quad (۱۰-۲)$$

مدل کارگاه محتمل یکپارچه

با در دست داشتن مدل کارگاه محتمل می‌توان مدل کارگاه محتمل یکپارچه محدوده استخراج را که در آن محدودیت طول کارگاه استخراج (در امتداد راهروهای اصلی طبقه یا پهنه) منظور می‌شود تولید نمود. چنانچه تعداد سطرهای مدل کارگاه محتمل یکپارچه با I و تعداد ستون‌های آن با J نشان داده شود، می‌توان گفت که تعداد سطرهای مدل کارگاه محتمل یکپارچه، I ، برابر با تعداد سطرهای مدل کارگاه محتمل است و تعداد ستون‌های آن، J ، به تعداد $l-1$ ستون بیشتر از تعداد ستون‌های مدل‌های پایه و کارگاه محتمل است. به عبارت دیگر:

$$I = Y \quad , \quad J = X + l - 1 \quad (۱۱-۲)$$

برای ساخت مدل کارگاه محتمل یکپارچه ابتدا ارزش اقتصادی تمام کارگاه‌های استخراجی که در خارج از محدوده معدن کاری قرار دارند، برابر با منفی بی‌نهایت قرار داده می‌شود. به عبارت دیگر:

$$M_{(f,c),j} = -u \quad , \quad 1 \leq j \leq l - 1 \quad (۱۲-۲)$$

که در آن، u یک مقدار مثبت بسیار بزرگ است.

در بهینه‌سازی محدوده استخراج باید توجه شود که تغییرات موقعیت حد بالایی و پایینی کارگاه محتمل در هر ستون در مقایسه با موقعیت کارگاه محتمل در ستون ما قبل خود نمی‌تواند از یک مقدار مشخص که به روش استخراج موردنظر وابسته است، بیشتر باشد [10].

در صورتیکه، $SL_{(f,c),x}$ موقعیت کارگاه محتمل در ستون x ام را نشان دهد، موقعیت کارگاه در ستون $(x-1)$ ام می‌تواند یکی از موقعیت‌های زیر باشد:

$$SL_{(f+rf,c+rc),x-1} \quad (۱۳-۲)$$

تحت شرایط:

$$f + rf \geq 0$$

$$c + rc \geq Y$$

$$(c + rc) - (f + rf) \geq h$$

$$|rf| = 0, 1, 2, \dots, n_f \quad , \quad n_f < h$$

$$|rc| = 0, 1, 2, \dots, n_c \quad , \quad n_c < h$$

که در آن، n_f حداکثر تعداد بلوک‌های هم‌ترازی در حد پایینی کارگاه محتمل و n_c حداکثر تعداد بلوک‌های هم‌ترازی در حد بالایی کارگاه محتمل است [10].

با اعمال محدودیت هم‌ترازی، حداکثر ارزش اقتصادی کارگاه استخراج با حداقل طول مجاز از روابط زیر بدست می‌آید:

$$f = 0, c = 0: \quad MSV_{(0,0),j} = 0$$

$$f \neq 0, c \neq 0: \quad MSV_{(0,0),j} = \begin{cases} -u \\ M_{(f,c),j-l+1} + \sum_{r=1}^{l-1} \max\{M_{(f+rf,c+rc),j-l-r+1}\} \quad l \leq j \leq J \end{cases} \quad (۱۴-۲)$$

تحت شرایط:

$$f + rf \geq 0$$

$$c + rc \geq l$$

$$(c + rc) - (f + rf) \geq h$$

$$|rf| = 0, 1, 2, \dots, nf, \quad nf < h$$

$$|rc| = 0, 1, 2, \dots, nc, \quad nc < h$$

که در آن، $MSV_{(f,c),j}$ حداکثر ارزش اقتصادی کارگاه استخراج با حداقل طول مجاز و منتهی به موقعیت $SL_{(f,c),j}$ ، u یک عدد مثبت بسیار بزرگ، l حداقل طول مجاز کارگاه استخراج و $M_{(f,c),j}$ ارزش اقتصادی کارگاه استخراج واقع در موقعیت $SL_{(f,c),j}$ است [10].

در شکل ۲-۸ مدل کارگاه محتمل یکپارچه متناظر با مدل کارگاه محتمل ارایه شده در شکل ۱-۶ آورده شده است:

4	-u	-u	-u	-u	10	11	3	2	1	6	12	14
3	-u	-u	-u	-u	8	10	4	0	-1	2	7	9
2	-u	-u	-u	-u	9	11	4	3	2	7	11	13
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i ↑	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	j →											

شکل ۲-۸: مدل کارگاه محتمل یکپارچه [۱۰]

الگوریتم اُلپس یک الگوریتم دوبعدی است که بر روی مدل کارگاه محتمل یکپارچه تعریف شده است. با کاربرد این الگوریتم و استفاده از تابع دوضابطه‌ای زیر ارزش محدوده استخراجی که از سمت راست به یک موقعیت دلخواه منتهی می‌شود، محاسبه و با ارزش‌ترین محدوده استخراج بر روی مدل کارگاه محتمل یکپارچه مشخص می‌گردد [10].

$$P_{(0,0),j} = \begin{cases} 0 & 1 \leq j \leq l \\ \max\{P_{(f+rf,c+rc),j-1}, P_{(0,0),j-1}\} & l \leq j \leq J \end{cases} \quad (۱۵-۲)$$

$$P_{(f,c),j} = \begin{cases} -u & 1 \leq j \leq l \\ \max\{P_{(f+rf,c+rc),j-1}, P_{(0,0),j-l}\} + MSV_{(f,c),j} + NSVP_{(f,c),j} & l \leq j \leq J \end{cases} \quad (۱۶-۲)$$

تحت شرایط:

$$f + rf \geq 0$$

$$c + rc \geq I$$

$$(c + rc) - (f + rf) \geq h$$

$$|rf| = 0, 1, 2, \dots, nf, \quad nf < h$$

$$|rc| = 0, 1, 2, \dots, nc, \quad nc < h$$

که در آن، $P_{(0,0),j}$ حداکثر ارزش محدوده استخراجی منتهی به کارگاه مجازی واقع در موقعیت

$P_{(f,c),j}$ ، $SL_{(0,0),j}$ حداکثر ارزش محدوده استخراجی منتهی به $SL_{(f,c),j}$ و $NSVP_{(f,c),j}$ پارامتر ارزش

کارگاه جدید است [10].

پارامتر کارگاه جدید از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$NSVP_{(f,c),j} = \begin{cases} \max\{M_{(f+rf,c+rc),j-2l+1}, 0\} - \max\{(\max(P_{(f+rf,c+rc),j-l}) - P_{(0,0),j-l}), 0\} + NSVP_{(f,c),j-l} & l \leq j \leq J, l \leq L \leq 2l \\ 0 & \end{cases} \quad (۱۷-۲)$$

۲-۴-۲- ویژگی‌های الگوریتم اُلیپس

الگوریتم اُلیپس بر روی نوع ویژه‌ای از مدل اقتصادی کارگاه استخراج تعریف می‌شود که در این مدل، بعضی از محدودیت‌های فنی و هندسی روش‌های استخراج زیرزمینی حذف شده‌اند. در الگوریتم اُلیپس از منطق برنامه‌ریزی پویا که دارای پشتوانه قوی ریاضی است، استفاده شده، بنابراین این الگوریتم قادر به پیدا کردن محدوده بهینه واقعی است. در الگوریتم اُلیپس، عواملی چون حداقل طول کارگاه استخراج، ارتفاع مجاز کارگاه استخراج و نیز محدودیت هم‌ترازی حدود بالایی و پایینی کارگاه استخراج مجاور در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین می‌توان از این الگوریتم برای بهینه‌سازی کانسارهای رگه‌ای یا لایه‌ای که معمولاً مدل‌های اقتصادی دوبعدی از آنها تهیه می‌شود، استفاده کرد [3].

۲-۵- الگوریتم گوما^۱

این الگوریتم نیز توسط جلالی و همکاران، در ادامه کار برای توسعه‌ی الگوریتم اُلیپس ارائه شده است. در این الگوریتم مسأله جانمایی بهینه طبقات همزمان با موضوع تعیین محدوده بهینه استخراج در هر طبقه در نظر گرفته می‌شود. الگوریتم اُلیپس یک الگوریتم جزگرا است و برای بهینه‌سازی اقتصادی محدوده استخراج در یک پهنه یا طبقه تدوین شده است. بنابراین برای عمومیت بخشیدن به موضوع بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری زیرزمینی، الگوریتم گوما ارائه شده است که با این الگوریتم امکان تعیین تعداد، ارتفاع و جانمایی طبقات وجود دارد. الگوریتم فرگیر گوما بر روی یک مدل بلوکی خاص به نام مدل اقتصادی با ارزش متغیر^۲ (VVEM) اجرا می‌شود [3].

۲-۵-۱- منطق الگوریتم گوما

در این الگوریتم، مدل بلوکی به نام مدل اقتصادی با ارزش متغیر تعریف و ارائه می‌شود که مبنای اجرای الگوریتم خواهد بود. در این مدل، ارزش اقتصادی هر بلوک با توجه به مشخصات هندسی و جانمایی طبقه‌ای که بلوک مورد نظر در آن قرار می‌گیرد، تغییر می‌نماید. به منظور ساخت مدل

1-Global Optimisation for Underground Mining Area

2-Variable Value Economic Model

اقتصادی با ارزش متغیر (VVEM)، سه مدل اقتصادی با مشخصات هندسی یکسان ولی با ماهیت متفاوت بنام‌های مدل درآمدی برجا^۱ (VVEM)، مدل هزینه موقعیت^۲ (PCM) و مدل هزینه استخراج^۳ (MCM) ساخته می‌شود. مدل VVEM و هر یک از مدل‌های سه‌گانه مذکور به صورت یک ماتریس دو بعدی با R سطر و C ستون نمایش داده می‌شود [3].

مدل درآمدی برجا

IIM یک مدل بلوکی با ارزش ثابت است که ارزش هر یک از بلوک‌های تشکیل‌دهنده آن نشان‌دهنده درآمد بلوک برجا^۴ (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. طبیعی است که با توجه به تعریف مذکور مقدار BII همواره نامنفی است. در شکل ۲-۹، یک محدوده مدل‌سازی شده دو بعدی فرضی از یک محدوده معدنی شامل ۱۳ سطر و ۱۵ ستون ملاحظه می‌شود. ارزش هر یک از بلوک‌های این مدل بلوکی BII نشان‌دهنده درآمد حاصل از آن بلوک بدون در نظر گرفتن موقعیت بلوک و هزینه‌های استخراج آن است. به طور ساده می‌توان گفت، مقدار BII متناسب با حاصلضرب مقدار ماده معدنی موجود در بلوک مورد نظر در قیمت فروش آن است [3].

مدل هزینه موقعیت

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 [3].

1- Insitu Income Model
2- Position Cost Model
3- Mining Cost Model
4-Block Insitu Income

Insitu Income Model															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	4	5	4	6	5	6	5	3	6	6	5	5	4	5	4
2	5	6	4	7	8	7	6	4	6	7	4	6	6	6	5
3	7	6	5	6	8	7	6	3	6	5	5	8	9	8	6
4	6	7	4	7	6	7	7	4	5	6	4	6	8	6	8
5	7	7	6	6	7	8	6	4	5	7	5	7	9	7	7
6	8	9	9	8	7	6	8	7	9	9	9	8	9	9	7
7	6	6	7	8	7	6	6	6	7	8	7	9	7	7	6
8	5	7	8	9	6	6	7	7	9	8	9	9	8	9	7
9	4	8	9	8	6	5	7	7	7	9	8	7	9	7	7
10	5	8	7	6	6	4	5	7	6	7	8	8	9	9	8
11	8	9	8	7	6	5	7	5	6	7	6	9	8	9	7
12	8	7	6	6	7	4	7	9	7	5	6	7	9	7	8
13	4	5	5	6	5	4	7	7	6	5	6	5	6	5	4

شکل ۲-۹: یک نمونه از مدل درآمدی برج [۳]

معمولاً استخراج بلوکی که در طبقه‌ای با عمق بیشتر واقع است به دلیل نیاز به احداث باز کننده عمیق تر، تهویه و خدمات فنی بیشتر و یا حتی نیاز به آبکشی به خاطر واقع شدن در زیر تراز آب‌های زیرزمینی بیشتر از بلوکی است که در طبقه‌ای با عمق کمتر واقع است و با کارگاهی با مشخصات یکسان استخراج می‌شود. علاوه بر این در امتداد یک طبقه نیز ممکن است بعضی از بلوک‌ها در موقعیت‌هایی با خصوصیات ژئومکانیکی متفاوتی قرار گیرند که در مقایسه با سایر بلوک‌ها، باید برای استخراج آنها هزینه‌های بیشتری صرف گردد [3].

در شکل ۲-۱۰، یک محدوده مدل‌سازی شده (که از نظر هندسی متناظر با محدوده مفروض در شکل ۲-۹ است)، نشان داده شده است. ارزش هر یک از بلوک‌های این مدل بلوکی، مازاد هزینه نسبی استخراج آن بلوک در مقایسه با هزینه استخراج بلوک مبنایی است که کمترین هزینه استخراج را دربردارد [3].

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

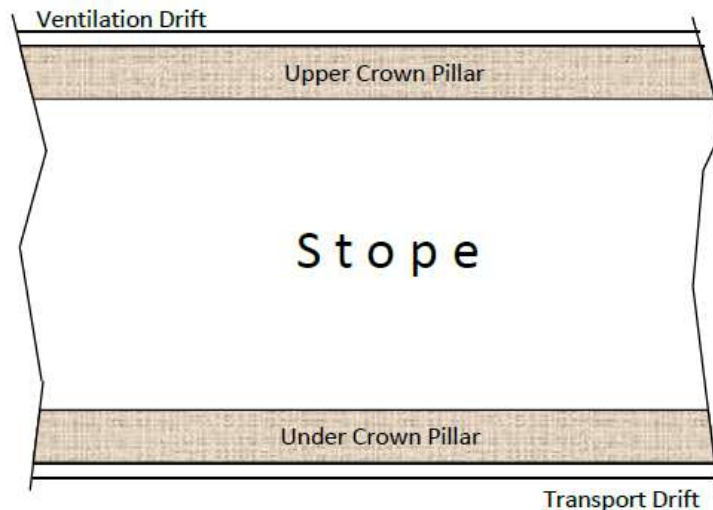
شکل ۲- ۱۰: یک نمونه از مدل هزینه موقعیت [۳]

مدل هزینه استخراج

MCM یک مدل بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر است که ارزش هر یک از بلوک‌های تشکیل دهنده آن هزینه استخراج بلوک^۱ (BMC) مورد نظر را نشان می‌دهد. در ساخت مدل هزینه استخراج برای تعیین ارزش هر بلوک لازم است علاوه بر روش استخراج، جانمایی و ارتفاع طبقه‌ای که بلوک مورد نظر در آن واقع می‌شود نیز مشخص گردد. بدیهی است که با تغییر جانمایی یا تغییر ارتفاع طبقه، ارزش بلوک‌های مدل مورد نظر تغییر می‌نماید [3].

هر طبقه به سه بخش مستقل شامل کارگاه استخراج، پایه تاج فوقانی^۲ و پایه تاج تحتانی^۳ قابل تفکیک است. با فرض اینکه هر یک از بخش‌های مذکور مضرب درستی از ابعاد بلوک‌ها باشند، هر یک از بلوک‌های واقع در یک طبقه فقط در یکی از سه بخش مذکور قرار خواهند گرفت. در شکل ۲- ۱۱، شمای کلی بخش‌های سه‌گانه نشان داده شده است [3].

1- Block Mining Cost
2- Upper Crown Pillar
3-Under Crown Pillar



شکل ۲- ۱۱: شمای کلی اجزای یک طبقه استخراجی [۳]

در حالت کلی، بلوک‌هایی که در محدوده پایه‌های تاج فوقانی و تحتانی واقع می‌شوند باید به صورت برجا باقی مانده و استخراج نشوند. لذا هزینه استخراج آنها برابر با یک عدد منفی بسیار بزرگ -۱۱- منظور می‌شود. هزینه استخراج سایر بلوک‌ها در هر طبقه، یعنی بلوک‌هایی که در محدوده کارگاه استخراج قرار می‌گیرند، با توجه به روش استخراج و ارتفاع آن طبقه برآورد می‌شود. در شکل ۲-۱۲ الف و ۲-۱۲ ب، بخشی از یک محدوده استخراج نشان داده شده در شکل ۲-۹ و ۲-۱۰ با ۱۳ سطر و ۵ ستون و همچنین دو طبقه با جانمایی‌های مختلف نشان داده شده است. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که تغییر در جانمایی طبقه می‌تواند موجب تغییر در هزینه استخراج بلوک‌ها شود [3].

	1	2	3	4	5
1					
2					
3	-u	-u	-u	-u	-u
4	-5	-5	-5	-5	-5
5	-5	-5	-5	-5	-5
6	-5	-5	-5	-5	-5
7	-5	-5	-5	-5	-5
8	-5	-5	-5	-5	-5
9	-u	-u	-u	-u	-u
10					
11					
12					
13					

	1	2	3	4	5
1					
2					
3					
4					
5	-u	-u	-u	-u	-u
6	-5	-5	-5	-5	-5
7	-5	-5	-5	-5	-5
8	-5	-5	-5	-5	-5
9	-5	-5	-5	-5	-5
10	-5	-5	-5	-5	-5
11	-u	-u	-u	-u	-u
12					
13					

الف- جانمایی طبقه بین سطرهای پنج تا یازده ب- جانمایی طبقه بین سطرهای سه تا نه

شکل ۲-۱۲: تأثیر جانمایی طبقات استخراجی بر هزینه استخراج هر بلوک [۳]

هنگامی که یک طبقه با یک روش استخراج مشخص در یک موقعیت خاص از محدوده استخراج جانمایی و به صورت مجرد و مجزا از سایر طبقات بررسی می‌شود، BMC برای بلوک‌هایی که در محدوده کارگاه استخراج آن طبقه قرار می‌گیرند، تنها به ارتفاع طبقه وابسته است. حداقل و حداکثر ارتفاع مجاز هر طبقه با توجه به محدودیت‌های فنی روش استخراج و پارامترهای ژئومکانیکی تعیین می‌شود اما ارتفاع بهینه آن با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی محاسبه می‌گردد [3].

مدل بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر

این مدل با تلفیق مدل‌های IIM، PCM و MCM که هر سه دارای ابعاد و مشخصات هندسی یکسان هستند، ساخته می‌شود. برای ساخت VVEM از روش مدل‌سازی برهم‌نهی لایه‌های چندگانه^۱ (MSM) استفاده شده است. در این روش مدل‌سازی هر یک از مدل‌های سه گانه IIM، PCM و MCM به صورت یک لایه که در برگیرنده یک گروه از اطلاعات اقتصادی مجزا است، منظور می‌شود و

1- Multi-layers Superposition Modeling

از برهم‌نهی آنها، مدل VVEM که مشتمل بر ارزش‌های اقتصادی محدوده مدل‌سازی شده است، حاصل می‌گردد. در مدل VVEM ارزش اقتصادی هر بلوک^۱ (BEV) از جمع مقادیر بلوک‌های نظیر در سه مدل مذکور بدست می‌آید. به عبارت دیگر:

$$BEV = BII + BPC + BMC \quad (۱۸-۲)$$

منظور از BPC در این رابطه، ارزش هر یک از بلوک‌های واقع در مدل هزینه موقعیت (PCM) است.

در شکل ۲-۱۳ یک نمونه مفروض از VVEM حاصل از برهم‌نهی مدل‌های IIM، PCM و MCM نشان داده شده است [3].

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

شکل ۲-۱۳: یک نمونه از مدل بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر [۳]

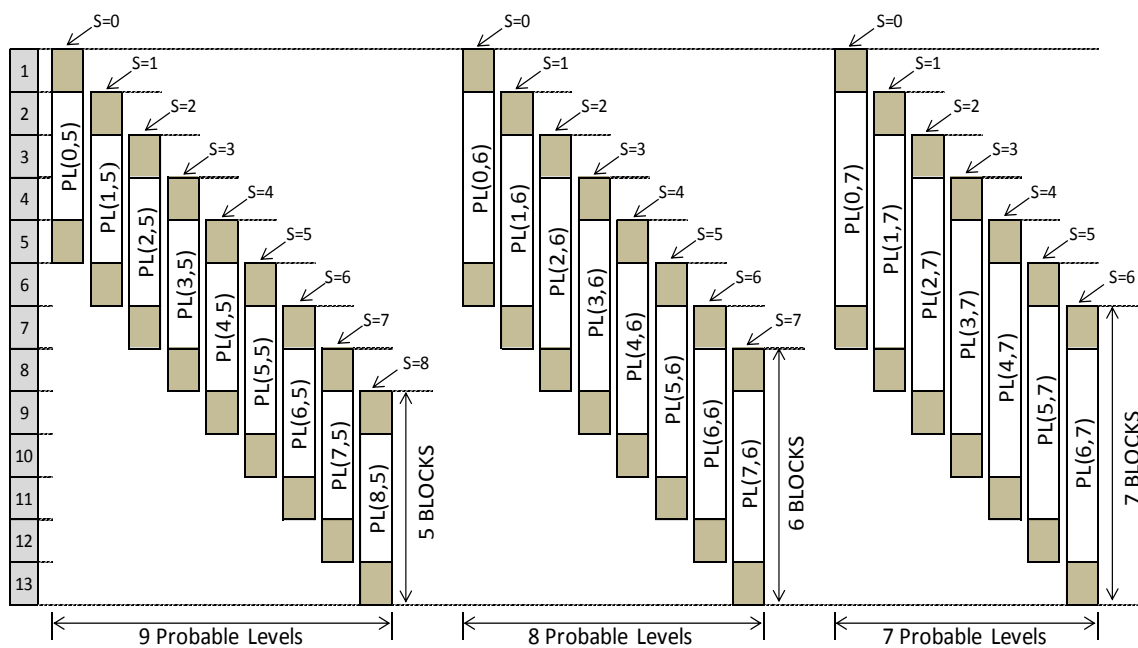
مدل IIM و PCM دارای بلوک‌هایی با ارزش ثابت هستند اما مدل MCM در برگزیده بلوک‌هایی با ارزش متغیر است که ارزش هر یک از بلوک‌های آن پس از مشخص شدن ارتفاع طبقات و جانمایی آنها در محدوده مدل‌سازی شده، تعیین می‌شود. بنابراین ارزش هر یک از بلوک‌های مدل VVEM نیز

1- Block Economic Value

متغیر بوده و به ارتفاع طبقه و جانمایی طبقه‌ای که بلوک مورد نظر در آن واقع است، بستگی دارد. برای تعیین مقدار BEV به عنوان تابعی از جانمایی و ارتفاع طبقه، می‌توان مجموعه‌ای از حالات متفاوت جانمایی طبقات با ارتفاع‌های مختلف که معرف تمام حالات محتمل برای جانمایی طبقات باشد را در هر محدوده مدلسازی شده، تعریف نمود و با توجه به هر یک از حالات محتمل، ابتدا مقدار BMC را برای بلوک‌های واقع در هر یک از حالات محتمل محاسبه و سپس BEV متناظر با آنها را محاسبه نمود [3].

طبقه محتمل

در هر محدوده مدل‌سازی شده می‌توان مجموعه‌ای از حالات مختلف جانمایی طبقات با ارتفاع‌های متفاوت که معرف تمام حالات محتمل برای جانمایی طبقات باشد را تعریف کرد. هر یک از اعضای این مجموعه یک طبقه محتمل نامیده می‌شود. در شکل ۲-۱۴ تمام طبقات محتمل در یک محدوده مدلسازی شده با ۱۳ سطر در شرایطی که حداقل ارتفاع مجاز طبقه ۵ بلوک و حداکثر آن ۷ بلوک باشد، نمایش داده شده است. 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 معرف ارتفاع طبقه می‌باشد. به عنوان مثال $PL_{(2,6)}$ کارگاه احتمالی را معرفی می‌نماید که محدوده بالایی آن از انتهای بلوک‌های واقع در سطر دوم محدوده مدلسازی شده آغاز و به ارتفاع ۶ بلوک احداث می‌شود. طبیعی است که چنین طبقه‌ای در بر گیرنده بلوک‌های واقع در سطرهای سوم تا هشتم محدوده مدل‌سازی شده خواهد بود [3].



شکل ۲-۱۴: تعداد و جانمایی طبقات محتمل [۳]

ارزش‌گذاری طبقات محتمل

پس از تعیین تعداد و جانمایی طبقات محتمل می‌توان BMC را برای تمام بلوک‌های واقع در هر یک از طبقات محتمل محاسبه و تخصیص داد. سپس ارزش اقتصادی بلوک‌ها برای تمام طبقات محتمل محدوده استخراج نشان داده شده در شکل ۲-۱۴ بر اساس رابطه ۲-۱۸ قابل محاسبه می‌باشد. به عنوان مثال، BEV مربوط به طبقاتی با ارتفاع ۶ بلوک در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است. حداقل عرض پایه‌های تاج فوقانی و تحتانی برابر با یک بلوک، حداقل ارتفاع طبقه ۵ بلوک و حداکثر ارتفاع طبقه ۷ بلوک منظور شده است [3].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(0,6)	1	2	0	3	4	3	2	0	2	3	0	2	2	2	1
	3	2	1	2	4	3	2	-1	2	1	1	4	5	4	2
	2	3	0	3	2	3	3	-1	1	2	0	2	4	2	4
	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(1,6)	3	2	1	2	4	3	2	-1	2	1	1	4	5	4	2
	2	3	0	3	2	3	3	-1	1	2	0	2	4	2	4
	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(2,6)	2	3	0	3	2	3	3	-1	1	2	0	2	4	2	4
	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	3	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(3,6)	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	3	2
	0	2	3	4	1	1	2	2	4	3	4	4	3	4	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(4,6)	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	3	2
	0	2	3	4	1	1	2	2	4	3	4	4	3	4	2
	-1	3	4	3	1	0	2	1	2	4	3	2	4	2	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(5,6)	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	2	1
	0	2	3	4	1	1	2	1	4	3	4	4	3	4	2
	-1	3	4	3	1	0	2	1	1	3	3	2	4	2	2
	0	2	1	0	0	-2	-1	1	0	1	2	2	3	4	3
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(6,6)	0	2	3	4	1	1	2	2	4	3	4	4	3	4	2
	-1	3	4	3	1	0	2	1	2	4	3	2	4	2	2
	0	3	2	1	1	-1	0	1	0	1	3	3	4	4	3
	3	3	2	1	0	-1	1	-1	0	1	0	3	2	4	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(7,6)	-1	3	4	3	1	0	2	1	2	4	3	2	4	2	2
	0	3	2	1	1	-1	0	1	0	1	3	3	4	4	3
	3	3	2	1	0	-1	1	-1	0	1	0	3	2	4	2
	2	1	0	0	1	-2	1	3	1	-1	0	1	3	1	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u

شکل ۲- ۱۵: ارزش اقتصادی بلوک (BEV) در طبقاتی با جانمایی متفاوت و ارتفاع ۶ بلوک [۳]

محدوده‌های استخراج محتمل^۱

یک محدوده استخراج محتمل محدوده‌ای شامل یک یا ترکیبی از چند طبقه محتمل بدون همپوشانی است. چیدمان‌های مختلف طبقات محتمل، محدوده‌های استخراج متفاوتی را بوجود می‌آورند. در شکل ۱۶-۲ تمام محدوده‌های استخراج محتمل با توجه به طبقات محتمل نشان داده شده در شکل ۱۴-۲ به تصویر کشیده شده است [3].

1- Probable Mining Area

S=0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1																					
2																					
3	PL(0,5)																				
4		PL(0,5)																			
5			PL(0,5)																		
6				PL(0,5)																	
7					PL(0,5)																
8						PL(0,5)															
9							PL(0,5)														
10								PL(0,5)													
11									PL(0,5)												
12										PL(0,5)											
13											PL(0,5)										
S=1	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	S=2	35	36	37	38	39	40	41
1														1							
2														2							
3														3							
4														4							
5	PL(1,5)													5							
6		PL(1,5)												6							
7			PL(1,5)											7							
8				PL(1,5)										8							
9					PL(1,5)									9							
10						PL(1,5)								10							
11							PL(1,5)							11							
12								PL(1,5)						12							
13									PL(1,5)					13							

شکل ۲- ۱۶: محدوددهای استخراج محتمل [۳]

در هر محدودده مدل سازی شده، فضای نمونه تغییرات VVEM، به عنوان یک مدل بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر، مجموعه ای است که اعضای آن را محدوددهای استخراج محتمل تشکیل می دهند. به عبارت دیگر به ازای هر محدودده مدلسازی شده دقیقاً به تعداد محدوددهای استخراج محتمل، مدل VVEM که هر یک دارای ارزش ثابتی است، وجود دارد [3].

الگوریتم فراگیر بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی

الگوریتم‌های جزءگرا، نظیر الگوریتم برنامه ریزی پویا و آلیپس، در بخشی از محدوده استخراج که در واقع یک طبقه یا پهنه است، محدوده بهینه واقعی را جستجو و معرفی می‌نمایند ولی بهینه‌سازی محدوده نهایی استخراج که مشتمل بر چندین طبقه است، با کاربرد چنین الگوریتم‌هایی مقدور نیست. در واقع با کاربرد یک الگوریتم جزءگرا مشکل بهینه‌سازی محدوده کارگاه استخراج در هر طبقه یا پهنه حل می‌شود اما مسأله بهینه‌سازی تعداد، ارتفاع و جانمایی طبقات یا پهنه‌ها در کل محدوده استخراج بدون پاسخ باقی می‌ماند. به عنوان یک اصل باید پذیرفت که لزوماً محدوده بهینه استخراج از ترکیب چند طبقه با گسترش و ارتفاع بهینه حاصل نمی‌شود بلکه در حالت کلی محدوده بهینه استخراج باید با در نظر گرفتن چیدمان‌های متفاوتی از طبقات محتمل که محدوده‌های استخراج محتمل را بوجود می‌آورند، جستجو شود. الگوریتم GOUMA در واقع با تلفیق الگوریتم جزءگرای آلیپس و مدل اقتصادی با ارزش متغیر VVEM روش نوینی را برای یافتن بهترین چیدمان کارگاه‌های استخراج بهینه شده ارائه می‌دهد. برای استفاده از این الگوریتم، ابتدا لازم است ارزش اقتصادی تمامی طبقات محتمل به عنوان اجزای سازنده محدوده‌های استخراج و سپس ارزش اقتصادی تمامی محدوده‌های استخراج محتمل محاسبه شود [3].

ارزش‌گذاری طبقات محتمل

هر محدوده استخراج محتمل مشتمل بر یک یا چند طبقه محتمل با مشخصات هندسی متفاوت است. محدوده بهینه استخراج در هر طبقه محتمل و ارزش اقتصادی متناظر با آن را می‌توان با استفاده از الگوریتم جزءگرای آلیپس تعیین نمود. در شکل ۲-۱۷ برخی محدوده‌های بهینه استخراج و ارزش اقتصادی متناظر با آنها در هر یک از طبقات محتمل با ارتفاع ۶ بلوک نشان داده شده در شکل ۲-۱۵، در شرایطی که حداقل طول کارگاه‌های استخراج به اندازه سه بلوک و ضرایب هم‌ترازی سقف و کف کارگاه به ترتیب برابر با یک و صفر بلوک باشد، با کاربرد الگوریتم آلیپس نشان داده شده است [3].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(0,6)	1	2	0	3	4	3	2	0	2	3	0	2	2	2	1
	3	2	1	2	4	3	2	-1	2	1	1	4	5	4	2
	2	3	0	3	2	3	3	-1	1	2	0	2	4	2	4
	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(1,6)	3	2	1	2	4	3	2	-1	2	1	1	4	5	4	2
	2	3	0	3	2	3	3	-1	1	2	0	2	4	2	4
	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(2,6)	2	3	0	3	2	3	3	-1	1	2	0	2	4	2	4
	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	3	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(3,6)	3	3	2	2	3	4	2	-1	0	3	1	3	5	3	3
	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	3	2
	0	2	3	4	1	1	2	2	4	3	4	4	3	4	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(4,6)	4	5	5	4	3	2	4	2	4	4	5	4	5	5	3
	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	3	2
	0	2	3	4	1	1	2	2	4	3	4	4	3	4	2
	-1	3	4	3	1	0	2	1	2	4	3	2	4	2	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(5,6)	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	2	4	2	2	1
	0	2	3	4	1	1	2	1	4	3	4	4	3	4	2
	-1	3	4	3	1	0	2	1	1	3	3	2	4	2	2
	0	2	1	0	0	-2	-1	1	0	1	2	2	3	4	3
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(6,6)	0	2	3	4	1	1	2	2	4	3	4	4	3	4	2
	-1	3	4	3	1	0	2	1	2	4	3	2	4	2	2
	0	3	2	1	1	-1	0	1	0	1	3	3	4	4	3
	3	3	2	1	0	-1	1	-1	0	1	0	3	2	4	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u
PL(7,6)	-1	3	4	3	1	0	2	1	2	4	3	2	4	2	2
	0	3	2	1	1	-1	0	1	0	1	3	3	4	4	3
	3	3	2	1	0	-1	1	-1	0	1	0	3	2	4	2
	2	1	0	0	1	-2	1	3	1	-1	0	1	3	1	2
	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u	-u

شکل ۲- ۱۷: محدوده بهینه استخراج در طبقات محتمل با ارتفاع ۶ بلوک و ارزش متناظر با آن [۳]

ارزش‌گذاری محدوده‌های استخراج

پس از تعیین محدوده بهینه استخراج در هر یک از طبقات محتمل و برآورد ارزش اقتصادی متناظر با آن می‌توان ارزش اقتصادی محدوده‌های استخراج محتمل را که هر یک ترکیبی از یک یا چند طبقه محتمل است، محاسبه نمود. در جدول ۱-۲ ارزش اقتصادی هر یک از محدوده‌های استخراج محتمل که در شکل ۱۶-۲ ارایه شده، نشان داده شده است [3].

