

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری مهندسی استخراج معدن

تعیین محدوده بهینه نهایی با هدف حداکثرسازی ارزش خالص فعلی

نگارنده:

میثم سالکی

اساتید راهنما:

دکتر رضا کاکایی

دکتر محمد عطایی

بهمن ۱۳۹۷

شماره: ۹۷/۴۰۴۹
تاریخ: ۹۷/۱۲/۱۴
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای میثم سالکی دانشجوی دکتری رشته مهندسی استخراج معدن به شماره دانشجویی ۹۰۲۴۷۷۵ ورودی بهمن ماه سال ۱۳۹۰ در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۲۸ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: تعیین محدوده بهینه نهایی با هدف حداکثرسازی ارزش خالص فعلی دفاع و با اخذ نمره ۱۸/۲۵ به درجه: بسیار خوب نائل گردید.

<input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	<input type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
<input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
	دکتر رضا کاکایی	استاد راهتما	استاد	
	دکتر محمد عطایی	استاد راهنما	استاد	
	دکتر فرهنگ سرشکی	استاد مدعو داخلی	استاد	
	دکتر مسعود منجزی	استاد مدعو خارجی	استاد	
	دکتر حسین میرزایی	استاد مدعو خارجی	استادیار	
	دکتر محمد کارآموزیان	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	دانشیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای میثم سالکی بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد عطایی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته‌ای که از خواسته هایشان گذشتند، سختی‌ها را به جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده‌ام برسم .

تشکر و قدردانی:

با استعانت از درگاه حضرت احدیت جل و علا، بدینوسیله مراتب قدردانی خود را به پاس محبت‌ها، همراهی‌ها، حمایت‌ها و راهنمایی‌های علمی و اخلاقی اساتید گرانقدرم حضرات آقایان پروفسور رضا کاکایی و پروفسور محمد عطایی که گذراندن دوره‌های تحصیلات تکمیلی به ویژه دوره دکتری و به سرانجام رسیدن این رساله را مدیون علم‌آموزی از محضر ایشان هستم، از صمیم قلب ابراز می‌نمایم.

همچنین بر خود لازم می‌دانم از زحمات کارکنان و کارشناسان ارجمند دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود که با زحمات خود موجب فراهم شدن فضای مناسب برای آموزش و پژوهش در این دانشکده شده‌اند، نیز کمال تشکر را داشته باشم.

تعهدنامه

اینجانب میثم سالکی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه "تعیین محدوده بهینه نهایی با هدف حداکثرسازی ارزش خالص فعلی" تحت راهنمایی آقایان دکتر رضا کاکایی و دکتر محمد عطایی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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: ۱۳۹۷/۱۱/۲۸

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 می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده:

تولیدات معدنی از گذشته‌های دور یکی از مهم‌ترین ارکان توسعه اقتصادی و تولیدات صنعتی بوده است که به روش‌های مختلف معدن‌کاری استخراج می‌شوند. از میان انواع روش‌های معدن‌کاری، روش روباز بیشترین سهم را در تولیدات معدنی به خود اختصاص داده است. برای معادنی که قرار است به روش روباز استخراج شوند، باید طراحی‌های مختلفی صورت پذیرد. از میان این طراحی‌ها، تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید دو بخش مهم و پایه‌ای هر معدن روباز هستند. از آنجایی که یک پروژه معدنی در حقیقت یک پروژه اقتصادی بسیار بزرگ است که در برخی موارد عمر آن به چند دهه و سرمایه‌گذاری آن به میلیاردها دلار می‌رسد، باید مانند دیگر پروژه‌های اقتصادی دارای بالاترین سود بوده و با بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی (NPV) ارزیابی و طراحی شود. در چند دهه گذشته طراحی یک معدن روباز به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی بزرگ مقیاس و پیچیده مطرح بوده است. به طور کلی طراحی محدوده بهینه نهایی یک معدن روباز باید با بیشینه‌سازی NPV انجام شود. در روش مرسوم فعلی، طراحی معادن روباز در دو بخش طراحی محدوده نهایی با بیشینه‌سازی سود تنزیل نشده و سپس برنامه‌ریزی تولید با هدف بیشینه‌سازی NPV انجام می‌شود. بر این اساس در چند دهه گذشته الگوریتم‌های ریاضی، ابتکاری و فراابتکاری مختلفی برای تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید ارائه شده است. با توجه به این که بهتر است طراحی محدوده نهایی با هدف بیشینه‌سازی NPV انجام شود، در این رساله ابتدا مدل‌سازی ریاضی این مسئله با این هدف توسعه داده شده است. این مدل‌سازی به دو صورت عدد صحیح و نیز صفر و یک ارائه شده است. این مدل‌ها ترتیب استخراج تک تک بلوک‌های کانسار و محدوده‌ای که در آن بیشترین NPV وجود دارد را تعیین می‌کنند. با مقایسه نتایج این مدل‌ها با الگوریتمی مانند برنامه‌ریزی پویای رومن مشخص شد که نتایج آن‌ها به صورت دقیق توانایی تعیین ترتیب و محدوده بهینه نهایی را دارند. این توابع هدف به علت پیچیدگی ذاتی و تعداد بالای متغیر تصمیم و محدودیت از نوع مسائل NP-Hard

هستند. حل این گونه از مسائل به شدت سخت و زمان بر است و در علم تحقیق در عملیات برای حل آنها پیشنهاد می‌شود که از الگوریتم‌های ابتکاری یا فراابتکاری که یک جواب با تقریب مناسب را در زمانی مناسب به دست می‌آورند، استفاده شود. بنابراین در ادامه برای حل توابع هدف توسعه داده شده، سه الگوریتم ابتکاری ارائه شده است. این الگوریتم‌ها به صورت پویا ترتیب استخراج بلوک‌های کانسار و محدوده‌ای که بر اساس این ترتیب دارای بالاترین NPV تجمعی است را پیشنهاد می‌دهند. بر اساس نتایج به دست آمده از مدل‌های عددی مختلف در حالت‌های دو و سه بعدی، میزان انطباق نتایج این الگوریتم‌ها با الگوریتم تئوری گراف لرچ و گروسمن بسیار زیاد و به صورت تقریبی بالای ۹۶ درصد بوده است.

کلمات کلیدی: معدن روباز، محدوده بهینه نهایی، ارزش خالص فعلی، مدل‌سازی ریاضی، الگوریتم

ابتکاری

لیست مقالات مستخرج از رساله:

مقالات ژورنالی:

- ارائه یک الگوریتم ابتکاری به منظور تعیین محدوده نهایی معادن روباز با هدف بیشینه سازی ارزش خالص فعلی؛ میثم سالکی، رضا کاکایی، محمد عطایی؛ مجله علمی-پژوهشی روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن (پذیرفته شده).
- ارائه مدل ریاضی برای بهینه سازی محدوده نهایی معادن روباز همزمان باز تعیین ترتیب استخراج بلوک‌ها؛ میثم سالکی، رضا کاکایی، محمد عطایی؛ مجله علمی-پژوهشی مهندسی منابع معدنی؛ دوره سوم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷، صفحات ۱۵-۳۱.
- Mathematical relationship between ultimate pit limits generated by discounted and undiscounted block value maximization in open pit mining; **Saleki, M., Kakaie, R., & Ataei, M.** (2019). Journal of Sustainable Mining (Accepted).
- A non-monetary valuation system for open pit mine design; **Meisam Saleki, Reza Kakaie, Mohammad Ataei; International Journal of Mining and Geo-Engineering (IJMGE)** (Revised-Under Review).

مقالات کنفرانسی:

- خصوصیات یک روش مناسب برای طراحی محدوده بهینه نهایی در معادن روباز؛ میثم سالکی، رضا کاکایی، محمد عطایی؛ چهارمین همایش ملی معادن روباز، دانشگاه شهید باهنر کرمان، اردیبهشت ۱۳۹۶.
- مدل ریاضی صفر و یکی تعیین همزمان محدوده بهینه نهایی و ترتیب بهینه استخراج بلوک‌های معادن روباز؛ میثم سالکی، رضا کاکایی، محمد عطایی؛ اولین کنفرانس ملی مدلسازی در مهندسی معدن و علوم وابسته، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) قزوین، اردیبهشت ۱۳۹۷ (یکی از مقالات برتر کنفرانس).

فهرست مطالب

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- تعریف مسئله	۵
۱-۳- ضرورت تحقیق	۶
۱-۴- هدف از تحقیق	۷
۱-۵- فرض‌های تحقیق	۸
۱-۶- ساختار رساله	۸

فصل دوم

پیشینه موضوع

۱-۱- مقدمه	۱۲
۱-۲- تعیین محدوده نهایی به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی	۱۳
۱-۳- رویکردهای مورد استفاده در حل بهینه‌سازی محدوده نهایی	۱۴
۱-۴- الگوریتم‌های تعیین محدوده نهایی	۱۵
۱-۴-۱- الگوریتم‌های ابتکاری	۱۸
۱-۴-۲- الگوریتم‌های ریاضی	۲۰
۱-۴-۳- الگوریتم‌های فراابتکاری	۲۴
۱-۵- روش ایده‌آل برای حل مسئله محدوده نهایی	۲۵
۱-۶- برنامه‌ریزی تولید	۲۷
۱-۶-۱- الگوریتم‌های ابتکاری	۲۹

۳۰	۲-۶-۲- الگوریتم‌های فراابتکاری
۳۱	۲-۶-۳- روش‌های ریاضی
۳۶	۲-۷-۷- روش‌های حل مسئله محدوده نهایی با هدف حداکثر کردن NPV
۳۸	۲-۷-۱- الگوریتم پویای هوشمند
۴۲	۲-۷-۲- روش لاتوری و گولوسینسکی
۴۵	۲-۷-۳- مقایسه دو روش "وانگ و سویم" و "لاتوری-گولوسینسکی"
۴۵	۲-۸-۸- عدم قطعیت‌های اقتصادی و زمین‌شناسی
۵۰	۲-۹-۹- جمع‌بندی

فصل سوم

مدل‌سازی ریاضی تعیین محدوده نهایی با بیشینه‌سازی NPV

۵۴	۳-۱-۱- مقدمه
۵۴	۳-۲-۲- مدل‌سازی مسئله محدوده نهایی با هدف حداکثرسازی NPV
۵۶	۳-۲-۱- برنامه‌ریزی عدد صحیح و صفر و یک
۷۴	۳-۲-۲- برنامه‌ریزی صفر و یکی
۷۸	۳-۲-۳- زودترین و دیرترین زمان ممکن برای استخراج یک بلوک
۸۷	۳-۲-۴- لحاظ کردن محدودیت‌های عیاری
۹۶	۳-۳-۳- نسبت اندازه محدوده LG و محدوده دارای بالاترین NPV
۱۱۵	۳-۴-۴- جمع‌بندی

فصل چهارم

الگوریتم‌های ابتکاری تعیین محدوده نهایی با بیشینه‌سازی NPV

۱۱۸	۴-۱-۱- مقدمه
۱۱۸	۴-۲-۲- منطق مورد نیاز برای راه حل مناسب

۱۲۱	..... ۳-۴- الگوریتم اول
۱۲۹	..... ۴-۴- الگوریتم دوم
۱۳۸	..... ۵-۴- الگوریتم سوم
۱۴۸	..... ۶-۴- مدل بلوکی دو بعدی
۱۴۹	..... ۴-۶-۱- استفاده از الگوریتم اول
۱۵۳	..... ۴-۶-۲- استفاده از الگوریتم دوم
۱۵۵	..... ۴-۶-۳- استفاده از الگوریتم سوم
۱۵۸	..... ۴-۶-۴- مقایسه سه الگوریتم در این مدل
۱۵۹	..... ۴-۷-۱- پیاده‌سازی الگوریتم‌ها در مدل سه بعدی
۱۵۹	..... ۴-۷-۱- مدل بلوکی سه بعدی مثال اول
۱۶۳	..... ۴-۷-۲- مدل بلوکی سه بعدی مثال دوم
۱۷۱	..... ۴-۸- مقایسه الگوریتم‌ها و کارآیی آن‌ها
۱۷۳	..... ۴-۹- جمع‌بندی

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱۷۶	..... ۵-۱- نتایج
۱۷۸	..... ۵-۲- پیشنهادها
۱۷۹	..... ۶- فهرست منابع به ترتیب حروف الفبا

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲-۱- برخی الگوریتم‌های ارائه شده برای تعیین محدوده نهایی ۱۷
- جدول ۲-۲-۲- ویژگی‌های یک روش ایده‌آل برای تعیین محدوده نهایی معدن روباز ۲۷
- جدول ۳-۲-۳- مقایسه دو روش وانگ و سویم با حالت ایده‌آل یک روش تعیین محدوده نهایی ۴۶
- جدول ۱-۳-۱- محاسبه ارزش خالص فعلی تجمعی مدل بلوکی فرضی ۷۲
- جدول ۲-۳-۲- محاسبه اندازه فضای بهینه جستجوی ترتیب بهینه بلوک‌های شکل ۳-۱۴ ۸۵
- جدول ۳-۳-۳- ترتیب بهینه بلوک‌ها، سود و ارزش خالص فعلی تجمعی آن (بدون رعایت محدودیت عیاری) ۹۳
- جدول ۴-۳-۴- ترتیب بهینه بلوک‌ها، سود و ارزش خالص فعلی تجمعی آن (با رعایت محدودیت عیاری). ۹۵
- جدول ۵-۳-۵- مقادیر سود تنزیل نشده و تنزیل شده و مقادیر تجمعی آن‌ها با نرخ بهره ۱۵ درصد برای شکل ۳-۱۹ ۹۹
- جدول ۶-۳-۶- مقادیر سود تنزیل نشده و تنزیل شده و مقادیر تجمعی آن‌ها با نرخ بهره ۵ درصد ۱۰۰
- جدول ۷-۳-۷- ترتیب بهینه بلوک‌های یک مدل فرضی پس از محدوده نهایی با سود حداکثر ۱۰۵
- جدول ۸-۳-۸- مجموعه‌ها و پارامترهای مورد استفاده ۱۰۵
- جدول ۹-۳-۹- مجموعه‌ها و پارامترهای مورد استفاده ۱۱۰
- جدول ۱-۴-۱- مقایسه نتایج الگوریتم‌های سه‌گانه و رتبه‌بندی آن‌ها بر اساس نتایج به دست آمده ۱۵۹
- جدول ۲-۴-۲- مشخصات مدل بلوکی اول ۱۶۰
- جدول ۳-۴-۳- مشخصات مدل بلوکی دوم ۱۶۴

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- تقسیم بندی روشهای طراحی معادن روباز بر اساس نوع ویژگی پایه‌ای ۱۶
- شکل ۲-۲- تقسیم بندی رویکردها و روش‌های استفاده شده در تعیین محدوده نهایی معدن روباز..... ۱۶
- شکل ۳-۲- گراف مستقیم برای یک مدل دو بعدی ۲۱
- شکل ۴-۲- روند طراحی و برنامه‌ریزی استراتژیک معدن روباز ۲۸
- شکل ۵-۲- ترتیب استخراج بلوک‌های یک مدل فرضی ۲۸
- شکل ۶-۲- مفهوم مخروط معکوس برای یک بلوک ۳۰
- شکل ۷-۲- روند حذف بلوک‌های باطله اضافی از طراحی ۳۹
- شکل ۸-۲- نمودار تطبیقی فازبندی به روش‌های پارامتری کردن و ابتکاری وانگ و سویم با مقایسه عیار فازها ۴۰
- شکل ۹-۲- نمودار تطبیقی فازبندی به روش‌های پارامتری کردن و ابتکاری وانگ و سویم با مقایسه تعداد بلوک‌های ماده معدنی فازها ۴۱
- شکل ۱۰-۲- زمان بندی پیت‌ها برای دستیابی به بالاترین NPV ۴۱
- شکل ۱۱-۲- مدل بلوکی فرضی ۴۳
- شکل ۱۲-۲- محدوده نهایی به دست آمده برای مدل فرضی از روش لرچ و گروسمن ۴۴
- شکل ۱۳-۲- محدوده نهایی به دست آمده برای مدل فرضی از روش لاتوری و گولوسینسکی ۴۴
- شکل ۱-۳- فضای جستجوی کامل برای کل کانسار ۵۵

- شکل ۳-۲- تشکیل BPP و محدود کردن فضای جستجو ۵۶
- شکل ۳-۳- محورهای مختصات x ، y و z ۵۶
- شکل ۳-۴- فرآیند کلی مدل‌سازی ریاضی مسئله تعیین محدوده نهایی و خطی‌سازی آن ۶۱
- شکل ۳-۵- مدل بلوکی دو بعدی فرضی ۶۳
- شکل ۳-۶- BPP برای مدل دو بعدی شکل ۳-۵ ۶۴
- شکل ۳-۷- تعیین محدوده بهینه نهایی و ترتیب بهینه استخراج بلوک‌های مدل شکل ۳-۶ در یک مرحله ۶۷
- شکل ۳-۸- تعیین ترتیب بهینه کل بلوک‌های BPP برای یافتن محدوده بهینه نهایی در مرحله اول ۷۰
- شکل ۳-۹- تعیین محدوده بهینه نهایی در مرحله دوم و ترتیب بهینه بلوک‌ها ۷۲
- شکل ۳-۱۰- نمودار تجمعی ارزش خالص فعلی و نقطه حداکثر آن ۷۳
- شکل ۳-۱۱- مخروط رو به بالا برای یک بلوک در افق ۳ ۸۰
- شکل ۳-۱۲- زودترین زمان ممکن برای استخراج یک بلوک در افق ۳ ۸۰
- شکل ۳-۱۳- مفهوم دیرترین زمان استخراج یک بلوک با مختصات (۱,۶) ۸۲
- شکل ۳-۱۴- مقادیر زودترین و دیرترین زمان (ترتیب) استخراج در یک مدل بلوکی دو بعدی ۸۳
- شکل ۳-۱۵- فرآیند بهینه‌سازی شده برای تعیین محدوده نهایی با هدف حداکثرسازی NPV ۸۶
- شکل ۳-۱۶- مدل بلوکی فرضی زمین‌شناسی (نمایانگر محتوای فلز هر بلوک) ۹۱
- شکل ۳-۱۷- مدل بلوکی فرضی اقتصادی ۹۱

- شکل ۳-۱۸- ترتیب بهینه استخراج بلوک‌های مدل شکل ۳-۱۶ بدون رعایت محدودیت عیاری ۹۱
- شکل ۳-۱۹- محدوده حداکثر سود و حداکثر NPV برای مدل شکل ۳-۱۶ (بدون رعایت محدودیت عیاری) ۹۴
- شکل ۳-۲۰- محدوده حداکثر سود و حداکثر NPV برای مدل شکل ۳-۱۶ (با رعایت محدودیت عیاری) ۹۴
- شکل ۳-۲۱- مدل بلوکی فرضی ۹۸
- شکل ۳-۲۲- محدوده نهایی مدل فرضی شکل ۳-۲۱ با سود حداکثر ۹۸
- شکل ۳-۲۳- محدوده نهایی شکل ۳-۲۱ با بیشترین NPV ۹۸
- شکل ۳-۲۴- نمودار مقادیر تجمعی سود تنزیل نشده تجمعی و NPV تجمعی ۹۹
- شکل ۳-۲۵- محدوده نهایی شکل ۳-۲۱ با نرخ بهره ۵ درصد ۱۰۰
- شکل ۳-۲۶- مدل بلوکی فرضی دو بعدی ۱۱۳
- شکل ۳-۲۷- BPP برای مدل بلوکی شکل ۳-۲۶ ۱۱۴
- شکل ۳-۲۸- محدوده LG برای مدل بلوکی شکل ۳-۲۶ ۱۱۴
- شکل ۳-۲۹- ترتیب بهینه استخراج بلوک‌های BPP مدل بلوکی فرضی شکل ۳-۲۶ ۱۱۴
- شکل ۳-۳۰- محدوده بهینه نهایی مدل بلوکی شکل ۳-۲۶ با نرخ بهره ۱۵ درصد ۱۱۵
- شکل ۴-۱- مراحل کلی یک الگوریتم مناسب برای تعیین محدوده نهایی ۱۲۰
- شکل ۴-۲- مراحل الگوریتم اول ۱۲۲
- شکل ۴-۳- یک مدل بلوکی اقتصادی و وزن مکانی بلوک‌های آن ۱۲۳

- شکل ۴-۴- بلوک‌های قابل استخراج..... ۱۲۴
- شکل ۴-۵- مدل بلوکی فرضی ۱۲۵
- شکل ۴-۶- مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای اجرای الگوریتم ابتکاری بر روی مدل بلوکی شکل ۴-۵ ۱۲۶
- شکل ۴-۷- مراحل اجرای الگوریتم اول برای مدل بلوکی شکل ۴-۶ ۱۲۷
- شکل ۴-۸- نمودار NPV تجمعی بر اساس ترتیب به دست آمده از الگوریتم اول ۱۲۸
- شکل ۴-۹- ترتیب بلوک‌ها بر اساس الگوریتم اول و حل تابع هدف..... ۱۲۸
- شکل ۴-۱۰- وزن مکانی به دست آمده از بلوک‌های مثبت عمیق ۱۲۹
- شکل ۴-۱۱- وزن مکانی به دست آمده از بلوک‌های مثبت نزدیکتر به راس مخروط معکوس ۱۳۰
- شکل ۴-۱۲- افق نزدیک‌ترین بلوک‌های ماده معدنی به راس مخروط معکوس (بلوک‌های مثبت عمیق) ۱۳۰
- شکل ۴-۱۳- افق نزدیکترین بلوک‌های ماده معدنی به راس مخروط معکوس (بلوک‌های مثبت سطحی) ۱۳۰
- شکل ۴-۱۴- الگوریتم ابتکاری دوم ۱۳۳
- شکل ۴-۱۵- مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای اجرای الگوریتم ابتکاری بر روی مدل بلوکی شکل ۴-۵ ۱۳۴
- شکل ۴-۱۶- مراحل اجرای الگوریتم دوم برای مدل بلوکی شکل ۴-۱۵ ۱۳۶
- شکل ۴-۱۷- ترتیب استخراج به دست آمده از الگوریتم دوم برای مدل بلوکی شکل ۴-۱۵ ۱۳۷
- شکل ۴-۱۸- نمودار NPV تجمعی بر اساس ترتیب به دست آمده از الگوریتم دوم ۱۳۷

- شکل ۴-۱۹- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم دوم برای مدل بلوکی شکل ۴-۱۵ ۱۳۷
- شکل ۴-۲۰- حذف بلوک‌های تعیین تکلیف شده از مدل بلوکی ۱۳۹
- شکل ۴-۲۱- الگوریتم ابتکاری سوم ۱۴۱
- شکل ۴-۲۲- تعداد بلوک‌های مثبت درون مخروط معکوس بلوک‌های مثبت مدل شکل ۴-۵ ۱۴۲
- شکل ۴-۲۳- سطح توپوگرافی به روزرسانی شده پس از مرحله اول و بلوک‌های نامزد ۱۴۳
- شکل ۴-۲۴- ترتیب بلوک‌ها پس از مرحله دوم ۱۴۳
- شکل ۴-۲۵- بروزرسانی سطح توپوگرافی پس از مرحله دوم و بلوک‌های نامزد ۱۴۴
- شکل ۴-۲۶- ترتیب بلوک‌ها پس از مرحله سوم ۱۴۴
- شکل ۴-۲۷- بروزرسانی سطح توپوگرافی پس از مرحله سوم و بلوک‌های نامزد ۱۴۵
- شکل ۴-۲۸- ترتیب بلوک‌ها پس از مرحله چهارم ۱۴۶
- شکل ۴-۲۹- بروزرسانی سطح توپوگرافی پس از مرحله چهارم و بلوک‌های نامزد ۱۴۶
- شکل ۴-۳۰- ترتیب بلوک‌ها پس از اتمام مراحل الگوریتم ۱۴۷
- شکل ۴-۳۱- محاسبات مربوط به مراحل انجام الگوریتم برای مدل بلوکی فرضی ۵-۵ ۱۴۷
- شکل ۴-۳۲- نمودار NPV تجمعی بر اساس ترتیب به دست آمده از الگوریتم سوم ۱۴۸
- شکل ۴-۳۳- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم سوم ۱۴۸
- شکل ۴-۳۴- مدل بلوکی دو بعدی ۱۴۹
- شکل ۴-۳۵- وزن مکانی (PW) بلوک‌های درون BPP ۱۴۹
- شکل ۴-۳۶- ترتیب استخراج بلوک‌ها بر اساس الگوریتم اول ۱۵۰

- شکل ۴-۳۷- نمودار NPV تجمعی به دست آمده از الگوریتم اول ۱۵۰
- شکل ۴-۳۸- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم اول با نرخ بهره ۳ درصد ۱۵۱
- شکل ۴-۳۹- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم اول با نرخ بهره صفر ۱۵۱
- شکل ۴-۴۰- ترتیب بهینه ریاضی محدوده بیشینه NPV براساس نتایج تابع هدف ۱۵۲
- شکل ۴-۴۱- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم LG ۱۵۳
- شکل ۴-۴۲- مقادیر NOI برای بلوکهای درون BPP ۱۵۳
- شکل ۴-۴۳- ترتیب به دست آمده از طریق الگوریتم دوم ۱۵۴
- شکل ۴-۴۴- نمودار NPV تجمعی به دست آمده از طریق الگوریتم دوم ۱۵۴
- شکل ۴-۴۵- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم دوم با نرخ بهره ۳ درصد ۱۵۵
- شکل ۴-۴۶- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم دوم با نرخ بهره صفر ۱۵۵
- شکل ۴-۴۷- تعداد بلوکهای مثبت درون مخروط معکوس هر بلوک مثبت ۱۵۶
- شکل ۴-۴۸- ترتیب بلوکها به دست آمده از الگوریتم سوم ۱۵۶
- شکل ۴-۴۹- نمودار NPV تجمعی بر اساس الگوریتم سوم با نرخ بهره ۳ درصد ۱۵۷
- شکل ۴-۵۰- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم سوم با نرخ بهره ۳ درصد ۱۵۸
- شکل ۴-۵۱- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم سوم با نرخ بهره صفر ۱۵۸
- شکل ۴-۵۲- نمودار NPV تجمعی به دست آمده از الگوریتم اول برای مدل بلوکی
سه بعدی اول ۱۶۰

- شکل ۴-۵۳- نمای افقی محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم اول برای مدل بلوکی
سه بعدی اول.....۱۶۱
- شکل ۴-۵۴- نمودار NPV تجمعی به دست آمده از الگوریتم دوم برای مدل بلوکی
سه بعدی اول.....۱۶۱
- شکل ۴-۵۵- نمای افقی محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم دوم برای مدل بلوکی
سه بعدی اول.....۱۶۲
- شکل ۴-۵۶- نمودار NPV تجمعی به دست آمده از الگوریتم ابتکاری سوم برای مدل بلوکی
سه بعدی اول.....۱۶۲
- شکل ۴-۵۷- نمای افقی محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم ابتکاری سوم برای مدل بلوکی
سه بعدی اول.....۱۶۳
- شکل ۴-۵۸- نمای افقی محدوده نهایی مدل بلوکی دوم با استفاده از الگوریتم اول.....۱۶۶
- شکل ۴-۵۹- منحنی NPV تجمعی براساس ترتیب استخراج طبق نتایج الگوریتم اول.....۱۶۷
- شکل ۴-۶۰- منحنی NPV تجمعی بر اساس ترتیب استخراج طبق نتایج الگوریتم دوم.....۱۶۷
- شکل ۴-۶۱- نمای افقی محدوده نهایی مدل بلوکی دوم با استفاده از الگوریتم دوم.....۱۶۸
- شکل ۴-۶۲- منحنی NPV تجمعی براساس ترتیب استخراج طبق نتایج الگوریتم سوم.....۱۶۹
- شکل ۴-۶۳- نمای افقی محدوده نهایی مدل بلوکی دوم با استفاده از الگوریتم سوم.....۱۷۰

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

معدن کاری یکی از قدیمی ترین حرفه‌هایی است که انسان از ابتدای حیاتش بنا بر نیازش به آن اشتغال داشته است. این حرفه در طول تاریخ در سیر تکامل خود به یک علم تبدیل شده است و روز به روز به وسعت آن افزوده گشته و می‌گردد. به طور کلی مراحل معدن کاری که منجر به تولید ماده خام آماده فرآوری می‌شود را به صورت خلاصه می‌توان به مراحل پی‌جویی، اکتشاف، تجهیز و آماده‌سازی، بهره‌برداری و بازسازی تقسیم نمود.

از بین روش‌های مختلف معدن کاری، معادنی که به روش روباز استخراج می‌شوند سهم عمده‌ای از تولیدات معدنی دنیا را به خود اختصاص داده‌اند. برای این معادن طراحی‌های مختلفی انجام می‌شود. مهم‌ترین این طراحی‌ها محدوده بهینه نهایی و برنامه‌ریزی تولید است. به صورت عمده این طراحی‌ها به منظور بهینه‌سازی پارامتر یا پارامترهای خاصی به ویژه برای سوددهی اقتصادی انجام می‌شوند.

یکی از تصمیم‌های ضروری، پس از قطعی شدن تصمیم استخراج، تعیین روش استخراج است. روش‌های استخراج به سه دسته کلی روش‌های هیدرولیکی و گمانه‌ای، روش‌های سطحی و روش‌های زیرزمینی تقسیم می‌شوند (SME, 2011). از این بین، قسمت اعظم مواد معدنی دنیا به صورت سطحی استخراج می‌شوند که روش روباز به عنوان یکی از این روش‌ها سهم به‌سزایی را به خود اختصاص داده است. با گذشت چندین دهه از استخراج مواد معدنی پرعیار، کانسارهایی که امروزه باید استخراج شوند دارای عیار کمتر و حجم بزرگ‌تری هستند. سهم گسترده تناژ استخراج روباز نسبت به دیگر روش‌های معدن کاری، اهمیت دقت در طراحی‌های آن را به محققان گوش‌زد می‌کند. از طرف دیگر به علت عیار پایین و بزرگ‌تر بودن بسیاری از منابعی که امروزه باید استخراج گردند، نقش تحلیل اقتصادی پروژه‌های معدنی روباز برجسته‌تر شده است. معدن کاری کانسارهای بزرگ، امروزه به هزینه سرمایه‌گذاری زیادی نیازمند است و در صورت اشتباه در ارزیابی‌های فنی و اقتصادی، ورشکستگی‌های بزرگی را به معدن کاران تحمیل می‌کند.

هر ذخیره معدنی که با روش روباز استخراج می‌شود، دارای یک محدوده‌ای است که در آن، استخراج با روش روباز اقتصادی است و خارج از آن محدوده استخراج با روش روباز از نظر اقتصادی میسر نخواهد بود. به آن محدوده از ذخیره معدنی که استخراج با روش روباز، از توجیه فنی و اقتصادی برخوردار است محدوده نهایی معدن می‌گویند. پس از آنجایی که اقتصاد رکن اصلی هر پروژه معدنی است، باید مرزی فیزیکی را که درون آن عملیات معدن‌کاری روباز، اقتصادی است مشخص کرد.

محدوده نهایی معدن را می‌توان به دو روش کلی دستی و کامپیوتری تعیین کرد. روش دستی که اصطلاحاً به آن روش گرافیکی نیز می‌گویند، روشی زمان‌بر و خطاپذیر است و به مقدار زیاد به قضاوت و تجربه طراحان معدن بستگی دارد و بر این اساس در چند دهه گذشته به جز در موارد استثنا مثل ذخائر کوچک استفاده نمی‌شود (اصانلو، ۱۳۸۴). در روش‌های کامپیوتری ابتدا از کامپیوتر برای مدل‌سازی کانسار بهره گرفته می‌شود و سپس با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده نهایی بهینه طراحی می‌شود.

در عملیات معدن‌کاری زمانی که هدف، دستیابی به مقداری بهینه از یک پارامتر باشد، محدوده بهینه نهایی تعریف و طراحی می‌شود. وقتی صحبت از محدوده بهینه می‌شود باید مهندس طراح، پارامتری را که هدف بهینه‌سازی است مشخص کند. بر این اساس، بهینه‌سازی محدوده نهایی باید با هدف دسترسی به یک یا چند هدف زیر انجام پذیرد (اصانلو، ۱۳۸۴):

- بیشینه کردن ارزش اقتصادی پیت
- بیشینه کردن ارزش یک تن از محصول قابل فروش
- بیشینه کردن عمر معدن
- بیشینه کردن مقدار فلز موجود در پیت

از میان معیارهای فوق بیشینه کردن ارزش اقتصادی بالاخص ارزش خالص فعلی، مهم‌ترین هدف در طراحی معادن روباز محسوب می‌شود.

پس از مراحل مدل‌سازی و تعیین محدوده بهینه نهایی، نوبت به برنامه‌ریزی تولید^۱ می‌رسد. برنامه‌ریزی تولید معدن را می‌توان به صورت "تعیین ترتیب استخراج بلوک‌های معدن، برای رسیدن به بالاترین ارزش خالص فعلی (NPV)، با در نظر گرفتن نرخ تولید، ترکیب عیار و شیب" تعریف کرد (Whittle, 1989). مانند هر پروژه اقتصادی و به صورت ایده‌آل باید پیت نهایی با هدف حداکثرسازی NPV تعیین شود که متأسفانه با گذشت بیش از ۴ دهه، این هدف هنوز محقق نشده است (Osanloo et al., 2008). دلیل این مسئله را به این صورت می‌توان بیان کرد (Whittle, 1989):

"مرز نهایی پیت را نمی‌توان تعیین کرد تا زمانی که ارزش اقتصادی بلوک‌ها مشخص گردد. ارزش بلوک‌ها را نمی‌توان تعیین کرد تا زمانی که ترتیب استخراج معین شود و ترتیب استخراج نمی‌تواند معلوم گردد تا زمانی که مرز نهایی پیت در دسترس و معلوم باشد."

راه حل معمول برای این مشکل تقسیم آن به چند زیرمسئله مانند تعیین محدوده نهایی و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی‌های بلند مدت، میان مدت و کوتاه مدت است. برای حل مسئله مذکور، ابتدا مدل بلوکی زمین‌شناسی طراحی می‌شود. با استفاده از فرضیات مربوط به ظرفیت‌های تولید سیستم معدن‌کاری و تخمین هزینه‌ها و قیمت ماده معدنی، مدل بلوکی اقتصادی ساخته می‌شود. سپس محدوده نهایی با هدف رسیدن به حداکثر جریان نقدینگی تنزیل نشده (سود) با استفاده از الگوریتمی مانند لرچ و گروسمن (Lerchs and Grossman, 1965)، که محدوده دارای حداکثر سود واقعی را تعیین می‌کند، طراحی می‌گردد. درون پیت نهایی پوش‌بک‌هایی طراحی می‌شود که توده ماده معدنی را به پیت‌های

^۱ Production Planning

پوسته‌پوسته‌ای از کوچک‌ترین پیت با بیشترین ارزش تا بزرگ‌ترین پیت با کم‌ترین ارزش، تقسیم می‌کند. این پوش‌بک‌ها به عنوان راهنما در خلال برنامه‌ریزی سالانه عمل می‌کنند (Osanloo et al., 2008).

پس به طور خلاصه می‌توان گفت، روش‌های فعلی تعیین محدوده نهایی از پارامتر سود تنزیل نشده برای بهینه‌سازی استفاده می‌کنند. اساساً ماهیت ارزش اقتصادی پولی، با مفهوم نرخ تنزیل گره خورده است و چون ارزش زمانی پول در سال‌های مختلف عمر معدن یکسان نیست، باید از NPV به عنوان پارامتر هدف بهینه‌سازی استفاده شود. به بیان دیگر، تعیین محدوده بهینه نهایی با هدف حداکثرسازی NPV، همان انجام همزمان طراحی محدوده بهینه نهایی و برنامه‌ریزی تولید است.

۱-۲- تعریف مسئله

محدوده نهایی یکی از مهمترین طراحی‌های یک معدن روباز است که تلاش‌های زیادی برای انجام آن صورت گرفته است. طراحی محدوده نهایی باید با توجه به ارزش زمانی پول صورت پذیرد که به تعبیری انجام همزمان تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید است و طبق اعتقاد معمول این امر ناممکن است. در دهه‌های گذشته، تلاش‌هایی برای دستیابی به الگوریتمی که محدوده نهایی با حداکثرسازی NPV به دست بیاورد، صورت گرفته است. با توجه به مثال‌هایی که برخی محققین ارائه نموده‌اند، می‌توان گفت که اگر ابتدا محدوده نهایی بر اساس حداکثر کردن سود تنزیل نشده به دست آید و سپس روی این محدوده به دست آمده، برنامه‌ریزی تولید انجام گیرد، هیچ تضمینی وجود ندارد که NPV به دست آمده، اولاً مثبت و اقتصادی باشد و ثانیاً بالاترین مقدار ممکن باشد. از آنجا که منطقی‌ترین راه برای تعیین محدوده نهایی حداکثرسازی NPV است تلاش‌های جدید باید به سمت حل این مسئله بر مبنای حداکثرسازی NPV قرار گیرد.

پس عملاً مسئله به دست آوردن محدوده بهینه نهایی با هدف حداکثرسازی NPV، به چند گام یا زیر مسئله یعنی توسعه مدل ریاضی و الگوریتم حل محدوده بهینه نهایی مبتنی بر حداکثرسازی NPV تقسیم می‌شود.

۱-۳- ضرورت تحقیق

محدوده نهایی تاثیر مستقیم و قابل توجهی بر اقتصاد پروژه استخراج معدن، تاسیسات وابسته و وضعیت جانمایی تاسیسات دارد. چون در طول زمان و در دنیای اقتصاد ارزش واحد پولی تنزیل می‌شود، اجباراً در تحلیل عملیات معدن کاری نیز مانند هر پروژه اقتصادی دیگر، ارزش زمانی پول باید در محاسبات این پروژه عظیم لحاظ گردد. از آن جا که این عملیات دارای حجم قابل توجهی از گردش مالی است، ضروری است تا با تعیین محدوده بر اساس بیشینه‌سازی NPV به جای سود تنزیل نشده از اشتباه در تخمین جریان نقدینگی پروژه و توجیه اقتصادی بودن آن پیش‌گیری شود. برخی مانند ویتل^۱ بیان کرده‌اند که نمی‌توان به صورت همزمان ترتیب استخراج، محدوده نهایی و ارزش پولی بلوک‌ها را تعیین کرد (Whittle, 1989). در مقابل این استدلال می‌توان گفت مسئله تعیین همزمان محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید در صورتی که بر اساس مدل‌سازی ریاضی مناسب انجام شود قابل حل خواهد بود. همچنین از آن جایی که حل مدل‌های ریاضی بزرگ مقیاس مانند تعیین محدوده بهینه نهایی با استفاده از روش‌های ریاضی بسیار پیچیده و زمان‌بر است، ضروری است که برای حل این مسئله از الگوریتم‌های ابتکاری یا فراابتکاری استفاده شود.

^۱ Whittle

۴-۱- هدف از تحقیق

یکی از منطقی‌ترین راه‌ها برای تعیین محدوده نهایی معدن روباز حداکثر کردن NPV است. در طراحی معدن روباز روش‌های فعلی به دو مرحله "تعیین محدوده با هدف حداکثر کردن سود" و "برنامه‌ریزی تولید در محدوده نهایی بدست آمده با هدف بیشینه‌سازی NPV" تقسیم می‌شود. در این تحقیق به مسئله "تعیین محدوده نهایی با هدف حداکثر کردن ارزش خالص فعلی" پرداخته خواهد شد. دستیابی به یک الگوریتم عملی و کارآمد برای تعیین محدوده نهایی با توجه به زمان استخراج بلوک‌ها هدف کلی این تحقیق است. از طرف دیگر، توسعه تابع هدف تعیین محدوده بهینه نهایی به گونه‌ای که مسئله را با توجه به حداکثرسازی NPV مدل کند، هدف دیگر تحقیق است. این هدف، مستقلاً دارای اهمیت است زیرا می‌تواند به عنوان کلید ورود به تحقیقات دیگر نیز مورد استفاده قرار گیرد.

بررسی امکان به‌کارگیری رویکرد ابتکاری مبتنی بر خلاقیت، اصول منطقی مسئله و فلسفه طراحی معدن روباز و در ادامه ارائه راه حلی ساده و قابل فهم برای مهندسان طراح برای تعیین محدوده نهایی به منظور بیشینه‌سازی NPV یکی دیگر از اهداف این تحقیق خواهد بود.

به طور خلاصه باید گفت که در این تحقیق تلاش خواهد شد که یک روش کاملاً مشخص و همگن برای طراحی محدوده نهایی ارائه شود. در این مسیر بر اساس اصول اولیه و فلسفه طراحی محدوده بهینه نهایی، گام‌های تابع هدف و نهایتاً الگوریتمی که مسئله اصلی را حل نماید، طی می‌شود. پس این تحقیق سعی در رسیدن به اهداف زیر را دارد:

الف) ارائه مدلی مناسب جهت تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید به صورت همزمان

ب) پیشنهاد الگوریتمی ابتکاری برای تعیین محدوده نهایی با هدف حداکثرسازی NPV

۱-۵- فرض‌های تحقیق

با توجه به اینکه مسئله محدوده نهایی معدن روباز یکی از پیچیده‌ترین مسائل بهینه‌سازی است، لازم است برای شروع تحقیق فرضیاتی در نظر گرفته شود. در این تحقیق برای رسیدن به یک الگوریتم برای حل همزمان مسئله محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- مدل بلوکی به صورت منظم و دارای بلوک‌های یکسان از نظر اندازه است.
- مدل بلوکی عیاری به عنوان ورودی مسئله استفاده می‌شود.
- کانسار یک فلزی است.
- تناژ استخراج سالانه در طول عمر معدن ثابت است.
- محدودیت مسئله، ظرفیت استخراج سالانه خواهد بود.
- معدن فروشنده کانسنگ استخراجی است و محدودیت‌های مربوط به فرآوری را ندارد.
- پارامترهای زمین‌شناسی قطعی در نظر گرفته می‌شود.
- روش ۱:۹ به عنوان محدودیت فنی استخراج استفاده می‌شود^۱.

۱-۶- ساختار رساله

این رساله علاوه بر فصل حاضر از چهار فصل دیگر به صورت زیر تشکیل شده است.

فصل دوم: در این فصل کلیات طراحی در معادن روباز و پیشینه موضوع طراحی محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید ارائه خواهد شد.

فصل سوم: در این فصل درباره موضوع مدل‌سازی ریاضی مسئله تعیین محدوده نهایی به منظور پیشینه‌سازی NPV بحث خواهد شد.

^۱ در این روش برای برداشت هر بلوک زیرین باید ۹ بلوک بلافاصله بالایی برداشته شود.

فصل چهارم: در این فصل برای حل مدل‌های ریاضی توسعه شده راه‌حلهایی ابتکاری در قالب الگوریتم‌های مختلف ارائه خواهد شد.

فصل پنجم: نهایتاً در این فصل نتیجه‌گیری و پیشنهادهای بیان خواهد شد.

فصل دوم

پیشینه موضوع

۲-۱- مقدمه

در روش روباز ابتدا کانسار به بلوک‌های منظمی تقسیم می‌شود. سپس برای کانسار محدوده نهایی تعیین می‌شود. بر این اساس الگوریتم‌های زیادی برای تعیین محدوده بهینه نهایی در معادن روباز معرفی شده‌اند که هدف اصلی همه آنها پیدا کردن مجموعه بلوک‌هایی است که اگر استخراج شوند "سود" به دست آمده تحت محدودیت‌های فنی و اقتصادی حداکثر می‌شود.

بر اساس تعریف فوق از محدوده بهینه، هر کدام از الگوریتم‌های ارائه شده دارای مزایا و معایبی هستند. مهم‌ترین ایراد وارده به برخی از این الگوریتم‌ها پیدا نکردن محدوده بهینه واقعی است. این الگوریتم‌ها را می‌توان در قالب رویکردهای ابتکاری، فراابتکاری و ریاضی دسته‌بندی کرد. اشتراک اکثر روش‌های موجود برای تعیین محدوده نهایی این است که به دنبال یافتن بالاترین سود تنزیل نشده‌اند. در این فصل به مرور این روش‌ها پرداخته می‌شود.

بر اساس فرآیند مرسوم فعلی، طراحان پس از تعیین محدوده نهایی به حل مسئله برنامه‌ریزی تولید می‌پردازند که به صورت اجمالی به مرور آن‌ها نیز پرداخته خواهد شد. سپس به روش‌هایی که همزمان به حل مسئله محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید، یا به عبارتی به دست‌آوردن محدوده نهایی با هدف حداکثر کردن NPV می‌پردازند اشاره می‌شود و بعد از آن درباره انواع عدم قطعیت در طراحی محدوده نهایی و راه حل‌های عیارمحور مدیریت عدم قطعیت اقتصادی که در روش‌های تعیین همزمان محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید استفاده شده است، بحث خواهد شد.

۲-۲- تعیین محدوده نهایی به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی

محدوده نهایی معدن روباز مرزی است که درون آن مقدار یک یا چند پارامتر به صورت منفرد یا همزمان حداکثر یا حداقل باشد. بر اساس این تعریف تعیین محدوده نهایی را باید یک مسئله بهینه‌سازی دانست. بر اساس هدف بهینه‌سازی نیز مدل ریاضی مورد نظر و محدودیت‌های آن تعیین می‌شود.

به طور کلی هدف بهینه‌سازی سود اقتصادی است. بنابراین تابع هدف مورد استفاده برای تعیین محدوده بهینه نهایی در دهه‌های گذشته به صورت رابطه زیر بیان شده است (Espinoza et al., 2013):

$$\text{Max } Z = \sum_{(i,j,k) \in OB} V_{ijk} \times x_{ijk} \quad (1-2)$$

Subject to:

$$x_{ijk} \leq x_{i'j'k'} \quad \forall (i, j, k) \in OB, (i', j', k') \in UB_{ijk} \quad (2-2)$$

که در این روابط:

i' و i اندیس‌های معرف در جهت محور شرقی غربی

j' و j اندیس‌های معرف در جهت محور شمالی جنوبی

k' و k اندیس‌های معرف در راستای عمودی

V_{ijk} ارزش اقتصادی بلوک ijk

OB مجموعه مختصات کل نقاط مرکز بلوک‌های کانسار

x_{ijk} متغیر تصمیم صفر و یکی بیان‌گر حضور (یک) و عدم حضور (صفر) بلوک ijk در محدوده نهایی

UB_{ijk} مجموعه مختصات نقاط مرکز بلوک‌های بلافاصله بالای بلوک ijk (۹ بلوک بالایی به ازای هر بلوک

در حالت سه بعدی و ۳ بلوک بالایی در حالت دو بعدی)

این مسئله به علت دارا بودن تعداد متغیر تصمیم و محدودیت زیاد در رده مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد. حل این نوع توابع هدف از طرق ریاضی بسیار زمان‌بر است. به همین دلیل روش‌های متنوعی با رویکردهای مختلف برای حل آن ارائه شده‌اند که در بخش‌های بعد به مرور آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۲-۳- رویکردهای مورد استفاده در حل بهینه‌سازی محدوده

نهایی

حل مسئله محدوده نهایی مانند دیگر مسائل بهینه‌سازی از روش‌های مختلفی قابل انجام است که باید خاطر نشان کرد که دقت رسیدن به جواب در روش‌های مختلف متفاوت است. دو دسته کلی از روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی شامل روش‌های دقیق^۱ و روش‌های تقریبی^۲ وجود دارد. روش‌های دقیق یا ریاضی راه حل‌های بهینه را به دست آورده و شرایط بهینگی را تضمین می‌نمایند. به عنوان نمونه از این الگوریتم‌ها می‌توان به برنامه‌ریزی پویا^۳ و الگوریتم شاخه و برش^۴ اشاره کرد. روش‌های دقیق برای ابعاد کوچک بعضی از مسائل بهینه‌سازی دشوار نیز قابل استفاده می‌باشند (فتاحی، ۱۳۹۰). برخی روش‌های ریاضی مانند روش تئوری گراف لرچ و گروسمن به طور دقیق مسئله محدوده نهایی را در حالت دو یا سه بعدی حل می‌کنند.

روش‌های تقریبی یا ابتکاری^۵ راه حل‌های با کیفیت بالا را در زمان معقولی تولید می‌نمایند اما تضمینی برای یافتن راه حل بهینه سراسری ندارند. روش‌های تقریبی را می‌توان به الگوریتم‌های ابتکاری خاص و فراابتکاری^۶ تقسیم نمود. الگوریتم‌های ابتکاری خاص برای حل یک مسئله خاص طراحی شده‌اند.

^۱ Exact Methods

^۲ Approximate Methods

^۳ Dynamic Programming

^۴ Branch and Cut

^۵ Heuristic

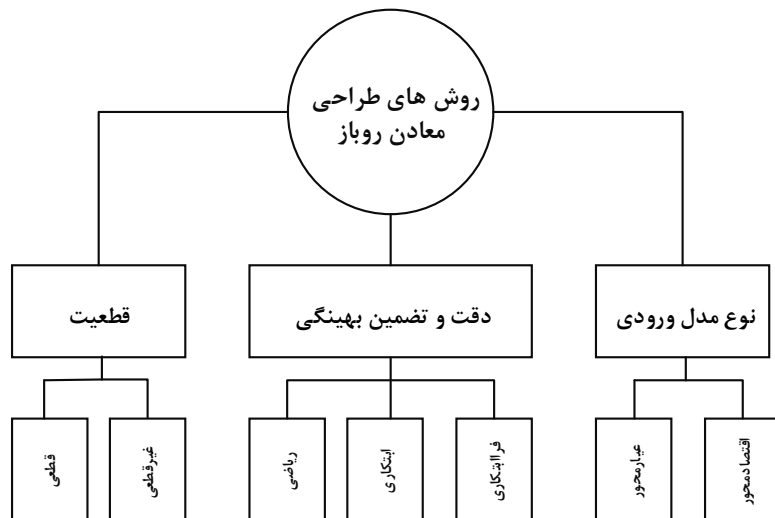
^۶ Meta-heuristic

الگوریتم‌های فراابتکاری الگوریتم‌هایی عمومی می‌باشند که برای حل اغلب مسائل بهینه‌سازی قابل استفاده می‌باشند (فتاحی، ۱۳۹۰). از طرف دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری، الگوریتم‌هایی هستند که بر هدایت ابتکاری یک الگوریتم سازنده یا جستجوی محلی متمرکز می‌شوند، به گونه‌ای که آن الگوریتم بتواند بر شرایط حساس (مانند فرار از بهینه محلی) غلبه کند (Rajabioun, 2011). بر اساس این تعریف از میان الگوریتم‌های تعیین محدوده نهایی الگوریتم‌هایی مثل مخروط شناور یا کروبوفا از دسته روش‌های ابتکاری خاص هستند که در این رساله به آن‌ها ابتکاری گفته می‌شود. همچنین روش‌هایی مثل کلونی مورچگان یا ژنتیک نیز از دسته روش‌های فراابتکاری می‌باشند که در بخش‌های بعدی مطالبی درباره بعضی از آن‌ها که برای تعیین محدوده نهایی یا برنامه‌ریزی تولید مورد استفاده قرار گرفته‌اند بیان خواهد شد.

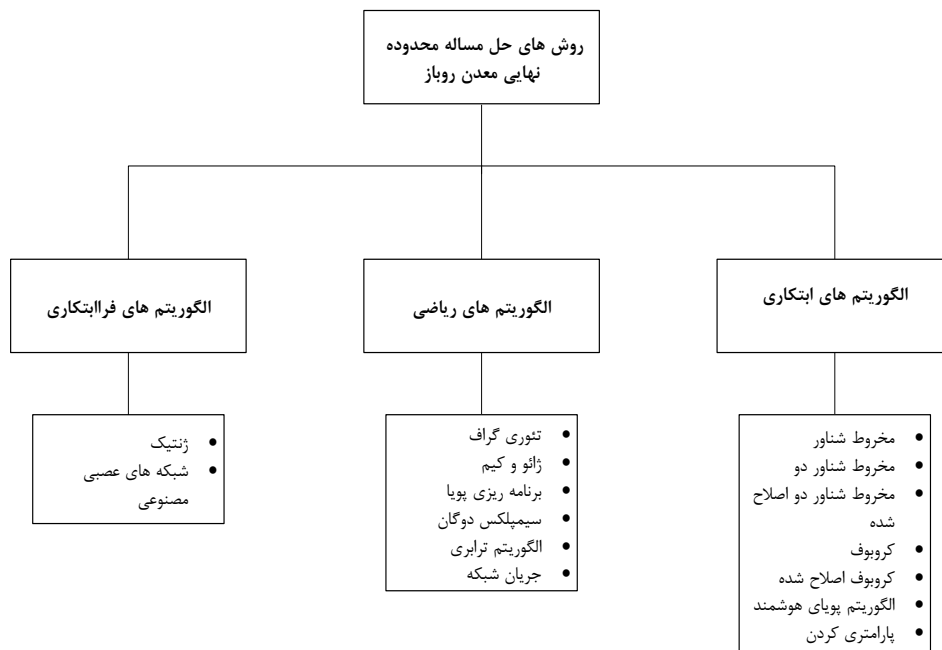
۲-۴- الگوریتم‌های تعیین محدوده نهایی

روش‌های تعیین محدوده بهینه نهایی و برنامه‌ریزی تولید براساس رویکردی که بر اساس آن توسعه داده شده‌اند قابل تقسیم بندی می‌باشند. به صورت عمده رویکردهای مورد استفاده را می‌توان بر اساس ویژگی‌هایی مانند دقت و تضمین بهینگی، قطعیت داده‌ها و مدل بلوکی مورد استفاده (عیاری یا اقتصادی) تقسیم‌بندی کرد. در یک تقسیم‌بندی بر اساس دقت جواب و تضمین بهینگی آن الگوریتم‌های ارائه شده به سه دسته ابتکاری، فراابتکاری و ریاضی تقسیم می‌شوند. از طرف دیگر بر اساس فرض اولیه درباره قطعیت داده‌های طراحی مانند داده‌های زمین‌شناسی و اقتصادی می‌توان روش‌ها را در دو دسته قطعی و غیرقطعی تقسیم کرد. همچنین بر اساس نوع مدل بلوکی مورد استفاده، روش‌ها در دو بخش روش‌های عیارمحور و اقتصادمحور توسعه داده شده‌اند. صورت کلی این تقسیم‌بندی در شکل ۲-۱ ارائه شده است. هر الگوریتم به صورت همزمان می‌تواند در یک زیرمجموعه از هر کدام از این دسته‌بندی‌ها قرار گیرد. به عنوان مثال روش مخروط شناور یک الگوریتم ابتکاری است که از مدل بلوکی اقتصادی استفاده می‌کند و

داده‌های عیاری و اقتصادی را قطعی در نظر می‌گیرد. در شکل ۲-۲ تقسیم‌بندی روش‌هایی که تاکنون برای حل مسئله محدوده نهایی معدن روباز به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی، استفاده شده‌اند بر اساس میزان دقت و تضمین بهینگی جواب نشان داده شده است. در جدول ۱-۲ مجموعه‌ای از الگوریتم‌های تعیین محدوده نهایی آورده شده است که در ادامه به توضیح این روش‌ها پرداخته می‌شود.



