بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته‌ی مهندسی معدن گرایش استخراج مواد معدنی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد استخراج مواد معدنی

برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت معادن زیرزمینی با هدف کمینه کردن انحراف از تولید برنامه بلند مدت

(مطالعه موردی: معدن زیرزمینی سرب و روی انگوران)

نگارنده: فرشید باباخانی

اساتید راهنما:

دکتر محمد عطائی

دکتر فرهنگ سرشکی

دی ۱۳۹۸

تقدیم به

همسر مهربانم

به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش برای من فراهم آورده است.

همدلی که با واژه ی نجیب و مغرور تلاش ؛ آشنایی دارد و تلاش راستین را می شناسد و عطر رویایی آن را استشمام می کند و مرا در راه رسیدن به اهداف عالی یاری می رساند.

سپاسگزاری

بدینوسیله مراتب سپاسگزاری خودم را نسبت به راهنمایی‌ها و صبوری استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر محمد عطائی که در این مدت موجبات ارتقاء علمی و اخلاقی بنده را فراهم آوردند ابراز می‌نمایم.

همچنین از جناب آقای دکتر فرهنگ سرشکی، که با اخلاق خود، دوستی، معرفت و مهربانی را به من آموخت.

در انتها نیز از دوست عزیز و همکار خوبم، جناب آقای دکتر مهدی رحمان‌پور، که با شکیبایی فراوان، اینجانب را در تکمیل این پایان‌نامه همراهی نمود، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

تعهدنامه

اینجانب **فرشید باباخانی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته استخراج مواد معدنی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه با موضوع «**برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت معادن زیرزمینی با هدف کمینه کردن انحراف از تولید برنامه بلند مدت (مطالعه موردی: معدن زیرزمینی سرب و روی انگوران)**» تحت راهنمایی دکتر محمد عطائی و دکتر فرهنگ سرشکی 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 بوده‌اند 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:

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

با بالا رفتن مصرف لوازم و مصالح در زندگی روزمره بشر و به تبع آن نیاز به تولید مواد معدنی بیشتر، معادن روباز با سرعت فزاینده‌ای استخراج و به انتهای محدوده اقتصادی خود نزدیک می‌شوند. بنابراین، به ناچار بایستی استخراج زیرزمینی از آن‌ها در دستور کار قرار گرفته و قبل از به اتمام رسیدن ذخایر معادن روباز، برای طراحی و برنامه‌ریزی استخراج به صورت زیرزمینی فکر چاره بود.

در این پروژه، معدن زیرزمینی سرب و روی انگوران انتخاب و برنامه‌ریزی برای تولید سالانه ۱۲۰،۰۰۰ تن ماده معدنی صورت گرفته است. برای انجام این برنامه‌ریزی، از روش‌های مدل‌سازی عددی بهره گرفته شده و با نرم افزار MATLAB حل شده است.

در انتهای حل مسئله‌ی مذکور، مشخص گردید که با اندکی تغییرات در نیروهای معدن و افزایش ظرفیت بچینگ و بتن‌ریزی، می‌توان به تولید ۲۲۰،۰۰۰ تن ماده معدنی سرب و روی در این معدن دست یافت. البته لازم به ذکر است که، این پروژه برای ۲ ماه برنامه‌ی زمان‌بندی ارائه شده است و با افزایش مدت زمان برنامه‌ریزی، می‌توان میزان استخراج بهینه و حداکثری را در این معدن به دست آورد.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت، معدن زیرزمینی، انحراف از تولید