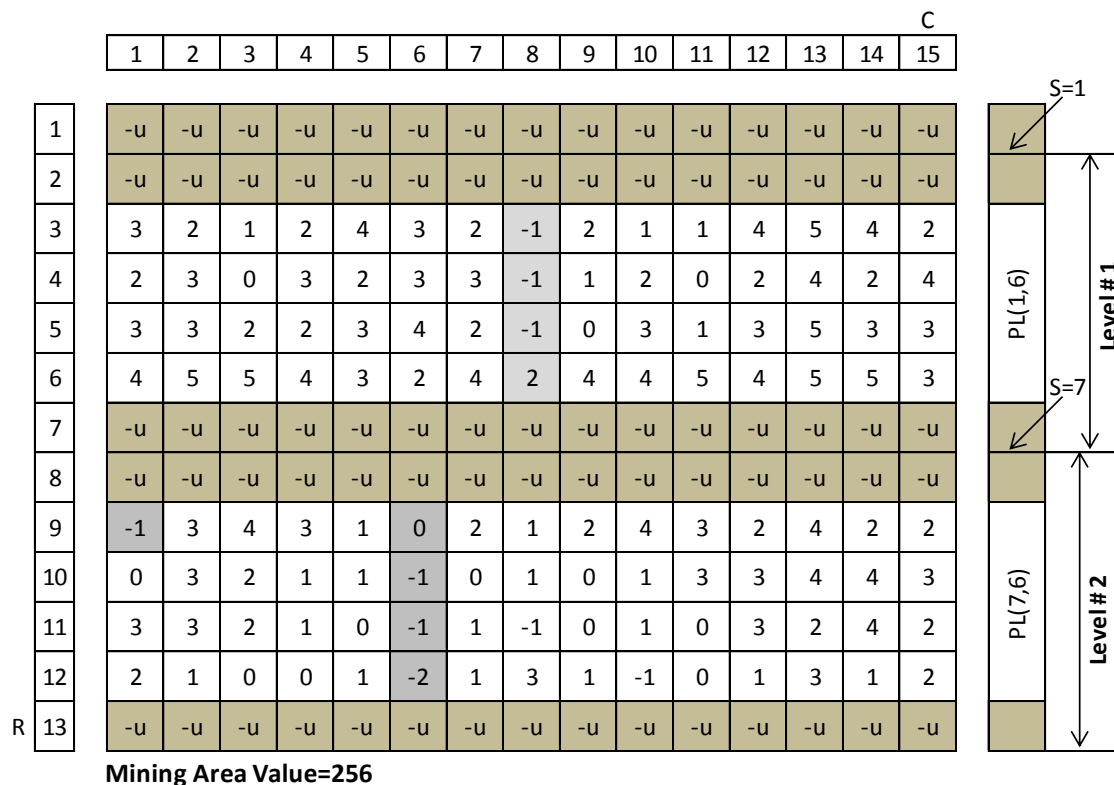
جدول ۱-۲: ارزش اقتصادی محدوده‌های استخراج محتمل

شماره محدوده محتمل	ارزش اقتصادی	شماره محدوده محتمل	ارزش اقتصادی	شماره محدوده محتمل	ارزش اقتصادی
1	52	21	215	41	123
2	152	22	62	42	81
3	110	23	120	43	108
4	94	24	104	44	165
5	79	25	89	45	124
6	164	26	178	46	83
7	168	27	157	47	160
8	147	28	127	48	113
9	129	29	161	49	100
10	117	30	203	50	112
11	131	31	188	51	77
12	189	32	256	52	58
13	173	33	120	53	116
14	158	34	147	54	65
15	247	35	83	55	42
16	226	36	123	56	95
17	196	37	110	57	27
18	120	38	178		
19	162	39	155		
20	147	40	182		

محدوده بهینه استخراج

محدوده بهینه استخراج از میان محدوده‌های استخراج محتمل و با توجه به ارزش اقتصادی متناظر با هر محدوده جستجو می‌گردد و محدوده‌ای که دارای بیشترین ارزش اقتصادی است به عنوان محدوده بهینه استخراج انتخاب می‌شود. همانطور که از جدول ۱ و شکل ۱۷-۲ به دست می‌آید، محدوده شماره ۳۲ که مشتمل بر دو طبقه محتمل با مشخصات $PL_{(1,6)}$ و $PL_{(7,6)}$ است دارای بیشترین ارزش

اقتصادی، برابر با ۲۵۶ واحد، بوده و به عنوان محدوده بهینه استخراج برگزیده می‌شود. در شکل ۲-۱۸ محدوده بهینه استخراج بر روی محدوده مدل‌سازی شده متناظر با شکل ۲-۹ نشان داده شده است [3].



شکل ۲-۱۸: محدوده بهینه استخراج [۳]

۲-۵-۲- ویژگی‌های الگوریتم گوما

در الگوریتم گوما برای بهینه‌سازی محدوده استخراج در هر طبقه محتمل از الگوریتم آلیپس که مبتنی بر منطق برنامه‌ریزی پویا است، استفاده شده است. بنابراین الگوریتم گوما از یک پشتوانه غنی ریاضی برخوردار است. الگوریتم گوما بر روی یک مدل بلوکی خاص اجرا می‌شود که از سه جزء مدل درآمدی برجا، مدل هزینه موقعیت و مدل هزینه معدن‌کاری تشکیل شده است. این روش مدل‌سازی تسهیلات ویژه‌ای را به منظور محاسبه هر چه دقیق‌تر ارزش اقتصادی بلوک^۱ (BEV) در مدل اقتصادی بلوکی در اختیار طراحان معدن قرار می‌دهد [3].

1-Block Economic Value

چون الگوریتم گوما بر روی مدل‌های بلوکی با ارزش متغیر اجرا می‌شود لذا امکان محاسبه ارزش اقتصادی هر بلوک بصورت تابعی از موقعیت پهنه یا طبقه‌ای که در آن واقع است، فراهم می‌آید. این در حالی است که همه الگوریتم‌هایی که تا کنون ارایه شده‌اند بر روی مدل‌های اقتصادی با ارزش ثابت اجرا می‌شوند. با تدوین الگوریتم فراگیر بهینه‌سازی محدوده معدن کاری زیرزمینی، در واقع روش‌های بهینه‌سازی جزگرا و کل‌گرا با هم تطبیق شده و یک راه‌حل مناسب که بتوان مسأله جانمایی پهنه پهنه‌ها یا طبقات استخراجی را همزمان با موضوع تعیین محدوده پهنه استخراج در هر پهنه یا طبقه حل نماید، ارایه شده است [3].

۲-۶- الگوریتم کارگاه شناور

آلفورد^۱ در سال ۱۹۹۵ الگوریتمی به نام کارگاه شناور را برای بهینه‌سازی کارگاه استخراج ارایه داده است که از آن برای تعیین محدوده مواد معدنی قابل استخراج در نرم‌افزار DATAMINE^۲ استفاده شده است. در این الگوریتم، یک کارگاه که دارای حداقل ابعاد مجاز است در میان مدل بلوکی شناور می‌شود، میانگین عیار بلوک‌های درون این کارگاه محاسبه و به عنوان عیار کارگاه معرفی می‌شود سپس تمام کارگاه‌هایی که دارای عیاری بالاتر از عیار حد باشند انتخاب می‌شوند. این الگوریتم بر روی مدل‌های بلوکی اقتصادی یا عیاری کانسار قابل اجراست [13].

۲-۶-۱- منطق الگوریتم کارگاه شناور

الگوریتم کارگاه شناور یک الگوریتم ابتکاری است و منطق مورد استفاده در آن با الگوریتم مخروط متحرک^۳ که مفاهیم اولیه آن توسط پانا^۴ برای تعیین محدوده پهنه معدن کاری روباز تدوین شده، مشابه است. تابع هدف در این الگوریتم ممکن است، بیشینه نمودن مقدار ماده معدنی، بیشینه نمودن عیار، بیشینه نمودن فلز محتوی و یا بیشینه نمودن ارزش نهایی محدوده معدن کاری باشد. مهمترین

1-Alford

2-Datamine Software

3-moving cone

4-Pana

فیود الگوریتم کارگاه شناور، محدودیت‌های هندسی کارگاه یا به عبارتی حداقل ابعاد کارگاه در سه جهت عمود بر هم است [13].

این الگوریتم دو پوش^۱ ایجاد خواهد کرد، پوش کوچکتر شامل موقعیت تمام کارگاه‌های دارای عیار بالاتر از عیار حد در اطراف هر بلوک است. پوش بزرگتر نیز ترکیبی از تمام موقعیت‌های کارگاه‌های دارای عیار بالاتر از عیار حد است. موقعیت بهینه کارگاه استخراج در بین این دو پوش قرار خواهد گرفت [13].

در این الگوریتم یک مکعب مستطیل که ابعاد آن برابر با حداقل ابعاد کارگاه در سه جهت عمود بر هم است، بصورت شناور در اطراف هر بلوک حرکت داده می‌شود تا سرانجام در موقعیتی قرار گیرد که در آن موقعیت بالاترین ارزش اقتصادی یا عیار در محدوده مکعب مستطیل حاصل شود. با به حرکت درآمدن کارگاه در اطراف هر بلوک، دو محدوده تعریف می‌شود که یکی زیر مجموعه دیگری است. محدوده بزرگتر، پوش خارجی و محدوده کوچکتر پوش داخلی نامیده می‌شود. پوش داخلی محدوده‌هایی که دربرگیرنده بلوک‌های اطراف بلوک اصلی با عیار بیش از عیار حد است و می‌توان آنها را استخراج نمود، مشخص می‌کند. این محدوده طوری جانمایی می‌شود که عیار بلوک‌های واقع در آن بیشترین مقدار ممکن باشد. پوش خارجی تمام موقعیت‌های محتمل برای کارگاه در اطراف بلوک اصلی را تعریف می‌نماید. در محدوده پوش خارجی ممکن است علاوه بر بلوک‌های ماده معدنی بلوک‌هایی از مواد باطله نیز وجود داشته باشد [13].

۲-۶-۲- ویژگی‌های الگوریتم کارگاه شناور

مبانی الگوریتم کارگاه شناور بسیار ساده و قابل فهم است. این الگوریتم بصورت سه‌بعدی و به‌سادگی برای بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت محدوده معدن‌کاری قابل استفاده است. این الگوریتم برای تمام روش‌های استخراج زیرزمینی قابل استفاده بوده و محدود به روش خاصی نمی‌باشد. مساوی بودن ابعاد

1- envelope

بلوک‌ها در مدل بلوکی این الگوریتم ضروری نیست. همچنین لازم نیست که ابعاد کارگاه مضرری از ابعاد بلوک‌ها باشد. به عبارت دیگر ممکن است فقط بخشی از یک بلوک جزء کارگاه در نظر گرفته شود. الگوریتم کارگاه شناور یک الگوریتم ابتکاری است و از پشتوانه ریاضی برخوردار نیست [3]. یکی از مشکلات اساسی الگوریتم کارگاه شناور، هم‌پوشانی کارگاه‌ها است و این مسأله زمانی رخ می‌دهد که چند بلوک با عیار بالا در دو یا چند کارگاه مشترک باشند. در چنین وضعیتی ممکن است یک کارگاه به تنهایی اقتصادی باشد ولی زمانی که با کارگاه‌های دیگر در نظر گرفته شود آنگاه مجموع این کارگاه‌ها دارای ارزش اقتصادی منفی شود [3].

۲-۷- الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی^۱

عطایی‌پور یک الگوریتم ابتکاری به نام ماکزیمم مقدار همسایگی را برای بهینه‌سازی محدوده کارگاه استخراج ارایه داده است. این الگوریتم، مشابه الگوریتم کارگاه شناور است ولی با روشی متفاوت از روش کارگاه شناور، پوش‌ها را تعریف کرده است.

۲-۷-۱- منطق الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی

این الگوریتم با شروع از یکی از بلوک‌های واقع در گوشه‌های مدل بلوکی، در اطراف آن بلوک شروع به جستجوی کارگاه استخراج می‌نماید. بعد از تجزیه و تحلیل تمام کارگاه‌های حاوی این بلوک، یکی از این کارگاه‌ها انتخاب می‌شود، سپس بلوک بعدی بررسی می‌شود. بنابراین این الگوریتم، به طور سیستماتیک تمام بلوک‌های مدل بلوکی اقتصادی را بررسی می‌کند [15].

همانطور که ذکر شد الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی یک الگوریتم ابتکاری است که مبانی و مفاهیم اولیه آن با مبانی و مفاهیم الگوریتم کارگاه شناور مشابه است. این الگوریتم در درون مدل اقتصادی کانسار، بلوک‌هایی که متناظر با بیشترین سود هستند را با اعمال شرایط هندسی کارگاه جستجو می‌کند [15].

تابع هدف در این الگوریتم با رابطه ریاضی زیر قابل بیان است:

$$MAX SEV = \sum_i \sum_j \sum_k F_{ijk} \times BEV_{ijk} \quad (19-2)$$

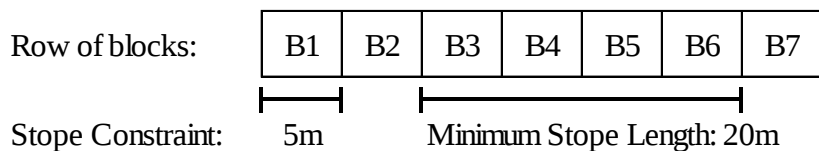
در این تابع، SEV مجموع ارزش اقتصادی محدوده معدن کاری، BEV_{ijk} ارزش اقتصادی بلوک B_{ijk} و F_{ijk} تابع عملگری است که استخراج یا عدم استخراج بلوک B_{ijk} را تعیین می‌نماید [15].

در الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی از مفهوم مرتبه همسایگی (O_{nb}) در جهات عمود بر هم استفاده شده است. قبل از تعریف مرتبه همسایگی، مفهوم همسایگی و نسبت ابعادی کارگاه (SBR) تعریف می‌شود [15].

همسایگی برای یک بلوک عبارت است از مجموعه‌ای از بلوک‌های متوالی، که باید برای رعایت حداقل ابعاد کارگاه، استخراج شوند. شکل ۱۹-۲ یک مدل بلوکی شامل یک ردیف را که از ۷ بلوک تشکیل شده است نشان می‌دهد. اگر حداقل ابعاد کارگاه ۲۰ متر و ابعاد بلوک‌ها در مدل بلوکی ۵ متر باشد، یک همسایگی محتمل برای بلوک B_4 می‌تواند شامل ۴ بلوک متوالی مثل مجموعه $\{B_3, B_4, B_5, B_6\}$ باشد. ولی این تنها همسایگی محتمل برای بلوک B_4 نیست و می‌توان مجموعه‌های دیگری مانند $\{B_2, B_3, B_4, B_5\}$ را نیز به عنوان همسایگی این بلوک تعریف نمود [15].

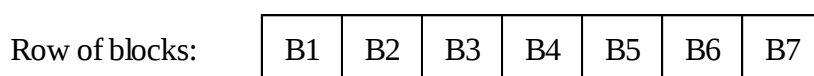
نسبت ابعادی کارگاه به صورت نسبت حداقل ابعاد کارگاه (طول یا ارتفاع) به ابعاد بلوک مدل اقتصادی (طول یا ارتفاع) تعریف می‌شود. نسبت ابعادی کارگاه یک عدد حقیقی است و ممکن است کسری از یک بلوک را هم در برگیرد اما از آنجاکه این الگوریتم نمی‌تواند بخشی از یک بلوک را بپذیرد بنابراین نسبت ابعادی کارگاه باید بصورت یک مقدار صحیح مثبت که مرتبه همسایگی (O_{nb}) نامیده شود، بیان گردد [15].

$$O_{nb} = [SBR - 0.01] + 1 \quad (20-2)$$

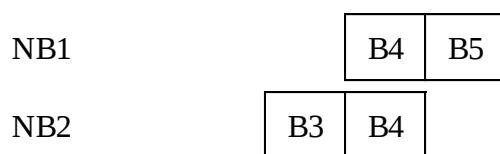


شکل ۲-۱۹: مفهوم همسایگی با توجه به حداقل ابعاد کارگاه [۱۵]

همسایگی برای هر بلوک توسط مجموعه‌ای از بلوک‌ها با آرایش خاص تعریف می‌شود. شکل ۲-۲۰ همسایگی محتمل برای بلوک B_4 را نشان می‌دهد. این همسایگی‌ها برای مرتبه‌های همسایگی ۲، ۳ و ۴ تعریف شده‌اند [15].

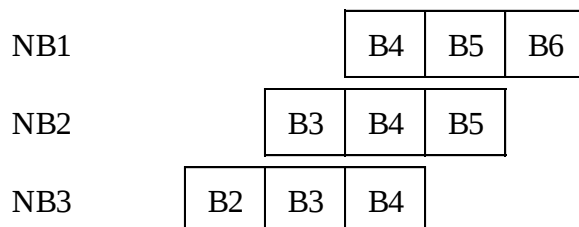


Possible NBs for B_4 : ($Onb=2$)



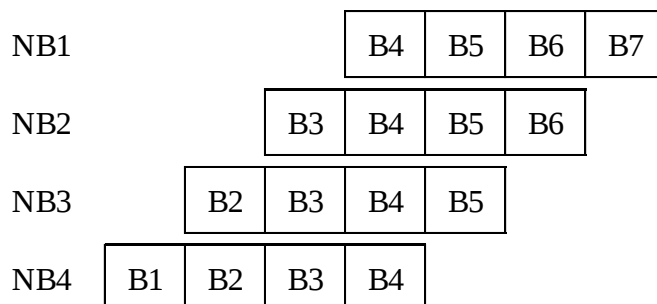
(a)

Possible NBs for B_4 : ($Onb=3$)



(b)

Possible NBs for B_4 : ($Onb=4$)



(c)

شکل ۲-۲۰: همسایگی‌های محتمل بلوک B_4 برای مرتبه‌های همسایگی ۲، ۳ و ۴

برای همسایگی مرتبه l ، تعداد l همسایگی محتمل برای هر بلوک مفروض وجود دارد که هر یک شامل l عضو است. همسایگی‌های محتمل هر بلوک را می‌توان در یک مجموعه گرد آورد. با فرض اینکه مرتبه همسایگی برابر با l ، باشد، این مجموعه همسایگی‌ها دارای بعد l خواهند بود، که در آن اعضای مجموعه (همسایگی‌ها) از یک تا l شمارش می‌شوند. در حالت کلی، مجموعه تمام همسایگی‌های محتمل برای هر بلوک، B_j ، با مرتبه همسایگی l را می‌توان با نماد کلی $NBS_{j,l}$ نشان داد و با رابطه ۲-۲۱ بیان کرد [15].

$$NBS_{j,l} = \{NB_{m,j,l} \subset U \mid m = 1, 2, \dots, l\} \quad (2-21)$$

که در آن، m شماره همسایگی، l مرتبه همسایگی، $NBS_{j,l}$ مجموعه همسایگی‌های محتمل برای بلوک j ام با مرتبه همسایگی l ، $NB_{m,j,l}$ همسایگی m ام برای بلوک j ام با مرتبه همسایگی l و U مجموعه مرجعی است که اعضای آن ارزش اقتصادی تمام بلوک‌ها در مدل اقتصادی است [15].

همسایگی شماره m ، یعنی NB_m ، برای هر بلوک نظیر B_j ، با مرتبه همسایگی l را می‌توان بوسیله مجموعه l بلوک متوالی با ترتیب صعودی که از بلوک B_{j-m+1} شروع و به بلوک B_{j+m-1} ختم می‌شوند، تعریف کرد. این مفهوم به صورت رابطه ۲-۲۲ قابل بیان است [15].

$$NB_{m,j,l} = \{BEV_{\beta} \in U \mid \beta = j - m + 1, j - m + 2, \dots, j - m + l\} \quad (2-22)$$

که در آن، β ، شماره ستون برای بلوک‌هایی که در همسایگی m قرار دارند و BEV_{β} ، ارزش اقتصادی بلوک β که در همان همسایگی قرار دارد [15].

با توجه به آنچه گفته شد در تعریف هر همسایگی به سه عامل؛ موقعیت بلوک برای همسایگی که تعریف شده است، مرتبه همسایگی و شماره همسایگی نیاز است [15].

پس از تعیین عوامل فوق ارزش همه همسایگی‌های محتمل محاسبه و با هم مقایسه می‌شود. سپس مجموعه همسایگی‌ای که دارای بیشترین ارزش باشد برای قرار گرفتن در محدوده نهایی انتخاب می‌شود. با استفاده از رابطه ۲-۲۳ می‌توان برای هر بلوک مثل، B_j ، با هر مرتبه همسایگی مثل، l ، با ارزش‌ترین همسایگی را محاسبه و تعریف کرد [15].

$$MVN_{j,l} = NB_{\mu,j,l} = \{ BEV_{\beta} \in U \mid \beta \in I, \beta = j - \mu + 1, j - \mu + 2, \dots, j - \mu + l \} \quad (23-2)$$

که در آن، μ عدد همسایگی که به ازای آن یکی از اعضای مجموعه مقادیر همسایگی، حداکثر خواهد بود. $MVN_{j,l}$ با ارزش‌ترین همسایگی برای بلوک B_j با مرتبه همسایگی l شماره ستون بلوک در با ارزش‌ترین همسایگی، BEV_{β} ارزش اقتصادی بلوک B_j که در آن با ارزش‌ترین همسایگی جانمایی شده است و بالاخره M مجموعه مرجعی است که اعضای آن ارزش اقتصادی بلوک‌ها در مدل بلوکی اقتصادی را نشان می‌دهد [15].

پس از محاسبه MVN ، تمام اعضایی که باعث مثبت شدن ارزش کارگاه می‌شوند برای قرار گرفتن در محدوده نهایی معدن‌کاری علامت‌گذاری می‌شوند، برای مشخص کردن بلوک‌های انتخاب شده از یک تابع عملکرد، F ، استفاده می‌شود. ارزش این تابع برای تمام بلوک‌هایی که برای قرار گرفتن در محدوده نهایی معدن‌کاری مشخص می‌شوند برابر با یک و برای سایر بلوک‌ها، صفر در نظر گرفته می‌شود [15].

۲-۷-۲- ویژگی‌های الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی

از آنجاکه در این الگوریتم، قسمت یا بخشی از یک بلوک نمی‌تواند جزء یک کارگاه استخراج باشد بنابراین ابعاد کارگاه باید مضربی از ابعاد بلوک‌ها باشد. اگرچه این الگوریتم دارای یک پایه نظری برای تعیین محدوده بهینه کارگاه استخراج است ولی دارای چند اشکال اساسی می‌باشد. اولین نقص این الگوریتم این است که اگر نقطه شروع تغییر یابد آنگاه ممکن است محدوده بدست‌آمده تفاوت پیدا کند، بنابراین این الگوریتم همیشه توانایی پیدا کردن محدوده بهینه را ندارد. دومین نقص این الگوریتم، به کار بردن مدل بلوکی اقتصادی است که در چنین مدلی، فاکتورهای هزینه کارگاه وارد نمی‌شود. در واقع ابعاد کارگاه استخراج، تعیین‌کننده هزینه‌های معدنکاری است بنابراین ثابت فرض کردن هزینه‌های معدنکاری در سرتاسر کانسار صحیح نیست [15].

منطق مورد استفاده در الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی ساده و قابل فهم است. این الگوریتم نیز مانند الگوریتم کارگاه شناور بصورت سه‌بعدی و به‌سادگی برای بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت محدوده معدن‌کاری در تمام روش‌های استخراج زیرزمینی قابل استفاده است. یکی از مشکلات مهم الگوریتم

با ارزش‌ترین همسایگی این است که همانند الگوریتم کارگاه شناور یک الگوریتم ابتکاری است و توانایی پیدا کردن جواب بهینه واقعی را ندارد [3].

۲-۸- الگوریتم دیمیتراکوپولوس

ریسک در تمام مسایل معدنی از قبیل مسایل فنی، مالی و زیست محیطی تأثیر گذار است. در هنگام امکان‌سنجی یک پروژه، عدم قطعیت به تمام منابع وابسته است بنابراین باید تمام این منابع و احتمالات هر یک در نظر گرفته شود. عدم قطعیت در تعیین عوامل زمین‌شناسی، یکی از مهمترین عدم قطعیت‌های فنی معدن است که به عنوان یکی از عوامل کلیدی در ورشکستگی پروژه‌های معدنی شناخته شده است. بنابراین ضرورت تعیین ریسک در مسایل زمین‌شناسی به خوبی احساس می‌شود. مدل‌سازی عدم قطعیت زمین‌شناسی در یک پروژه معدنی، بوسیله تکنولوژی‌های شبیه‌سازی موجود قابل انجام است [20].

پیشرفت‌های اخیر در مبحث معادن روباز نشان داده است که با مدیریت ریسک عیار در طراحی و برنامه‌ریزی معدن می‌توان سود را به میزان قابل توجهی افزایش داد. به عنوان مثال، محققان یک پروژه، با مدیریت ریسک‌های زمین‌شناسی توانسته‌اند مقدار NPV را ۲۸ درصد افزایش دهند [20]. واضح است که مشابه معادن روباز، برای معادن زیرزمینی نیز می‌توان با مدیریت ریسک، سود را افزایش داد. تاکنون بهینه‌سازی در طراحی معادن زیرزمینی نسبت به طراحی معادن روباز، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به هر حال در تمام روش‌هایی که تا کنون ارائه شده است، ریسک، در نظر گرفته نشده و فرض آنها بر قطعی بودن پارامترهای ورودی بوده است [20].

۲-۸-۱- منطق الگوریتم دیمیتراکوپولوس

دیمیتراکوپولوس و گریکو^۱ در سال ۲۰۰۹ یک روش بهینه‌سازی احتمالاتی جدید، برای طراحی در شرایط عدم قطعیت بر اساس برنامه‌ریزی اعداد صحیح ارائه داده‌اند. در این روش، کانسار به یک سری لایه، پهنه و حلقه تقسیم می‌شود. در واقع هر پهنه شامل چند حلقه و هر لایه شامل چند پهنه

1-Dimitrakopoulos and Grieco

است، و کل کانسار نیز از چند لایه تشکیل می‌شود. در این روش، محدودیت‌های حداقل و حداکثر طول حلقه‌ها و همچنین محدودیت ابعاد پایه‌های باقیمانده در بین دو کارگاه مجاور، در نظر گرفته می‌شود. این روش بر روی داده‌های بدست‌آمده از معدن کید کریک کانادا^۱ که دارای کانسار (مس - روی - نقره) است اجرا شده است [20].

تعیین ریسک در طراحی کارگاه‌های استخراج زیرزمینی مشابه تعیین ریسک در طراحی و برنامه‌ریزی تولید معادن روباز است. به منظور تعیین ریسک، به دو مولفه اصلی زیر نیاز است:

- طراحی کارگاه بر اساس مدل بلوکی تعیین شده با روش‌های تخمین متداول
- شبیه‌سازی واقعی کانسار (منظور، استخراج منطقه طراحی شده است) و تعیین ریسک بوسیله برداشت‌های برجا

به عبارت دیگر اگر چند کارگاه‌های طراحی شده، استخراج شوند و سپس مقدار ماده معدنی و عیار هر کارگاه محاسبه شود آنگاه می‌توان عدم قطعیت زمین‌شناسی و ریسک را محاسبه نمود و از آن در طراحی‌های آتی استفاده کرد [20].

در این الگوریتم، یک فرمول بر مبنای برنامه‌ریزی اعداد صحیح برای طراحی محل بهینه کارگاه ارایه شده است. محدوده بهینه بر اساس ابعاد، محل قرارگیری و تعداد کارگاه‌های استخراج در یک مدل بلوکی تعیین می‌شود. تابع هدف در این روش، بیشینه کردن عیار موجود در یک محدوده با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تخمین عیار است. به عبارت دیگر تابع هدف به صورت رابطه ۲-۲۴ است [20].

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n g_{ij} p_{ij} B_{ij} \quad (2-24)$$

در این تابع، m تعداد طبقه‌های مدل بلوکی؛ n تعداد حلقه‌های موجود در هر طبقه؛ p_{ij} احتمال بالاتر بودن عیار رینگ ij از عیار حد تعیین شده؛ g_{ij} عیار حلقه ij و بالاتر از عیار حد و B_{ij} یک متغیر

دودویی است و زمانی که یک حلقه شناسایی می‌شود در صورت انتخاب این حلقه، مقدار B_{ij} یک، و در غیر این صورت مقدار آن صفر می‌باشد. در این روش، طراح حداقل ریسک مجاز^۱ یا PL را تعیین می‌نماید. یکی از محدودیت‌های این روش این است که اگر یک رینگ انتخاب شد آنگاه باید میانگین احتمالات رینگ‌های انتخاب شده در هر پهنه، بزرگتر یا مساوی با حداقل ریسک مجاز باشد [20].

به عبارت دیگر باید:

$$\sum_{i=1}^n (p_{ij} - PL) B_{ij} \geq 0 \quad (25-2)$$

واضح است که با تغییر در مقدار PL ، محدوده‌های متفاوتی از کارگاه استخراج بدست می‌آید.

۲-۸-۲- ویژگی‌های الگوریتم دیمیتراکوپولوس

اگرچه این روش با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمین‌شناسی، کمک زیادی به طراحی کارگاه‌های استخراج می‌نماید و همچنین اولین روشی است که عدم قطعیت را در طراحی کارگاه در نظر گرفته است ولی دارای اشکالاتی نیز است. از جمله اشکالات این روش این است که ابتدا محل حلقه‌ها را تعیین می‌کند، سپس در این حلقه‌ها، کارگاه‌های با بیشترین سود را جستجو می‌نماید لذا توانایی پیدا نمودن محل بهینه کارگاه‌ها را ندارد. به عبارت دیگر چون در این روش از قبل محل حلقه‌ها مشخص شده است لذا امکان تعیین دقیق محل بهینه کارگاه‌ها وجود ندارد. در صورتیکه باید بتوان با تقسیم کانسار به حلقه‌های دارای موقعیت‌های مختلف، تمام کارگاه‌های محتمل را شناسایی کرد سپس کارگاه‌های دارای بیشترین ارزش را انتخاب نمود. همچنین یکی دیگر از اشکالات این روش، زمان طولانی آن در پیدا کردن جواب است و هرچه که تعداد حلقه‌ها افزایش یابد به همان نسبت نیز این زمان افزایش خواهد یافت [2].

1-minimum acceptable level of risk

۲-۹- الگوریتم توپال

توپال و سنز^۱ در سال ۲۰۱۰ یک الگوریتم جدید برای تعیین محدوده معدنکاری زیرزمینی ارائه داده‌اند. این الگوریتم بر روی مدل بلوکی اقتصادی اجرا می‌شود، و توانایی پیدا کردن، موقعیت، ارزش و سود خالص فعلی کارگاه‌های استخراج را در سه بعد دارا است [2].

۲-۹-۱- منطق الگوریتم توپال

این روش شامل سه اصل اساسی زیر است:

الف- یکسان‌سازی ابعاد بلوک‌ها

ب- بهینه‌سازی کارگاه‌های استخراج

ج- نمایش محدوده تعیین شده

الف- یکسان‌سازی ابعاد بلوک‌ها

برای کاربرد این الگوریتم، به منظور بهینه‌سازی کارگاه‌های استخراج، بلوک‌های واقع در مدل بلوکی باید دارای ابعاد یکسانی باشند. بنابراین از یک مبدل به منظور تبدیل مدل بلوکی دارای بلوک‌های با ابعاد متفاوت به یک مدل بلوکی دارای بلوک‌های با ابعاد یکسان استفاده شده است. این مبدل، هر بلوک و یا بخشی از حجم آن‌را که درون بلوک جدید جای می‌گیرد، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد. برای محاسبه ارزش بلوک‌های واقع در مدل جدید (مدل بلوکی دارای بلوک‌های با ابعاد یکسان)، ابتدا ارزش بلوک‌هایی که درون بلوک جدید قرار می‌گیرند در حجمی از این بلوک‌ها که درون بلوک جدید جای می‌گیرد، ضرب می‌شود. سپس این مقادیر جمع می‌شوند و بر کل حجم بلوک جدید تقسیم می‌گردد. بنابراین ارزش بلوک جدید به این روش بدست می‌آید سپس برای تمام بلوک‌های واقع در مدل بلوکی جدید این مراحل انجام می‌شود [2].

ب- بهینه‌سازی محدوده کارگاه

بهینه‌سازی محدوده کارگاه، بر روی مدل بلوکی بدست‌آمده از مرحله قبل انجام می‌شود. پارامترهای ورودی به الگوریتم و برنامه کامپیوتری آن شامل حدود ابعاد کارگاه استخراج، قیمت یا قیمت‌های فروش هر تن از مواد معدنی، هزینه استخراج و فرآوری هر تن از مواد معدنی استخراج شده و هزینه هر یک متر مکعب پر کردن می‌باشد. با وارد نمودن این مقادیر، این الگوریتم، محدوده بهینه کارگاه استخراج را با استفاده از نرم‌افزار MATLAB بر روی مدل بلوکی مربوطه تعیین می‌نماید [2].

در ابتدای این برنامه، مدل بلوکی ساخته شده بوسیله مبدل بلوکی اجرا می‌شود. سپس بر روی مدل بلوکی اجرا شده، طبق مراحل زیر (مراحل اول تا چهارم)، عملیات بهینه‌سازی انجام می‌شود:

مرحله اول: ابتدا کوچکترین ابعاد ممکن کارگاه در نظر گرفته می‌شود و تمام موقعیت‌های ممکن برای کارگاه‌های با این ابعاد، در مدل بلوکی تعیین می‌شود آنگاه موقعیت و ارزش تمام کارگاه‌های دارای ارزش مثبت، در یک لیست از بالا به پایین نوشته می‌شود. سپس کارگاه‌های با ابعاد بزرگتر، انتخاب و همین عملیات بر روی آنها انجام می‌شود. این کار تا زمانی که تمام کارگاه‌های با ابعاد مجاز آزمایش شوند ادامه می‌یابد. در نهایت جدولی شامل تمام کارگاه‌های محتمل و ارزش این کارگاه‌ها تشکیل می‌شود [2].

مرحله دوم: در این مرحله یک پوش بر روی هر کارگاه محتمل تشکیل می‌شود سپس ارزش تمام کارگاه‌های درون این پوش جمع شده و بر تعداد کارگاه‌های درون آن تقسیم می‌گردد. عدد بدست‌آمده که بیانگر میانگین سود هر پوش است نیز برای هر کارگاه محتمل دارای ارزش مثبت در جدول مذکور نوشته خواهد شد [2].

مرحله سوم: در این مرحله ابتدا کارگاه استخراج دارای بیشترین ارزش از جدول کارگاه محتمل انتخاب می‌شود و ارزش، موقعیت و ابعاد آن در جدول نهایی محدوده استخراج نوشته می‌شود. سپس اگر کارگاه انتخاب شده دارای بیشترین میانگین سود (مقدار بدست‌آمده برای هر کارگاه در مرحله ۲)

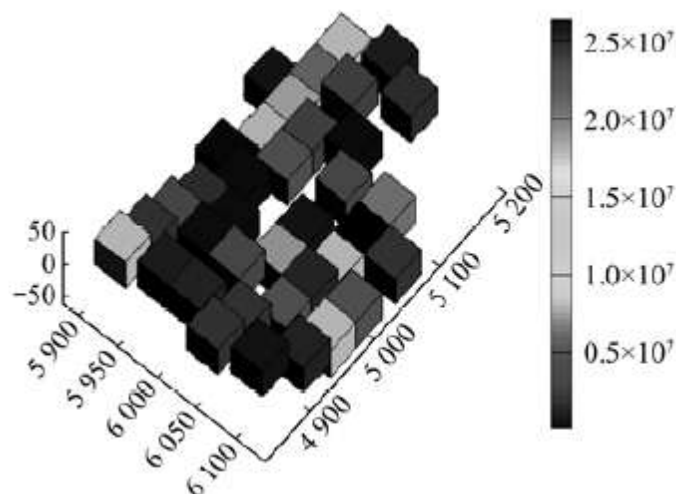
باشد آنگاه بلوک‌های درون این کارگاه جزء محدوده در نظر گرفته می‌شوند و تمام کارگاه‌هایی که با کارگاه انتخاب شده دارای بلوک مشترک باشند از جدول کارگاه محتمل حذف می‌شوند [2].

مرحله چهارم: به منظور پیدا نمودن کارگاه با ارزش بعدی در جدول کارگاه محتمل، مرحله سوم تکرار خواهد شد. در واقع تا زمانی که تمام کارگاه‌ها از جدول کارگاه محتمل حذف شوند، مرحله چهارم ادامه می‌یابد [2].

بعد از پایان مرحله چهارم، جدول نهایی محدوده استخراج فقط شامل کارگاه‌هایی است که هیچ اشتراکی با هم نداشته و به صورت نزولی از بالا به پایین در این جدول قرار گرفته‌اند. انتخاب کارگاه‌ها بر اساس میانگین سود پوش‌ها (مقدار بدست‌آمده برای هر کارگاه در مرحله ۲) تضمین می‌کند که اولاً ترکیب کارگاه‌های انتخاب شده بهترین انتخاب ممکن باشد و ثانیاً پوش‌ها دارای ابعاد مجاز باشند [2].

ج- تصویرسازی کارگاه

بوسیله یک برنامه کامپیوتری، تصویری سه‌بعدی از محدوده بهینه نهایی کارگاه استخراج تعیین می‌شود. در این تصویر، سود حاصل از استخراج هر کارگاه، با یک رنگ نشان داده می‌شود و یک راهنما در کنار این تصویر مشخص می‌کند که هر رنگ مربوط به چه سودی است [2].



شکل ۲-۲۱: تصویر خروجی از برنامه کامپیوتری الگوریتم توپال [۲]

۲-۹-۲- ویژگی‌های الگوریتم توپال

الگوریتم ارایه شده توسط توپال و سنز از توانایی‌های زیر برخوردار است:

- تعیین محدوده بهینه بر اساس یک ابعاد مشخصی از کارگاه استخراج (ابعاد تمام کارگاه‌ها یکسان هستند).