شکل ۱-۲- تقسیم بندی روش‌های طراحی معدن روباز بر اساس نوع ویژگی پایه‌ای



شکل ۲-۲- تقسیم بندی رویکردها و روش‌های استفاده شده در تعیین محدوده نهایی معدن روباز

جدول ۱-۲- برخی الگوریتم‌های ارائه شده برای تعیین محدوده نهایی

رویکرد	روش (عنوان)	ارائه- دهنده(گان)	سال ارائه	توضیحات
ریاضی	تئوری گراف (Lerchs and Grossman, 1965)	لرچ و گروسمن	۱۹۶۵	این روش رسیدن به جواب بهینه را تضمین می‌کند اما عدم توانایی در شیب‌های متغیر، پیچیدگی الگوریتم و زمان بر بودن آن از معایب این روش است. ژائو و کیم (۱۹۹۲) نیز روشی براساس تئوری گراف ارائه دادند.
	برنامه‌ریزی پویا (Lerchs and Grossman, 1965)	لرچ و گروسمن	۱۹۶۵	تنها در حالت دوبعدی قادر به پیدا کردن جواب بهینه است. جانسون و شارپ (۱۹۷۱) آن را به ۲٫۵ بعدی ارتقا دادند اما هنوز مشکل پیدا نشدن جواب واقعی در برخی موارد وجود دارد.
	الگوریتم ترابری (Huttagosol and Cameron, 1992)	هوتاگوسول و کامرون	۱۹۹۲	با تبدیل مسئله محدوده نهایی معدن به یک مسئله ترابری سعی در حل مسئله از طریق روش سیمپلکس دوگان دارد.
	سیمپلکس دوگان (Underwood and Tolowinski, 1998)	آندروود و تولوینسکی	۱۹۹۸	روش سیمپلکس شبکه‌ای از الگوریتم LG کندتر است.
	ریاضی منطقی (Rahimi et al., 2018)	رحیمی و همکاران		این الگوریتم دارای رویکرد ریاضی منطقی است.
ابتکاری	مخروط شناور (Pana, 1965)	کارلسون و همکاران	۱۹۶۶	با رویکرد ابتکاری است و عدم رسیدن به جواب بهینه بزرگ‌ترین عیب آن است.
	کوروبوف (David et al., 1974)	کوروبوف	۱۹۷۴	عدم یافتن محدوده بهینه نهایی در برخی موارد که دوود و اونر (۱۹۹۳) به اصلاح آن پرداختند که هنوز ایراد پیدا نکردن محدوده بهینه واقعی در برخی موارد پابرجا ماند.
	پارامتری کردن (François-Bongarçon and Guibal, 1982)	بنگارکن و گوئیبال	۱۹۸۲	بهینه‌سازی بر مبنای بیشینه‌سازی فلز محتوا است. استفاده از این روش در کانسارهای چند فلزی دشوار است.
	مخروط شناور II (Wright, 1999)	رایت	۱۹۹۹	نسبت به مخروط شناور نتایج بهتری را ارائه می‌دهد اما در برخی موارد محدوده بهینه درست را ارائه نمی‌دهد.
	لرچ-گروسمن با شیب‌های متغیر (Khalokakaie et al., 2000a)	کاکایی	۲۰۰۰	این روش برای اصلاح عیب عدم توانایی اعمال شیب‌های متغیر در تئوری گراف ارائه شده است.
مخروط شناور اصلاح شده II (کاکایی، ۱۳۸۳)	کاکایی	۲۰۰۴	این روش به بهبود مخروط شناور ۲ پرداخته است اما در برخی موارد هنوز محدوده بهینه نهایی ر به درستی تعیین نمی‌کند.	
فراابتکاری	الگوریتم ژنتیک (Denby and Schofield, 1994)	دن‌بای و همکاران	۱۹۹۴	جواب بهینه را به دست نمی‌دهد و نیز برای معادن واقعی به کار گرفته نشده است.
	شبکه‌های عصبی مصنوعی (Achireko and Frimpong, 1996)	آچیرکو و فریمپونگ	۱۹۹۶	این الگوریتم قادر نیست محدوده بهینه واقعی را تعیین کند.
	شبکه عصبی مصنوعی (Sayadi et al., 2011)	صیادی و همکاران	۲۰۱۱	این الگوریتم قادر نیست محدوده بهینه واقعی را تعیین کند.

۲-۴-۱- الگوریتم‌های ابتکاری

روش مخروط شناور^۱، ساده‌ترین راه حل را برای تعیین محدوده بهینه نهایی معدن روباز ارائه می‌دهد (Pana, 1965). الگوریتم مخروط شناور، یک الگوریتم شبیه‌سازی است که در آن تعیین طرح محدوده نهایی معدن، تابع شبیه‌سازی استخراج آن است. عنصر اصلی در این شبیه‌سازی، مخروط باطله‌برداری حداقل است. در این روش برای هر بلوک مثبت (ماده معدنی)، یک مخروط با توجه به شیب پایدار معدن، طوری ساخته می‌شود که راس آن در بلوک ماده معدنی باشد. سپس ارزش بلوک‌های واقع در مخروط را با هم جمع می‌کنند و در صورتی که نتیجه مثبت باشد، تمام بلوک‌های واقع در داخل آن جزء محدوده معدن در نظر گرفته می‌شود، در غیر این صورت جستجو برای بلوک‌ها مثبت دیگر ادامه می‌یابد (Carlson et al., 1966). مشکل عمده این روش آن است که توانایی اصلاح بلوک‌های مشترک در تراز یکسان و ترازهای مختلف را ندارد. این روش در عین سادگی در یافتن محدوده بهینه در برخی از مدل‌ها ناتوان است، چرا که ترتیب جستجوی بلوک‌های با ارزش اقتصادی مثبت، بخش مهمی از این روش به شمار می‌آید (Lemieux, 1979). علیرغم کوشش‌های لمیوکس در اصلاح این روش، این تلاش‌ها ناموفق بوده است. روش کروبوو^۲ در سال ۱۹۷۴ میلادی معرفی شد (David et al., 1974). در روش مذکور شبیه الگوریتم‌های مختلف مخروط شناور برای بلوک مثبت (ماده معدنی) یک مخروط معکوس با توجه به زاویه شیب معدن طوری ساخته می‌شود که راس مخروط در بلوک ماده معدنی باشد. سپس در داخل مخروط، مقادیر مثبت به مقادیر منفی اختصاص داده می‌شود تا این که هیچ بلوکی با ارزش منفی باقی نمانده و یا تمام مقادیر مثبت اختصاص داده شود. در صورتی که ارزش بلوکی که برای آن مخروط ساخته شده مثبت باقی بماند، تمام بلوک‌های واقع در آن جز محدوده معدن در نظر گرفته می‌شود. اگر مخروط مذکور خالی

^۱ Floating cone

^۲ Korobov

باشد و یا به عبارت دیگر فاقد بلوکی دیگر باشد، جستجو برای بلوک‌های دیگر ادامه پیدا می‌کند. در غیر این صورت الگوریتم از ابتدا با مقادیر اصلی بلوک‌ها برای بلوک‌های باقی‌مانده ادامه پیدا می‌کند (کاکایی، ۱۳۸۴). این الگوریتم در برخی موارد نمی‌توانست محدوده بهینه را پیدا کند. دود^۱ و انور^۲ پیشنهاد کردند که ابتدا مقادیر مثبت به بلوک‌های غیر مشترک و پس از آن به بلوک‌های مشترک اختصاص داده شود (Dowd and Onur, 1993a). با وجود این اصلاحات هنوز هم در برخی موارد این الگوریتم محدوده بهینه را پیدا نمی‌کند.

ماترون^۳ (Matheron, 1975 (a, b, c))، بنگارکن^۴ و مارشال^۵ (François-Bongarcon and Marechal, 1976) و بنگارکن و گوئیبال^۶ (François-Bongarcon and Guibal, 1982) پایه اصلی پارامتری کردن^۷ ذخیره و کاربرد آن برای طراحی معادن روباز را ارائه دادند. توانایی روش ارائه شده توسط آن‌ها بر مبنای قبول این ایده است که یک خانواده کامل بهینه، ممکن است در مجموعه‌ی از پیت‌های فنی وجود داشته باشد. این فرآیند شامل در نظر گرفتن یک سری از پیت‌های فنی می‌باشد که هر کدام از آن‌ها شامل بیشترین میزان فلز بازیابی شده (q) برای هر تن ماده معدنی استخراج شده (v) و تناژ کل پیت (T) می‌باشد. به طور معمول ممکن است تعداد زیادی پیت با تناژهای v و T وجود داشته باشند. اما در بین آن‌ها حداقل یک پیت وجود دارد که بیشترین فلز بازیابی شده را دارد. این پیت به لحاظ فنی پیت بهینه متناظر با تناژ (T,v) می‌باشد. در مرحله بعد هدف پیدا کردن یک طیف کامل از پیت‌های فنی متناظر با هر تناژ (T,v) می‌باشد. بر طبق این فرضیه، پیت بهینه اقتصادی لزوماً در بین این خانواده از پیت‌های فنی

^۱ Dowd

^۲ Onur

^۳ Matheron

^۴ Bongarcon

^۵ Marechal

^۶ Guibal

^۷ Parameterization

می‌باشد. این روش نیاز به استفاده از ریاضیات پیچیده دارد و مشکل ایجاد شکاف^۱ یکی از ایرادات عمده آن است و جواب بهینه واقعی را به دست نمی‌دهد.

روش مخروط شناور^۲ اولین بار در سال ۱۹۹۹ میلادی برای برطرف کردن بعضی از ضعف‌های روش مخروط شناور معرفی شد (Wright, 1999). در این روش مشکل بلوک‌های مشترک در ترازهای یکسان حل شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که برخلاف گفته رایج، مبنی بر بهینه بودن پاسخ این روش، اجرای آن در برخی مدل‌ها، منجر به پاسخ بهینه نخواهد شد (کاکایی، ۱۳۸۳).

۲-۴-۲- الگوریتم‌های ریاضی

لرچ^۲ و گروسمن^۳ در سال ۱۹۶۵ الگوریتمی به نام الگوریتم نظریه گراف^۴ برای حل مسئله تعیین محدوده پیت نهایی، در حالت سه بعدی ارائه دادند (Lerchs and Grossman, 1965). در این روش، مسئله یافتن محدوده بهینه نهایی، تبدیل به مسئله پیدا کردن گراف با بیش‌ترین وزن می‌شود که محدودیت‌های استخراج و شیب دیواره پیت در آن رعایت شده باشند. الگوریتم نظریه گراف، شبکه سه بعدی بلوک‌های مدل بلوکی ماده معدنی را به یک گراف جهت‌دار تبدیل می‌کند. هر بلوک در شبکه با یک گره ارائه می‌شود که وزنی معادل درآمد خالص بلوک مذکور به آن گره تخصیص داده می‌شود. گره‌ها به وسیله کمان‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند، به طوری که اتصال‌های هدایت شده از هر گره خاص تا سطح توپوگرافی، مجموعه‌ای از گره‌ها (بلوک‌ها) که به منظور استخراج این گره باید برداشته شوند را تعریف می‌کنند (هوسترولید و کوچتا، ۱۹۹۵). شکل ۲-۳ یک گراف مستقیم را نشان می‌دهد که برای یک مدل دو بعدی از کانساری به کار رفته که در آن ابعاد بلوک‌ها یکسان و زاویه شیب معدن ۴۵ درجه فرض شده است. در این مثال برای استخراج بلوک ۱۰ لازم است که بلوک‌های ۲، ۳ و ۴ برداشته شوند. در گراف مذکور

^۱ Gap

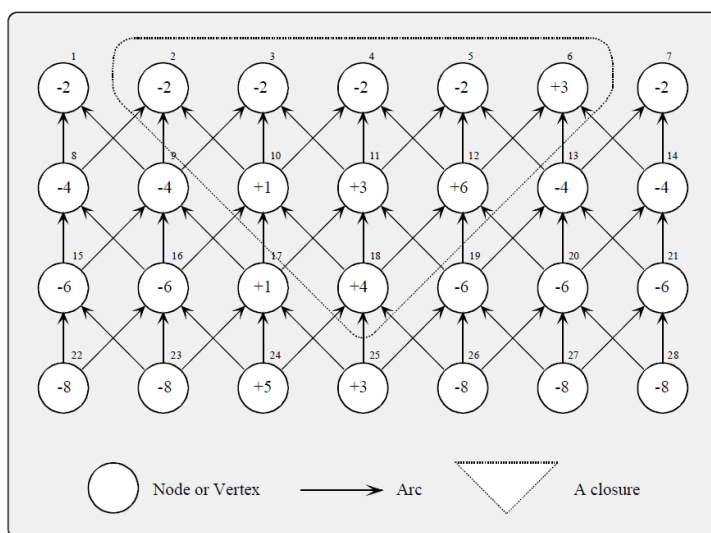
^۲ Lerchs

^۳ Grossman

^۴ Graph Theory

مجموعه‌ای از گره‌ها را که با توجه به شیب پایداری معدن می‌تواند تشکیل یک پیت قابل اجرا را نماید کلوزر^۱ می‌گویند. هر کلوزر دارای ارزشی است که برابر با مجموع ارزش گره‌های (بلوک‌های) داخل آن است. لذا این الگوریتم با استفاده از یک سری قواعد سعی می‌کند که کلوزر یا پیت با بیشترین ارزش اقتصادی را پیدا نماید. مهم‌ترین مزیت این روش قابلیت آن برای پیدا کردن محدوده بهینه واقعی معادن روباز در همه حالات است (Khalokakaie et al., 2000a). این الگوریتم از نظر ریاضی قابل اثبات است که همیشه جواب بهینه را پیدا می‌کند. معایب روش لرج و گروسمن عبارت‌اند از (Khalokakaie et al., 2000a):

- پیچیدگی روش
 - صرف وقت کامپیوتری زیاد برای حصول به جواب
 - مشکلات مربوط به استفاده از شیب‌های متغیر
- روش مذکور از طریق اعمال شیب‌های متغیر اصلاح شده و بر اساس این اصلاح یک نرم‌افزار طراحی نیز ارائه شده است (Khalokakaie et al., 2000 (a, b)).



شکل ۲-۳- گراف مستقیم برای یک مدل دو بعدی (Khalokakaie et al., 2000a)

^۱ Closure

برنامه‌ریزی پویا^۱ روشی است که در حالت دو بعدی محدوده بهینه را پیدا می‌کند. اولین بار لرچ و گروسمن این روش را برای طراحی محدوده معادن روباز در حالت دو بعدی به کار بردند (Lerchs and Grossman, 1965). روش مذکور تنها در حالت دو بعدی کاربرد داشته و محدوده بهینه را پیدا می‌کرد. جانسون^۲ و شارپ^۳ نیز برای تبدیل الگوریتم دو بعدی لرچ و گروسمن به حالت سه‌بعدی روشی را پیشنهاد دادند (Johnson and Sharp, 1971). این روش، تکرار الگوریتم دو بعدی است که در ابتدا برای مقاطع عرضی و در پایان برای مقاطع طولی (که عمود بر مقاطع اول هستند) به کار می‌رود. کونیگسبرگ^۴ و دیگران موفق شدند تا با به کارگیری مستقیم برنامه‌ریزی پویا مسئله بهینه‌سازی پیت در معادن روباز را حل کنند (Koenigsberg et al., 1982). این روش‌ها نیز توانایی پیدا کردن پیت بهینه را در همه موارد ندارند.

تحقیقات مختلفی برای استفاده از الگوریتم جریان شبکه^۵ برای بهینه‌سازی محدوده نهایی پیت انجام شده است (Johnson, 1988; Yegulalp and Arias, 1992). در فرمولاسیون این الگوریتم، کانسار به صورت شبکه‌ای از بلوک‌ها و پایانه‌های ورودی و خروجی مدل می‌شوند که به وسیله کمان‌هایی به یکدیگر متصل می‌شوند. این الگوریتم از جمله روش‌هایی است که بسیاری از خطاهای روش‌های ابتکاری را اصلاح کرده است اما همچنان انتخاب مسیری که در آن جریان از گره منبع به سمت گره پایانه بیشینه باشد نیاز به فرآیند سعی و خطای طولانی دارد که این امر در مورد مدل‌های بزرگ‌تر با شبکه پیچیده‌تر بدون استفاده از برنامه‌های کامپیوتری بسیار دشوار به نظر می‌رسد.

^۱ Dynamic Programming

^۲ Johnson

^۳ Sharp

^۴ Koenigsberg

^۵ Network Flow

هوتاگوسول^۱ و کامرون^۲ در سال ۱۹۹۲ مسئله تعیین محدوده معادن را به صورت یک مسئله بزرگ ترابری^۳ مدل کردند (Huttagosol and Cameron, 1992). مدل آن‌ها بر اساس یک مدل بلوکی شامل ماده معدنی و باطله بود. آن‌ها برای حل مسئله از روش سیمپلکس شبکه‌ای^۴ استفاده کردند. اولین محدودیت مدل، محدودیت استخراج با در نظر گرفتن شیب مجاز می‌باشد. مسئله این‌گونه مدل شده است که در آن هر بلوک ماده معدنی (بلوک مثبت) معادل یک گره پایه در شبکه ترابری در نظر گرفته می‌شود و در این شبکه هر بلوک باطله، معادل گره مقصد در نظر گرفته می‌شود. مسیر بین مقصد و گره پایه باید مبین شیب مجاز باشد و نیز هر بلوک باطله باید قبل از بلوک ماده معدنی که در زیر آن واقع شده است استخراج گردد. تابع هدف در این مدل بیشینه‌سازی ارزش پیت می‌باشد. تجربیات محاسباتی آنان نشان داده است که روش سیمپلکس شبکه‌ای از الگوریتم LG کندتر است (Hochbaum and Chen, 2000). ژائو^۵ و کیم^۶ در سال ۱۹۹۲ نیز از تئوری گراف برای بهینه‌سازی محدوده نهایی معادن روباز استفاده کردند (Zhao and Kim, 1992). این الگوریتم مدل بلوکی را مانند یک گراف با تعداد زیادی درخت، مدل می‌کند.

گره‌های تئوری گراف، معادل بلوک‌های مدل بلوکی قرار داده می‌شود و کمان‌ها نشان‌دهنده محدودیت شیب دیواره می‌باشد. الگوریتم آن‌ها نسبت به روش لرچ و گروسمن، درعین حالی که جواب را به درستی پیدا می‌کند، برای یادگیری ساده‌تر است و زمان کامپیوتری و حافظه کمتری برای رسیدن به جواب نیاز دارد.

^۱ Huttagosol

^۲ Cameron

^۳ Transportation

^۴ Network Simplex

^۵ Zhao

^۶ Zhao and Kim

آندروود^۱ و تولووینسکی^۲ در سال ۱۹۹۸ با استفاده از سیمپلکس دوگان^۳ محدوده نهایی معدن را تعیین کردند. در این تحقیق الگوریتم لرچ و گروسمن از دیدگاه سیمپلکس دوگان بررسی شده و نشان داده‌اند زمان کمتری نسبت به تئوری گراف نیاز دارد (Underwood and Tolowinski, 1998). آن‌ها یک الگوریتم جریان شبکه بر اساس این سیمپلکس دوگان بسط داده‌اند. در این روش نشان داده شده است که چگونه این الگوریتم ارتباط نزدیکی با الگوریتم لرچ و گروسمن دارد و چگونه گام‌های الگوریتم آن‌ها، می‌تواند از نقطه نظر برنامه‌ریزی ریاضی دیده شود. آن‌ها عنوان کرده‌اند که تحلیلشان، یک بینش را به الگوریتم لرچ و گروسمن اضافه می‌کند و نشان می‌دهد که در چه جاهایی می‌تواند کارا تر باشد. یآوری و همکارانش در سال ۱۳۸۳ نرم‌افزار "به‌کاو" را بر اساس این الگوریتم معرفی نمودند (یآوری و همکاران، ۱۳۸۳).

۲-۴-۳- الگوریتم‌های فراابتکاری

آچیرکو و فریمپونگ الگوریتمی برای بهینه‌سازی پیت بر مبنای شبکه‌های عصبی مصنوعی^۴ ارائه دادند (Achireko and Frimpong, 1996). این الگوریتم شامل استفاده هم‌زمان از شبیه‌سازی شرطی و شبکه‌های عصبی در بهینه‌سازی بود. هدف اصلی این الگوریتم که با نام MCS/MFNN ارائه شد، در نظر گرفتن عدم قطعیت تناژ و عیار ماده معدنی بیان شده است. این الگوریتم نیز محدوده بهینه واقعی را در بسیاری موارد پیدا نمی‌کند. صیادی و همکارانش نیز از شبکه عصبی مصنوعی برای طراحی محدوده نهایی استفاده کردند (Sayadi et al., 2011).

^۱ Underwood

^۲ Tolowinski

^۳ Dual Simplex

^۴ Artificial Neural Network

دنبای و اسکوفیلد روشی جهت طراحی محدوده بهینه نهایی، با هدف دستیابی به حداکثر سود ارائه دادند که این الگوریتم بر مبنای الگوریتم ژنتیک^۱ می‌باشد (Denby and Schofield, 1994). در این الگوریتم ارزش نهایی پیت بر مبنای مجموع ارزش بلوک‌هایی که استخراج خواهند شد، محاسبه می‌شود. ایراد عمده این روش عدم امکان به‌کارگیری در یک مدل واقعی و پیدا نکردن محدوده بهینه است.

ژیائو-چاون^۲ و همکارانش (Xiao-chuan et al., 2014) نیز هزینه‌های زیست محیطی را در تعیین محدوده نهایی لحاظ کرده‌اند. همچنین رحیمی و همکارانش (Rahimi et al., 2018) با هدف بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید، مقصد مواد استخراج شده و محدوده نهایی یک الگوریتم ریاضی منطقی^۳ را ارائه داده‌اند.

۲-۵- روش ایده‌آل برای حل مسئله محدوده نهایی

روش‌های فعلی تعیین محدوده بهینه نهایی، با رویکردهای ابتکاری، ریاضی و فراابتکاری به دنبال دستیابی به بالاترین سود تنزیل نشده هستند و در آن‌ها از پارامترهای قطعی اقتصادی و دارای مقدار ثابت در طول عمر معدن استفاده می‌کنند. برخی از این روش‌ها مثل مخروط شناور و کروبووف، محدوده بهینه نهایی واقعی را در بسیاری موارد پیدا نمی‌کنند. ایراد مشترک این روش‌ها حداکثر کردن سود به جای NPV و لحاظ یا حذف نکردن عدم قطعیت اقتصادی می‌باشد. در مجموع مشخص می‌شود که هنوز یک روش کاملاً ایده‌آل که تمام شرایط مد نظر برای پیدا کردن محدوده نهایی معدن روباز را ارضا نماید، پیدا نشده است. با این وجود، ویژگی‌های یک روش ایده‌آل فرضی را می‌توان با بررسی مطالعات انجام شده از جنبه‌های مختلف حدس زد. به عنوان مثال، پیچیدگی کم یا قابل فهم بودن برای مهندسان طراح معدن، زمان کوتاه یا منطقی حل مسئله، تضمین رسیدن به جواب بهینه، قابلیت حل مسائل واقعی و بزرگ و قابلیت تجاری‌سازی از ویژگی‌هایی است که می‌توان برای یک روش ایده‌آل برشمرد.

^۱ Genetic Algorithm

^۲ Xiao-chuan

^۳ A Logical Mathematical Algorithm

پروژه طراحی یک معدن روباز یک پروژه اقتصادی بلند مدت است و تمام اصول حاکم بر ارزیابی‌های اقتصادی یک پروژه با حجم سرمایه‌گذاری گسترده بر آن حاکم است. شرایط اقتصادی با گذشت زمان دارای نوسانات مختلفی است. قیمت پولی^۱ یک تن ماده معدنی و همچنین هزینه‌های استخراج و فرآوری، در طول سال‌های عمر معدن روباز تغییرات زیادی می‌کنند و این تغییرات هم می‌تواند به سمت مثبت، یعنی سوددهی باشد و هم می‌تواند باعث ضرردهی عملیات استخراج گردد. از طرف دیگر تنزیل ارزش پول با گذشت زمان نیز یک اصل مرسوم در ارزیابی‌های اقتصادی است. بنابراین اصطلاحاً NPV یک پروژه باید محاسبه گردد. پس یک روش ایده‌آل تعیین محدوده بهینه نهایی، هم باید نوسانات مذکور در شرایط هزینه-قیمت را لحاظ کند، هم ارزیابی خود را در ابتدا با حداکثر کردن NPV انجام دهد. کاری که اکنون در اکثر روش‌های مرسوم طراحی محدوده نهایی صورت نمی‌پذیرد و طراحی با بهینه‌سازی سود تنزیل نشده و با تعمیم شرایط اقتصادی سال صفر طراحی به کل عمر معدن انجام می‌شود.

در جدول ۲-۲ ویژگی‌های یک روش ایده‌آل برای حل مسئله محدوده نهایی معدن روباز بیان شده است که هر چه روش ارائه شده از سوی محققان، دارای هم‌پوشانی بیشتری با این ویژگی‌ها باشد از مطلوبیت بهتری برخوردار خواهد بود.

^۱ Monetary Value

جدول ۲-۲- ویژگی‌های یک روش ایده‌آل برای تعیین محدوده نهایی معدن روباز

ویژگی	حالت ایده‌آل	توضیح
هدف	حداکثر کردن NPV	
رویکرد	ریاضی	استفاده از هر کدام از این رویکردها به شرط ارضای دیگر شرایط تفاوت ندارد.
	ابتکاری	
	فراابتکاری	
ابعاد	سه بعدی	
مدل بلوکی ورودی	زمین‌شناسی	
در نظر گرفتن عدم قطعیت	لحاظ کردن عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی و اقتصادی	با توجه به تغییرات گسترده در پارامترهای اقتصادی و فنی در طول عمر معدن باید در یک روش ایده‌آل این عدم قطعیت‌ها لحاظ شود که بتوان روش را از نظر منطقی درست دانست.
پیچیدگی	سطح پیچیدگی کم تا متوسط	چون مهندس معدن باید با استفاده از نرم‌افزار مبتنی بر روش مفروض، در محیط معدن طراحی را انجام دهد، باید این روش را در محیط دانشگاه در مقاطع کارشناسی یا تحصیلات تکمیلی در دروس رسمی یا دوره‌های آموزشی بیاموزد که بتواند درک درستی از عملکرد نرم‌افزار مورد استفاده داشته باشد.
قابلیت برنامه‌نویسی	داشته باشد.	
قابلیت رسیدن به هدف	در تمام موارد بتواند به درستی به هدف برسد.	
زمان حل مسئله	منطقی و حتی المقدور کوتاه	
قابلیت استفاده در مدل‌های واقعی (بزرگ)	داشته باشد.	
قابلیت تجاری‌سازی	داشته باشد.	

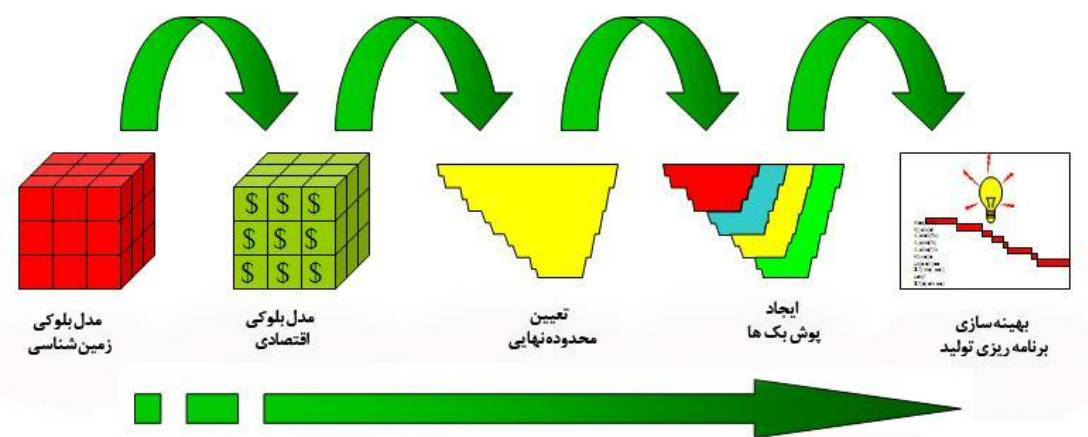
۲-۶- برنامه‌ریزی تولید

پس از تعیین محدوده نهایی، برای بلوک‌های درون محدوده برنامه‌ریزی تولید صورت می‌پذیرد. در شکل

۲-۴ مراحل منجر به یک طرح استراتژیک برای برنامه‌ریزی تولید نشان داده شده است. برای تعیین زمان

استخراج بلوک‌ها، مدلی به صورت شکل ۲-۵ برای کانسار ایجاد می‌شود.

برای برنامه‌ریزی تولید راه‌حل‌های زیادی طی چند دهه اخیر ارائه شده است که در این بخش به مرور اجمالی برخی از آنها پرداخته می‌شود. درباره برنامه‌ریزی تولید از رویکردهای ابتکاری، ریاضی و فراابتکاری استفاده شده است که سهم الگوریتم‌های ریاضی بسیار بیشتر است. مسائل مربوط به عدم قطعیت در برنامه‌ریزی تولید نیز وجود دارد و تلاش‌های یک دهه گذشته بیشتر مبتنی بر لحاظ کردن عدم قطعیت‌های اقتصادی و زمین‌شناسی در محاسبات بوده است.



شکل ۲-۴- روند طراحی و برنامه‌ریزی استراتژیک معدن روباز

۳	۲	۱	۱	۱	۲	۳
	۳	۲	۱	۲	۴	
		۳	۴	۴		
			۴			

شکل ۲-۵- ترتیب استخراج بلوک‌های یک مدل فرضی

۲-۶-۱- الگوریتم‌های ابتکاری

برعکس مسئله تعیین محدوده نهایی تعداد روش‌های ابتکاری زیادی برای برنامه‌ریزی تولید پیشنهاد نشده است. الگوریتم‌های تحلیل پارامتری، گرشون^۱، ویتل و وانگ^۲-سویم^۳، الگوریتم‌هایی هستند که با رویکرد ابتکاری در برنامه‌ریزی تولید پیشنهاد شده‌اند.

روش تحلیل پارامتری توسط لرج و گروسمن در سال ۱۹۶۵ ارائه شد (Lerchs and Grossman, 1965). این روش بر این پایه استوار است که با تغییر تدریجی یک یا چند پارامتر اقتصادی و به دست آوردن محدوده بهینه برای هر تغییر، تعدادی پیت لانه‌ای تو در تو به وجود می‌آید. در این روش با کاستن از ارزش بلوک‌ها به وسیله کاهش قیمت فلز یا افزایش هزینه‌ها، پیت‌هایی کوچک‌تر از مرحله قبل به دست می‌آید (عطایی و حسینی، ۱۳۹۰).

فرآیند ویتل روشی دیگری است که آن هم بر مبنای بهترین و بدترین حالت قیمت فلز به محاسبه پیت‌های تو-در-تو^۴ می‌پردازد. این روش بر مبنای اجرای یک سری از الگوریتم تئوری گراف لرج و گروسمن، با تغییر دادن قیمت فلز، قرار دارد. تعداد زیادی از اجراهای الگوریتم لرج و گروسمن، با روندی صعودی از کمترین قیمت فلز تا بیشتر قیمت انجام می‌پذیرد و کوچک‌ترین پیت با کمترین قیمت و بزرگ‌ترین پیت با بیشترین قیمت به دست می‌آیند. ویتل نرم‌افزارهای Four-D و Four-X را طبق این مفاهیم برای برنامه‌ریزی تولید ارائه داده است (Whittle, 1999).

گرشون روشی ابتکاری را پیشنهاد داد که مفهوم مخروط معکوس را در آن به کار گرفته بود و توانست به روشی برای محاسبه زمان استخراج بلوک‌ها بر مبنای کیفیت عیاری آن‌ها دست یابد. این روش برای مدل بلوکی عیاری توسعه داده شده است. در روش ابتکاری گرشون با استفاده از یک شاخص، مطلوبیت

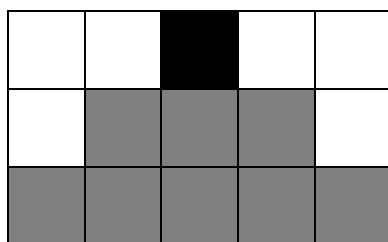
^۱ Gershon

^۲ Wang

^۳ Sevim

^۴ Nested Pits

استخراج بلوک‌ها مشخص می‌شود. این شاخص مطلوبیت، موقعیت وزنی یا موقعیت عیاری نام دارد. برای تعیین موقعیت وزنی هر بلوک، مخروط رو به پایین^۱ آن بلوک مانند شکل ۲-۶ ساخته می‌شود و با جمع عیارهای بلوک‌های واقع در این مخروط، وزن مکانی^۲ بلوک مورد نظر به دست می‌آید. وزن مکانی یک بلوک در حقیقت میزان مطلوبیت یک بلوک را برای استخراج بیان می‌کند. بر اساس مقادیر مطلوبیت مذکور فازبندی و ترتیب‌بندی استخراج بلوک‌ها انجام می‌پذیرد. نکته مهم در ارزشمند بودن این روش ارائه روشی مبتنی بر مفهوم مخروط معکوس است. در حقیقت مخروط معکوس ابتکاری عالی برای در نظر گرفتن همزمان یک بلوک و بلوک‌های زیرین آن برای برنامه‌ریزی تولید است که تا حدودی نیز در این روش موفق بوده است (Gershon, 1987). ایرادهای وارد بر این روش نادیده گرفتن هزینه استخراج بلوک‌های با عیار صفر یا باطله و عدم وجود تضمین برای بهینگی برنامه‌ریزی انجام شده است.



شکل ۲-۶- مفهوم مخروط معکوس برای یک بلوک

۲-۶-۲- الگوریتم‌های فراابتکاری

کومرال^۳ و دوود انجماد تدریجی^۴ را برای برنامه‌ریزی تولید به کار گرفتند (Kumral and Dowd 2005). همچنین ستاروند نیز از کلونی مورچگان^۵ در برنامه‌ریزی تولید استفاده کرد که از نظر ریاضی رسیدن به بهترین جواب را تضمین نمی‌کند (Sattarvand, 2009). میرزایی و کاکایی نیز از الگوریتم ژنتیک برای برنامه‌ریزی تولید استفاده کردند (میرزایی و کاکایی، ۱۳۸۴).

^۱ Downward Cone

^۲ Positional Weight

^۳ Kumral

^۴ Simulated Annealing

^۵ Ant Colony

۲-۶-۳- روش‌های ریاضی

یکی از روش‌های ریاضی که در برنامه‌ریزی تولید استفاده شده است پارامتری کردن لاگرانژی است که توسط افراد مختلف در زمان‌های مختلفی استفاده شده است (Dagdelen and Johnson, 1986; Caccetta et al., 1998; Akaike and Dagdelen, 1999). رمضان و همکاران ایده خوشه‌بندی^۱ را که تعداد بسیار زیاد داده را به تعداد دسته‌های محدود و نسبتاً مشابه خوشه‌بندی می‌کند، در برنامه‌ریزی تولید مورد استفاده قرار دادند. این الگوریتم به عنوان الگوریتم درخت پایه^۲ نام گرفته است (Ramazan et al., 2005). الگوریتم درخت پایه رمضان، بر اساس مدل برنامه‌ریزی خطی بنا شده و بلوک‌ها را به شکل مؤثری با یک‌دیگر ترکیب می‌کند. این عمل شمار متغیرهای دودویی موجود را برای برنامه‌ریزی تولید معادن روباز، کاهش داده و تغییر غیرقابل قبولی نیز در جواب بهینه ایجاد نخواهد کرد. کاهش اندازه مدل و رسیدن به حدود ۶ درصد NPV بیشتر نسبت به استفاده از دیگر روش‌ها مثل نرم افزارهای NPV Scheduler، Mintec Scheduler و الگوریتم ویتل از مزیت‌های این روش هستند (Osanloo et al., 2008; Ramazan et al., 2005).

برنامه‌ریزی پویا دیگر روشی است که برای برنامه‌ریزی تولید استفاده شده است. این روش به دنبال جستجو برای تمام احتمالات و انتخاب گزینه بهینه است. برخلاف دیگر روش‌های تحقیق در عملیات، یک راه حل استاندارد ریاضی برای برنامه‌ریزی پویا وجود ندارد. مسئله برنامه‌ریزی تولید مانند یک گراف مدل می‌شود که گره‌ها وضعیت سیستم و کمان‌ها مربوط به حرکت سیستم از یک وضعیت به وضعیت دیگر است. پیدا کردن مسیری با بیشترین ارزش معادل حل مساله برنامه‌ریزی تولید خواهد بود (Osanloo et al., 2008). اولین تلاش‌ها توسط رومن انجام گرفت (Roman, 1974). این روش برای مدل‌های بزرگ

^۱ Clustering Approach

^۲ Fundamental Tree Algorithm

نمی‌تواند استفاده شود (Osanloo et al., 2008). دوود و اونور نیز برنامه‌ریزی پویا را برای برنامه‌ریزی تولید به کار بردند (Dowd and Onur, 1993b) که زمان طولانی محاسبات مشکل اصلی آن است (Sattarvand, 2009). تولوینسکی و آندروود با ترکیب برنامه‌ریزی پویا و ابتکاری و روش‌هایی مثل هوش مصنوعی راه دیگری را ارائه نمودند (Tolowinski and Underwood, 1992). در ادامه برخی دیگر به ارائه راهی برای استفاده از برنامه‌ریزی پویا در برنامه‌ریزی تولید پرداختند (Tolwinski, 1998; Tolwinski and Golosinski, 1995; Erarslan and celebi, 2001). باید گفت با وجود تلاش‌های خوب و مزیت‌های روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا، مثل مزیت حل همزمان محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید، این روش‌ها برای کانسارهای بسیار بزرگ قابل استفاده نیستند (Osanloo et al., 2008). در ادامه تلاش‌ها برای کاربرد برنامه‌ریزی پویا، لاتوری و گولوسینسکی در سال ۲۰۱۱ نیز راه حلی را ارائه نمودند که در بخش‌های آینده مورد اشاره قرار خواهد گرفت.

جانسون مدل برنامه‌ریزی خطی^۱ (LP) (Johnson, 1969) و پس از او گرشون مدل‌های برنامه‌ریزی خطی مختلط^۲ (MIP) (Gershon, 1983) را برای برنامه‌ریزی تولید ارائه دادند. در ادامه این تحقیقات، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط^۳ (MILP) از جمله مدل‌هایی است که برای مسئله برنامه‌ریزی تولید استفاده شده است. در مدل‌های بهینه‌سازی MILP توانایی در نظر گرفتن فرآوری چند کانه‌ای و چند عنصری را در بهینه‌سازی وجود دارد. این انعطاف باعث دستیابی به NPV بالاتری نسبت به دیگر روش‌های سنتی می‌شود. مدل‌های مختلفی بر اساس MILP توسعه داده شده‌اند. کاستا و هیل با ارائه مدل خود نوعی از روش شاخه و کران را برای آن ارائه کرده‌اند (Caccetta and Hill, 2003). رمضان و دیمیتراکوپولوس در مدل خود از روشی برای کاهش تعداد متغیرهای صفر و یکی که در آن بلوک‌های

¹ Linear Programming (LP)

² Mixed Integer Programming (MIP)

³ Mixed Integer Linear Programming (MILP)

باطله به عنوان متغیرهای تصمیم پیوسته به جای عدد صحیح تعیین می‌شوند استفاده کردند (Ramazan and Dimitrakopoulos, 2004). رمضان و همکارانش یک روش تجمیع بر اساس مفاهیم درخت پایه برای کاهش تعداد متغیرهای تصمیم در فرمول‌بندی MILP ارائه دادند (Ramazan et al., 2005). همچنین بلند و همکاران مسئله برنامه‌ریزی تولید معادن روباز را به صورت MILP کردند. روش آن‌ها به این صورت بود که برای فرآیند معدن‌کاری، تجمیع بلوک‌ها به کار گرفته شده است. تک بلوک‌ها نیز برای تصمیم در مورد فرآوری بکار رفته‌اند (Boland et al., 2009). رحمان و اسد یک مدل جدید بهینه‌سازی را برمبنای MILP برای برنامه ریزی تولید کوتاه مدت ارائه دادند (Rehman S.U., and Asad, 2010). عسکری نسب و همکارانش نیز چهار مدل MILP را برای برنامه‌ریزی تولید ارائه و توسعه دادند (Askari-Nasab et al., 2011). عیوضی و عسکری نسب یک روش برنامه ریزی تولید سلسله مراتبی را که طرح بهینه استراتژیک معدن روباز را به برنامه ریزی تولید بهینه میان مدت پیوند می‌داد با استفاده از MILP ارائه کردند (Eivazy and Askari-Nasab, 2012). کارهای ریاضی دیگری نیز در فضای غیرقطعی برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید صورت گرفته است. دیمیتراکوپولوس^۱ در سال ۱۹۹۸ مدلی بر مبنای عدم قطعیت و سنجش ریسک زمین‌شناسی انجام داد (Dimitrakopoulos, 1998). منابه^۲ و فرویلند^۳ یک مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح (MIP) با در نظر نظر گرفتن عدم قطعیت عیار ارائه داد (Menabde and Froyland, 2004). گودوی و دیمیتراکوپولوس یک رهیافت بهینه‌سازی جدید برای برنامه‌ریزی تولید بر اساس مدیریت مؤثر برداشت باطله و عدم قطعیت عیار را مطرح کردند (Godoy and Dimitrakopoulos, 2004). دیمیتراکوپولوس و رمضان در سال ۲۰۰۴

^۱ Dimitrakopoulos

^۲ Menabde

^۳ Froyland

یک مدل برنامه‌ریزی خطی^۱ (LP) را ارائه کردند که بر خلاف روش‌های قبلی قابلیت کاربرد در ذخایر با چند ماده معدنی را دارد (Dimitrakopoulos and Ramazan, 2004). دیمیتراکوپولوس و همکاران در سال ۲۰۰۷ با بیان یک روش جدید، سعی در پررنگ کردن نقش تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در فرآیند حل مسئله کرده و بدین ترتیب گامی در جهت بهبود روش‌های بهینه‌سازی تحت عدم قطعیت برداشته‌اند (Dimitrakopoulos et al., 2007). در همان سال دیمیتراکوپولوس و رمضان با اجرای یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح تصادفی^۲ (SIP) بر روی تعدادی مدل تصادفی، سعی در یافتن یک برنامه‌ریزی تولید بهینه در شرایط عدم قطعیت زمین‌شناسی داشتند (Ramazan and Dimitrakopoulos, 2007). غلام‌نژاد و همکاران نیز با در نظر گرفتن تابع توزیع احتمال عیار بلوک‌ها به عنوان یک ورودی، شکل تصادفی مدل برنامه‌ریزی تولید را ارائه دادند (Gholamnejad et al., 2008).

بلند و همکاران در سال ۲۰۰۹ از تجمیع بلوک‌ها استفاده کردند (Boland et al., 2009). تجمیع بلوک‌ها روشی است که می‌تواند تعداد متغیرها یا تعداد محدودیت‌ها و یا هر دو را کاهش دهد. ابریشمی‌فر در سال ۲۰۱۱ مدلی را بر اساس برنامه‌ریزی آرمانی یک‌طرفه با قیدهای تصادفی^۳ ارائه کرد. مدل فرض شده در مطالعه وی براساس برنامه‌ریزی آرمانی بوده و با نرم‌افزار LINGO حل شده است (Abrishamifar, 2011).

دیمیتراکوپولوس در سال ۲۰۱۱ روی برآورد غیرواقعی در مورد NPV کار کرد (Dimitrakopoulos, 2011). در این تحقیق از دو رویکرد انجماد تدریجی^۴ و برنامه‌ریزی عدد صحیح اتفاقی استفاده شده است. اپیشترین و همکاران در سال ۲۰۱۲ از فرمول‌بندی جریان شبکه چند کالایی ظرفیت‌دهی شده کلی^۵

^۱ Linear Programming

^۲ Stochastic Integer Programming

^۳ Chance-constrained one-side goal programming

^۴ Simulated Annealing

^۵ General Capacitated Multicommodity Network Flow Formulation

استفاده کردند (Epestein et al., 2012). هدف از این مدل بهینه‌سازی کردن چند معدن به شیوه‌ای مجتمع است.

لمقري و ديميتراکوپولوس در سال ۲۰۱۲ مدل برنامه‌ريزي توليد برمبنای جستجوی تابو^۱ و با شرایط عدم قطعیت قیمت فلز را ارائه دادند (Lamghari and Dimitrakopoulos, 2012). بندورف و ديميتراکوپولوس در سال ۲۰۱۳ بیان کردند که برای یک عملیات معدن‌کاری، برآورده شدن اهداف کمی و کیفی حیاتی است و از فرمول‌بندی برنامه‌ريزي عدد صحیح تصادفی (SIP) استفاده کردند. تغییرپذیری عیار برجا^۲ و عدم قطعیت توزیع فضایی کانسنگ^۳ و پارامتر کیفیت همگی سبب انحراف از اهداف تولیدی و ناکارآمدی‌های مالی^۴ می‌شوند. کاربرد این روش در یک کانسار آهن در استرالیای غربی، قابلیت این رویکرد را برای کنترل کردن ریسک انحراف از اهداف تولیدی را در طول زمان نشان داده است (Bendorf and Dimitrakopoulos, 2013).

در ادامه تحقیقات بالا، در سال‌های گذشته نیز تحقیقات بسیار زیادی روی مسائل مربوط به عدم قطعیت در برنامه‌ريزي توليد صورت گرفته است (Golamnejad and Moosavi, 2012; Moosavi and Gholamnejad, 2015; Lamghari and Dimitrakopoulos, 2016; Gilani and Sattarvand, 2016; Baek et al, 2016; Upadhyay and Askari-Nasab, 2018; Tahernejad et al, 2018 (a, b); Jamshidi, and Osanloo, 2018; Paricheh and Osanloo, 2018).

به طور کلی باید گفت نسبت به ارائه الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری، بر روی مدل‌سازی ریاضی مسئله برنامه‌ريزي توليد تحقیقات بیشتری انجام گرفته است. مزیت اصلی روش‌های ریاضی، وجود پشتوانه منطقی ریاضی حل مسئله بهینه‌سازی است. ایراد عمده برخی از این روش‌ها در درجه اول گستره زیاد، وسعت

^۱ Tabu search

^۲ In-situ Grade Variability

^۳ Uncertainty about the Spatial Distribution of Ore

^۴ General Financial Deficits

ایده‌ها و در نظر نگرفتن همزمان چند عدم قطعیت است. از طرف دیگر برای توسعه الگوریتم‌هایی که مدل‌های

بهینه‌سازی ارائه شده را با پیچیدگی کم‌تر و به صورت کاربردی با هدف استفاده در معادن مختلف حل کنند کار چندانی انجام نگرفته است. تنوع ایده‌ها و راه حل‌ها، مهندسان طراح را در عمل با سردرگمی در انتخاب روش مناسب مواجه می‌کند. تحقیقات ایده‌آل‌گرایانه دانشگاهی باید همراه با واقع‌بینی صنعتی و عملی به پیش رود. یک روش طراحی، باید توانایی تطبیق با معادن مختلف را داشته باشد و بتواند اعتماد سرمایه‌گذار معدنی را جلب کند. علی‌رغم تمام روش‌های ارائه شده، هنوز یک روش استاندارد قطعی مورد اتفاق محققان نیست، زیرا با توجه به تاریخ‌های ارائه روش‌ها، هر ساله مدل‌سازی‌های جدید برای این مسائل ارائه می‌شود.

۲-۷- روش‌های حل مسئله محدوده نهایی با حداکثر کردن NPV

در طراحی محدوده بهینه نهایی ابتدا باید پارامتری که هدف بهینه‌سازی است، تعیین گردد. گفته شد که روش صحیح ارزیابی اقتصادی یک پروژه معدنی، تعیین ارزش خالص فعلی آن است. امروزه برای طراحی معادن روباز ابتدا محدوده نهایی با هدف حداکثرسازی سود تنزیل نشده تعیین می‌شود آن‌گاه برای بلوک‌های درون این محدوده برنامه‌ریزی تولید صورت می‌پذیرد. لزوم حداکثر کردن NPV مورد توافق تمام محققان است اما تا کنون اکثر تلاش‌ها برای دستیابی به روشی که این هدف را برآورده کند یا ناکام مانده‌اند و یا به نتایج تاثیرگذاری در دنیای مهندسی معدن دست نیافته‌اند. این دسته از روش‌ها بر خلاف روش‌هایی که در بخش‌های قبل بیان شد به حل محدوده نهایی با هدف حداکثر کردن NPV می‌پردازند. به بیان دیگر این روش‌ها هم‌زمان با تعیین محدوده زمان استخراج بلوک را نیز محاسبه می‌کنند. این کار را به عبارت دیگر می‌توان "تعیین همزمان محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید" نامید. باید اشاره کرد از

نظر مفهومی در حال حاضر و طی دهه‌های گذشته به علت مجزا حل کردن این دو مسئله هرگاه از برنامه-ریزی تولید به تنهایی نام برده می‌شود، فرض بر تعیین محدوده‌نهایی از قبل است. همچنین در مفهوم استاندارد کنونی، برنامه‌ریزی تولید به هدف حداکثرسازی NPV و تحت محدودیت‌های مختلفی مثل تناژ استخراج سالانه، میزان باطله‌برداری در مرحله آماده‌سازی و عیار ورودی کارخانه فرآوری صورت می‌گیرد. علاوه بر الگوریتم برنامه‌ریزی پویای رومن در حالت دو بعدی (Roman, 1974)، روش وانگ و سویم (Wang and Sevim, 1992; 1993; 1995) و الگوریتم لاتوری و گولوسینسکی (Latorre and Golosinski, 2011) از جمله روش‌هایی می‌باشند که برای تعیین محدوده‌نهایی با هدف حداکثرسازی NPV پیشنهاد شده‌اند. عسکری نسب و اواه-وفهئی (Askari-Nasab and Awuah-Offei, 2009) از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تعیین محدوده‌نهایی با ارزش تنزیل شده بلوک‌ها استفاده کردند.

با رویکرد در نظر گرفتن عدم قطعیت، ریچموند با ترکیب شبیه‌سازی مونت کارلو^۱ و تکنیک‌های ابتکاری به طراحی محدوده‌نهایی با هدف بهینه‌سازی NPV پرداخته است (Richmond, 2018). بورگاری^۲ و همکارانش نیز با در نظر گرفتن عدم قطعیت بازار از شبیه‌سازی تصادفی حرکت براونی^۳ برای تعیین قیمت و برنامه‌ریزی تولید مستقیم بلوک‌ها استفاده کرده‌اند (Burgarelli et al., 2018). در این بخش از بین این روش‌ها، به دو روش وانگ و سویم و برنامه‌ریزی پویای (آمیخته با ابتکار) لاتوری و گولوسینسکی که با رویکرد ابتکاری به دنبال حل مسئله محدوده‌بینه‌نهایی با هدف حداکثرسازی NPV هستند پرداخته می‌شود.

^۱ Monte Carlo-based Simulation

^۲ Burgarelli

^۳ Brownian motion

۲-۷-۱- الگوریتم پویای هوشمند^۱

وانگ و سویم (Wang and Sevim, 1992; 1993; 1995) با الهام از برخی قسمت‌های روش برنامه‌ریزی گرشون (Gershon, 1986) الگوریتمی را برای تعیین همزمان محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید به کار گرفتند. در روش گرشون مفهوم مخروط معکوس مورد استفاده قرار گرفته است و وانگ و سویم از این مفهوم در روش ابتکاری خود بهره گرفتند. در این روش اصلی‌ترین مشکل روش پارامتری کردن یعنی شکاف^۲ با یک ترفند ابتکاری حل می‌شود. وجود تفاوت بزرگ میان دو پیت مجاور در سری پیت‌های تو در تو شکاف نام دارد. در این روش ابتکاری در طراحی پیت اولیه سعی در تهیه پیتی است که نسبت به پیت‌های هم‌اندازه خود بیشترین فلز را دارد. ایده اصلی این الگوریتم بر این مبنا قرار دارد که یک پیت با حداکثر فلز محتوی^۳ با اندازه M بلوک برابر است با حذف N بلوک دارای کمترین عیار از یک مجموعه $M+N$ بلوکی. در این حالت برای مقابله با مشکل شکاف به جای تولید پیت با بالاترین فلز محتوی به عنوان فاز اول، یک پوسته با کمترین فلز محتوی به عنوان فاز آخر طراحی می‌گردد و چون پوسته‌ها نمی‌توانند دور از هم باشند، مشکل شکاف نیز قطعاً به وجود نخواهد آمد (Wang and Sevim, 1995). گام‌های اجرای این روش را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- ایجاد مدل بلوکی عیاری و ایجاد بزرگ‌ترین پیت ممکن که پایین‌ترین بلوک ماده معدنی را در بر بگیرد و بلوک‌های باطله اضافی را مانند شکل ۲-۷ از فرآیند طراحی حذف کند.
- برای هر بلوک مدل فوق یک مخروط رو به پایین تشکیل و میانگین عیار فلز (مجموع عیارهای بلوک‌های موجود در مخروط معکوس تقسیم بر تعداد بلوک‌ها) تعیین می‌شود.

^۱ Intelligent Dynamic Algorithm

^۲ Gap

^۳ Maximum-Metal Pit

- اگر تعداد بلوک‌های واقع در مخروط معکوس کمتر از یا مساوی با تعداد بلوک‌های یک فاز باشد مخروط در یک آرایه ذخیره می‌شود.

پس از انجام مراحل فوق برای تمام بلوک‌ها، آرایه مذکور بر اساس مقدار فلز مرتب می‌شود. از آرایه مذکور چند مخروط اول را که محتوی فلز آن‌ها کمینه بوده و تعداد بلوک‌های آن‌ها بیش از تعداد بلوک‌های لازم یک فاز نباشد، انتخاب و به عنوان فاز آخر از مدل حذف می‌شود.