- تعیین محدوده بهینه بر اساس محدوده‌ای از ابعاد کارگاه استخراج (ابعاد کارگاه استخراج متفاوت هستند).

- پیدا کردن ابعاد بهینه برای کارگاه استخراج و تعیین محدوده بهینه بر اساس این ابعاد.

- توانایی در نظر گرفتن همزمان ارزش و حجم کارگاه در طراحی (در اینصورت کارگاه‌هایی که ارزش آنها تقسیم بر حجم آنها بیشتر از سایر کارگاه‌ها باشد زودتر انتخاب می‌شوند).

الگوریتم ارایه شده توسط توپال و سنز، دارای ماهیت ابتکاری است و محدوده بهینه معدنکاری را در سه بعد تعیین می‌نماید. ورودی‌های این روش شامل ابعاد کارگاه استخراج، مدل بلوکی و هزینه‌های معدنکاری می‌باشد. یکی از مهمترین مزیت‌های این الگوریتم، قابلیت آن در طراحی کارگاه‌هایی با ابعاد مختلف است [2].

اجرای روش جدید بر روی یک مدل بلوکی واقعی نشان داده است که این روش توانایی پیدا کردن محدوده بهینه را به ازای ابعاد مختلف کارگاه استخراج و قیمت‌های مختلف از محصول تولیدی دارا است [2].

فصل سوم:

الگوریتم بهینه ساز کارگاه های استخراج زیرزمینی (SOA)

۳-۱- مقدمه

در این فصل الگوریتم بهینه‌ساز کارگاه استخراج (SOA)^۱ که در این تحقیق توسعه داده شده است، توضیح داده خواهد شد. این الگوریتم، یک الگوریتم با منطق جزگراست که بر روی یک مدل اقتصادی بلوکی سه بعدی اجرا می‌شود و قادر است محدوده بهینه کارگاه‌های استخراج را با در نظر گرفتن محدودیت‌های تعیین شده مشخص نماید. از جمله محدودیت‌هایی که در این الگوریتم در نظر گرفته می‌شود، می‌توان به محدودیت‌های حداقل و حداکثر ارتفاع کارگاه‌های استخراج، حداقل و حداکثر ابعاد کارگاه‌های استخراج در دو جهت امتداد و ضخامت، حداقل عرض پایه‌های جانبی^۲ و همچنین محدودیت هم‌ترازی^۳ اشاره کرد. این الگوریتم برای روش‌های استخراج از طبقات فرعی، تخریب در طبقات فرعی، کند و آکند، انباره‌ای و تخریب بلوکی قابلیت کاربرد دارد.

1-Stope Optimiser Algorithm

2-Rib Pillar

3-Leveling Constraint

۳-۲- دامنه کاربرد الگوریتم

همانطور که ذکر شده است این الگوریتم برای مهمترین روش‌های استخراج قایم^۱ از جمله روش‌های استخراج از طبقات فرعی، تخریب در طبقات فرعی، کند و آکند، انباره‌ای و تخریب بلوکی به کار می‌رود. در روش‌های استخراج قایم، بر مبنای ملاحظات فنی و اقتصادی، ممکن است کانسار به یک یا چند طبقه استخراجی^۲ تقسیم شود. هر طبقه استخراجی از دو تونل دنبال لایه^۳، پایه‌های تاج^۴، زیربرش^۵، تعدادی قیف^۶ و بونکر^۷ تشکیل می‌شود و در بعضی روش‌های استخراج، ممکن است از تونل-های موازی لایه^۸ نیز به منظور استخراج یک طبقه استفاده شود که در اینصورت تونل‌های دنبال لایه و موازی لایه بوسیله تونل‌های عمود بر لایه یا میانبر^۹ به هم متصل می‌شوند. علاوه بر موارد ذکر شده، در روش‌هایی مانند استخراج از طبقات فرعی و تخریب در طبقات فرعی چند تونل طبقات فرعی^{۱۰} نیز در یک طبقه حفر می‌شود و در ادامه توضیح داده خواهد شد که از طریق این تونل‌های طبقات فرعی، عملیات چالزنی و آتشیاری به منظور خرد نمودن ماده معدنی، در درون هر طبقه انجام می‌شود. در شکل ۳-۱ اجزای یک طبقه استخراجی نشان داده شده است. پایه‌های تاج، به منظور جدا کردن کارگاه‌های استخراج در طبقات مجاور و حفاظت از تونل‌های تهویه و حمل و نقل به کار می‌روند و در حالت کلی، بلوک‌های واقع در درون پایه‌های تاج بالایی^{۱۱} و پایینی^{۱۲} استخراج نخواهند شد.

1- به طور کلی به روش‌هایی که ضرورتاً به صورت قائم و یا نزدیک به قائم و تحت زاویه‌ای بزرگ‌تر از زاویه قرار سنگ معدنی شکسته شده، کانسار را استخراج می‌کنند، روش‌های استخراج قائم گفته می‌شود [22].

2-Level

3-Drift

4-Crown Pillar

5-Under cut

6-Draw bell

7-Chute

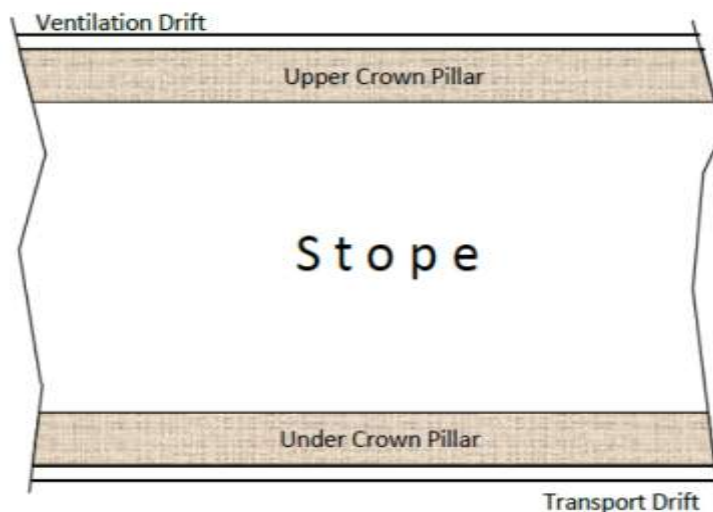
8-Lateral Drift

9-Cross cut

10-Sublevel

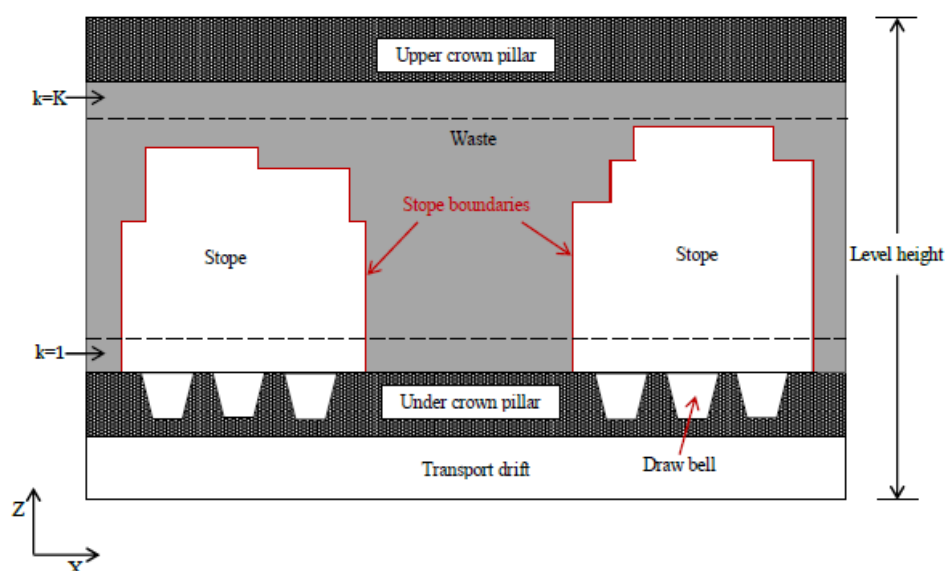
11-Upper Crown Pillar

12-Under Crown Pillar



شکل ۳-۱: اجزای یک طبقه استخراجی [۳]

در یک طبقه استخراجی به منظور خارج نمودن مواد معدنی از درون هر کارگاه استخراج، چندین قیف در درون لنگه تاج پایینی احداث می‌شود. در شکل ۳-۲، موقعیت کارگاه‌های استخراج^۱ و قیف‌ها در درون یک طبقه استخراجی نشان داده شده است. بدلیل ماهیت روش‌های استخراج قایم، همواره باید توجه شود که کارگاه‌های استخراج به لنگه تاج پایینی^۲ متصل باشند تا امکان تخلیه مواد استخراجی از درون قیف‌های^۳ درون این لنگه مهیا شود (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲: شمای کلی از یک طبقه استخراجی برای روش‌های استخراج قایم

-
- 1-Stope
 - 2-Upper Crown Pillar
 - 3-Draw bell

تابع هدف در الگوریتم SOA، تعیین محدوده بهینه کارگاه استخراج^۱ بر مبنای ملاحظات فنی و اقتصادی است. در واقع ملاحظات فنی باید تأمین کننده عواملی مانند حفظ پایداری کارگاه استخراج و ... باشند و بر مبنای ملاحظات اقتصادی نیز باید به بیشترین سود ممکن دست یافت. عبارت دیگر در محدوده تعیین شده با کاربرد این الگوریتم علاوه بر اینکه باید تمام محدودیت‌های فنی رعایت شده باشد این محدوده، باید تضمین کننده بیشترین سود ممکن نیز باشد.

قبل از ادامه توضیحات مربوط به مراحل انجام الگوریتم SOA لازم است روش‌های استخراج از طبقات فرعی^۲ و تخریب در طبقات فرعی^۳ معرفی شوند.

۳-۲-۱- روش استخراج از طبقات فرعی

روش استخراج از طبقات فرعی یکی از روش‌های بدون نگهداری می‌باشد. این روش برای استخراج مواد معدنی نسبتاً پرشیب که هم ماده معدنی و هم سنگ در برگیرنده از نظر خود نگهداری تا حدودی صلاحیت داشته باشند به کار می‌رود [21].

این روش پر تولید بوده و حجم استخراج در آن بالا می‌باشد. سنگ معدن و کمرهائی که با این روش استخراج می‌شوند، عموماً بایستی محکم بوده و لذا نیازی به نگهداری مصنوعی ندارد و یا اگر نیاز داشته باشد کم و قابل اغماض می‌باشد. در توده‌های بزرگ ممکن است چندین کارگاه ایجاد شود که بین آنها پایه‌هائی از ماده معدنی باقی می‌ماند. طرز کار بدین صورت است که پس از حفر دو تونل دنبال لایه اصلی در بالا و پایین و یک دوایل ارتباطی، تعدادی تونل دنبال لایه افقی دیگر نیز به فواصل چند متر در داخل ماده معدنی احداث و بدین ترتیب آن را به طبقات فرعی متعددی تقسیم می‌کنند. توأم با انجام این عملیات، بونکرهائی نیز در قسمت پایین کارگاه احداث می‌کنند و مواد معدنی حفر شده از طریق این بونکرها، به داخل وسایل حمل و نقلی که در تونل دنبال لایه پایین قرار دارند،

1-Stope Optimum Limit

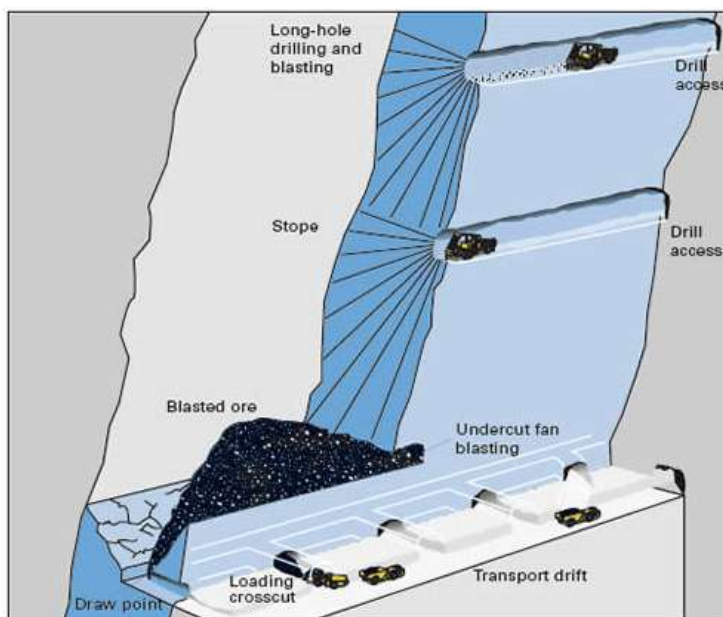
2-Sublevel Stopping

3-Sublevel Caving

تخلیه می‌شود. پس از احداث طبقات فرعی و بونکرها، طبقات فرعی را از پایین به بالا استخراج می‌کنند [21].

برای شروع استخراج در ابتدا لازم است که یک شکاف در انتهای کارگاه در عرض ماده معدنی یعنی بین کمرپایین و کمربالا ایجاد شود. این کار معمولاً با چال‌زنی و آتش‌کاری دیوارها از داخل دوپیل انتهائی انجام می‌گیرد. وقتی که این دوپیل از کمربالا تا پایین باز شد، استخراج می‌تواند به سرعت پیش رود. این دوپیل باز یا شکاف ایجاد شده، یک سطح آزاد برای آتش‌کاری ایجاد می‌کند و می‌توان در این شکاف اقدام به حفر چال‌های موازی (کانسارهای کم‌ضخامت) یا چال‌های پروانه‌ای از داخل طبقه فرعی کرد. در اثر آتش‌کاری مواد خرد می‌شوند و در اثر وزن خود به قسمت‌های پایین فرو می‌ریزند و در بالای بونکر جمع می‌شوند. هر چند کارگاه‌ها فاقد نگهداری هستند، اما گاهی برای نگهداری قسمت‌های استخراج شده، در اطراف تونل‌های اصلی بالا و پایین مقداری از ماده معدنی را برجای می‌گذارند. همچنین در قسمت‌های دیگر نیز مقداری از ماده معدنی را به صورت پایه‌های طویل از بالا تا پایین کارگاه به جای می‌گذارند [21].

در شکل ۳-۳، شمای کلی از یک کانسار که با روش استخراج از طبقات فرعی در حال استخراج است نشان داده شده است.

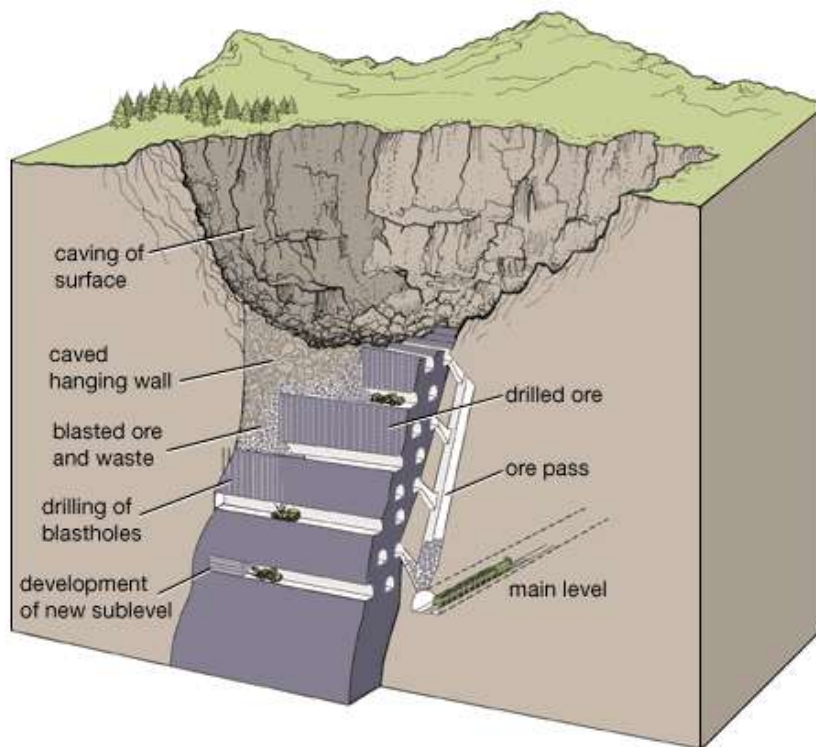


شکل ۳-۳: شمای کلی از استخراج یک کانسار به روش استخراج از طبقات فرعی

۳-۲-۲- روش تخریب در طبقات فرعی

روش تخریب در طبقات فرعی در کانسارهای قائم و نزدیک به قائم فلزی و غیر فلزی به کار می‌رود. در شرایطی که توده‌های بزرگ کاسنگ با سنگ‌های سست قابل تخریب احاطه شده باشند، این روش قابل استفاده است. در این روش در اولین مرحله با حفر تونل‌های طبقات فرعی، قسمت اعظم آماده‌سازی صورت می‌گیرد. برای اینکه بتوان ماده معدنی استخراج شده از تمام طبقات فرعی را به تونل‌های باربری اصلی منتقل کرد یک دوپل مورب در سنگ‌های کمرباطین ماده معدنی حفر و انتهای آن به تونل اصلی متصل می‌شود. پس از انجام کارهای آماده‌سازی، در هر طبقه فرعی چالزنی، بارگیری و حمل و نقل به صورت جداگانه صورت می‌گیرد. در این روش جهت استخراج رو به پایین و مواد معدنی واقع بین طبقات فرعی به صورت بالاسری خرد می‌شوند. بدین منظور از انتهای بالاترین طبقه فرعی دستگاه‌های چالزنی شروع به حفر چال‌ها می‌کنند. آتش‌کاری در یک طبقه فرعی از کمربالا یا انتهای کانسار شروع و به صورت پسر و به طرف کمرباطین ادامه دارد. پس از آتش‌کاری مواد خرد شده در اثر نیروی وزن خود به داخل کف طبقه فرعی می‌ریزد و از آنجا بوسیله لودر، LHD و یا اسکرپر بارگیری شده و به محل عبور ماده معدنی حمل و تخلیه می‌شود [22].

در شکل ۳-۴، شمای کلی از یک کانسار که با روش تخریب در طبقات فرعی در حال استخراج است نشان داده شده است.

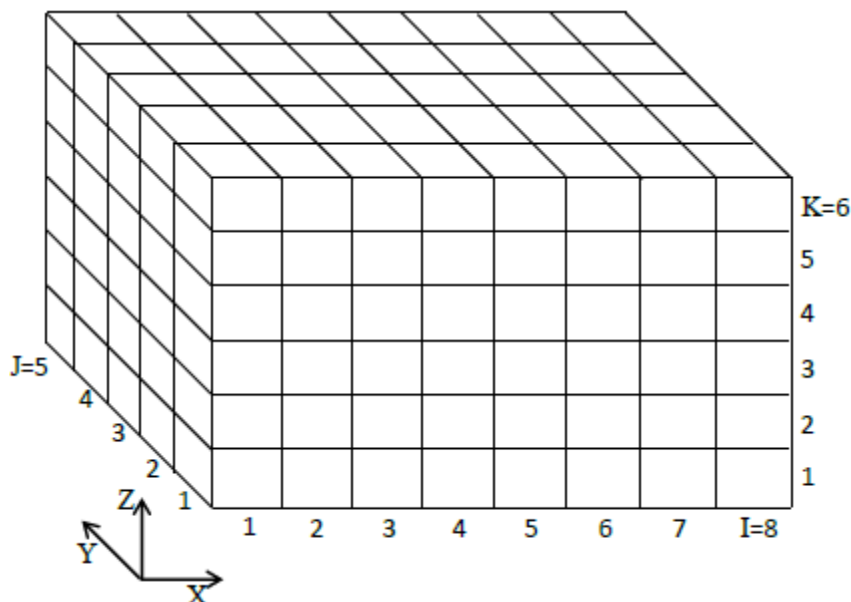


شکل ۳-۴: شمای کلی از استخراج یک کانسار به روش تخریب در طبقات فرعی

۳-۳- مراحل اجرای الگوریتم

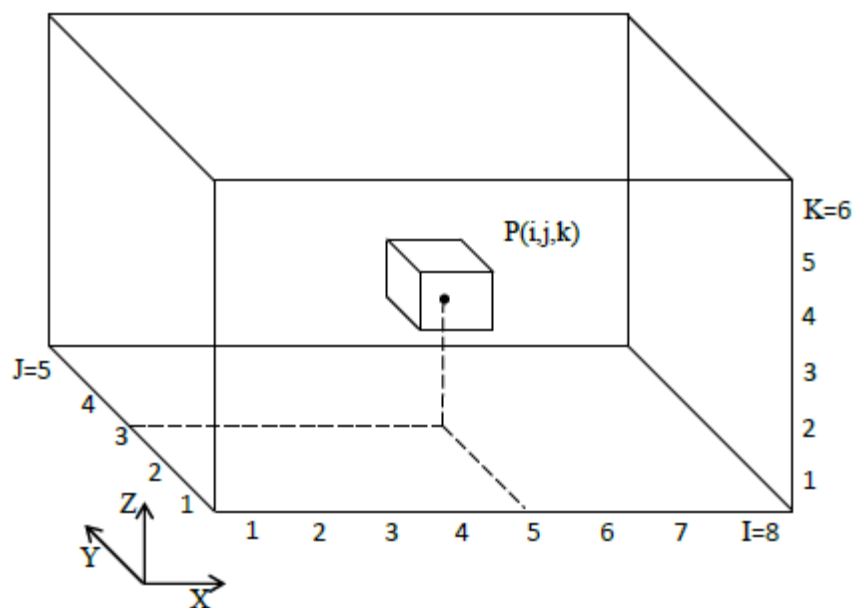
همانطور که ذکر شده الگوریتم SOA بر روی یک مدل بلوکی اقتصادی سه بعدی اجرا می‌شود. در این الگوریتم یک کارگاه استخراج به نام کارگاه استخراج محتمل و به شکل مکعب مستطیل در تمام موقعیت‌های ممکن قرار خواهد گرفت و ارزش آن به نحوی که در ادامه توضیح داده خواهد شد محاسبه می‌شود. سپس با ارزش‌ترین کارگاه محتمل از بین تمام مجموعه جواب ممکن انتخاب می‌شود. پس از انتخاب با ارزش‌ترین کارگاه محتمل در صورتی که این کارگاه، محدودیت‌های فنی تعریف شده را نقض ننماید به عنوان جزئی از محدوده انتخاب خواهد شد. در این الگوریتم، به نحوی که در ادامه به صورت مفصل توضیح داده خواهد شد هر کارگاه محتمل فقط یک بار بررسی می‌شود.

اگر یک مدل بلوکی اقتصادی مطابق شکل ۳-۵ و به نام P در دسترس باشد که در این مدل بلوکی اقتصادی، تعداد بلوک‌ها در جهت امتدادی یا X برابر با I بلوک، در جهت ضخامت یا Y برابر با J بلوک و در جهت عمق یا Z برابر با K بلوک باشد آنگاه در اولین مرحله از اجرای الگوریتم، یک مدل بلوکی سه‌بعدی و با ابعاد مشابه مدل P و به نام S ساخته خواهد شد. مدل S، مدل دودویی^۱ نامیده می‌شود و در ابتدا تمام بلوک‌های آن دارای ارزش صفر هستند. بعبارت دیگر چون قبل از شروع اجرای الگوریتم هیچ کارگاهی یافت نشده است بنابراین تمام بلوک‌ها دارای ارزش صفراند که به معنای عدم استخراج آنها می‌باشد و چنانچه در پایان اجرای الگوریتم، کارگاهی یافت شود آنگاه بلوک‌های واقع در محدوده این کارگاه و در درون مدل بلوکی S دارای ارزش یک خواهند شد. تمام بلوک‌های مدل S همواره یکی از دو مقدار صفر و یا یک را خواهند داشت. در واقع نتیجه حاصل از اجرای الگوریتم SOA، مدل S خواهد بود که با توجه به مدل بلوکی اقتصادی P و دیگر پارامترهایی که در ادامه توضیح داده خواهد شد تعیین می‌شود. طبیعی است اگر الگوریتم SOA هیچ کارگاهی را پیدا نکند در اینصورت تمام بلوک‌های مدل S دارای ارزش صفر خواهند بود.



شکل ۳-۵: مدل بلوکی اقتصادی P

در شکل ۳-۶ موقعیت قرارگیری هر بلوک از مدل P نشان داده شده است.



شکل ۳-۶: نمایش بلوک $P_{(i,j,k)}$ در مدل بلوکی اقتصادی P

بنابر توضیحات ذکر شده، می‌توان مرحله اول اجرای الگوریتم SOA را در جمله زیر خلاصه نمود:

مرحله اول: ساخت یک مدل بلوکی به نام S و با ابعاد مشابه مدل P، که تمام بلوک‌های آن دارای ارزش صفراند.

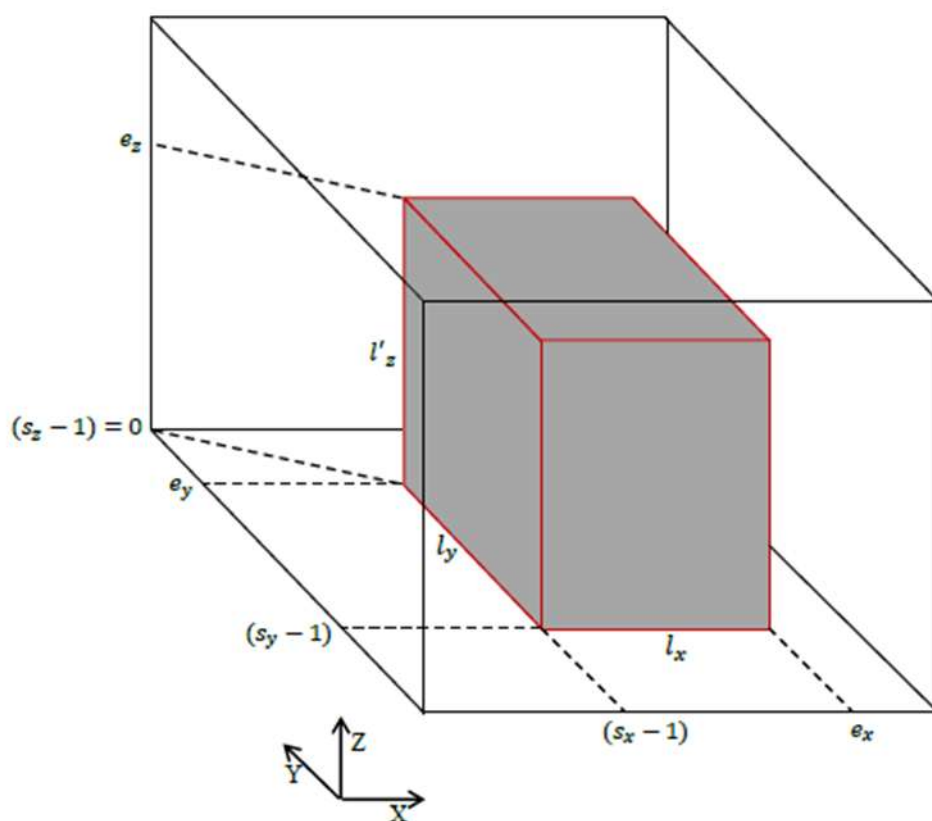
پس از تشکیل مدل بلوکی S، در مرحله دوم اجرای الگوریتم، مدل بلوکی سه بعدی T ساخته خواهد شد. در ابتدای اجرای این الگوریتم، تمام بلوک‌های واقع در مدل T نیز مشابه مدل S دارای ارزش صفر هستند اما ابعاد مدل T با مدل S تفاوت دارد. اگر حداقل و حداکثر ارتفاع کارگاه استخراج بترتیب با l_z و L_z نشان داده شود. تعداد بلوک‌های مدل T در جهت X و Y مانند دو مدل P و S بترتیب I و J بلوک است اما تعداد بلوک‌های این مدل در جهت Z برابر با $(L_z - l_z + 1)$ خواهد بود.

بنابراین می‌توان مرحله دوم الگوریتم را در جمله زیر خلاصه نمود:

مرحله دوم: ساخت یک مدل بلوکی به نام T و با ابعاد I, J و $(L_Z - l_Z + 1)$ بلوک در سه جهت X, Y و Z که تمام بلوک‌های آن دارای ارزش صفراند.

پس از اجرای مراحل اول و دوم الگوریتم، در مرحله سوم، جستجو برای پیدا نمودن کارگاه‌های محتمل^۱ شروع می‌شود. همانطور که قبلاً نیز ذکر شده است، هر کارگاه محتمل، به شکل یک مکعب مستطیل است که اگر حداقل ابعاد کارگاه‌های استخراج در دو جهت X و Y بترتیب با l_X و l_Y نشان داده شود در اینصورت ابعاد هر کارگاه محتمل در سه جهت X, Y و Z بترتیب برابر با l_X, l_Y و l'_Z است. l'_Z شامل تمام اعداد موجود در بازه l_Z و L_Z می‌باشد. بنابراین تعداد بلوک‌های هر کارگاه محتمل برابر با $(l_X \times l_Y \times l'_Z)$ است.

اگر برای یک کارگاه محتمل به ابعاد $l_X \times l_Y \times l'_Z$ ، حدود پایین در سه جهت X, Y و Z بترتیب s_X, s_Y و s_Z نامگذاری شود و همچنین حدود بالا در سه جهت X, Y و Z بترتیب e_X, e_Y و e_Z باشد و l'_Z شامل تمام اعداد موجود در بازه l_Z و L_Z باشد آنگاه محل قرارگیری این حدود و موقعیت قرارگیری هر کارگاه محتمل، در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. بعبارت دیگر اگر کارگاه محتمل در یک جهت خاص بر روی محور مربوط به آن جهت تصویر شود آنگاه کوچکترین شماره بلوک در آن جهت، حد پایین و بزرگترین شماره بلوک، حد بالا نام دارد.



شکل ۳-۷: نمایش یک کارگاه محتمل و حدود بالا و پایین آن در سه راستای X ، Y و Z

چون همواره کارگاه‌های استخراج باید به لنگه تاج پایینی متصل باشند بنابراین همواره حد پایین هر کارگاه محتمل در راستای Z برابر با یک است.

حدود تغییرات، s_x ، s_y و s_z در یک مدل بلوکی بصورت رابطه ۳-۱ قابل بیان است:

$$s_x = 1, 2, \dots, (I - l_x + 1)$$

$$s_y = 1, 2, \dots, (J - l_y + 1) \quad (1-3)$$

$$s_z = 1$$

که در این رابطه، I تعداد بلوک‌ها در جهت X و J تعداد بلوک‌ها در جهت Y است. با توجه به ابعاد هر کارگاه و همچنین حدود پایین آن در سه جهت ذکر شده، می‌توان مقدار حدود بالا را بصورت زیر برای آن تعیین نمود.

$$e_X = s_X + l_X - 1$$

$$e_Y = s_Y + l_Y - 1 \quad (2-3)$$

$$e_Z = l'_Z \quad l_Z \leq l'_Z \leq L_Z$$

همچنین حدود تغییرات e_X ، e_Y و e_Z نیز از طریق رابطه ۳-۳ قابل محاسبه است:

$$e_X = (l_X), (l_X + 1), \dots, I$$

$$e_Y = (l_Y), (l_Y + 1), \dots, J \quad (3-3)$$

$$e_Z = l'_Z \quad l_Z \leq l'_Z \leq L_Z$$

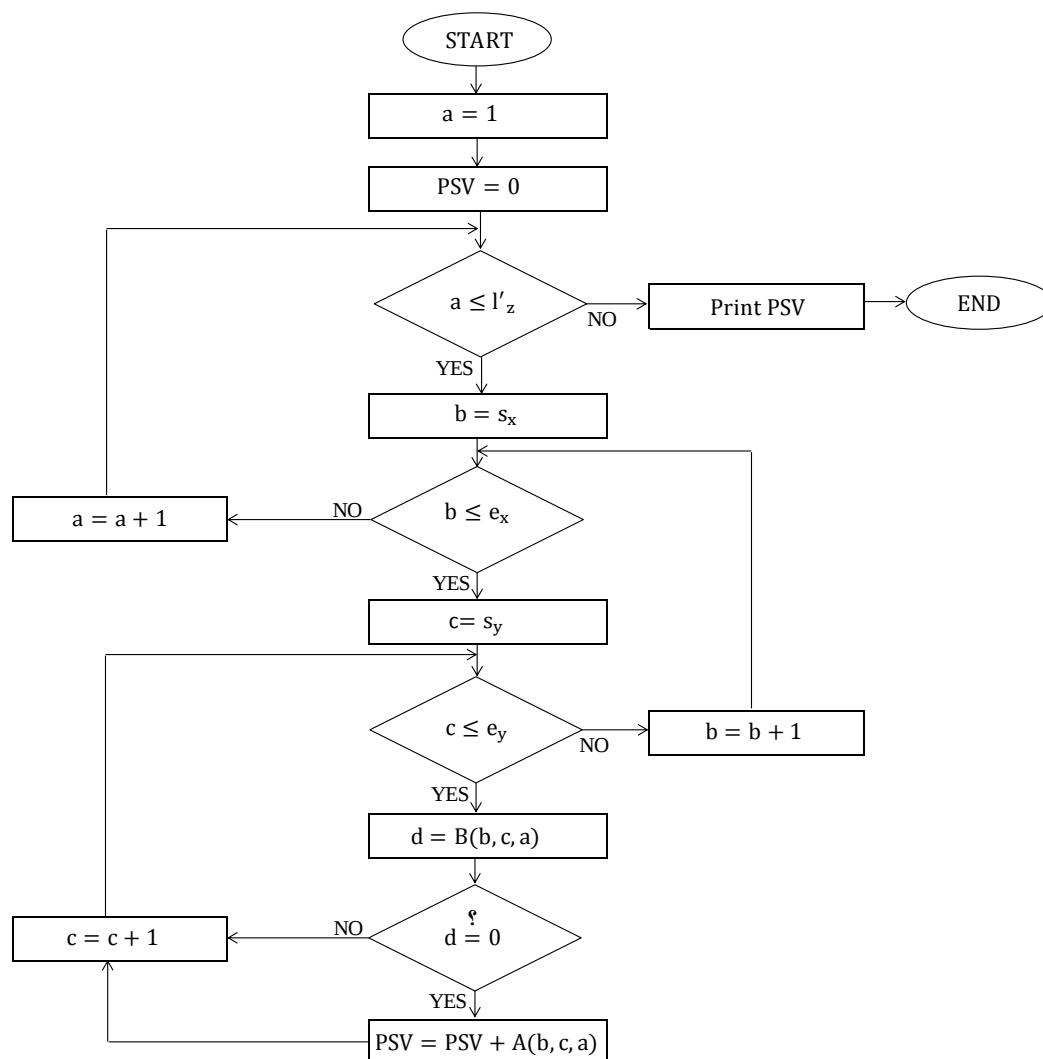
با تعیین حدود تغییرات حد بالا و پایین کارگاه محتمل، تمام موقعیت‌های ممکن برای تشکیل این کارگاه بسادگی بدست خواهد آمد و این کارگاه باید در تمام این موقعیت‌ها قرار بگیرد تا در نهایت با ارزش‌ترین کارگاه محتمل انتخاب گردد. هر کارگاه محتمل با $SL(s_X, s_Y, l'_Z)$ نشان داده می‌شود. در واقع اگر برای هر کارگاه محتمل، حدود پایین آن در دو جهت X و Y و حد بالای آن در جهت Z در دسترس باشد در اینصورت با توجه به این مقادیر، تعیین موقعیت آن کارگاه بسادگی انجام می‌شود. پس از تعیین حدود بالا و پایین اولین کارگاه محتمل، صرفنظر از ارزش آن و فقط در صورتیکه با توجه به مقادیر s_X ، s_Y و l'_Z مقدار $T(s_X, s_Y, (l'_Z - l_Z + 1))$ برابر با صفر باشد، انتخاب می‌شود. کارگاه‌های محتمل بعدی در صورت داشتن دو شرط زیر جایگزین کارگاه محتمل قبلی خواهند شد:

الف- با توجه به مقادیر s_X ، s_Y و l'_Z مقدار $T(s_X, s_Y, (l'_Z - l_Z + 1))$ برای آن کارگاه محتمل برابر با صفر باشد.

ب- ارزش آن از ارزش کارگاه محتمل قبلی بیشتر باشد.

بنابراین پس از بررسی تمام موقعیت‌های ممکن، یک کارگاه محتمل که دارای بیشترین ارزش است انتخاب می‌شود و حدود پایین آن در سه جهت X ، Y و Z بترتیب f_{s_x} ، f_{s_y} و f_{s_z} و همچنین حدود بالای آن نیز در همین جهات بترتیب f_{e_x} ، f_{e_y} و f_{e_z} نامگذاری می‌شود.

به منظور تعیین ارزش هر کارگاه محتمل باید ارزش تمام بلوک‌های واقع در آن کارگاه را در صورتیکه قبلاً به عنوان جزئی از محدوده انتخاب نشده باشند با هم جمع نمود. یادآوری می‌شود که بلوکی جزء محدوده استخراجی است که دارای مقدار یک در مدل S باشد. روندنمای تعیین ارزش هر کارگاه محتمل در شکل ۸-۳ رسم شده است که در این روندنما، منظور از PSV ، ارزش هر کارگاه محتمل است.



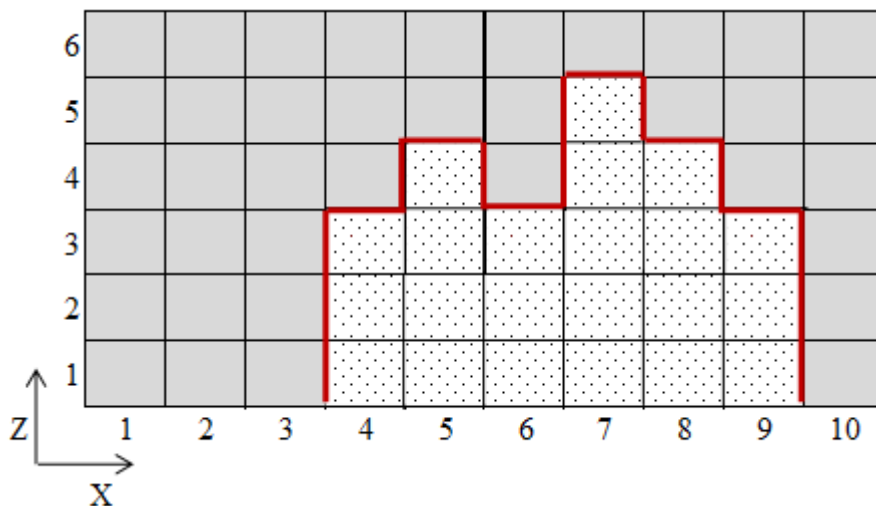
شکل ۸-۳: روندنمای تعیین ارزش هر کارگاه محتمل

پس از تعیین موقعیت و ارزش با ارزش‌ترین کارگاه محتمل، ممکن است ارزش این کارگاه، مقداری منفی، صفر و یا مثبت باشد. در صورتیکه ارزش این کارگاه، منفی و یا صفر باشد در این صورت اجرای الگوریتم در همین مرحله متوقف خواهد شد اما چنانچه ارزش آن مثبت باشد باید مراحل چهارم تا هشتم را انجام داد و چنانچه کارگاه محتمل انتخاب شده، توانایی تأمین تمام شرایط موجود در این مراحل را داشته باشد آنگاه به عنوان جزئی از محدوده استخراجی انتخاب خواهد شد و مقدار بلوک‌های متناظر با این کارگاه در مدل S از صفر به یک تغییر خواهد کرد که همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، مقدار یک برای هر بلوک در مدل S، به معنای استخراج آن بلوک است.

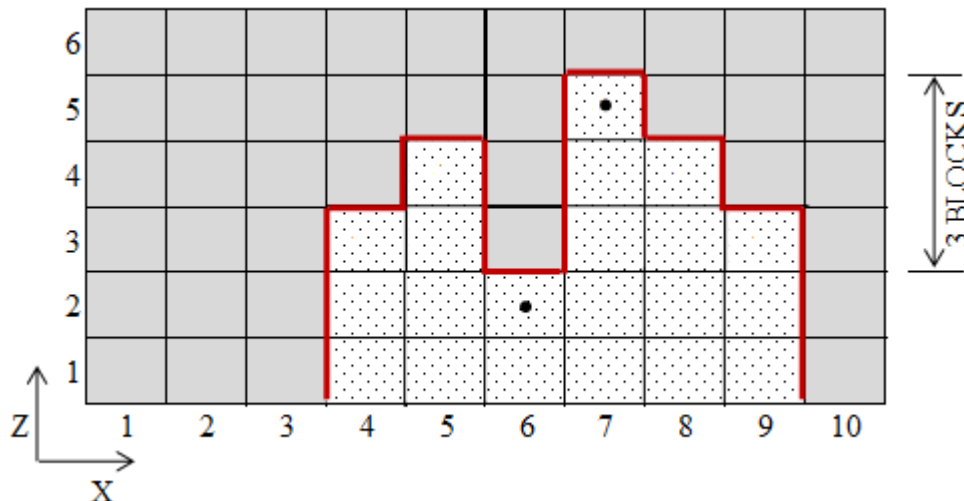
مرحله چهارم: با توجه به مقادیر حدود بالا و پایین با ارزش‌ترین کارگاه محتمل، مقدار $T(fs_X, fs_Y, (fe_Z - l_Z + 1))$ از صفر به یک تغییر خواهد یافت.

قبل از ادامه توضیح مراحل بعد الگوریتم لازم است محدودیت هم‌ترازی^۱ برای یک محدود استخراجی تعریف و تبیین گردد.

اختلاف تراز سقف کارگاه استخراج در دو ردیف بلوک مجاور واقع در محدوده استخراجی باید در یک محدوده از قبل تعیین شده باشد که این مسأله بوسیله محدودیت هم‌ترازی سقف نشان داده می‌شود. عبارت دیگر اختلاف تراز سقف کارگاه استخراج در دو ردیف بلوک مجاور یکدیگر در یک کارگاه استخراج همواره باید کوچکتر و یا مساوی محدودیت هم‌ترازی سقف تعریف شده باشد به همین ترتیب محدودیت هم‌ترازی برای کف کارگاه استخراج نیز تعریف می‌شود. به عنوان مثال اگر محدودیت هم‌ترازی سقف در سه جهت X، Y و Z به ترتیب m_X ، m_Y و m_Z نامگذاری شود و مقدار m_Z برابر دو بلوک در نظر گرفته شود در شکل ۳-۹-الف این محدودیت رعایت شده است در حالی که در شکل ۳-۹-ب نقض شده است.



الف: یک کارگاه استخراج با محدودیت هم‌ترازی سقف برابر با دو بلوک در جهت Z



ب: نقض شدن محدودیت هم‌ترازی سقف در نتیجه حذف یک بلوک از محدوده استخراجی

شکل ۳-۹: بررسی محدودیت هم‌ترازی سقف بر یک محدوده استخراجی در جهت Z

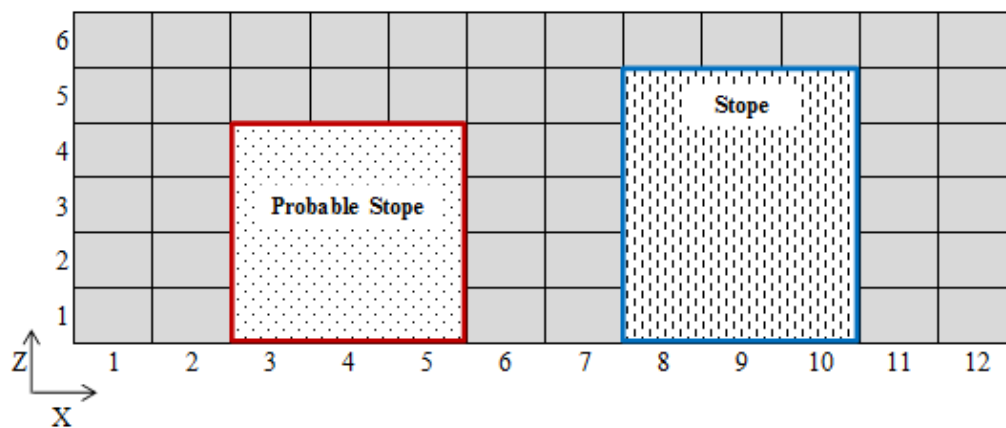
با حذف بلوک واقع در ردیف سوم و ستون ششم از کارگاه استخراج شکل ۳-۹-الف، اختلاف ارتفاع بین بالاترین بلوک واقع در ستون ششم و ستون هفتم به سه بلوک می‌رسد که از مقدار تعیین شده بیشتر است بنابراین در شکل ۳-۹-ب محدودیت هم‌ترازی در جهت Z نقض شده است.

موقعیت با ارزش‌ترین کارگاه محتمل انتخاب شده در مرحله سوم، ممکن است نسبت به کارگاه‌های از قبل تعیین شده، دارای یکی از سه حالت زیر باشد که متناسب با هر حالت باید اقدامات مقتضی صورت گیرد.

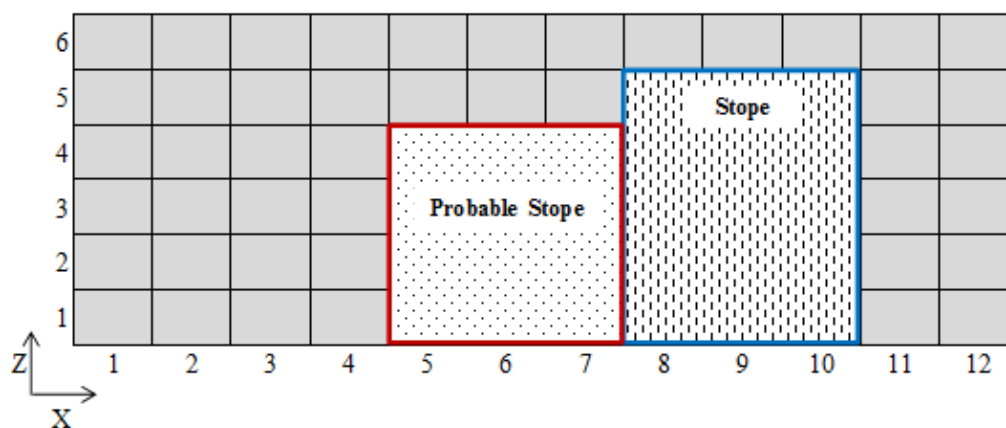
حالت الف- مستقل از کارگاه‌های قبل باشد. بعبارت دیگر هیچ بلوک مشترکی با کارگاه‌های قبلی نداشته باشد و از یکدیگر مجزا باشند (شکل ۳-۱۰-الف).

حالت ب- به کارگاه‌های قبل چسبیده باشد. در این حالت مانند حالت الف، هیچ بلوک مشترکی بین کارگاه محتمل و کارگاه‌های قبل وجود ندارد اما این کارگاه‌ها از یکدیگر مجزا نیستند (شکل ۳-۱۰-ب).

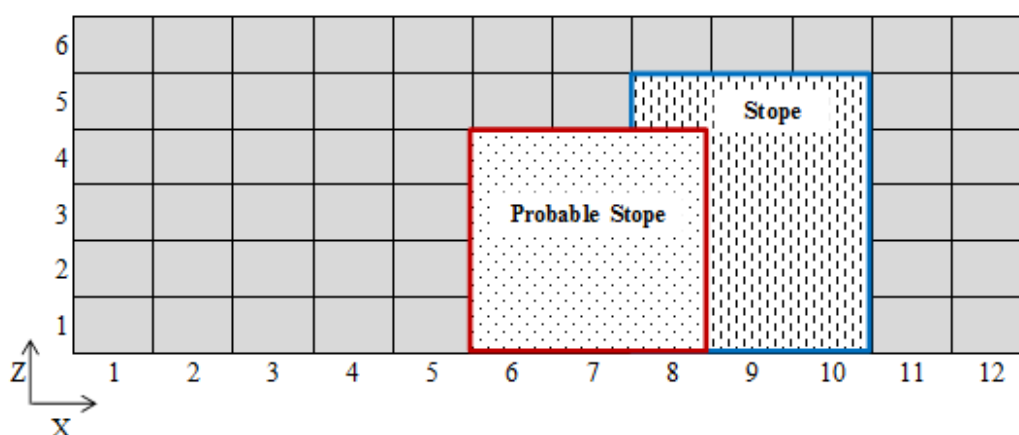
حالت ج- با هم تداخل داشته باشند. یعنی دارای بلوک یا بلوک‌های مشترک باشند (شکل ۳-۱۰-ج).
اگر حالت الف بوجود آید، در اینصورت بررسی محدودیت‌های هم‌ترازی و حداکثر طول کارگاه‌ها لازم نخواهد بود و بلافاصله پس از مرحله چهارم، الگوریتم به مرحله هفتم خواهد رفت اما چنانچه حالت ب و یا ج برقرار باشد، مرحله پنجم الگوریتم اجرا خواهد شد.



الف: کارگاه محتمل مستقل از کارگاه‌های قبل



ب: کارگاه محتمل چسبیده به کارگاه‌های قبل

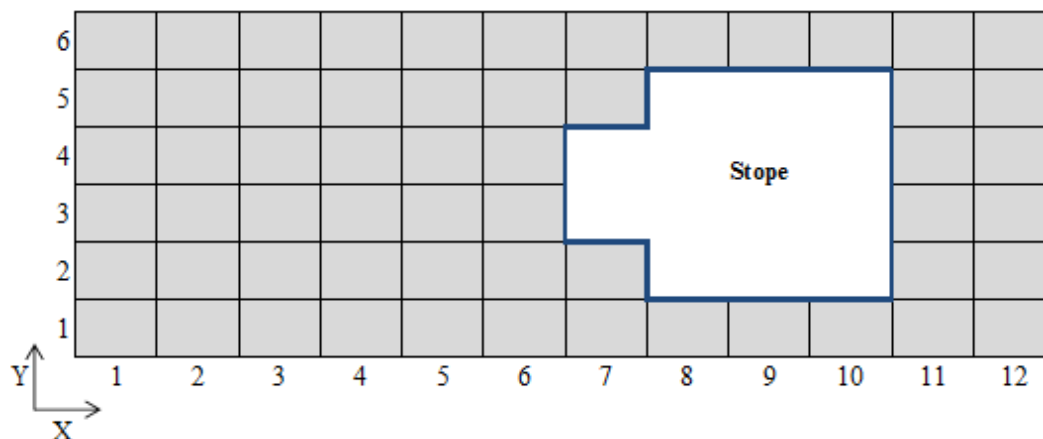


ج: کارگاه محتمل دارای بلوک مشترک با کارگاه‌های قبل

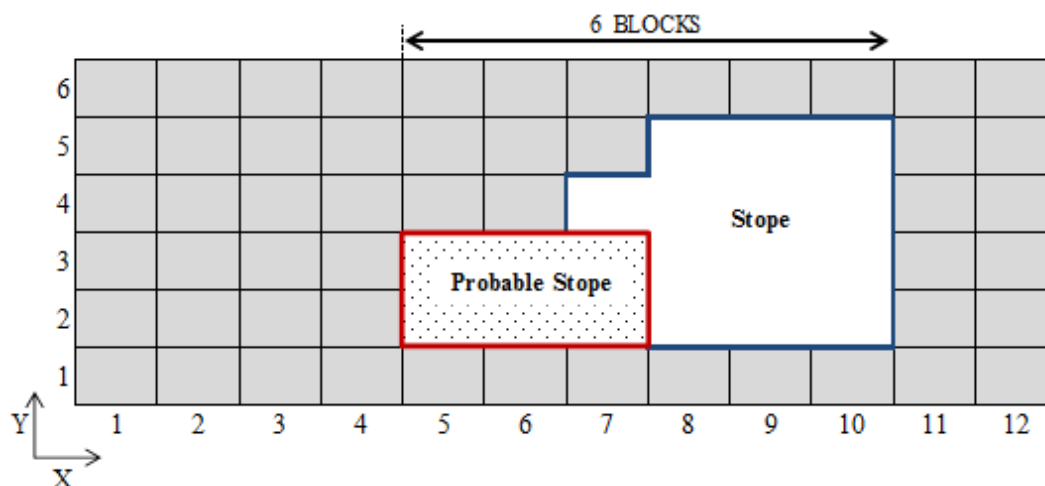
شکل ۳-۱۰: موقعیت‌های مختلف قرارگیری کارگاه محتمل نسبت به محدوده از پیش تعیین شده

مرحله پنجم: در این مرحله، اختلاف تراز بین بلوک‌های کارگاه محتمل در سه جهت X ، Y و Z با تمام بلوک‌های کارگاه‌های قبل که بعنوان جزئی از محدوده انتخاب شده‌اند، محاسبه می‌شود و چنانچه این اختلاف ارتفاع کوچکتر یا مساوی محدودیت هم‌ترازی تعریف شده باشد در اینصورت باید مرحله ششم الگوریتم اجرا شود و در غیر اینصورت بدلیل نقض شدن محدودیت هم‌ترازی، این کارگاه محتمل انتخاب نخواهد شد و الگوریتم به مرحله سوم برمی‌گردد و جستجو برای یافتن کارگاه‌های محتمل دیگر ادامه خواهد یافت.

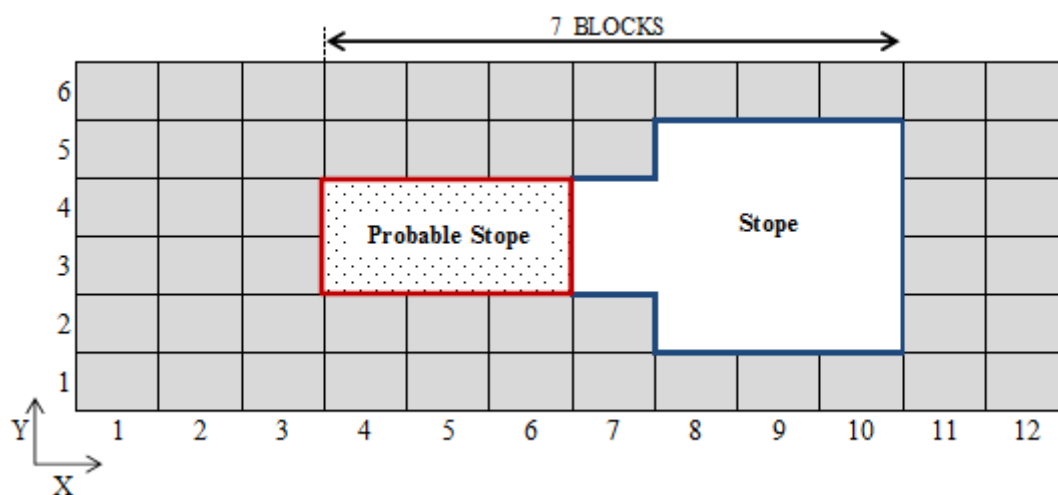
مرحله ششم: با اضافه شدن یک کارگاه محتمل به محدوده استخراجی، ممکن است ابعاد کارگاه از حداکثر مقادیر تعیین شده تجاوز نماید. از آنجاکه ابعاد کارگاه‌های محتمل در جهت Z همواره در محدوده مجاز است ($l_Z \leq l'_Z \leq L_Z$) فقط در دو جهت X و Y لازم است طول کارگاه‌ها بررسی شود. اگر حداکثر ابعاد کارگاه استخراج در سه جهت X ، Y و Z به ترتیب l_X ، l_Y و L_Z نامگذاری شود و تصویر افقی یک محدوده استخراجی فرضی بصورت شکل ۳-۱۱-الف باشد و مقادیر l_Y و l_X بترتیب دو و سه بلوک، همچنین مقادیر مربوط به l_Y و l_X بترتیب چهار و شش بلوک فرض شود آنگاه در صورتیکه یک کارگاه محتمل در موقعیت شکل ۳-۱۱-ب قرار گیرد هیچ یک از این محدودیت‌ها نقض نمی‌شود ولی با قرارگیری یک کارگاه در موقعیت شکل ۳-۱۱-ج محدودیت حداکثر ابعاد کارگاه در جهت X نقض خواهد شد.



الف: تصویر افقی از یک محدوده استخراجی



ب: برقراری محدودیت حداکثر ابعاد کارگاه در صورت اضافه شدن کارگاه محتمل به محدوده



ج: نقض شدن محدودیت حداکثر ابعاد کارگاه در صورت اضافه شدن کارگاه محتمل به محدوده

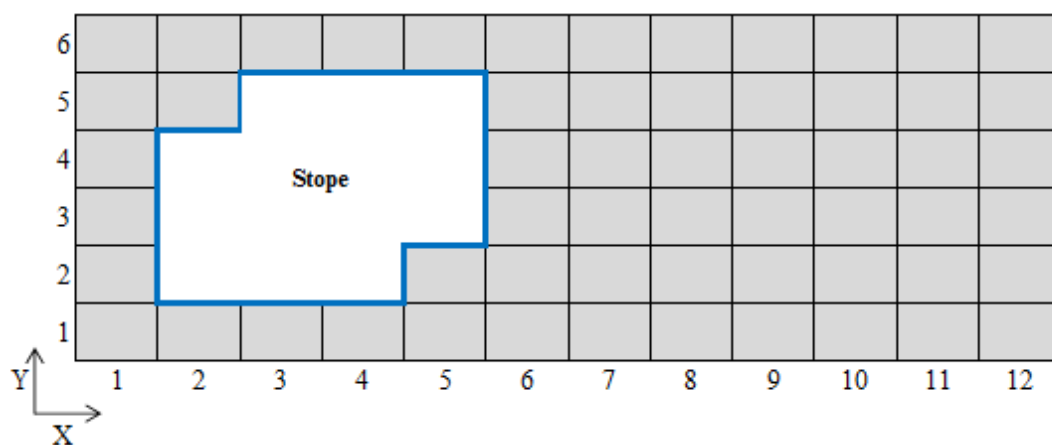
شکل ۳-۱۱: بررسی محدودیت حداکثر ابعاد کارگاه استخراج در صورت اضافه شدن یک کارگاه محتمل

در صورت برقراری محدودیت حداکثر ابعاد کارگاه استخراج، الگوریتم به مرحله بعد خواهد رفت، در غیر این صورت بدلیل نقض شدن این محدودیت، این کارگاه محتمل انتخاب نمی‌شود و الگوریتم به مرحله سوم باز خواهد گشت و جستجو به منظور پیدا نمودن کارگاه‌های محتمل دیگر ادامه خواهد یافت.

یکی از مسایلی که در طراحی محل و موقعیت کارگاه‌های استخراج باید به آن توجه شود، برقراری یک حداقل فاصله، بین دو کارگاه و در جهت امتداد کانسار یا X برای حفظ پایداری آنهاست که این

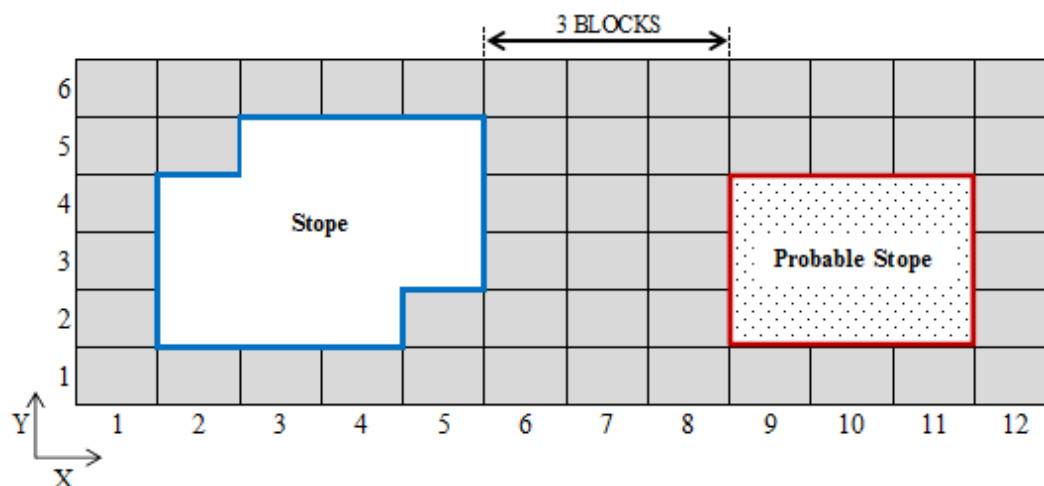
محدودیت برای روش‌هایی مانند کند و آکند^۱ و انبارهای^۲ از درجه اهمیت بالاتری برخوردار است و به نام محدودیت حداقل عرض پایه‌های جانبی^۳ شناخته می‌شود. این محدودیت در مرحله ششم در نظر گرفته خواهد شد و اگر کارگاه احتمالی که در مرحله سوم انتخاب می‌شود، این محدودیت را نقض نماید امکان انتخاب نخواهد داشت.

مرحله هفتم: اگر محدودیت حداقل عرض پایه‌های جانبی در جهت X با d_x نشان داده شود، هر کارگاه احتمالی که در مرحله دوم انتخاب می‌شود در صورتی به عنوان جزئی از محدوده استخراجی انتخاب خواهد شد که باعث نقض این محدودیت نشود. اگر تصویر افقی از یک محدوده استخراجی فرضی بصورت شکل ۳-۱۲-الف باشد و d_x برابر با سه بلوک در نظر گرفته شود، با قرارگیری یک کارگاه محتمل در موقعیت شکل ۳-۱۲-ب این محدودیت نقض نخواهد شد اما با قرار گرفتن آن در موقعیت شکل ۳-۱۲-ج، چون فاصله کارگاه محتمل از محدوده استخراجی به کمتر از سه بلوک خواهد شد این محدودیت نقض می‌شود.

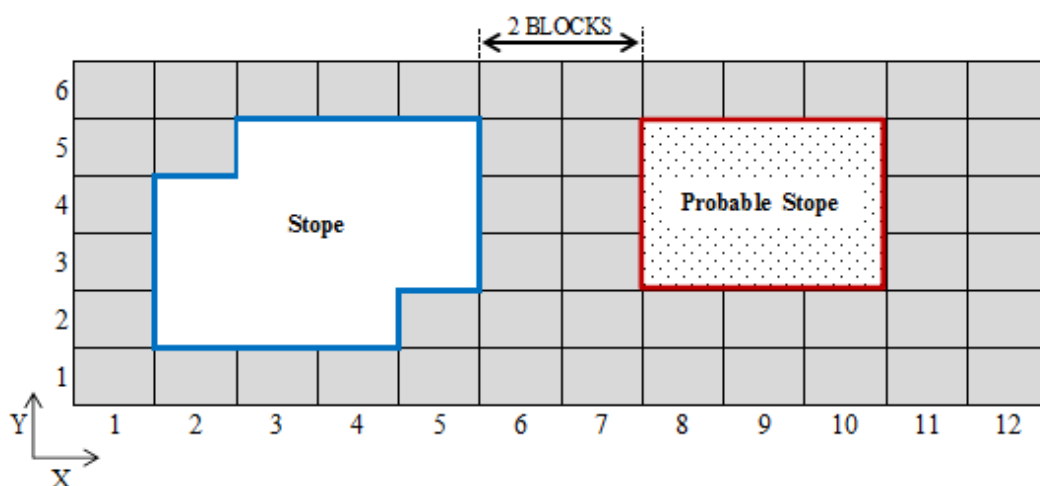


الف: تصویر افقی از یک محدوده استخراجی

-
- 1-Cut and Fill
 - 2-Shrinkage Stopping
 - 3-Rib Pillar



ب: برقراری محدودیت حداقل عرض پایه‌های جانبی در صورت اضافه شدن کارگاه محتمل به محدوده

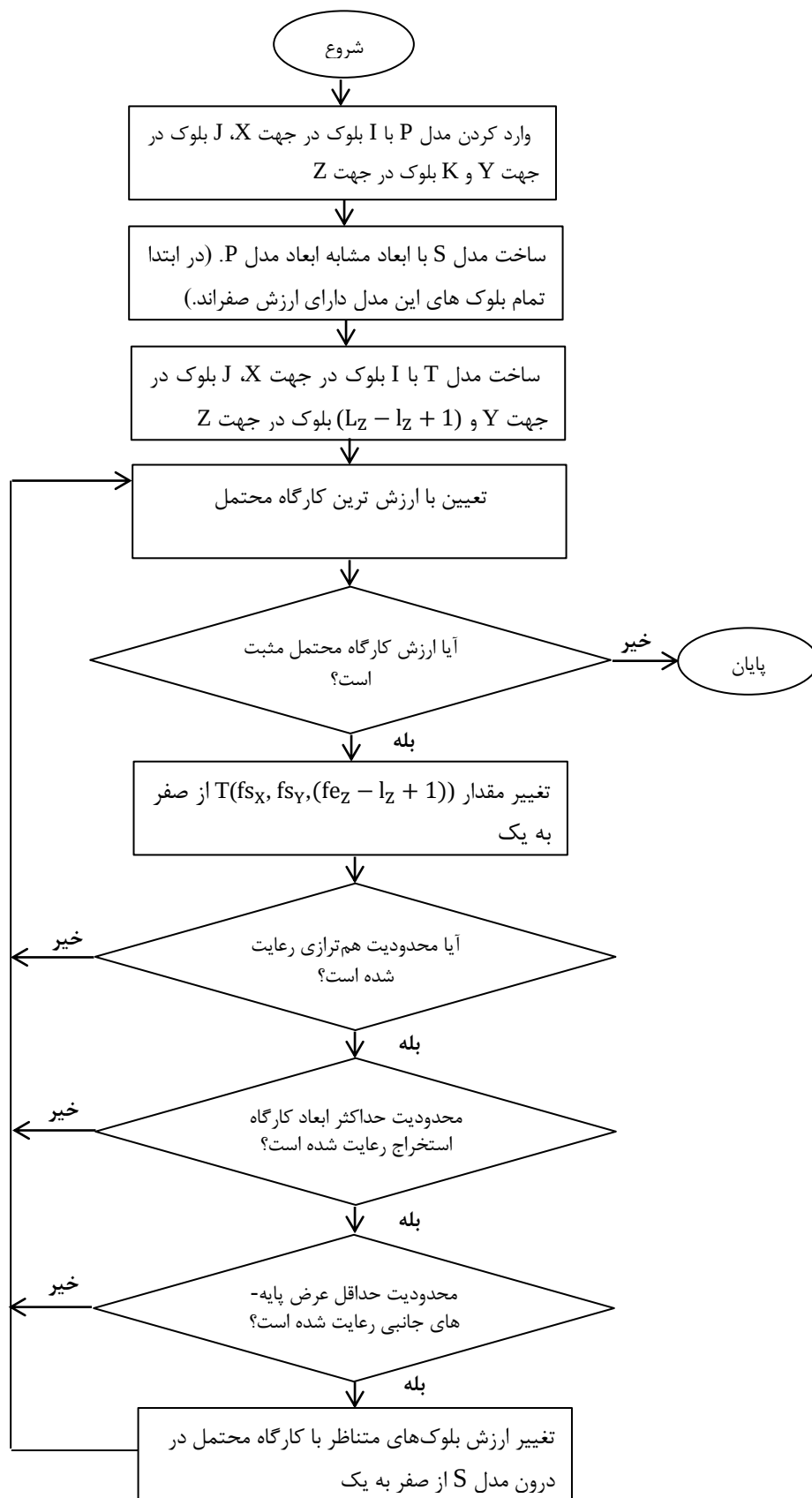


ج: نقض شدن محدودیت حداقل عرض پایه‌های جانبی در صورت اضافه شدن کارگاه محتمل به محدوده
 شکل ۳-۱۲: بررسی محدودیت حداقل عرض پایه‌های جانبی در صورت اضافه شدن یک کارگاه محتمل

در صورتیکه کارگاه محتمل، شرایط مرحله هفتم را داشته باشد در اینصورت به عنوان جزئی از محدوده استخراجی انتخاب خواهد شد و مقدار تمام بلوک‌های متناظر با این کارگاه در مدل S از صفر به یک تغییر خواهد کرد.

مرحله هشتم: در این مرحله، الگوریتم به مرحله سوم باز خواهد گشت و جستجو برای پیدا نمودن کارگاه‌های محتمل دیگر ادامه می‌یابد.

روندنمای الگوریتم SOA در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۳: روندنمای الگوریتم SOA

۴-۳- محدودیت‌های مربوط به روش‌های استخراج

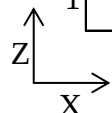
ممکن است بعضی از محدودیت‌ها برای یک روش استخراج خاص از درجه اهمیت کمتری برخوردار باشد بعبارت دیگر آن محدودیت تأثیر قابل توجهی بر آن روش استخراج نداشته باشد. بنابراین در چنین شرایطی نباید در این الگوریتم این محدودیت در نظر گرفته شود که به این منظور باید به هر محدودیت مقادیر خاصی داده شود تا تأثیر آن محدودیت از بین برود. بعنوان مثال از آنجاکه در روشی مانند استخراج از طبقات فرعی^۱، محدودیت‌های مانند حداکثر طول کارگاه در جهت امتداد (L_x) و حداقل عرض پایه‌های کناری (d_x) دارای اهمیت چندانی نیستند بنابراین در این روش مقدار L_x برابر با تعداد بلوک‌ها در جهت امتدادی در نظر گرفته می‌شود. لازم به یادآوری است که منظور از جهت امتدادی در این پایان‌نامه همان جهت X است. از آنجاکه تعداد بلوک‌ها در جهت X با I نشان داده می‌شود، بنابراین برای روش استخراج از طبقات فرعی مقدار L_x برابر با I است. همچنین در این روش مقدار d_x برابر با یک بلوک خواهد بود. بطور کلی در این الگوریتم فقط محدودیت‌های موثر بر یک روش استخراج در نظر گرفته می‌شود و از آنجاکه روش‌های استخراج مختلف دارای محدودیت‌های متفاوتی هستند، بنابراین با بکار بردن این الگوریتم، محدوده تعیین شده برای هر روش استخراج متفاوت خواهد بود.

۵-۳- مثال عددی

به منظور تشریح الگوریتم SOA، جستجوی محدوده بهینه استخراج بر روی یک مدل اقتصادی بلوکی که در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است، اجرا می‌شود. در این مثال، به منظور مقایسه نتایج اجرای الگوریتم SOA با نتایج الگوریتم آلیپس که دارای منطق ریاضی است، از یک مدل دوبعدی استفاده شده است تا هر دو الگوریتم مذکور بر روی آن اجرا شوند. به عبارت دیگر این مدل دوبعدی را می‌توان بصورت یک مدل سه‌بعدی که تعداد بلوک‌های آن در جهت ضخامت مدل، یک بلوک است، فرض نمود ($J=1$). در این مدل، حداقل ارتفاع و حداقل طول کارگاه استخراج در جهت X برابر با سه بلوک

1-Sublevel Stopping

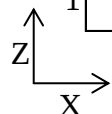
در نظر گرفته می‌شود و محدودیت هم‌ترازی سقف در جهت Z برابر با یک بلوک و محدودیت هم‌ترازی کف، معادل صفر بلوک منظور می‌شود. چون الگوریتم آلیپس محدودیت‌هایی مانند حداکثر طول کارگاه استخراج و حداقل عرض پایه‌های جانبی را در نظر نمی‌گیرد بنابراین مقدار این دو محدودیت در الگوریتم SOA بترتیب ده و یک بلوک در نظر گرفته خواهد شد تا هر دو الگوریتم مذکور از شرایط مشابهی در تعیین محدوده استخراج برخوردار باشند.