- مراحل فوق برای فازهای ماقبل آخر و ... تکرار خواهد شد.

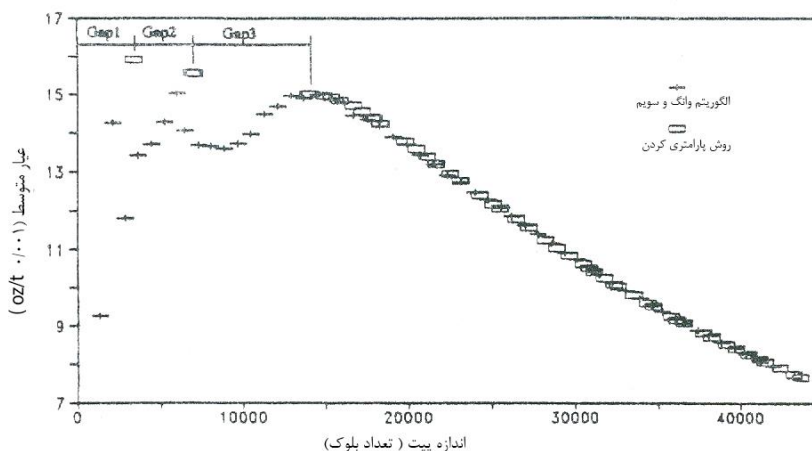


شکل ۲-۷- روند حذف بلوک‌های باطله اضافی از طراحی (Wang and Sevim, 1995)

وانگ و سویم این روش را برای معدن طلایی در غرب آمریکا به کار بردند (Wang and Sevim, 1995) که نتایج مقایسه‌یاری و تعداد بلوک‌ها ماده معدنی آن‌ها به ترتیب در نمودارهای شکل‌های ۲-۸ و ۲-۹ نشان داده شده است. فازبندی با فاصله ۸۰۰ بلوک بین هر دو فاز متوالی انجام شده است. همان‌گونه که از شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود در فازبندی با استفاده از روش پارامتری کردن ۳ شکاف عمده در اول نمودار دیده می‌شود در صورتی که در الگوریتم ابتکاری وانگ و سویم این ایراد وجود ندارد. همچنین در عیار پیت‌های اولیه تولید شده از الگوریتم ابتکاری تغییرات بزرگی در عیار متوسط به چشم می‌خورد که علت آن کوچک‌تر بودن پیت‌های اول و قرار داشتن آن‌ها در قسمت نزدیک به سطح و تاثیرپذیری از بی‌نظمی عیاری در بالاترین قسمت توده ماده معدنی است. با استفاده همزمان از دو نمودار عیاری و تعداد بلوک‌ها، این نتیجه به دست آمده است که از نظر مقدار فلز دو روش پارامتری کردن و روش وانگ و سویم

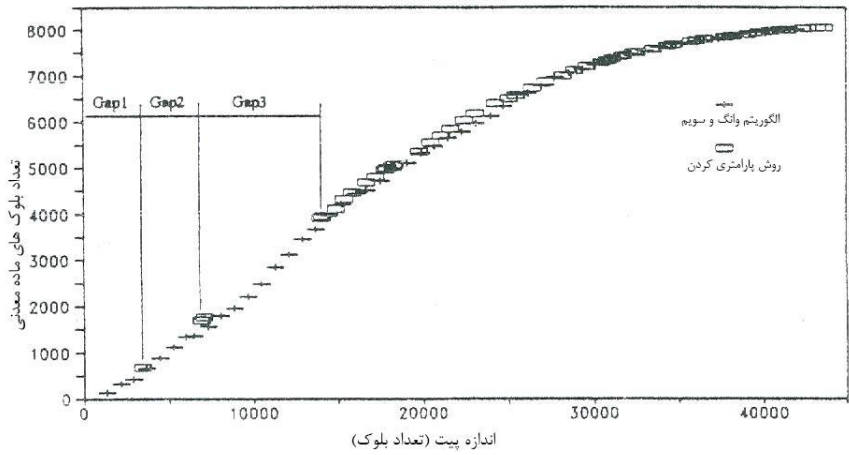
عملکرد مشابهی داشته‌اند (Wang and Sevim, 1995). از نظر زمان حل مسئله، با توجه به فاصله زمانی و سطح تکنولوژیک کامپیوترها زمان انجام آن (ابتدای دهه ۱۹۹۰ میلادی) تا زمان فعلی (۲۰۱۸ میلادی)، نویسندگان نتایجی را اعلام کرده‌اند که از نظر عددی به تنهایی قابل استناد نیست اما از نظر کلی روش ابتکاری زمان کمتری را برای رسید به جواب نیاز داشته است.

پس از فازبندی برای ترتیب‌دهی پیت‌های لانه‌ای به دست آمده در این روش از برنامه‌ریزی پویا استفاده شده است و یک الگوریتم جستجوی جامع^۱ توسط ارائه دهندگان به کار گرفته شد. بدین معنی که تمام مسیرهای ممکن بین پیت‌های لانه‌ای (مثال فرضی) مطابق شکل ۲-۱۰ برای رسیدن به بالاترین NPV بررسی می‌شود. به این ترتیب محدوده نهایی و عمر معدن نیز پیدا می‌شود که در این مثال فرضی عمر معدن ۳ سال و پیت شماره ۴ محدوده نهایی خواهد بود.



شکل ۲-۸- نمودار تطبیقی فازبندی به روش‌های پارامتری کردن و ابتکاری وانگ و سویم با مقایسه عیار فازها (Wang and Sevim, 1995)

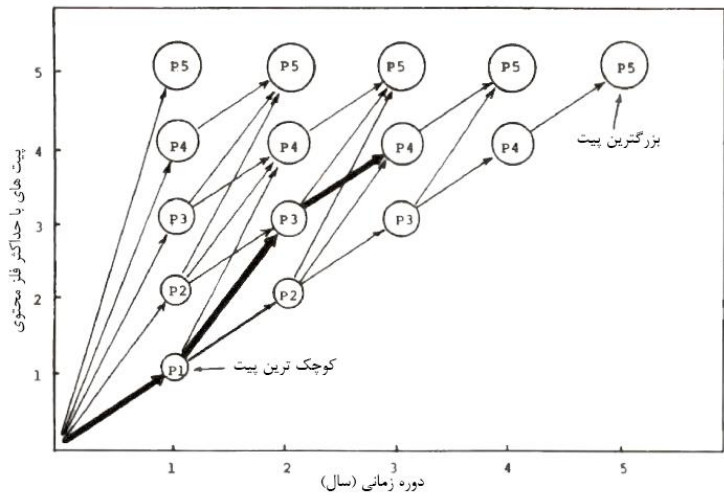
^۱ Exhaustive Search



شکل ۲-۹- نمودار تطبیقی فازبندی به روش‌های پارامتری کردن و ابتکاری وانگ و سویم با مقایسه تعداد بلوک‌های ماده معدنی فازها (Wang and Sevim, 1995)

بنا بر مراحل گفته شده، می‌توان به طور خلاصه بیان کرد که روش وانگ و سویم از چند بخش تشکیل شده است:

- تشکیل مرز بزرگ‌ترین پیت ممکن
- تشکیل پیت‌های محتوی حداکثر فلز
- ترتیب‌بندی پیت‌های لانه‌ای



شکل ۲-۱۰- زمان‌بندی پیت‌ها برای دستیابی به بالاترین NPV (Wang and Sevim, 1995)

حسن این روش در کار کردن با عیارها و تلاش برای رسیدن به بالاترین مقدار فلز استخراج شده از کانسار است. این روش فقط از ایده مخروط معکوس برای پیدا کردن کمترین عیارها و حذف آن‌ها استفاده کرده است و از ایده مسیریابی به منظور دستیابی به یک برنامه‌ریزی بلوک به بلوک در روش گرشون استفاده نکرده است. ایراد دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد این است که در این روش بر خلاف روش‌های تحلیل پارامتری که فازبندی با تغییر یک پارامتر مثل قیمت انجام می‌شود مستقل از پارامترهای اقتصادی است اما در بخش برنامه‌ریزی و زمان‌بندی استخراج پیت‌های لانه‌ای همان مسیر مبتنی بر پارامترهای اقتصادی ثابت طی می‌شود که معایب آن در بخش‌های قبل اشاره شد. نکته دیگر این است که در این روش فازها به عنوان اجزای برنامه‌ریزی در نظر گرفته می‌شوند و ایده مشخصی نیز برای زمان‌بندی "بلوک به بلوک" پیشنهاد نشده است. در مرحله زمان‌بندی فازها با استفاده از برنامه‌ریزی پویا هنگامی که ابعاد ذخیره افزایش یابد تعداد بسیار زیاد فازها باعث بزرگ شدن مسئله تعیین زمان‌بندی فازها می‌شود و چون این روش یک جستجوی جامع است و تمام حالت‌های ممکن را بررسی می‌کند زمان حل مسئله را بسیار زیاد خواهد کرد. بنابراین در کانسارهای بسیار بزرگ این راه حل کارایی خود را از دست می‌دهد. همچنین باید اضافه کرد در این روش مانند روش پارامتری فقط ارزش عیاری بلوک‌های ماده معدنی را در محاسبات دخیل می‌کند و هزینه بلوک‌های باطله را لحاظ نمی‌کند و به عبارتی بلوک‌های باطله را با عیار صفر در نظر می‌گیرد که با واقعیت متفاوت است.

۲-۷-۲- روش لاتوری و گولوسینسکی

لاتوری و گولوسینسکی در سال ۲۰۱۱ روشی را ارائه کردند که محدوده نهایی را با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول و نرخ بهره مشخص پیدا می‌کند و عنوان کار خود را "تعیین محدوده نهایی اقتصادی با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول" نامیدند (Latorre and Golosinski, 2011). این روش ترکیبی از برنامه‌ریزی پویا و ابتکاری بوده که رویکرد آن غالباً به صورت ریاضی است. همان‌گونه که در بخش مربوط به

برنامه‌ریزی تولید اشاره شد کارهای زیادی برای استفاده از برنامه‌ریزی پویا صورت گرفته است که اکثر آن‌ها مورد اشاره قرار گرفت. همچنین گفته شد که روش ریاضی ثابتی برای استفاده از برنامه‌ریزی پویا وجود ندارد و محققان از خلاقیت خود برای پیاده کردن مفهوم این رویکرد بهره برده‌اند.

روش مورد اشاره برای کانسارهایی با اندازه و توزیع عیاری مختلف آزمایش شده است که برای نرخ بهره صفر نتایج با روش لرچ و گروسمن یکسان بوده است. هنگامی که نرخ بهره بالاتر از صفر باشد محدوده نهایی تغییر کرده و به NPV بالاتری منجر می‌شود (Latorre and Golosinski, 2011). یک مدل بلوکی فرضی با ابعاد کم توسط محققین با روش لرچ و گروسمن و روش جدید حل شده است که مدل اولیه و نتایج حل آن از طریق دو روش به ترتیب در شکل‌های ۲-۱۱، ۲-۱۲ و ۲-۱۳ نشان داده شده‌اند. سود تنزیل نشده محدوده لرچ و گروسمن برای این مدل بلوکی ۲۵۳ واحد و NPV آن بر اساس روش پارامتری کردن ۲۶/۹- واحد است. بر اساس نتایج روش سنتی عملاً این محدوده غیراقتصادی است. این در حالی است که NPV برای محدوده به دست آمده از روش ارائه شده ۳۵ واحد با ۲۶ بلوک کمتر از محدوده LG است. این روش برای اندازه‌های مختلفی از مدل‌های بلوکی واقعی نیز اجرا شده است. بر اساس گزارش نویسندگان زمان اجرای کامپیوتری برای یک مدل ۲۰۰۰۰ بلوکی و ۹۸۰۰۰۰ بلوکی، به ترتیب ۲ ثانیه و ۱ ساعت و ۲۷ دقیقه طول کشیده است.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	2	1	2	1	2	5	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
4	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	1	1	1	2	2	3	8	10	-2	-2	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
5	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	1	1	1	3	2	10	15	10	3	1	1	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
6	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	-1	2	7	5	10	15	20	5	2	1	-1	-1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
7	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	4	-1	7	15	20	15	10	2	2	-2	-2	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3
8	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	10	8	25	15	20	6	4	1	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
9	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	2	8	15	30	20	-3	8	5	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

شکل ۲-۱۱- مدل بلوکی فرضی (Latorre and Golosinski, 2011)

ارائه‌دهندگان عنوان کرده‌اند که این روش همیشه در نرخ بهره صفر جوابی مطابق روش لرچ و گروسمن را خواهد داد. طبق گفته نویسندگان در تمام موارد آزمایش شده NPV به دست آمده از آنچه در روش لرچ و گروسمن برای آن مدل مورد آزمایش به دست آمده است بیشتر بوده اما راهی برای اثبات همیشگی بودن این برتری ارائه نشده است.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1		-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3			
2			-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3				
3				-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	2	1	2	1	2	5	-2	-3	-3	-3					
4					-2	-2	-2	-2	1	1	1	2	2	3	8	10	-2	-2	-1	-2						
5						-2	-2	1	1	1	3	2	10	15	10	3	1	1	-1							
6							1	-1	2	7	5	10	15	20	5	2	1	-1								
7								3	4	-1	7	15	20	15	10	2	2									
8									3	10	8	25	15	20	6	4										
9										8	15	30	20		8											
10												10														

شکل ۲-۱۲ - محدوده نهایی به دست آمده برای مدل فرضی از روش لرچ و گروسمن (Latorre and Golosinski, 2011)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1			-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3				
2				-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3						
3					-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	2	1	2	1	2	5	-2	-3							
4						-2	-2	-2	1	1	1	2	2	3	8	10	-2	-2								
5							-2	1	1	1	3	2	10	15	10	3	1									
6								-1	2	7	5	10	15	20	5	2										
7									4	-1	7	15	20	15	10											
8										10	8	25	15	20												
9											15	30	20													
10												10														

شکل ۲-۱۳ - محدوده نهایی به دست آمده برای مدل فرضی از روش لاتوری و گولوسینسکی (Latorre and Golosinski, 2011)

یکی از محاسن بسیار مهم این تحقیق اثبات این نظر است که همیشه محدوده با بالاترین سود بر محدوده با بالاترین NPV تطابق ندارد. همچنین ممکن است محدوده‌ای دارای حداکثر سود مثبت باشد اما پس از برنامه‌ریزی تولید با روشی مانند تحلیل پارامتری برای آن NPV منفی به دست آید که اقتصادی بودن کل فرآیند استخراج آن معدن را زیر سوال می‌برد. این نکته این ضرورت را به اثبات می‌ساند که در طراحی معدن روباز باید به دنبال حل مسئله از طریق حداکثرسازی NPV به جای سود تنزیل نشده بود. از معایب

این روش می‌توان به پیچیدگی ریاضی بسیار آن اشاره کرد. سختی برنامه‌نویسی این روش نیز یکی از نتایج پیچیدگی بسیار زیاد آن است. همچنین این روش از مدل اقتصادی ثابت استفاده می‌کند و تغییرات شرایط اقتصادی را لحاظ نمی‌کند. این محققان در ادامه کار خود به بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید با هدف تعیین ترتیب بهینه بلوک‌ها و عرض پوش‌بک‌ها پرداختند (Nanjari-Latorre and Golosinski, 2013).

۲-۷-۳- مقایسه دو روش "وانگ و سویم" و "لاتوری-گولوسینسکی"

در جدول ۲-۳ ویژگی‌های روش‌های وانگ و سویم و نیز لاتوری و گولوسینسکی با ویژگی‌های یک روش ایده‌آل (جدول ۲-۲) مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود هر کدام از این دو روش دارای مزیت‌ها و کمبودهایی هستند. وانگ و سویم در راستای مدیریت تغییرات اقتصادی با حذف ارزش پولی ایده‌های خود را اعمال کرده‌اند اما لاتوری و گولوسینسکی اساساً به این نکته توجه نداشته‌اند. از نظر پیچیدگی و قابل فهم بودن نیز روش لاتوری و گولوسینسکی دارای پیچیدگی زیادی است. روش وانگ و سویم از ابتدا با مدل بلوکی زمین‌شناسی کار می‌کند اما روش لاتوری و گولوسینسکی روی مدل بلوکی اقتصادی اجرا می‌گردد. از نظر قابلیت برنامه‌نویسی نیز روش وانگ و سویم ساده‌تر بوده و روش لاتوری و گولوسینسکی دارای پیچیدگی زیادی است. در مجموع باید گفت که در مطالعات آتی، باید بتوان به روشی دست یافت که علاوه بر داشتن محاسن روش‌های گذشته معایب آن‌ها را نیز رفع نماید.

۲-۸- عدم قطعیت‌های اقتصادی و زمین‌شناسی

همانگونه که گفته شد، تقریباً تمام روش‌های موجود برای طراحی و برنامه‌ریزی معادن روباز، بر ارزش‌های پولی تخصیص داده شده به هر بلوک عمل می‌کنند. این مقادیر اقتصادی، بر پایه محیط و شرایط فعلی اقتصادی و قضاوت مهندسان طراح بنا شده‌اند. این پارامترها به راحتی با میانگین‌گیری از موارد هزینه‌ای و سایر موارد اقتصادی قابل دسترس هستند و این‌گونه فرض می‌شود که در تمام طول

عمر معدن ثابت می‌باشند. بنابراین بهینه بودن پیت، تنها مشروط به باقی بودن محیط فعلی و شرایط اقتصادی است. اگر شرایط اقتصادی تغییر کند، پیت بهینه و طراحی‌های آن، دیگر معتبر نخواهند بود. نوسانات قیمت فلزات در سال‌های اخیر بسیار گسترش یافته است و عدم قطعیت زیادی را به فرآیند برنامه‌ریزی تولید معدن وارد کرده‌اند، در حالی که هیچ یک از الگوریتم‌های موجود برای تعیین محدوده نهایی، عدم قطعیت قیمت فلزات را لحاظ نکرده‌اند (Akbari et al., 2008).

جدول ۲-۳- مقایسه دو روش وانگ و سویم با حالت ایده‌آل یک روش تعیین محدوده نهایی

ویژگی	حالت ایده‌آل	وانگ و سویم	لاتوری و گولوسینسکی
هدف	حداکثر کردن NPV		
رویکرد	ریاضی		
	ابتکاری		
	فراابتکاری		
ابعاد	سه بعدی		
مدل بلوکی ورودی	زمین‌شناسی		
عدم قطعیت اقتصادی	لحاظ کردن عدم قطعیت اقتصادی		
پیچیدگی	سطح پیچیدگی کم تا متوسط		
قابلیت برنامه‌نویسی	داشته باشد.		
قابلیت رسیدن به هدف	در تمام موارد بتواند به درستی به هدف برسد.	*	**
زمان حل مسئله	منطقی و حتی المقدور کوتاه		
قابلیت استفاده در مدل‌های واقعی (بزرگ)	داشته باشد.		
قابلیت تجاری‌سازی	داشته باشد.		

*در برخی موارد به نتیجه می‌رسد. ** طبق گفته ارائه‌دهندگان در تمام موارد به نتیجه رسیده است.

در تعیین پارامترهای مدل بلوکی زمین‌شناسی مثل عیار و شکل توده ماده معدنی نیز عدم قطعیت وجود دارد. وقتی این پارامترهای زمین‌شناسی با پارامترهای اقتصادی برای تعیین مدل بلوکی اقتصادی همراه گردند، این دو بخش تولید کننده عدم قطعیت، با شدت بیشتری خود را نشان خواهند داد. بنابراین بهتر است که این عدم قطعیت‌ها در فرآیند طراحی محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید به گونه‌ای مدیریت گردند که ریسک ناشی از آن‌ها به کمترین مقدار خود برسد.

تا کنون روش‌های مختلفی برای مقابله با ذات متغیر و بی‌ثبات شرایط اقتصادی در طراحی محدوده نهایی به کار گرفته شده است. این روش‌ها را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

۱- ثابت فرض کردن پارامترهای اقتصادی در کل عمر معدن

۲- روش‌های پارامتری کردن

۳- حل مسئله با روش‌های مختلف عدم قطعیت اقتصادی مثل انتخاب حقیقی^۱

ثابت فرض کردن پارامترهای اقتصادی راه حلی است که اکثر روش‌های طراحی محدوده نهایی بر آن بنا نهاده شده‌اند. عیب اساسی این روش اصطلاحاً پاک کردن صورت مسئله نوسان‌های اقتصادی در طول عمر معدن (که گاه به چند دهه می‌رسد) است. فرض ساده‌سازی شده این روش ثابت در تمام پارامترهای اقتصادی و تبدیل مدل بلوکی زمین‌شناسی به یک مدل اقتصادی بدون تغییر در طول عمر معدن است. سپس به وسیله یکی از الگوریتم‌های طراحی محدوده نهایی، فرآیند طراحی انجام می‌پذیرد. عیب دیگر این رویکرد همراه شدن عدم قطعیت زمین‌شناسی (عیار و شکل توده ماده معدنی) و عدم قطعیت اقتصادی (قیمت و هزینه) در فرمول‌های محاسبه ارزش بلوک‌هاست که به صورت فزاینده‌ای ریسک را در طراحی محدوده نهایی افزایش می‌دهد. با توجه به فقدان راه حل قطعی برای پیش‌بینی شرایط آینده حسن روش محاسبه ارزش اقتصادی بلوک‌ها در "رسیدن به یک جواب در مقابل نرسیدن به هیچ جوابی" است. البته باید اضافه شود که حتی با فرض وجود یک روش برای پیش‌بینی قطعی پارامترهای اقتصادی در آینده، روش‌های فعلی تعیین محدوده نهایی به علت ناتوانی در تعیین زمان دقیق استخراج هر بلوک از به کارگیری این پیش‌بینی‌ها در تعیین محدوده نهایی نیز ناتوان خواهند بود. در این روش ارزش‌گذاری پس از تعیین محدوده نهایی تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای اقتصادی انجام می‌پذیرد.

^۱ Real Option Approach (ROA)

روش‌های پارامتری کردن به اعمال فرآیند جستجوی محدوده نهایی بر روی مدل عیاری می‌پردازند. این روش‌ها به دنبال حداکثرسازی مقدار فلز پیت به جای ارزش پولی پیت هستند (François-Bongarcon and Marechal, 1976; François-Bongarcon and Guibal, 1982). در مرحله بعد پارامترهای اقتصادی روی پیت اعمال می‌شوند تا بهترین پیت به دست آید. مزیت اصلی این روش استفاده از مدل عیاری است که در طول عمر معدن ثابت است؛ اما در مرحله بعد دوباره با پارامترهای اقتصادی کار شده و عدم قطعیت در آن نادیده گرفته می‌شود. در این روش فرض بر قطعی بودن پارامترهای زمین‌شناسی است و عدم قطعیت آن‌ها نادیده گرفته شده است. عیب دیگر این مجموعه روش‌ها نیاز به ریاضیات پیچیده، در مرحله یافتن پیت‌های با محتوای فلز حداکثر است. همچنین ارزش‌دهی صفر به بلوک‌های باطله نیز از معایب این روش‌ها است چون این بلوک‌ها در عین داشتن عیار صفر دارای هزینه استخراج می‌باشند.

روش‌های مدیریت عدم قطعیت در اقتصاد مثل ROA نیز بخشی دیگر از روش‌هایی هستند که به کار گرفته شده‌اند. این روش‌ها به بررسی احتمالات مربوط به تغییرات پارامترهای اقتصادی می‌پردازند و جنبه احتمالی بودن آن‌ها نیز باعث زیر سوال بودن کاربردی بودن آن‌ها برای سرمایه‌گذاران کلان معدنی است. از این روش برای تعیین محدوده نهایی و تخمین ذخیره معدن روباز (Akbari et al., 2008) یا ارزیابی‌های اقتصادی در طراحی معادن روباز استفاده شده است (Akbari et al., 2009) (Dimitrakopoulos and Sabour; 2007; Haque et al, 2016; Siña and Guzmán; 2018).

عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی و اقتصادی به قسمت نامشخص هر کدام از این دو بخش از پارامترهای طراحی معادن روباز برمی‌گردند. در مرحله اکتشاف ماده معدنی تخمین‌های عیار یا هندسه توده ماده معدنی بر اساس اطلاعات به دست آمده از داده‌های اکتشافی، منجر به ایجاد عدم قطعیت در پارامترهای زمین‌شناسی توده ماده معدنی و مدل بلوکی می‌شود. در تعیین ارزش اقتصادی بلوک‌ها در طول عمر

معدن از پارامترهای اقتصادی استفاده می‌شود. پارامترهای اقتصادی در طول عمر معدن به شدت تغییر کرده و دارای عدم قطعیت هستند، به گونه‌ای که حتی گفته می‌شود ممکن است باعث خروج پیت نهایی از شرط بهینگی گردند. این دو عدم قطعیت علی‌رغم تشابه، دارای یک تفاوت اساسی در منشا خود هستند و آن این است که قسمت مهمی از عدم قطعیت زمین‌شناسی به سطح تکنولوژیک اکتشافات بستگی دارد و در صورت استفاده از روش یا ابزارهای کامل‌تر یا نمونه‌برداری بیشتر یا حفر گمانه‌های اکتشافی بیشتر، کمتر خواهد شد. در مقابل عدم قطعیت اقتصادی و نامعلوم بودن شرایط کاملاً دقیق اقتصادی آینده به عدم توانایی ذاتی انسان در پیش‌بینی دقیق آینده بر می‌گردد. پارامترهای زمین‌شناسی (هندسه و عیار ماده معدنی) در حال حاضر در زیرزمین موجود بوده و ثابت باقی می‌مانند اما ابزاری که بتواند یک دید کامل و عینی از آن را ارائه دهد وجود ندارد و مهندسان به ناچار پس از گمانه‌زنی و نمونه‌برداری، با روش‌هایی مثل کریجینگ برای تخمین نقاط مجهول، روی می‌آورند. این درحالی است که آینده وجود نداشته و هیچ روشی نیز برای دریافت اطلاعات واقعی و عینی از تغییر پارامترهای اقتصادی در آینده وجود ندارد. معمولاً در این موارد از بررسی روند تغییرات در گذشته، پیش‌بینی‌هایی صورت می‌پذیرد که هیچ تضمینی برای وقوع این پیش‌بینی‌ها در آینده وجود ندارد. به عنوان مثال اگر بر اساس مطالعه تغییرات صعودی قیمت در گذشته فرض شود که در آینده نیز این روند وجود دارد، نتیجه‌ای که از تعمیم این پیش‌بینی به آینده دورتر به دست می‌آید روند روبه‌تزايد و سرسام‌آور قیمت فلزات خواهد بود که از نظر ریاضی به سمت بی‌نهایت میل خواهد کرد. همچنین اگر بر اساس روند گذشته فرض شود که تغییر هزینه‌ها در آینده به صورت کاهشی خواهد بود، می‌توان نتیجه گرفت که این روند به سمت صفر شدن هزینه‌ها پیش خواهد رفت. پس می‌توان گفت که هر دو این تعمیم‌ها و نتایج آن‌ها با واقعیات دنیای اقتصادی هم‌خوانی ندارند.

به طور خلاصه باید گفت عدم قطعیت‌ها و بررسی سناریوهای ممکن بهتر است که از ابتدای مسیر طراحی یعنی تعیین محدوده بهینه نهایی لحاظ شوند. در قسمت مهمی از روش‌های تعیین همزمان محدوده نهایی و برنامه‌ریزی مانند روش‌های عیارمحور گرشون، پارامتری کردن و روش وانگ و سویم ریسک از حذف پارامترهای اقتصادی از فرآیند طراحی به عنوان یک روش ابتکاری برای مقابله با عدم قطعیت اقتصادی استفاده کرده‌اند. این روش ارزش‌گذاری عیارمحور با وجود برخورداری از یک منطق جالب، دارای معایبی مانند در نظر نگرفتن هزینه‌های استخراج است.

۲-۹- جمع‌بندی

در این فصل روش‌ها و الگوریتم‌های طراحی محدوده از منظرهای مختلف تقسیم‌بندی شدند. مهم‌ترین این تقسیم‌بندی بر اساس دقت و تضمین رسیدن به جواب بهینه واقعی است. بر این اساس روش‌ها به سه دسته ریاضی، ابتکاری و فراابتکاری تقسیم شدند. طبق دسته‌بندی مذکور روش‌هایی مانند مخروط شناور و روش‌های اصلاح شده آن و الگوریتم کروبوفا از جمله روش‌های ابتکاری محسوب می‌شوند. همچنین برخی محققان از الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز برای تعیین محدوده نهایی استفاده کردند. از میان این روش‌ها روش لرچ و گروسمن (مبتنی بر نظریه گراف) و جریان شبکه به عنوان روش‌های ریاضی جواب بهینه واقعی را محاسبه می‌کنند.

برای هر معدن روباز پس از تعیین محدوده، برنامه‌ریزی تولید انجام می‌شود. هدف برنامه‌ریزی تولید رسیدن به بالاترین NPV در طول عملیات معدن‌کاری است. به این منظور از روش‌های مختلف و مدل‌های مختلف

برنامه‌ریزی در تحقیقات مختلف استفاده شده است. همچنین در بسیاری از این تحقیقات، عدم قطعیت در پارامترهای اقتصادی و زمین‌شناسی به صورت ویژه مورد توجه قرار گرفته است.

در برخی روش‌های طراحی معادن روباز به تعیین همزمان محدوده نهایی و برنامه‌ریزی پرداخته شده است. این روش‌ها از NPV به عنوان معیار بهینه‌سازی به جای سود تنزیل نشده استفاده کرده‌اند. از این میان روش‌های وانگ - سویم و لاتوری - گولوسینسکی مورد بررسی قرار گرفت و مزایا و معایب هر کدام نیز مطرح گردید.

فصل سوم

مدل سازی ریاضی تعیین

محدوده نهایی با

بیشینه سازی NPV

۳-۱- مقدمه

در فصل‌های قبل گفته شد که مسئله تعیین محدوده نهایی یک مسئله بهینه‌سازی است. به صورت عمده در اکثر تحقیقات هدف از بهینه‌سازی، حداکثرسازی سود تنزیل نشده بوده است که مهم‌ترین روش دستیابی به آن الگوریتم لرچ-گروسمن (LG) است. در مقابل این نظر، بخشی از تحقیقات بر روی حل مسئله بهینه‌سازی محدوده نهایی با هدف حداکثرسازی ارزش خالص فعلی (NPV) و تعیین هم‌زمان ترتیب استخراج بلوک‌ها و محدوده نهایی متمرکز شده‌اند. در این راستا روش‌ها و الگوریتم‌هایی نیز ارائه شده است که در فصل دوم به تفصیل به آن‌ها اشاره شد. علی‌رغم ارائه برخی روش‌ها و الگوریتم‌ها یکی از موضوعاتی که در این‌باره کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است و یا به طور کلی مغفول مانده است، مدون ساختن روابط ریاضی و ارائه توابع هدفی است که مسئله تعیین محدوده نهایی با حداکثرسازی NPV را تشریح می‌کنند. بیان ریاضی این مسئله علاوه بر تبیین دقیق آن، راه را برای بررسی‌های گسترده‌تر و استفاده سایر محققان به منظور توسعه روش‌ها ابتکاری، فراابتکاری و ریاضی باز خواهد کرد. در این راستا، در این فصل مدل‌های ریاضی این مسئله به صورت برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح و صفر و یکی^۱ توسعه داده شده است. در ادامه نیز پیشنهادهایی برای خطی‌سازی و کاهش متغیرهای تصمیم این مدل‌ها ارائه شده است.

۳-۲- مدل‌سازی مسئله محدوده نهایی با هدف حداکثرسازی

NPV

بر اساس تعریف ارائه شده از مسئله باید هدف از تابع ارائه شده برای تعیین محدوده نهایی حداکثرسازی NPV باشد. از طرف دیگر چون محدوده نهایی از ابتدا مشخص نیست، مدل مذکور باید برای تمام بلوک‌های کانسار نوشته شود. همچنین متغیرهای تصمیم خاصی نیز باید تعریف شوند تا مشخص کننده

^۱ Binary

محدوده بهینه نهایی باشند. پس اولاً هدف مدل‌سازی باید حداکثرسازی NPV باشد و ثانیاً مدل باید به صورت هم‌زمان شامل جستجو در کل بلوک‌های کانسار، تعیین ترتیب بهینه استخراج کل بلوک‌ها و مشخص کردن محدوده نهایی دارای بالاترین NPV باشد.

در ارزیابی اول از حجم مسئله چون به ازای هر بلوک باید متغیرهای تصمیم تعریف شود، مشخص می‌شود که جستجو در کل فضای کانسار ابعاد فضای جستجو را به صورت فزاینده‌ای افزایش خواهد داد. برای کاهش حجم این مسئله، وانگ و سویم پیشنهاد دادند (Wang and Sevim, 1993) که یک محدوده به عنوان بزرگ‌ترین پیت ممکن^۱ با رعایت شیب و محدودیت‌های مجاز استخراجی تعریف شود. این پیت شامل پایین‌ترین و دورترین بلوک‌های ماده معدنی است. با استفاده از این تکنیک بلوک‌های باطله‌ای که هیچ تاثیری در تعیین محدوده نهایی ندارند از محاسبات حذف می‌شوند. در شکل‌های ۱-۳ و ۲-۳، به ترتیب کل فضای کانسار و بزرگ‌ترین پیت ممکن (BPP) در یک مقطع عمودی نشان داده شده‌اند.

w	w	o	o	o	w	o	w	w	w
w	w	o	w	w	w	o	o	o	w
w	w	w	o	o	o	w	o	w	w
w	w	w	o	o	w	w	w	w	w
w	w	w	w	w	w	w	w	w	w

شکل ۱-۳- فضای جستجوی کامل برای کل کانسار (o بلوک ماده معدنی^۲ و w بلوک باطله^۳)

¹ The Biggest Possible Pit (BPP)

² Ore Block

³ Waste Block

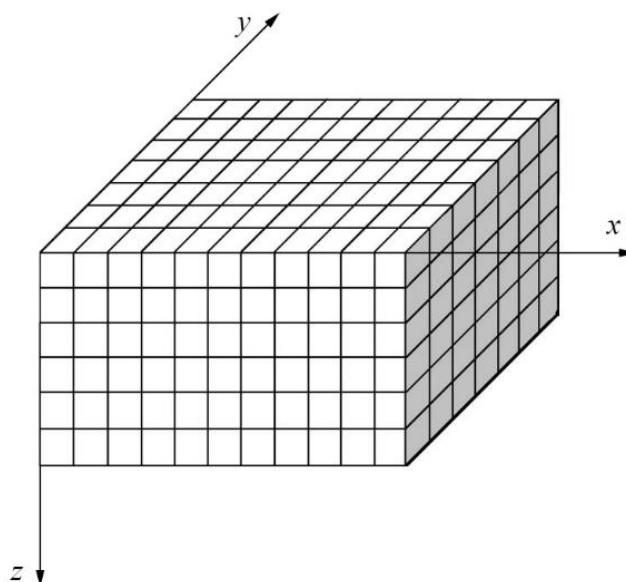
w	w	o	o	o	w	o	w	w	w
w	w	o	w	w	w	o	o	o	w
w	w	w	o	o	o	w	o	w	w
w	w	w	o	o	w	w	w	w	w
w	w	w	w	w	w	w	w	w	w

←BPP

شکل ۳-۲- تشکیل BPP و محدود کردن فضای جستجو

محورهای مختصات راست‌گرد مورد استفاده در این مدل‌سازی‌ها، در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.

براین اساس در روابط اندیس‌های i ، j و k به ترتیب برای محورهای x ، y و z تعریف شده‌اند.



شکل ۳-۳- محورهای مختصات x ، y و z

۳-۲-۱- برنامه‌ریزی عدد صحیح و صفر و یک

با توجه به توضیحات قبلی، تابع هدف (۳-۱) برای حل مسئله محدوده بهینه نهایی با هدف حداکثرسازی

NPV به صورت زیر به همراه محدودیت‌های (۳-۲) تا (۳-۶) ارائه می‌شود. مدل (۳-۱) یک برنامه‌ریزی

غیرخطی عدد صحیح و صفر و یک غیرخطی است که از برخی متغیرهای کمکی صفر و یکی در

محدودیت‌های آن استفاده شده است.

$$\text{Max } Z = \sum_{(i,j,k) \in BPP} V_{ijk} \times (1/1+c)^{y_{ijk}} \times x_{ijk} \quad (1-3)$$

Subject to:

$$x_{ijk} \leq x_{i'j'k'} \quad \forall (i, j, k) \in BPP, (i', j', k') \in UB_{ijk} \quad (2-3)$$

$$y_{ijk} > y_{i'j'k'} \quad \forall (i, j, k) \in BPP, (i', j', k') \in UB_{ijk} \quad (3-3)$$

$$\left. \begin{aligned} y_{ijk} - y_{i'j'k'} - M \times q_{ijk,i'j'k'} &< 0 \\ y_{ijk} - y_{i'j'k'} + M \times (1 - q_{ijk,i'j'k'}) &> 0 \end{aligned} \right\} \quad \forall (i, j, k) \in BPP, (i', j', k') \in BPP_k^{ij} \quad (4-3)$$

$$\left. \begin{aligned} y_{ijk} - y_{i''j''k''} - M \times q_{ijk,i''j''k''} &< 0 \\ y_{ijk} - y_{i''j''k''} + M \times (1 - q_{ijk,i''j''k''}) &> 0 \end{aligned} \right\} \quad \forall (i, j, k) \in BPP, (i'', j'', k'') \in ODC_{ijk} \quad (5-3)$$

$$1 \leq y_{ijk} \leq N \quad \forall (i, j, k) \in BPP \quad (6-3)$$

که در آن:

V_{ijk} ارزش اقتصادی بلوک با مختصات ijk

c نرخ بهره به ازای دوره زمانی استخراج هر بلوک

M یک عدد صحیح مثبت بزرگ

N تعداد بلوک‌های درون محدوده BPP

$OB \subset \mathbb{Z}^3$ مجموعه مختصات کل نقاط درون مرز کانسار^۲ (\mathbb{Z} مجموعه اعداد صحیح)

$BPP \subset \mathbb{Z}^3$ مجموعه مختصات نقاط درون BPP در حالت سه‌بعدی

^۱ با استفاده از متغیر صفر و یکی $q_{ijk,i'j'k'}$ تنها یکی از دو محدودیت مندرج در روابط (۴-۳) و (۵-۳) در تابع هدف اعمال خواهد شد. به این صورت که اگر متغیر تصمیم کمکی یک باشد، قید اول این روابط به علت بزرگ بودن عدد M بدیهی و زائد شده و قید دوم در تابع هدف اعمال می‌شود. به همین صورت، اگر این متغیر کمکی صفر باشد قید دوم به علت بزرگی مقدار M بدیهی و زائد خواهد شد.

^۲ Ore Body (OB)

مجموعه مختصات نقاط عضو مجموعه BPP_k که نسبت به نقطه ijk در یکی از شرط‌های تعریف شده صدق کنند.

مجموعه مختصات نقاط درون BPP در افق k

$$BPP_k \subset \mathbb{Z}^3$$

مجموعه مختصات نقاط درون مخروط رو به پایین^۱ بلوک با مختصات ijk و بدون عضویت (i, j, k)

$$DC_{ijk} \subset \mathbb{Z}^3$$

مجموعه مختصات بلوک‌های بالای بلوک ijk ^۲ در افق $i-1$ که برای استخراج آن باید برداشته شوند. (۹ بلوک بالایی برای هر بلوک (۱:۹))

$$UB_{ijk}^{**} \subset \mathbb{Z}^3$$

متغیر تصمیم عدد صحیح، بیان گر ترتیب بهینه استخراج بلوک با مختصات ijk

$$y_{ijk}$$

متغیر تصمیم صفر و یکی بیان گر حضور یا عدم حضور بلوک با مختصات ijk در محدوده نهایی

$$x_{ijk}$$

متغیر کمکی صفرویکی برای جلوگیری از برابر شدن مقادیر متغیرهای تصمیم y_{ijk} و $y_{i'j'k'}$

$$q_{ijk, i'j'k'}$$

همچنین روابط زیر میان مجموعه‌هایی تعریف شده در بالا برقرار می‌باشد:

$$BPP \subseteq OB \quad (۷-۳)$$

$$BPP_k \subset BPP \quad (۸-۳)$$

$$\bigcup_{k=1}^{k_{\max}} BPP_k = BPP \quad (۹-۳)$$

$$ODC_{ijk} = \left(\bigcup_{l=k+1}^{k_{\max}} BPP_l \right) \setminus DC_{ijk} \quad (۱۰-۳)$$

محدودیت‌های (۲-۳) و (۳-۳) از ضرورت فنی رعایت ترتیب استخراج بلوک‌ها نتیجه می‌شوند. محدودیت

(۲-۳) استخراج ۹ بلوک بالایی قبل از هر بلوک پایین‌تر از سطح توپوگرافی را تضمین می‌کند. نامعادله

^۱ Downward Cone (DC)

^۲ Upper Blocks

**

$UB_{ijk} = \{(i-1, j, k-1), (i, j, k-1), (i+1, j, k-1), (i-1, j-1, k-1), (i, j-1, k-1), (i+1, j-1, k-1), (i-1, j+1, k-1), (i, j+1, k-1), (i+1, j+1, k-1)\}$

(۳-۳) نیز بیان می‌دارد که ترتیب بهینه استخراج هر بلوک که پایین‌تر از بلوک‌های زیر سطح توپوگرافی قرار دارند، الزاماً بزرگ‌تر از ترتیب استخراج ۹ بلوک بالایی خود است.

محدودیت‌های (۳-۴) و (۳-۵) مجموعاً، با استفاده از متغیرهای کمکی صفر و یکی، اختصاص هر زمان استخراج به یک بلوک و هر بلوک به یک زمان را تضمین می‌کنند. از آنجایی که محدودیت (۳-۳) عدم تساوی ترتیب استخراج بلوک‌های درون مخروط معکوس بلوک ijk ، با ترتیب استخراج آن بلوک را تضمین می‌کند، تنها نیاز است که محدودیت‌های (۳-۴) و (۳-۵) برای تضمین عدم تساوی y_{ijk} با بلوک‌های خارج از مخروط معکوس بلوک ijk در هر افق و نیز زیر آن افق تا پایین‌ترین عمق BPP نوشته شود. شیوه تعیین مجموعه ODC_{ijk} نیز در رابطه (۳-۹) نشان داده شده است. در این رابطه ابتدا اعضای از مجموعه BPP که پایین‌تر از افق k قرار دارند مشخص می‌شود. سپس بلوک‌های عضو مخروط معکوس بلوک ijk از این مجموعه حذف می‌شوند.

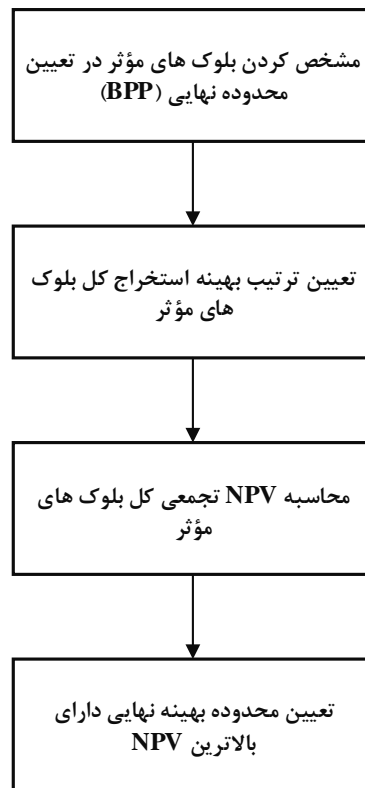
تعداد متغیرهای اصلی این تابع هدف برابر با N متغیر عدد صحیح y_{ijk} و N متغیر صفر و یکی x_{ijk} است. تعداد متغیرهای کمکی نیز کاملاً وابسته به شکل محدوده BPP و تعداد اعضای مجموعه‌های مرتبط با محدودیت‌های آن‌هاست.

همچنین باید اضافه کرد که با قرار دادن نرخ بهره صفر در تابع هدف (۳-۱)، مدل به حالت محدوده بهینه نهایی با هدف سود حداکثر تبدیل می‌شود. این امر نشان می‌دهد که محدوده بهینه نهایی دارای حداکثر سود حالت خاصی از محدوده نهایی با ارزش خالص فعلی حداکثر می‌باشد.

در مجموع می‌توان گفت که مزیت توسعه مدل ریاضی این مسئله در قالب برنامه‌ریزی عدد صحیح و صفر و یک این است که تعداد متغیرهای تصمیم اصلی آن $2 \times N$ است. در این تابع هدف برای جلوگیری از تساوی متغیرهای تصمیم مربوط به تعیین ترتیب بهینه استخراج از متغیرهای کمکی صفر و یکی استفاده شده است که تنها در محدودیت‌ها استفاده می‌شوند. به همین دلیل این قالب از تابع هدف برعکس تعداد

کم متغیرهای تصمیم دارای محدودیت‌های زیادی است که تعداد آن‌ها وابسته به شکل ظاهری کانسار و BPP است. با وجود حذف بلوک‌های اضافی از محاسبات از طریق تکنیک BPP هنوز مجموع تعداد متغیرها و محدودیت‌های این تابع هدف به صورت ذاتی بسیار زیاد است. این تعداد زیاد محدودیت و متغیر در کنار غیرخطی بودن آن این مسئله را برای کانسارهای بزرگ در رده مسائل NP-Hard قرار خواهد داد. بر خلاف مسئله تعیین محدوده نهایی که از طریق روش LG قابل حل است، مساله تعیین همزمان محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید مساله‌ای به شدت NP-Hard است (Johnson and Niemi, 1983; Espinoza et al, 2013). حل این نوع توابع غیرخطی با تعداد بالایی از متغیر تصمیم، بسیار مشکل و نیازمند حافظه و پردازنده‌های قدرتمند کامپیوتری است و معمولاً نرم‌افزارهای تحقیق در عملیاتی جواب‌های محلی تقریبی غیردقیق را برای این نوع مسائل بزرگ پیدا می‌کنند.

برای حل این مشکل می‌توان تابع هدف رابطه (۳-۱) را به دو مرحله خطی تقسیم کرد. در این راستا فرآیند کلی مدل‌سازی این تابع هدف و راه حل کلی پیشنهادی برای خطی‌سازی آن در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. در مرحله اول ترتیب بهینه استخراج کل بلوک‌ها به دست خواهد آمد و در مرحله بعد، محدوده بهینه نهایی مشخص می‌شود. با این روش تابع هدف بسیار حجیم و غیرخطی رابطه (۳-۱) به دو تابع خطی که هر کدام دارای نصف متغیرهای تصمیم تابع اصلی (N) هستند، تبدیل می‌شود.



شکل ۳-۴- فرآیند کلی مدل سازی ریاضی مسئله تعیین محدودده نهایی و خطی سازی آن

حل تابع هدف رابطه (۳-۱)، ابتدا مستلزم تعیین ترتیب بهینه کل بلوک‌هایی است که درون BPP قرار دارند. از نظر ریاضی برای ماکزیمم سازی مجموع جملات تابع هدف رابطه (۳-۱) باید تک تک جملات آن تا جایی که محدودیت‌های مسئله اجازه می‌دهند، ماکزیمم‌سازی شوند. به بیان فنی، از آن جایی که ضریب $1/1+c$ مقداری کوچک‌تر از یک است و مقدار آن به توان y_{ijk} ، نسبت عکس با مقدار توان دارد، به جملات بلوک‌های ماده معدنی (مثبت) باید زودترین (کوچک‌ترین) ترتیب (y_{ijk}) ممکن و به جملات مربوط به بلوک‌های منفی باید دیرترین (بزرگ‌ترین) توان (y_{ijk}) اختصاص یابد. بنابراین در مرحله اول باید ترتیب بهینه استخراج کل بلوک‌های درون BPP مشخص شود.

طبق این استدلال تابع هدف خطی مرحله اول به صورت (۳-۱۱) ارائه می‌شود:

$$\text{Min } Z = \sum_{(i,j,k) \in BPP} V_{ijk} \times y_{ijk} \quad (11-3)$$

Subject to:

$$y_{ijk} > y_{i'j'k'} \quad \forall (i,j,k) \in BPP, (i',j',k') \in UB_{ijk} \quad -3) \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} y_{ijk} - y_{i'j'k} - M \times q_{ijk,i'j'k} &< 0 \\ y_{ijk} - y_{i'j'k} + M \times (1 - q_{ijk,i'j'k}) &> 0 \end{aligned} \right\} \quad \forall (i,j,k) \in BPP, (i',j',k) \in BPP_k^j \quad -3) \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} y_{ijk} - y_{i''j''k''} - M \times q_{ijk,i''j''k''} &< 0 \\ y_{ijk} - y_{i''j''k''} + M \times (1 - q_{ijk,i''j''k''}) &> 0 \end{aligned} \right\} \quad \forall (i,j,k) \in BPP, (i'',j'',k'') \in ODC_{ijk} \quad -3) \quad (14)$$

$$1 \leq y_{ijk} \leq N \quad \forall (i,j,k) \in BPP \quad -3) \quad (15)$$

در مرحله دوم، از مقادیر متغیرهای y_{ijk} به دست آمده در تابع هدف رابطه (3-11)، به عنوان ضرایب ثابت در تعیین ارزش خالص فعلی هر بلوک استفاده می‌شود. در این مرحله متغیرهای صفر و یکی مربوط به تعیین محدوده نهایی، تنها مجهولات تابع محسوب می‌شوند. لازم به ذکر است که در این مرحله، پارامتر نرخ بهره (c) نقش مهمی در تعیین مقدار ارزش خالص فعلی هر بلوک (NPV_{ijk}) دارد که طراح باید آن را از ابتدا مشخص کند. به این ترتیب تابع هدف مرحله دوم به صورت زیر قابل بیان است:

$$\text{Max } Z = \sum_{(i,j,k) \in BPP} \underbrace{V_{ijk} \times (1/1+c)^{y_{ijk}}}_{NPV_{ijk}} \times x_{ijk} \quad (16-3)$$

Subject to:

$$x_{ijk} \leq x_{i'jk'} \quad \forall (i, j, k) \in BPP, (i', j', k') \in UB_{ijk} \quad (17-3)$$

همچنین با استفاده از نرخ بهره (c) ضریب تنزیل (r) از رابطه (۱۸-۳) قابل محاسبه است.

$$r = 1/1+c \quad (18-3)$$

طبق آن چه که از محدودیت‌های مربوط به استخراج بلوک‌ها گفته شد، می‌توان نتیجه گرفت که برای حل

این تابع کافی است ابتدا مقادیر تجمعی ارزش خالص کل بلوک‌ها، بر اساس ترتیب بهینه استخراج به

دست آمده در مرحله اول، محاسبه شود. سپس نقطه‌ای که در آن نمودار ارزش خالص فعلی تجمعی (

NPV_{\max}) حداکثر است را به عنوان محدوده نهایی ($y_{NPV_{\max}}$) تعیین کرد. به عبارت دیگر، تمام بلوک-

هایی که ترتیب بهینه استخراج آن‌ها قبل از $y_{NPV_{\max}}$ است، درون محدوده بهینه نهایی قرار دارند.

به منظور توضیح بهتر مدل‌سازی ریاضی ارائه شده در این بخش، ابتدا تابع هدف (۱-۳) برای مدل بلوکی

دو بعدی فرضی شکل ۳-۵، در یک مرحله و با استفاده از نرم‌افزار Lingo 17 حل شده و محدوده بهینه

نهایی برای آن تعیین می‌شود. سپس همان تابع هدف، در دو مرحله طبق استراتژی شکل ۳-۴ با استفاده

از توابع هدف روابط (۱۱-۳) و (۱۶-۳) حل و محدوده بهینه نهایی محاسبه شده است.

	$i \rightarrow$				
	-1	-1	2	-1	-1
k ↓	-1	+4	-1	-1	-1
	-1	-1	+1	-1	-1

شکل ۳-۵- مدل بلوکی دو بعدی فرضی

بر اساس توضیحات اولیه داده شده درباره این مدل‌سازی ریاضی، ابتدا باید BPP برای مدل شکل ۳-۵

مشخص شود. در شکل ۳-۶ بزرگ‌ترین پیت ممکن برای مدل شکل ۳-۵، نشان داده شده است.

-1	-1	2	-1	-1
-1	+4	-1	-1	-1
-1	-1	+1	-1	-1

←BPP

شکل ۳-۶ BPP برای مدل دو بعدی شکل ۳-۵

تابع هدف برای مدل مذکور، با نرخ بهره ۱۰ درصد (r ضریب تنزیل) و مفروضات زیر، به ازای دوره زمانی استخراج یک بلوک، به صورت زیر خواهد بود:

$$N = 9$$

$$c = 0.1$$

$$r = \frac{1}{1+0.1} \approx 0.9$$

$$M = 100$$

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & (-1 \times x_{1,1} \times (0.9^{y_{1,1}}) - 1 \times x_{1,2} \times (0.9^{y_{1,2}}) + 2 \times x_{1,3} \times (0.9^{y_{1,3}}) - 1 \times x_{1,4} \times (0.9^{y_{1,4}}) \\ & - 1 \times x_{1,5} \times (0.9^{y_{1,5}}) + 4 \times x_{2,2} \times (0.9^{y_{2,2}}) - 1 \times x_{2,3} \times (0.9^{y_{2,3}}) - 1 \times x_{2,4} \times (0.9^{y_{2,4}}) + x_{3,3} \times (0.9^{y_{3,3}}) \end{aligned}$$

Subject to:

الف: محدودیت‌های فنی مربوط به استخراج، ۱:۳

$$-x_{1,1} + x_{2,2} \leq 0$$

$$-x_{1,2} + x_{2,2} \leq 0$$

$$-x_{1,3} + x_{2,2} \leq 0$$

$$-x_{1,2} + x_{2,3} \leq 0$$

$$-x_{1,3} + x_{2,3} \leq 0$$

$$-x_{1,4} + x_{2,3} \leq 0$$

$$-x_{1,3} + x_{2,4} \leq 0$$

$$-x_{1,5} + x_{2,4} \leq 0$$

$$-x_{1,4} + x_{2,4} \leq 0$$

$$-x_{2,2} + x_{3,3} \leq 0$$

$$-x_{2,3} + x_{3,3} \leq 0$$

$$-x_{2,4} + x_{3,3} \leq 0$$

ب: محدودیت‌های مربوط به ترتیب استخراج بلوک‌ها، ناشی از محدودیت‌های فنی استخراج

$$-y_{1,1} + y_{2,2} > 0$$

$$-y_{1,3} + y_{2,2} > 0$$

$$-y_{1,2} + y_{2,2} > 0$$

$$-y_{1,2} + y_{2,3} > 0$$

$$-y_{1,3} + y_{2,3} > 0$$

$$-y_{1,4} + y_{2,3} > 0$$

$$-y_{1,3} + y_{2,4} > 0$$

$$-y_{1,4} + y_{2,4} > 0$$

$$-y_{1,5} + y_{2,4} > 0$$

$$-y_{2,2} + y_{3,3} > 0$$

$$-y_{2,3} + y_{3,3} > 0$$

$$-y_{2,4} + y_{3,3} > 0$$

ج: محدودیت‌های تضمین منحصر به فرد بودن زمان استخراج هر بلوک

$$y_{1,1} - y_{1,2} + M \times (1 - q_{1,1,1,2}) > 0$$

$$y_{1,1} - y_{1,2} - M \times q_{1,1,1,2} < 0$$

$$y_{1,1} - y_{1,3} + M \times (1 - q_{1,1,1,3}) > 0$$

$$y_{1,1} - y_{1,3} - M \times q_{1,1,1,3} < 0$$

$$y_{1,1} - y_{1,4} + M \times (1 - q_{1,1,1,4}) > 0$$

$$y_{1,1} - y_{1,4} - M \times q_{1,1,1,4} < 0$$

$$y_{1,1} - y_{1,5} + M \times (1 - q_{1,1,1,5}) > 0$$

$$y_{1,1} - y_{1,5} - M \times q_{1,1,1,5} < 0$$

$$y_{1,2} - y_{1,3} + M \times (1 - q_{1,2,1,3}) > 0$$

$$y_{1,2} - y_{1,3} - M \times q_{1,2,1,3} < 0$$

$$y_{1,2} - y_{1,4} + M \times (1 - q_{1,2,1,4}) > 0$$

$$y_{1,2} - y_{1,4} - M \times q_{1,2,1,4} < 0$$

$$y_{1,2} - y_{1,5} + M \times (1 - q_{1,2,1,5}) > 0$$

$$y_{1,2} - y_{1,5} - M \times q_{1,2,1,5} < 0$$

$$y_{1,3} - y_{1,4} + M \times (1 - q_{1,3,1,4}) > 0$$

$$y_{1,3} - y_{1,4} - M \times q_{1,3,1,4} < 0$$

$$y_{1,3} - y_{1,5} + M \times (1 - q_{1,3,1,5}) > 0$$

$$y_{1,3} - y_{1,5} - M \times q_{1,3,1,5} < 0$$

$$y_{1,4} - y_{1,5} + M \times (1 - q_{1,4,1,5}) > 0$$

$$y_{1,4} - y_{1,5} - M \times q_{1,4,1,5} < 0$$

$$y_{2,2} - y_{2,3} + M \times (1 - q_{2,2,2,3}) > 0$$

$$y_{2,2} - y_{2,3} - M \times q_{2,2,2,3} < 0$$

$$y_{2,2} - y_{2,4} + M \times (1 - q_{2,2,2,4}) > 0$$

$$y_{2,2} - y_{2,4} - M \times q_{2,2,2,4} < 0$$

$$y_{2,3} - y_{2,4} + M \times (1 - q_{2,3,2,4}) > 0$$

$$y_{2,3} - y_{2,4} - M \times q_{2,3,2,4} < 0$$

$$y_{1,4} - y_{2,2} - M \times q_{1,4,2,2} < 0$$

$$y_{1,4} - y_{2,2} + M \times (1 - q_{1,4,2,2}) > 0$$

$$y_{1,5} - y_{2,2} - M \times q_{1,5,2,2} < 0$$

$$y_{1,5} - y_{2,2} + M \times (1 - q_{1,5,2,2}) > 0$$

$$y_{1,5} - y_{2,3} - M \times q_{1,5,2,3} < 0$$

$$y_{1,5} - y_{2,3} + M \times (1 - q_{1,5,2,3}) > 0$$

$$y_{1,1} - y_{2,3} - M \times q_{1,1,2,3} < 0$$

$$y_{1,1} - y_{2,3} + M \times (1 - q_{1,1,2,3}) > 0$$

$$y_{1,1} - y_{2,4} - M \times q_{1,1,2,4} < 0$$

$$y_{1,1} - y_{2,4} + M \times (1 - q_{1,1,2,4}) > 0$$

$$y_{1,2} - y_{2,4} - M \times q_{1,2,2,4} < 0$$

$$y_{1,2} - y_{2,4} + M \times (1 - q_{1,2,2,4}) > 0$$

$$1 \leq y_{ij} \leq 9 \quad x_{ij} = 0 \text{ or } 1 \quad q_{ij,vj'} = 0 \text{ or } 1$$

جزئیات حل و نتایج (محلی^۱) به دست آمده از پردازش مدل بالا، توسط نرم افزار Lingo 17 به صورت زیر

است:

Local optimal solution found.

Objective value (NPV): 2.885400

Objective bound: 2.885400

Infeasibilities: 0.000000

Extended solver steps: 1093

Total solver iterations: 57873

Elapsed runtime seconds: 15.91

Model Class: MINLP

Variable Result

$x_{1,1}$ 1.000000

$x_{1,2}$ 1.000000

$x_{1,3}$ 1.000000

$x_{1,4}$ 0.000000

$x_{1,5}$ 0.000000

$x_{1,6}$ 1.000000

$x_{2,3}$ 0.000000

¹ Local Solution

$x_{2,4}$	0.000000
$x_{3,3}$	0.000000
$y_{1,1}$	3.000000
$y_{1,2}$	2.000000
$y_{1,3}$	1.000000
$y_{1,4}$	6.000000
$y_{1,5}$	5.000000
$y_{1,6}$	4.000000
$y_{2,3}$	7.000000
$y_{2,4}$	8.000000
$y_{3,3}$	9.000000

براساس نتایج حل این مدل در یک مرحله غیرخطی، محدوده بهینه نهایی و ترتیب بهینه استخراج بلوک-های مدل شکل ۳-۶ به صورت شکل ۳-۷ خواهد بود.

-1	-1	+2	-1	-1
..... 1,3	..... 1,2	..... 1,1	..... 0,6	..... 0,5
	+4	-1	-1	
	..... 1,4	..... 0,7	..... 0,8	
		+1		
		..... 0,9		

V_{ki}
.....
$x_{ki} \quad y_{ki}$

شکل ۳-۷- تعیین محدوده بهینه نهایی و ترتیب بهینه استخراج بلوک‌های مدل شکل ۳-۶ در یک مرحله

در ادامه با استفاده از دو مرحله‌ای کردن حل تابع هدف اصلی محدوده نهایی برای مدل بلوکی مفروض تعیین می‌شود. در این راستا ابتدا متغیرهای تصمیم مربوط به ترتیب بلوک‌ها مشخص و در مرحله بعد محدوده نهایی تعیین می‌شود. برای این منظور ابتدا تابع هدف (۳-۱۱) و محدودیت‌های مربوط به آن برای مدل شکل ۳-۵ به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\text{Max } Z = y_{1,1} + y_{1,2} - 2 \times y_{1,3} + y_{1,4} + y_{1,5} - 4 \times y_{2,2} + y_{2,3} + y_{2,4} - y_{3,3}$$

Subject to:

الف: محدودیت‌های مربوط به ترتیب استخراج بلوک‌ها، ناشی از محدودیت‌های فنی استخراج

$$- y_{1,1} + y_{2,2} > 0$$

$$- y_{1,3} + y_{2,2} > 0$$

$$\begin{aligned}
& -y_{1,2} + y_{2,2} > 0 \\
& -y_{1,2} + y_{2,3} > 0 \\
& -y_{1,3} + y_{2,3} > 0 \\
& -y_{1,4} + y_{2,3} > 0 \\
& -y_{1,3} + y_{2,4} > 0 \\
& -y_{1,4} + y_{2,4} > 0 \\
& -y_{1,5} + y_{2,4} > 0 \\
& -y_{2,2} + y_{3,3} > 0 \\
& -y_{2,3} + y_{3,3} > 0 \\
& -y_{2,4} + y_{3,3} > 0
\end{aligned}$$

ب: محدودیت‌های تضمین منحصر به فرد بودن زمان استخراج هر بلوک

$$\begin{aligned}
& y_{1,1} - y_{1,2} + M \times (1 - q_{1,1,1,2}) > 0 \\
& y_{1,1} - y_{1,2} - M \times q_{1,1,1,2} < 0 \\
& y_{1,1} - y_{1,3} + M \times (1 - q_{1,1,1,3}) > 0 \\
& y_{1,1} - y_{1,3} - M \times q_{1,1,1,3} < 0 \\
& y_{1,1} - y_{1,4} + M \times (1 - q_{1,1,1,4}) > 0 \\
& y_{1,1} - y_{1,4} - M \times q_{1,1,1,4} < 0 \\
& y_{1,1} - y_{1,5} + M \times (1 - q_{1,1,1,5}) > 0 \\
& y_{1,1} - y_{1,5} - M \times q_{1,1,1,5} < 0 \\
& y_{1,2} - y_{1,3} + M \times (1 - q_{1,2,1,3}) > 0 \\
& y_{1,2} - y_{1,3} - M \times q_{1,2,1,3} < 0 \\
& y_{1,2} - y_{1,4} + M \times (1 - q_{1,2,1,4}) > 0 \\
& y_{1,2} - y_{1,4} - M \times q_{1,2,1,4} < 0 \\
& y_{1,2} - y_{1,5} + M \times (1 - q_{1,2,1,5}) > 0 \\
& y_{1,2} - y_{1,5} - M \times q_{1,2,1,5} < 0 \\
& y_{1,3} - y_{1,4} + M \times (1 - q_{1,3,1,4}) > 0 \\
& y_{1,3} - y_{1,4} - M \times q_{1,3,1,4} < 0 \\
& y_{1,3} - y_{1,5} + M \times (1 - q_{1,3,1,5}) > 0 \\
& y_{1,3} - y_{1,5} - M \times q_{1,3,1,5} < 0 \\
& y_{1,4} - y_{1,5} + M \times (1 - q_{1,4,1,5}) > 0 \\
& y_{1,4} - y_{1,5} - M \times q_{1,4,1,5} < 0 \\
& y_{2,2} - y_{2,3} + M \times (1 - q_{2,2,2,3}) > 0 \\
& y_{2,2} - y_{2,3} - M \times q_{2,2,2,3} < 0 \\
& y_{2,2} - y_{2,4} + M \times (1 - q_{2,2,2,4}) > 0 \\
& y_{2,2} - y_{2,4} - M \times q_{2,2,2,4} < 0 \\
& y_{2,3} - y_{2,4} + M \times (1 - q_{2,3,2,4}) > 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_{2,3} - y_{2,4} - M \times q_{2,3,2,4} &< 0 \\
y_{1,4} - y_{2,2} - M \times q_{1,4,2,2} &< 0 \\
y_{1,4} - y_{2,2} + M \times (1 - q_{1,4,2,2}) &> 0 \\
y_{1,5} - y_{2,2} - M \times q_{1,5,2,2} &< 0 \\
y_{1,5} - y_{2,2} + M \times (1 - q_{1,5,2,2}) &> 0 \\
y_{1,5} - y_{2,3} - M \times q_{1,5,2,3} &< 0 \\
y_{1,5} - y_{2,3} + M \times (1 - q_{1,5,2,3}) &> 0 \\
y_{1,1} - y_{2,3} - M \times q_{1,1,2,3} &< 0 \\
y_{1,1} - y_{2,3} + M \times (1 - q_{1,1,2,3}) &> 0 \\
y_{1,1} - y_{2,4} - M \times q_{1,1,2,4} &< 0 \\
y_{1,1} - y_{2,4} + M \times (1 - q_{1,1,2,4}) &> 0 \\
y_{1,2} - y_{2,4} - M \times q_{1,2,2,4} &< 0 \\
y_{1,2} - y_{2,4} + M \times (1 - q_{1,2,2,4}) &> 0 \\
1 \leq y_{ki} \leq 9 & \\
q_{ki,kT} = 0 \text{ or } 1 &
\end{aligned}$$

پس از حل این مدل با نرم افزار لینگو نتیجه بهینه سراسری^۱ زیر به دست آمد:

Global optimal solution found.

Objective value:	4.000000
Objective bound:	4.000000
Infeasibilities:	0.000000
Extended solver steps:	9
Total solver iterations:	486
<u>Elapsed runtime seconds:</u>	<u>0.20</u>

Model Class: **MILP**

<u>Variable</u>	<u>Result</u>
$y_{1,1}$	3.000000
$y_{1,2}$	2.000000
$y_{1,3}$	1.000000
$y_{1,4}$	6.000000
$y_{1,5}$	5.000000
$y_{1,6}$	4.000000
$y_{2,3}$	7.000000
$y_{2,4}$	8.000000
$y_{3,3}$	9.000000

ترتیب بهینه به دست آمده طبق نتایج بالا برای مدل فرضی در شکل ۳-۸ نشان داده شده است.

¹ Global Optimal Solution

-1 3	-1 2	+2 1	-1 6	-1 5
	+4 4	-1 7	-1 8	
		+1 9		

V_{ki}
.....
y_{ki}

شکل ۳-۸- تعیین ترتیب بهینه کل بلوک‌های BPP برای یافتن محدوده بهینه نهایی در مرحله اول

همان‌گونه که در معرفی کلی مدل دو مرحله‌ای بیان شد، در مرحله دوم یعنی تعیین محدوده بهینه نهایی، پاسخ‌های به دست آمده برای متغیرهای تصمیم مرحله قبل، به عنوان پارامترهای ثابت در مرحله دوم استفاده می‌شوند. تنها متغیرهای صفر و یکی مربوط به تعیین محدوده بهینه مجهولات تابع هدف در مرحله می‌باشند. تابع هدف این مرحله بر اساس رابطه (۳-۱۷)، برای مدل بلوکی شکل ۳-۸ به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} \text{Max}Z = & -0.729 \times x_{1,1} - 0.81 \times x_{1,2} + 1.8 \times x_{1,3} - 0.59 \times x_{1,4} - 0.53 \times x_{1,5} + 2.6244 \times x_{2,2} \\ & - 0.43 \times x_{2,3} - 0.4783 \times x_{2,4} + 0.387 \times x_{3,3} \end{aligned}$$

Subject to:

محدودیت‌های فنی مربوط به استخراج، ۳:۱

- $x_{1,1} + x_{2,2} \leq 0$
- $x_{1,2} + x_{2,2} \leq 0$
- $x_{1,3} + x_{2,2} \leq 0$
- $x_{1,2} + x_{2,3} \leq 0$
- $x_{1,3} + x_{2,3} \leq 0$
- $x_{1,4} + x_{2,3} \leq 0$
- $x_{1,3} + x_{2,4} \leq 0$
- $x_{1,5} + x_{2,4} \leq 0$
- $x_{1,4} + x_{2,4} \leq 0$
- $x_{2,2} + x_{3,3} \leq 0$
- $x_{2,3} + x_{3,3} \leq 0$
- $x_{2,4} + x_{3,3} \leq 0$

نتایج این مرحله نیز در نرم افزار لینگو به شرح زیر به دست آمد:

Global optimal solution found.

Objective value:	2.885400
Objective bound:	2.885400
Infeasibilities:	0.000000
Extended solver steps:	0
Total solver iterations:	0
Elapsed runtime seconds:	0.02

Model Class: **PILP**

Variable	Result
$x_{1,1}$	1.000000
$x_{1,2}$	1.000000
$x_{1,3}$	1.000000
$x_{1,4}$	0.000000
$x_{1,5}$	0.000000
$x_{1,6}$	1.000000
$x_{2,3}$	0.000000
$x_{2,4}$	0.000000
$x_{3,3}$	0.000000

پس از طی این دو مرحله محدودده بهینه نهایی به صورت شکل ۳-۹ به دست آمده است. همان گونه که از نتایج مشاهده می شود محدودده بهینه نهایی با ارزش خالص فعلی ۲/۸۸۵ واحد پولی و ۴ بلوک دارای بیشترین NPV است. مقادیر تجمعی ارزش خالص فعلی بلوک ها به ترتیب استخراج آنها محاسبه و در جدول ۳-۱ آورده شده است و در شکل ۳-۱۰ نیز نمودار مقادیر تجمعی ارزش خالص فعلی بلوک ها نمایش داده شده است.

-1 1,3	-1 1,2	+2 1,1	-1 0,6	-1 0,5
	+4 1,4	-1 0,7	-1 0,8	
		+1 0,9		

$$V_{ki}$$

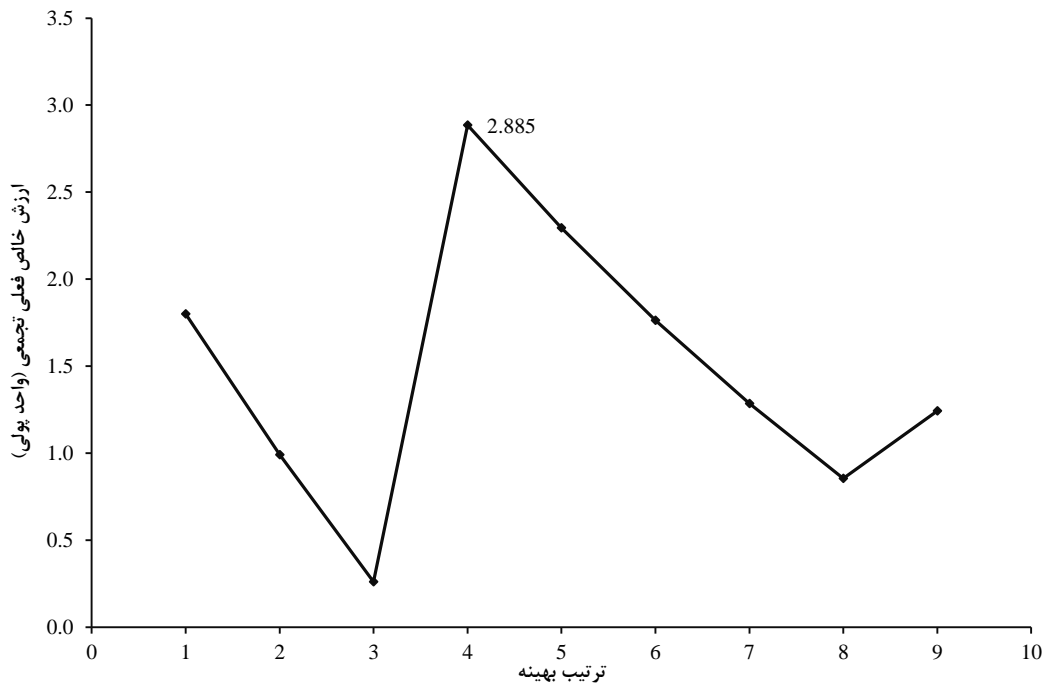
.....

$$x_{ki}, y_{ki}$$

شکل ۳-۹- تعیین محدوده بهینه نهایی در مرحله دوم و ترتیب بهینه بلوک‌ها

جدول ۳-۱- محاسبه ارزش خالص فعلی تجمعی مدل بلوکی فرضی

ارزش خالص فعلی تجمعی (واحد پولی)	ارزش خالص فعلی (واحد پولی)	ارزش (واحد پولی)	ترتیب بهینه	مختصات بلوک (k,i)
1.800	1.800	2	1	(1,3)
0.990	-0.810	-1	2	(1,2)
0.261	-0.729	-1	3	(1,1)
<u>2.885</u> (NPV_{max})	2.624	4	<u>4</u>	<u>(2,2)</u>
2.295	-0.590	-1	5	(1,5)
1.763	-0.531	-1	6	(1,4)
1.285	-0.478	-1	7	(2,3)
0.855	-0.430	-1	8	(2,4)
1.242	0.387	1	9	(3,3)



شکل ۳-۱۰- نمودار تجمعی ارزش خالص فعلی و نقطه حداکثر آن

در این مثال، نتایج حاصل از حل مدل مثال عددی فوق در یک مرحله و دو مرحله (طبق استراتژی پیشنهادی) بر هم منطبق می‌باشند. از آنجایی که تابع هدف در روش یک مرحله‌ای غیرخطی و نیز دارای تعداد بالاتر متغیر است، جواب‌هایی که نرم‌افزار بهینه‌سازی به دست می‌آورد، پاسخ‌های بهینه محلی است و با افزایش ابعاد مسئله دست‌یابی به پاسخ دقیق بهینه بسیار مشکل است. تبدیل مسئله به دو زیر مسئله خطی که تعداد متغیرهای اصلی هر کدام دقیقاً نصف مدل غیرخطی است، راه حلی ریاضی مناسبی برای دست‌یابی به پاسخ بهینه واقعی است. این استراتژی می‌تواند به عنوان پایه ارائه و توسعه الگوریتم‌های حل مسئله تعیین محدوده بهینه نهایی باشد.

همان‌گونه که گفته شد، متغیرهای تصمیم استفاده شده برای تابع هدف رابطه (۳-۱) ترکیبی از اعداد صحیح و صفر و یکی است. با وجود این که این شیوه باعث کاهش تعداد متغیرهای تصمیم اصلی می‌شود،

اما تعداد محدودیت‌های مسئله را به شدت افزایش می‌دهد. به همین دلیل در بخش‌های بعدی از مدل برنامه‌ریزی کاملاً صفر و یکی برای توسعه تابع هدف مسئله استفاده می‌شود.

۳-۲-۲- برنامه‌ریزی صفر و یکی

در این شیوه نوشتن تابع هدف پس از تعیین BPP، یک متغیر تصمیم صفر و یکی به حضور یا عدم حضور هر بلوک در محدوده نهایی اختصاص داده می‌شود. همچنین برای تعیین زمان استخراج هر بلوک، به تعداد

بلوک‌های درون BPP به عنوان تمام حالات ممکن برای ترتیب استخراج هر بلوک متغیر تصمیم تعریف می‌شود. در این حالت محدودیت‌ها به صورت محسوسی کاهش خواهد یافت اما تعداد متغیرهای تصمیم به شدت افزایش می‌یابند.

مسئله بهینه‌سازی همزمان محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید به صورت مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی زیر ارائه می‌شود.

$$Max Z = \sum_{(i,j,k) \in BPP} V_{ijk} \times \underbrace{\left(\frac{1}{1+c} \right)^{\sum_{t=1}^N (t \times p_{ijkt})}}_{NPV_{ijk}} \times x_{ijk} \quad (19-3)$$

Subject to:

$$x_{ijk} \leq x_{i'j'k'} \quad \forall (i, j, k) \in BPP, (i', j', k') \in UB_{ijk} \quad (20-3)$$

$$\sum_{t=1}^N p_{ijkt} = 1 \quad \forall (i, j, k) \in BPP \quad (21-3)$$

$$\sum_{(i,j,k) \in BPP} p_{ijkt} = 1 \quad \forall t \in T \quad (22-3)$$

$$\sum_{t=1}^N t \times p_{ijkt} > \sum_{t=1}^N t \times p_{i'j'k't} \quad \forall (i, j, k) \in BPP, (i', j', k') \in UB_{ijk} \quad (23-3)$$

$$y_{ijk} = \sum_{t=1}^N t \times p_{ijkt} \quad \forall (i, j, k) \in BPP \quad (24-3)$$

که در آن:

$$T = \{1, \dots, N\} \quad \text{مجموعه تمام ترتیب‌های بلوک‌های درون BPP}$$

$$t \in T \quad \text{زمان (ترتیب)}$$

$$p_{ijkt} \quad \text{متغیر تصمیم صفر و یکی برای تعیین ترتیب استخراج بلوک } ijk$$

محدودیت (۲۰-۳) مربوط به رعایت مسائل فنی استخراج یعنی لزوم استخراج ۹ بلوک بالایی برای دسترسی به بلوک پایین است. محدودیت‌های (۲۱-۳) و (۲۲-۳) اختصاص هر زمان به یک بلوک و هر بلوک به یک زمان را تضمین می‌کنند. محدودیت (۲۳-۳) نیز کوچک‌تر بودن ترتیب استخراج بلوک‌های درون مخروط رو به بالای هر بلوک از ترتیب آن بلوک را بیان می‌کند. رابطه (۲۴-۳) نحوه محاسبه ترتیب استخراج هر بلوک پس از تعیین متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد. تعداد متغیرهای تصمیم این مدل برابر با $N \times (N+1)$ است.

تابع هدف صفر و یکی مسئله محدوده نهایی را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت:

$$Max Z = \sum_{(i, j, k) \in BPP} x_{ijk} \times \left(\underbrace{\sum_{t=1}^N V_{ijk} \times \frac{1}{(1+c)^t} \times p_{ijkt}}_{NPV_{ijk}} \right) \quad (25-3)$$

Subject to:

$$x_{ijk} \leq x_{i'j'k'} \quad \forall (i, j, k) \in BPP, (i', j', k') \in UB_{ijk} \quad (26-3)$$

$$\sum_{t=1}^N p_{ijkt} = 1 \quad \forall (i, j, k) \in BPP \quad (27-3)$$

$$\sum_{(i, j, k) \in BPP} p_{ijkt} = 1 \quad \forall t \in T \quad (28-3)$$

$$\sum_{t=1}^N t \times p_{ijkt} > \sum_{t=1}^N t \times p_{i'j'k't} \quad \forall (i, j, k) \in BPP, (i', j', k') \in UB_{ijk} \quad (29-3)$$

مفهوم محدودیت‌های این تابع هدف نیز همانند محدودیت‌های تابع هدف قبل است. تعداد متغیرهای تصمیم و محدودیت‌های این تابع هدف نیز با آن برابر است.

این توابع هدف صفر و یکی مانند تابع هدف عدد صحیح ارائه شده غیرخطی بوده و بر اساس استراتژی بیان شده می‌توان آن‌ها را خطی کرد. بنابراین می‌توان تابع هدف خطی مرحله اول را به صورت روابط زیر بیان کرد:

$$Min Z = \sum_{(i,j,k) \in BPP} \sum_{t=1}^N V_{ijk} \times P_{ijkt} \quad (30-3)$$

or

$$Max Z = \sum_{(i,j,k) \in BPP} \sum_{t=1}^N \left(\underbrace{V_{ijk} \times \frac{1}{(1+c)^t}}_{NPV_{ijkt}} \times P_{ijkt} \right) \quad (31-3)$$

Subject to:

$$\sum_{t=1}^N p_{ijkt} = 1 \quad \forall (i, j, k) \in BPP \quad (32-3)$$

$$\sum_{t=1}^N t \times p_{ijkt} > \sum_{t=1}^N t \times p_{i'j'k't} \quad \forall (i, j, k) \in BPP, (i', j', k') \in UB_{ijk} \quad (33-3)$$

$$\sum_{(i,j,k) \in BPP} p_{ijkt} = 1 \quad \forall t \in T \quad (34-3)$$

پس از حل تابع هدف مرحله اول بر اساس مقادیر به دست آمده برای p_{ijkt} از آن‌ها به عنوان ضرایب ثابت در توابع هدف (۳-۱۹) یا (۳-۲۵) همراه با محدودیت (۳-۲۰) استفاده می‌شود و محدوده نهایی بر اساس آن به دست می‌آید.

یکی از مزیت‌های رابطه (۳-۲۵) به (۳-۱۹) برای بیان صورت ریاضی مسئله بهینه‌سازی محدوده نهایی قابلیت توسعه پارامترهای آن به حالت وابستگی به زمان است. بر این اساس تابع هدف رابطه (۳-۲۵) را می‌توان به صورت توسعه یافته به صورت رابطه (۳-۲۵) نوشت:

$$\text{Max } Z = \sum_{(i,j,k) \in BPP} \left(x_{ijk} \times \left(\sum_{t=1}^N \underbrace{V(g_{ijk}, \text{economy}(t)) \times \frac{1}{(1+c)^t}}_{NPV_{ijkt}} \times p_{ijkt} \right) \right) \quad (3-25)$$

Subject to:

$$x_{ijk} \leq x_{i'j'k'} \quad \forall (i,j,k) \in BPP, (i',j',k') \in UB_{ijk} \quad (3-36)$$

$$\sum_{t=1}^N p_{ijkt} = 1 \quad \forall (i,j,k) \in BPP \quad (3-37)$$

$$\sum_{(i,j,k) \in BPP} p_{ijkt} = 1 \quad \forall t \in T \quad (3-38)$$

$$\sum_{t=1}^N t \times p_{ijkt} > \sum_{t=1}^N t \times p_{i'j'k't} \quad \forall (i,j,k) \in BPP, (i',j',k') \in UB_{ijk} \quad (3-39)$$

که در آن:

$\text{economy}(t)$ پارامترهای اقتصادی در زمان t

g_{ijk} عیار بلوک با مختصات ijk

تابع هدف مذکور یک رابطه غیرخطی بوده و برای خطی‌سازی آن مانند توابع قبلی می‌توان از استراتژی پیشنهاد شده استفاده کرد. تابع هدف رابطه (۳-۳۵) بیان‌گر این نکته است که به لحاظ ریاضی در صورتی که اطلاعات اقتصادی سال‌های آینده در طول عمر یک معدن در دسترس و قابل پیش‌بینی باشد، بر خلاف گفته ویتل می‌توان معدن را بر اساس حداکثرسازی NPV به گونه‌ای طراحی کرد که به صورت هم‌زمان، زمان استخراج بلوک، ارزش اقتصادی بلوک در آن زمان و محدوده نهایی را محاسبه کرد. بنابراین

یکی از موانع مهم در راه استفاده دقیق از این تابع هدف با وجود حل بسیار سخت آن، عدم امکان پیش‌بینی دقیق (و یا حتی با تقریب قابل قبول) وضعیت پارامترهای اقتصادی در آینده است. فضای جستجوی زمان استخراج هر بلوک در مدل‌های صفر و یکی ارائه شده شامل کل تعداد ترتیب‌های درون BPP است. به این معنا که به ازای هر زمان استخراج یک متغیر تصمیم برای هر بلوک ایجاد می‌شود. این موضع باعث گسترش بسیار زیاد حجم مسئله می‌شود. در بخش بعد پیشنهادهایی برای کاهش فضای جستجو و بهینه‌سازی تعداد متغیرهای تصمیم مدل‌های ارائه شده مطرح می‌شود.

۳-۲-۳- زودترین و دیرترین زمان ممکن برای استخراج یک بلوک

معمولاً به صورت سنتی در مدل‌سازی‌های ریاضی برنامه‌ریزی تولید فرض می‌شود که یک بلوک در کل زمان‌های استخراج قابل استخراج است. سپس با حل مدل ریاضی زمان بهینه استخراج آن بلوک محاسبه می‌شود. بر اساس اهداف متداول در برنامه‌ریزی تولید که مهم‌ترین آن دستیابی به بالاترین NPV است، تا جایی که محدودیت‌های مسئله اجازه می‌دهند، باید بلوک‌های ماده معدنی با عیار بیشتر هر چه زودتر استخراج شوند و در مقابل استخراج بلوک‌های باطله به تأخیر بیفتد. مدل‌سازی ارائه شده برای تعیین هم‌زمان زمان استخراج بلوک‌ها و محدوده نهایی نیز از این قاعده برای حداکثرسازی NPV پیروی می‌کند. در توابع هدف ارائه شده در بخش‌های قبل در یک مرحله ابتدا از طریق تکنیک BPP بلوک‌ها و متغیرهای تصمیمی که اساساً نقشی در تعیین محدوده نهایی ندارند از محاسبات حذف شدند. بر اساس پیش‌فرض مرسوم یعنی جستجوی زمان بهینه استخراج یک بلوک در بازه‌ای به وسعت کل زمان‌های ممکن درون BPP، تعداد متغیرهای تصمیم هر بلوک به اندازه تمام این زمان‌ها در توابع هدف تعیین گردیدند. اما در عمل و به لحاظ فنی هیچ‌گاه امکان ندارد که یک بلوک (باطله یا ماده معدنی) در افق دوم زیر سطح توپوگرافی به عنوان اولین بلوک استخراج گردد. به همین ترتیب می‌توان گفت که بلوک‌های آخرین افق زیر سطح توپوگرافی، ولو بر ارزش‌ترین بلوک‌ها، را هیچ‌گاه نمی‌توان زودتر از یک زمان خاص استخراج

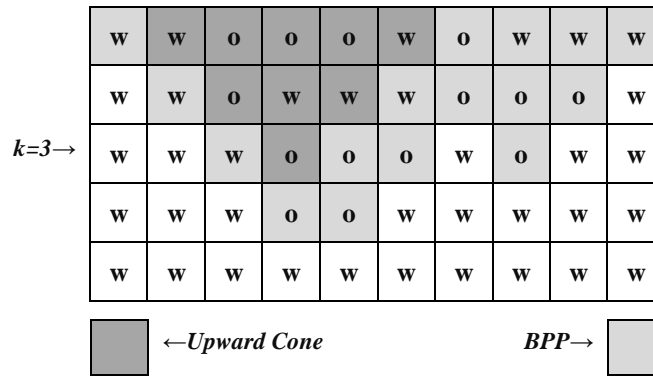
کرد. پس برای هر بلوک می‌توان با تعیین زودترین زمان ممکن استخراج متغیرهای تصمیمی که مربوط به زمان‌هایی زودتر از این زمان می‌باشند را از تابع هدف حذف کرد.

از طرف دیگر هر بلوک فارغ از نوع آن (باطله یا ماده معدنی) خود جزیی از مسیر دسترسی به بلوک‌های زیرین است. بر اساس آنچه که از روند مورد نیاز برای دستیابی به NPV بالاتر گفته شده، بهتر است که برداشت

بلوک‌های باطله هر چه دیرتر انجام شود تا عملیات معدن‌کاری زودتر به سوددهی برسد. اما همان‌گونه که ذکر شد، برداشت یک بلوک باطله را نمی‌توان بیشتر از یک زمان به تاخیر انداخت و الزاماً باید برای دسترسی به بلوک‌های زیرین آن را استخراج کرد. مفهوم زودترین زمان استخراج در تحقیقات گذشته (Cullenbine et al., 2011; Chicoisne et al., 2012; Lambert et al., 2014) نیز مورد استفاده قرار گرفته است و در این تحقیق بنا بر نیاز و مدل‌سازی ارائه شده روابط مناسب برای محاسبه این مفاهیم پیشنهاد شده‌اند.

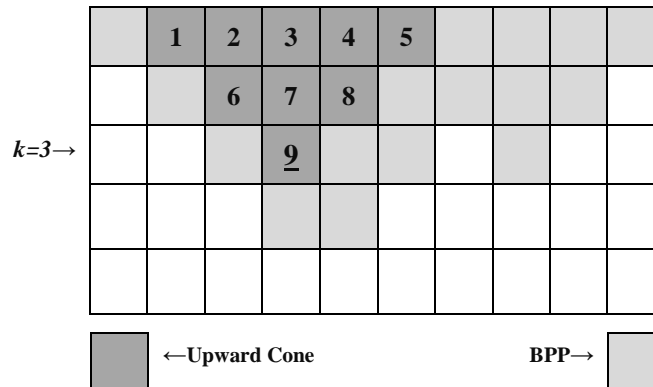
در این تحقیق فرض شده است که باید ۳ بلوک بالایی در مدل‌های دو بعدی و ۹ بلوک بالای هر بلوک برداشته شود، تا معدن‌کار از نظر فنی بتواند بلوک پایین آن‌ها را استخراج کند. به عبارتی باید برای استخراج یک بلوک واقع در افق دوم ۹ بلوک از افق اول استخراج شود. با این توضیح مشخص می‌شود که زودترین زمان استخراج این بلوک عدد ۱۰ می‌باشد. با تعمیم این استدلال برای همه بلوک‌های درون BPP، می‌توان گفت که سریع‌ترین راه دسترسی به یک بلوک از مسیر مخروط رو به بالایی^۱ که راس آن در بلوک مورد نظر قرار دارد، می‌گذرد. در شکل ۳-۱۱ مخروط رو به بالایی یک بلوک درون BPP نشان داده شده است. پس سریع‌ترین زمان استخراج یا به عبارتی کم‌ترین عدد ترتیب استخراج یک بلوک برابر با تعداد بلوک‌های درون مخروط رو به بالای آن بلوک به اضافه خود آن بلوک خواهد بود.

¹ Upward Cone



شکل ۱۱-۳- مخروط رو به بالا برای یک بلوک در افق ۳

در شکل ۱۱-۳ تعداد بلوک‌های مخروط روبه بالای بلوک مورد نظر به اضافه خود آن بلوک برابر با ۹ است. پس برای سریع‌ترین دسترسی به بلوک مذکور باید ۸ بلوک برداشته شود و خود بلوک، بلوک نهم خواهد بود. در شکل ۱۲-۳ مفهوم زودترین زمان ممکن برای استخراج یک بلوک (فارغ از نوع آن) برای این بلوک نشان داده شده است.



شکل ۱۲-۳- زودترین زمان ممکن برای استخراج یک بلوک در افق ۳

بر اساس مطالب بالا، می‌توان با استفاده از روابط زیر زودترین زمان ممکن برای استخراج یک بلوک را محاسبه کرد. این روابط برای مدل‌های دو بعدی و سه بعدی و برای هر حالت نیز رابطه تقریبی و دقیق ارائه شده است.

$$seq_{ki}^{\min} = w_{ki} \tag{۴۰-۳}$$

$$seq_{ki}^{\min} \sim k^2 \tag{۴۱-۳}$$

$$seq_{ijk}^{\min} = w_{ijk} \quad (42-3)$$

$$seq_{ijk}^{\min} \sim (k+1) \times (2 \times k + 1) \times ((2 \times k + 3)/3) \quad (43-3)$$

که در این روابط:

seq_{ki}^{\min} زودترین زمان ممکن برای استخراج بلوک ki

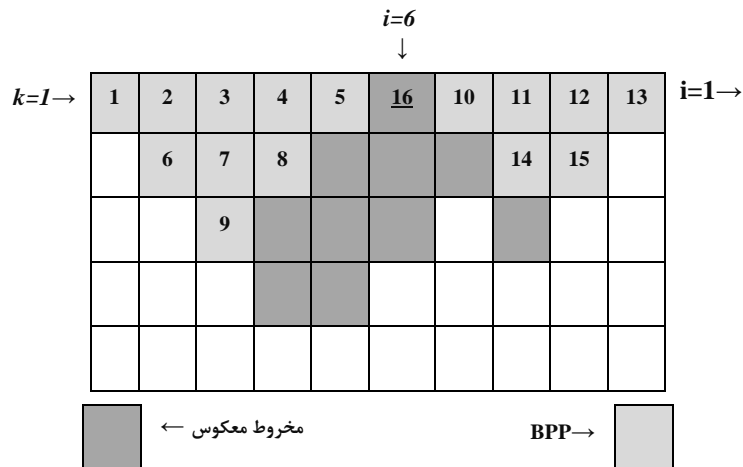
seq_{ijk}^{\min} زودترین زمان ممکن برای استخراج بلوک ijk

w_{ki} تعداد بلوک‌های درون مخروط رو به بالای بلوک ki

w_{ijk} تعداد بلوک‌های درون مخروط رو به بالای بلوک ijk

روابط (3-41) و (3-43) به صورت تقریبی زودترین زمان استخراج یک بلوک را در حالت‌های دو و سه بعدی محاسبه می‌کنند و هر چه سطح توپوگرافی به افقی بودن نزدیک‌تر شود این روابط دقیق‌تر عمل خواهند کرد.

مجموعه بلوک‌های درون مخروط معکوس یک بلوک در حقیقت بلوک‌هایی هستند که برای استخراج آن-ها باید بلوک راس آن مخروط برداشته شود. در صورتی که این بلوک باطله باشد نمی‌توان استخراج آن را بیشتر از زمانی خاص به تاخیر انداخت. در حقیقت دیرترین زمان استخراج یک بلوک حاصل تفاضل تعداد بلوک‌های BPP و تعداد بلوک‌های درون مخروط معکوس آن بلوک است. بر این اساس در شکل 3-13 دیرترین زمانی که یک بلوک را می‌توان استخراج کرد نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۳ - مفهوم دیرترین زمان استخراج یک بلوک با مختصات (۱,۶)

از آن جایی که در کانسارهای واقعی، شکل مرزهای BPP (مخصوصاً مرز پایین) و بالتبع آن مرز زیرین مخروط‌های رو به پایین بلوک‌ها، از الگوی ریاضی منظمی پیروی نمی‌کنند، بر عکس مفهوم زودترین زمان استخراج که می‌توان با فرض افقی بودن سطح توپوگرافی به صورت تقریبی رابطه آن را پیش‌بینی کرد، نمی‌توان فرمول مشخصی را برای آن ارائه داد. با این وجود تعریف آن و نحوه محاسبه آن در هر نوع کانساری کاملاً مشخص و قابل انجام است. طبق این تعاریف از روابط زیر می‌توان دیرترین زمان استخراج یک بلوک را محاسبه نمود:

$$seq_{ik}^{\max} = N - m_{ik} \quad (۴۵-۳)$$

$$seq_{ijk}^{\max} = N - m_{ijk} \quad (۴۶-۳)$$

که در این روابط:

N

تعداد بلوک‌های درون BPP

seq_{ik}^{\max}

دیرترین زمان ممکن برای استخراج بلوک ik

seq_{ijk}^{\max}

دیرترین زمان ممکن برای استخراج بلوک ijk

m_{ik}

تعداد بلوک‌های درون مخروط معکوس بلوک ik

m_{ijk}

تعداد بلوک‌های درون مخروط معکوس بلوک ijk

با توجه به مطالب گفته شده، در شکل ۳-۱۴ برای بلوک‌های مختلف یک مدل بلوکی دو بعدی، مقادیر زودترین و دیرترین زمان استخراج مشخص شده است. همان‌گونه که از اعداد مندرج در این شکل مشخص است مقادیر زودترین و دیرترین زمان استخراج بلوک‌ها با هم متفاوت می‌باشند. در تعیین زودترین زمان استخراج فاصله عمودی یک بلوک از سطح توپوگرافی مهم‌ترین عامل است.

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
..... 22	..... 19	..... 17	..... 16	..... 16	..... 16	..... 17	..... 19	..... 22	..... 23
	4	4	4	4	4	4	4	4	
	..... 23	..... 21	..... 20	..... 20	..... 21	..... 22	..... 24	..... 24	
		9	9	9	9		9		
		..... 24	..... 23	..... 23	..... 23		..... 23		
			16	16					
			..... 25	..... 25					
				16					
				..... 25					

seq_{ik}^{\min}
.....
 seq_{ik}^{\max}

← BPP

$N=25$

شکل ۳-۱۴- مقادیر زودترین و دیرترین زمان (ترتیب) استخراج در یک مدل بلوکی دو بعدی

از آن‌جا که تعداد متغیرهای تصمیم مربوط به هر بلوک به بازه‌ای که شامل زودترین تا دیرترین زمان استخراج یک بلوک وابسته است، می‌توان از روابط زیر مجموعه‌های مربوط به تعیین متغیرهای تصمیم یک بلوک در توابع هدف صفر و یکی ارائه شده را مشخص کرد. این روابط فضای بهینه شده جستجوی زمان استخراج هر بلوک در حالت سه بعدی را مشخص می‌کنند. در حالت دو بعدی نیز همین روابط قابل استفاده می‌باشند.

$$N_{ijk}^{opt} = seq_{ijk}^{\max} - seq_{ijk}^{\min} + 1 \quad (3-47)$$

$$N_{ijk}^{opt} < N \quad (3-48)$$

که در این روابط:

N_{ijk}^{opt} اندازه بهینه بازه جستجوی زمان استخراج بلوک ijk

در جدول ۲-۳ مقادیر زودترین و دیرترین زمان استخراج هر بلوک و درصد کاهش فضای جستجو و تعداد متغیرهای تصمیم مربوط به هر بلوک بیان شده است. به عنوان مثال در شکل ۳-۱۱ تخصیص متغیرهای تصمیم برای بلوک با مختصات (۲,۴) از ترتیب ۴ تا ترتیب ۲۰ کفایت می‌کند.

همان‌گونه که در جدول ۲-۳ مشاهده می‌شود، در مجموع تعداد متغیرهای صفر و یکی تصمیم که مربوط به تعیین ترتیب بهینه بلوک‌ها می‌باشند ۲۹ درصد کاهش یافته است. با استفاده از این تکنیک یعنی حذف متغیرهای تصمیم غیرضروری از تابع هدف مسئله، زمان و حافظه کامپیوتری مورد نیاز برای حل مسئله کاهش خواهد یافت. اگر فضای جستجو کاهش نیابد تابع هدف یک مرحله‌ای محدوده نهایی برای مدل دو بعدی شکل ۳-۱۴ دارای ۲۵×۲۶ متغیر (۶۵۰ متغیر) خواهد بود، اما اگر فضای جستجو به این روش محدود شود تعداد متغیرهای صفر و یکی تصمیم به ۴۶۲ متغیر کاهش خواهد یافت. این کاهش چشمگیر در تعداد متغیرهای تصمیم باعث سرعت بیشتر در محاسبات خواهد شد. این مفاهیم علاوه بر قابلیت استفاده در توابع هدف ارائه شده در بخش‌های قبل در دیگر مدل‌های برنامه‌ریزی تولید نیز قابل استفاده خواهد بود. به این صورت که بلوک‌هایی که به لحاظ فنی امکان حضور در فاز اول استخراج را ندارند از محاسبات مربوط به برنامه‌ریزی تولید آن فاز حذف خواهند شد. طبق این روش برای هر بلوک می‌توان مجموعه‌ای مجزا از بازه ممکن زمان استخراج به نام فضای جستجوی بهینه^۱ (OSS) به صورت زیر تشکیل داد:

$$OSS_{ijk} = \{Seq_{ijk}^{min}, \dots, Seq_{ijk}^{max}\} \quad (۳-۴۹)$$

بر اساس آنچه که درباره بهینه‌سازی فضای جستجوی زمان استخراج هر بلوک گفته شد، می‌توان برای هر بلوک در توابع هدف روابط (۳-۱۹)، (۳-۲۵)، (۳-۳۰)، (۳-۳۱) و (۳-۳۵) و محدودیت‌های آن می‌توان از $t \in OSS_{ijk}$ به جای بازه ۱ تا N استفاده کرد و آن‌ها را بازآرایی کرد. این شیوه در توابع هدف روابط

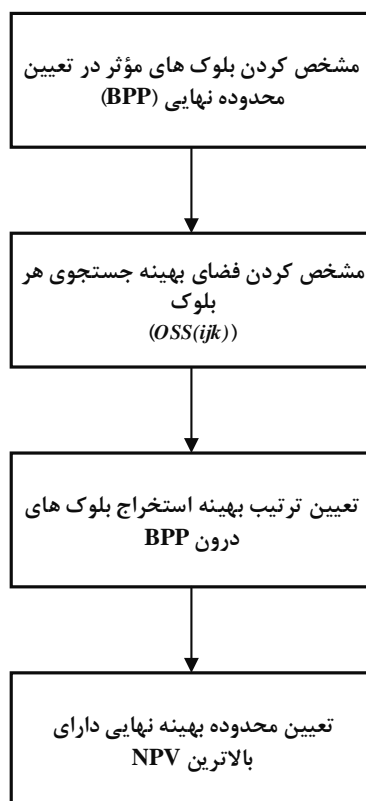
^۱ Optimum Search Space (OSS)

(۱-۳) و (۱۱-۳) به صورت محدودیت خطی به مسئله اضافه شده و باعث کاهش تعداد متغیرهای تصمیم نمی‌شود. این محدودیت‌های جدید جایگزین محدودیت‌های (۳-۶) و (۳-۱۶) می‌شوند.

جدول ۲-۳- محاسبه اندازه فضای بهینه جستجوی ترتیب بهینه بلوک‌های شکل ۳-۱۴

مختصات بلوک (k, i)	تعداد کل بلوک-ها N	ترتیب حداقل seq_{ik}^{\min}	ترتیب حداکثر seq_{ik}^{\max}	اندازه بهینه فضای جستجوی هر بلوک N_{ik}^{opt}	میزان کاهش اندازه فضای جستجو (درصد) $\left(\frac{N - N_{ik}^{opt}}{N}\right) \times 100$
(1,1)	25	1	22	22	12
(1,2)	25	1	19	19	24
(1,3)	25	1	17	17	32
(1,4)	25	1	16	16	36
(1,5)	25	1	16	16	36
(1,6)	25	1	16	16	36
(1,7)	25	1	17	17	32
(1,8)	25	1	19	19	24
(1,9)	25	1	22	22	12
(1,10)	25	1	23	23	8
(2,2)	25	4	23	20	20
(2,3)	25	4	21	18	28
(2,4)	25	4	20	17	32
(2,5)	25	4	20	17	32
(2,6)	25	4	21	18	28
(2,7)	25	4	22	19	24
(2,8)	25	4	24	21	16
(2,9)	25	4	24	21	16
(3,3)	25	9	24	16	36
(3,4)	25	9	23	15	40
(3,5)	25	9	23	15	40
(3,6)	25	9	24	16	36
(3,8)	25	9	25	17	32
(4,4)	25	16	25	10	60
(4,5)	25	16	25	10	60
کل تعداد متغیرهای تصمیم	650	-	-	462	28.923

با توجه به این تکنیک برای بهینه‌سازی تعداد متغیرهای تصمیم صفر و یکی در مدل‌سازی ریاضی تعیین محدوده نهایی فرآیند حل این مسئله را می‌توان به صورت شکل ۳-۱۵ نشان داد.



شکل ۳-۱۵- فرآیند بهینه‌سازی شده برای تعیین محدوده نهایی با هدف حداکثرسازی NPV

محدودیت‌هایی که تاکنون در توابع هدف ارائه شده، استفاده شده است تنها به محدودیت‌های فنی و معدن‌کاری یعنی لزوم برداشت بلوک‌های بالایی برای دسترسی به بلوک پایینی منحصر شده است. این مقدار کم‌ترین تعداد محدودیت مورد نیاز برای حل این مسئله بهینه‌سازی است. به لحاظ ریاضی مقداری که از این تابع هدف به دست خواهد آمد نیز بالاترین مقدار ممکن NPV خواهد بود. بسته به نظر طراح، اضافه کردن محدودیت‌های دیگر مانند محدودیت‌های عیاری به مسئله باعث تغییر در جواب‌های تابع هدف می‌گردد. در بخش بعد به توابع هدف صفر و یکی ارائه شده محدودیت‌های عیاری اضافه شده و جواب‌های آن با جواب‌های محدوده بدون لحاظ کردن محدودیت‌های عیاری مقایسه خواهد شد.

۳-۲-۴- لحاظ کردن محدودیت‌های عیاری

در روش معمول برای تعیین محدوده بهینه نهایی یعنی حداکثرسازی سود تنزیل نشده به علت عدم تعیین ترتیب استخراج بلوک‌ها در مدل‌سازی ریاضی امکان اعمال محدودیت مربوط به رعایت عیار متوسط در هر دوره زمانی میان مدت یا کوتاه مدت وجود ندارد. نکته مهم در این مورد این است که اگر محدوده بهینه نهایی با اعمال محدودیت رعایت عیار متوسط طراحی شود به علت استفاده از بلوک‌های کم عیار برای ترکیب با بلوک‌های پرعیار برای ارضای محدودیت‌های عیار متوسط دوره‌ای احتمالاً محدوده بزرگ‌تر می‌شود و به دنبال آن بلوک‌های ماده معدنی بیشتری قابلیت استخراج پیدا می‌کنند. در نتیجه احتمالاً عمر معدن افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که در این صورت مقدار تابع هدف از حالت قبل (بدون محدودیت عیاری) کم‌تر می‌شود.

در مدل‌های صفر و یکی ارائه شده این امکان وجود دارد که محدودیت‌های مربوط به عیار متوسط دوره‌ای به صورت محدودیت‌های خطی به تابع هدف اضافه شود. محدودیت‌های مربوط به عیار متوسط برای استفاده در این مدل‌سازی به محدودیت میزان فلز خالص تبدیل شده‌اند. برای محاسبه حداقل و حداکثر فلز خالص مورد نیاز برای استخراج در دوره زمانی τ می‌توان طبق روابط (۳-۵۰) و (۳-۵۱) عمل کرد.

$$lmt_{\tau} = mc \times bt_{\tau}^{lg} \times lg_{\tau} \quad (۳-۵۰)$$

$$umt_{\tau} = mc \times bt_{\tau}^{ug} \times ug_{\tau} \quad (۳-۵۱)$$

که در این روابط

τ

دوره میان مدت

mc ظرفیت استخراجی^۱ (تعداد بلوک‌های) پیش‌بینی شده برای استخراج در هر دوره زمانی میان مدت

ug_{τ} حد بالای^۲ عیار متوسط مورد قبول در دوره زمانی τ

lg_{τ} حد پایین^۳ عیار متوسط مورد قبول در دوره زمانی τ

bt_{ijk} وزن بلوک با مختصات ijk بر حسب تن

bt_{τ}^{ug} وزن متوسط بلوک‌های ماده معدنی با عیار ug_{τ} به تن

bt_{τ}^{lg} وزن متوسط بلوک‌های ماده معدنی با عیار lg_{τ} به تن

umt_{τ} بالاترین تناژ فلز^۴ خالص مورد نیاز در دوره زمانی میان مدت τ

lmt_{τ} کم‌ترین تناژ فلز^۵ خالص مورد نیاز در دوره زمانی میان مدت τ

با استفاده از روابط بالا توابع هدف صفر و یکی با لحاظ فضای بهینه‌سازی شده جستجوی متغیرهای تصمیم و محدودیت‌های عیاری به صورت زیر توسعه داده می‌شوند:

$$Max Z = \sum_{(i,j,k) \in BPP} V_{ijk} \times \left(\frac{1}{1+c} \right)^{\sum_{t \in OSS_{ijk}} (t \times P_{ijkt})} \times x_{ijk} \quad (52-3)$$

or

$$Max Z = \sum_{(i,j,k) \in BPP} x_{ijk} \times \left(\underbrace{\sum_{t \in OSS_{ijk}} \overbrace{V_{ijk} \times \frac{1}{(1+c)^t} \times P_{ijkt}}^{NPV_{ijkt}}}_{NPV_{ijk}} \right) \quad (53-3)$$

Subject to:

¹ Mining Capacity (mc)

² Upper Bound

³ Lower Bound

⁴ Upper Metal Tonnage (umt)

⁵ Lower Metal Tonnage (lmt)

$$x_{ijk} \leq x_{i'j'k'} \quad \forall (i, j, k) \in BPP, (i', j', k') \in UB_{ijk} \quad -3) \quad (54)$$

$$\sum_{t \in OSS_{ijk}} p_{ijkt} = 1 \quad \forall (i, j, k) \in BPP \quad -3) \quad (54)$$

$$\sum_{t \in OSS_{ijk}} t \times p_{ijkt} > \sum_{t \in OSS_{i'j'k'}} t \times p_{i'j'k't} \quad \forall (i, j, k) \in BPP, (i', j', k') \in UB_{ijk} \quad -3) \quad (55)$$

$$\sum_{(i, j, k) \in BPP} p_{ijkt} = 1 \quad \forall t \in OSS_{ijk} \quad -3) \quad (56)$$

$$lmt_{\tau} \leq \sum_{(t \in Mtp_{\tau})} \sum_{(i, j, k) \in OSS_t} g_{ijk} \times bt_{ijk} \times p_{ijkt} \leq umt_{\tau} \quad \forall \tau \in Mtps \quad -3) \quad (57)$$

$$y_{ijk} = \sum_{t \in OSS_{ijk}} t \times p_{ijkt} \quad \forall (i, j, k) \in BPP \quad -3) \quad (58)$$

که در این روابط:

OSS_t مجموعه مختصات بلوک‌هایی که قابل استخراج در زمان t

$Mtp_{\tau} = \{t \in T \mid mc \times (\tau - 1) < t \leq mc \times \tau\}$ مجموعه ترتیب‌هایی که در دوره میان مدت τ قرار دارند.