4	-1	1	1	0	-1	-1	-1	-1	1	1
3	0	1	2	1	-1	-1	2	0	2	2
2	2	2	0	2	0	1	1	2	1	1
1	1	1	-1	1	-1	1	0	1	2	1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

شکل ۳- ۱۴: مدل بلوکی اقتصادی ماده معدنی [۳]

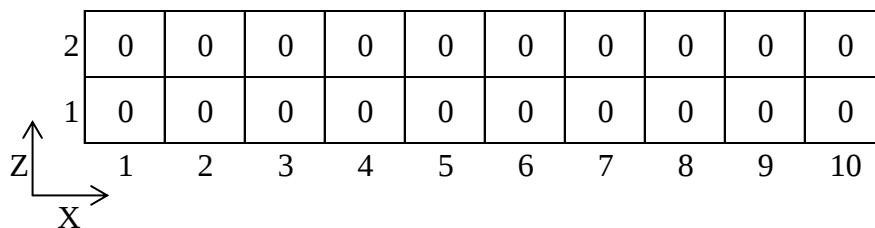
بر مبنای مراحل پیش‌گفته برای اجرای الگوریتم SOA، اگر این مدل بلوکی اقتصادی، P نامیده شود در ابتدای اجرای الگوریتم تعداد بلوک‌های مدل P در سه جهت X، Y و Z محاسبه می‌شود و یک مدل بلوکی به نام مدل S و با ابعاد مدل P ساخته می‌شود. چون I برابر ده بلوک، J برابر یک بلوک (بدلیل دوبرندی بودن) و K برابر چهار بلوک است بنابراین هر دو مدل ذکر شده دارای چهل بلوک هستند. بر این اساس، در مرحله اول اجرای الگوریتم، مدل S بصورت زیر تعیین می‌شود.



4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

شکل ۳- ۱۵: ایجاد مدل S در اولین مرحله از اجرای الگوریتم

در مرحله دوم، مدل T با ابعاد ۱۰ بلوک در جهت X، ۱ بلوک در جهت Y و ۲ بلوک در جهت Z ساخته می‌شود که تمام بلوک‌های این مدل دارای ارزش صفر هستند. این مدل در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است. چون حداقل و حداکثر ارتفاع کارگاه‌های استخراج بترتیب برابر با ۳ و ۴ بلوک است بنابراین طبق روابطی که قبلاً توضیح داده شده است، تعداد بلوک‌های مدل T در جهت Z برابر با ۲ بلوک است.



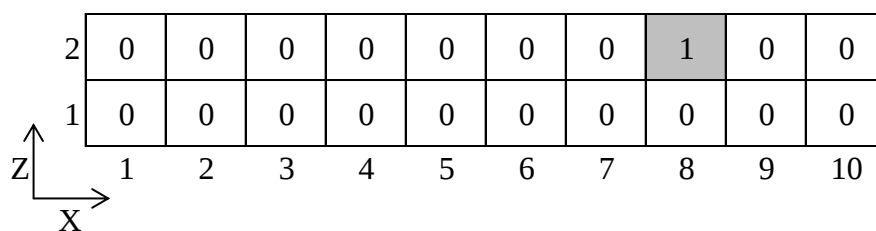
شکل ۳-۱۶: ایجاد مدل T در اولین مرحله از اجرای الگوریتم

در مرحله سوم، جستجو برای پیدا کردن با ارزش‌ترین کارگاه استخراج شروع می‌شود. در جدول ۳-۱ موقعیت و ارزش تمام کارگاه‌های محتمل آورده شده است.

جدول ۳-۱: فهرست کارگاه‌های محتمل و ارزش هر یک از این کارگاه‌ها در شروع اجرای الگوریتم

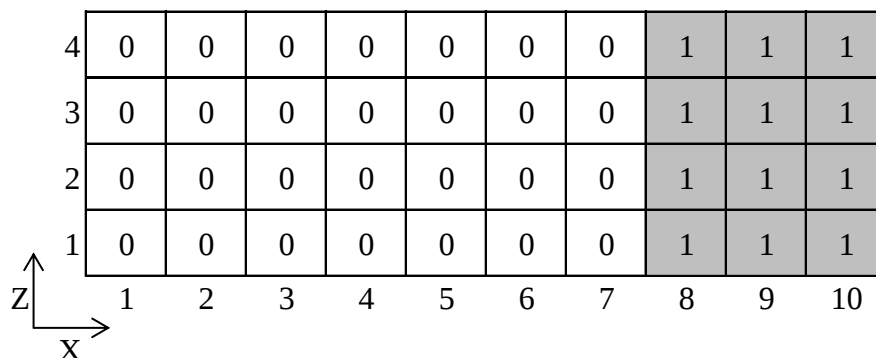
ارزش کارگاه محتمل	e_y	s_y	e_x	s_x	e_z	s_z	شماره کارگاه محتمل
8	1	1	3	1	3	1	1
9	1	1	3	1	4	1	2
9	1	1	4	2	3	1	3
11	1	1	4	2	4	1	4
3	1	1	5	3	3	1	5
3	1	1	5	3	4	1	6
3	1	1	6	4	3	1	7
1	1	1	6	4	4	1	8
2	1	1	7	5	3	1	9
-1	1	1	7	5	4	1	10
7	1	1	8	6	3	1	11
4	1	1	8	6	4	1	12
11	1	1	9	7	3	1	13
10	1	1	9	7	4	1	14
12	1	1	10	8	3	1	15
13	1	1	10	8	4	1	16

چون کارگاه شماره ۱۶ دارای بیشترین ارزش است، این کارگاه بعنوان خروجی مرحله سوم الگوریتم انتخاب می‌شود. سپس با توجه به مقادیر حدود بالا و پایین آن مقدار $T(8,1,2)$ از صفر به یک تغییر خواهد یافت که در نتیجه آن، مدل T بصورت شکل ۳-۱۷ تغییر خواهد کرد. چون این کارگاه هیچ یک از محدودیت‌های فنی را نقض نمی‌کند بنابراین این کارگاه تمام شرایط مراحل پنجم تا هفتم را دارد و انتخاب خواهد شد، سپس مقادیر مربوط به بلوک‌های این کارگاه در مدل S از صفر به یک تغییر خواهند کرد که در شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است.



2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

شکل ۳-۱۷: مدل T پس از انتخاب کارگاه شماره ۱۶



4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

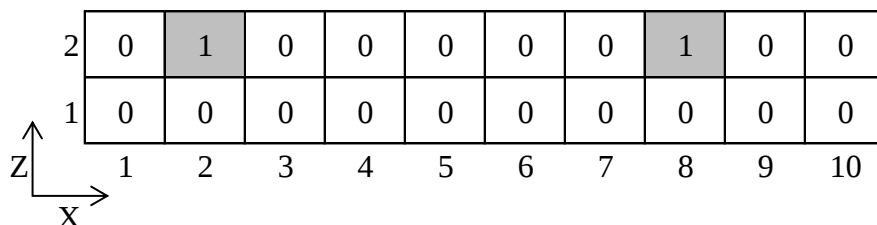
شکل ۳-۱۸: مدل S پس از انتخاب کارگاه شماره ۱۶

پس از انتخاب کارگاه محتمل شماره ۱۶، الگوریتم به مرحله سوم خواهد رفت و جستجو برای پیدا نمودن کارگاه‌های محتمل دیگر ادامه می‌یابد. در این مرحله فهرست کارگاه‌های محتمل و ارزش آنها بصورت جدول ۳-۲ است.

جدول ۳-۲: فهرست کارگاه‌های محتمل و ارزش هر یک از این کارگاه‌ها پس از انتخاب کارگاه ۱۶

ارزش کارگاه محتمل	e_y	s_y	e_x	s_x	e_z	s_z	شماره کارگاه محتمل
8	1	1	3	1	3	1	1
9	1	1	3	1	4	1	2
9	1	1	4	2	3	1	3
11	1	1	4	2	4	1	4
3	1	1	5	3	3	1	5
3	1	1	5	3	4	1	6
3	1	1	6	4	3	1	7
1	1	1	6	4	4	1	8
2	1	1	7	5	3	1	9
-1	1	1	7	5	4	1	10
4	1	1	8	6	3	1	11
2	1	1	8	6	4	1	12
3	1	1	9	7	3	1	13
2	1	1	9	7	4	1	14
0	1	1	10	8	3	1	15
0	1	1	10	8	4	1	16

از میان کارگاه‌های موجود در جدول ۳-۲، کارگاه شماره ۴ دارای بیشترین ارزش است و انتخاب می‌شود سپس برای این کارگاه محتمل نیز با توجه به مقادیر مربوط به حدود بالا و پایین آن، مقدار $T(2,1,2)$ از صفر به یک تغییر می‌یابد و در شکل ۳-۱۹ نشان داده شده است. چون کارگاه محتمل شماره ۴ نیز هیچ یک از محدودیت‌های مراحل پنجم تا هفتم را نقض نخواهد کرد، بنابراین این کارگاه، دومین کارگاهی است که انتخاب می‌شود و مقادیر متناظر با بلوک‌های آن در مدل دودویی S از صفر به یک تغییر خواهند کرد و در شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است.



2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

شکل ۳-۱۹: مدل T پس از انتخاب کارگاه‌های ۴ و ۱۶

4	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
3	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
2	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

شکل ۳-۲۰: مدل S پس از انتخاب کارگاه‌های ۴ و ۱۶

پس از انتخاب دو کارگاه شماره ۱۶ و شماره ۴، الگوریتم به مرحله سوم باز خواهد گشت که در این مرحله، موقعیت و ارزش کارگاه‌ها بصورت جدول ۳-۳ است.

جدول ۳-۳: فهرست کارگاه‌های محتمل و ارزش هر یک از این کارگاه‌ها پس از انتخاب کارگاه ۴ و ۱۶

شماره کارگاه محتمل	S_z	e_z	S_x	e_x	S_y	e_y	ارزش کارگاه محتمل
1	1	3	1	3	1	1	3
2	1	4	1	3	1	1	2
3	1	3	2	4	1	1	0
4	1	4	2	4	1	1	0
5	1	3	3	5	1	1	-2
6	1	4	3	5	1	1	-3
7	1	3	4	6	1	1	-1
8	1	4	4	6	1	1	-3
9	1	3	5	7	1	1	2
10	1	4	5	7	1	1	-1
11	1	3	6	8	1	1	4
12	1	4	6	8	1	1	2
13	1	3	7	9	1	1	3
14	1	4	7	9	1	1	2
15	1	3	8	10	1	1	0
16	1	4	8	10	1	1	0

در این مرحله با توجه به جدول ۳-۳، کارگاه شماره ۱۱ که دارای بیشترین ارزش است انتخاب می‌شود و از آنجا که این کارگاه نیز مانند دو کارگاه قبل هیچ محدودیتی را نقض نمی‌کند انتخاب این کارگاه نیز قطعی می‌شود و پس از تغییر مقدار $T(6,1,1)$ از صفر به یک، مقادیر متناظر با بلوک‌های

این کارگاه محتمل در مدل S از صفر به یک تغییر خواهند نمود. بنابراین با انتخاب این کارگاه، مدل T بصورت شکل ۳-۲۱ و مدل S نیز بصورت شکل ۳-۲۲ می‌شود.

2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

شکل ۳-۲۱: مدل T پس از انتخاب کارگاه‌های ۴، ۱۱ و ۱۶

4	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
3	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
2	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

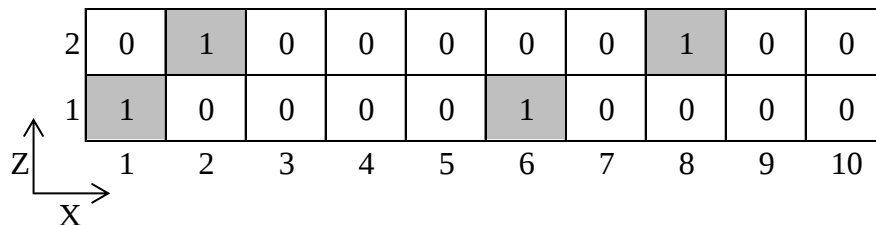
شکل ۳-۲۲: مدل S پس از انتخاب کارگاه‌های ۴، ۱۱ و ۱۶

با انتخاب کارگاه ۱۱، جدول ارزش و موقعیت کارگاه‌ها به جدول ۳-۴ تغییر خواهد کرد.

جدول ۳-۴: فهرست کارگاه‌های محتمل و ارزش هر یک از این کارگاه‌ها پس از انتخاب کارگاه ۴، ۱۱ و ۱۶

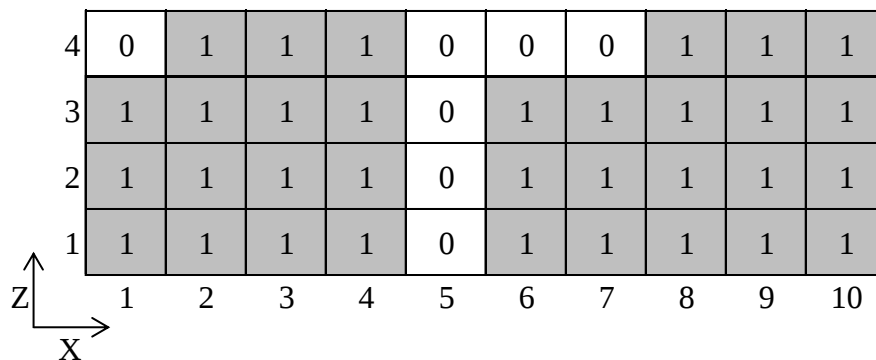
ارزش کارگاه محتمل	e_y	s_y	e_x	s_x	e_z	s_z	شماره کارگاه محتمل
3	1	1	3	1	3	1	1
2	1	1	3	1	4	1	2
0	1	1	4	2	3	1	3
0	1	1	4	2	4	1	4
-2	1	1	5	3	3	1	5
-3	1	1	5	3	4	1	6
-2	1	1	6	4	3	1	7
-4	1	1	6	4	4	1	8
-2	1	1	7	5	3	1	9
-5	1	1	7	5	4	1	10
0	1	1	8	6	3	1	11
-2	1	1	8	6	4	1	12
0	1	1	9	7	3	1	13
-1	1	1	9	7	4	1	14
0	1	1	10	8	3	1	15
0	1	1	10	8	4	1	16

با توجه به جدول شماره ۳-۴، در این مرحله کارگاه محتمل شماره ۱ که دارای ارزش ۳ است، انتخاب می‌شود که در این صورت مدل T و مدل S بصورت شکل ۳-۲۳ و ۳-۲۴ تغییر می‌یابند.



2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

شکل ۳-۲۳: مدل T پس از انتخاب کارگاه‌های ۱، ۴، ۱۱ و ۱۶



4	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
3	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

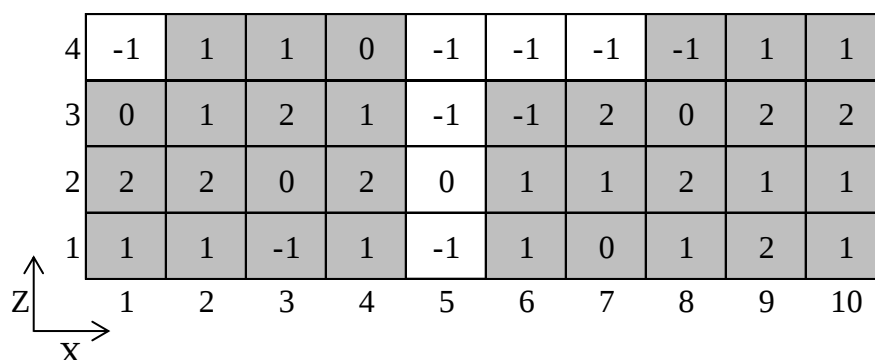
شکل ۳-۲۴: مدل S پس از انتخاب کارگاه‌های ۱، ۴، ۱۱ و ۱۶

پس از انتخاب کارگاه شماره ۱، جدول ارزش و موقعیت کارگاه‌های محتمل بصورت جدول ۳-۵ می‌شود و چون تمام کارگاه‌های درون این جدول دارای ارزش صفر و یا منفی هستند بنابراین اجرای الگوریتم متوقف خواهد شد و مدل S که در شکل ۳-۲۴ نشان داده شده است بعنوان محدوده استخراجی تعیین می‌شود.

جدول ۳-۵: فهرست کارگاه‌های محتمل و ارزش هر یک از این کارگاه‌ها پس از انتخاب کارگاه ۱، ۴، ۱۱ و ۱۶

ارزش کارگاه محتمل	e_y	S_y	e_x	S_x	e_z	S_z	شماره کارگاه محتمل
0	1	1	3	1	3	1	1
-1	1	1	3	1	4	1	2
0	1	1	4	2	3	1	3
0	1	1	4	2	4	1	4
-2	1	1	5	3	3	1	5
-3	1	1	5	3	4	1	6
-2	1	1	6	4	3	1	7
-4	1	1	6	4	4	1	8
-2	1	1	7	5	3	1	9
-5	1	1	7	5	4	1	10
0	1	1	8	6	3	1	11
-2	1	1	8	6	4	1	12
0	1	1	9	7	3	1	13
-1	1	1	9	7	4	1	14
0	1	1	10	8	3	1	15
0	1	1	10	8	4	1	16

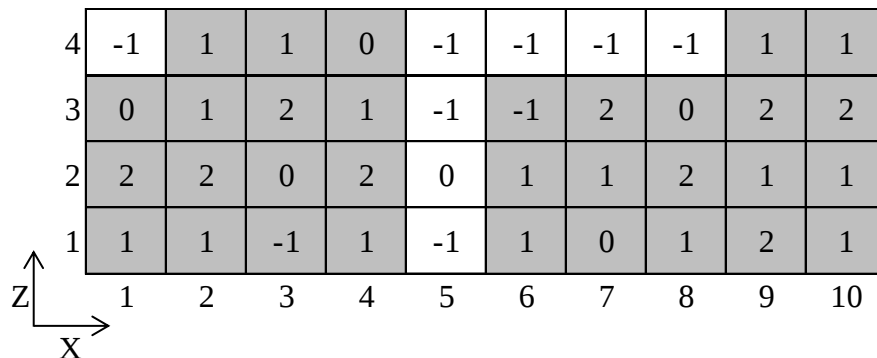
در شکل ۳-۲۵، محدوده استخراجی تعیین شده با الگوریتم SOA بر روی مدل اقتصادی بلوکی مذکور نشان داده شده است. این محدوده استخراجی دارای ۳۳ بلوک قابل استخراج و به ارزش ۳۱ واحد است.



شکل ۳-۲۵: محدوده استخراجی تعیین شده با الگوریتم SOA و به ارزش ۳۱ واحد

به منظور مقایسه نتایج الگوریتم SOA با نتایج دیگر الگوریتم‌های موجود، الگوریتم آلیس بر روی مدل اقتصادی بلوکی نشان داده شده در شکل ۳-۱۴، پیاده‌سازی و محدوده بهینه مشخص شده است

که محدوده تعیین شده بوسیله این الگوریتم دارای ۳۲ بلوک استخراجی و به ارزش ۳۲ واحد است. این محدوده در شکل ۳-۲۶ نشان داده شده است [3].



4	-1	1	1	0	-1	-1	-1	-1	1	1
3	0	1	2	1	-1	-1	2	0	2	2
2	2	2	0	2	0	1	1	2	1	1
1	1	1	-1	1	-1	1	0	1	2	1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

شکل ۳-۲۶: محدوده استخراجی تعیین شده با الگوریتم آلیس و به ارزش ۳۲ واحد [۳]

محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم SOA، با محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم آلیس در یک بلوک استخراجی متفاوت هستند و این تفاوت از این جهت است که در الگوریتم SOA، همواره محدودیت حداقل طول کارگاه استخراج (که برای این مثال برابر با ۳ بلوک فرض شده است)، در هر ردیف از مدل بلوکی رعایت می‌شود.

۳-۶- اعتبارسنجی الگوریتم

به منظور مقایسه نتایج حاصل از کاربرد الگوریتم SOA با الگوریتم‌های مشابه، محدوده بهینه استخراج بر روی یک مدل اقتصادی بلوکی دوبعدی که در شکل ۳-۲۷ نشان داده شده است، با کاربرد الگوریتم مذکور جستجو شده است.

برای این مدل اقتصادی بلوکی، بوسیله الگوریتم‌های ریدل و آلیس، محدوده بهینه استخراجی در فصل دوم محاسبه شده است که نتایج آن در ادامه آورده شده است.

5	-1	5	0	0	2	0	-1	1	0	-2
4	-2	-2	1	-1	1	1	4	8	1	0
3	1	-1	6	-1	-2	-2	2	6	1	3
2	1	3	3	-2	-1	-1	2	4	2	2
1	3	4	5	-1	-1	-4	1	2	10	1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

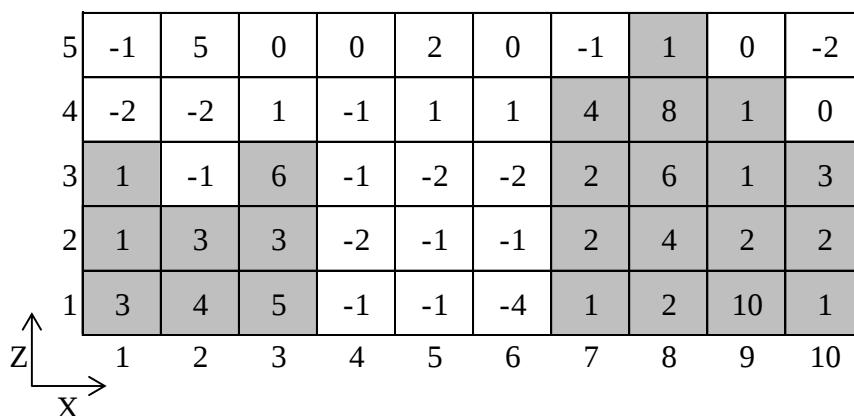
شکل ۳- ۲۷: مدل بلوکی اقتصادی دوبعدی [۶]

در این مثال، حداقل ارتفاع و طول کارگاه، دو بلوک و محدودیت هم‌ترازی در جهت Z برابر با یک بلوک در نظر گرفته می‌شود. در واقع شرایط یکسان برای کاربرد سه الگوریتم پیش‌گفته (ریدل، آلیپس و SOA) در نظر گرفته شده است.

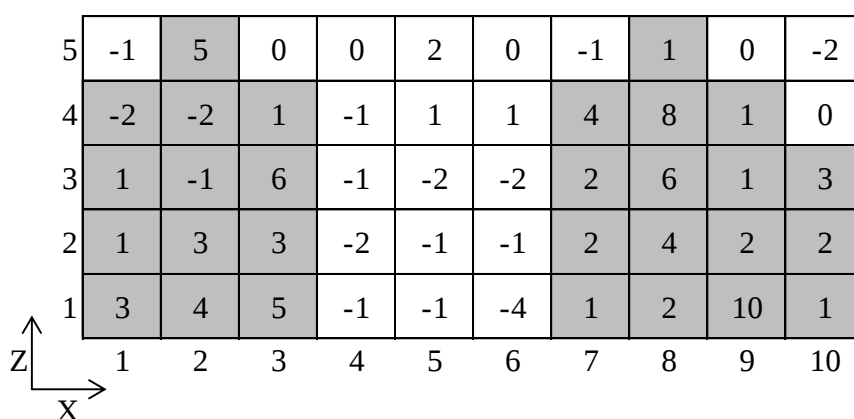
در شکل ۳-۲۸-الف، ارزش اقتصادی و محدوده بهینه استخراج با کاربرد الگوریتم ریدل مشاهده می‌شود که دارای ارزش ۷۶ است.

در شکل ۳-۲۸-ب، ارزش اقتصادی و محدوده بهینه استخراج با کاربرد الگوریتم آلیپس مشاهده می‌شود که محدوده‌ای متفاوت با محدوده تعیین شده بوسیله الگوریتم ریدل و دارای ارزش ۷۷ است.

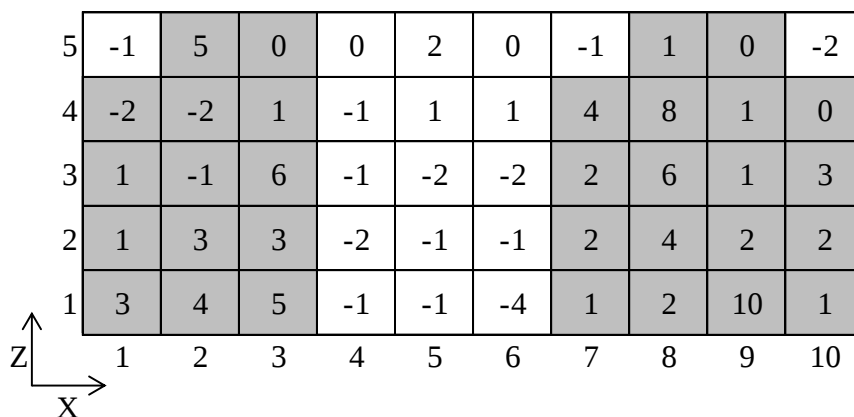
در شکل ۳-۲۸-ج، ارزش اقتصادی و محدوده بهینه استخراج با کاربرد الگوریتم مشاهده SOA می‌شود که دارای ارزش ۷۷ است و با هر دو محدوده تعیین شده بوسیله الگوریتم‌های ریدل و آلیپس تفاوت دارد.



شکل الف: محدوده بهینه استخراج با کاربرد الگوریتم ریدل و به ارزش ۷۶ واحد [6]



شکل ب: محدوده بهینه استخراج با کاربرد الگوریتم آلپیس و به ارزش ۷۷ واحد [3]



شکل ج: محدوده بهینه استخراج با کاربرد الگوریتم SOA و به ارزش ۷۷ واحد

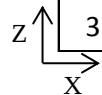
شکل ۳-۲۸: مقایسه محدوده‌های حاصل از سه الگوریتم ریدل، آلپیس و SOA

مقایسه محدوده بهینه‌های استخراج با یکدیگر نشان می‌دهد که هر سه محدوده با هم دارای تفاوت بوده و ارزش محدوده بدست‌آمده بوسیله الگوریتم SOA از ارزش محدوده بدست‌آمده بوسیله الگوریتم ریدل، یک واحد بیشتر است اما ارزش هر دو محدوده بدست‌آمده با الگوریتم‌های SOA و آلپیس،

یکسان است. لازم به ذکر است که محدودیت حداقل ابعاد کارگاه استخراج که برای این مثال برابر با ۲ بلوک فرض شده است در دو الگوریتم ریدل، آلیپس در تمام ردیف‌های مدل بلوکی در نظر گرفته نشده است اما الگوریتم SOA، این مسأله را در تمام ردیف‌های مدل بلوکی در نظر گرفته است.

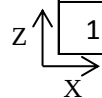
علاوه بر مقایسه الگوریتم SOA با الگوریتم‌های دو بعدی، این الگوریتم با الگوریتم توپال که ماهیت سه بعدی دارد مقایسه شده و نتایج حاصل از این اعتبارسنجی نیز موفقیت‌آمیز بوده است. در این مثال، فرض شده است که حداقل و حداکثر ابعاد کارگاه استخراج در جهت امتداد (X) بترتیب برابر با ۳ و ۴ بلوک بوده، همچنین ابعاد کارگاه‌ها در جهت ضخامت برابر با ۳ بلوک و حداقل و حداکثر ارتفاع هر کارگاه نیز ۴ و ۵ بلوک است. در شکل ۳-۲۹ تا ۳-۳۲ مقاطع قائم از مدل بلوکی اقتصادی نشان داده شده است. با کاربرد الگوریتم توپال محدوده‌ای به ارزش ۵۳ واحد مطابق شکل‌های ۳-۳۳ تا ۳-۳۶ بدست آمده است ولی با کاربرد الگوریتم SOA بر روی همین مدل بلوکی اقتصادی، محدوده‌ای به ارزش ۵۷ واحد و مطابق شکل‌های ۳-۳۷ تا ۳-۴۰ تعیین شده است.

3	2	1	0	1	1	0	-1	1	1
1	-1	0	-2	2	3	2	-2	-1	1
0	-2	1	-1	0	1	1	0	-1	0
-1	1	2	2	-1	-2	0	1	1	0
3	0	-1	0	1	0	-2	3	-1	-2



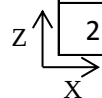
شکل ۳-۲۹: مقطع قائم از مدل بلوکی اقتصادی در $Y=1$

0	-2	-1	1	1	1	3	0	2	0
0	3	0	1	-2	0	-1	1	3	-1
0	1	2	-1	0	0	-3	1	0	-2
2	1	0	0	3	-1	-2	2	0	-1
1	-1	0	-1	2	1	1	0	2	3



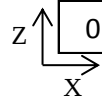
شکل ۳-۳۰: مقطع قائم از مدل بلوکی اقتصادی در $Y=2$

2	-1	1	0	0	1	2	0	-1	1
0	1	3	2	1	3	2	1	0	-3
1	3	1	-1	0	0	-1	0	-2	-1
-1	-1	-1	3	1	2	1	1	3	0
2	1	0	-1	-2	0	1	3	-1	-2



شکل ۳-۳۱: مقطع قائم از مدل بلوکی اقتصادی در $Y=3$

-3	-3	0	1	0	-1	1	0	0	-2
-1	-2	-1	2	1	2	0	1	-1	1
2	1	3	-2	0	1	-2	0	0	1
0	0	3	-1	-2	0	1	1	2	3
0	1	1	3	-1	-1	0	1	0	3



شکل ۳-۳۲: مقطع قائم از مدل بلوکی اقتصادی در $Y=4$

3	2	1	0	1	1	0	-1	1	1
1	-1	0	-2	2	3	2	-2	-1	1
0	-2	1	-1	0	1	1	0	-1	0
-1	1	2	2	-1	-2	0	1	1	0
3	0	-1	0	1	0	-2	3	-1	-2

شکل ۳-۳۳: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم توپال در $Y=1$

0	-2	-1	1	1	1	3	0	2	0
0	3	0	1	-2	0	-1	1	3	-1
0	1	2	-1	0	0	-3	1	0	-2
2	1	0	0	3	-1	-2	2	0	-1
1	-1	0	-1	2	1	1	0	2	3

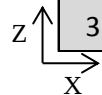
شکل ۳-۳۴: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم توپال در $Y=2$

2	-1	1	0	0	1	2	0	-1	1
0	1	3	2	1	3	2	1	0	-3
1	3	1	-1	0	0	-1	0	-2	-1
-1	-1	-1	3	1	2	1	1	3	0
2	1	0	-1	-2	0	1	3	-1	-2

شکل ۳-۳۵: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم توپال در $Y=3$

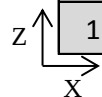
-3	-3	0	1	0	-1	1	0	0	-2
-1	-2	-1	2	1	2	0	1	-1	1
2	1	3	-2	0	1	-2	0	0	1
0	0	3	-1	-2	0	1	1	2	3
0	1	1	3	-1	-1	0	1	0	3

شکل ۳-۳۶: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم توپال در $Y=4$



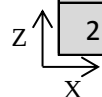
3	2	1	0	1	1	0	-1	1	1
1	-1	0	-2	2	3	2	-2	-1	1
0	-2	1	-1	0	1	1	0	-1	0
-1	1	2	2	-1	-2	0	1	1	0
3	0	-1	0	1	0	-2	3	-1	-2

شکل ۳-۳۷: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم SOA در $Y=1$



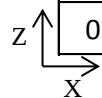
0	-2	-1	1	1	1	3	0	2	0
0	3	0	1	-2	0	-1	1	3	-1
0	1	2	-1	0	0	-3	1	0	-2
2	1	0	0	3	-1	-2	2	0	-1
1	-1	0	-1	2	1	1	0	2	3

شکل ۳-۳۸: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم SOA در $Y=2$



2	-1	1	0	0	1	2	0	-1	1
0	1	3	2	1	3	2	1	0	-3
1	3	1	-1	0	0	-1	0	-2	-1
-1	-1	-1	3	1	2	1	1	3	0
2	1	0	-1	-2	0	1	3	-1	-2

شکل ۳-۳۹: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم SOA در $Y=3$



-3	-3	0	1	0	-1	1	0	0	-2
-1	-2	-1	2	1	2	0	1	-1	1
2	1	3	-2	0	1	-2	0	0	1
0	0	3	-1	-2	0	1	1	2	3
0	1	1	3	-1	-1	0	1	0	3

شکل ۳-۴۰: مقطع قائم از محدوده تعیین شده با کاربرد الگوریتم SOA در $Y=4$

فصل چهارم:

الگوریتم بهینه‌ساز محدوده معدن کاری زیرزمینی

(MLOA)

۴-۱- مقدمه

یکی از مهمترین عوامل عدم گسترش الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده معدن کاری زیرزمینی، عدم استقبال طراحان این نوع معادن، بدلیل پیچیده بودن ساخت مدل اقتصادی محدوده معدنی آنهاست. دلیل پیچیده بودن این مدل‌های اقتصادی را می‌توان متغیر بودن ارزش بلوک‌های واقع در مدل اقتصادی بلوکی معادن زیرزمینی دانست زیرا ارزش این بلوک‌ها تابعی از تعداد، ارتفاع و جانمایی طبقات است که هر گونه تغییر در این عوامل سبب تغییر در ارزش این بلوک‌ها می‌شود. بنابراین در تدوین الگوریتم‌های بهینه‌سازی باید بتوان تأثیر همزمان تعداد، ارتفاع و جانمایی طبقات را در نظر گرفت و از ثابت فرض کردن ارزش بلوک‌ها در مدل اقتصادی بلوکی اجتناب ورزید. بهترین راه‌حل برای بهینه‌سازی محدوده معدن کاری زیرزمینی، تدوین یک الگوریتم فراگیر است که توانایی تعیین تعداد، ارتفاع و جانمایی بهینه طبقات را داشته باشد و در درون هر یک از این طبقات نیز بتواند محل بهینه کارگاه‌های استخراج را مشخص نماید. الگوریتم SOA که در فصل قبل توضیح داده شده است، یک الگوریتم جزگراست که فقط در یک طبقه استخراجی فرآیند بهینه‌سازی را انجام می‌دهد. و از آنجاکه ممکن است ابعاد مدل اقتصادی محدوده معدنی به نحوی باشد که بتوان بیش از یک طبقه را در این مدل تعیین کرد در اینصورت لازم است از یک الگوریتم فراگیر به منظور بهینه‌سازی استفاده

شود. در این فصل، الگوریتم بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری یا MLOA^۱ توضیح داده می‌شود. نقش این الگوریتم، تعیین تعداد، ارتفاع و جانمایی بهینه طبقات استخراجی در سه‌بعد است و در درون هر طبقه نیز با کاربرد الگوریتم SOA، فرآیند بهینه‌سازی انجام می‌شود. چون در الگوریتم MLOA از الگوریتم SOA استفاده شده است، بنابراین هرگونه تغییر و اصلاح الگوریتم SOA در عمل منجر به تغییر در الگوریتم MLOA می‌شود و از آنجاکه نتایج حاصل از اعتبارسنجی الگوریتم SOA موفقیت‌آمیز بوده است بنابراین الگوریتم MLOA نیز در عمل از پشتوانه قوی کارآمدی در تعیین محدوده بهینه معدن‌کاری برخوردار خواهد بود.

مبنای الگوریتم MLOA بر اساس ایجاد تغییر در تعداد، ارتفاع و جانمایی طبقات است و همانطور که ذکر شده است، هرگونه تغییر در این عوامل باعث ایجاد تغییر در ارزش بلوک‌ها می‌شود بنابراین استفاده از یک مدل بلوکی با ارزش ثابت نمی‌تواند جوابگوی نیازهای مطرح شده باشد. برای رفع این مشکل، مدل‌سازی محدوده معدن‌کاری باید به نحوی انجام شود که با هر گونه تغییر در عوامل فوق‌الذکر ارزش بلوک به بهترین طریق ممکن تغییر نماید.

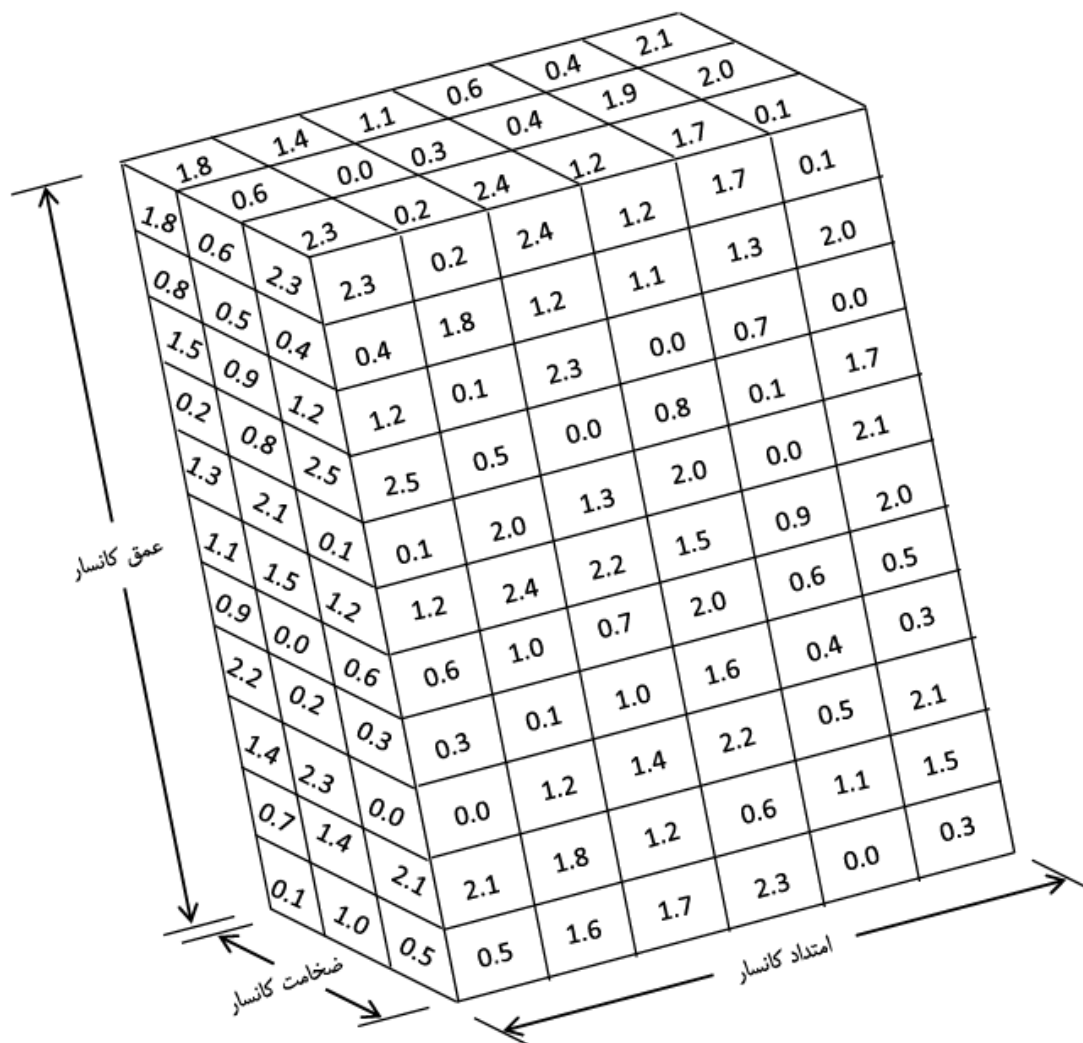
۲-۴- مدل‌سازی محدوده معدن‌کاری

در الگوریتم MLOA، به منظور تعیین مدل بلوکی اقتصادی، از یک مدل درآمدی، یک مدل هزینه‌ای و هزینه‌های مربوط به احداث فضاهای آماده‌سازی کارگاهی استفاده شده است. مدل درآمدی (IM)^۲، یک مدل بلوکی سه‌بعدی با ارزش ثابت است که ارزش هر بلوک آن نشان‌دهنده درآمد حاصل از استخراج آن بلوک است و مشابه مدل‌های درآمدی معادن روباز قابل محاسبه است. در مدل هزینه‌ای، تمام هزینه‌های استخراجی که مستقل از تعداد طبقات هستند، آورده می‌شود بنابراین این مدل، مدل

هزینه‌ای مستقل از تعداد طبقات (LNICM)^۱ نامیده می‌شود که در ادامه، هر دو مدل مذکور و نحوه محاسبه هزینه‌های آماده‌سازی کارگاهی به تفصیل شرح داده می‌شوند.

۴-۳-۱- مدل درآمدی (IM)

IM یک مدل بلوکی سه‌بعدی با ارزش ثابت است که ارزش هر یک از بلوک‌های تشکیل‌دهنده آن، نشان‌دهنده درآمد آن بلوک است. ارزش هر بلوک به عیار و تناژ بلوک موردنظر، قیمت فروش هر تن ماده معدنی، بازیابی کارخانجات ذوب، تصفیه و فرآوری وابسته است. با توجه به نحوه تعیین ارزش هر بلوک، واضح است که ارزش تمام بلوک‌های این مدل همواره نامنفی‌اند. در شکل ۴-۱، یک محدوده مدل‌سازی شده سه‌بعدی فرضی از یک مدل درآمدی نشان داده شده است. ارزش هر بلوک از این مدل درآمدی، نشان‌دهنده درآمد حاصل از استخراج و بدون در نظر گرفتن موقعیت بلوک و هزینه‌های مربوط به استخراج آن است. تعداد بلوک‌های مدل IM در جهت امتدادی (X) با I، در جهت ضخامت (Y) با J و در جهت عمق (Z) با R مشخص می‌شود. بنابراین در شکل ۴-۱، مقدار I برابر با ۶، مقدار J برابر با ۳ و مقدار R برابر با ۱۱ بلوک است. بر خلاف مدل بلوکی اقتصادی P در فصل قبل، که در آن، شماره‌گذاری بلوک‌ها در جهت Z از پایین به بالا انجام شده است در مدل‌های سه‌بعدی این فصل شماره‌گذاری از بالا به پایین انجام می‌شود. لازم به ذکر است که ارزش بلوک‌های این مدل، بر مبنای یک واحد پولی مانند ریال، دلار و یا ... است.



شکل ۴-۱: یک نمونه از مدل درآمدی

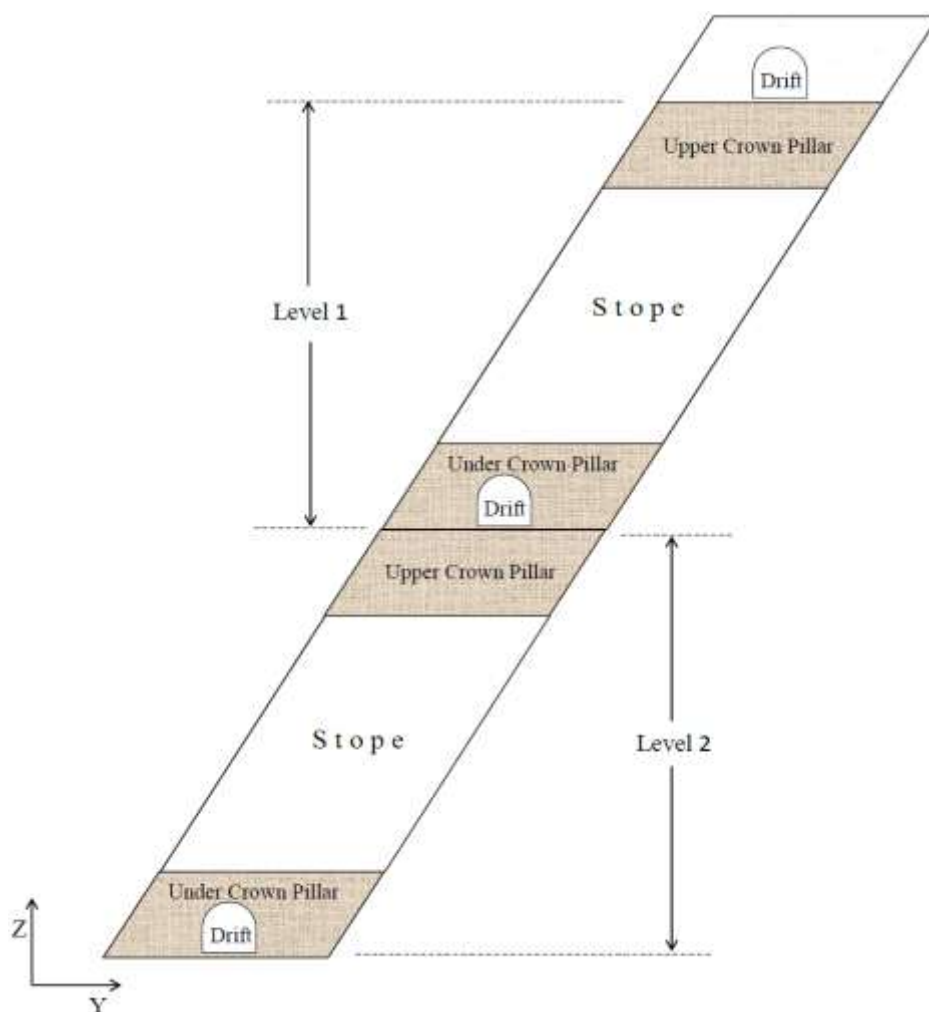
۴-۳-۲- مدل هزینه‌ای مستقل از تعداد طبقات (LNICM)

تونل‌های دنباله لایه، قیف، بونکر و زیربرش از جمله فضاهای آماده‌سازی هستند که احداث آنها، برای استخراج یک طبقه، ضروری است. تعداد این فضاهای آماده‌سازی، تابعی از تعداد طبقات است و مسلماً با افزایش تعداد طبقات، تعداد این اجزاء نیز افزایش خواهد یافت. اگر فضاهای آماده‌سازی مذکور، فضاهای آماده‌سازی کارگاهی نامیده شود، با افزایش تعداد طبقات، هزینه فضاهای آماده‌سازی کارگاهی افزایش می‌یابد. برای هر بلوک در مدل LNICM فقط هزینه‌های استخراجی که مستقل از تعداد طبقات هستند در نظر گرفته می‌شود. اگر حداقل و حداکثر ارتفاع هر طبقه استخراجی بترتیب با h و H نشان داده شود، در مدل LNICM تمام هزینه‌های استخراج یک بلوک در حالتی که فرض

شود آن بلوک در یک طبقه به ارتفاع h قرار خواهد گرفت، در نظر گرفته می‌شود؛ این هزینه‌ها، شامل تمام هزینه‌های استخراج، بجز هزینه احداث فضاهای آماده‌سازی کارگاهی می‌باشند. از جمله هزینه‌هایی که در مدل LNICM در نظر گرفته می‌شود می‌توان هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های جاری و هزینه احداث فضاهای آماده‌سازی دسته اول (چاه، رمپ و ...) را نام برد که مستقل از تعداد طبقات‌اند. بنابراین همانطور که ذکر شده است، هزینه‌های احداث فضاهای آماده‌سازی کارگاهی در این مدل در نظر گرفته نخواهد شد.

اگر یک کانسار فرضی مطابق شکل ۴-۲ از دو طبقه تشکیل شده باشد چون طبقات نزدیک به سطح زمین، در اولویت استخراج قرار دارند، در ابتدا طبقه اول استخراج می‌شود و پس از اتمام عملیات استخراج این طبقه و تکمیل احداث فضاهای آماده‌سازی طبقه دوم، استخراج طبقه دوم شروع می‌شود. در این حالت با باقی گذاشتن یک لنگه به نام لنگه تاج بالایی از تخریب تونل حمل و نقل طبقه اول جلوگیری می‌شود تا بتوان از این تونل به منظور تهویه طبقه دوم استفاده نمود. بعبارت دیگر نقش لنگه تاج بالایی، جلوگیری از تخریب تونل حمل و نقل، به منظور نگه داشتن این تونل برای تهویه طبقه پایین‌تر است. برای برخی از روش‌های استخراج مانند روش استخراج از طبقات فرعی^۱ و روش کند و آکند^۲، بدلائل ژئومکانیکی، اقتصادی و یا سایر ملاحظات، ممکن است طراحان معدن، یک تونل موازی لایه به منظور استخراج هر طبقه احداث نمایند که در این حالت، لنگه تاج بالایی در نظر گرفته نمی‌شود و به تونل‌های دنباله لایه، اجازه تخریب داده می‌شود و از تونل موازی لایه به منظور تهویه طبقه پایین‌تر استفاده خواهد شد. با توجه به توضیحات فوق، ممکن است در برخی از مواقع تونل‌های موازی لایه به منظور احداث یک طبقه احداث شود که در چنین شرایطی، این تونل‌های موازی لایه و میانبرهایی که این تونل‌ها را به تونل‌های دنباله لایه وصل می‌نمایند نیز باید بعنوان فضاهای آماده‌سازی کارگاهی، در نظر گرفته شوند و هزینه‌های مربوط به احداث آنها در محاسبات اقتصادی تأثیر داده شود.

1-Sublevel Stopping
2-Cut and Fill



شکل ۴-۲: نمای قایم از یک کانسار فرضی متشکل از دو طبقه استخراجی

در شکل ۳-۴ یک مدل LNICM از یک کانسار فرضی و با ابعاد مشابه ابعاد مدل IM شکل ۱-۴ نشان داده شده است (واضح است که ابعاد دو مدل نامبرده همواره باید یکسان باشند). اگر فرض شود که از مدل‌های شکل ۱-۴ و ۳-۴ به منظور طراحی طبقات با حداقل ارتفاع ۴ بلوک استفاده شود ($h=4$), در اینصورت هزینه استخراج هر بلوک، با فرض قرارگیری آن، در یک طبقه به ارتفاع ۴ تعیین شده است و در مدل شکل ۳-۴ نشان داده شده است. هزینه بلوک‌های این مدل، بر مبنای یک واحد پولی مانند ریال، دلار و یا ... است.

هم برای حمل و نقل بکار می‌روند. به عنوان مثال اگر یک محدوده معدن‌کاری شامل ۳ طبقه استخراجی باشد در این صورت این محدوده معدن‌کاری شامل ۴ تونل دنبال‌لایه است که ۱ تونل فقط به منظور تهویه، ۱ تونل فقط به منظور حمل و نقل و ۲ تونل، هم برای تهویه و هم برای حمل و نقل احداث می‌شوند.

اگر ابعاد بلوک‌ها در جهت X با x_d نمایش داده شود، در این صورت طول هر تونل دنبال‌لایه و موازی‌لایه برابر با $I \times x_d$ است. همچنین اگر هزینه احداث هر متر تونل دنبال‌لایه و موازی‌لایه به ترتیب C_{ld} و C_d باشد، هزینه احداث فضاهای آماده‌سازی کارگاهی که با LDC^۱ نشان داده می‌شود بوسیله روابط ۴-۱ و ۴-۲ بدست می‌آید.

در صورت وجود تونل موازی‌لایه:

$$LDC = \left(\frac{N+1}{N} \times I \times x_d \times C_d \right) + (C_{uc}) + (n_{db} \times C_{db}) + (n_{ch} \times C_{ch}) + (I \times x_d \times C_{ld}) + (C_{cc}) + (m \times I \times x_d \times C_{sl}) \quad (۱-۴)$$

در صورت عدم وجود تونل موازی‌لایه:

$$LDC = \left(\frac{N+1}{N} \times I \times x_d \times C_d \right) + (C_{uc}) + (n_{db} \times C_{db}) + (n_{ch} \times C_{ch}) + (m \times I \times x_d \times C_{sl}) \quad (۲-۴)$$

که در این روابط، C_{uc} هزینه احداث زیربرش، C_{db} هزینه احداث هر قیف، C_{ch} هزینه احداث هر بونکر، C_{cc} هزینه احداث میانبرها، n_{db} تعداد قیف‌های هر طبقه، n_{ch} تعداد بونکرهای هر طبقه، N تعداد طبقات محتمل هر محدوده محتمل، m تعداد تونل‌های طبقات فرعی در هر طبقه و C_{sl} هزینه هر متر حفاری تونل طبقات فرعی است، سایر پارامترهای این روابط نیز قبلاً معرفی شده‌اند.

اگر حداقل ضخامت لنگه تاج بالایی و لنگه تاج پایینی به ترتیب با W_p و W_n نشان داده شود و مقدار هر دو پارامتر در مثال مذکور برابر با ۱ بلوک فرض شود و حداکثر ارتفاع طبقات نیز برای این مثال،

برابر با ۶ بلوک باشد، تمام حالات ممکن برای جانمایی طبقات محتمل^۱ در ادامه نشان داده شده است.

قبل از توضیح طبقه محتمل و جانمایی این طبقات برای مثال بالا، نحوه تعیین حداکثر تعداد طبقات ممکن برای یک کانسار نشان داده شده است.

۴-۴- حداکثر تعداد طبقات^۲

برای یک کانسار که دارای R بلوک در جهت Z است و حداقل و حداکثر ارتفاع طبقات، به ترتیب h و H بلوک باشد، حداکثر تعداد طبقات که با N_m نشان داده می‌شود، بوسیله رابطه ۳-۴ قابل محاسبه است.

$$N_m = \begin{cases} 0 & h > R \\ 1 & \frac{R - W_n}{2} < h \leq R \\ \left[\frac{R - W_n}{h} \right] & h \leq \frac{R - W_n}{2} \end{cases} \quad (3-4)$$

منظور از علامت [] در رابطه ۳-۴، تابع جزء صحیح است.

چون در مثال قبل، مقدار R برابر با ۱۱ بلوک، h برابر با ۴ بلوک و W_n نیز برابر با ۱ بلوک است بنابراین طبق رابطه ۳-۴ حداکثر تعداد طبقات برابر با ۲ طبقه است.

$$N_m = \left[\frac{11-1}{4} \right] = [2.5] = 2$$

اگر مقدار h از ۴ بلوک به ۳ بلوک تغییر نماید در این صورت حداکثر تعداد طبقات محتمل برای مثال مذکور از ۲ طبقه به ۳ طبقه تغییر خواهد نمود.

1-Probable Level

2-Maximum Number of Level

$$N_m = \left\lceil \frac{11-1}{3} \right\rceil = [3.33] = 3$$

همچنین اگر مقدار h برابر با ۶ بلوک باشد در این صورت حداکثر تعداد طبقات برای این مثال برابر با ۱ طبقه است.

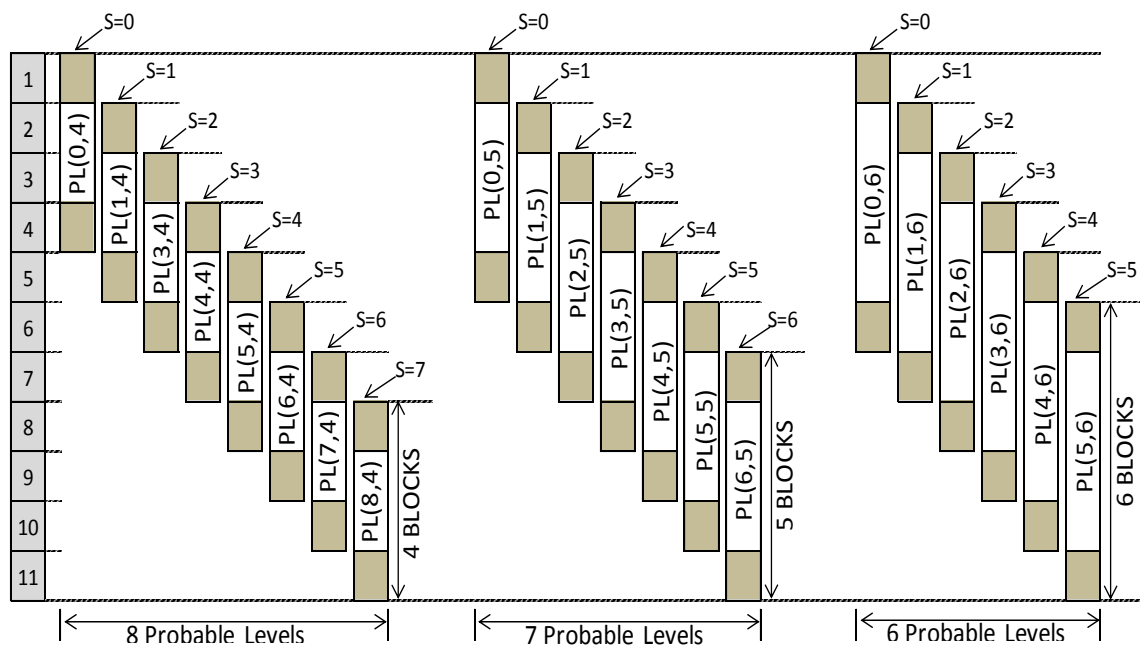
جلالی در الگوریتم گوما از مفهوم طبقه محتمل به منظور تعیین حالات مختلف جانمایی طبقات استخراجی استفاده نموده است، در الگوریتم MLOA نیز از همین مفهوم استفاده می‌شود که در ادامه شرح داده خواهد شد. لازم به یادآوری است که الگوریتم گوما یک الگوریتم دوبعدی است که بر روی یک مدل اقتصادی بلوکی با ارزش متغیر به نام VVEM اجرا می‌شود و با تعیین تعداد و جانمایی موقعیت طبقات محتمل، بوسیله الگوریتم آلیپس در هر طبقه عمل بهینه‌سازی را انجام می‌دهد [3].

۴-۵- طبقه محتمل

در هر محدوده مدل‌سازی شده می‌توان مجموعه‌ای از حالات مختلف جانمایی طبقات با ارتفاع‌های مختلف که معرف تمام حالات محتمل برای جانمایی طبقات باشد را تعریف کرد. هر یک از اعضای این مجموعه یک طبقه محتمل نامیده می‌شود.

در شکل ۴-۵ تمام طبقات محتمل در یک محدوده مدل‌سازی شده که دارای ۱۱ بلوک در جهت Z است ($R=11$)، در شرایطی که حداقل ارتفاع طبقه و حداکثر ارتفاع آن به ترتیب ۴ و ۶ بلوک باشد، نشان داده شده است.

موقعیت و ارتفاع هر طبقه محتمل بوسیله زوج مرتب $PL(S, h')$ نشان داده می‌شود که در این زوج مرتب، اندیس S معرف نقطه شروع و یا جانمایی طبقه محتمل و h' معرف ارتفاع هر طبقه است.



شکل ۴-۴: تعداد و جانمایی طبقات محتمل

۴-۶- محدوده معدن کاری محتمل^۱

از کنار هم قرار گرفتن یک یا چند طبقه محتمل و در صورت عدم همپوشانی این طبقات، محدوده‌های معدن کاری محتمل تشکیل می‌شود.

موقعیت‌های مختلف قرارگیری محدوده‌های معدن کاری برای طبقات محتمل نشان داده شده در شکل ۴-۴ در شکل ۴-۵ به تصویر کشیده شده است.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1																	
2	PL(0,4)																
3		PL(0,4)															
4			PL(0,4)														
5				PL(0,4)													
6					PL(0,4)												
7						PL(4,5)											
8							PL(5,5)										
9								PL(6,5)									
10									PL(4,6)								
11										PL(5,6)							
12											PL(1,4)						
13												PL(1,4)					
14													PL(1,4)				
15														PL(1,4)			
16															PL(1,4)		
17																PL(1,4)	
18																	PL(2,4)
19																	
20																	
21																	
22																	
23																	
24																	
25																	
26																	
27																	
28																	
29																	
30																	
31																	
32																	
33																	
34																	
35																	
36																	
37																	
38																	
39																	
40																	
41																	
42																	
43																	
44																	
45																	
46																	
47																	
48																	
49																	
50																	
51																	
52																	
53																	
54																	

شکل ۴-۵: تعداد و جانمایی طبقات محتمل

واضح است که هر محدوده محتمل از یک یا چند طبقه محتمل تشکیل می‌شود که حداکثر تعداد طبقات محتمل در درون یک محدوده محتمل، برابر با N_m است که در رابطه ۴-۳ روش محاسبه آن ذکر شده است.

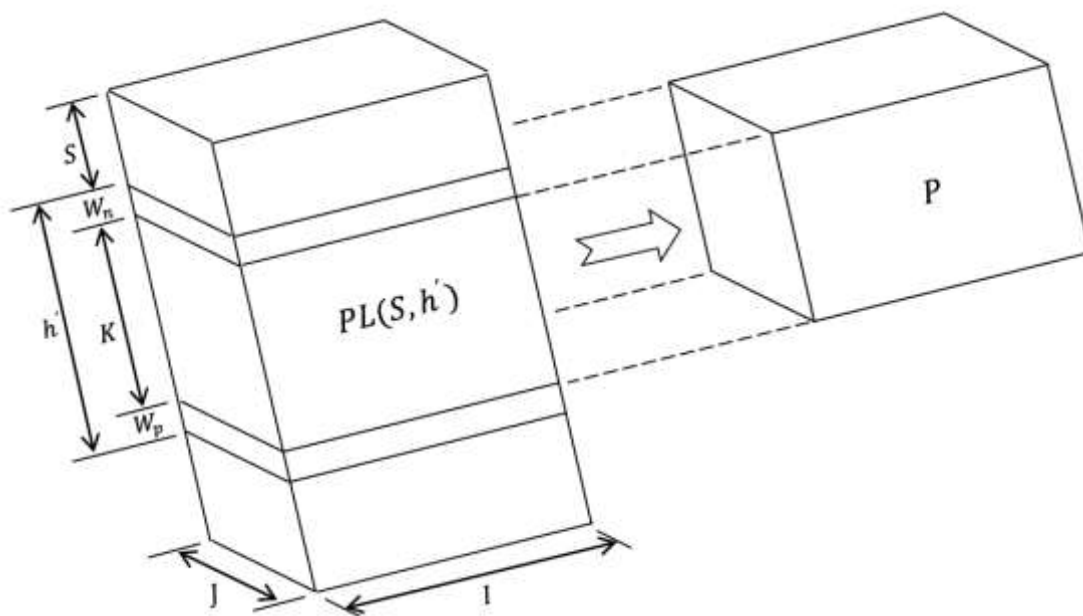
پس از تعیین حداکثر تعداد طبقات و چگونگی جانمایی طبقات محتمل، در درون هر یک از این طبقات، با کاربرد الگوریتم SOA فرآیند بهینه‌سازی انجام می‌شود و با جمع نمودن ارزش تمام محدوده‌های بدست آمده حاصل از هر طبقه محتمل، ارزش هر محدوده معدن کاری محتمل مشخص می‌شود و در نهایت با مقایسه ارزش تمام محدوده‌های معدن کاری محتمل با یکدیگر، محدوده محتمل با بیشترین ارزش از بین آنها انتخاب خواهد شد و به عنوان محدود بهینه نهایی و خروجی الگوریتم MLOA معرفی می‌شود.

۴-۷- مدل بلوکی اقتصادی^۱

همانطور که ذکر شده، در الگوریتم MLOA با کاربرد الگوریتم SOA در درون هر طبقه محتمل فرآیند بهینه‌سازی انجام می‌شود و همانطور که در فصل قبل توضیح داده شده است، الگوریتم SOA بر روی یک مدل اقتصادی بلوکی سه‌بعدی به نام P اجرا می‌شود. یکی از مهمترین مراحل الگوریتم MLOA پس از تعیین طبقات و محدوده‌های محتمل، نحوه تعیین مدل بلوکی اقتصادی P خواهد بود تا الگوریتم SOA با استفاده از این مدل و دیگر پارامترهای فنی که قبلاً توضیح داده شده است، محدوده بهینه معدن کاری را مشخص نماید. در واقع الگوریتم SOA، یک الگوریتم جزگرا است که در درون هر طبقه استخراجی و با در نظر گرفتن یک سری محدودیت‌های خاص (محدودیت‌های فنی)، تعداد، ابعاد و موقعیت کارگاه‌های استخراج را مشخص می‌نماید ولی الگوریتم MLOA، یک الگوریتم فراگیر است که با در نظر گرفتن پارامترهای اقتصادی؛ تعداد، ارتفاع و محل طبقات استخراجی را مشخص می‌کند.

۴-۷-۱- موقعیت مدل بلوکی اقتصادی

در الگوریتم MLOA، با کاربرد مدل درآمدی، مدل LNICM و دیگر پارامترهای اقتصادی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، مدل بلوکی اقتصادی P برای هر طبقه محتمل تعیین می‌شود. در شکل ۴-۶ موقعیت مدل P در درون یک طبقه محتمل نشان داده شده است. همانطور که در شکل نیز نشان داده شده است تعداد بلوک‌های مدل P در جهت Z که با K نشان داده می‌شود برابر با $h' - (W_p + W_n)$ است که منظور از h' در این رابطه، ارتفاع طبقه محتمل می‌باشد.



شکل ۴-۶: موقعیت مدل P در درون هر طبقه محتمل

در فصل سوم به منظور تعیین موقعیت هر کارگاه محتمل در درون مدل P، از مفهوم حد پایین و حد بالا استفاده شده است که در این بخش نیز از همین مفهوم برای تعیین حدود بالا و پایین مدل P در درون هر طبقه محتمل استفاده می‌شود. از آنجاکه هر طبقه محتمل با زوج مرتب $PL(S, h')$ نشان داده می‌شود اگر حدود پایین مدل P در سه جهت X، Y و Z بترتیب با LS_x ، LS_y و LS_z و حدود بالای آن در سه جهت مذکور نیز بترتیب با LE_x ، LE_y و LE_z نشان داده شود، مقدار LS_x و LS_y همواره برابر با

یک است و مقادیر LE_x و LE_y بترتیب برابر با I و J است و مقادیر LS_z و LE_z از رابطه ۴-۴ تعیین می‌شود.

$$\begin{cases} LS_z = S + W_n + 1 \\ LE_z = S + h' - W_p \end{cases} \quad (4-4)$$

همچنین تعداد بلوک‌های مدل P در جهت Z که با K نشان داده می‌شود با کاربرد رابطه ۴-۵ قابل تعیین است.

$$K = LE_z - LS_z + 1 = h' - W_p - W_n \quad (5-4)$$

۴-۷-۲- ارزش گذاری مدل بلوکی اقتصادی

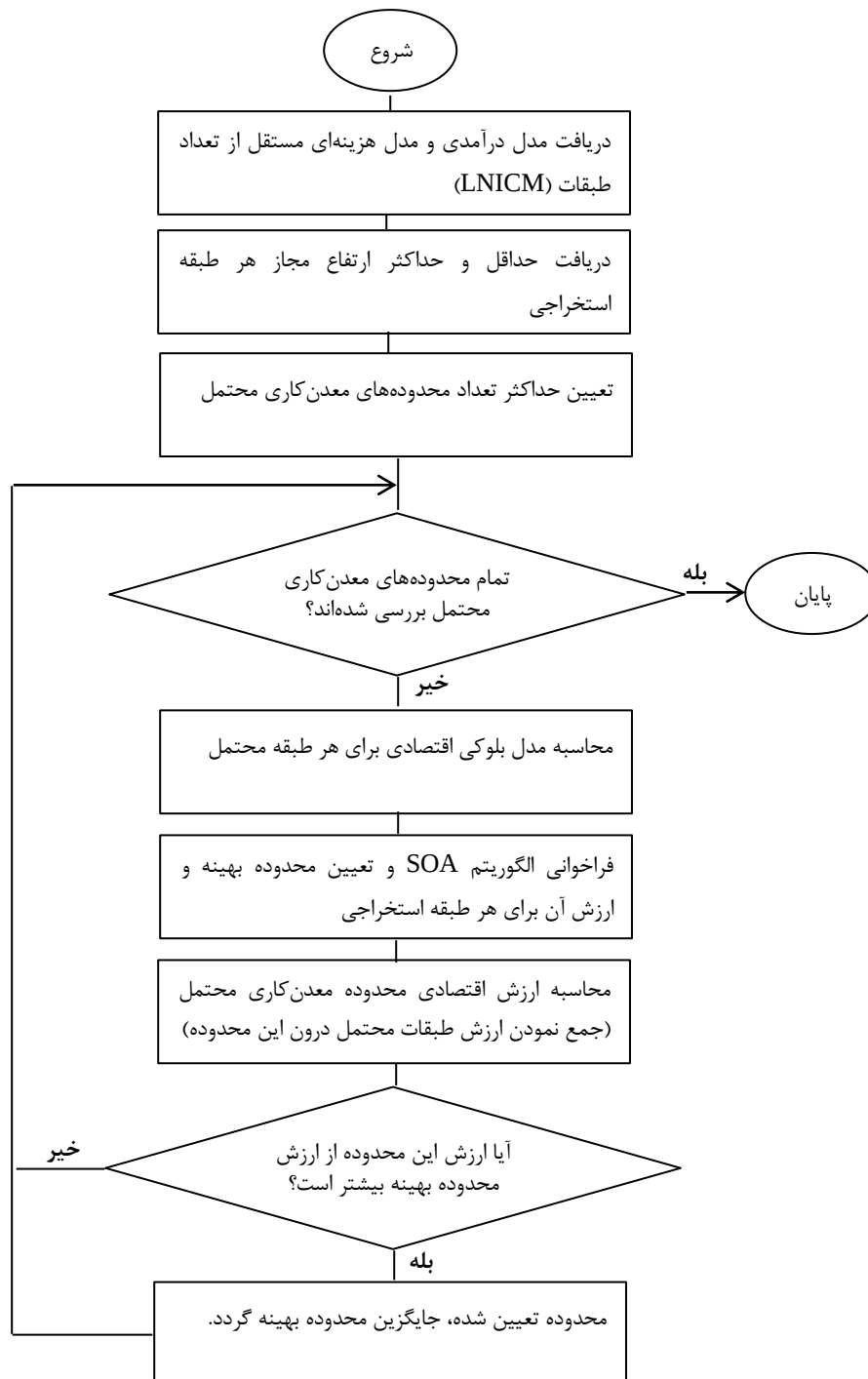
همانطور که تا کنون توضیح داده شده است مدل P یک مدل سه‌بعدی و دارای $I \times J \times K$ بلوک است که پس از تعیین هر طبقه محتمل و تعیین حدود بالا و پایین آن بدست می‌آید. اگر هر بلوک از مدل P در سه جهت X ، Y و Z بترتیب با متغیرهای i ، j و k نشان داده شود در اینصورت ارزش این بلوک که با $BEV_{(i,j,k)}$ نشان داده می‌شود بوسیله رابطه ۴-۶ محاسبه می‌شود.

$$BEV_{(i,j,k)} = IM_{(i,j,k)} + LNICM_{(i,j,k)} + \left(\frac{LDC}{I \times J \times K} \right) + ((h' - h) \times LHC) \quad (6-4)$$

در این رابطه h' ارتفاع طبقه محتمل، h حداقل ارتفاع هر طبقه محتمل و LHC هزینه‌ای است که با بیشتر شدن ارتفاع یک طبقه محتمل از حداقل ارتفاع، باید از ارزش هر بلوک کم شود؛ در واقع به ازای هر واحد اختلاف h' و h به میزان LHC ، هزینه هر بلوک افزایش خواهد یافت. بعبارت دیگر چون در مدل $LNICM$ فقط هزینه قرارگیری بلوک در یک طبقه با حداقل ارتفاع، در نظر گرفته می‌شود و در حالت کلی با افزایش ارتفاع یک طبقه، هزینه استخراج (منظور از هزینه‌های استخراج، هزینه‌های

غیر از هزینه‌های آماده‌سازی کارگاهی است) آن افزایش می‌یابد بنابراین باید متناسب با افزایش هر واحد ارتفاع طبقه، به میزان مشخص شده (LHC) به هزینه استخراج هر بلوک اضافه گردد.

در شکل ۷-۴ روندنمای الگوریتم MLOA نشان داده شده است.