$Mtps = \left\{ \tau \mid 1 \leq \tau \leq \left\lceil \frac{N}{mc} \right\rceil + 1 \right\}$ مجموعه کل دوره‌های میان مدت¹ ممکن برای استخراج کل محدوده BPP

bt_{ijk} وزن بلوک با ijk بر حسب تن

این توابع هدف غیرخطی را می‌توان با استفاده از استراتژی پیشنهاد شده به صورت زیر خطی کرد:

¹ Midterm Periods (Mtps)

$$Max Z = \sum_{((i,j,k) \in BPP)} \sum_{(t \in OSS_{ijk})} \left(\underbrace{V_{ijk} \times \frac{1}{(1+c)^t}}_{NPV_{ijkt}} \times P_{ijkt} \right) \quad (59-3)$$

or

$$Min Z = \sum_{((i,j,k) \in BPP)} \sum_{(t \in OSS_{ijk})} V_{ijk} \times P_{ijkt} \quad (60-3)$$

Subject to:

$$\sum_{t \in OSS_{ijk}} P_{ijkt} = 1 \quad \forall (i,j,k) \in BPP \quad (61-3)$$

$$\sum_{t \in OSS_{ijk}} t \times P_{ijkt} > \sum_{t \in OSS_{i'j'k'}} t \times P_{i'j'k't} \quad \forall (i,j,k) \in BPP, (i',j',k') \in UB_{ijk} \quad (62-3)$$

$$\sum_{(i,j,k) \in BPP} P_{ijkt} = 1 \quad \forall t \in OSS_{ijk} \quad (63-3)$$

$$lmt_{\tau} \leq \sum_{(t \in Mtp_{\tau})} \sum_{(i,j,k) \in OSS_t} g_{ijk} \times bt_{ijk} \times P_{ijkt} \leq umt_{\tau} \quad \forall \tau \in Mtps \quad (64-3)$$

پس از به دست آوردن ترتیب بهینه استخراج بر اساس این تابع هدف، با استفاده از تابع هدف مربوطه یا محاسبه بالاترین NPV تجمعی محدوده نهایی تعیین می‌شود.

در ادامه برای مقایسه نتایج حضور یا عدم حضور محدودیت‌های عیاری از یک مثال فرضی استفاده می‌شود. در شکل ۳-۱۶ یک مدل بلوکی زمین‌شناسی که اعداد هر بلوک نمایان‌گر میزان فلز محتوی آن است نشان داده شده است. شکل ۳-۱۷ مدل اقتصادی همان مدل بلوک با فرض قیمت ۲ واحد پولی به ازای هر تن فلز خالص و یک واحد پولی برای هزینه برداشت هر بلوک باطله نشان داده شده است. لازم به توضیح است که در این مدل به عنوان یک فرض ساده‌ساز از ارزش ناخالص هر بلوک ماده معدنی استفاده شده است.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	1.5	0	0.5	1	0	0
2	0	0.5	0	2	0	0.5	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0.5	0.5	0	0	0

شکل ۱۶-۳- مدل بلوکی فرضی زمین شناسی (نمایان گر محتوای فلز هر بلوک)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1	-1	+3	-1	+1	+2	-1	-1
2	-1	+1	-1	+4	-1	+1	-1	-1
3	-1	-1	-1	+2	-1	-1	-1	-1
4	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1

شکل ۱۷-۳- مدل بلوکی فرضی اقتصادی

با حل تابع هدف روابط (۳-۳۰) یا (۳-۳۱) در نرم افزار Lingo که در آنها محدودیت‌های عیاری وجود

ندارد، ترتیب بهینه استخراج بلوک‌های شکل ۱۷-۳ درون BPP، به صورت شکل ۱۸-۳ خواهد بود.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	9	8	1	4	3	2	6	17
2		10	11	5	12	7	18	
3			14	13	15	19		
4				16	20			

←BPP

شکل ۱۸-۳- ترتیب بهینه استخراج بلوک‌های مدل شکل ۱۶-۳ بدون رعایت محدودیت عیاری

در جدول ۳-۳ سود تنزیل نشده و ارزش خالص فعلی تجمعی بلوک‌ها براساس ترتیب نشان داده شده در

شکل ۱۷-۳ آورده شده است. در محاسبات نرخ بهره ۱۰ درصد به ازای هر بلوک استفاده شده است.

محدوده دارای بیشترین سود در بلوک با مختصات (۲,۶) با ترتیب ۷ و محدوده بهینه دارای بیشترین

NPV در مختصات (۲,۴) با ترتیب ۵ قرار دارد. محدوده‌های دارای بیشترین سود و بیشترین NPV در شکل ۳-۱۹ نشان داده شده است.

همان‌گونه که در نتایج جدول ۳-۳ مشاهده می‌شود، در دوره‌های کوتاه مدت ۴ بلوکه، تناژ فلز خالص در دوره‌های ۳ و ۵، یعنی بازه‌های بلوک‌های ۹ تا ۱۲ و ۱۷ تا ۲۰ بسیار کم‌تر از سایر دوره‌ها است و بیشترین فلز خالص نیز در دوره‌های اول و دوم به دست آمده است. این مثال در حقیقت تایید کننده این نکته است که در صورتی که در مدل‌سازی‌ها محدودیتی برای عیار متوسط دوره‌های زمانی خاص لحاظ نگردد و تنها از محدودیت‌های معدن‌کاری (۱:۹) استفاده شود، سال‌های اولیه عمر معدن تا جایی که محدودیت‌های طراحی اجازه دهد بالاترین میزان استحصال فلز را خواهند داشت و به تدریج میزان فلز استخراجی سالانه کاهش پیدا می‌کند و بلوک‌های کم‌عیارتر عمدتاً در سال‌های پایانی عمر معدن استخراج خواهند شد. در این صورت مقدار تابع هدف یعنی NPV محدوده نهایی بالاترین مقدار خود را خواهد داشت. در این حالت بیشینه NPV مدل مفروض ۶/۹۳۲ واحد پولی و محدوده تنزیل نشده آن به ارزش ۹ واحد پولی خواهد بود.

جدول ۳-۳- ترتیب بهینه بلوک‌ها، سود و ارزش خالص فعلی تجمعی آن (بدون رعایت محدودیت عیاری)

مجموع فلز خالص در هر دوره زمانی ۴ بلوکی (تن)	τ	فلز (تن)	ارزش خالص فعلی تجمعی (واحد پولی)	سود تنزیل نشده تجمعی (واحد پولی)	ارزش خالص فعلی (واحد پولی)	ضریب تنزیل	ترتیب بهینه (t)	ارزش (واحد پولی)	مختصات بلوک
2	1	1.5	2.727	3	2.727	$\frac{0.90}{9}$	1	+3	(1,3)
		1	4.380	5	1.653	$\frac{0.90}{9}$	2	+2	(1,6)
		0.5	5.131	6	0.751	$\frac{0.90}{9}$	3	+1	(1,5)
		0	4.448	5	-0.683	$\frac{0.90}{9}$	4	-1	(1,4)
2.5	2	2	6.932 (<i>NPVmax</i>)	9	2.484	$\frac{0.90}{9}$	5	+4	(2,4)
		0	6.368	8	-0.564	$\frac{0.90}{9}$	6	-1	(1,7)
		0.5	6.881	9 (P_{max})	0.513	$\frac{0.90}{9}$	7	+1	(2,6)
		0	6.414	8	-0.467	$\frac{0.90}{9}$	8	-1	(1,2)
0.5	3	0	5.990	7	-0.424	$\frac{0.90}{9}$	9	-1	(1,1)
		0.5	6.376	8	0.386	$\frac{0.90}{9}$	10	+1	(2,2)
		0	6.025	7	-0.350	$\frac{0.90}{9}$	11	-1	(2,3)
		0	5.707	6	-0.319	$\frac{0.90}{9}$	12	-1	(2,5)
1.5	4	1	6.286	8	0.579	$\frac{0.90}{9}$	13	+2	(3,4)
		0	6.023	7	-0.263	$\frac{0.90}{9}$	14	-1	(3,3)
		0	5.783	6	-0.239	$\frac{0.90}{9}$	15	-1	(3,5)
		0.5	6.001	7	0.218	$\frac{0.90}{9}$	16	+1	(3,4)
0.5	5	0	5.803	6	-0.198	$\frac{0.90}{9}$	17	-1	(1,8)
		0	5.623	5	-0.180	$\frac{0.90}{9}$	18	-1	(2,7)
		0	5.460	4	-0.164	$\frac{0.90}{9}$	19	-1	(3,6)
		0.5	5.608	5	0.149	$\frac{0.90}{9}$	20	+1	(3,5)

9	8	1	4	3	2	6	17
	10	11	5	12	7	18	
		14	13	15	19		
			16	20			

←BPP محدوده LG →

← NPV محدود دارای بالاترین NPV

شکل ۳-۱۹ - محدوده حداکثر سود و حداکثر NPV برای مدل شکل ۳-۱۶ (بدون رعایت محدودیت عیاری)

در مقابل در صورتی که برای عملیات معدن‌کاری محدودیت‌های عیاری قائل شوند و مدل‌سازی تعیین محدوده نهایی بر این اساس صورت پذیرد فلز به دست آمده در دوره های زمانی یکسان از عمر محدوده نهایی به صورت یکنواخت‌تری تقسیم خواهد شد. با این هدف برای مدل بلوکی شکل‌های ۳-۱۶ و ۳-۱۷ دوباره محدوده نهایی تعیین می‌شود. در این مرحله ابتدا با استفاده از توابع هدف (۳-۵۹) یا (۳-۶۰) ترتیب بهینه برای بلوک‌ها تحت محدودیت‌های (۳-۶۱) تا (۳-۶۴) تعیین می‌شود. نتایج حل این مدل که مانند مدل‌های قبلی از طریق برنامه‌نویسی در نرم افزار لینگو انجام شده است، در شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است. دوره‌های زمانی ۴ بلوکه و محدودیت تناژ فلز خالص در هر دوره بین ۱/۵ تا ۲ تن تعیین شده است. نتایج تحلیلی و محاسبه سود تنزیل نشده تجمعی و NPV تجمعی بلوک‌ها بر اساس ترتیبی که از طریق تابع هدف به دست آمده است در جدول ۳-۴ ارائه شده است.

3	7	5	4	2	1	6	8
	18	10	9	12	14	11	
		19	13	15	16		
			20	17			

←BPP محدوده تنزیل نشده →

← NPV محدود دارای بالاترین NPV

شکل ۳-۲۰ - محدوده حداکثر سود و حداکثر NPV برای مدل شکل ۳-۱۶ (با رعایت محدودیت عیاری)

جدول ۳-۴- ترتیب بهینه بلوک‌ها، سود و ارزش خالص فعلی تجمعی آن (با رعایت محدودیت عیاری)

مجموع فلز خالص در هر دوره زمانی ۴ بلوکی (تن)	τ	فلز (تن)	ارزش خالص فعلی تجمعی (واحد پولی)	سود تنزیل نشده تجمعی (واحد پولی)	ارزش خالص فعلی (واحد پولی)	ضریب تنزیل	ترتیب بهینه (t)	ارزش (واحد پولی)	مختصات بلوک
1.5	1	1	1.818	2	1.818	0.909	1	2	(1,6)
		0.5	2.645	3	0.826	0.909	2	1	(1,5)
		0	1.893	2	-0.751	0.909	3	-1	(1,1)
		0	1.210	1	-0.683	0.909	4	-1	(1,4)
1.5	2	1.5	3.073	4	1.863	0.909	5	3	(1,3)
		0	2.509	3	-0.564	0.909	6	-1	(1,7)
		0	1.995	2	-0.513	0.909	7	-1	(1,2)
		0	1.529	1	-0.467	0.909	8	-1	(1,8)
2	3	2	3.225 (NPV_{max})	5 (P_{max})	1.696	0.909	9	4	(2,4)
		0	2.840	4	-0.386	0.909	10	-1	(2,3)
		0	2.489	3	-0.350	0.909	11	-1	(2,7)
		0	2.171	2	-0.319	0.909	12	-1	(2,5)
1.5	4	1	2.750	4	0.579	0.909	13	2	(3,4)
		0.5	3.013	5 (P_{max})	0.263	0.909	14	1	(2,6)
		0	2.774	4	-0.239	0.909	15	-1	(3,5)
		0	2.556	3	-0.218	0.909	16	-1	(3,6)
1.5	5	0.5	2.754	4	0.198	0.909	17	1	(3,5)
		0.5	2.934	5	0.180	0.909	18	1	(2,2)
		0	2.770	4	-0.164	0.909	19	-1	(3,3)
		0.5	2.919	5 (P_{max})	0.149	0.909	20	1	(3,4)

همان‌گونه که از نتایج مشخص است در این حالت چند نقطه به عنوان دارای بالاترین سود تنزیل نشده به دست آمده است که می‌توانند به عنوان نقاط تعیین کننده محدوده نهایی با سود تنزیل نشده استفاده شوند. در مقابل محدوده دارای بالاترین NPV شامل ۹ بلوک با NPV تجمعی ۳/۲۲۵ واحد پولی است. میزان فلز خالص استخراجی در هر دوره ۴ بلوکه نیز از ثبات قابل قبولی در چهارچوب محدودیت‌های تعیین شده قرار دارد.

آنچه که از مقایسه مقادیر تابع هدف و اندازه محدوده نهایی مشخص می‌شود این است که با اضافه شدن محدودیت‌های عیاری به تابع هدف تعیین محدوده نهایی این محدوده بزرگ‌تر شده و همان‌گونه که از طریق استدلال ریاضی پیش‌بینی شده بود مقدار تابع هدف کاهش یافته است.

لازم به ذکر است که اضافه کردن محدودیت عیاری به این صورت برای برنامه‌ریزی بلند مدت و نهایتاً تعیین محدوده بهینه نهایی به منظور بیشترین استفاده ممکن از بلوک‌های ماده معدنی است. برای برنامه‌ریزی‌های میان مدت یا کوتاه مدت و تعیین پوشش‌ک‌ها درون محدوده بهینه نهایی که لازم است به صورت محدودیت‌های جدید به مسئله اضافه گردد باید از پراکندگی بیش‌از حد بلوک‌های هر دوره زمانی میان مدت جلوگیری کرد.

در گذشته سوالاتی درباره نسبت اندازه محدوده دارای بیشترین سود (LG) و محدوده دارای بالاترین NPV در یک کانسار واحد وجود داشته است که در بخش بعد درباره آن بحث خواهد شد.

۳-۳- نسبت اندازه محدوده LG و محدوده دارای بالاترین NPV

در بخش‌های قبلی با استفاده از مدل‌سازی ریاضی مسئله تعیین محدوده بهینه نهایی با هدف حداکثرسازی NPV و استراتژی پیشنهادی برای خطی‌سازی آن مشخص شد که در مرحله اول طراحی، می‌توان ابتدا ترتیب بهینه استخراج کل بلوک‌های درون BPP را به دست آورد. سپس با استفاده از این ترتیب بهینه و دخیل کردن نرخ بهره محدوده بهینه نهایی را مشخص کرد.

در مرحله دوم، پارامتر نرخ بهره (c) به عنوان پارامتر کلیدی مطرح است. مهندس طراح با توجه به شرایط اقتصادی، نرخ بهره‌ای را برای طراحی در نظر می‌گیرد که می‌تواند مقادیر مختلفی در بازه مجاز برای نرخ بهره را شامل شود.

بنابراین از آنجایی که اولاً تعیین محدوده نهایی با حداکثرسازی NPV مناسب‌تر است و ثانیاً در تعیین همزمان محدوده نهایی با بیشینه NPV و ترتیب بهینه بلوک‌ها، شرایط اقتصادی (هزینه و قیمت) در زمان استخراج هر بلوک و نرخ بهره در آن زمان موثر هستند، این سوال قابل طرح می‌باشد که در چه مواقعی محدوده LG و محدوده دارای بیشینه NPV با هم متفاوت یا بر هم منطبق هستند؟ به عبارت دیگر، آیا از نظر ریاضی شرایطی وجود دارد که محدوده LG از محدوده با بیشترین NPV بزرگ‌تر باشد و یا بر عکس، محدوده LG از محدوده با بیشترین NPV کوچک‌تر باشد و یا دو محدوده بر هم منطبق باشند؟ پاسخ به این سوال از این نظر حایز اهمیت است که ریسک خطا در تعیین محدوده نهایی و مکان‌یابی تاسیسات جانبی معدن و نیز از دست رفتن بلوک‌های ماده معدنی قابل استخراج از نظر اقتصادی، کاهش یابد. یعنی اگر طراح، محدوده را با به دست آوردن بیشترین سود تنزیل نشده طراحی کرد، باید قابل پیش‌بینی باشد که در صورت تغییر شرایط و تغییر پارامترهای اقتصادی مثل قیمت، هزینه و نرخ بهره، چه تغییری در محدوده بهینه نهایی و در نتیجه مقدار ماده معدنی قابل استخراج ایجاد می‌شود. اهمیت پاسخ به این سوال با توجه به عمومیت طراحی محدوده نهایی بر مبنای بیشترین سود، برای معادن روبازی که به این شیوه قدیمی طراحی شده‌اند نیز مهم است. بدین معنا که با توجه به مدل‌سازی ریاضی جدید و اثبات امکان‌پذیری طراحی بر اساس حداکثرسازی NPV، درباره این معادن روباز باید مشخص شود که در صورت بازطراحی، محدوده قبلی به چه میزان قابل گسترش است؟

از نظر کلی طبق آنچه در بخش‌های قبل برای توسعه مدل‌سازی ریاضی تعیین محدوده نهایی گفته شد، دو محدوده مذکور در صورتی که محدودیت‌های تابع هدف آن‌ها با هم یکی باشد، زمانی که نرخ بهره صفر در نظر گرفته شود به علت عدم تنزیل ارزش بلوک‌ها، بر هم منطبق خواهند شد و محدوده LG و محدوده دارای بالاترین NPV در یک نقطه قرار می‌گیرند. در این صورت، تنها تفاوت دو روش در مشخص بودن ترتیب بهینه استخراج بلوک‌ها است. در مقابل زمانی که نرخ بهره در محاسبات مربوط به تعیین محدوده

با هدف حداکثر کردن NPV وارد می‌شود، تضمینی برای این تطبیق وجود نخواهد داشت. اگر از فرض مرسوم یعنی ثبات پارامترهای اقتصادی در طول عمر معدن استفاده شود، عامل تعیین کننده در این مورد نرخ بهره خواهد بود.

در بخش‌های قبل تابع هدفی که بر اساس آن می‌توان محدوده نهایی را با حداکثرسازی NPV مشخص کرد ارائه شد. در این زمینه مشخص شد که با صفر قرار دادن نرخ بهره صفر در معادلات تابع هدف مربوطه محدوده LG به دست خواهد آمد.

در ادامه با استفاده از یک مثال تاثیر نرخ بهره بر تغییر اندازه محدوده نشان داده می‌شود. مدل بلوکی فرضی شکل ۳-۲۱، از ۱۵ بلوک با ۳ بلوک ماده معدنی تشکیل شده است و اعداد هر بلوک ارزش آن بلوک بر حسب واحد پولی را نشان می‌دهند. محدوده LG این مدل کوچک در شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است. سود حداکثر آن (P_{max}) ، ۵ واحد پولی و تعداد بلوک‌های آن ۹ بلوک می‌باشد.

محدوده LG ←	-1	-1	+2	-1	-1	-1	-1	+2	-1	-1
	-1	+4	-1	-1	-1	-1	+4	-1	-1	-1
	-1	-1	+5	-1	-1	-1	-1	+5	-1	-1

شکل ۳-۲۲- محدوده نهایی مدل فرضی شکل ۳-۲۱ با سود حداکثر

شکل ۳-۲۱- مدل بلوکی فرضی

با حل تابع هدف محدوده نهایی برای مدل بلوکی شکل ۳-۲۱ مطابق شکل ۳-۲۳ تعیین می‌شود. ارزش خالص فعلی این محدوده با نرخ بهره ۱۵ درصد برای دوره زمانی استخراج هر بلوک، $2/61$ واحد پولی به دست می‌آید.

-1	-1	+2	-1	-1
-1	+4	-1	-1	-1
-1	-1	+5	-1	-1

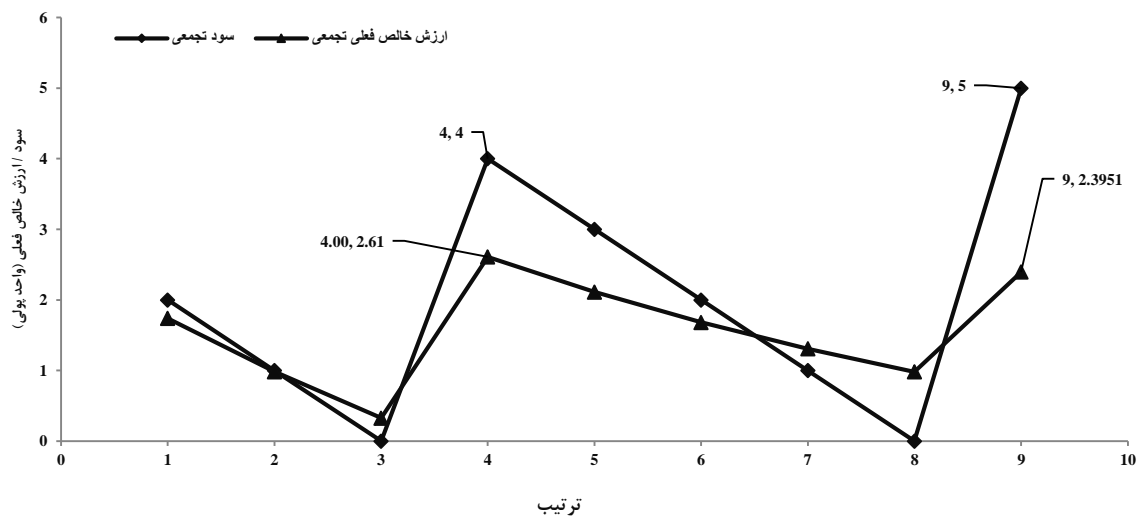
محدوده دارای بالاترین NPV ←

شکل ۳-۲۳- محدوده نهایی شکل ۳-۲۱ با بیشترین NPV

در جدول ۳-۵ ترتیب بلوک‌ها و مقادیر سود تنزیل نشده تجمعی و NPV تجمعی بلوک‌های آن‌ها آورده شده است. در شکل ۳-۲۴ نیز نمودار تجمعی NPV و سود دو محدوده نشان داده شده است.

جدول ۳-۵- مقادیر سود تنزیل نشده و تنزیل شده و مقادیر تجمعی آن‌ها با نرخ بهره ۱۵ درصد برای شکل ۳-۱۹

مختصات بلوک	ارزش (واحد پولی)	ترتیب بهینه استخراج	ارزش تنزیل نشده تجمعی (واحد پولی)	ضریب تنزیل	ارزش خالص فعلی (واحد پولی)	ارزش خالص فعلی تجمعی (واحد پولی)
(1,3)	2	1	2	0.869	1.738	1.738
(1,2)	-1	2	1	0.869	0.982	-0.755
(1,1)	-1	3	0	0.869	0.3266	-0.6562
(2,2)	4	4	4	0.869	2.6076 (NPV_{max})	2.281
(1,5)	-1	5	3	0.869	2.11	-0.495
(1,4)	-1	6	2	0.869	1.6814	-0.43
(2,3)	-1	7	1	0.869	1.307	-0.374
(2,4)	-1	8	0	0.869	0.982	-0.325
(3,3)	5	9	5 (P_{max})	0.869	2.395	1.41



شکل ۳-۲۴- نمودار مقادیر تجمعی سود تنزیل نشده تجمعی و NPV تجمعی

در ادامه برای تعیین محدوده بهینه نهایی مدل بلوکی شکل ۳-۲۱، به جای نرخ بهره ۱۵ درصد به ازای هر بلوک، از نرخ بهره ۵ درصد استفاده می‌شود. پس از انجام محاسبات مربوطه، محدوده به دست آمده از ۹ بلوک مانند شکل ۳-۲۵ تشکیل می‌شود. مقادیر تجمعی سود و ارزش خالص فعلی بلوک‌ها و ترتیب آن‌ها در جدول ۳-۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، دو محدوده LG و محدوده دارای بیشترین NPV در این حالت بر هم منطبق می‌باشند. پس می‌توان گفت انطباق دو نوع محدوده به بازه‌ی نرخ بهره نیز وابسته است.

-1	-1	+2	-1	-1
-1	+4	-1	-1	-1
-1	-1	+5	-1	-1

محدوده دارای بالاترین NPV ←

شکل ۳-۲۵ - محدوده نهایی شکل ۳-۲۱ با نرخ بهره ۵ درصد

جدول ۳-۶ - مقادیر سود تنزیل نشده و تنزیل شده و مقادیر تجمعی آن‌ها با نرخ بهره ۵ درصد

مختصات بلوک	ارزش (واحد پولی)	ترتیب بهینه استخراج	ارزش تنزیل نشده تجمعی (واحد پولی)	ضریب تنزیل	ارزش خالص فعلی (واحد پولی)	ارزش خالص فعلی تجمعی (واحد پولی)
(1,3)	2	1	2	0.9523	1.9046	1.9046
(1,2)	-1	2	1	0.9523	-0.9069	0.9977
(1,1)	-1	3	0	0.9523	-0.8636	0.1341
(2,2)	4	4	4	0.9523	3.2897	3.4238
(1,5)	-1	5	3	0.9523	-0.7832	2.6406
(1,4)	-1	6	2	0.9523	-0.7458	1.8948
(2,3)	-1	7	1	0.9523	-0.7103	1.1845
(2,4)	-1	8	0	0.9523	-0.6764	0.5081
(3,3)	5	9	5 (P_{max})	0.9523	3.2206	3.7287 (NPV_{max})

از مثال فوق می‌توان این نتیجه را گرفت که در صورتی که نرخ بهره برای دوره‌های زمانی استخراج کانسار تغییر کند این امکان وجود دارد که اندازه محدوده نیز تغییر کند. مزیت در دسترس بودن یک مدل‌سازی ریاضی که می‌تواند ابتدا ترتیب بهینه استخراج بلوک‌های کانسار را تعیین کند و پس از آن با لحاظ کردن نرخ بهره محدوده نهایی را مشخص کند، در این است که ابزار ریاضی لازم برای تحقیق درباره نسبت اندازه محدوده الگوریتم LG با محدوده‌ای که از طریق برنامه‌ریزی تولید بلند مدت تعیین می‌شود را ایجاد کرده است.

طبق نتایج به دست آمده در بخش مربوط به اضافه کردن محدودیت‌های عیاری در این فصل مشخص شد که با اضافه کردن محدودیت‌های جدید به تابع هدف تعیین محدوده نهایی، اندازه محدوده برنامه‌ریزی شده از محدوده LG بزرگ‌تر شده و میزان NPV و سود محدوده نیز در حالت تنزیل شده و تنزیل نشده کاهش خواهد یافت. پس به صورت قطعی نمی‌توان درباره درست بودن تئوری کاستا و هیل در حالتی که محدودیت‌هایی بیش از حداقل تعداد لازم یعنی محدودیت‌های "برداشت بلوک‌های بالاتر برای دسترسی به بلوک‌های پایین‌تر" به تابع هدف اضافه می‌شود اظهار نظر کرد. پس نظریه مذکور را می‌توان در حالت خاص یعنی تعیین هم‌زمان ترتیب تک تک بلوک‌ها و محدوده نهایی با رعایت حداقل تعداد محدودیت‌های فنی لازم درست دانست. در ادامه به صورت تحلیلی و با استفاده از ابزار ریاضی ارائه شده در این فصل برای مدل‌سازی مسئله تعیین محدوده نهایی به بررسی نظریه مذکور در این حالت خاص پرداخته می‌شود. ابتدا مفروضات زیر در نظر گرفته می‌شود:

۱. ترتیب بهینه استخراج بلوک‌ها از طریق حل تابع هدف مربوطه برای بلوک‌های درون BPP از

قبل مشخص شده است.

۲. تنها محدودیت‌های مسئله محدودیت‌های فنی مربوط به برداشت بلوک‌های بالایی برای

دست‌رسی به بلوک‌های پایینی است.

۳. پارامترهای اقتصادی قیمت و هزینه در طول عمر معدن ثابت هستند.

با استفاده از فرض اول در بررسی‌های آتی به جای مختصات (i,j,k) از ترتیب بهینه تعیین شده استخراج بلوک‌های BPP استفاده می‌شود، یعنی هر بلوک با عدد ترتیب بهینه آن مشخص می‌شود. علت استفاده از این شیوه اندیس‌گذاری این است که محدوده LG و محدوده دارای بیشینه NPV تنها با اعمال نرخ تنزیل و با استفاده از این ترتیب می‌توانند مشخص شوند و ترتیب بهینه استخراج بلوک‌ها برای هر دو محدوده یکسان است.

برای پاسخ به این سوال که آیا محدوده LG می‌تواند کوچک‌تر از محدوده نهایی با بیشینه NPV باشد یا نه، بر اساس مفروضات فوق بررسی‌های لازم انجام می‌پذیرد. برای این بررسی ابتدا به عنوان یک فرض خلف در نظر گرفته می‌شود که در ترتیب بهینه درون BPP نقطه‌ای وجود دارد که محدوده آن از محدوده LG بزرگ‌تر بوده (سود تنزیل نشده تجمعی آن کم‌تر است) و هم‌زمان NPV تجمعی آن بیشتر از NPV تجمعی بلوک‌ها تا نقطه محدوده LG است. پس طبق این فرض خلف (در صورتی که درست باشد) باید معادلات (۶۵-۳) و (۶۶-۳) به صورت هم‌زمان معتبر باشند:

$$\sum_{l=1}^{l_{P_{max}}} V_l \times r^l < \sum_{l=1}^{l_{NPV_{max}}} V_l \times r^l \quad (۶۵-۳)$$

$$\sum_{l=1}^{l_{P_{max}}} V_i > \sum_{l=1}^{l_{NPV_{max}}} V_l \quad (۶۶-۳)$$

که در این روابط:

l

ترتیب بهینه استخراج بلوک‌ها

V_l ارزش بلوک با ترتیب استخراج بهینه l

$r = 1/(1+c)$ ضریب تنزیل

NPV_{max} بیشترین مقدار NPV در کل BPP

$l_{NPV_{max}}$ ترتیب استخراج بلوکی که در آن NPV بیشینه است.

P_{max} بیشترین مقدار سود تنزیل نشده در BPP

$l_{P_{max}}$ ترتیب بهینه استخراج بلوکی که در آن سود تنزیل نشده تجمعی حداکثر است.

به عنوان یک فرض اولیه و خلف داریم:

$$l_{NPV_{max}} > l_{P_{max}} \quad (۶۷-۳)$$

پس می‌توان روابط (۶۵-۳) و (۶۶-۳) را به صورت زیر نوشت:

$$\sum_{l=1}^{l_{P_{max}}} V_l \times r^l < \sum_{i=1}^{l_{P_{max}}} V_i \times r^i + \sum_{l=l_{P_{max}}+1}^{l_{NPV_{max}}} V_l \times r^l \quad (۶۸-۳)$$

$$\sum_{l=1}^{l_{P_{max}}} V_l > \sum_{l=1}^{l_{P_{max}}} V_i + \sum_{l=l_{P_{max}}+1}^{l_{NPV_{max}}} V_l \quad (۶۹-۳)$$

با حذف قسمت مشترک از دو نامعادله (۶۸-۳) و (۶۹-۳)، نامعادلات زیر به دست می‌آید که در صورت

امکان بزرگ‌تر بودن محدوده با NPV حداکثر از محدوده LG، باید به صورت همزمان معتبر باشند:

$$\sum_{l=l_{P_{max}}+1}^{l_{NPV_{max}}} V_l \times r^l > 0 \quad (۷۰-۳)$$

$$\sum_{l=l_{P_{max}}+1}^{l_{NPV_{max}}} V_l < 0 \quad (۷۱-۳)$$

حال برای بررسی شرط برقراری نامعادلات (۷۰-۳) و (۷۱-۳)، باید بازه یا بازه‌هایی از r که در آن‌ها این نامعادلات برقرار و در نتیجه محدوده با ارزش خالص فعلی تجمعی حداکثر از محدوده LG بزرگ‌تر است بررسی شود.

از آن‌جایی که با توجه به روابط (۷۲-۳) و (۷۳-۳) محدوده مجاز تغییرات ضریب تنزیل، وابسته به تغییرات مجاز برای نرخ بهره است:

$$r = \frac{1}{1+c} \quad (۷۲-۳)$$

$$0 \leq c \leq 1 \quad (۷۳-۳)$$

پس داریم:

$$\frac{1}{2} \leq r \leq 1 \quad (۷۴-۳)$$

با توجه به محدوده مجاز به دست آمده در رابطه (۷۴-۳)، تنها در صورتی محدوده بهینه نهایی با حداکثر سود از محدوده نهایی با حداکثر کوچک‌تر است که نامعادلات (۷۰-۳)، (۷۱-۳) و (۷۴-۳) به صورت همزمان برقرار باشند. در صورتی که این سه نامعادله به صورت همزمان برقرار نباشند می‌توان نتیجه گرفت که در هیچ حالتی از نرخ بهره، محدوده با ارزش خالص فعلی حداکثر از محدوده LG بزرگ‌تر نیست.

حالت واقعی ترتیب بلوک‌ها، بر اساس آن چه از فرضیات اولیه نتیجه می‌شود، این گونه است که اولین بلوک بعد از محدوده با بیشترین سود، از نوع باطله است و آخرین بلوک در نقطه ارزش خالص فعلی حداکثر نیز ماده معدنی است. در فاصله بین این دو، به تناوب بلوک‌های ماده معدنی و باطله قرار دارند. در خاص‌ترین حالت، تمام بلوک‌های باطله پشت سر هم و تمام بلوک‌های ماده معدنی بعد از اتمام بلوک‌های باطله و به صورت پیوسته قرار دارند. در جدول ۷-۳، یک مثال از حالت کلی ترتیب بلوک‌ها بعد از

محدوده با سود حداکثر آورده شده است. تعداد بلوک‌های محدوده LG ۹ عدد بوده است، پس ترتیب این سری بلوک از ۱۰ آغاز می‌شود. برای بررسی این مسئله، ابتدا مجموعه‌ها، اندیس‌ها و پارامترهای مورد استفاده در جدول ۳-۸ معرفی می‌شوند.

جدول ۳-۷- ترتیب بهینه بلوک‌های یک مدل فرضی پس از محدوده نهایی با سود حداکثر

o	o	w	o	o	w	o	w	w	نوع بلوک (o^2 یا w^1)
+1	+1	-2	+1	+1	-2	+2	-2	-2	ارزش بلوک (V_i)
18	17	16	15	14	13	12	11	10	ترتیب (l)

جدول ۳-۸- مجموعه‌ها و پارامترهای مورد استفاده

<i>A</i>	مجموعه اندیس‌های (ترتیب استخراج) اولین سری از بلوک‌های باطله تا قبل از اولین سری از بلوک‌های ماده معدنی
<i>B</i>	مجموعه اندیس بلوک‌های ماده معدنی از اولین بلوک ماده معدنی تا قبل از شروع آخرین سری از بلوک‌های باطله
<i>C</i>	مجموعه اندیس‌های بلوک‌های باطله‌ای که بعد از اولین سری از بلوک‌های مثبت قرار دارند تا آخرین بلوک باطله
<i>D</i>	مجموعه اندیس‌های آخرین سری از بلوک‌های ماده معدنی
<i>E</i>	مجموعه اندیس‌های بلوک‌های ماده معدنی بعد از نقطه با حداکثر سود
<i>F</i>	مجموعه اندیس‌های بلوک‌های باطله بعد از نقطه با حداکثر سود
<i>G</i>	مجموعه کل اندیس‌های کل بلوک‌های ماده معدنی و باطله بعد از نقطه با حداکثر سود
$l_{first\ ore}$	اندیس اولین بلوک مثبت (کوچک‌ترین عضو مجموعه <i>B</i>)
$l_{final\ waste}$	اندیس آخرین بلوک باطله (بزرگ‌ترین عضو مجموعه <i>C</i>)

مجموعه‌های *A*، *B*، *C* و *D* و نیز مجموعه‌های *E* و *F*، جدا از هم می‌باشند. همچنین روابط زیر میان این مجموعه‌ها برقرار است:

$$B \cup D = E \quad (75-3)$$

$$A \cup C = F \quad (76-3)$$

$$E \cup F = G \quad (77-3)$$

¹ Waste

² Ore

روابط زیر نیز میان $l_{first.ore}$ و $l_{final.waste}$ و اعضای مجموعه‌های A, B, C و D بر قرار است:

$$l_{first.ore} < l_{final.waste} \quad (78-3)$$

$$l_{first.ore} > l \quad \forall l \in A \quad (79-3)$$

$$l_{first.ore} \leq l \quad \forall l \in B \quad (80-3)$$

$$l_{final.waste} \geq l \quad \forall l \in C \quad (81-3)$$

$$l_{final.waste} < l \quad \forall i \in D \quad (82-3)$$

به عنوان نمونه، برای مدل بلوکی جدول ۳ داریم:

$$A = \{10,11\} \quad B = \{12,14,15\}$$

$$C = \{13,16\} \quad D = \{17,18\}$$

$$l_{first.ore} = 12 \quad l_{final.waste} = 16$$

پس از این مقدمات، ابتدا از نامساوی‌های (۷۱-۳) و (۷۴-۳) برای شروع استفاده می‌شود. نامساوی (۳-۳) (۷۱)، با توجه به روابط (۷۵-۳)، (۷۶-۳) و (۷۷-۳)، به صورت (۸۳-۳) قابل بازآرایی است. مفهوم رابطه (۷۱-۳) و نیز (۸۳-۳)، بدین معناست که مجموع ارزش‌های بلوک‌های باطله، از مجموع ارزش‌های بلوک‌های ماده معدنی، در بازه استخراج پس از محدوده LG تا نقطه ارزش خالص فعلی حداکثر، بیشتر است، پس در نتیجه مجموع کل آن‌ها نیز منفی خواهد شد.

$$\sum_{l \in A} V_l + \sum_{l \in C} V_l > \sum_{l \in B} V_l + \sum_{l \in D} V_l \quad (83-3)$$

$$\sum_{l \in A} V_l - \sum_{l \in B} V_l > \sum_{l \in D} V_l - \sum_{l \in C} V_l \quad (84-3)$$

با توجه به نامساوی‌های (۷۴-۳) و (۷۸-۳)، خواهیم داشت:

$$r^{l_{first.ore}} > r^{l_{final.waste}} \quad (۸۵-۳)$$

با ضرب طرفین نامساوی‌های (۸۴-۳) و (۸۵-۳) در یکدیگر، به دست می‌آید:

$$r^{l_{first.ore}} \times \sum_{l \in A} V_l - r^{l_{first.ore}} \times \sum_{l \in B} V_l > r^{l_{final.waste}} \times \sum_{l \in D} V_l - r^{l_{final.waste}} \times \sum_{l \in C} V_l \quad (۸۶-۳)$$

رابطه (۸۶-۳)، به صورت زیر نیز قابل بیان است:

$$\sum_{l \in A} r^{l_{first.ore}} \times V_l - \sum_{l \in B} r^{l_{first.ore}} \times V_l > \sum_{l \in D} r^{l_{final.waste}} \times V_l - \sum_{l \in C} r^{l_{final.waste}} \times V_l \quad (۸۷-۳)$$

طبق روابط (۷۹-۳)، (۸۰-۳)، (۸۱-۳) و (۸۲-۳)، در سمت چپ نامعادله (۸۷-۳) و قسمت بزرگ‌تر، ضریب مشترک جملات $\sum_{l \in A} r^{l_{first.ore}} \times V_l$ یعنی $r^{l_{first.ore}}$ می‌تواند به صورت $\sum_{l \in A} r^l \times V_l$ نوشته شود، زیرا با توجه به این که اعضای مجموعه A از $l_{first.ore}$ کوچک‌تر می‌باشند، پس r^l متناظر با آن‌ها نیز از $r^{l_{first.ore}}$ بزرگ‌تر خواهد بود. بنابراین، چون ضریب کلی جملات $\sum_{l \in A} r^{l_{first.ore}} \times V_l$ مثبت است، می‌توان آن‌ها را جایگزین ضریب مشترک $r^{l_{first.ore}}$ کرد، به گونه‌ای که همچنان بزرگ‌تر بودن سمت راست نامساوی برقرار باقی بماند.

از طرف دیگر، ضریب مشترک $r^{l_{first.ore}}$ در جملات $\sum_{l \in B} r^{l_{first.ore}} \times V_l$ را می‌توان طوری با r^l جایگزین کرد که بزرگ‌تر بودن سمت چپ نامساوی (۸۷-۳) همچنان برقرار باقی بماند، زیرا اولاً طبق رابطه (۸۰-۳)، اعضای مجموعه B ، بزرگ‌تر از یا مساوی با $l_{first.ore}$ بوده، پس طبق نامساوی (۷۴-۳)، r^l متناظر با هر l عضو مجموعه B از $r^{l_{first.ore}}$ کوچک‌تر بوده و چون ضریب جملات آن‌ها در سمت چپ نامساوی منفی است، جایگزینی ضرایب این جملات منفی با ضرایب کوچک‌تر از یا مساوی با ضرایب قبلی، جهت نامساوی (۸۷-۳) را تغییر نمی‌دهد.

در سمت راست نامساوی (۸۷-۳)، طبق رابطه (۸۲-۳)، ضرایب یکسان جملات $\sum_{l \in D} r^{l, final.waste} \times V_l$ ، به علت

بزرگتر بودن l های عضو مجموعه D از $l_{final.waste}$ ، می‌توانند با r^l های متناظر با l های اعضای مجموعه D که کوچکتر از ضریب مشترک $r^{l, final.waste}$ هستند، جایگزین شده و به علت مثبت بودن علامت این جملات در سمت راست، علیرغم این جایگزینی، جهت نامساوی (۸۷-۳) بدون تغییر باقی خواهد ماند.

در جملات منفی سمت راست نامساوی (۸۷-۳)، یعنی $\sum_{l \in C} r^{l, final.waste} \times V_l$ نیز، چون طبق نامساوی (۸۱-۳)، l های عضو مجموعه C از $l_{final.waste}$ ، کوچکتر بوده یا با آن مساوی هستند، پس r^l های متناظر با l های عضو مجموعه C ، یا با $r^{l, final.waste}$ مساوی بوده و یا از آن بزرگتر می‌باشند. با توجه به منفی بودن علامت این سری از جملات سمت راست نامساوی (۸۷-۳)، جایگزینی ضریب یکسان $r^{l, final.waste}$ با r^l های متناظر با l های عضو مجموعه C ، کماکان سمت راست را کوچکتر نگه می‌دارد.

با توجه به استدلال‌های چهارگانه فوق برای ثابت ماندن جهت نامساوی بعد از جایگزینی ضرایب یکسان $r^{l, final.waste}$ و $r^{l, first.ore}$ با r^l ، می‌توان نوشت:

$$\sum_{l \in A} r^l \times V_l - \sum_{l \in B} r^l \times V_l > \sum_{l \in D} r^l \times V_l - \sum_{l \in C} r^l \times V_l \quad (۸۸-۳)$$

پس از بازآرایی نامساوی (۸۸-۳)، نامساوی (۸۹-۳) به دست می‌آید:

$$\sum_{l \in A} r^l \times V_l + \sum_{l \in C} r^l \times V_l > \sum_{l \in B} r^l \times V_l + \sum_{l \in D} r^l \times V_l \quad (۸۹-۳)$$

با استفاده از روابط (۷۵-۳) و (۷۶-۳) داریم:

$$\sum_{l \in F} r^l \times V_l > \sum_{l \in E} r^l \times V_l \quad (90-3)$$

از رابطه (90-3) به دست می‌آید که مجموع ارزش‌های تنزیل شده بلوک‌های باطله (مجموعه F) از مجموع ارزش‌های تنزیل شده بلوک‌های ماده معدنی (مجموعه E) بیشتر بوده، پس ارزش تنزیل شده یا ارزش خالص فعلی کل منفی می‌شود.

نامساوی (90-3) که از نامساوی‌های (71-3) و (74-3) نتیجه شده است، اثبات می‌کند که نامساوی (70-3) پس از محدوده نهایی با بیشترین سود برقرار نیست و در نتیجه محدوده نهایی با ارزش خالص فعلی حداکثر در هیچ حالتی از نرخ بهره، از محدوده LG بزرگ‌تر نخواهد شد.

اگر این استدلال برای هر بلوک ماده معدنی بعد از محدوده LG تعمیم داده شود و برای آن بلوک ماده معدنی این نامعادلات بازنویسی شوند، مشخص خواهد شد به ازای هیچ مقداری از نرخ بهره، محدوده نهایی با بیشینه ارزش خالص فعلی از محدوده LG بزرگ‌تر نخواهد شد.

همان‌گونه که در مثال‌های قبلی نشان داده شد، با تغییر نرخ بهره محدوده نهایی نیز می‌تواند تغییر کند و از محدوده LG کوچک‌تر گردد. در ادامه به صورت ریاضی این مسئله بررسی و تحلیل خواهد شد.

در این حالت نیز طبق مفروضات مسئله و یک فرض خلف اولیه روابط (65-3) و (66-3) برقرار می‌باشد، با این تفاوت که این بار رابطه زیر میان دو اندیس مرزی $I_{NPV_{max}}$ و $I_{P_{max}}$ برقرار است:

$$I_{NPV_{max}} < I_{P_{max}} \quad (91-3)$$

لذا، با بازنویسی روابط (35) و (37) براساس رابطه (45)، نامعادله زیر به دست می‌آید:

$$\sum_{l=1}^{I_{NPV_{max}}} V_l \times r^l > \sum_{l=1}^{I_{NPV_{max}}} V_l \times r^l + \sum_{l=I_{NPV_{max}}+1}^{I_{P_{max}}} V_l \times r^l \quad (92-3)$$

$$\sum_{l=1}^{I_{NPV_{max}}} V_l < \sum_{l=1}^{I_{NPV_{max}}} V_l + \sum_{l=I_{NPV_{max}}+1}^{I_{P_{max}}} V_l \quad (93-3)$$

پس از حذف قسمت‌های مشترک از دو طرف نامعادلات (92-3) و (93-3)، روابط (94-3) و (95-3) به دست خواهند آمد:

$$\sum_{l=I_{NPV_{max}}+1}^{I_{P_{max}}} V_l \times r^l < 0 \quad (94-3)$$

$$\sum_{l=I_{NPV_{max}}+1}^{I_{P_{max}}} V_l > 0 \quad (95-3)$$

پس برای بررسی امکان کوچک‌تر شدن محدوده با ارزش خالص فعلی حداکثر از محدوده LG، باید تحقیق کرد که آیا اگر با فرض وجود r در بازه نیم تا یک و برقرار بودن نامعادله (95-3)، می‌توان به نامعادله (94-3) رسید یا نه؟ برای ادامه بررسی، ابتدا مجموعه‌های مورد استفاده در این بخش در جدول 9-3 معرفی می‌شوند.

جدول 9-3- مجموعه‌ها و پارامترهای مورد استفاده

اندیس / پارامتر	توضیح
H	مجموعه اندیس‌های (ترتیب استخراج) بلوک‌های باطله بعد از نقطه ارزش خالص فعلی حداکثر تا نقطه سود حداکثر
I	مجموعه اندیس بلوک‌های ماده معدنی از اولین بلوک ماده معدنی تا قبل از شروع آخرین سری از بلوک‌های باطله
J	مجموعه کل اندیس‌های کل بلوک‌های ماده معدنی و باطله بعد از نقطه با ارزش خالص فعلی حداکثر تا نقطه سود حداکثر
$l_{first\ waste}$	اندیس اولین بلوک مثبت (کوچک‌ترین عضو مجموعه H)
$l_{final\ ore}$	اندیس آخرین بلوک باطله (بزرگ‌ترین عضو مجموعه I)

مجموعه‌های H و I جدا از هم می‌باشند. همچنین روابط زیر میان مجموعه‌های فوق برقرار است:

$$H \cup I = J \quad (96-3)$$

روابط زیر نیز میان $l_{first\ waste}$ و $l_{final\ ore}$ و اعضای مجموعه‌های H و I برقرار است:

$$l_{first\ waste} < l_{final\ ore} \quad (97-3)$$

$$l_{first\ waste} \leq l \quad \forall l \in H \quad (98-3)$$

$$l_{final\ ore} \geq l \quad \forall l \in I \quad (99-3)$$

$$l_{first\ waste} = l_{NPV\ max} + 1 \quad (100-3)$$

$$l_{final\ ore} = l_{P\ max} \quad (101-3)$$

با استفاده از مجموعه‌های تعریف شده فوق، نامعادله (۹۵-۳) به صورت (۱۰۲-۳) قابل بازنویسی است:

$$\sum_{l \in I} V_l - \sum_{l \in H} V_l > 0 \quad (102-3)$$

لذا خواهیم داشت:

$$\sum_{l \in H} V_l < \sum_{l \in I} V_l \quad (103-3)$$

از طرف دیگر طبق تعریف محدوده مجاز برای r داریم:

$$r^{l_{NPV\ max} + 1} > r^{l_{P\ max}} \quad (104-3)$$

نامعادله (۱۰۴-۳) در حقیقت نمایان‌گر رابطه ضرایب تنزیل مربوط به بلوک‌های ماده معدنی و نیز باطله

است. یعنی به ازای هر ضریب تنزیل مربوط به بلوک‌های باطله، یک یا چند ضریب تنزیل با مقدار کمتر

وجود دارد.

نکته‌ای که در این مرحله از تحلیل روابط مربوط به این بخش باید در نظر گرفته شود، این است که جهت نامعادلات (۳-۱۰۳) و (۳-۱۰۴)، با اینکه طرفین دو نامعادله نظیر به نظر مربوط به بلوک‌های ماده معدنی (سمت راست دو نامعادله) و نیز مربوط به بلوک‌های باطله (سمت چپ دو نامعادله) می‌باشد، با هم متفاوت است. این تفاوت جهت قطعیت لازم برای قضاوت درباره برقراری همزمان سه نامعادله (۳-۷۴)، (۳-۹۴) و (۳-۹۵) را به بررسی مصداقی و موردی موقوف می‌کند.

برای روشن‌تر شدن این نکته مثال زیر ارائه می‌شود. یک حالت بسیار ساده بلوک‌ها و اندیس‌ها برای صدق در نامعادله (۳-۹۵) به صورت زیر است:

به عنوان مثال با فرض V_1 برابر ۲- و V_2 برابر ۳- می‌توان نوشت:

$$-2 < 3 \quad \text{یا} \quad -2+3 > 0$$

از طرف دیگر نیز برای توان‌های ۱ و ۲ ضریب تنزیل داریم:

$$r^1 > r^2$$

به منظور پیدا کردن مقادیر معتبر برای برقراری نامعادله (۳-۹۳) در این مثال، باید نامعادله زیر حل شود:

$$r^1 \times 2 > r^2 \times 3$$

از حل نامعادله توضیح داده شده در این مثال به دست می‌آید که در بازه مجاز برای ضریب تنزیل یعنی

بازه نشان داده شده در نامعادله (۳-۷۴)، در بازه $\frac{1}{2} < r < \frac{2}{3}$ ، نامعادله (۳-۹۳) برای این مثال برقرار بوده

و مجموع ارزش خالص فعلی این دو بلوک منفی خواهد شد. این مثال ساده نشان می‌دهد برای ارزیابی

دقیق بازه‌هایی از r که سه نامعادله (۳-۷۴)، (۳-۹۴) و (۳-۹۵) به صورت همزمان برقرار باشند، باید به

صورت موردی در مسائل واقعی حل شود.

با رجوع دوباره به مثال حل شده در ابتدای این بخش دیده شد که برای نرخ بهره ۱۵ درصد محدودده با ارزش خالص فعلی بیشینه از محدودده با بیشترین سود کوچکتر است اما برای همان مدل بلوکی و با نرخ بهره ۵ درصد، دو محدودده بر هم منطبق هستند.

با تعمیم نقطه $l_{first\ waste}$ به تمام بلوکهای باطله‌ای که بلافاصله از نظر ترتیب بهینه استخراج پس از یک بلوک ماده معدنی قرار دارند، می‌توان استدلال‌های فوق را تعمیم داد و امکان کوچکتر شدن محدودده با ارزش خالص فعلی حداکثر نسبت به محدودده با سود حداکثر را نتیجه گرفت.

به طور کلی، هدف این بخش بررسی امکان کوچکتر بودن محدودده با هدف حداکثرسازی ارزش خالص فعلی نسبت به محدودده با بیشترین سود بود. مثال‌های مطروحه در بخش‌های پیشین تایید کننده این بررسی کلی است و بازه‌هایی از r که در آن‌ها محدودده نهایی با بیشترین NPV از محدودده با سود حداکثر کوچکتر است به مدل موردی در کانسارهای واقعی بستگی دارد.

در ادامه، برای نشان دادن مفهوم تحلیل‌های فوق در یک مدل بلوکی فرضی نسبت اندازه محدودده‌های LG، BPP و بیشینه NPV نشان داده می‌شود. در شکل ۳-۲۶ یک مدل بلوکی فرضی دو بعدی با ۷ بلوک مثبت و مجموعاً ۴۴ بلوک نشان داده شده است. BPP برای این مدل بلوکی در شکل ۳-۲۷ نشان داده شده است.

-1	-1	-1	-1	+2	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	+4	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1
-1	-1	-1	-1	+5	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1

شکل ۳-۲۶- مدل بلوکی فرضی دو بعدی

-1	-1	-1 (3)	-1 (2)	+2 (1)	-1 (6)	-1 (5)	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	+4 (4)	-1 (7)	-1 (8)	-1	-1	-1	+1	-1
-1	-1	-1	-1	+5 (9)	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1



شکل ۳-۳۰- محدود بهینه نهایی مدل بلوکی شکل ۳-۲۶ با نرخ بهره ۱۵ درصد

همان گونه که در این مثال مشاهده می شود محدود دارای بیشینه NPV از محدود LG کوچک تر بوده و خود محدود LG نیز زیر مجموعه BPP می باشد. پس بر این اساس روابط بین این سه محدود به صورت زیر خواهد بود:

$$UPit_{LG} \subseteq BPP \quad (۱۰۵-۳)$$

$$UPit_{NPV} \subseteq UPit_{LG} \quad (۱۰۶-۳)$$

۳-۴- جمع بندی

در این فصل به مدل سازی ریاضی مسئله تعیین محدود بهینه نهایی پرداخته شد. با استفاده از برنامه ریزی های عدد صحیح و صفر و یکی، توابع هدفی که با حل آن ها محدود نهایی تعیین می شود ارائه شد. به منظور حذف بلوک های اضافه از محاسبات از تکنیک بزرگ ترین محدود ممکن که شامل دورترین و عمیق ترین بلوک های ماده معدنی است استفاده شد. به علت ذات مسئله اصلی این توابع هدف غیرخطی بودند. به همین دلیل، برای خطی سازی این مدل ها پیشنهاد شد که مسئله در دو مرحله خطی حل شود. بر این اساس در مرحله اول ترتیب بهینه استخراج بلوک ها و در مرحله بعد با محاسبه NPV تجمعی بلوک ها بر اساس ترتیب بهینه به دست آمده محدود دارای بیشترین NPV به عنوان محدود نهایی تعیین می شود. مدل سازی ریاضی این مساله از طرفی باعث تبیین مفهوم مساله و راهنمایی محققین برای

درک مناسب‌تر از تعیین محدوده نهایی با هدف بیشینه‌سازی NPV می‌شود و از طرف دیگر به عنوان روش اعتبارسنجی پاسخ‌هایی است که از راه‌های ابتکاری یا فراابتکاری به دست می‌آیند.

در ادامه به منظور کاهش تعداد متغیرهای صفر و یکی و زمان محاسبات، مفاهیم زودترین و دیرترین زمان ممکن برای استخراج هر بلوک تعریف شد. این مفاهیم بر این پایه ارائه شده‌اند که یک بلوک طبق محل قرارگیری آن نسبت به سطح توپوگرافی زودتر از یک زمان قابل برداشت نخواهد بود. همچنین هر بلوک دیرتر از یک زمان دیگر نیز قابل استخراج نیست. با توجه به این مفاهیم اندازه فضای مربوط به جستجوی زمان استخراج هر بلوک بهینه‌سازی شد.

در توابع هدفی که همه متغیرهای تصمیم آن‌ها صفر و یکی است این قابلیت وجود دارد که محدودیت‌هایی که میزان عیار متوسط دوره‌های زمانی عمر معدن را مشخص می‌کنند به مدل اضافه شوند. در این راستا روابط مربوط به این محدودیت‌ها ارائه و به توابع هدف اضافه شدند.

فصل چهارم

الگوریتم‌های ابتکاری

تعیین محدوده نهایی با

بیشینه‌سازی NPV

۴-۱- مقدمه

در فصل دوم گفته شد که برای تعیین محدوده نهایی به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی دشوار روش‌های ابتکاری و فراابتکاری مختلفی ارائه شده است. در فصل سوم نیز مدل‌های ریاضی مسئله تعیین محدوده نهایی با هدف بهینه‌سازی NPV ارائه شد. مدل‌های ریاضی ارائه شده به علت تعداد محدودیت و متغیر تصمیم بسیار زیاد در معادن واقعی، از نوع مسائل سخت تلقی می‌شود. در علم تحقیق در عملیات^۱ برای این دسته از مسائل بهینه‌سازی پیشنهاد می‌شود که از راه‌حلهایی با زمان مناسب و سطح پیچیدگی کم‌تر استفاده شود. بر این مبنا در این فصل به ارائه راه‌حلهایی ابتکاری بر اساس تعریف مفاهیم مناسب برای حل مدل‌های ارائه شده پرداخته می‌شود.

۴-۲- منطق مورد نیاز برای راه حل مناسب

در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده از دو نوع راه حل تقریبی یعنی ابتکاری و فراابتکاری استفاده می‌شود. الگوریتم‌های ابتکاری بر اساس نیاز یک مسئله خاص برای آن توسعه می‌یابند. در مقابل، الگوریتم‌های فراابتکاری به عنوان یک راه حل کلی، در موارد مصداقی با مسئله اصلی تطبیق داده می‌شوند. برای ارائه یک الگوریتم ابتکاری ابتدا باید به ملزومات مورد نیاز برای دستیابی به منطق حل مسئله دست یافت. مسئله اصلی این رساله بهینه‌سازی محدوده نهایی برای دستیابی به بالاترین NPV است. همان‌گونه که در توضیحات فصل‌های قبل گفته شد، مفهوم این مسئله تعیین همزمان ترتیب بهینه استخراج و محدوده نهایی است. بر این اساس، مدل‌های ریاضی این مسئله به صورت غیرخطی ارائه گردیدند. برای حل این مدل‌های غیرخطی، ابتدا می‌توان ترتیب بهینه استخراج بلوک‌ها را تعیین کرد، آن‌گاه با تجمیع NPV بلوک‌ها بر اساس ترتیب به دست آمده، نقطه دارای بالاترین NPV به عنوان محدوده نهایی انتخاب شود.

^۱ Operation Research (OR)

این استراتژی را می‌توان به عنوان پایه ارائه الگوریتم حل مسئله محدوده نهایی قرار داد. پس در الگوریتم باید ابتدا ترتیب استخراج بلوک‌ها مشخص شده و بعد از آن بر اساس ترتیب پیشنهادی NPV آن‌ها محاسبه و مقدار تجمعی محاسبه شود.

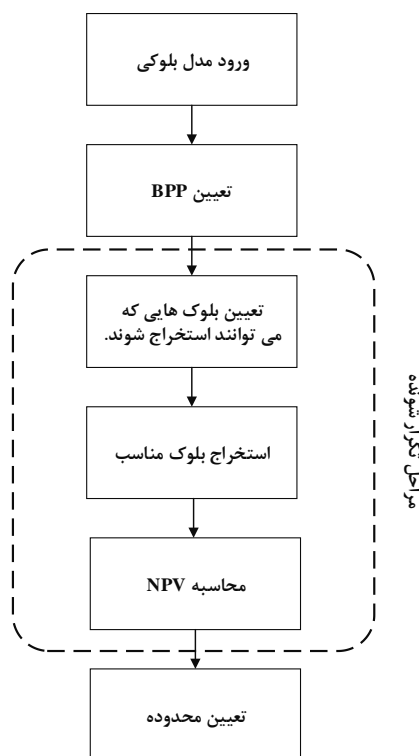
روابط و محدودیت‌های توابع هدف ارائه شده در فصل‌های قبل نکات زیر را برای استفاده در توسعه الگوریتم مشخص می‌کنند:

۱. بلوک‌های اضافی باید از طریق تعیین BPP از محاسبات حذف شوند.
۲. ابتدا باید بلوک‌های بالایی برای دستیابی به بلوک‌های پایینی برداشته شوند.
۳. اولویت استخراج با بلوک‌هایی است که دارای ارزش بیشتری هستند.
۴. مسیر استخراج باید به سمت بلوک‌هایی باشد که ارزش بیشتری دارند.
۵. برای تعیین هر ترتیب، به صورت بلوک به بلوک باید جستجو و انتخاب انجام شود.

این نکات به عنوان استراتژی کلی دستیابی به یک راه حل برای تعیین ترتیب استخراج راهنمای توسعه الگوریتم استفاده خواهند شد. در حقیقت مسئله تعیین ترتیب بلوک‌ها را می‌توان به عنوان یک مسئله مرتب کردن نزولی مجموعه‌ای از اعداد دید که توسط محدودیت‌های مسئله مقید شده است.

BBP با توجه به تعریفی که در فصل سوم ارائه شد، تعیین می‌شود. برای عملیاتی کردن نکته ۲ نیز می‌توان این‌گونه گفت که بلوک یا باید در سطح توپوگرافی قرار داشته باشد یا ترتیب بلوک‌های بالایی آن مشخص شده باشد. بر اساس ارزش اقتصادی نیز می‌توان میزان مطلوبیت بلوک برای قرارگیری در ترتیب زودتر را سنجید. نکته ۴ بیان‌گر ضرورت در نظر گرفتن همزمان بلوک‌های بالا و پایین است که باید از راهی مناسب برای اجرایی کردن آن استفاده شود. در توابع هدف ارائه شده برای تک تک بلوک‌های درون BPP ترتیب مشخصی اختصاص داده شده است. پس در الگوریتم نیز باید برای تک تک بلوک‌ها ترتیب

مناسب تعیین شود. پس بر اساس نکات بالا الگوریتم مورد نظر باید از چند بخش تشکیل یابد. نمای کلی این بخش‌ها در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. مجموعه‌ای از این بخش‌ها باید تکرار شوند تا ترتیب مناسب همه بلوک‌ها تعیین شود. سپس بالاترین NPV به عنوان محدوده نهایی تعیین شود.



شکل ۴-۱- مراحل کلی یک الگوریتم مناسب برای تعیین محدوده نهایی

همان‌گونه که گفته شد بلوک‌های بالایی که امکان استخراج دارند و بلوک‌های پایین‌تر برای پیدا کردن مسیر مناسب استخراج، باید به صورت همزمان لحاظ و دیده شوند. به این معنا که باید به صورت همزمان هم ارزش خود بلوک دیده شود و هم تاثیری که استخراج آن بلوک در مسیر کلی استخراج دارد لحاظ گردد. در روش‌های گرشون و وانگ و سویم از مفهوم مخروط معکوس استفاده شده است. مخروط معکوس در حقیقت مجموعه‌ای از بلوک‌هاست که برای استخراج آن‌ها باید بلوک راس آن استخراج شود. از طرف دیگر در روش گرشون از مفهوم وزن مکانی (PW)^۱ استفاده شده است. در این روش وزن مکانی یک

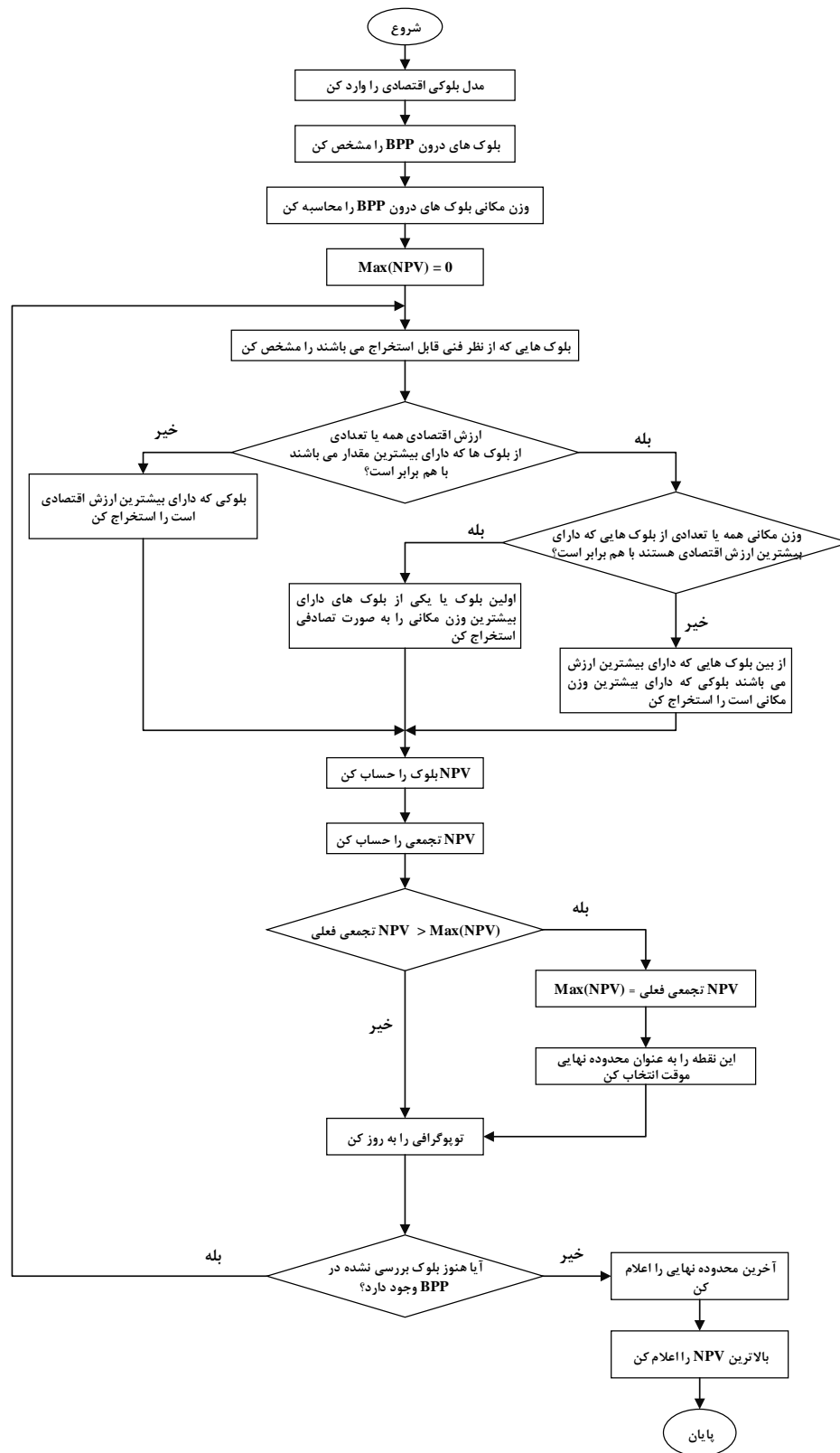
^۱ Positional Weight (PW)

بلوک مجموع عبارهای بلوک‌های ماده معدنی درون مخروط معکوس آن است. با توجه به این نکات وزن مکانی بیان‌گر ارزش مسیری است که برداشته شدن یک بلوک دسترسی به آن را ممکن می‌کند. این مفهوم یک ابزار مناسب برای همزمان در نظر گرفتن ارزش یک بلوک و بلوک‌های زیرین آن را ایجاد کرده است.

در مجموع یک الگوریتم برای تعیین محدوده نهایی بر اساس بیشینه‌سازی NPV باید به صورت بلوک به بلوک از میان بلوک‌های قابل استخراج، بلوکی که دارای بالاترین ارزش است را استخراج کند و به صورت همزمان مسیری را بپیماید که راه را برای برداشت بلوک‌های با ارزش بیشتر باز کند. در بخش‌های بعد الگوریتم‌هایی که بر این اساس توانایی پیدا کردن محدوده نهایی را دارند، ارائه می‌شود.

۴-۳- الگوریتم اول

در این بخش بر اساس اصول اولیه بیان شده در بخش قبل، یک الگوریتم جستجوگر که به صورت همزمان ترتیب استخراج و محدوده نهایی را تعیین می‌کند ارائه می‌شود. جزئیات مراحل این الگوریتم در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. به صورت خلاصه مراحل این الگوریتم به ترتیب از مشخص کردن BPP، محاسبه وزن مکانی بلوک‌ها، مشخص کردن بلوک‌های نامزد، مقایسه بلوک‌های نامزد بر اساس ارزش اقتصادی، مقایسه ارزش بلوک‌های دارای ارزش اقتصادی مساوی بر اساس وزن مکانی، محاسبه NPV تجمعی و تعیین محدوده موقت و نهایی تشکیل شده است. در مرحله اول مقایسه بلوک‌های نامزد اولویت با پرارزش‌ترین بلوک است. در صورتی که همه یا تعدادی از این بلوک‌ها دارای بالاترین ارزش به صورت مساوی بودند، اولویت با بلوکی است که دارای بیشترین وزن مکانی است. اگر وزن مکانی همه یا تعدادی از بلوک‌های مقایسه شده در این مرحله با هم برابر بود، اولین بلوک یا به صورت تصادفی یکی از این بلوک‌ها انتخاب می‌شود. در ادامه به صورت تفصیلی این مراحل شرح داده می‌شود.



شکل ۴-۲- مراحل الگوریتم اول

این الگوریتم برای مدل بلوکی اقتصادی قابل استفاده است. برای استفاده از آن پس از تهیه مدل بلوکی حاوی ارزش بلوک‌ها ابتدا BPP تعیین می‌شود. پس از تعیین BPP باید وزن مکانی بلوک‌های درون این مرز محاسبه شود. نحوه محاسبه وزن مکانی بلوک‌ها در شکل‌های ۳-۴ الف و ۳-۴ ب نشان داده شده است. لازم به توضیح است که تاکنون وزن مکانی تنها برای مدل‌های زمین‌شناسی در روش‌های پیشین استفاده شده است و در این الگوریتم مفهوم وزن مکانی برای اولین بار برای مدل بلوکی اقتصادی استفاده شده است.

9	15	15	15	11	4	2
	9	11	11	4	2	
		2	2	2		
			0			

←BPP → بلوک راس

ب- مقادیر وزن مکانی (PW) بلوک‌ها

-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	-1	4	-1	-1	-1	
		7	2	-1		
			2			


←BPP → مخروط معکوس

الف- مدل بلوکی اقتصادی

شکل ۳-۴- یک مدل بلوکی اقتصادی و وزن مکانی بلوک‌های آن

پس از محاسبه مقادیر وزن مکانی سپس برای تعیین ترتیب همه بلوک‌های درون BPP مراحل خاصی باید به تعداد بلوک‌ها تکرار شود. برای هر تکرار ابتدا باید بلوک‌هایی که از نظر فنی قابل استخراج می‌باشند مشخص گردد. در این روش قرار داشتن در سطح توپوگرافی یا مشخص شدن ترتیب ۹ بلوک بالای هر بلوک و یا ترکیب این دو معیار قابل استخراج بودن آن است. بلوک‌های قابل استخراج در شکل ۴-۴ برای یک مدل بلوکی دو بعدی مشخص شده‌اند.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	w							w	w	w
2		o	o				o	w	w	
3			w	w	o	w		o		
4				o	o					
5										



شکل ۴-۴- بلوک‌های قابل استخراج

پس از این که بلوک‌های قابل استخراج مشخص شد، این بلوک‌ها به عنوان نامزد استخراج در آن مرحله با هم مقایسه خواهند شد. از آن جایی که برای رسیدن به بالاترین NPV بلوک‌های با ارزش بیشتر باید زودتر استخراج شوند، معیار اول برای مقایسه بین آن‌ها، ارزش آن‌ها خواهد بود. طبق این قاعده بلوکی که دارای بیشترین ارزش از بین بلوک‌های نامزد باشد به عنوان بلوک مطلوب برای استخراج در آن مرحله انتخاب می‌شود. در صورتی که ارزش اقتصادی دو یا چند بلوک با هم برابر بود، از بین بلوک‌هایی که در بیشترین ارزش با هم برابرند، بلوکی انتخاب می‌شود که دارای بیشترین وزن مکانی است. همان‌گونه که قبلاً گفته شد وزن مکانی یک بلوک ارزش مسیری است که استخراج آن بلوک باعث باز شدن آن می‌شود. پس در صورتی که نتوان بین چند بلوک به ترجیح مناسبی بر اساس ارزش آن‌ها رسید، وزن مکانی معیار مناسبی برای پیدا کردن بلوک مطلوب خواهد بود.

در ابتدای الگوریتم و قبل از شروع تکرارها باید یک پارامتر به نام $\text{Max}(\text{NPV})$ با مقدار اولیه صفر تعریف شود. این پارامتر در حقیقت معرف مقدار بهینه تابع هدف خواهد بود. در هر مرحله پس از انتخاب بلوک مناسب، با توجه به ترتیب آن، مقدار NPV آن محاسبه می‌شود. پس محاسبه NPV هر مرحله این مقدار با مقادیر مراحل قبل جمع می‌شود. در پایان هر مرحله NPV تجمعی هر مرحله با $\text{Max}(\text{NPV})$ مقایسه می‌شود. اگر NPV تجمعی آن مرحله از $\text{Max}(\text{NPV})$ بیشتر بود، NPV تجمعی به عنوان مقدار جدید $\text{Max}(\text{NPV})$ تعیین می‌شود. در این صورت مجموعه بلوک‌هایی که از ابتدا تا این مرحله قرار دارند به

عنوان محدوده نهایی موقت انتخاب می‌شوند. در غیر این صورت تغییری در مقدار Max(NPV) ایجاد نخواهد شد. این مراحل تا زمانی که همه بلوک‌های درون BPP بررسی شوند ادامه پیدا می‌کند. پس از هر مرحله و انتخاب بلوک مربوط به آن مرحله، بلوک‌هایی که تکلیف ترتیب استخراج آن‌ها مشخص شده است به عنوان بلوک‌های استخراج شده فرض می‌شوند. بنابراین پس از هر مرحله توپوگرافی به حالتی که این بلوک‌ها وجود ندارند به‌روز می‌شود.

پس از بررسی تمام بلوک‌ها، آخرین مرزی که به عنوان محدوده موقت بهینه انتخاب شده بود به عنوان محدوده نهایی انتخاب می‌شود. برای نشان دادن نحوه عملکرد این الگوریتم از مدل دو بعدی شکل ۴-۵ استفاده می‌شود. مقادیر ارزش اقتصادی و وزن مکانی بلوک‌های درون BPP برای این مدل بلوکی در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که گفته شد، وزن مکانی یک بلوک از محاسبه مجموع بلوک‌های مثبت درون مخروط معکوس آن بلوک به دست می‌آید. به عنوان مثال برای محاسبه وزن مکانی بلوک (۱,۳) باید ارزش بلوک‌های مثبت (۲,۲)، (۲,۳)، (۳,۳) و (۳,۴) با هم جمع شوند.

	1	2	3	4	5	6
1	-1	-1	3	-1	-1	-1
2	-1	5	6	-1	1	-1
3	-1	-1	1	3	-1	-1

←BPP

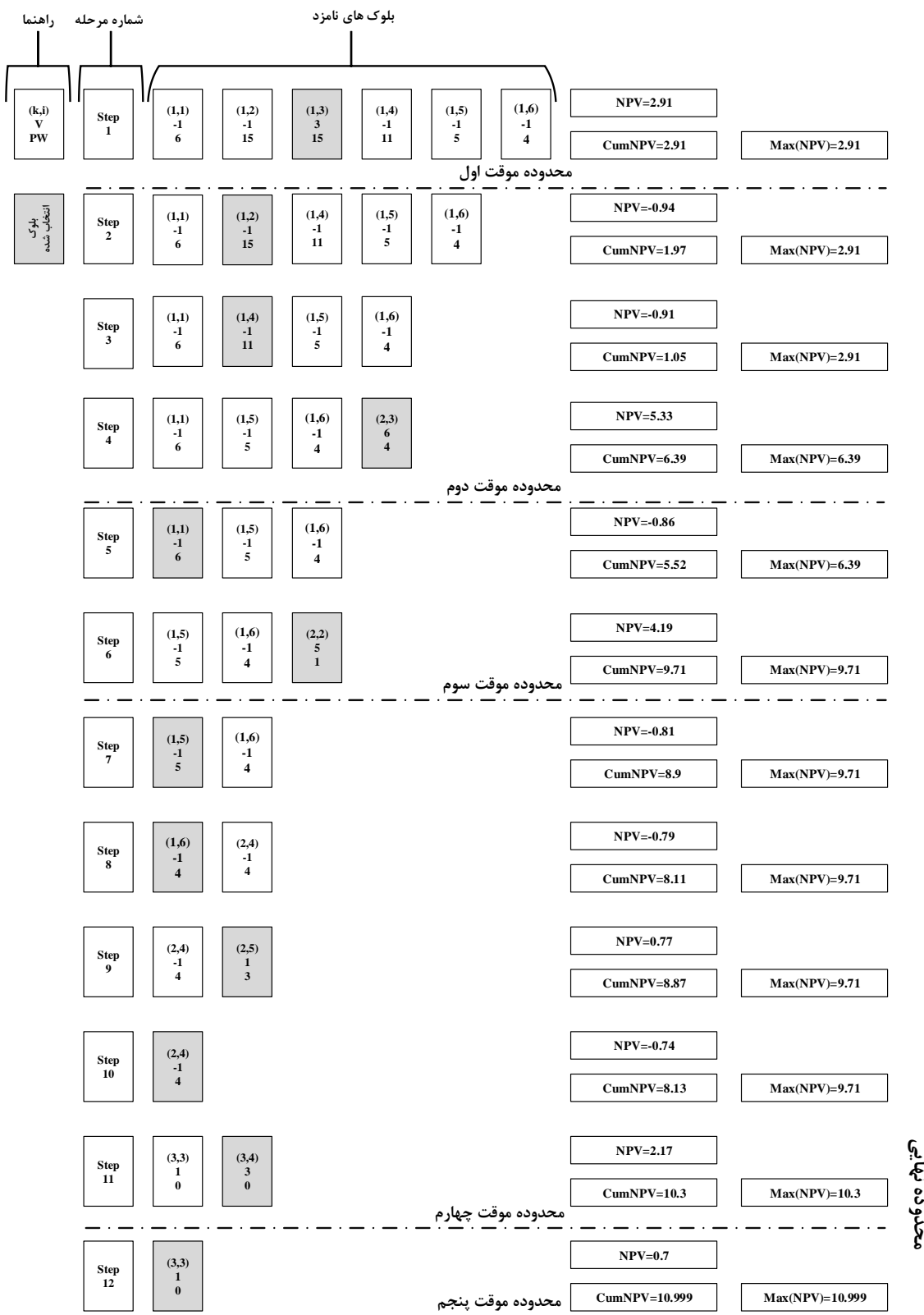
شکل ۴-۵- مدل بلوکی فرضی

	1	2	3	4	5	6
1	-1	-1	3	-1	-1	-1
	6	15	15	11	5	4
2		5	6	-1	1	
		1	4	4	3	
3			1	3		
			0	0		

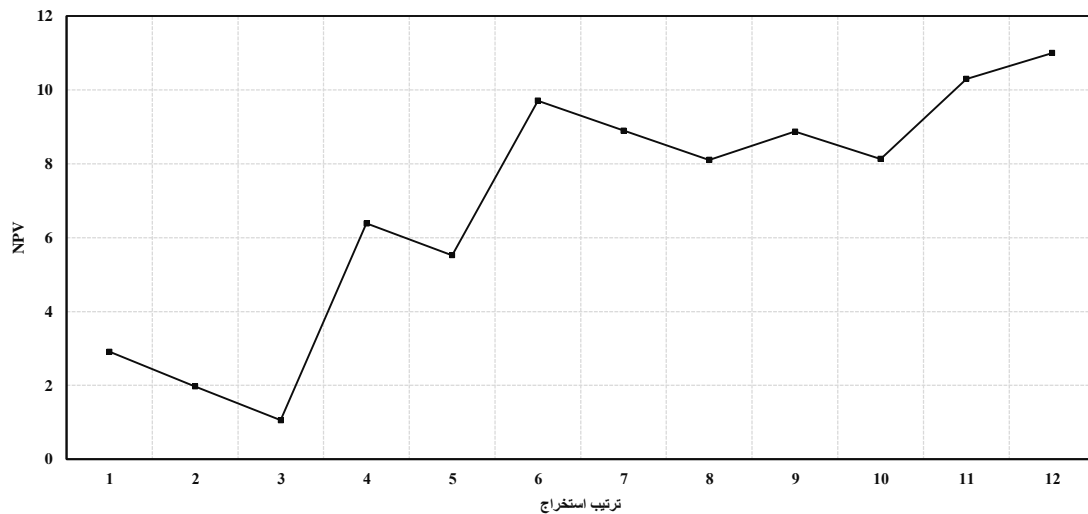
V	سلول یک بلوک ←
PW	

شکل ۴-۶- مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای اجرای الگوریتم ابتکاری بر روی مدل بلوکی شکل ۴-۵ (V: ارزش اقتصادی، PW: وزن مکانی)

مراحل الگوریتم برای مدل شکل ۴-۶ با نرخ بهره ۳ درصد به ازای هر بلوک در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. در این الگوریتم در اولین مرحله بلوک مثبت (۱,۳) به عنوان بلوک مناسب انتخاب می‌شود. NPV این مرحله ۲/۹۱ واحد پولی شد. چون این مقدار از مقدار اولیه Max(NPV) یعنی صفر بیشتر است، مقدار مذکور جایگزین مقدار قبلی شده و به عنوان Max(NPV) جدید ذخیره می‌شود. این مقدار ذخیره شده برای تابع هدف در مرحله ۴ با مقدار جدید یعنی ۶/۳۹ جایگزین شد. در مرحله ششم نیز بار دیگر با افزایش مقدار Max(NPV) به ۹/۷۱ واحد پولی محدوده موقت سوم تشکیل می‌شود. سپس این مراحل با همین قواعد تا اتمام بلوک‌های BPP با تغییر محدوده موقت در مراحل یازده و دوازده ادامه پیدا می‌کند. بر این اساس چون مقدار تابع هدف در مرحله ۱۲ به بالاترین مقدار خود یعنی ۱۰/۹۹۹ می‌رسد، این نقطه و بلوک‌های منتهی به آن به عنوان محدوده نهایی انتخاب می‌شوند. نمودار NPV تجمعی این مثال در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.



شکل ۴-۷- مراحل اجرای الگوریتم اول برای مدل بلوکی شکل ۴-۶



شکل ۴-۸- نمودار NPV تجمعی بر اساس ترتیب به دست آمده از الگوریتم اول

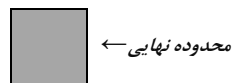
طبق نتایج به دست آمده محدوده نهایی برای این مدل بلوکی مطابق شکل ۴-۹-الف خواهد بود. این محدوده متشکل از ۱۲ بلوک با NPV معادل ۱۰/۹۹ واحد پولی است. ترتیب استخراج و محدوده حاصل از حل تابع هدف که در شکل ۴-۹-ب نشان داده شده است، در این مثال با نتیجه الگوریتم تطابق دارد. از آنجایی که این الگوریتم ابتکاری است، نمی‌توان به صورت تضمین شده و همیشگی انتظار تطابق نتایج را داشت.

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

ب: ترتیب و محدوده بهینه به دست آمده از حل تابع هدف

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

الف: ترتیب و محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم اول



شکل ۴-۹- ترتیب بلوک‌ها بر اساس الگوریتم اول و حل تابع هدف

در مجموع این الگوریتم با جستجوی بلوک به بلوک مسیری را برای استخراج انتخاب می‌کند که هم بلوک‌های با ارزش بیشتر سریع‌تر استخراج شوند و هم راه برای بلوک‌های با ارزش‌تر باز شود. این قابلیت

در این الگوریتم وجود دارد که محدودیت‌های عیاری به آن اضافه شود و ثبات برخی پارامترها در دوره‌های زمانی خاص رعایت شود. همچنین این الگوریتم قابلیت به کارگیری در شیب‌های متغیر را نیز داراست.

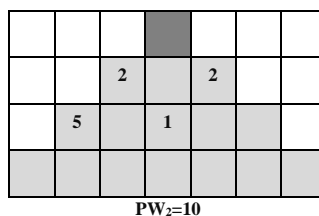
۴-۴- الگوریتم دوم

در الگوریتم اول پارامتری که موجب هدایت مسیر استخراج به سمت بلوک‌های با ارزش‌تر در بخش‌های پایین‌تر کانسار می‌شود وزن مکانی است. وزن مکانی پارامتری است که دوری و نزدیکی بلوک‌های مثبت درون مخروط معکوس را لحاظ نکرده است. به این معنا که ممکن است دو بلوک دارای وزن مکانی یکسانی باشند اما بلوک‌های مثبت درون مخروط معکوس یکی عمیق‌تر از دیگری باشند. این تفاوت در شکل‌های ۴-۱۰ و ۴-۱۱ نشان داده شده است. بر این اساس با وجود این‌که وزن مکانی شاخص مناسبی برای مشخص کردن مسیری است که الگوریتم را به مناطق پرعیارتر کانسار هدایت کند اما نمی‌تواند شاخصی کافی برای ارزیابی نزدیک بودن بلوک‌های مثبت به بلوک راس مخروط معکوس باشد. این نکته از این حیث حایز اهمیت است که به خاطر نرخ تنزیل، NPV بلوک‌ها با بالا رفتن عدد ترتیب استخراج آن‌ها کاهش چشمگیری یافته و چه بسا یک بلوک مثبت با مقدار

کم‌تر اما زمان استخراج زودتر NPV بالاتری نسبت به یک بلوک مثبت با ارزش بیشتر اما زمان استخراج دیرتر داشته باشد.

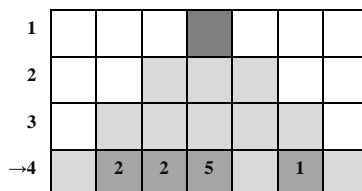
$PW_1=10$

شکل ۴-۱۰- وزن مکانی به دست آمده از بلوک‌های مثبت عمیق

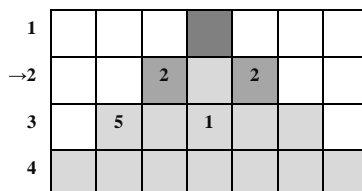


شکل ۴-۱۱- وزن مکانی به دست آمده از بلوک‌های مثبت نزدیک‌تر به راس مخروط معکوس

بنابر توضیحات بالا، در کنار وزن مکانی یک شاخص دیگر نیز باید تعریف شود تا بتواند مسیر را به سمت بلوک‌های مثبت نزدیک‌تر به سطح زمین هدایت کند. در این بخش این شاخص، شاخص نزدیک‌ترین بلوک ماده معدنی (NOI)^۱ نامیده می‌شود. در ادامه نحوه محاسبه این شاخص ارائه می‌شود. در شکل‌های ۴-۱۲ و ۴-۱۳ نزدیک‌ترین بلوک‌های مثبت به راس یک مخروط معکوس نشان داده شده‌اند.



شکل ۴-۱۲- افق نزدیک‌ترین بلوک‌های ماده معدنی به راس مخروط معکوس (بلوک‌های مثبت عمیق)



شکل ۴-۱۳- افق نزدیک‌ترین بلوک‌های ماده معدنی به راس مخروط معکوس (بلوک‌های مثبت سطحی)

بر اساس توضیحات بالا می‌توان رابطه محاسبه شاخص نزدیک‌ترین بلوک ماده معدنی برای هر بلوک را این‌گونه بیان کرد:

$$NOI_{ijk} = k_{ijk}^{fo} - k_{ijk} \quad (۴-۱)$$

که در این رابطه:

NOI_{ijk} شاخص نزدیکی بلوک مثبت برای بلوک ijk

^۱ Nearest Ore Index (NOI)

k_{ijk}^{fo}

افق نزدیک‌ترین بلوک یا بلوک‌های مثبت درون مخروط معکوس بلوک ijk به بلوک

 ijk k_{ijk}

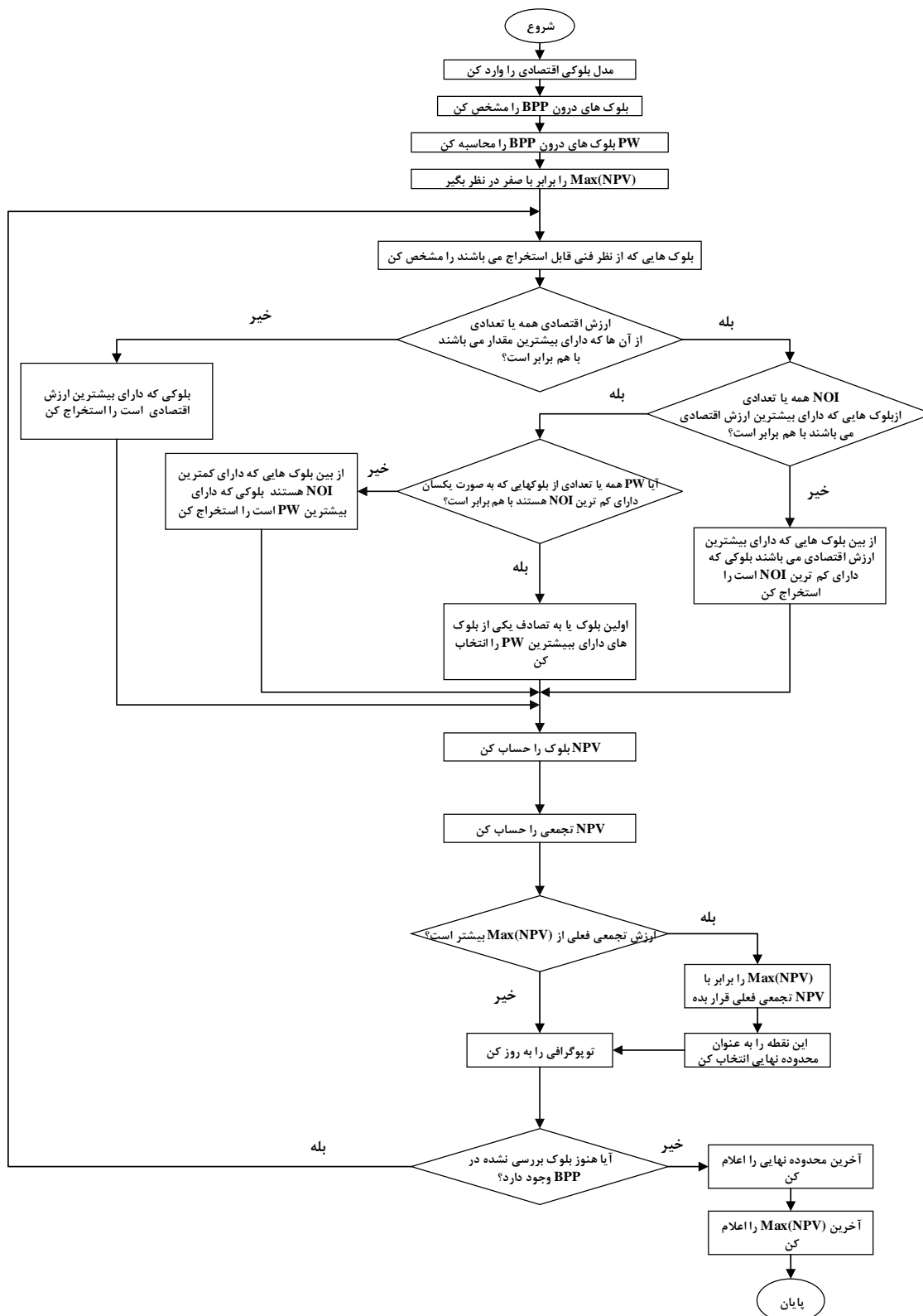
افق خود بلوک ijk

طبق این تعریف مقادیر NOI برای بلوک‌های راس مخروط معکوس شکل‌های ۴-۱۲ و ۴-۱۳ به ترتیب ۳ و ۱ می‌باشند. با استفاده از شاخص مذکور، الگوریتم دوم برای تعیین محدوده نهایی به صورت شکل ۴-۱۴ ارائه می‌شود. برای استفاده از این الگوریتم ابتدا باید BPP برای کانسار مشخص شود، آن‌گاه برای بلوک‌های درون آن مقادیر NOI و PW محاسبه شوند. به صورت خلاصه طبق الگوریتم ارائه شده، ابتدا باید بلوک‌های نامزد انتخاب شوند و سپس این بلوک‌ها ابتدا بر اساس ارزش اقتصادی مقایسه شوند. در این مرحله اولویت با بلوکی است که بیشتر ارزش اقتصادی را دارد. در صورتی که همه یا تعدادی از این بلوک‌ها به صورت مساوی دارای بالاترین ارزش اقتصادی باشند، این بین آن‌ها بلوکی که دارای کم‌ترین NOI است به عنوان بلوک مطلوب انتخاب می‌شود. در این مرحله نیز اگر همه یا تعدادی از این بلوک‌ها به صورت یکسان دارای کم‌ترین NOI بودند، بلوک مناسب بلوکی است که دارای بیشترین PW است. اگر پس از تمام این مراحل همچنان همه یا تعدادی از بلوک‌هایی که از نظر مقایسه‌های قبلی دارای ارزش یکسان بوده‌اند، دارای PW برابر بودند، به صورت تصادفی یا انتخابی (اولین بلوک) به عنوان بلوک منتخب معرفی می‌شود. پس از انتخاب بلوک مطلوب این مرحله و محاسبه NPV آن و سپس NPV تجمعی تا این مرحله و مقایسه با نتایج مراحل قبل، محدوده موقت و نهایتاً در آخرین مرحله محدوده نهایی مشخص می‌شود. در ادامه نیز به صورت جزئی‌تر این مراحل توضیح داده خواهد شد.

مراحل الگوریتم دوم شبیه الگوریتم اول است. پس از تعیین مقادیر فوق برای بلوک‌های BPP ابتدا مانند الگوریتم اول در هر مرحله بلوک‌های نامزد برای مقایسه انتخاب می‌شوند. سپس مقادیر ارزش آن‌ها با هم مقایسه می‌شوند. در این صورت اولویت با بلوکی خواهد بود که بیشترین ارزش را دارد. در صورتی که دو یا چند بلوک به صورت یکسان دارای بیشترین ارزش بودند، مقادیر NOI این بلوک‌ها با هم مقایسه

می‌شود. در این معیار، ملاک مطلوبیت NOI کم‌تر است. پس از بین بلوک‌هایی که بیشترین ارزش را دارند بلوکی انتخاب می‌شود که کم‌ترین NOI را دارد. در صورتی که در این مقایسه نیز بلوک‌هایی وجود داشته باشند که در کم‌ترین مقدار NOI با هم برابر باشند، این بار وزن مکانی آن‌ها با هم مقایسه می‌شود. در این حالت اولویت انتخاب از بین این بلوک‌ها با بلوکی است که بیشترین مقدار PW را دارا باشد.

در این الگوریتم نیز باید مراحل فوق به تعداد بلوک‌های BPP تکرار شود. همچنین در ابتدا باید پارامتر $\text{Max}(\text{NPV})$ برای چک کردن مقدار بهینه تابع هدف با مقدار اولیه صفر تعریف شود. سپس در هر بار انتخاب بلوک مطلوب و پس از محاسبه NPV و NPV تجمعی آن، این NPV تجمعی با مقدار $\text{Max}(\text{NPV})$ مقایسه می‌شود. در صورتی که NPV تجمعی از مقدار $\text{Max}(\text{NPV})$ بیشتر بود این مقدار به عنوان $\text{Max}(\text{NPV})$ جدید تعیین و محدوده منتهی به آن به عنوان محدوده نهایی موقت تعیین می‌شود. پس از اتمام بررسی بلوک‌های BPP آخرین محدوده نهایی موقت به عنوان محدوده نهایی اصلی انتخاب می‌شود.



شکل ۴-۱۴- الگوریتم ابتکاری دوم

پس از توضیحات فوق با استفاده از یک مثال این مراحل نشان داده می‌شود. به این منظور از مدل بلوکی

شکل

۴-۵ استفاده می‌شود. مقادیر NOI و PW برای این مدل در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است.

	1	2	3	4	5	6
1	-1	-1	3	-1	-1	-1
2	1	6	1	15	1	15
3	1	11	1	5	2	4
4		5	6	-1	1	
5		1	1	1	4	1
6			1	4	3	
7			1	3		
8			0	0	0	0

V
NOI PW

← سلول یک بلوک

شکل ۴-۱۵- مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای اجرای الگوریتم ابتکاری بر روی مدل بلوکی شکل ۴-۵
(V: ارزش اقتصادی، NOI: شاخص نزدیک‌ترین بلوک مثبت، PW: وزن مکانی)

مراحل اجرای الگوریتم برای این مدل بلوکی در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. در ابتدای کار مقدار اولیه تابع هدف یعنی $Max(NPV)$ برابر با صفر فرض می‌شود. در مرحله اول ۶ بلوک به عنوان بلوک‌های دارای قابلیت استخراج نامزد شده‌اند. چون ارزش اقتصادی بلوک (۱,۳) از همه بیشتر است این بلوک به عنوان بلوک اول انتخاب می‌شود. از آنجایی که NPV در این مرحله ۲/۹۱ است و این مقدار از مقدار اولیه $Max(NPV)$ بیشتر است، $Max(NPV)$ برابر با این مقدار می‌شود و این مرحله به عنوان محدوده موقت انتخاب می‌شود. در مرحله دوم، پنج بلوک نامزد شدند که پس از مقایسه ارزش، NOI و PW آن‌ها بلوک

(۱,۲) به عنوان بلوک مناسب انتخاب شد. از آنجایی که NPV این مرحله از آخرین $\text{Max}(\text{NPV})$ کم تر است، تغییری در مقدار $\text{Max}(\text{NPV})$ و محدوده موقت اتفاق نمی افتد. تغییر بعدی در مقدار $\text{Max}(\text{NPV})$ و محدوده موقت در مرحله چهارم و با انتخاب بلوک (۲,۳) انجام می شود. پس از طی مراحل الگوریتم تغییر بعدی در $\text{Max}(\text{NPV})$ و در نتیجه محدوده موقت سوم در مرحله ششم پس از انتخاب بلوک (۲,۲) به وجود می آید. در این مرحله NPV تجمعی به مقدار $۹/۷۱$ واحد پولی می رسد. با انجام بقیه مراحل الگوریتم تا مرحله ۱۱ برای مدل بلوکی فرضی محدوده موقت جدیدی به دست نمی آید. تغییر بعدی محدوده موقت در مرحله ۱۲ اتفاق می افتد که $\text{Max}(\text{NPV})$ به مقدار $۱۰/۹۹۹$ می رسد. بر اساس این نتایج، محدوده نهایی از این الگوریتم تا محدوده موقت پنجم در مرحله ۱۲ و با NPV $۱۰/۹۹۹$ واحد پولی به دست آمد. در نهایت ترتیب استخراج بلوک ها بر اساس این الگوریتم مطابق شکل ۴-۱۷ است. نمودار NPV تجمعی بر اساس این الگوریتم در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. محدوده نهایی به دست آمده از این الگوریتم نیز در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است.

راهنما	شماره مرحله	بلوک های نامزد								
(k,i) V NOI PW	Step 1	(1,1) -1 1 6	(1,2) -1 1 15	(1,3) 3 1 15	(1,4) -1 1 11	(1,5) -1 1 5	(1,6) -1 1 4	NPV=2.91	CumNPV=2.91	Max(NPV)=2.91
محدوده موقت اول										
انتخاب شده بلوک	Step 2	(1,1) -1 1 6	(1,2) -1 1 15	(1,4) -1 1 10	(1,5) -1 1 5	(1,6) -1 1 4		NPV=-0.94	CumNPV=1.97	Max(NPV)=2.91
	Step 3	(1,1) -1 1 6	(1,4) -1 1 10	(1,5) -1 1 5	(1,6) -1 1 4			NPV=-0.91	CumNPV=1.05	Max(NPV)=2.91
	Step 4	(1,1) -1 1 6	(1,5) -1 1 5	(1,6) -1 1 4	(2,3) 6 1 4			NPV=5.33	CumNPV=6.39	Max(NPV)=6.39
محدوده موقت دوم										
	Step 5	(1,1) -1 1 6	(1,5) -1 1 5	(1,6) -1 1 4				NPV=-0.86	CumNPV=5.52	Max(NPV)=6.39
	Step 6	(1,5) -1 1 5	(1,6) -1 1 4	(2,2) 5 1 1				NPV=4.19	CumNPV=9.71	Max(NPV)=9.71
محدوده موقت سوم										
	Step 7	(1,5) -1 1 5	(1,6) -1 1 4					NPV=-0.81	CumNPV=8.9	Max(NPV)=9.71
	Step 8	(1,6) -1 1 4	(2,4) -1 1 4					NPV=-0.79	CumNPV=8.11	Max(NPV)=9.71
	Step 9	(2,4) -1 1 4	(2,5) 1 1 3					NPV=0.77	CumNPV=8.87	Max(NPV)=9.71
	Step 10	(2,4) -1 1 4						NPV=-0.74	CumNPV=8.13	Max(NPV)=9.71
	Step 11	(3,3) 1 0 0	(3,4) 3 0 0					NPV=2.17	CumNPV=10.3	Max(NPV)=10.3
محدوده موقت چهارم										
	Step 12	(3,3) 1 0 0						NPV=0.7	CumNPV=10.999	Max(NPV)=10.999
محدوده موقت پنجم										

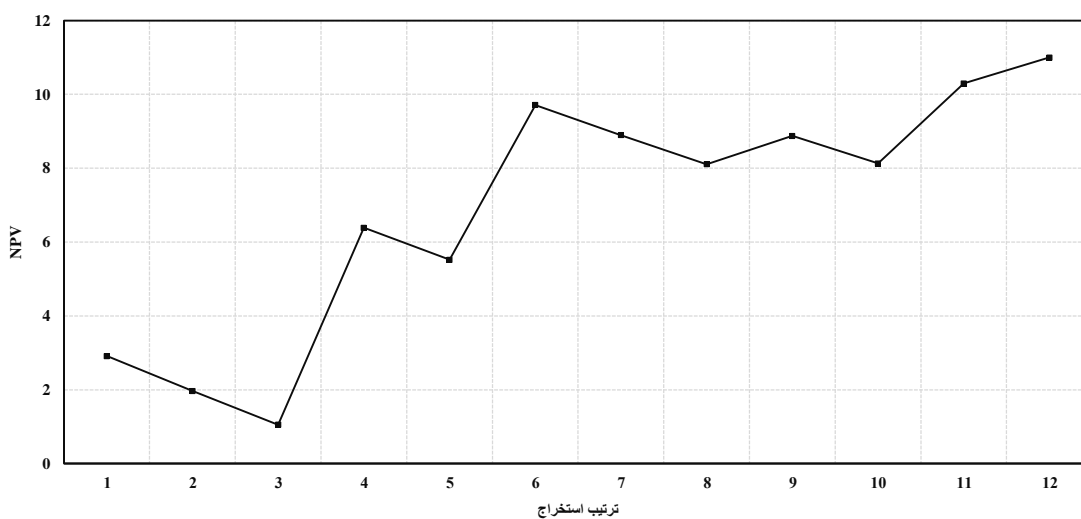
محدوده نهایی

شکل ۴-۱۶ - مراحل اجرای الگوریتم دوم برای مدل بلوکی شکل ۴-۱۵

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

←BPP

شکل ۴-۱۷- ترتیب استخراج به دست آمده از الگوریتم دوم برای مدل بلوکی شکل ۴-۱۵



شکل ۴-۱۸- نمودار NPV تجمعی بر اساس ترتیب به دست آمده از الگوریتم دوم

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

←محدوده نهایی

شکل ۴-۱۹- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم دوم برای مدل بلوکی شکل ۴-۱۵

به طور کلی تمرکز الگوریتم دوم بر رسیدن به بلوک‌های مثبت نزدیک‌تر است. به همین دلیل می‌توان گفت که این الگوریتم نسبت به الگوریتم اول NPV بالاتری را تولید می‌کند. از طرف دیگر چون این

الگوریتم به صورت بلوک به بلوک جستجوی خود را انجام می‌دهد، قابلیت اعمال محدودیت‌های عیاری در دوره‌های مشخص را نیز دارد.

۴-۵- الگوریتم سوم

همان‌گونه که قبلاً گفته شد، برای رسیدن به NPV بیشتر باید بلوک‌های دارای ارزش بیشتر در زمان زودتری استخراج شوند. در الگوریتم اول از مفهوم وزن مکانی و در الگوریتم دوم از ترکیب وزن مکانی و شاخص نزدیک‌ترین بلوک ماده معدنی برای دستیابی به این هدف استفاده شد. پس به طور کلی اگر هدف دسترسی سریع‌تر به بلوک‌های ماده معدنی تعریف شود، می‌توان به گونه‌ای دیگر شاخصه‌هایی برای توسعه یک الگوریتم ابتکاری را ارائه کرد.

در فصل سوم عنوان شد که برای هر بلوک می‌توان دو شاخص زودترین و دیرترین زمان ممکن را تعریف کرد. در این بخش با استفاده از مفهوم زودترین زمان ممکن برای استخراج یک بلوک، یک الگوریتم ابتکاری جدید ارائه می‌شود. در این راستا مسئله به صورت ساده‌سازی شده این‌گونه بیان می‌شود که بهتر آن است که بلوک‌های مثبتی که دارای زودترین زمان ممکن کم‌تری نسبت به بقیه هستند زودتر استخراج شوند. در این صورت با کم‌ترین باطله‌برداری در زمان کم‌تری ماده معدنی و قسمت‌های با ارزش‌تر کانسار در دسترس قرار می‌گیرند. در این راستا قبل از توضیح الگوریتم، مفهوم "زودترین زمان استخراج به‌روز شده" تعریف می‌شود.