شکل ۷-۴: روندنمای الگوریتم MLOA

۴-۸- ویژگی‌های الگوریتم MLOA

الگوریتم MLOA یک الگوریتم سه‌بعدی است که پس از تعیین طبقات و محدوده‌های محتمل، در درون هر طبقه محتمل، یک مدل بلوکی اقتصادی سه‌بعدی بر اساس پارامترهای اقتصادی خواهد ساخت و سپس با کاربرد الگوریتم SOA در درون هر طبقه محتمل؛ تعداد، ابعاد و موقعیت کارگاه‌های استخراج را مشخص می‌نماید. پس از تعیین تعداد، ارتفاع و موقعیت هر طبقه محتمل در درون هر محدوده معدن کاری محتمل و تعیین تعداد، ابعاد و موقعیت کارگاه‌های استخراج در درون هر طبقه محتمل، مجموع ارزش محدوده‌های بدست‌آمده از هر طبقه محتمل محاسبه می‌شود و بعنوان ارزش هر محدوده معدن کاری محتمل معرفی خواهد شد و در نهایت با مقایسه ارزش تمام محدوده‌های معدن کاری محتمل با یکدیگر، با ارزش‌ترین محدوده انتخاب می‌شود و بعنوان محدوده بهینه نهایی معرفی خواهد شد. از بین الگوریتم‌هایی که تاکنون برای بهینه‌سازی محدوده معدن کاری ارایه شده‌اند بجز الگوریتم گوما، سایر الگوریتم‌های موجود بر روی مدل‌های بلوکی اقتصادی با ارزش ثابت اجرا می‌شوند. در مدل بلوکی اقتصادی که الگوریتم MLOA برای هر طبقه محتمل در نظر می‌گیرد، ارزش هر بلوک با توجه به تعداد، ارتفاع و جانمایی طبقات قابل تغییر است و این باعث خواهد شد، عملیات بهینه‌سازی بر روی یک مدل بلوکی اقتصادی که توانایی در نظر گرفتن مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر یک معدن زیرزمینی را دارا است اجرا شود که در نهایت این مسأله کمک زیادی به طراحی بهینه معدن می‌نماید. از آنجاکه الگوریتم MLOA، الف- تمام حالات ممکن برای جانمایی طبقات استخراجی و محدوده‌های معدن کاری را در نظر می‌گیرد، ب- از یک مدل بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر استفاده می‌نماید، ج- در درون هر طبقه نیز با کاربرد الگوریتم SOA، تعداد، ابعاد و موقعیت کارگاه‌های استخراج را مشخص می‌نماید و نتایج حاصل از اعتبارسنجی الگوریتم SOA نیز موفقیت‌آمیز بوده است بنابراین این الگوریتم از پشتوانه قوی کارآمدی در تعیین محدوده بهینه معدن برخوردار است.

فصل پنجم:

برنامه کامپیوتری بهینه سازی محدوده معدن کاری زیرزمینی

۵-۱- مقدمه

تاکنون نرم افزارها و برنامه های کامپیوتری زیادی در زمینه ی بهینه سازی محدوده معدن کاری روباز ارایه شده است اما بدلیل عدم وجود الگوریتم های مناسب و فراگیر در زمینه ی بهینه سازی محدوده معدن کاری زیرزمینی، تعداد این نرم افزارها و برنامه ها در مقایسه با نرم افزارها و برنامه های بهینه سازی روباز بسیار کمتر بوده است [3].

اولین بار در سال ۱۹۷۷ ریدل بر اساس الگوریتمی که ارایه داده، یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن تدوین کرده است. این برنامه قدیمی ترین برنامه کامپیوتری است که برای بهینه سازی محدوده استخراج در یک طبقه تدوین شده و بر روی چند مدل اقتصادی دو بعدی فرضی اجرا شده است [6].

نرم افزار دیتاماین مهمترین و پرکاربردترین نرم افزاری است که برای بهینه سازی محدوده معدن کاری استفاده می شود. این نرم افزار بر اساس الگوریتم کارگاه شناور توسط شرکت نرم افزاری دیتاماین طراحی شده است و قابلیت تجاری پیدا کرده است [13].

برنامه کامپیوتری غیرتجاری SLO نیز بر اساس الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی برای بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری زیرزمینی ارایه شده است اما گزارشی از کاربرد این الگوریتم بر روی مدل‌های واقعی ارایه نشده است [16].

بر مبنای الگوریتم اُلیپس، یک برنامه کامپیوتری به نام SBO¹ توسط جلالی و همکاران در سال ۱۳۸۵ طراحی و تدوین شده است و نتایج حاصل از اعتبارسنجی آن بر روی مدل‌های فرضی موفقیت‌آمیز بوده است [12].

جلالی پس از تدوین الگوریتم فراگیر گوما، بر مبنای این الگوریتم، برنامه کامپیوتری GOUMA-CP را تدوین کرده است که بر روی مدل‌های بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر (VVEM) اجرا می‌شود. ویژگی‌های خاص و کارآمد الگوریتم گوما باعث می‌شود که این برنامه کامپیوتری از پشتوانه قوی در تعیین محدوده بهینه معدن‌کاری زیرزمینی برخوردار باشد [3].

توپال نیز بر مبنای الگوریتمی که ارایه داده است یک برنامه در محیط نرم‌افزار MATLAB تدوین کرده است که بوسیله این برنامه می‌توان کارگاه‌های استخراج با ابعاد یکسان و یا متفاوت را طراحی نمود [2].

در این تحقیق نیز بر مبنای الگوریتم MLOA، یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار MATLAB² ارایه شده است. این برنامه کامپیوتری، پس از دریافت اطلاعات مربوط به مدل‌های درآمدی، هزینه‌ای و دیگر عوامل فنی و اقتصادی، محدوده بهینه را تعیین و بصورت یک تصویر سه بعدی نمایش خواهد داد.

1-Stope Boundary Optimiser
2-MATrix LABoratory

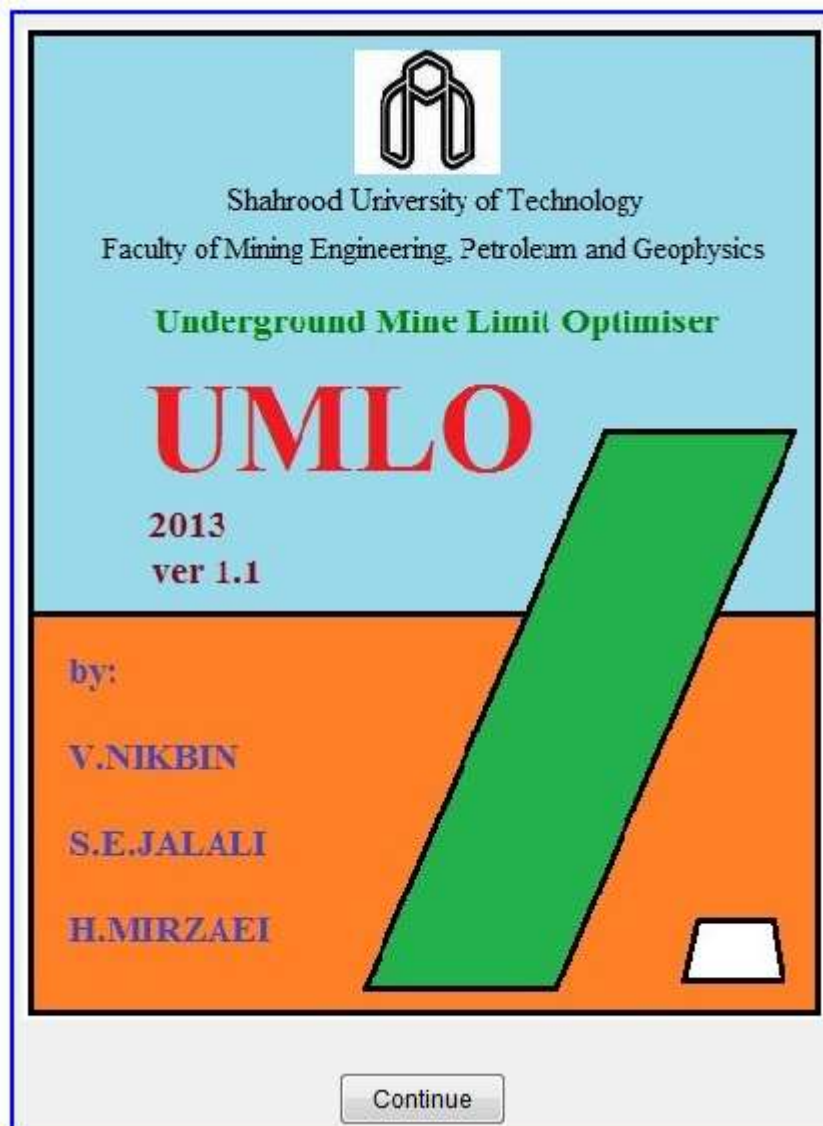
۵-۲- معرفی برنامه کامپیوتری UMLO^۱

برنامه کامپیوتری UMLO بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری زیرزمینی تدوین شده است. این برنامه پس از ساخت مدل بلوکی اقتصادی با ارزش متغیر برای هر طبقه محتمل در درون تمام محدوده‌های محتمل، محدوده بهینه معدن‌کاری و ارزش متناظر با آن را به منظور دستیابی به سود بیشینه جستجو و تعیین می‌نماید.

برنامه کامپیوتری UMLO در محیط نرم‌افزار MATLAB و با استفاده از رابط‌های گرافیکی کاربر^۲ (GUI) تدوین شده است و با نام UMLO.EXE، در صورت نصب بودن کامپایلر آن بر روی کامپیوتر، تحت Windows اجرا می‌شود. UMLO بر روی کامپیوترهای شخصی (PC) معمولی قابل اجراست.

پس از اجرای برنامه، پنجره شناسنامه آن که در شکل ۵-۱ نشان داده شده است، بر روی صفحه نمایش دیده خواهد شد. در این پنجره، مشخصات برنامه از جمله نام برنامه، تاریخ تدوین، شماره ویرایش و اسامی پدیدآورندگان آن درج شده است. پس از نمایش این پنجره و انتخاب گزینه‌ی Continue، برنامه وارد بخش‌های بعدی می‌شود.

1-Underground Mine Limit Optimiser
2-Graphical User Interfaces



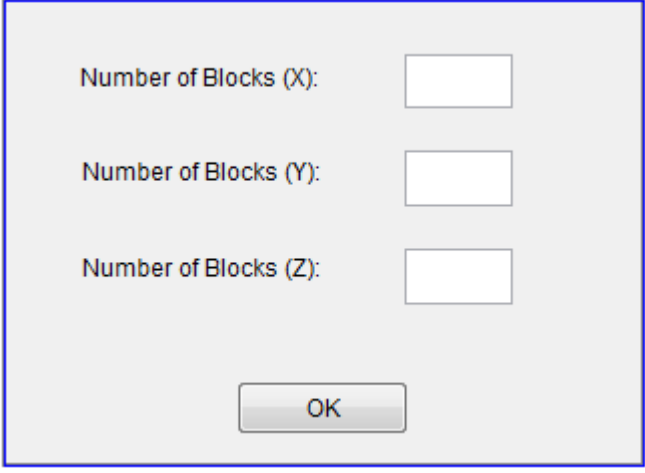
شکل ۵- ۱: شناسنامه برنامه کامپیوتری UMLO

۵-۳- ورودی‌های برنامه کامپیوتری UMLO

برنامه کامپیوتری UMLO پس از اجرا، مجموعه‌ای از اطلاعات فنی، هندسی و اقتصادی معدن کاری را دریافت و بر اساس این اطلاعات، محدوده بهینه معدن کاری را مشخص می‌نماید.

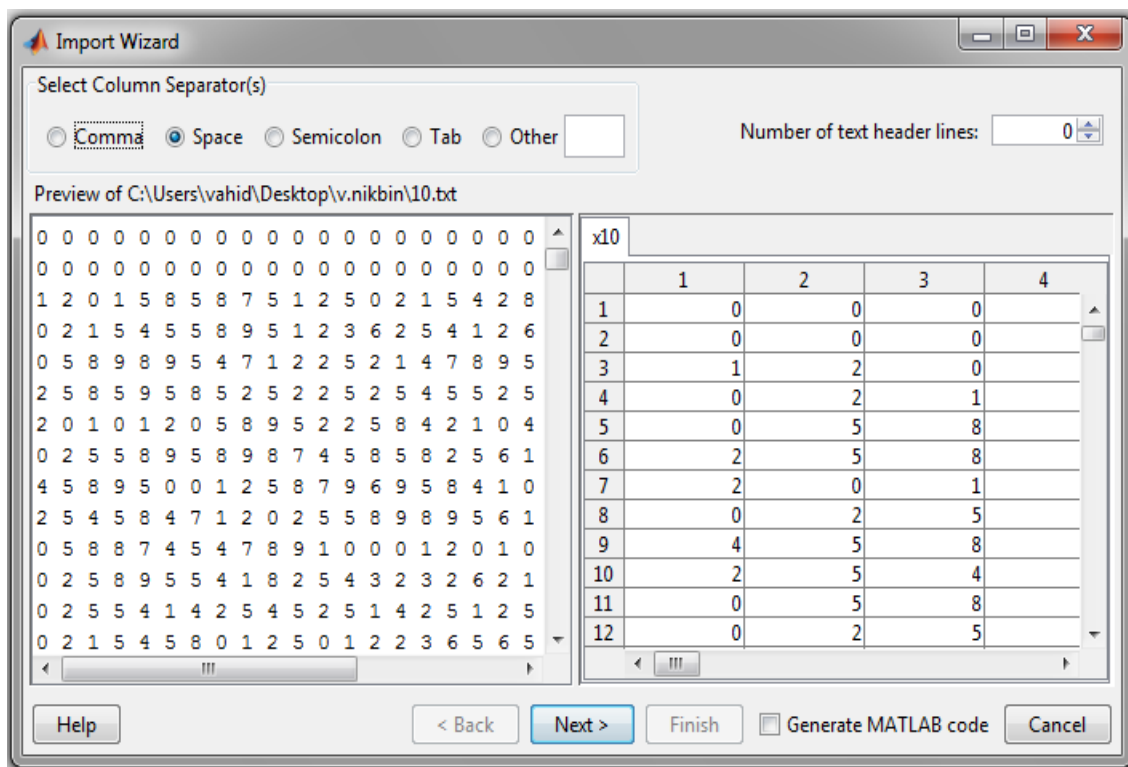
داده‌های ورودی برنامه به دو گروه تقسیم می‌شوند. در گروه اول، اطلاعاتی که بصورت یک فایل از پیش‌ساخته شده‌ی txt هستند به برنامه معرفی می‌شوند اما گروه دوم شامل اطلاعاتی است که کاربر در حین اجرای برنامه وارد می‌نماید.

پس از اجرای برنامه و نمایش پنجره شناسنامه برنامه و انتخاب گزینه‌ی Continue، در اولین مرحله، یک منو به نام Model Geometry فعال می‌شود که پس از انتخاب گزینه‌ی مربوط به این منو، یک پنجره نمایش داده می‌شود که در آن، تعداد بلوک‌های مدل درآمدی (IM) و مدل هزینه‌ای LNICM در سه جهت X، Y و Z توسط کاربر به برنامه معرفی می‌شود. در شکل ۵-۲ صفحه مربوط به Model Geometry نمایش داده شده است.



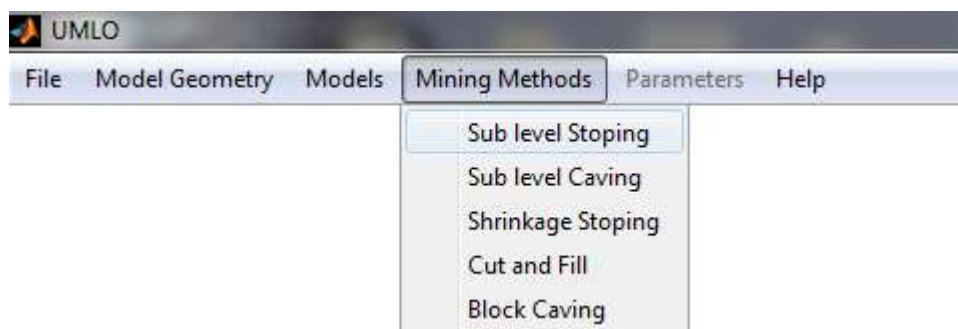
شکل ۵-۲: پنجره مربوط به Model Geometry

پس از ورود تعداد بلوک‌ها در سه جهت X، Y و Z، یک منوی دیگر از برنامه به نام Models فعال می‌شود که پس از انتخاب گزینه‌ی مربوط به این منو، آدرس فایل‌های مربوط به مدل IM و مدل LNICM که از نوع txt هستند توسط کاربر دریافت خواهد شد و به برنامه معرفی می‌شود. در شکل ۵-۳ نمونه‌ای از یک فایل ورودی و از نوع txt نشان داده شده است.



شکل ۵-۳: نمونه‌ای از یک فایل ورودی از نوع txt

در مرحله بعد، منوی Mining Methods فعال می‌شود که از طریق این منو، روش استخراج توسط کاربر به برنامه معرفی می‌شود. چون روش‌های استخراج مختلف دارای محدودیت‌های مختلف هستند و ممکن است بعضی از محدودیت‌ها برای بعضی از روش‌های استخراج دارای اهمیت چندانی نباشند، بنابراین در مراحل بعد، گزینه‌ی مربوط به این محدودیت‌ها غیرفعال شده و مقدار پیش‌فرضی برای آن محدودیت به برنامه معرفی خواهد شد. در شکل ۵-۴ منوی مربوط به Mining Methods و زیرمنوهای آن که شامل پنج روش از روش‌های استخراج قایم هستند، نشان داده شده است.



شکل ۵-۴: منوی مربوط به Mining Methods

پس از دریافت روش استخراج، منوی دیگری به نام Parameters نمایش داده می‌شود که دارای سه زیرمنو برای درج عوامل فنی (Technical Parameters)، عوامل اقتصادی (Economic Parameters) و عوامل هندسی (Geomertic Parameters) است. این منو و زیرمنوهای مربوط به آن در شکل ۵-۵ نشان داده شده است.



شکل ۵-۵: منوی مربوط به Parameters

در این منو، اولین زیرمنویی که فعال خواهد شد، منوی Technical Parameters است. از طریق این زیرمنو، اطلاعات مربوط به پارامترهای فنی از کاربر دریافت خواهد شد. پنجره مربوط به پارامترهای فنی در شکل ۵-۶ نشان داده شده است. پس از وارد نمودن اطلاعات فنی و تأیید آنها توسط کاربر، زیرمنوی دیگری به نام Economic Parameters فعال شده و از طریق پنجره مربوط به آن، اطلاعات اقتصادی از کاربر دریافت می‌شود این پنجره در شکل ۵-۷ نشان داده شده است. در نهایت نیز با فعال شدن زیرمنوی Geomertic Parameters، اطلاعات هندسی مدل بلوکی و معدن، مانند ابعاد بلوک‌ها در سه جهت X، Y و Z و همچنین مشخصات مربوط به تونل‌های امتداد لایه از کاربر دریافت می‌شود. پنجره مربوط به این زیرمنو نیز در شکل ۵-۸ نشان داده شده است.

Minimum Level Height (in Blocks):	
Maximum Level Height (in Blocks):	
Minimum Stope Dimension (X), (in Blocks):	
Maximum Stope Dimension (X), (in Blocks):	
Minimum Stope Dimension (Y), (in Blocks):	
Maximum Stope Dimension (Y), (in Blocks):	
Minimum Rib Pillar Dimension (X), (in Blocks):	
Leveling Constraint (X), (in Blocks):	
Leveling Constraint (Y), (in Blocks):	
Leveling Constraint (Z), (in Blocks):	
Minimum Width of Upper Crown Pillar (in Blocks):	
Maximum Width of Upper Crown Pillar (in Blocks):	
Minimum Width of Under Crown Pillar (in Blocks):	
Number of Draw Bells in each Probable Level:	
Number of Chutes in each Probable Level:	
Number of Sub Level in each Probable Level:	
OK	

شکل ۵-۶: پنجره دریافت اطلاعات فنی

Cost Per Draw Bell (in Dollars):	
Cost Per Chute (in Dollars):	
Cost Per Under Cut (in Dollars):	
Cost Per Length of Drift (in Dollars):	
Cost Level Height (in Dollars):	
Cost Per Sub Level (in Dollars):	
OK	

شکل ۵-۷: پنجره دریافت اطلاعات اقتصادی

Drift Width (in Meters):	
Drift Height (in Meters):	
Slope Walls of Drift (in Degrees):	
Block Dimension (X), (in Meters):	
Block Dimension (Y), (in Meters):	
Block Dimension (Z), (in Meters):	
Dip of Slope (in Degrees):	
OK	

شکل ۵-۸: پنجره دریافت اطلاعات هندسی

همانطور که در فصل‌های قبل ذکر شده است، در بعضی از روش‌های استخراج ممکن است از تونل‌های موازی لایه به منظور استخراج هر طبقه استفاده شود که در اینصورت هزینه حفاری هر متر از این تونل‌ها، عرض و ارتفاع این تونل‌ها، فاصله این تونل‌ها از لایه و همچنین هزینه احداث میانبرها در یک پنجره و مطابق شکل ۵-۹ دریافت می‌شود.

Lateral Drift Width (in Meters):	
Lateral Drift Height (in Meters):	
Slope Walls of Lateral Drift (in Degrees):	
Distance From Vein (in Meters):	
Cost Per Length of Lateral Drift (in Dollars):	
Number of Cross Cut in each Probable Level:	
Cost Per Cross Cut (in Dollars):	
OK	

شکل ۵-۹: پنجره دریافت اطلاعات هندسی و اقتصادی تونل‌های موازی لایه

لازم به ذکر است، تمام اطلاعاتی که توسط کاربر وارد می‌شود با فرمت mat در پوشه‌ای که برنامه در آن قرار دارد، ذخیره خواهد شد.

۵-۴- خروجی برنامه کامپیوتری UMLO

پس از وارد نمودن اطلاعات لازم و تأیید آنها توسط کاربر، تمام اطلاعات ذخیره شده، فراخوانی می‌شود و بر مبنای آنها، محاسبات برنامه به منظور تعیین محدوده بهینه معدن‌کاری شروع خواهد شد. با اتمام محاسبات، یک فایل با فرمت txt و به نام Output در پوشه‌ای که برنامه در آن قرار دارد ذخیره می‌شود. فایل ذخیره شده شامل اعداد ۰، ۱، ۲ و ۳ است که این اعداد بترتیب معرف باطله، ماده معدنی، لنگه تاج بالایی و لنگه تاج پایینی هستند.

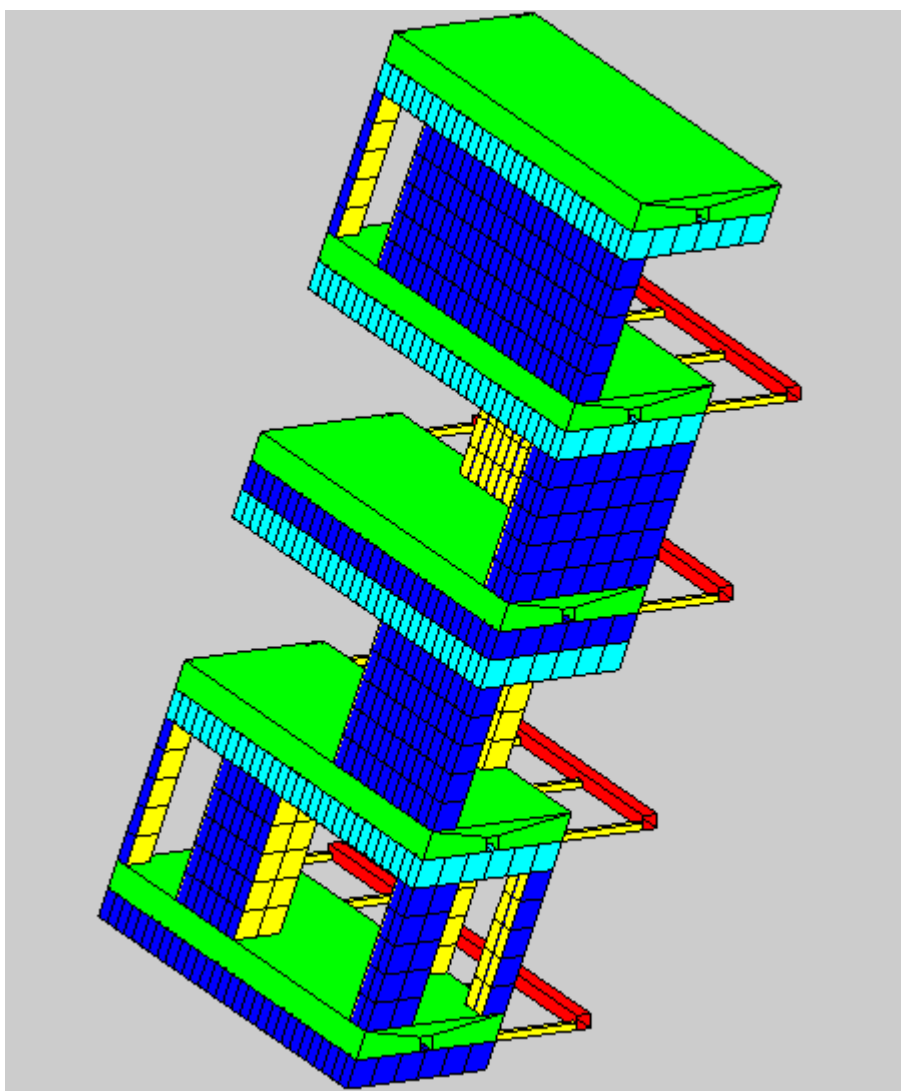
۵-۵- نمایش گرافیکی محدوده بهینه معدن‌کاری

پس از تعیین محدوده بهینه معدن‌کاری، از طریق گزینه‌های موجود در سمت چپ و بالای صفحه برنامه کامپیوتری مذکور که در شکل ۵-۱۰ نیز نشان داده شده است می‌توان تصویری سه بعدی از محدوده بهینه معدن‌کاری را مشاهده نمود.



شکل ۵- ۱۰: گزینه‌های نمایش محدوده بهینه معدن کاری

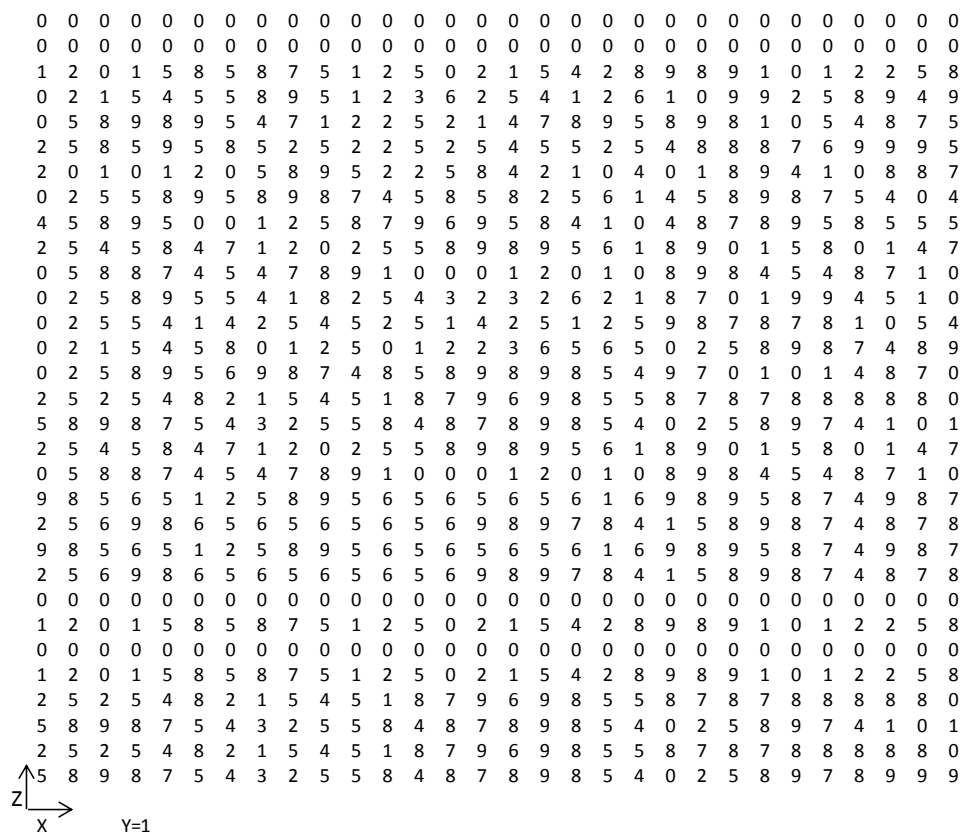
در شکل ۵-۱۱، یک تصویر سه‌بعدی از محدوده بهینه‌ی معدن کاری و شامل چهار طبقه استخراجی برای یک مدل فرضی دارای ۵۵۸۰ بلوک نشان داده شده است. در این شکل، بخش‌های دارای رنگ آبی معرف باطله، رنگ زرد معرف دیواره‌های محدوده بهینه معدن کاری، رنگ سبز معرف لنگه تاج پایینی، رنگ فیروزه‌ای معرف لنگه تاج بالایی و رنگ قرمز معرف تونل‌های موازی لایه است.



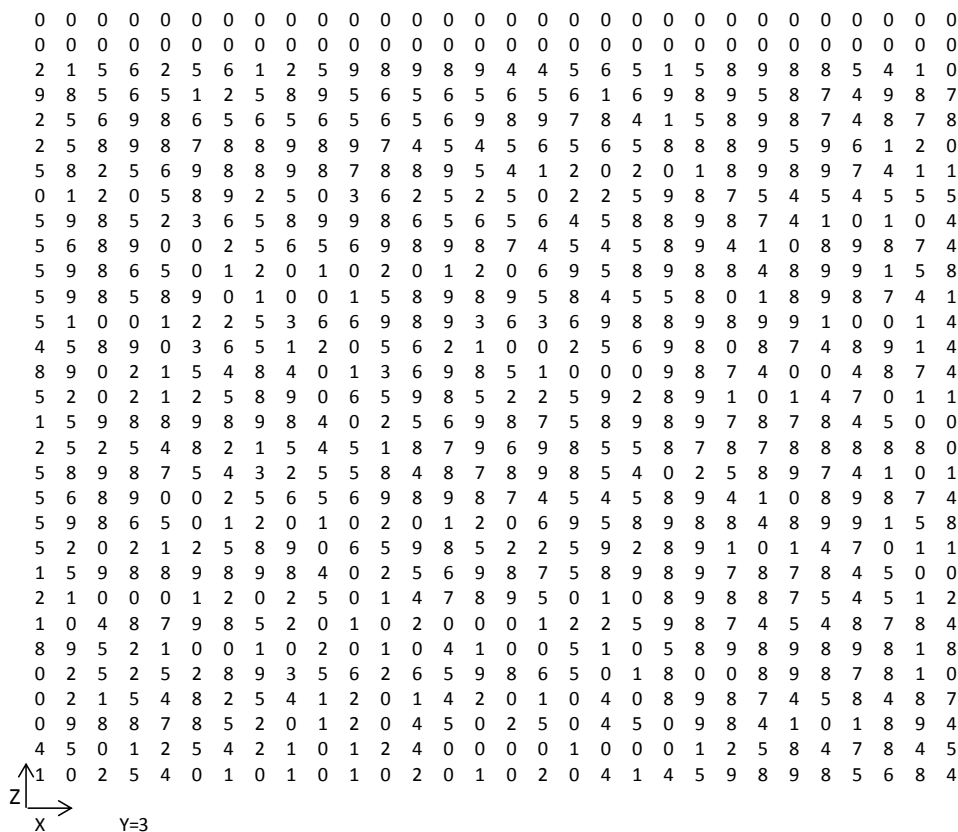
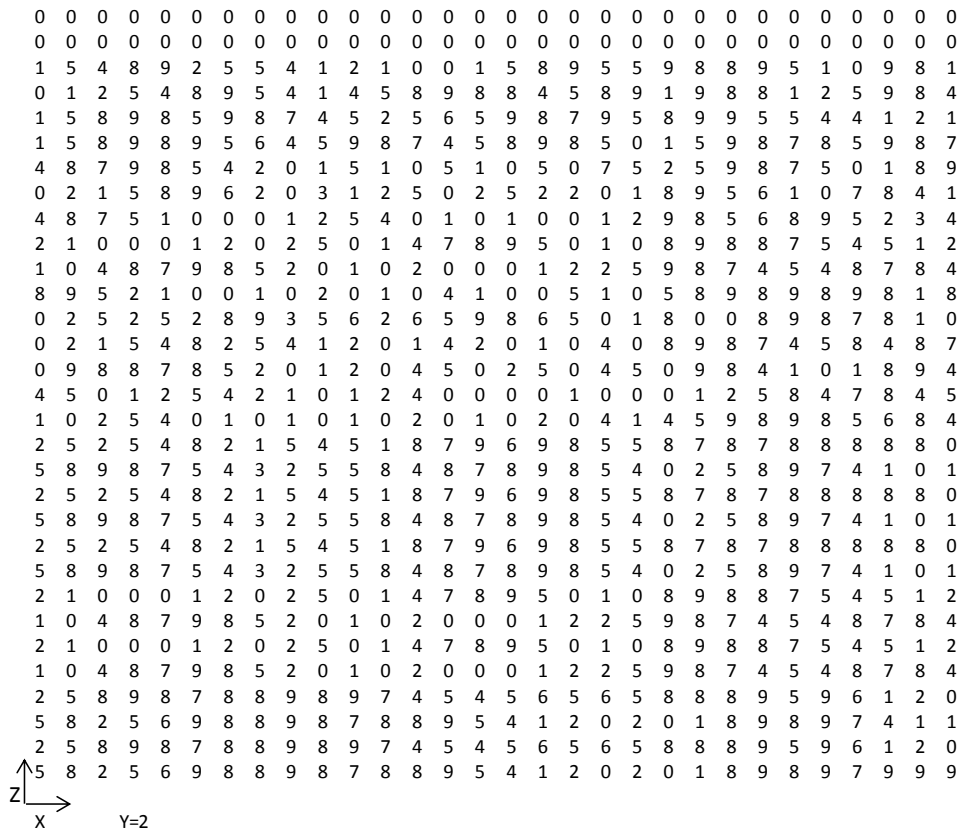
شکل ۵- ۱۱: تصویر سه‌بعدی محدوده بهینه یک کانسار فرضی

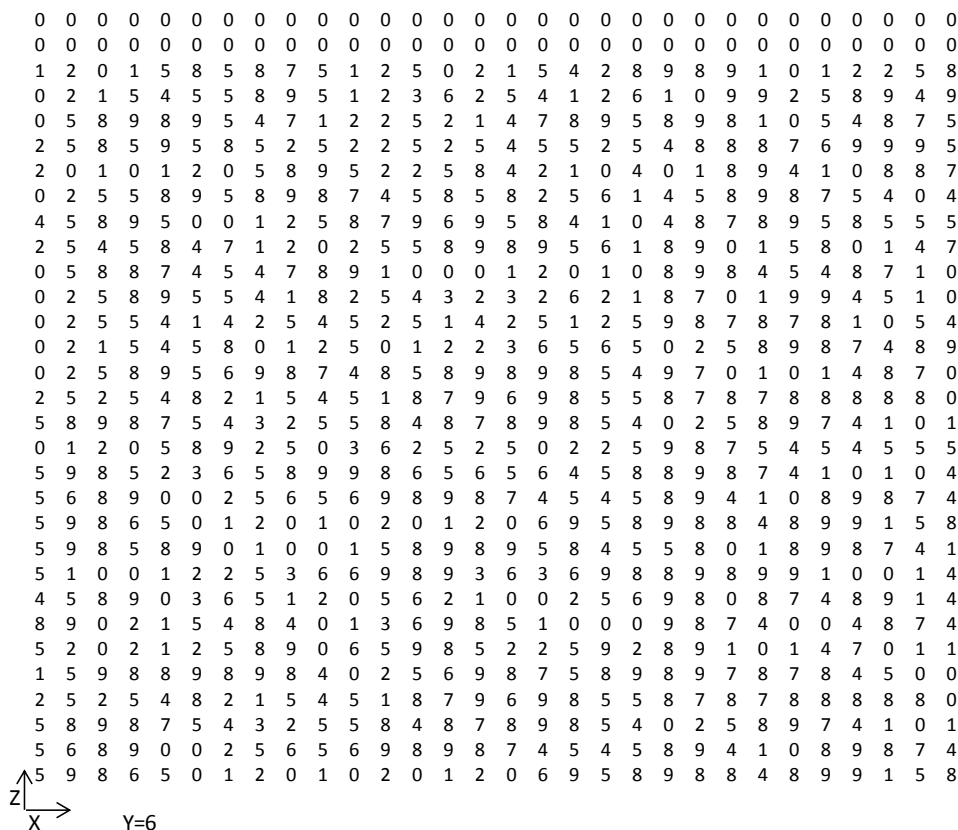
مثال عددی

بر اساس یک سری از داده‌ها و اطلاعات فرضی، با کاربرد برنامه کامپیوتری UMLO، محدوده بهینه معدن‌کاری، محاسبه شده است. در شکل‌های ۵-۱۲ تا ۵-۱۷، مقاطع قائم از یک مدل درآمدی نشان داده شده است. هر یک از اعداد نشان داده شده در این شکل‌ها نشان دهنده درآمد حاصل از استخراج آن بلوک بر حسب دلار است که در محاسبه ارزش آن‌ها، هیچگونه هزینه‌ای لحاظ نشده است. همچنین در شکل‌های ۵-۱۸ تا ۵-۲۳، مقاطع قائم از یک مدل LNICM نشان داده شده است. در مدل LNICM نیز تمام هزینه‌ها بر اساس دلار هستند.