در الگوریتم‌های اول و دوم پس از مشخص شدن ترتیب استخراج هر بلوک برای تکرار مراحل بعدی و تعیین ترتیب بلوک‌های بعدی، بلوک‌های تعیین تکلیف شده از مدل بلوکی حذف شده و اصطلاحاً توپوگرافی به‌روز می‌شود. در این حالت راه دست‌سری بلوک‌هایی که هنوز ترتیب استخراج آن‌ها مشخص

نشده است به سطح توپوگرافی نزدیک تر شده و زودترین زمان ممکن برای استخراج آن‌ها کاهش می‌یابد. این موضوع در شکل ۴-۲۰ نشان داده شده است.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	w							w	w	w
2		o	o				o	w	w	
3			w	w	o	w		o		
4				o	o					
5										

ب- مدل بلوکی بعد از تعیین ترتیب ۱۰ بلوک

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	w	w	w	w	w	w	w	w	w	w
2		o	o	o	w	w	o	w	w	
3			w	w	o	w		o		
4				o	o					
5										

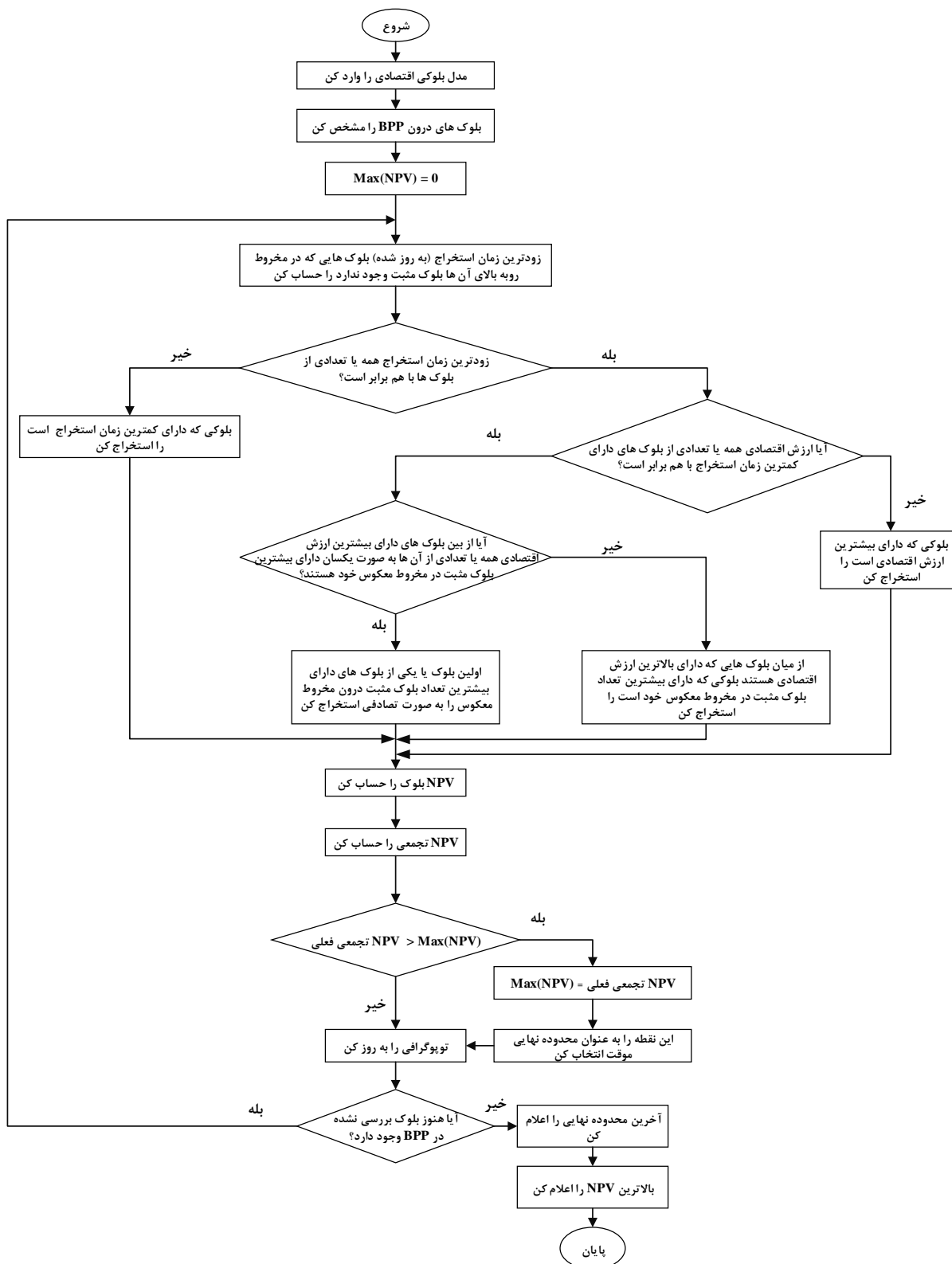
الف- مدل بلوکی قبل از تعیین ترتیب بلوک‌ها

شکل ۴-۲۰- حذف بلوک‌های تعیین تکلیف شده از مدل بلوکی

همان‌گونه که در شکل ۴-۲۰-الف مشخص است زودترین زمان ممکن برای استخراج بلوک (۳,۵) طبق روابط مربوطه در فصل سوم برابر ۹ است. پس از تعیین تکلیف ۹ بلوک از این مدل طبق شکل ۴-۲۰-ب زودترین زمان استخراج به‌روز شده این بلوک به ۱ کاهش می‌یابد. این شاخص در بخش‌های تکرار شونده یک الگوریتم ابتکاری به خوبی می‌تواند مسیر استخراج را با کم‌ترین تعداد بلوک باطله و نزدیک‌ترین مسیر به بلوک‌های مثبت برساند. پس از توضیح این مفهوم در ادامه الگوریتم ابتکاری دیگری برای تعیین محدوده نهایی به منظور بیشینه‌سازی NPV ارائه می‌شود. مراحل این الگوریتم ابتکاری در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است. تعداد مراحل این الگوریتم با الگوریتم‌های قبلی متفاوت است. در این الگوریتم تنها بلوک‌های مثبت با هم مقایسه می‌شوند. در این الگوریتم ابتدا زودترین زمان استخراج هر بلوک مثبت محاسبه می‌شود. از آنجایی که زودترین زمان استخراج بلوک‌های مثبتی که در مخروط رو به بالای خود هیچ بلوک مثبتی ندارند از بلوک‌های مثبت زیرین خود کم‌تر است، مقایسه مطلوبیت، تنها بین این بلوک‌ها در هر مرحله صورت می‌پذیرد. در مرحله اول مقایسه ابتدا اولویت با بلوک مثبتی است که دارای کم‌ترین مقدار زودترین زمان استخراج (به روز شده) باشد. سپس در صورتی که زودترین زمان استخراج همه یا تعدادی از این بلوک‌های مثبت با هم برابر بود، پس از مقایسه ارزش اقتصادی آن‌ها بلوکی که دارای

بیشترین ارزش باشد به عنوان بلوک مطلوب استخراج می‌شود. اگر از این میان دوباره بلوک‌هایی وجود داشته باشند که دارای زودترین زمان استخراج و ارزش اقتصادی یکسانی هستند، بلوکی که دارای بیشترین تعداد بلوک مثبت در مخروط خود است به عنوان بلوک مناسب انتخاب می‌شود. در صورتی که پس از این مراحل هنوز بلوک‌هایی وجود داشته باشند که از نظر سه شاخص قبلی دارای مطلوبیت یکسانی هستند، اولین بلوک یا به تصادف یکی از این بلوک‌ها به عنوان بلوک قابل استخراج انتخاب می‌شود. توضیحات تفصیلی این الگوریتم در قالب یک مثال در ادامه ارائه خواهد شد.

همان‌گونه که گفته شد، در این الگوریتم به جای وزن مکانی از شاخص تعداد بلوک‌های مثبت درون مخروط معکوس استفاده می‌شود. نحوه محاسبه این شاخص مشابه وزن مکانی است. با این تفاوت که این بار تعداد بلوک ماده معدنی درون مخروط معکوس محاسبه می‌شود. محاسبه این شاخص برای بلوک‌های شکل ۴-۵ در شکل ۴-۲۲ نشان داده شده است. در این الگوریتم این شاخص تنها برای بلوک‌های مثبت محاسبه می‌شود.



شکل ۴-۲۱- الگوریتم ابتکاری سوم

	1	2	3	4	5	6
1			4			
2		1	2		1	
3			0	0		

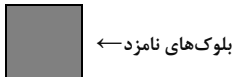
شکل ۴-۲۲- تعداد بلوک‌های مثبت درون مخروط معکوس بلوک‌های مثبت مدل شکل ۴-۵

در این الگوریتم بلوک‌های نامزد برای استخراج از بین بلوک‌های مثبت انتخاب می‌شوند. به این صورت که بلوک‌های مثبتی که درون مخروط رو به بالای خود هیچ بلوک مثبتی ندارند به عنوان نامزد انتخاب می‌شوند. به عنوان مثال در مرحله اول برای مدل شکل ۴-۵ بلوک‌های (۱,۳) و (۲,۵) می‌توانند نامزد باشند. در این مرحله با مقایسه شاخص زودترین زمان استخراج این دو بلوک، بلوک (۱,۳) به عنوان بلوک اول انتخاب می‌شود. قبل از شروع الگوریتم پارامتر $\text{Max}(\text{NPV})$ با مقدار اولیه صفر ذخیره می‌شود و هرگاه NPV تجمعی از این مقدار یا مقادیر بعدی آن بیشتر شد، جایگزین آن خواهد شد. مقدار NPV تجمعی و $\text{Max}(\text{NPV})$ در این مرحله با نرخ بهره ۳ درصد به ازای یک بلوک، همگی برابر با ۲/۹۱ واحد پولی است که به عنوان محدوده موقت تعیین می‌شود.

پس از به‌روزرسانی سطح توپوگرافی مدل به صورت شکل ۴-۲۳ در خواهد آمد. پس از این کار، بلوک‌های (۲,۲)، (۲,۳) و (۲,۵) به عنوان نامزد انتخاب می‌شوند. از بین بلوک‌های نامزد در هر مرحله ابتدا مقدار زودترین زمان استخراج آن‌ها با هم مقایسه می‌شود و اولویت با بلوک مثبتی است که کم‌ترین زمان استخراج را دارد. در این مرحله زودترین زمان ممکن استخراج این بلوک‌ها به صورت به‌روز شده به ترتیب ۳، ۳ و ۴ است. از این مجموعه بلوک‌های (۲,۲) و (۲,۳) به عنوان دارندگان کم‌ترین زمان استخراج در این شاخص با هم برابرند. پس باید طبق روال الگوریتم ارزش آن‌ها با هم مقایسه شود که بر این اساس بلوک (۲,۳) و بلوک‌های درون مخروط روبه بالای آن به عنوان بلوک‌های مرحله دوم استخراج می‌شوند.

پس ترتیب بلوک‌ها تا این مرحله به صورت شکل ۴-۲۴ است. مقدار NPV تجمعی و Max(NPV) در این مرحله هر دو برابر با ۶/۳۹ می‌باشند. با توجه به تغییر مقدار Max(NPV)، بلوک‌ها تا این مرحله به عنوان محدوده موقت دوم تعیین می‌شوند.

	1	2	3	4	5	6
1	-1	-1		-1	-1	-1
2	-1	5	6	-1	1	-1
3	-1	-1	1	3	-1	-1



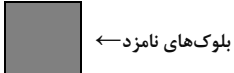
شکل ۴-۲۳- سطح توپوگرافی به روزرسانی شده پس از مرحله اول و بلوک‌های نامزد

	1	2	3	4	5	6
1		2	1	3		
2			4			
3						

شکل ۴-۲۴- ترتیب بلوک‌ها پس از مرحله دوم

در مرحله سوم بلوک‌هایی که تا این مرحله انتخاب شده‌اند از مدل حذف شده و توپوگرافی مجدداً به روز شده و زودترین زمان استخراج برای بلوک‌های نامزد محاسبه می‌شود. بلوک‌های نامزد در مرحله سوم در شکل ۴-۲۵ نشان داده شده است.

	1	2	3	4	5	6
1	-1				-1	-1
2	-1	5		-1	1	-1
3	-1	-1	1	3	-1	-1



شکل ۴-۲۵- برورسانی سطح توپوگرافی پس از مرحله دوم و بلوک‌های نامزد

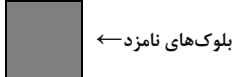
در مرحله سوم بلوک‌های (۲,۲) و (۲,۵) به عنوان نامزد انتخاب می‌شوند. ابتدا زودترین زمان‌های آن‌ها که به ترتیب ۲ و ۳ می‌باشند با هم مقایسه می‌شوند. چون بلوک (۲,۲) زودترین زمان استخراج کم‌تری دارد به عنوان بلوک این مرحله به همراه بلوک‌های باقی‌مانده از مخروط رو به بالایش انتخاب می‌شود. پس ترتیب بلوک‌ها در این مرحله به صورت شکل ۴-۲۶ می‌باشند. مقادیر NPV تجمعی و $\text{Max}(\text{NPV})$ در این مرحله هر دو برابر با ۹/۷۱۰۶ می‌باشند. با توجه به تغییر مقدار $\text{Max}(\text{NPV})$ بلوک‌ها تا این مرحله به عنوان محدوده موقت سوم تعیین می‌شوند.

	1	2	3	4	5	6
1	5	2	1	3		
2		6	4			
3						

شکل ۴-۲۶- ترتیب بلوک‌ها پس از مرحله سوم

پس از مرحله سوم و به روزرسانی سطح توپوگرافی مدل به صورت شکل ۴-۲۷ خواهد بود.

	1	2	3	4	5	6
1					-1	-1
2	-1			-1	1	-1
3	-1	-1	1	3	-1	-1



شکل ۴-۲۷- برورسانی سطح توپوگرافی پس از مرحله سوم و بلوک‌های نامزد

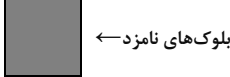
در مرحله چهارم بلوک‌های (۲,۵) و (۳,۳) با مقادیر برابر زودترین زمان استخراج ۳ به عنوان نامزد انتخاب می‌شوند. از آن جایی که مقدار ارزش اقتصادی آن‌ها نیز با هم برابر است پس تعداد بلوک‌های مثبت درون مخروط آن‌ها که در شکل ۴-۲۲ محاسبه شده بود، با هم مقایسه می‌شوند. بر این اساس بلوک (۲,۵) که دارای ۱ بلوک مثبت در مخروط معکوس خود است انتخاب می‌شود. در این مرحله مقدار NPV تجمعی ۸/۸۷۴۵ است. با توجه به این که $Max(NPV)$ به دست آمده از مرحله قبل از مقدار NPV تجمعی این مرحله بیشتر است تغییری در مقدار آن و محدوده موقت ایجاد نمی‌شود. پس ترتیب به دست آمده تا این مرحله به صورت شکل ۴-۲۸ است.

برای مرحله بعد ابتدا بلوک‌های این مرحله از مدل حذف می‌شوند و سطح توپوگرافی مطابق شکل ۴-۲۹ به روزرسانی می‌شود.

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

شکل ۴-۲۸- ترتیب بلوک‌ها پس از مرحله چهارم

	1	2	3	4	5	6
1						
2	-1			-1		-1
3	-1	-1	1	3	-1	-1



شکل ۴-۲۹- برورسانی سطح توپوگرافی پس از مرحله چهارم و بلوک‌های نامزد

در مرحله پنجم بلوک‌های (۳,۳) و (۳,۴) نامزد انتخاب می‌شوند. با توجه به این که زودترین زمان استخراج به روز شده آن‌ها با هم برابر است از بین آن‌ها بلوک (۳,۴) که دارای ارزش بیشتری است، به عنوان بلوک این مرحله انتخاب می‌شود. پس از این انتخاب NPV تجمعی این مرحله محاسبه می‌شود. NPV تجمعی در این مرحله نسبت به مرحله قبل افزایش یافته و به $10/3$ می‌رسد و به دنبال آن محدوده موقت تا این بلوک توسعه می‌یابد. پس طبق قرارداد الگوریتم مقدار $\text{Max}(\text{NPV})$ با این مقدار برورسانی می‌شود.

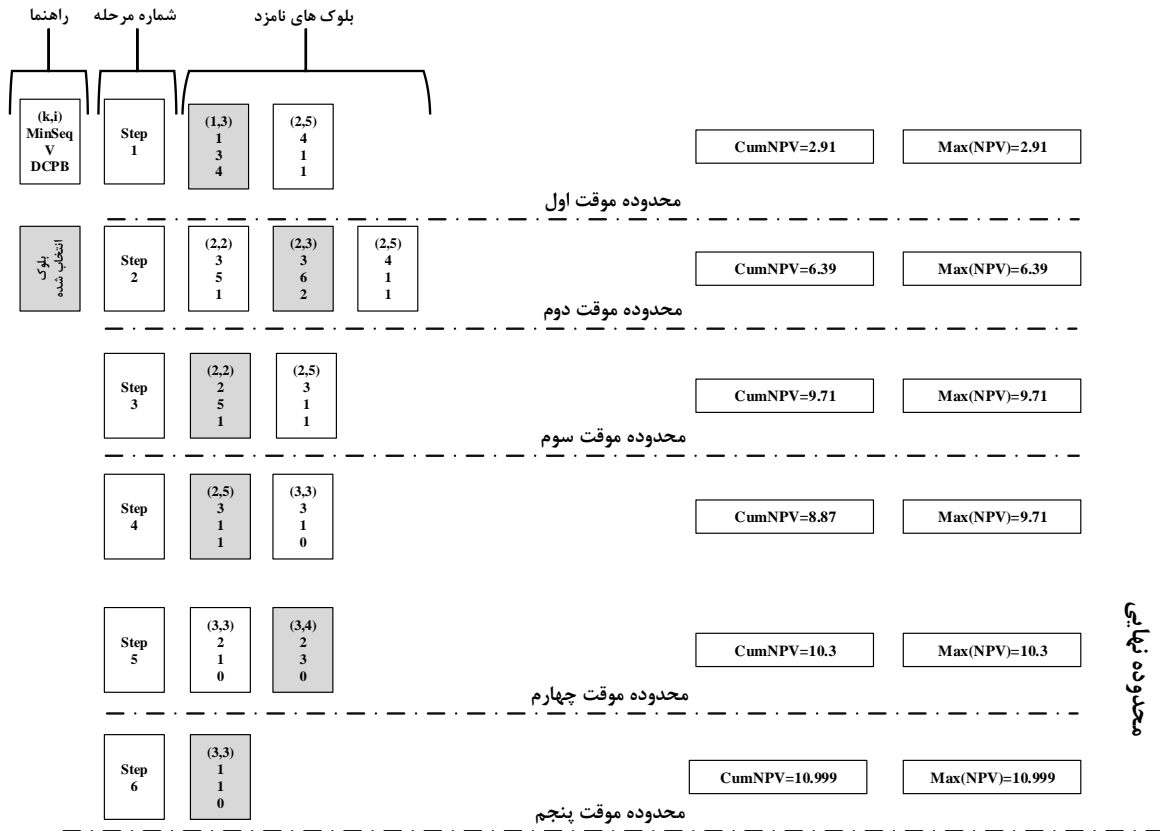
در مرحله آخر یعنی ششم نیز تنها بلوک باقی‌مانده به عنوان بلوک ۱۲ انتخاب شده و ترتیب کل بلوک‌ها به صورت شکل ۴-۳۰ در خواهد آمد. در این مثال نتیجه استفاده از الگوریتم سوم کاملاً بر نتیجه بهینه ریاضی منطبق است.

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

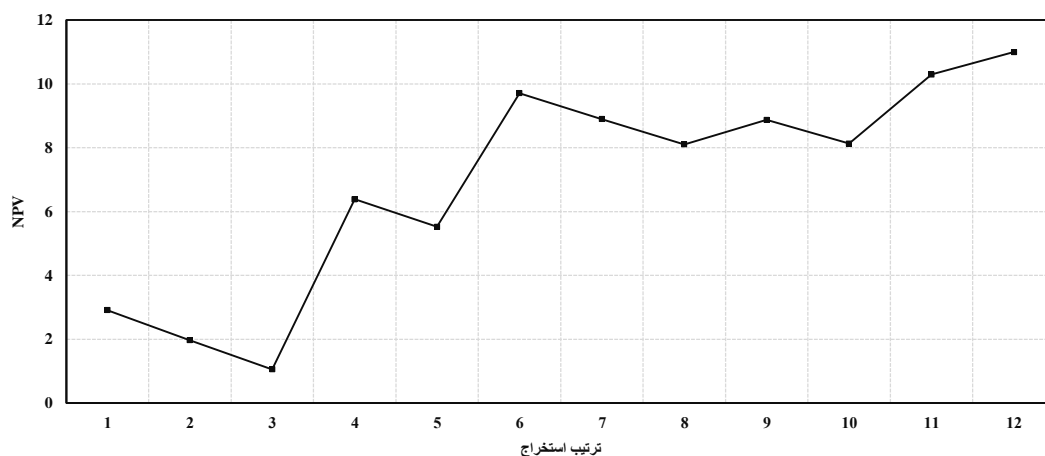
←BPP

شکل ۴-۳۰- ترتیب بلوک‌ها پس از اتمام مراحل الگوریتم

پس از انجام کلیه این مراحل محدوده نهایی با مقدار NPV ۱۰/۹۹۹ و ۱۲ بلوک تعیین می‌شود. محاسبات مربوط به این مراحل در شکل ۴-۳۱ و نمودار NPV تجمعی آن در شکل ۴-۳۲ نشان داده شده‌اند. محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم برای این مدل نیز به صورت شکل ۴-۳۳ است.




شکل ۴-۳۱- محاسبات مربوط به مراحل انجام الگوریتم برای مدل بلوکی فرضی ۵-۵



شکل ۴-۳۲- نمودار NPV تجمعی بر اساس ترتیب به دست آمده از الگوریتم سوم

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

 ← محدوده نهایی

شکل ۴-۳۳- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم سوم

مهم‌ترین ویژگی این الگوریتم دسترسی سریع‌تر به ماده معدنی و لحاظ کردن تعداد بلوک‌های مثبتی است که با برداشتن یک بلوک مسیر استخراج به سمت برداشت آن‌ها هدایت می‌شود. بر اساس این دو ویژگی می‌توان گفت که این الگوریتم توانایی پیشنهاد ترتیب مناسبی از بلوک‌ها و دستیابی به NPV بالایی را دارد.

۴-۶- مدل بلوکی دو بعدی

در این بخش با استفاده از یک مثال عددی نتایج الگوریتم‌های سه‌گانه ارائه شده با هم و نیز با روش LG و روش لاتوری-گولوسینسکی مقایسه می‌شوند. به این منظور از مدل بلوکی شکل ۴-۳۴ استفاده می‌شود.

برنامه‌نویسی این الگوریتم‌ها برای حل مدل‌های بلوکی دو و سه بعدی در محیط برنامه‌نویسی MATLAB انجام شده است.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	2	1	2	1	2	5	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
4	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	1	1	1	2	2	3	8	10	-2	-2	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
5	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	1	1	1	3	2	10	15	10	3	1	1	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
6	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	-1	2	7	5	10	15	20	5	2	1	-1	-1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
7	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	4	-1	7	15	20	15	10	2	2	-2	-2	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3
8	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	10	8	25	15	20	6	4	1	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
9	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	0	2	8	15	30	20	-3	8	5	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

←BPP

شکل ۴-۳۴- مدل بلوکی دو بعدی (Latorre and Golosinski, 2011)

۴-۶-۱- استفاده از الگوریتم اول

برای استفاده از الگوریتم برای تعیین محدوده نهایی مدل بلوکی شکل ۴-۳۴ ابتدا وزن مکانی بلوک‌های BPP تعیین می‌شود. این مقادیر در شکل ۴-۳۵ نشان داده شده است.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	4	19	58	99	159	196	258	302	349	377	397	412	421	421	417	399	385	342	271	166	98	35	25	11	5	3
2		4	19	58	99	159	196	258	302	349	377	393	405	408	394	385	342	271	166	98	35	25	11	5	3	
3			4	19	58	99	159	196	258	302	346	369	380	376	375	335	266	166	98	35	25	11	5	3		
4				4	19	58	99	159	195	254	295	334	343	348	314	254	166	98	35	25	11	5	3			
5					4	19	58	98	156	190	243	272	299	279	238	160	95	34	25	11	5	3				
6						4	18	57	94	143	168	213	220	204	148	91	32	24	11	5	3					
7							4	14	49	86	128	131	143	114	74	26	21	10	4	2						
8								2	10	35	63	75	60	38	13	14	7	2	1							
9									0	0	10	10	10		0	0	0	0								
10												0														

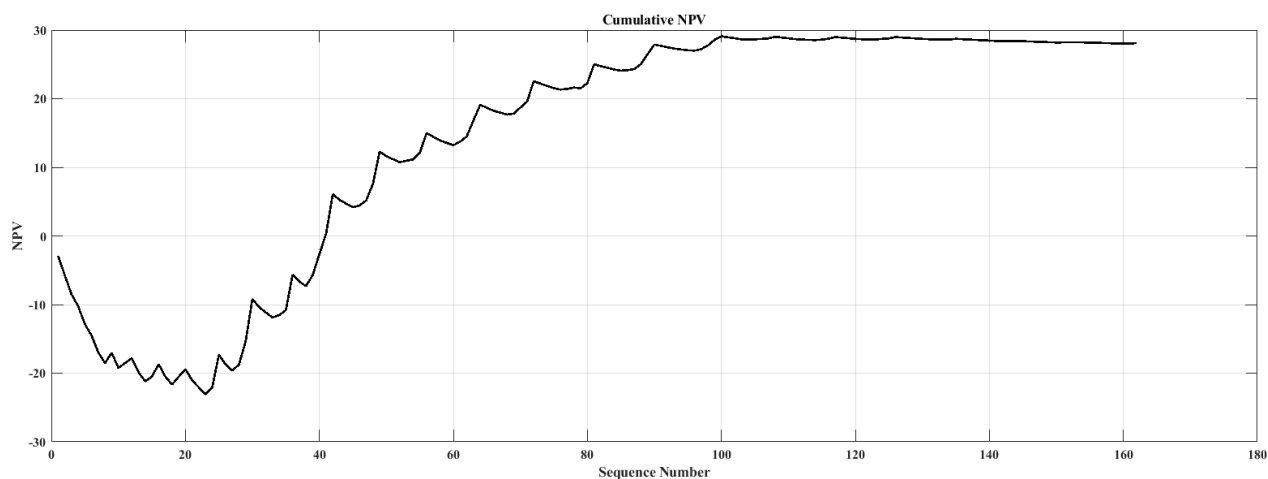
شکل ۴-۳۵- وزن مکانی (PW) بلوک‌های درون BPP

پس از انجام مراحل الگوریتم اول برای مدل بلوکی مذکور ترتیب استخراج این بلوک‌ها به صورت شکل ۴-۳۶ خواهد بود.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	145	118	91	73	65	50	43	31	21	17	10	5	1	2	3	7	13	26	37	57	82	101	109	127	136	154
2		146	119	92	74	66	51	44	32	22	18	11	6	4	8	14	27	38	58	83	102	110	128	137	155	
3			147	120	93	75	67	52	45	33	23	19	12	9	15	28	39	59	84	103	111	129	138	156		
4				148	121	94	76	68	53	46	34	24	20	16	29	40	60	85	104	112	130	139	157			
5					149	122	95	77	69	54	47	35	25	30	41	61	86	105	113	131	140	158				
6						150	123	96	78	70	55	48	36	42	62	87	106	114	132	141	159					
7							151	124	97	79	71	56	49	63	88	107	115	133	142	160						
8								152	125	98	80	72	64	89	108	116	134	143	161							
9									153	126	99	81	90	0	117	135	144	162								
10												100														

شکل ۴-۳۶- ترتیب استخراج بلوک‌ها بر اساس الگوریتم اول

بر اساس ترتیب به دست آمده از این الگوریتم نمودار NPV تجمعی بلوک‌ها با نرخ بهره ۳ درصد به ازای هر بلوک به صورت شکل ۴-۳۷ به دست می‌آید.



شکل ۴-۳۷- نمودار NPV تجمعی به دست آمده از الگوریتم اول

بر اساس این نتایج بالاترین NPV در ترتیب ۱۰۰ با مقدار ۲۹/۱۰۵۲ واحد پولی است و محدوده نهایی مطابق شکل ۴-۳۸ خواهد بود. با نرخ بهره صفر نیز محدوده نهایی مطابق شکل ۴-۳۹ به دست می‌آید.

نتیجه حل تابع هدف و روش لاتوری و گولوسینسکی محدوده‌ای مطابق با این محدوده اما با مقدار NPV بیشتر برای این مدل بلوکی است. مقدار NPV بهینه این مدل بلوکی با نرخ بهره مذکور ۳۵ واحد پولی است که ترتیب بهینه بر اساس حل تابع هدف در شکل ۴-۴۰ نشان داده شده است.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	2	1	2	1	2	5	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
4	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	1	1	1	2	2	3	8	10	-2	-2	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
5	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	1	1	1	3	2	10	15	10	3	1	1	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
6	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	-1	2	7	5	10	15	20	5	2	1	-1	-1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
7	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	4	-1	7	15	20	15	10	2	2	-2	-2	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3
8	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	10	8	25	15	20	6	4	1	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
9	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	0	2	8	15	30	20	-3	8	5	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

←BPP

→ محدوده نهایی

شکل ۴-۳۸- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم اول با نرخ بهره ۳ درصد

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	2	1	2	1	2	5	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
4	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	1	1	1	2	2	3	8	10	-2	-2	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
5	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	1	1	1	3	2	10	15	10	3	1	1	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
6	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	-1	2	7	5	10	15	20	5	2	1	-1	-1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
7	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	4	-1	7	15	20	15	10	2	2	-2	-2	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3
8	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	10	8	25	15	20	6	4	1	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
9	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	0	2	8	15	30	20	-3	8	5	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

←BPP

→ محدوده نهایی

شکل ۴-۳۹- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم اول با نرخ بهره صفر

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
1		101	91	82	57	50	43	37	31	21	2	1	3	5	7	10	13	17	26	65	73	110	118				
2			102	92	83	58	51	44	38	32	22	4	6	8	11	14	18	27	66	74	111	119					
3				103	93	84	59	52	45	39	33	23	9	12	15	19	28	67	75	112	120						
4					104	94	85	60	53	46	40	34	24	16	20	29	68	76	113	121							
5						105	95	86	61	54	47	41	35	25	30	69	77	114	122								
6							106	96	87	62	55	48	42	36	70	78	115	123									
7								107	97	88	63	56	49	71	79	116	124										
8									108	98	89	64	72	80	117	125											
9										109	99	90	81		126												
10												100															

← محدوده NPV بانرخ بهره ۳ درصد → محدوده با نرخ بهره صفر ←

شکل ۴-۴- ترتیب بهینه ریاضی محدوده بیشینه NPV براساس نتایج تابع هدف

با استفاده از رابطه (۲-۴) می‌توان میزان مطابقت مقدار به دست آمده از طریق الگوریتم ابتکاری و مقدار بهینه واقعی را سنجید.

$$A = \frac{NPV_{estimated}}{NPV_{optimal}} \times 100 \quad (2-4)$$

که در این رابطه:

A میزان انطباق نتایج با نتیجه بهینه به درصد

$NPV_{estimated}$ مقدار تخمین تابع هدف از راه الگوریتم ابتکاری

$NPV_{optimal}$ مقدار بهینه واقعی تابع هدف با استفاده از الگوریتم ریاضی (نرم‌افزار Lingo)

(17)

مقدار A برای نتایج بالا ۸۳/۱۵ درصد و میزان انطباق فیزیکی محدوده بر محدوده بهینه نیز ۱۰۰ درصد است. محدوده نهایی این مدل بلوکی با استفاده از الگوریتم LG نیز به صورت شکل ۴-۴۱ و به ارزش ۲۵۳ واحد است. با مقایسه نتیجه الگوریتم اول با نرخ بهره صفر مشخص می‌شود که این محدوده مطابقت ۱۰۰ درصدی با محدوده LG دارد.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	2	1	2	1	2	5	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
4	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	1	1	1	2	2	3	8	10	-2	-2	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
5	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	1	1	1	3	2	10	15	10	3	1	1	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
6	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	-1	2	7	5	10	15	20	5	2	1	-1	-1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
7	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	4	-1	7	15	20	15	10	2	2	-2	-2	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3
8	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	10	8	25	15	20	6	4	1	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
9	-3	-3	-3	-3	-3	-3	0	2	8	15	30	20	-3	8	5	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

←BPP

→ محدوده نهایی

شکل ۴-۴۱- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم LG

۴-۶-۲- استفاده از الگوریتم دوم

در این بخش برای مدل بلوکی شکل ۴-۳۴ با استفاده از الگوریتم دوم ترتیب استخراج و محدوده نهایی

تعیین می‌شود. به این منظور علاوه بر وزن مکانی مقادیر NOI بلوک‌ها نیز باید محاسبه شود. مقادیر NOI

این مدل بلوکی در شکل ۴-۴۲ نشان داده شده است.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	6	5	5	4	4	3	3	3	3	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	4	4	4	6	6	6	6
2		5	4	4	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5	5	5	5	
3			4	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	4	4	4	4		
4				3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3			
5					2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2				
6						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1					
7							1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
8								1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
9									0	0	1	1	1		0	0	0	0								
10												0														

شکل ۴-۴۲- مقادیر NOI برای بلوک‌های درون BPP

پس از انجام مراحل الگوریتم دوم ترتیب بهینه بلوک‌های مدل مذکور به صورت شکل ۴-۴۳ خواهند بود.

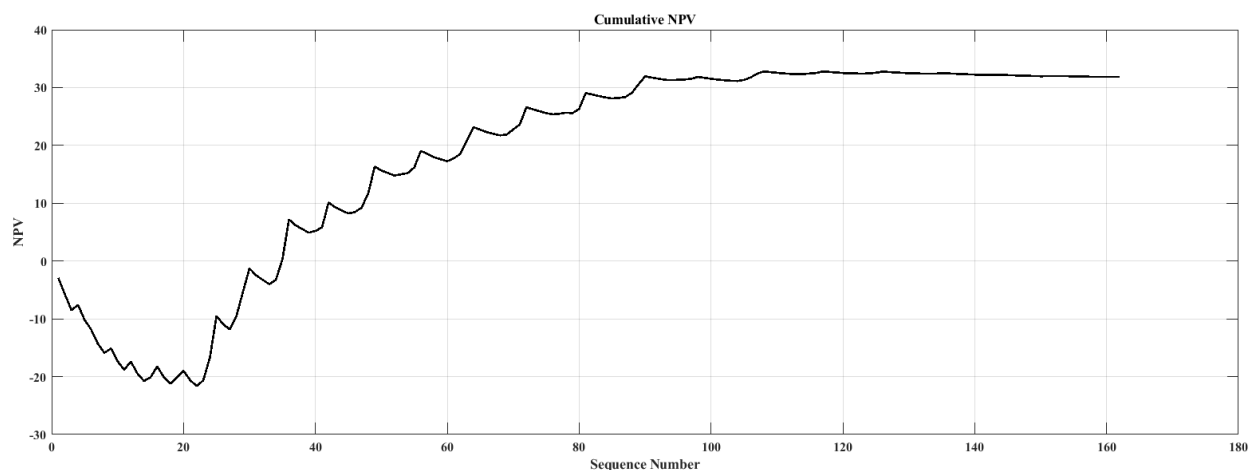
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25

26

1	145	109	99	73	65	50	43	37	31	21	3	2	1	5	7	10	13	17	26	57	82	91	118	127	136	154
2		146	110	100	74	66	51	44	38	32	22	4	6	8	11	14	18	27	58	83	92	119	128	137	155	
3			147	111	101	75	67	52	45	39	33	23	9	12	15	19	28	59	84	93	120	129	138	156		
4				148	112	102	76	68	53	46	40	34	24	16	20	29	60	85	94	121	130	139	157			
5					149	113	103	77	69	54	47	41	35	25	30	61	86	95	122	131	140	158				
6						150	114	104	78	70	55	48	42	36	62	87	96	123	132	141	159					
7							151	115	105	79	71	56	49	63	88	97	124	133	142	160						
8								152	116	106	80	72	64	89	98	125	134	143	161							
9									153	117	107	81	90		126	135	144	162								
10												108														

شکل ۴-۴۳- ترتیب به دست آمده از طریق الگوریتم دوم

با محاسبه NPV بلوک‌ها بر اساس ترتیب آن‌ها و نیز محاسبه NPV تجمعی آنها نمودار این مقادیر به صورت شکل ۴-۴۴ خواهد بود.



شکل ۴-۴۴- نمودار NPV تجمعی به دست آمده از طریق الگوریتم دوم

در این الگوریتم بیشینه NPV به دست آمده برابر با $32/7981$ واحد پولی در ترتیب ۱۰۸ است که محدوده نهایی آن در شکل ۴-۴۵ نشان داده شده است. میزان تطابق مقدار به دست آمده با مقدار بهینه واقعی نیز $93/7$ درصد است که از الگوریتم اول بالاتر است. در این الگوریتم ۸ بلوک به محدوده نهایی ریاضی اضافه شده است که مجموع ارزش تنزیل نشده این ۸ بلوک صفر است. نتیجه این الگوریتم با نرخ بهره صفر که در شکل ۴-۴۶ نشان داده شده است، مطابق با نتیجه الگوریتم LG است.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	2	1	2	1	2	5	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
4	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	1	1	1	2	2	3	8	10	-2	-2	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
5	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	1	1	1	3	2	10	15	10	3	1	1	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
6	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	-1	2	7	5	10	15	20	5	2	1	-1	-1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
7	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	4	-1	7	15	20	15	10	2	2	-2	-2	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3
8	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	10	8	25	15	20	6	4	1	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
9	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	0	2	8	15	30	20	-3	8	5	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

←BPP → محدوده نهایی

شکل ۴-۴۵- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم دوم با نرخ بهره ۳ درصد

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	2	1	2	1	2	5	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
4	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	1	1	1	2	2	3	8	10	-2	-2	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
5	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	1	1	1	3	2	10	15	10	3	1	1	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
6	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	-1	2	7	5	10	15	20	5	2	1	-1	-1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
7	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	4	-1	7	15	20	15	10	2	2	-2	-2	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3
8	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	10	8	25	15	20	6	4	1	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
9	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	0	2	8	15	30	20	-3	8	5	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

←BPP → محدوده نهایی

شکل ۴-۴۶- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم دوم با نرخ بهره صفر

۴-۶-۳- استفاده از الگوریتم سوم

همان گونه که در معرفی این الگوریتم گفته شد، برای این الگوریتم علاوه بر زودترین زمان استخراج به روز

شده باید تعداد بلوک های مثبت درون مخروط معکوس هر بلوک نیز محاسبه شود. مقادیر تعداد بلوک های

مثبت درون مخروط معکوس بلوک های مثبت در شکل ۴-۴۷ نشان داده شده است.

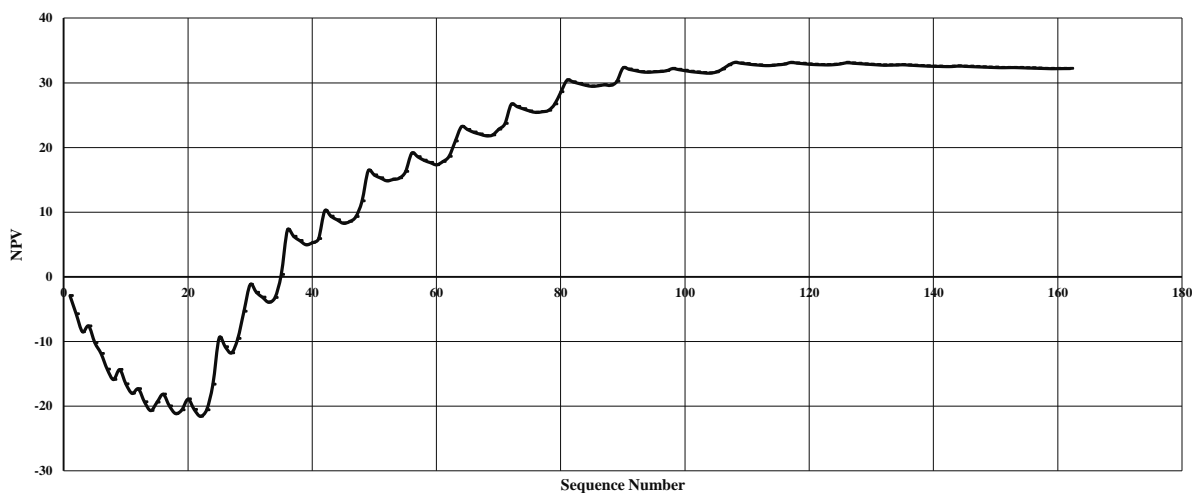
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1																										
2												53														
3												43	44	43	41	37	31									
4								24	27	30	32	33	34	32	28											
5							14	17	19	21	22	24	24	23	21	17	13									
6						6		11	13	13	15	15	15	15	14	11										
7						3	4	7		9	8	8	8	8	7	7				2						
8							1	2	4	4	4	3	3	2	3	3	2	1								
9								0	0	1	1	1		0	0	0	0									
10												0														

شکل ۴-۴۷- تعداد بلوک‌های مثبت درون مخروط معکوس هر بلوک مثبت

پس از حل مدل با الگوریتم سوم، ترتیب به دست آمده برای استخراج بلوک‌ها و نمودار NPV تجمعی آن به ترتیب به صورت شکل‌های ۴-۴۸ و ۴-۴۹ خواهد بود.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	127	109	99	82	65	50	43	37	31	5	1	2	3	7	10	13	17	21	26	57	73	91	118	136	145	154
2		128	110	100	83	66	51	44	38	32	6	4	8	11	14	18	22	27	58	74	92	119	137	146	155	
3			129	111	101	84	67	52	45	39	33	9	12	15	19	23	28	59	75	93	120	138	147	156		
4				130	112	102	85	68	53	46	40	34	16	20	24	29	60	76	94	121	139	148	157			
5					131	113	103	86	69	54	47	41	35	25	30	61	77	95	122	140	149	158				
6						132	114	104	87	70	55	48	42	36	62	78	96	123	141	150	159					
7							133	115	105	88	71	56	49	63	79	97	124	142	151	160						
8								134	116	106	89	72	64	80	98	125	143	152	161							
9									135	117	107	90	81		126	144	153	162								
10												108														

شکل ۴-۴۸- ترتیب بلوک‌ها به دست آمده از الگوریتم سوم



شکل ۴-۴۹- نمودار NPV تجمعی بر اساس الگوریتم سوم با نرخ بهره ۳ درصد

در این الگوریتم در ترتیب ۱۰۸ بالاترین NPV تجمعی برابر با ۳۳/۱۶۴۲ واحد پولی مطابق شکل ۴-۵۰ است. یکی از نکات جالب توجه این است که در ترتیب ۱۱۷ نیز مقدار NPV تجمعی ۳۳/۱۵۵۵ واحد پولی به دست آمده است که به مقدار بیشینه نزدیک است. میزان تطابق مقدار به دست آمده از راه الگوریتم به مقدار بهینه واقعی نیز ۹۴/۷۵ درصد است که از دو الگوریتم قبلی بالاتر است. با نرخ بهره صفر نیز این الگوریتم مانند دو الگوریتم قبلی محدوده‌ای منطبق با روش LG که در شکل ۴-۵۱ نشان داده شده است، به دست می‌آورد.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	2	1	2	1	2	5	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
4	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	1	1	1	2	2	3	8	10	-2	-2	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
5	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	1	1	1	3	2	10	15	10	3	1	1	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
6	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	-1	2	7	5	10	15	20	5	2	1	-1	-1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
7	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	4	-1	7	15	20	15	10	2	2	-2	-2	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3
8	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	10	8	25	15	20	6	4	1	1	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
9	-3	-3	-3	-3	-3	-3	0	2	8	15	30	20	-3	8	5	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

←BPP → محدوده نهایی

شکل ۴-۵۰- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم سوم با نرخ بهره ۳ درصد

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	2	1	2	1	2	5	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
4	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	1	1	1	2	2	3	8	10	-2	-2	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
5	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	1	1	1	3	2	10	15	10	3	1	1	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
6	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	-1	2	7	5	10	15	20	5	2	1	-1	-1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
7	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	4	-1	7	15	20	15	10	2	2	-2	-2	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3
8	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	3	10	8	25	15	20	6	4	1	1	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
9	-3	-3	-3	-3	-3	-3	0	2	8	15	30	20	-3	8	5	1	1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

←BPP → محدوده نهایی

شکل ۴-۵۱- محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم سوم با نرخ بهره صفر

۴-۶-۴- مقایسه سه الگوریتم در این مدل

مقایسه نتایج این سه الگوریتم برای مدل بلوکی دو بعدی مشترک استفاده شده در این بخش بر اساس رتبه بندی در جدول ۴-۱ ارائه شده است. در این جدول عدد ۱ بالاترین رتبه و عدد ۳ پایین ترین رتبه در هر موضوع را نشان می دهد. مقایسه بر اساس میزان انطباق NPV الگوریتم بر NPV بهینه (مقدار A)، میزان انطباق با محدوده بهینه واقعی، میزان انطباق محدوده با نرخ بهره صفر بر محدوده LG و قابلیت اعمال محدودیت های عیاری انجام شده است.

جدول ۴-۱- مقایسه نتایج الگوریتم‌های سه‌گانه و رتبه‌بندی آن‌ها بر اساس نتایج به دست آمده

الگوریتم	تطابق NPV با مقدار بهینه	انطباق با محدوده بهینه	انطباق با محدوده LG	قابلیت اعمال محدودیت‌های عیاری
اول	۳	۱	۱	۱
دوم	۲	۲	۱	۱
سوم	۱	۲	۱	۲

در مجموع برای این سه الگوریتم باید گفت که هر کدام در برخی ویژگی‌های مقایسه شده دارای برتری می‌باشند. به عنوان مثال الگوریتم‌های دوم و سوم با وجود این که تطابق ۱۰۰ درصدی با محدوده بهینه نداشته‌اند اما ترتیبی را برای بلوک‌ها پیشنهاد داده‌اند که ارزش اقتصادی عملیات معدن‌کاری را نسبت به الگوریتم اول بالاتر محاسبه می‌کند. به طور کلی برای الگوریتم‌های ابتکاری نمی‌توان با قطعیت مقایسه انجام داد، چرا که در موارد مختلف ممکن است نتایج متفاوتی را ارائه دهند. با توجه به این که حل مدل‌های پیچیده و حجیم بهینه‌سازی از طریق راه حل‌های ریاضی بسیار مشکل است، طراحان به ناچار باید از الگوریتم‌های ابتکاری یا فراابتکاری استفاده کنند.

۴-۷- پیاده‌سازی الگوریتم‌ها در مدل سه بعدی

در این بخش از الگوریتم‌های سه‌گانه برای تعیین همزمان ترتیب استخراج و محدوده نهایی استفاده می‌شود.

۴-۷-۱- مدل بلوکی سه بعدی مثال اول

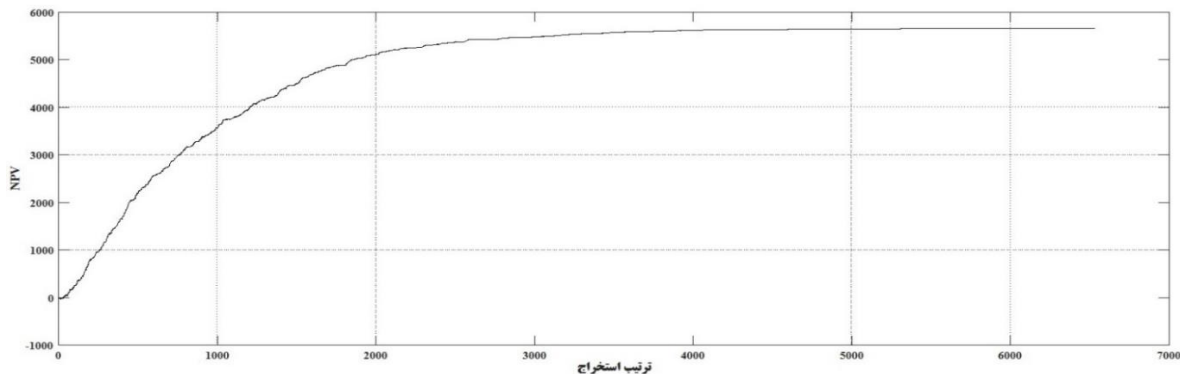
مدل اول یک مدل بلوکی اقتصادی سه بعدی شامل ۴۰ بلوک در راستای شرقی غربی، ۴۷ بلوک در راستای شمالی و ۱۱ بلوک در جهت عمودی به کار گرفته شد. مشخصات این مدل بلوکی در جدول ۴-۲ ارائه شده است. BPP این مدل بلوکی شامل ۶۵۳۳ بلوک و محدوده بهینه نهایی آن به روش LG دارای ۵۰۶۳ بلوک به ارزش ۲۶۷۶۱ واحد پولی است. در تعیین محدوده این مدل از روش استخراج ۱:۹ استفاده شده است. با صفر در نظر گرفتن نرخ بهره، برای این مدل بلوکی از الگوریتم‌های اول، دوم و سوم به ترتیب محدوده‌هایی به ارزش ۲۶۲۱۳، ۲۶۳۷۵ و ۲۶۶۱۱ واحد پولی به دست آمد. بر اساس این نتایج مقدار

تطابق مقدار به دست آمده برای تابع هدف از طریق این الگوریتم‌ها و مقدار بهینه واقعی آن (روش LG) به ترتیب ۹۷/۹۵، ۹۸/۵۶ و ۹۹/۴۳ درصد است.

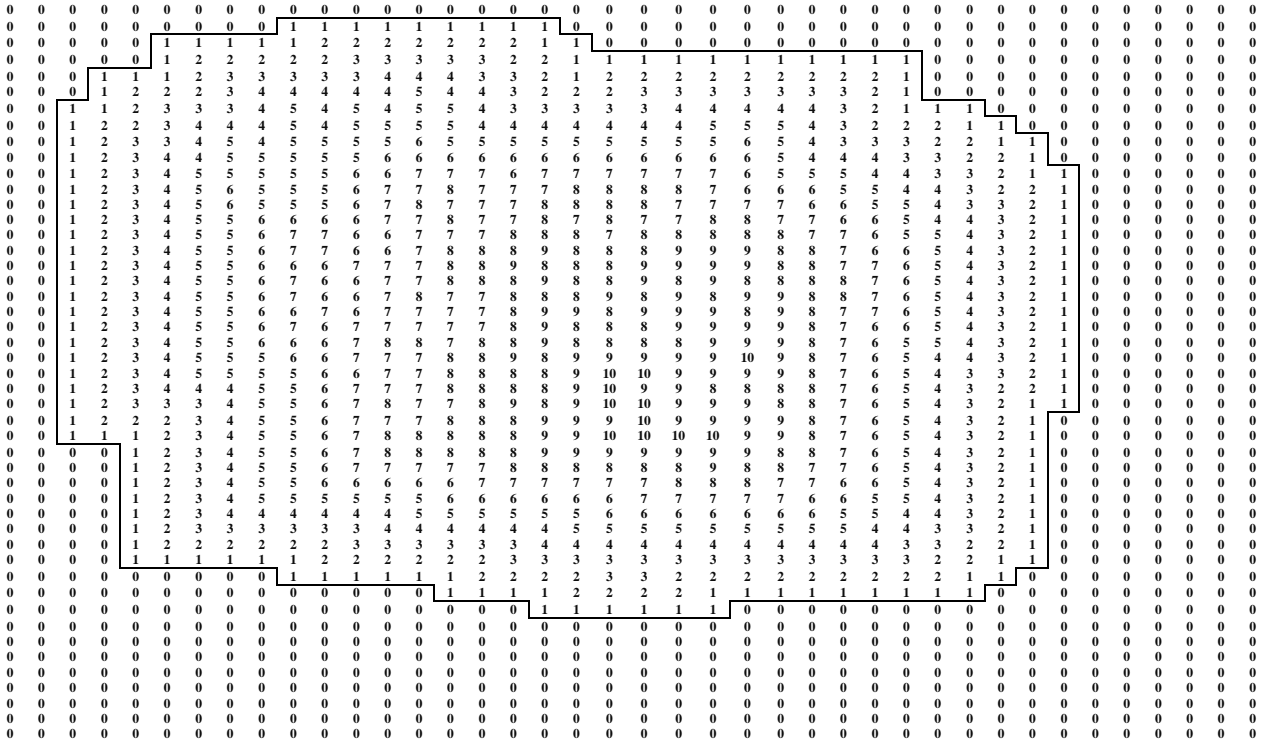
جدول ۴-۲- مشخصات مدل بلوکی اول

پارامتر	مقدار
تعداد کل بلوک‌ها	۲۰۶۸۰
ابعاد بلوک‌ها (متر)	۱۰×۱۰×۱۰
گسترش شرقی غربی (بلوک)	۴۰
گسترش شمالی جنوبی (بلوک)	۴۷
عمق (بلوک)	۱۱
تعداد بلوک‌های BPP	۶۵۳۳
تعداد بلوک‌های ماده معدنی	۱۷۸۴
تعداد بلوک‌های باطله موثر	۴۷۴۹
نسبت BPP به کل بلوک‌ها (درصد)	۳۱/۶

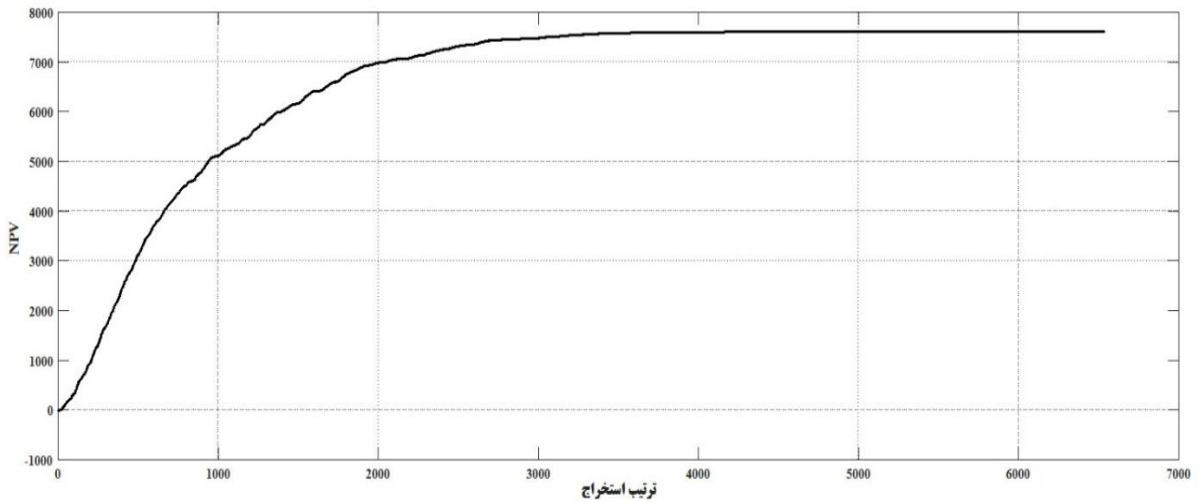
با در نظر گرفتن نرخ بهره ۰/۱ درصد به ازای دوره زمانی استخراج هر بلوک مقدار بیشینه NPV تجمعی با الگوریتم اول ۵۶۶۰، با الگوریتم دوم ۷۱۸۷ و با الگوریتم سوم ۷۶۱۶ واحد پولی به دست آمد. نمودارهای NPV تجمعی و نماهای افقی محدوده نهایی برای این مدل بلوکی در شکل‌های ۴-۵۲ و ۴-۵۳ برای الگوریتم اول، شکل‌های ۴-۵۴ و ۴-۵۵ برای الگوریتم دوم و شکل‌های ۴-۵۶ و ۴-۵۷ برای الگوریتم سوم نشان داده شده‌اند. در نمای افقی محدوده اعداد هر نقطه، تعداد بلوک‌هایی در راستای عمودی است که به محدوده نهایی تعلق دارند.



شکل ۴-۵۲- نمودار NPV تجمعی به دست آمده از الگوریتم اول برای مدل بلوکی سه بعدی اول



شکل ۴-۵۵- نمای افقی محدوده نهایی به دست آمده از الگوریتم دوم برای مدل بلوکی سه بعدی اول



شکل ۴-۵۶- نمودار NPV تجمعی به دست آمده از الگوریتم ابتکاری سوم برای مدل بلوکی سه بعدی اول

جدول ۳-۴- مشخصات مدل بلوکی دوم

مقدار	پارامتر
۷۲۰۰۰	تعداد کل بلوک‌ها
۱۵×۱۵×۱۵	ابعاد بلوک‌ها (متر)
۶۰	گسترش شرقی غربی (بلوک)
۶۰	گسترش شمالی جنوبی (بلوک)
۲۰	عمق (بلوک)
۱۲۴۸۸	تعداد بلوک‌های BPP
۶۷۴۶	تعداد بلوک‌های ماده معدنی
۵۷۴۲	تعداد بلوک‌های باطله موثر
۱۷/۳۴	نسبت BPP به کل بلوک‌ها (درصد)

برای محاسبه نرخ بهره به ازای دوره زمانی استخراج هر بلوک، ابتدا باید از طریق ظرفیت استخراج سالانه تعداد بلوک‌هایی که باید در یک سال استخراج شوند مشخص شود. بر این اساس با استفاده از رابطه (۳-۴) تعداد بلوک‌های استخراج سالانه قابل محاسبه خواهد بود:

$$B_y = MC_y / W_b \quad (۳-۴)$$

که در این رابطه:

B_y تعداد بلوک‌های استخراج شده در سال

MC_y ظرفیت استخراج سالانه به تن

W_b وزن متوسط بلوک‌ها به تن

پس از محاسبه تعداد دوره‌های زمانی استخراج بلوک‌ها با لحاظ کردن نرخ بهره سالانه به عنوان نرخ بهره موثر، با استفاده از رابطه (۴-۴) که از بازآرایی روابط مربوط به نرخ بهره موثر سالانه که در مراجع مختلف

با موضوع ارزیابی اقتصادی پروژه‌های صنعتی (اسکونزاد، ۱۳۸۶) موجود است، نرخ بهره به ازای دوره زمانی استخراج هر بلوک به دست می‌آید:

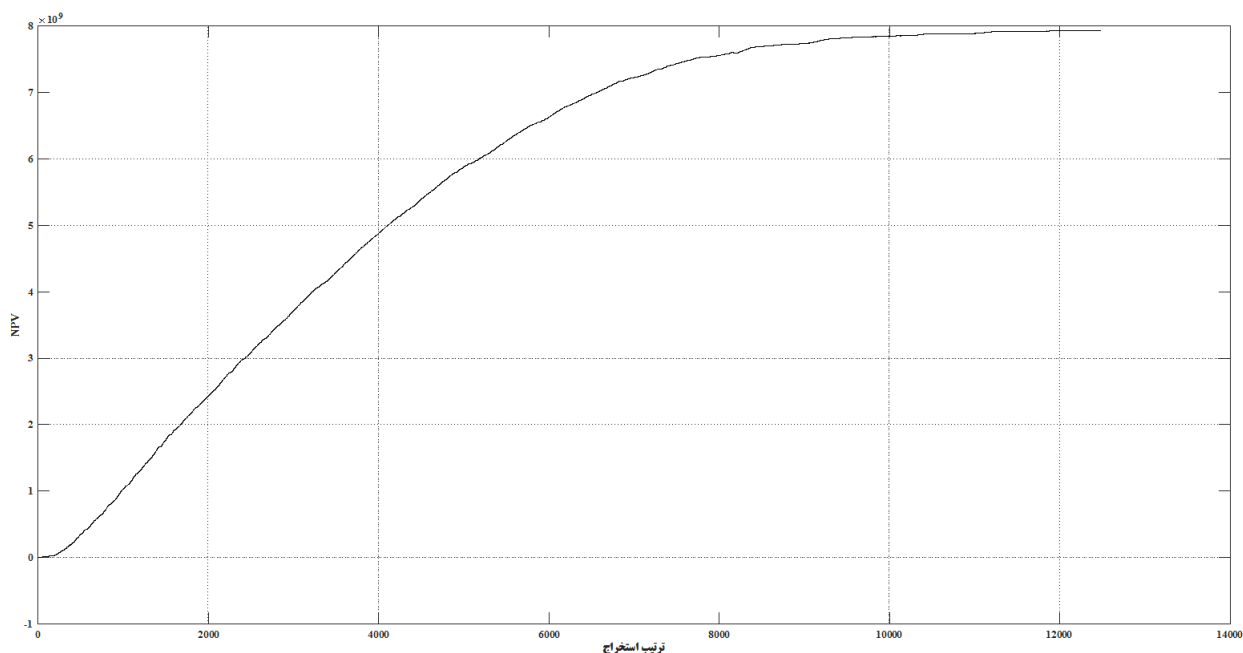
$$c = \sqrt[B_e]{(i_e + 1)} - 1 \quad (4-4)$$

که در این رابطه:

i_e نرخ بهره موثر سالانه

پس از تبدیل مدل عیاری به مدل اقتصادی با استفاده از الگوریتم‌های LG، اول، دوم و سوم محدوده نهایی با نرخ بهره صفر تعیین شد. بر این اساس ارزش محدوده‌هایی که از طریق این الگوریتم‌ها به دست آمد به ترتیب در الگوریتم LG $1/6 \times 10^{10}$ دلار با تعداد بلوک ۹۸۱۳، در الگوریتم اول $1/58 \times 10^{10}$ دلار با تعداد بلوک ۱۲۴۸۸، در الگوریتم دوم $1/6 \times 10^{10}$ دلار با تعداد بلوک ۱۰۵۵۷ و در الگوریتم سوم $1/6 \times 10^{10}$ دلار با تعداد بلوک ۱۰۵۵۴ بود. بنابراین میزان انطباق پاسخ الگوریتم‌ها بر پاسخ بهینه الگوریتم LG نیز به ترتیب ۹۷/۶ درصد در الگوریتم اول و ۹۸/۴ درصد در الگوریتم‌های دوم و سوم است.

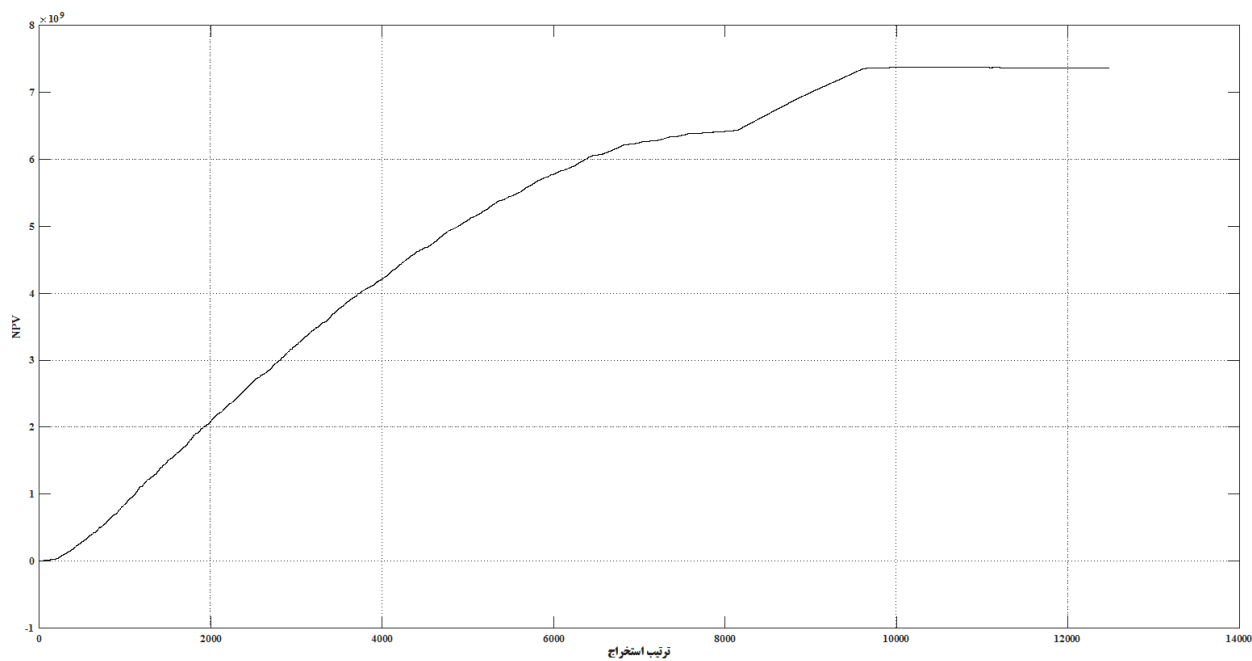
با لحاظ نرخ بهره ۱۵ درصد سالانه و محاسبه نرخ بهره به ازای هر بلوک برای این مدل، بلوکی محدوده نهایی با استفاده از سه الگوریتم تعیین گردید. NPV محدوده نهایی با استفاده از الگوریتم اول $7/9 \times 10^9$ با ۱۲۴۸۸ بلوک به دست آمد. نمای افقی و منحنی NPV این محدوده به ترتیب در شکل‌های ۴-۵۸ و ۴-۵۹ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵۹- منحنی NPV تجمعی براساس ترتیب استخراج طبق نتایج الگوریتم اول

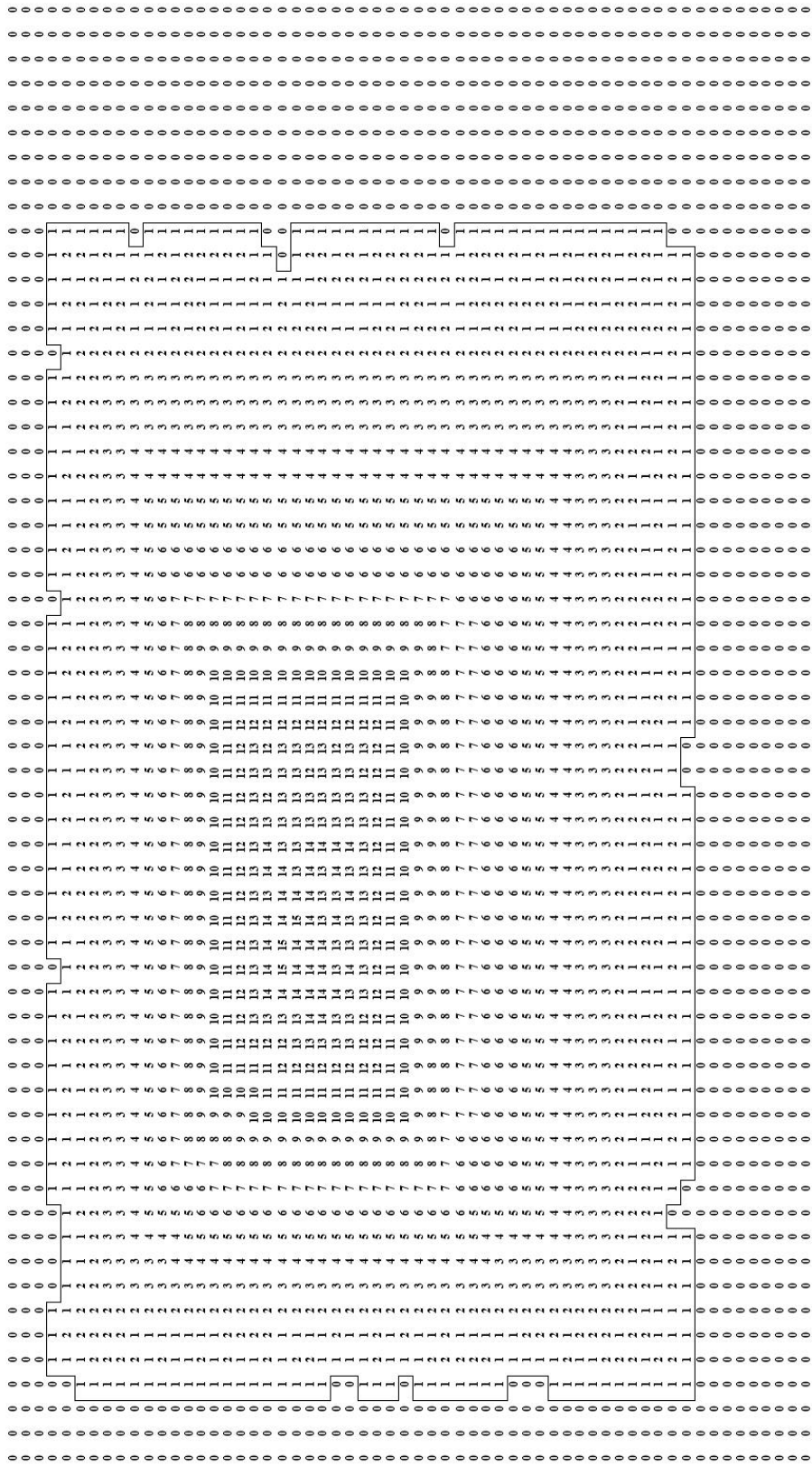
منحنی NPV تجمعی نتایج به کارگیری الگوریتم دوم در شکل ۴-۶۰ نشان داده شده است. این الگوریتم

برای این مدل بلوکی محدوده‌ای با نمای افقی شکل ۴-۶۱ را تعیین کرد.



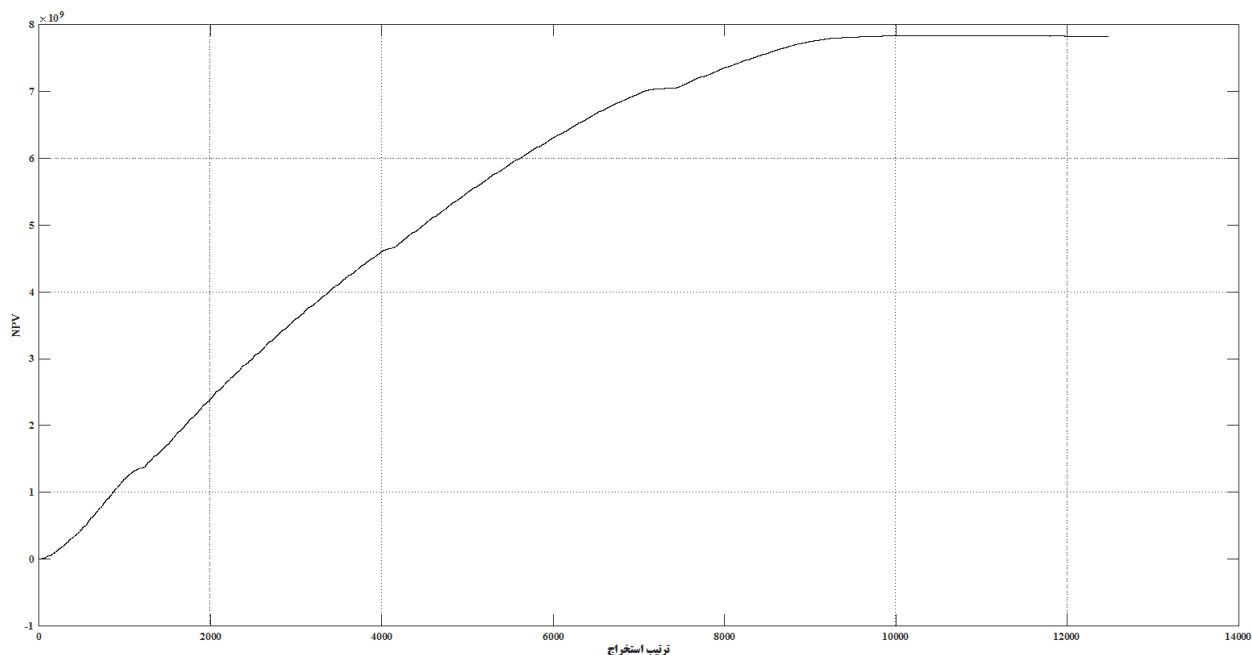
شکل ۴-۶۰- منحنی NPV تجمعی بر اساس ترتیب استخراج طبق نتایج الگوریتم دوم

شکل ۴-۶۱- نمای افقی محدوده نهایی مدل بلوکی دوم با استفاده از الگوریتم دوم



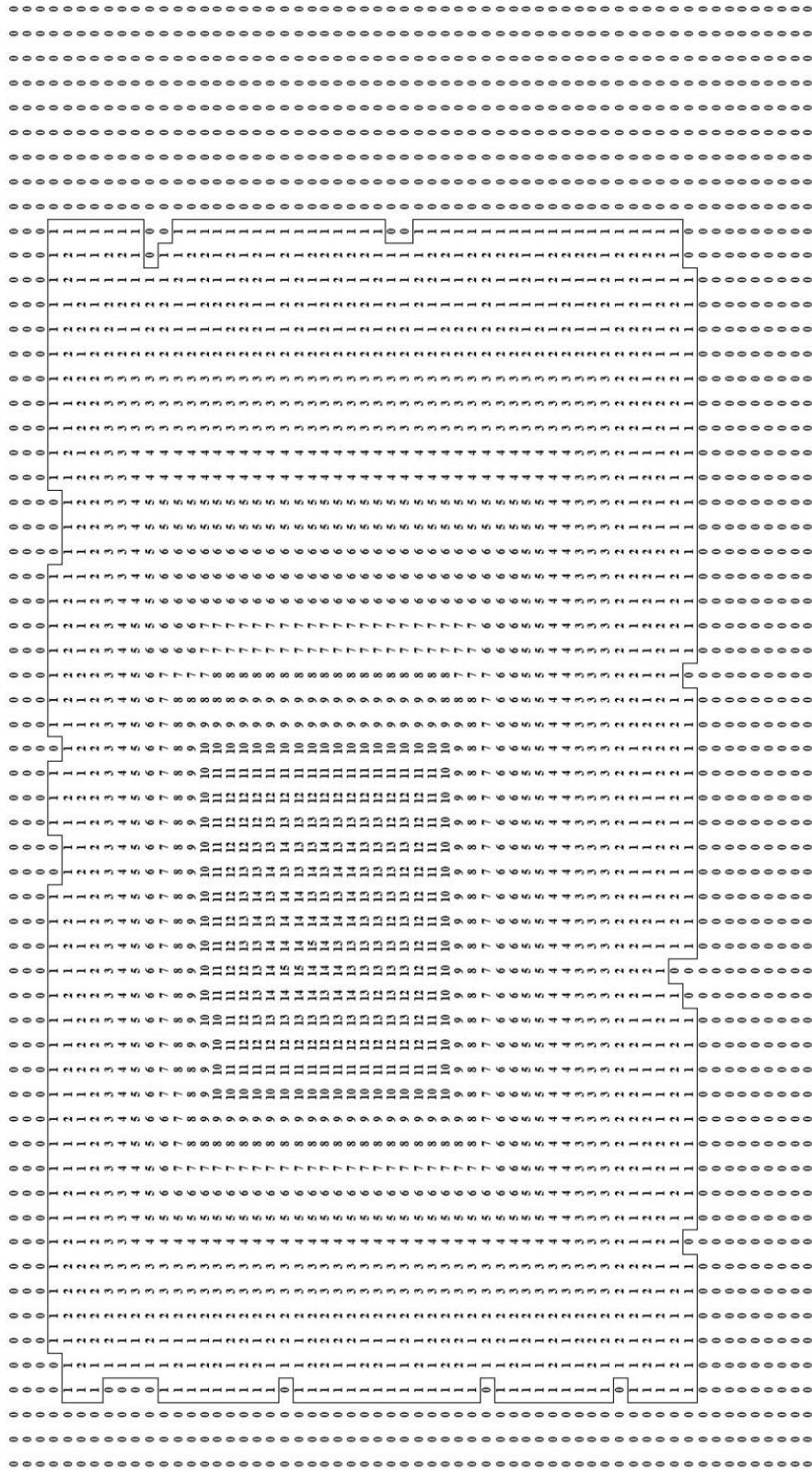
طبق محاسبات انجام شده، NPV محدوده نهایی حاصل از الگوریتم دوم با نرخ بهره سالانه ۱۵ درصد $7/38 \times 10^9$ دلار با بلوک خواهد بود.

NPV محدوده نهایی این مدل بلوکی با استفاده از الگوریتم سوم $7/84 \times 10^9$ دلار با بلوک به دست آمد. منحنی NPV این الگوریتم در شکل ۴-۶۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۶۲- منحنی NPV تجمعی براساس ترتیب استخراج طبق نتایج الگوریتم سوم

نمای افقی محدوده به دست آمده از الگوریتم سوم نیز در شکل ۴-۶۳ نشان داده شده است.



شکل ۴-۶۳- نمای افقی محدوده نهایی مدل بلوکی دوم با استفاده از الگوریتم سوم

بر اساس آنچه از نتایج این الگوریتم‌ها به دست آمد، الگوریتم اول نسبت به دو الگوریتم دیگر محدوده‌ای با ارزش تنزیل شده بالاتری را تعیین کرد که نشان از ترتیب بهتر استخراج دارد. در مقابل محدوده الگوریتم‌های دوم و سوم دارای ارزش تنزیل نشده بالاتری هستند که انطباق بیشتری با محدوده بهینه LG دارند.

۴-۸ - مقایسه الگوریتم‌ها و کارآیی آن‌ها

هدف از ارائه و توسعه الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری برای مسائل حجیم و در اصطلاح علم تحقیق در عملیات NP-Hard، دستیابی به یک راه حل تقریبی با دقتی قابل قبول است. همان‌گونه که در منابع علمی گفته می‌شود، مسایل بهینه‌سازی در معادن روباز از جمله محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید و موضوع این تحقیق یعنی حل همزمان مساله محدوده نهایی و ترتیب بهینه بلوک‌ها نیز از جمله مسایل بهینه NP-Hard با درجه بالا هستند. به صورت معمول انتظاری که از یک الگوریتم ابتکاری یا فراابتکاری در این گونه مسایل وجود دارد، رسیدن به جوابی برای تابع هدف است که در زمانی منطقی، تقریب قابل قبولی را ارائه دهد. بنابر توضیحات بالا، کارآیی یک الگوریتم را می‌توان از طریق مقایسه پاسخ آن با پاسخ بهینه یا پاسخ الگوریتم‌های مشابه ارزیابی کرد. از طرف دیگر میزان دقت یک الگوریتم ابتکاری یا فراابتکاری نیز ممکن است در مصادیق مختلف با هم تفاوت‌هایی را نشان دهد و ارزیابی مطلق میزان انطباق پاسخ الگوریتم و مقدار بهینه در این گونه الگوریتم‌ها بر خلاف الگوریتم‌های دقیق و ریاضی، جنبه علمی ندارد. با این وجود به صورت یک برآورد می‌توان نتایج مثال‌های مختلف یک الگوریتم را با هم مقایسه کرد و یک ارزیابی میانگین را ارائه داد. از طرف دیگر در الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم‌های توسعه داده شده در این تحقیق، از استراتژی‌های ابتکاری مانند مقایسه ارزش اقتصادی، مقایسه وزن مکانی، مقایسه NOI، مقایسه زودترین زمان استخراج و ... برای هدایت مسیر استخراج به سمت بهینه استفاده شده است.

بر اساس مطالب گفته شده و انتظاری که از یک الگوریتم ابتکاری وجود دارد، این امکان وجود دارد که با وجود استراتژی های گفته شده در آخرین مرحله از توالی گزینش بلوک های مناسب، چند بلوک به صورت یکسان دارای ارزش مساوی باشند. هر تعداد که در یک الگوریتم ابتکاری این مراحل گزینش به صورت ابتکاری پیشنهاد شود، این امکان وجود دارد که دو یا چند بلوک هم ارز دارای ارزش یکسان گردند. در این سه الگوریتم نیز ممکن است پس از چند مرحله گزینش، دو یا چند بلوک دارای ارزش یکسان باشند و ملاکی برای مقایسه آنها وجود نداشته باشد. بر اساس راه حل پیشنهادی در معرفی هر کدام از این الگوریتم ها، در حالت برابری اولین بلوک یا به صورت تصادفی یکی از بلوک ها به عنوان بلوک استخراج شده تعیین می شود. منطق الگوریتم اول در اولویت اول گزینش زودتر بلوکی است که دارای بیشترین ارزش باشد و در اولویت دوم با بهره گیری از مفهوم وزن مکانی مسیر را به سمت استخراج زودتر مناطق پرارزش تر هدایت کند. در الگوریتم دوم نیز با استفاده از شاخص NOI تلاش شده است که روند استخراج به سمت مسیر بهینه هدایت شود. منطق الگوریتم سوم نیز بر این پایه استوار است که برای دستیابی به NPV بیشتر باید بلوک های مثبت زودتر استخراج شوند. بر همین مبنا ابتدا زودترین زمان استخراج بلوک ها با هم مقایسه می شود. بنابراین بلوک مثبتی که دارای نزدیکی بیشتری به سطح زمین باشد دارای اولویت بیشتری برای استخراج می شود. در شرایط برابر نیز بلوکی که دارای بیشترین ارزش باشد استخراج می شود. در صورت برابری این دو شاخص در دو یا چند بلوک تعداد بلوک های مثبت درون مخروط معکوس بلوک ها با هم مقایسه می شود که بیان گر این مفهوم است که در صورت استخراج کدام بلوک راه برای استخراج تعداد بیشتری بلوک مثبت باز می شود.

در مثال های سه بعدی استفاده شده برای ارزیابی این سه الگوریتم مشاهده شد که در مثال اول، بهترین NPV مربوط به الگوریتم سوم بود و الگوریتم های دوم و اول به ترتیب در رتبه های بعدی قرار داشتند. در

مدل بلوکی سه بعدی دوم برعکس مدل قبلی، بالاترین NPV با استفاده از الگوریتم اول به دست آمد و در رتبه بعدی به ترتیب الگوریتم‌های سوم و دوم بودند.

در مجموع باید گفت بر اساس تعریف مسئله، هر سه الگوریتم ارائه شده یک هدف یعنی تعیین همزمان ترتیب استخراج بلوک‌ها و محدوده نهایی را دنبال می‌کنند. هر سه روش به صورت بلوک به بلوک و با مقایسه بلوک‌های قابل استخراج در هر مرحله ترتیبی را برای استخراج پیشنهاد می‌دهند. تفاوت ترتیب پیشنهادی این سه الگوریتم به علت شروط مقایسه بلوک‌های کاندیدا در هر مرحله است. الگوریتم سوم به دنبال پیدا کردن ترتیب استخراج بر اساس بلوک‌های ماده معدنی است و اولویت را در رسیدن سریع‌تر به ماده معدنی قرار می‌دهد. مزیت الگوریتم سوم در رسیدن هر چه سریع‌تر به بلوک‌های ماده معدنی است. مزیت الگوریتم اول و دوم نیز در امکان بیشتر برای وارد کردن محدودیت‌های کنترل عیار در دوره‌های زمانی برنامه‌ریزی تولید است. در مجموع در مثال‌های دو و سه بعدی نتایج به دست آمده به صورت متوسط نشان از انطباق بالای ۹۷ درصدی این الگوریتم‌ها با الگوریتم LG دارد که می‌توان آن را یک نتیجه مناسب به حساب آورد.

مهم‌ترین کارکرد ترتیب استخراج به دست آمده از این الگوریتم‌ها، تعیین برنامه‌ریزی بلند مدت بلوک‌های کانسار است. با توجه به این که یکی از اهداف این الگوریتم‌ها هدایت مسیر استخراج به سمت مناطق پرعیارتر کانسار است، این ترتیب پیشنهادی می‌تواند به عنوان طراحی برنامه‌ریزی تولید مورد استفاده مهندسان قرار گیرد.

۴-۹- جمع‌بندی

در این فصل برای حل مساله تعیین همزمان محدوده نهایی و ترتیب بهینه استخراج بلوک‌ها، سه الگوریتم ابتکاری ارائه شد. در این الگوریتم‌ها از شاخص‌های ارزش اقتصادی، وزن مکانی، نزدیک‌ترین بلوک ماده معدنی (NOI) و زودترین زمان استخراج برای مقایسه بلوک‌های نامزد در هر مرحله استفاده شد. شاخص

وزن مکانی که تا پیش از این برای مدل‌های عیاری استفاده می‌شد، در این تحقیق برای مدل‌های بلوکی اقتصادی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین با تعریف شاخص NOI الگوریتم دوم توسعه پیدا کرد. در ادامه با استفاده از مفهوم زودترین زمان استخراج که در فصل سوم تعریف گردید، الگوریتم سوم ارائه شد. بر اساس نتایج این الگوریتم‌ها میزان تخمین مقدار بهینه تابع هدف با نرخ بهره صفر یعنی مقایسه با نتایج الگوریتم LG بسیار خوب بود که اهداف مورد انتظار از یک الگوریتم ابتکاری را به خوبی برآورده کرده است.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتایج

بر اساس مطالعات انجام شده در فصل‌های گذشته در خصوص موضوع این رساله یعنی تعیین محدوده بهینه نهایی با هدف حداکثرسازی ارزش خالص فعلی (NPV) نتایج زیر به دست آمده است:

- مدل ریاضی تعیین محدوده نهایی و ترتیب بهینه استخراج بلوک‌ها به صورت برنامه‌ریزی‌های عدد صحیح و صفر و یکی توسعه داده شد. این مدل‌های بهینه‌سازی به زبان ریاضی مفهوم اصلی موضوع این رساله را تبیین کرده‌اند که کمک شایانی به درک صحیح از مساله و توسعه راه حل‌های آن کرده‌اند. این مدل‌های ریاضی توانایی تعیین ترتیب همه بلوک‌ها را به صورت تک تک داراست که نسبت به مدل‌های قبلی برنامه‌ریزی تولید که تنها فازهای استخراجی را تعیین می‌کنند، یک مزیت محسوب می‌شود.

- بر اساس تحلیل‌های ریاضی مبتنی بر نتایج توسعه مدل‌های ریاضی ارائه شده در این رساله، در صورتی که تنها محدودیت‌های فنی استخراجی یعنی لزوم برداشت بلوک‌های بالایی برای برداشت هر بلوک در مساله وجود داشته باشد، محدوده تنزیل شده برابر یا کوچک‌تر از محدوده LG خواهد بود. در مقابل، در صورتی که محدودیت‌های دیگر مانند عیار متوسط دوره‌های استخراجی در مساله لحاظ شود این امکان وجود دارد که محدوده تنزیل شده از محدوده LG بزرگ‌تر شود.

- به صورت ذاتی بلوک‌های کنسار امکان ندارد که زودتر و دیرتر از برخی زمان‌ها استخراج شوند. زودترین زمان و دیرترین زمان ممکن برای استخراج یک بلوک تبیین کننده این مفهوم هستند. براساس این مفاهیم، به زبان ریاضی نحوه محاسبه این زمان‌ها ارائه شد. با تقلیل تعداد متغیرهای تصمیم مساله از طریق این دو مفهوم حجم مدل ریاضی کاهش پیدا خواهد کرد. در مجموع این راهکار باعث کاهش محاسبات مربوط به حل مدل گردید و قابلیت زیادی برای به کارگیری در مدل‌های برنامه‌ریزی تولید و الگوریتم‌های ابتکاری دارد.

- به علت NP-Hard بودن تابع هدف ارائه شده، سه الگوریتم ابتکاری توسعه داده شد. بر این اساس در الگوریتم اول برای اولین بار مشخص شد که می‌توان از وزن مکانی، که قبلاً به عنوان یک مفهوم عیاری مورد استفاده قرار گرفته بود، در مدل‌های اقتصادی استفاده شود. بر این اساس الگوریتم اول با استفاده از یک فرآیند تکرار شونده با مقایسه ارزش اقتصادی و وزن مکانی بلوک‌های قابل استخراج در هر مرحله ترتیبی را به طراح پیشنهاد می‌دهد که مسیر استخراج را به سمت استخراج زودتر مناطق پرعیارتر هدایت کند.

- شاخص نزدیک‌ترین بلوک ماده معدنی (NOI) تعریف شد. با استفاده از این شاخص در کنار شاخص‌های وزن مکانی و ارزش اقتصادی بلوک‌ها، الگوریتم دوم توسعه داده شد. الگوریتم دوم با جستجوی

نزدیک‌ترین بلوک‌های ماده معدنی مسیر استخراج را برای بیشینه‌سازی NPV هدایت می‌کند.

- بر پایه مفهوم زودترین زمان ممکن استخراج یک بلوک، الگوریتم سوم توسعه داده شد. این الگوریتم با استفاده از این اصل که برای دستیابی به بالاترین NPV باید بلوک‌های ماده معدنی زودتر استخراج شوند، توسعه داده شده است. بنابراین در این الگوریتم بر خلاف الگوریتم‌های دوگانه قبلی، با نادیده گرفتن بلوک‌های باطله فرآیند جستجو تنها برای بلوک‌های ماده معدنی صورت می‌پذیرد. در قسمت بیشتر موارد این الگوریتم از دو الگوریتم قبلی NPV بالاتری را تولید کرد که نشان از ترتیب بهتر بلوک‌ها دارد. البته باید یادآوری کرد که ممکن است بسته به ساختار کانسار دو الگوریتم قبلی نتایج بهتری را تولید کنند.

- در مثال‌های مختلف مقایسه نتایج الگوریتم‌های ارائه شده با مقادیر بهینه و نتایج الگوریتم LG نشان می‌دهد که آن‌ها به عنوان روش‌هایی ابتکاری با دقتی قابل قبول و در زمانی مناسب توانایی تعیین محدوده نهایی را دارند.

- ترتیب به دست آمده از این الگوریتم‌ها را می‌توان به عنوان برنامه‌ریزی تولید مورد استفاده قرار داد.

۵-۲- پیشنهادها

با توجه به نتایج به دست آمده در این رساله، پیشنهادهای زیر به منظور توسعه هر چه بیشتر این تحقیق و موضوعات وابسته به آن ارائه می‌شود:

- توسعه مدل‌های ریاضی برای پوشش اهداف برنامه‌ریزی‌های میان مدت و کوتاه مدت از طریق وارد کردن محدودیت‌های عیاری، فرآوری و وجود چند مقصد مجزا برای ماده معدنی
- توسعه مدل‌های ریاضی در حالت عدم قطعیت پارامترهای طراحی
- بهبود و توسعه الگوریتم‌های ارائه شده برای افزایش دقت آن‌ها از طریق بهبود و افزایش مبنای مقایسه در حالت برابری بلوک‌ها
- اضافه کردن محدودیت‌های عیاری و فرآوری به الگوریتم‌ها برای افزایش کاربرد آن‌ها در مقیاس صنعتی و تجاری

فهرست منابع به ترتیب حروف الفبا:

- اسکونژاد، م. (۱۳۸۶). *اقتصاد مهندسی یا ارزیابی اقتصادی پروژه های صنعتی*، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- اصانلو، م. (۱۳۸۴). *روش های استخراج معادن سطحی*. جلد اول، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- عطایی، م. حسینی، س م ع. (۱۳۹۰). *طراحی محدوده و برنامه ریزی تولید در معادن روباز؛ انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیر کبیر، چاپ اول، تهران*.
- فتاحی، پ. (۱۳۹۰). *الگوریتم های فرا/بتکاری؛ انتشارات دانشگاه بوعلی سینا*.
- کاکایی، ر. (۱۳۸۳). *طراحی محدوده بهینه نهایی معدن به کمک الگوریتم مخروط شناور II و مقایسه آن با الگوریتم لرج-گروسمن*. انجمن مهندسی معدن ایران، جلد اول، صفحه ۴۶۶-۴۵۱.
- کاکایی، ر. (۱۳۸۴). *بررسی روش های مختلف طراحی محدوده بهینه نهایی در معادن روباز*. مجله علوم و فنون دانشگاه صنعتی شاهرود، (شماره ۶ و ۷)، صفحه ۳۱-۱۹.
- میرزایی، ح. کاکایی، ر. (۱۳۸۴). *برنامه ریزی تولید معادن روباز با استفاده از الگوریتم ژنتیک؛ مجموعه مقالات دومین کنفرانس معادن روباز ایران؛ صفحه ۵۹-۶۷*.
- هوسترولید، و. کوچتا، م. (۱۹۹۵ م). *طراحی و برنامه ریزی معادن روباز؛ ترجمه علی اصغر خدایاری و مهدی یآوری، دانشگاه صنایع و معادن ایران، چاپ اول ۱۳۸۳*.
- یآوری، م. فلاح، ن. (۱۳۸۳). *نرم افزار تعیین محدوده کاواک نهایی معادن فلزی پایه روباز؛ مرکز تحقیقات مواد معدنی ایران - یزد؛ صفحه ۱-۱۸*.
- Abrishamifar, S. A. (2011). Ore extraction and blending optimization model in polymetallic open pit mines by chance constrained one-sided goal programming. *International Journal of Industrial Engineering*, 60-67.

- Achireko, P. K., & Frimpong, S. (1996). Open pit optimization using artificial neural networks on conditionally simulated blocks. In *Proceeding of 26th Int. APCOM Symposium* (pp. 285-290).
- Akaike, A., & Dagdelen, K. (1999). A strategic production scheduling method for an open pit mine. *proceedings of the 28th Application of Computers and Operation Research in the Mineral Industry*, 729-738.
- Akbari, A. D., Osanloo, M., & Shirazi, M. A. (2009). Reserve estimation of an open pit mine under price uncertainty by real option approach. *Mining Science and Technology (China)*, 19(6), 709-717.
- Akbari, A. D., OSANLOU, M., & Shirazi, M. A. (2008). Determination of ultimate pit limits in open mines using real option approach.
- Askari-Nasab, H., & Awuah-Offei, K. (2009). Open pit optimisation using discounted economic block values. *Mining Technology*, 118(1), 1-12.
- Askari-Nasab, H., Pourrahimian, Y., Ben-Awuah, E., & Kalantari, S. (2011). Mixed integer linear programming formulations for open pit production scheduling. *Journal of Mining Science*, 47(3), 338.
- Baek, J., Choi, Y., & Park, H. S. (2016). Uncertainty representation method for open pit optimization results due to variation in mineral prices. *Minerals*, 6(1), 17.
- Benndorf, J., & Dimitrakopoulos, R. (2013). Stochastic long-term production scheduling of iron ore deposits: integrating joint multi-element geological uncertainty. *Journal of Mining Science*, 49(1), 68-81.
- Boland, N., Dumitrescu, I., Froyland, G., & Gleixner, A. M. (2009). LP-based disaggregation approaches to solving the open pit mining production scheduling problem with block processing selectivity. *Computers & Operations Research*, 36(4), 1064-1089.
- Burgarelli, H. R., Souza, F. R., Nader, A. S., Torres, V. F. N., Câmara, T. R., Ortiz, C. E. A., & Galery, R. (2018). Direct block scheduling under marketing uncertainties. *REM-International Engineering Journal*, 71(2), 275-280.
- Caccetta, L., & Hill, S. P. (2003). An application of branch and cut to open pit mine scheduling. *Journal of global optimization*, 27(2-3), 349-365.

- Caccetta, L., Kelsey, P., & Giannini, L. (1998). Open pit mine production scheduling. In *APCOM 98: Computer Applications in the Mineral Industries International Symposium* (pp. 65-72).
- Carlson, T. R., Erickson, J. D., O'Brain, D. T., & Pana, M. T. (1966). Computer techniques in mine planning. *Mining Engineering*, 18(5), 53-56.
- Chicoisne, R., Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., & Rubio, E. (2012). A new algorithm for the open-pit mine production scheduling problem. *Operations Research*, 60(3), 517-528.
- Cullenbine, C., Wood, R. K., & Newman, A. (2011). A sliding time window heuristic for open pit mine block sequencing. *Optimization letters*, 5(3), 365-377.
- Dagdelen, K., & Johnson, T.B. (1986). Optimum open pit mine production scheduling by Lagrangian parameterization. *Proc. of the 19th APCOM*, 127-142.
- David, M., Dowd, P. A., & Korobov, S. (1974, April). Forecasting departure from planning in open pit design and grade control. In *12th Symposium on the application of computers and operations research in the mineral industries (APCOM)* (Vol. 2, pp. F131-F142).
- Dehghani, H., & Ataee-pour, M. (2012). Determination of the effect of operating cost uncertainty on mining project evaluation. *Resources Policy*, 37(1), 109-117.
- Dehghani, H., Ataee-pour, M., & Esfahanipour, A. (2014). Evaluation of the mining projects under economic uncertainties using multidimensional binomial tree. *Resources Policy*, 39, 124-133.
- Denby, B., & Schofield, D. (1994). Open-pit design and scheduling by use of genetic algorithms. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section A. Mining Industry*, 103.
- Dimitrakopoulos, R. (1998). Conditional simulation algorithms for modelling orebody uncertainty in open pit optimisation. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 12(4), 173-179.
- Dimitrakopoulos, R. (2011). Stochastic optimization for strategic mine planning: a decade of developments. *Journal of Mining Science*, 47(2), 138-150.

- Dimitrakopoulos, R. G., & Sabour, S. A. A. (2007). Evaluating mine plans under uncertainty: Can the real options make a difference?. *Resources Policy*, 32(3), 116-125.
- Dimitrakopoulos, R., & Ramazan, S. (2004). Uncertainty based production scheduling in open pit mining. *SME transactions*, 316.
- Dimitrakopoulos, R., & Ramazan, S. (2004). Uncertainty based production scheduling in open pit mining. *SME transactions*, 316.
- Dimitrakopoulos, R., Martinez, L., & Ramazan, S. (2007). A maximum upside/minimum downside approach to the traditional optimization of open pit mine design. *Journal of Mining Science*, 43(1), 73-82.
- Dowd, P. A., & Onur, A. H. (1993a). Optimizing open pit design and sequencing. *Proceedings 23rd Application of Computer in Mineral Industry*, 411-422.
- Eivazy, H., & Askari-Nasab, H. (2012). A hierarchical open-pit mine production scheduling optimisation model. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 4(2), 89-115.
- Epstein, R., Goic, M., Weintraub, A., Catalán, J., Santibáñez, P., Urrutia, R., & Caro, F. (2012). Optimizing long-term production plans in underground and open-pit copper mines. *Operations Research*, 60(1), 4-17.
- Erarslan, K., & Celebi, N. (2001). A simulative model for optimum open pit design. *CIM bulletin*, 94(1055), 59-68.
- Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., & Newman, A. (2013). MineLib: a library of open pit mining problems. *Annals of Operations Research*, 206(1), 93-114.
- François-Bongarçon, D., & Guibal, D. (1982, April). Algorithms for parameterizing reserves under different geometrical constraints. In *Proc. 17th symposium on the application of computers and operations research in the mineral industries (APCOM: AIME)* (pp. 297-309).
- François-Bongarçon, D., & Marechal A. (1976). A new method for open-pit design: parametrization of the final pit contour. *Proc. of the 14th APCOM*, 573-583.

- Gershon, M. (1987). Heuristic approaches for mine planning and production scheduling. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 5(1), 1-13.
- Gershon, M. E. (1983). Mine scheduling optimization with mixed integer programming. *Min. Eng.(Littleton, Colo.);(United States)*, 35(4), 351-354.
- Gholamnejad, J., & Moosavi, E. (2012). A new mathematical programming model for long-term production scheduling considering geological uncertainty. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(2), 77-81.
- Gholamnezhad, J., Osanlou, M., & Khoram, E. (2008). A chance constrained integer programming model for open pit long-term production planning. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 21(4), 407-418.
- Gilani, S. O., & Sattarvand, J. (2016). Integrating geological uncertainty in long-term open pit mine production planning by ant colony optimization. *Computers & Geosciences*, 87, 31-40.
- Godoy, M., & Dimitrakopoulos, R. (2004). Managing risk and waste mining in long-term production scheduling of open-pit mines. *SME transactions*, 316(3).
- Haque, M. A., Topal, E., & Lilford, E. (2016). Estimation of mining project values through real option valuation using a combination of hedging strategy and a mean reversion commodity price. *Natural Resources Research*, 25(4), 459-471.
- Hochbaum, D. S., & Chen, A. (2000). Performance analysis and best implementations of old and new algorithms for the open-pit mining problem. *Operations Research*, 48(6), 894-914.
- Huttagosol, P., & Cameron, R. (1992). A computer design of ultimate pit limit by using transportation algorithm. In *Proceedings of 23rd APCOM symp., Tucson, Arizona* (pp. 443-460).
- Jamshidi, M., & Osanloo, M. (2018). UPL determination of multi-element deposits with grade uncertainty using a new block economic value calculation approach. *Journal of Mining and Environment*, 9(1), 61-72.

- Johnson, D. S., & Niemi, K. A. (1983). On knapsacks, partitions, and a new dynamic programming technique for trees. *Mathematics of Operations Research*, 8(1), 1-14.
- Johnson, T. B. (1988). Application of the Max Flow algorithm to ultimate pit design. *Engineering design: better results through operations research methods*, 518-531.
- Johnson, T. B., & Sharp, W. R. (1971). *A Three-dimensional dynamic programming method for optimal ultimate open pit design* (Vol. 7553). Bureau of Mines, US Dep. of the Interior.
- Johnson, T.B. (1969). Optimum Open-Pit Mine Production Scheduling. *Proc. 8th International Symposium on Computers and Operations Research*, Salt Lake City, Utah, USA.
- Khalokakaie, R., Dowd, P. A., & Fowell, R. J. (2000a). Lerchs–Grossmann algorithm with variable slope angles. *Mining Technology*, 109(2), 77-85.
- Khalokakaie, R., Dowd, P. A., & Fowell, R. J. (2000b). A Windows program for optimal open pit design with variable slope angles. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 14(4), 261-275.
- Koenigsberg, E. (1982). The optimum contours of an open pit mine: an application of dynamic programming. *17th Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*, 274-287.
- Kumral, M., & Dowd, P. A. (2005). A simulated annealing approach to mine production scheduling. *Journal of the Operational Research Society*, 56(8), 922-930.
- Lambert, W. B., Brickey, A., Newman, A. M., & Eureka, K. (2014). Open-pit block-sequencing formulations: a tutorial. *Interfaces*, 44(2), 127-142.
- Lamghari, A., & Dimitrakopoulos, R. (2012). A diversified Tabu search approach for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 222(3), 642-652.

- Lamghari, A., & Dimitrakopoulos, R. (2016). Network-flow based algorithms for scheduling production in multi-processor open-pit mines accounting for metal uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 273-290.
- Latorre, E., & Golosinski, T. S. (2011). Definition of economic limits taking into consideration time value of money. *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM) Journal*, 2(3), 162-170.
- Lemieux, M. (1979). Moving cone optimizing algorithm. *Computer methods for the 80's in the mineral industry*, Weiss A. (Ed.), SME-AIME, 329–345.
- Lerchs, H., & Grossman, I. F., (1965). Optimum design of open-pit mines. *Canadian Institute of Mining Bulletin*, 58, 47-54.
- Matheron, G. (1975a). Compléments sur le paramétrage de contours optimaux. *Note géostatistique*, 129.
- Matheron, G. (1975b). Le paramétrage des contours optimaux. *Technique notes*, 401, 19-54.
- Matheron, G. (1975c). Le paramétrage technique des réserves. *Internal Note CGMM, Ecole des Mines de Paris*, 54.
- Mathieson, G. (1982, September). Open pit sequencing and scheduling. In *SME Fall Meeting, Honolulu, September* (pp. 4-9).
- Menabde, M., & Froyland, G., (2004). Mining schedule optimisation for conditionally simulated orebodies. *Proceeding of the international symposium on ore body modelling and strategic mine planing*, 347-352.
- Moosavi, E., & Gholamnejad, J. (2015). Long-term production scheduling modeling for the open pit mines considering tonnage uncertainty via indicator kriging. *Journal of Mining Science*, 51(6), 1226-1234.
- Nanjari-Latorre, E., & Golosinski, T. S. (2013). Optimising open pit mine scheduling taking into consideration time value of money and mining restrictions. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 27(3), 156-165.

- Onur, A. H., & Dowd, P. (1993b). Open-pit optimization- Part 2: Production scheduling and inclusion of roadways. *TRANS INST MIN METALL SECT A MIN IND.*, 102, 105-113.
- Osanloo, M., Gholamnejad, J., & Karimi, B. (2008). Long-term open pit mine production planning: a review of models and algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 22(1), 3-35.
- Pana, M. T. (1965, March). The simulation approach to open pit design. In *APCOM SYMPOSIUM* (Vol. 5, pp. 127-138).
- Paricheh, M., & Osanloo, M. (2018). A simulation-based risk management approach to locating facilities in open-pit mines under price and grade uncertainties. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 89, 119-134.
- Rahimi, E., Moosavi, E., Shirinabadi, R., & Gholinejad, M. (2018). Optimized algorithm in mine production planning, mined material destination, and ultimate pit limit. *Journal of Central South University*, 25(6), 1475-1488.
- Rajabioun, R. (2011). Cuckoo optimization algorithm. *Applied soft computing*, 11(8), 5508-5518.
- Ramazan, S., & Dimitrakopoulos, R. (2004). Traditional and new MIP models for production scheduling with in-situ grade variability. *International Journal of Surface Mining*, 18(2), 85-98.
- Ramazan, S., and Dimitrakopoulos, R. (2007). Stochastic Optimisation of Long-Term Production Scheduling for Open Pit Mines With a New Integer Programming Formulation. *Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, 359-365.
- Ramazan, S., Dagdelen, K., & Johnson, T. B. (2005). Fundamental tree algorithm in optimising production scheduling for open pit mine design. *Mining Technology*, 114(1), 45-54.
- Ramazan, S., Dagdelen, K., & Johnson, T. B. (2005). Fundamental tree algorithm in optimising production scheduling for open pit mine design. *Mining Technology*, 114(1), 45-54.

- Richmond, A. (2018). Direct net present value open pit optimisation with probabilistic models. In *Advances in Applied Strategic Mine Planning* (pp. 217-228). Springer, Cham.
- Roman, R. J. (1974). The role of time value of money in determining an open pit mining sequence and pit limits. In *Proc. 12th Symp. Application Computers and Operation Research in the Mineral Industry*.
- Sattarvand, J. (2009). *Long-term Open pit Planning by Ant Colony Optimization* (Doctoral dissertation, RWTH Aachen University).
- Sayadi, A. R., Fathianpour, N., & Mousavi, A. A. (2011). Open pit optimization in 3D using a new artificial neural network. *Archives of Mining Sciences*, 56(3), 389-403.
- Siña, M., & Guzmán, J. I. (2018). Real option valuation of open pit mines with two processing methods. *Journal of Commodity Markets*.
- SME. (2011). *SME mining engineering handbook* (Vol. 1). SME.
- Tahernejad, M. M., Ataei, M., & Khalokakaie, R. (2018a). A practical approach to open-pit mine planning under price uncertainty using information gap decision theory. *Journal of Mining and Environment*, 9(2), 527-537.
- Tahernejad, M. M., Khalokakaie, R., & Ataei, M. (2018b). Analyzing the effect of ore grade uncertainty in open pit mine planning; A case study of Rezvan iron mine, Iran. *Int. Journal of Mining & Geo-Engineering*.
- Tolwinski, B. (1998). Scheduling production for open pit mines. *27th Applications of Computers and Operations Research in Minerals Industries*, 168-175.
- Tolwinski, B., & Golosinski, T. S. (1995). Long term open pit scheduler. *Mine Planning and Equipment Selection 1995*, pp. 256 – 270.
- Tolwinski, B., & Underwood, R. (1992, April). An algorithm to estimate the optimal evolution of an open pit mine. In *Proceedings of 23rd APCOM Symposium, University of Arizona* (pp. 399-409).
- Underwood, R., & Tolwinski, B. (1998). A mathematical programming viewpoint for solving the ultimate pit problem. *European Journal of Operational Research*, 107(1), 96-107.

- Upadhyay, S. P., & Askari-Nasab, H. (2018). Simulation and optimization approach for uncertainty-based short-term planning in open pit mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(2), 153-166.
- Wang Q., & Sevim H., (1992). Enhance Production Planning in Open pit Mining Through Intelligent Dynamic Search. *23rd APCOM*, pp. 461-471.
- Wang Q., & Sevim H., (1993). Open pit production planning through pit-generation and pit-sequencing. *Transactions, SME*, Vol. 294, pp. 1968-1972.
- Wang Q., & Sevim H., (1995). Alternativ to Parametrization in Finding a Series of Maximum-Metal Pits for Production Planning, *Mining Engineering Journal*, pp 178-182.
- Wellmer, F. W., Dalheimer, M., & Wagner, M. (2008). Economic evaluations in exploration. Springer Science & Business Media.
- Whittle, J. (1989). The facts and fallacies of open pit optimization. *Whittle Programming Pty Ltd., North Balwyn, Victoria, Australia*, 1-7.
- Whittle, J. (1999). A decade of open pit mine planning and optimization-the craft of turning algorithms into packages. *Proceedings of 28th APCOM symp.*, Golden, Colorado School of Mines, pp. 15-24.
- Wright, A. (1999). MOVING CONE II-A simple algorithm for optimum pit limits design. *Proceedings of the 28rd APCOM*, 367-374.
- Xu, X. C., Gu, X. W., Qing, W. A. N. G., Liu, J. P., & Jun, W. A. N. G. (2014). Ultimate pit optimization with ecological cost for open pit metal mines. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(5), 1531-1537.
- Yegulalp, T. M., & Arias, J. A. (1992, April). A fast algorithm to solve the ultimate pit limit problem. In *23rd International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in The Mineral Industries* (pp. 391-398). Littleton, Co: AIME.
- Zhao Y., & Kim Y.C. (1992). A new optimal pit limit design algorithm. *Proc. of the 23rd APCOM*, 423-434.

Abstract:

Optimization of the final pit limit is one of the most important aspects of the design of open pit mining. In the last decades, there have been two major approaches to determining the final pit limit. The first approach is undiscounted profit maximization and the other is maximizing the NPV of the ultimate pit limit. For each approach, some methods and algorithms are presented. In the first approach, initially, the final pit outline with the aim of maximizing undiscounted profit is determined. Then achievement of the highest net present value (NPV) is planned for the pit production scheduling. Ideally, it is better to optimize the final pit by maximizing NPV rather than profit. The aim of the second method is to maximize NPV so that the optimal long-term production planning of ore blocks is determined immediately. The pit with the highest cumulative NPV will be accepted as the final pit. In the common methodology of open pit design, after ultimate pit determination short/mid/long-term production planning should be determined. In this dissertation, at first the mathematical modelling of optimum ultimate pit determination with NPV maximization was developed. The developed models are nonlinear and some techniques were applied for their linearization. Subsequently, to solve the models three heuristic algorithms were developed. In these algorithms the concepts of economic value, positional weight, nearest ore index and earliest mining time were used to find the extraction sequence of blocks and ultimate pit limit that has the maximum cumulative NPV. The results of the algorithms showed the approximate answers were near optimum.

Key words: Open pit mines, Optimum ultimate pit limit, Net present value, Mathematical modelling, Heuristic algorithms



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D. Thesis in Mining Engineering

Ultimate Pit Limit Determination by Net Present Value (NPV) Maximization

By: Meisan Saleki

Supervisors:

Dr. Reza Kakaie

Dr. Mohammad Ataei

February 2019