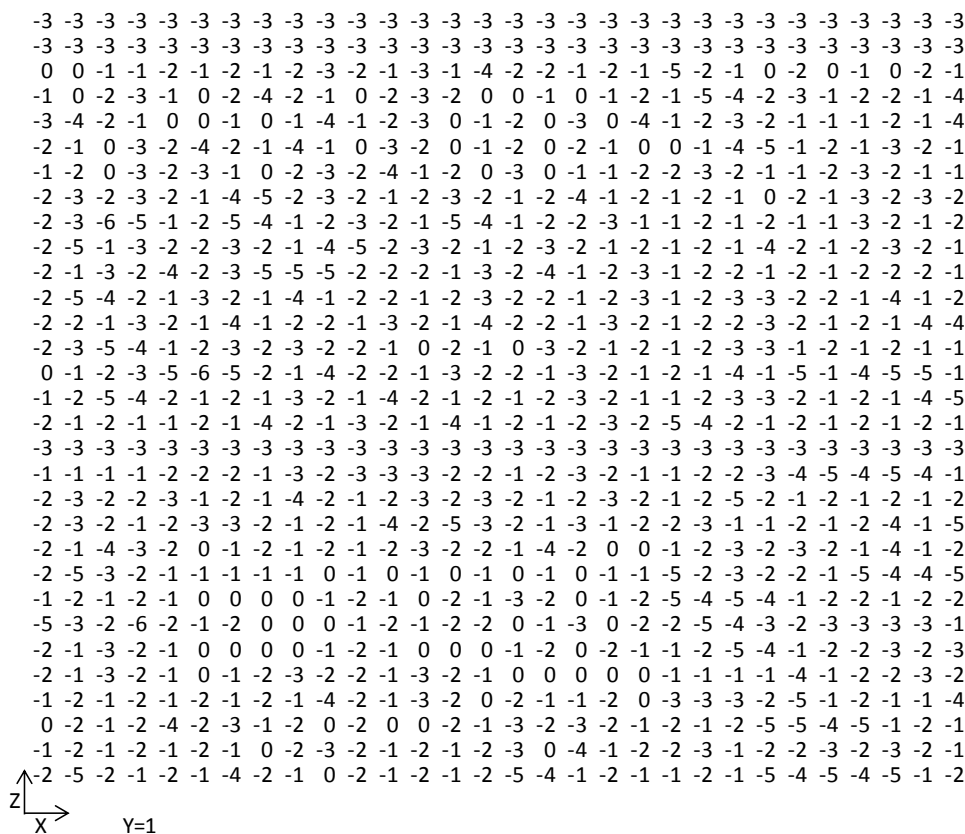


شکل ۵-۱۲: ارزش بلوک‌های مقطع قائم از مدل درآمدی در Y=1

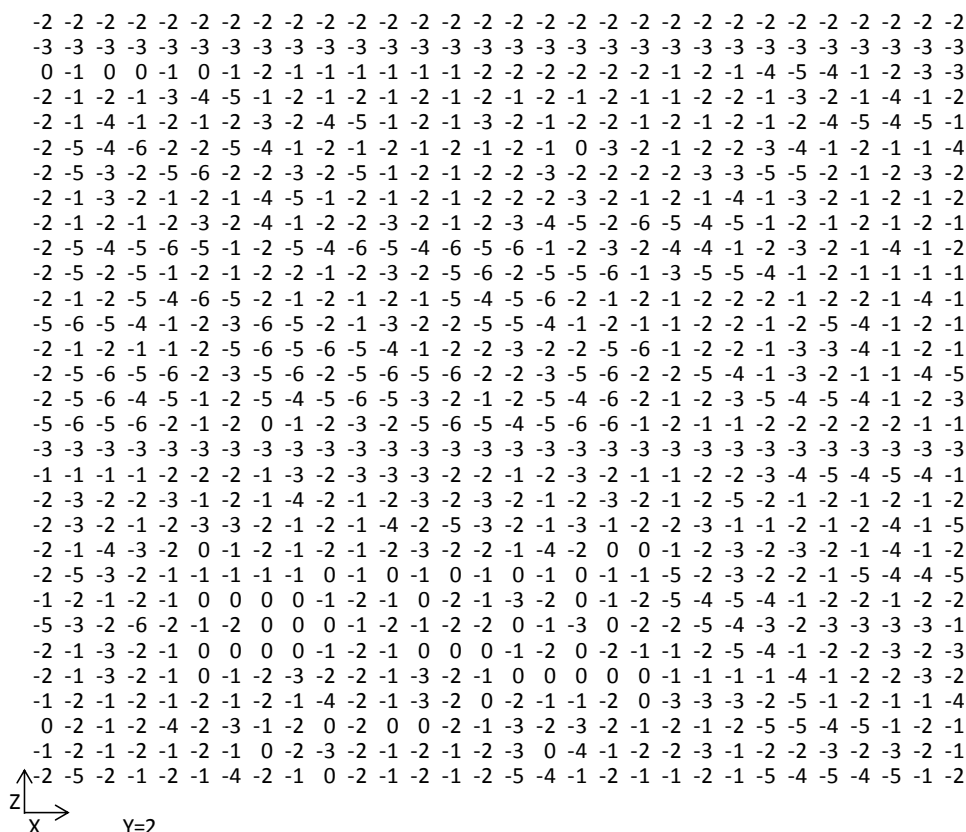




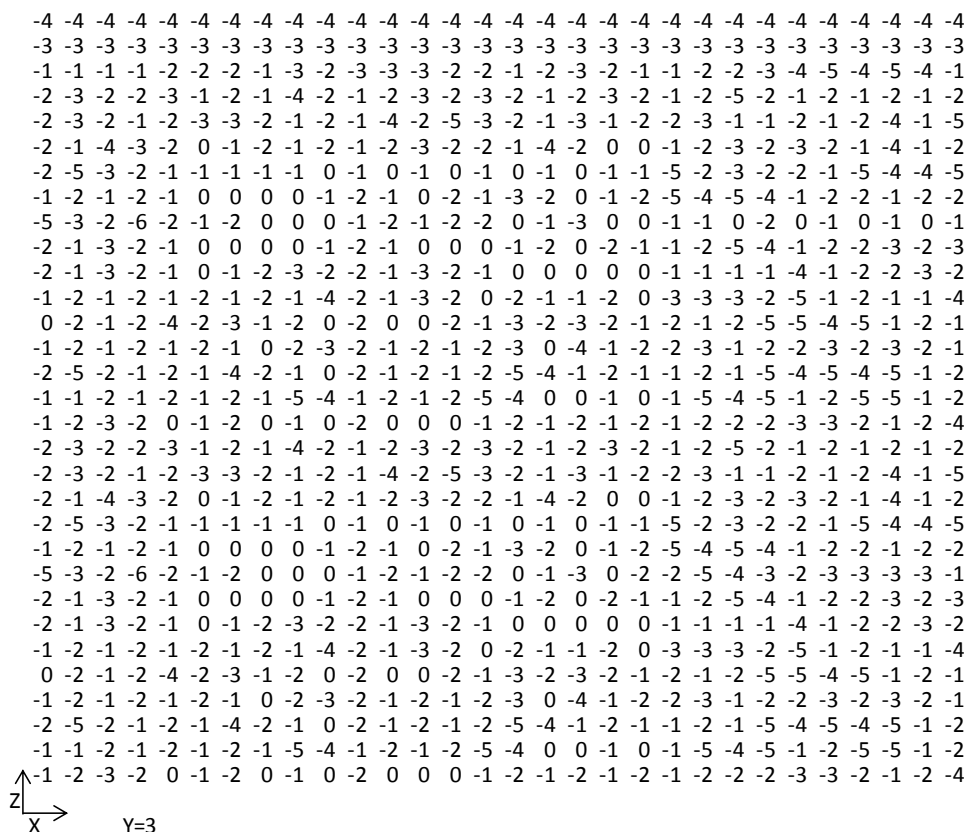
شکل ۵-۱۷: ارزش بلوک‌های مقطع قائم از مدل درآمدی در $Y=6$



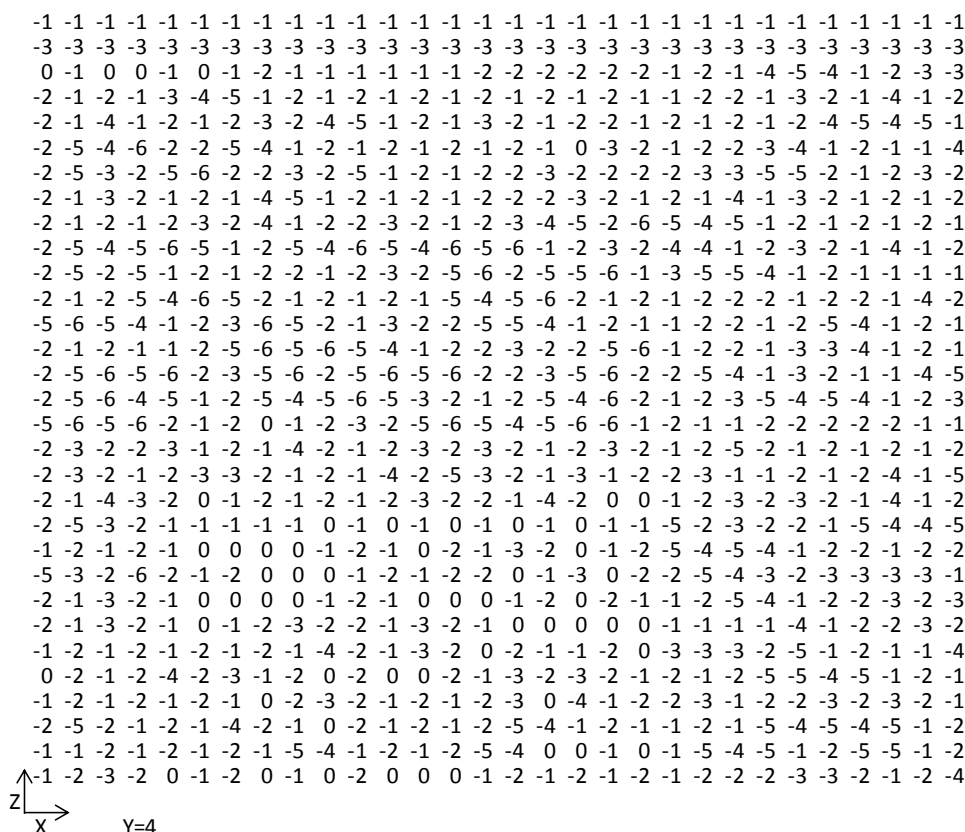
شکل ۵-۱۸: ارزش بلوک‌های مقطع قائم از مدل LNIMC در $Y=1$



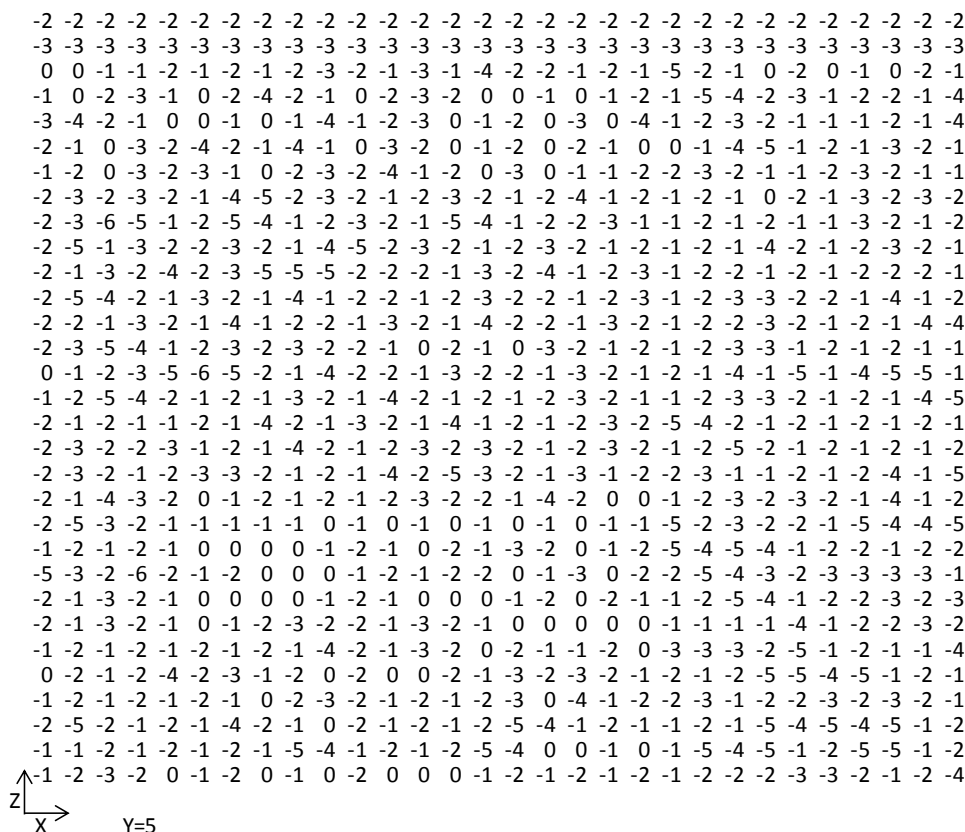
شکل ۵- ۱۹: ارزش بلوک‌های مقطع قائم از مدل LNICM در Y=2



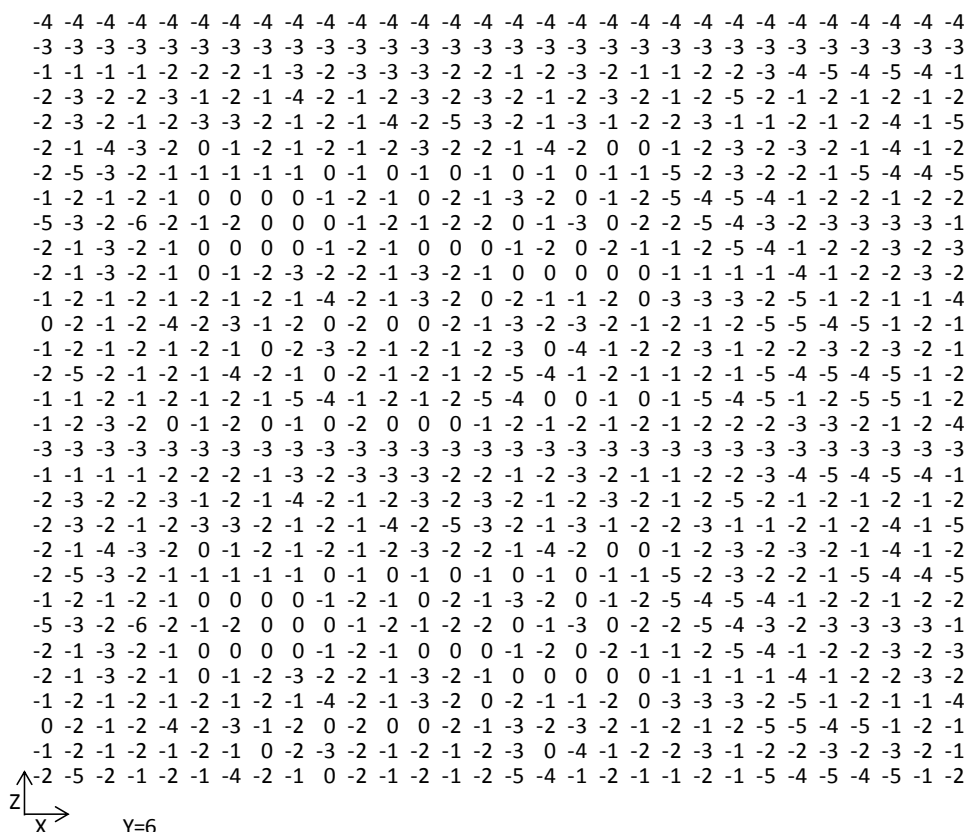
شکل ۵- ۲۰: ارزش بلوک‌های مقطع قائم از مدل LNICM در Y=3



شکل ۵-۲۱: ارزش بلوک‌های مقطع قائم از مدل LNICM در Y=4



شکل ۵-۲۲: ارزش بلوک‌های مقطع قائم از مدل LNICM در Y=5



شکل ۵-۲۳: ارزش بلوک‌های مقطع قائم از مدل LNICM در $Y=6$

در جداول ۵-۱ تا ۵-۵ تمام اطلاعات فنی، هندسی و اقتصادی لازم به منظور تعیین محدوده بهینه

معدن‌کاری نشان داده شده است که پس از معرفی این اطلاعات به نرم‌افزار، بر مبنای آنها محدوده

بهینه تعیین شده است و در شکل ۵-۲۴ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱: ابعاد مدل‌های بلوکی در سه جهت X ، Y و Z

۳۰ بلوک	ابعاد مدل در جهت امتداد (X)
۶ بلوک	ابعاد مدل در جهت ضخامت (Y)
۳۱ بلوک	ابعاد مدل در جهت عمق (Z)

جدول ۵-۲: پارامترهای فنی معدن کاری

۷ بلوک	حداقل ارتفاع طبقه
۱۰ بلوک	حداکثر ارتفاع طبقه
۷ بلوک	حداقل ابعاد کارگاه استخراج در جهت امتداد (X)
-	حداکثر ابعاد کارگاه استخراج در جهت امتداد (X)
۴ بلوک	حداقل ابعاد کارگاه استخراج در جهت ضخامت (Y)
۶ بلوک	حداکثر ابعاد کارگاه استخراج در جهت ضخامت (Y)
۱ بلوک	محدودیت هم ترازى در جهت امتداد (X)
۱ بلوک	محدودیت هم ترازى در جهت امتداد (Y)
۲ بلوک	محدودیت هم ترازى در جهت امتداد (Z)
۱ بلوک	حداقل ضخامت لنگه تاج پایینی
۱ بلوک	حداقل ضخامت لنگه تاج بالایی
۱ بلوک	حداکثر ضخامت لنگه تاج بالایی
۱۰	تعداد قیف های هر طبقه استخراجی
۱۰	تعداد میانبرها در هر طبقه استخراجی
۳	تعداد تونل های طبقات فرعی در هر طبقه استخراجی

جدول ۵-۳: پارامترهای اقتصادی معدن کاری

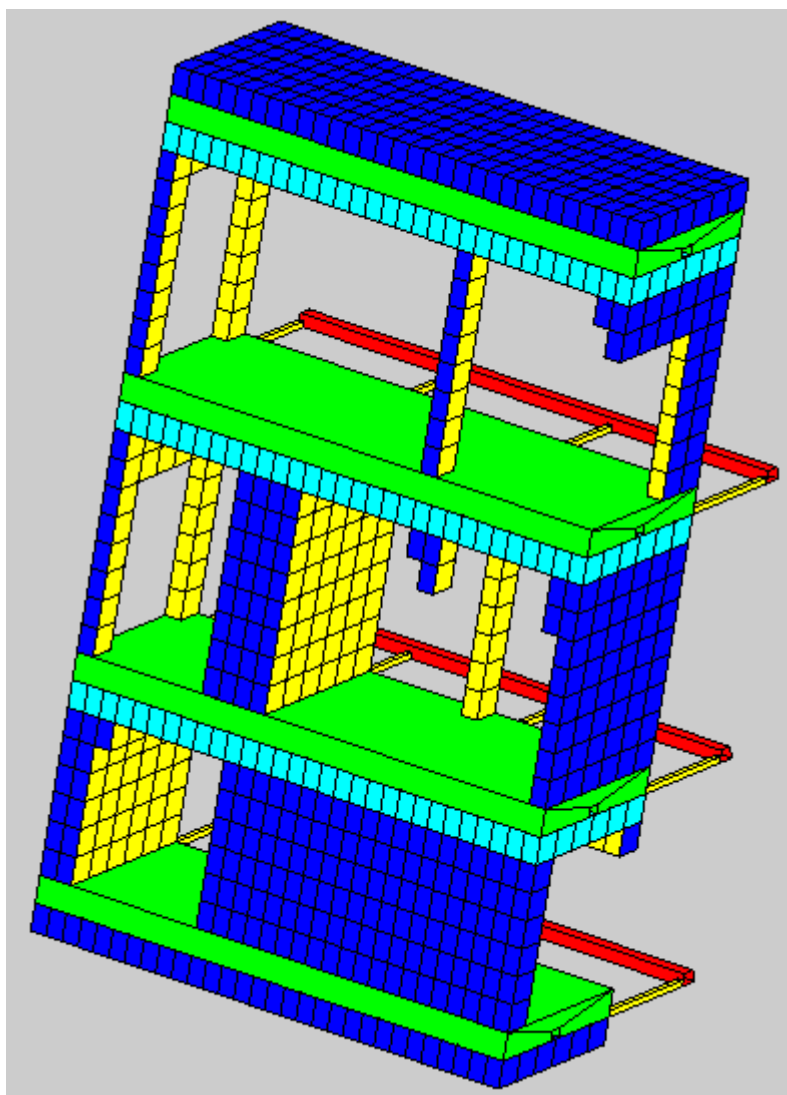
-۵.۴۲	هزینه احداث هر قیف (دلار)
-۴.۷۴	هزینه احداث هر میانبر (دلار)
-۱۰.۷۶	هزینه احداث زیربرش (دلار)
-۰.۱۴	هزینه حفاری تونل امتداد لایه (دلار بر متر)
-۸.۲۶	هزینه احداث تونل طبقات فرعی (دلار)

جدول ۵-۴: پارامترهای هندسی معدن کاری

عرض تونل امتداد لایه	۵ متر
ارتفاع تونل امتداد لایه	۴ متر
شیب دیواره تونل امتداد لایه	درجه ۹۰
ابعاد بلوک ها در جهت امتداد (X)	۸ متر
ابعاد بلوک ها در جهت ضخامت (Y)	۱۰ متر
ابعاد بلوک ها در جهت عمق (Z)	۱۱ متر
شیب لایه استخراجی	۷۶ درجه

جدول ۵-۵: مشخصات هندسی و اقتصادی تونل های موازی لایه و میانبرها

عرض تونل موازی لایه	۵ متر
ارتفاع تونل موازی لایه	۵ متر
شیب دیواره تونل موازی لایه	۸۰ درجه
فاصله تونل موازی لایه از لایه استخراجی	۴۲ متر
هزینه حفاری هر متر از تونل موازی لایه (دلار)	-۰.۱۲
تعداد میانبرها در هر طبقه استخراجی	۴
هزینه احداث هر میانبر (دلار)	-۷.۱۶



شکل ۵-۲۴: محدوده بهینه تعیین شده بر اساس برنامه کامپیوتری UMLO

۵-۶- ویژگی‌های برنامه کامپیوتری UMLO

برنامه کامپیوتری UMLO بر مبنای الگوریتم فراگیر MLOA فرآیند بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری را انجام می‌دهد. سه ویژگی مهم الگوریتم MLOA باعث شده است این برنامه کامپیوتری، در تعیین محدوده بهینه معدن‌کاری کارآمد باشد.

اولین ویژگی الگوریتم MLOA این است که در آن، محدودیت‌های فنی متناسب با روش‌های استخراج قایم مانند حداقل و حداکثر ارتفاع کارگاه‌های استخراج، حداقل و حداکثر ابعاد کارگاه‌ها در دو جهت امتداد و ضخامت کنسار، حداقل عرض پایه‌های جانبی، محدودیت‌های هم‌ترازی در سه جهت مذکور و

ضخامت پایه‌های تاج بالایی و پایینی در نظر گرفته می‌شود. دومین ویژگی این الگوریتم توانایی آن در تعیین تمام حالات محتمل برای جانمایی طبقات اسنخراجی است. سومین و مهمترین ویژگی این الگوریتم، توانایی تعیین مدل بلوکی اقتصادی برای هر طبقه محتمل و با در نظر گرفتن تأثیر همزمان سه عامل تعداد، ارتفاع و جانمایی طبقات بر ارزش هر بلوک در درون این مدل بلوکی اقتصادی است.

فصل ششم:

نتیجہ گیری و پیشہادات

اگرچه در نیم قرن اخیر الگوریتم‌های متعددی در مبحث بهینه‌سازی اقتصادی محدوده معدن‌کاری روباز ارایه شده است ولی در ارتباط با بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری زیرزمینی تعداد این الگوریتم‌ها بسیار اندک است. همچنین در الگوریتم‌هایی که تاکنون ارایه شده است از یک سری فرضیات و ساده‌سازی‌هایی استفاده شده، که باعث محدود نمودن دامنه کاربرد آنها شده است لذا طراحان معادن زیرزمینی تا به حال استقبال چندانی از این الگوریتم‌ها نشان نداده‌اند. بنابراین برخلاف معدن‌کاری روباز، هیچ یک از الگوریتم‌هایی که تاکنون برای بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری زیرزمینی ارایه شده‌اند دارای جامعیت و گستردگی نیستند.

بطور کلی دلایل کند بودن توسعه این الگوریتم‌ها را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

الف- روش‌های استخراج معادن زیرزمینی بسیار متعدد و از نظر فنی کاملاً متفاوت هستند. بنابراین بسط یک الگوریتم که پاسخگوی تمام محدودیت‌های فنی و هندسی روش‌های متعدد استخراج زیرزمینی باشد، دشوار است.

ب- محاسبه پارامترهای اقتصادی در محدوده استخراج زیرزمینی که عامل اصلی تصمیم‌گیری در تعیین محدوده بهینه استخراج است، به علت وابستگی به عوامل متعددی همچون روش استخراج، موقعیت هندسی و جانمایی کارگاه‌های استخراج با پیچیدگی‌های زیادی همراه است.

ج- تاکنون بستر مناسب برای استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده استخراج زیرزمینی به نحو شایسته فراهم نشده است. برای استفاده از این الگوریتم‌ها، فرهنگ‌سازی عمومی در بین طراحان معادن زیرزمینی ضروری است، زیرا طراحان معمولاً تمایل دارند با تکیه بر تجارب مهندسی، طراحی معدن را به روش‌های دستی و یا دستی- کامپیوتری و با ترسیم مقاطع قائم و افقی در محدوده کانسار انجام دهند.

در این تحقیق، با تدوین یک الگوریتم جزگرای جدید به نام SOA سعی شده است با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی تأثیرگذار بر یک معدن، محدوده‌ای با بیشترین ارزش اقتصادی را جستجو نمود. به منظور اعتبارسنجی الگوریتم SOA، این الگوریتم و دیگر الگوریتم‌های موجود بر روی مدل‌های بلوکی اقتصادی یکسان اجرا شده‌اند که نتایج حاصل از این اعتبارسنجی، نشان‌دهنده موفقیت الگوریتم SOA در تعیین محدوده بهینه معدن‌کاری زیرزمینی بوده است.

به منظور فراگیر نمودن فرآیند طراحی، الگوریتم MLOA تدوین و توسعه داده شده است. این الگوریتم پس از بررسی تمام حالات ممکن برای جانمایی طبقات استخراجی، در درون هر طبقه استخراجی با کاربرد الگوریتم SOA فرآیند بهینه‌سازی را انجام داده و نتایج حاصل از کاربرد این الگوریتم بر روی یک مدل بلوکی اقتصادی، شامل تعیین تعداد، ارتفاع و جانمایی بهینه طبقات استخراجی و همچنین تعداد، ابعاد و موقعیت قرارگیری بهینه کارگاه‌های استخراج در درون هر طبقه است.

با توجه به دلایلی مانند عمیق‌تر شدن معادن روباز و افزایش هزینه‌های استخراج (افزایش مسیر رفت و برگشت تجهیزات باربری که در نتیجه آن هزینه‌های حمل و نقل افزایش خواهد یافت)، اقتصادی

نبودن ساخت تجهیزات بارگیری و باربری با ظرفیت‌های بالاتر برای معادن روباز، افزایش نرخ تولید معادن زیرزمینی و توانایی رقابت با معادن روباز، پیشرفت در ساخت و بکارگیری تجهیزات استخراج زیرزمینی و افزایش سطح دانش و مهارت این شیوه استخراج، تغییر نحوه استخراج معادن از شیوه روباز به شیوه زیرزمینی در چندین سال اخیر از روند و گسترش قابل توجهی برخوردار بوده است. به منظور طراحی معادن زیرزمینی، یکی از مهمترین مسایلی که در وهله اول مورد توجه قرار خواهد گرفت مسأله طراحی محدوده بهینه معدن‌کاری زیرزمینی است. بدلیل اینکه تا کنون الگوریتم‌ها و برنامه‌های کامپیوتری کمی ارایه شده است و این معدود برنامه‌های کامپیوتری دارای نواقص زیادی هستند لذا ضرورت تدوین برنامه‌ها و نرم‌افزارهای مبتنی بر الگوریتم‌های کارآمد بیشتر از گذشته احساس می‌شود. در این تحقیق با تدوین یک برنامه کامپیوتری به نام UMLO سعی شده، تا تسهیلات ویژه‌ای به منظور استفاده آسان‌تر کاربران از الگوریتم MLOA ارایه شود. بدلیل ساده بودن برنامه کامپیوتری تدوین شده، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده با تدوین یک برنامه کامپیوتری کامل و جامع بر مبنای الگوریتم MLOA بتوان راهی جدید در طراحی محدوده بهینه معدن‌کاری زیرزمینی ایجاد نمود.

منابع و مأخذ:

1. Sens J J, Topal E., (2008) "A new algorithm for stope boundary optimisation", **The AusIMM New Leaders Conference. Brisbane, Australia**, PP 25-28.
2. Topal , Sens J., (2010) "A new algorithm for stope boundary optimization", **J. of Coal Science & Engineering**, No.2, Vol.16, PP 113-119.
۳. جلالی م ا، (۱۳۸۵)، رساله دکتری؛ "بهینه‌سازی محدوده معدن کاری زیرزمینی در کانسارهای رگه‌ای"، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
۴. جلالی م ا، عطایی‌پور م، (۱۳۸۶)، "اصلاح الگوریتم لرچ و گراسمن برای بهینه‌سازی محدوده معدن کاری روباز با شیب دیواره کمتر از 1:1"، **نشریه علمی - پژوهشی مهندسی معدن**، شماره ۲، دوره ۱: ص ۱.
۵. جلالی م ا، حسینی ه، (۱۳۸۸)، "بهینه‌سازی محدوده استخراج در معادن زیرزمینی با استفاده از الگوریتم حریصانه"، **نشریه علمی - پژوهشی مهندسی معدن**، شماره ۷، دوره ۴: ص ۱.
6. Riddle J., (1977) "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.
7. Ovanic J. Young D., (1995) "Economic Optimisation of Stope Geometry Using Separable Programming with Special Branch and Bound Techniques", **Third Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry; H. Mitri (ed), Balkema, Rotterdam**, PP 129-135.
8. Ovanic J, Young D S, (1999) "Economic optimization of open stope geometry", **28th international APCOM symposium. Colorado school of Mines, Golden, Colorado. USA**, PP 855-862.
9. Shahriar K, Oraee K, Bakhtavar E., (2007) " A study on the optimisation algorithms for determining open-pit and underground mining limits", **Modern management of Mine producing, Geology and environmental protection (SGEM), Albena, Bulgaria**.
10. Jalali S E, Ataee-pour M., (2004) "A 2D Dynamic Programming Algorithm to Optimize Stope Boundary", **Proceeding of Mine Planning and Equipment Selection (MPES)**, PP 45-52.

11. Jalali S E, Ataee-pour M, Shahriar K., (2007) "Rigorous Algorithms to Optimise stope boundaries Capabilities Restrictions and Applications", **Modern management of Mine producing, Geology and environmental protection (SGEM)**, Albena, Bulgaria.
12. Jalali S E, Ataee-pour M, Shahriyar K., (2007) "A Computer Program to Optimize Stope Boundaries Using Probable Stope Algorithm", **Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)**, No.3, Vol.2, PP 7-14.
13. Alford C., (1995) "Optimisation in Underground Mine Design", **25th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy**, PP 213-218.
14. Alford C, Hall B., (2009) "Stope optimisation tools for the selection of optimum cut-off grade in underground mine design", **Proceedings of project evaluation conference, Melbourne**, PP 137-144.
15. Ataee-pour M., (1997) "A New Heuristic Algorithm to Optimise Stope Boundaries", **Proceeding of the 2nd Regional APCOM Symposium on Computer Applications in the Mineral Industry, Moscow, Russia**.
16. Ataee-pour M, Baafi E Y., (2003) "SLO – AProgram for Stope Limit Optimisation Using A Heuristic Algorithm", **Proceedings of the 18th International Mining Congress and Exhibition of Turkey – IMCET, G Ozbayoglu (ed.)**, Turkey, PP 295-301.
17. Ataee-pour M., (2004) "Optimisation of stope limits using a heuristic approach", **J. of Mining Technology**, PP 123-128.
18. Ataee-pour M, (2005) "A critical survey of the existing stope layout optimization techniques", **J. of Mining Science**, PP 447-466.
19. Dimitrakopoulos R, Grieco N., (2009) "Stope design and geological uncertainty: quantification of risk in conventional designs and probabilistic alternative", **J. of Mining Science**, No.2, Vol.45, PP 152-163.
20. Grieco N, Dimitrakopoulos R., (2004) "Grade uncertainty in stope design: Improving the optimization process", **Proceedings Orebody Modelling and Strategic Mine Planning**, PP 249–255.

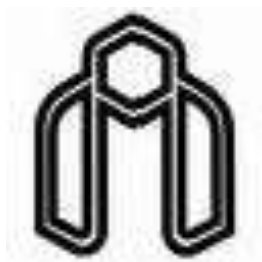
۲۱. عطایی م.، (۱۳۸۶)، "معدن کاری زیرزمینی"، جلد اول، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ص ۲۶۶-۲۷۱.

۲۲. عطایی م.، (۱۳۸۶)، "معدن‌کاری زیرزمینی"، جلد دوم، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ص ۵۵۴-۵۵۸.

Abstract

It has been about 4 decades that application of optimization algorithms in designing mines have come to vogue. Most of the progresses of these algorithms have been on the open pit mining. Unlike open pit mining, growth of such algorithms on the field of underground mining have been to slow, due to high variety of underground mining methods, complexity of economic modeling of mining limit and using simplifying assumption. In order to determine the optimum underground mining limit, a new algorithm called Stope Optimiser Algorithm (SOA) was designed. In this algorithm, the optimum limit is determined in a level considering given constraints. Also in this algorithm, constraints like minimum and maximum dimension of stope, minimum and maximum level height of stope, leveling constraints and minimum width of rib pillars are considered. To consider mine designing operations unanimously, an algorithm called Mining Limit Optimiser Algorithm (MLOA) have been used. In the MLOA algorithm, after determining the number and location of all the probable levels, the SOA algorithm is used to determine the number, dimension and location of stopes in any probable level. At last by determining the obtained value of probable mining area, all of these limits are compared and an optimal arrangement of number and location of levels, together with stope limit determination in every level is selected as output of the MLOA algorithm. Also, a computerized program have been designed in MATLAB, that determines mining limit, based on MLOA algorithm, after entering income and cost block models and other technical and economical factors and finally, a tridimensional image of the optimum limit of stopes and levels is obtained as the output of this algorithm.

Keywords: underground mining limit, probable stope, probable level, SOA algorithm, MLOA algorithm, optimisation



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

MSC. Thesis

Optimisation of Underground Mining Limits for Sublevel Stoping and Sublevel Caving Methods

Vahid Nikbin

Supervisors:

Dr. S.E. Jalali

Dr. H. Mirzaei

September 2013