فهرست مطالب

۱- فصل اول: کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- بیان مسئله ۲

۱-۲-۱- برنامه‌ریزی ۳

الف) جانسون ۴

ب) کاوزنس ۵

پ) ماتیسون ۵

ت) هارتمن ۶

ث) وارد و بریتون ۶

ج) استفان ۶

چ) باهاتاچاریا ۷

ح) ربولو ۹

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق ۹

۱-۴- روش تحقیق ۱۱

۱-۵- ساختار پایاننامه ۱۱

۲- فصل دوم: مروری بر پیشینه پژوهش ۱۳

۲-۱- مقدمه ۱۴

۲-۲- برنامه‌ریزی معدنکاری زیرزمینی مس ۱۴

۲-۳- مدلی برای برنامه‌ریزی تولید معادن زیرزمینی زغالسنگ ۱۵
۲-۴- مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای برنامه‌ریزی تولید معادن زیرزمینی ۱۸
۲-۵- برنامه‌ریزی تولید در معدن کرونا ۲۴
۲-۶- بهینه‌سازی برنامه‌ریزی بلند مدت معادن زیرزمینی ۲۸
۲-۷- برنامه‌ریزی در زمینه معادن زیرزمینی ۳۲
۲-۸- راه‌حل برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید کوتاه و بلند مدت معدن زیرزمینی ۳۲
۲-۹- برنامه‌ریزی تولید کوتاه و بلند مدت برای معادن زیرزمینی ۳۸
۲-۱۰- برنامه‌ریزی ریاضی برای بهینه‌کردن ترتیب استخراج در روش تخریب توده‌ای ۴۲
۲-۱۱- برنامه‌ریزی استخراج و پرکردن یک معدن پیچیده زیرزمینی ۴۷
۲-۱۲- برنامه‌ریزی تولید معادن زیرزمینی با لحاظ کردن محدودیت‌های تهویه ۵۱
۲-۱۳- جمع بندی ۵۴
۲-۱۳-۱- محدودیت باربری ۵۴
۲-۱۳-۲- محدودیت ذخیره هر بلوک ۵۴
۲-۱۳-۳- محدودیت حفاری ۵۵
۲-۱۳-۴- محدودیت آتشباری ۵۵
۲-۱۳-۵- محدودیت تهویه ۵۵
۲-۱۳-۶- محدودیت توالی استخراج ۵۵
۲-۱۳-۷- محدودیت توالی پر کردن ۵۶
۲-۱۳-۸- محدودیت ظرفیت و تعداد ماشین‌آلات ۵۶

۲-۱۳-۹- محدودیت مقدار استخراج ماده معدنی ۵۶
۲-۱۳-۱۰- محدودیت انتقال مواد پر کننده ۵۷
۲-۱۳-۱۱- محدودیت دسترسی به مواد پر کننده ۵۷
۲-۱۳-۱۲- محدودیت پرسنل ۵۷
۲-۱۳-۱۳- محدودیت تعداد کارگاه همزمان ۵۷
۲-۱۳-۱۴- محدودیت عیار مورد نیاز ۵۸
۲-۱۳-۱۵- محدودیت اختلاط ۵۸
۲-۱۳-۱۶- محدودیت ایمنی ۵۸
۳- فصل سوم: مطالعه موردی ۶۱
۳-۱- مقدمه ۶۲
۳-۲- معرفی معدن سرب و روی انگوران ۶۲
۳-۳- مشخصات کانسار ۶۳
۳-۴- اکتشافات ۶۴
۳-۵- شکل کانسار ۶۵
۳-۶- کلیات طرح استخراج ۶۶
۳-۶-۱- مقدار ذخیره قابل استخراج در بخش زیرزمینی ۶۶
۳-۶-۲- محدوده مورد طراحی ۶۶
۳-۶-۳- حدود ظرفیت تولید ۶۷
۳-۶-۴- برنامه زمانی کار ۶۸

۳-۶-۵- مشخصات ماده معدنی ۶۸
۳-۷- طرح آماده‌سازی معدن ۶۹
۳-۸- مقدار پیشروی ۷۰
۳-۹- ترابری ۷۰
۳-۹-۱- لودر LHD ۷۰
۳-۹-۲- نوار نقاله، لوکوموتیو و واگن ۷۱
۳-۱۰- پر کردن ۷۲
۳-۱۱- مراحل حفاری و بتن‌ریزی ۷۶
۳-۱۲- کارگاه‌های تراز ۲۷۳۷ ۷۶
۳-۱۳- جمع‌بندی ۷۸
۴- فصل چهارم: مبانی ۷۹
۴-۱- مقدمه ۸۰
۴-۲- تعریف تحقیق در عملیات (OR) ۸۰
۴-۲-۱- ویژگی‌های اساسی تحقیق در عملیات ۸۱
۴-۳- فرآیند تصمیم‌گیری و حل مسائل تحقیق در عملیات ۸۱
۴-۳-۱- گام اول- تعریف مسئله ۸۲
۴-۳-۲- گام دوم- فرموله‌کردن ۸۲
۴-۳-۳- گام سوم- مدل‌سازی ۸۳
۴-۳-۴- گام چهارم- جمع‌آوری داده‌ها ۸۳

۴-۳-۵- گام پنجم- حل مدل ۸۳
۴-۳-۶- گام ششم- اعتبار مدل و تحلیل حساسیت ۸۳
۴-۳-۷- گام هفتم- تفسیر نتایج ۸۴
۴-۳-۸- گام هشتم- تصمیم‌گیری و اجرا ۸۴
۴-۴- مدل‌سازی مسائل ۸۴
۴-۵- برنامه‌ریزی خطی (LP) ۸۵
۴-۵-۱- بخش‌های اصلی مدل برنامه‌ریزی خطی ۸۵
۴-۵-۲- مدل عمومی برنامه‌ریزی خطی ۸۷
۴-۶- تعریف پارامترها و متغیرها ۸۸
۵- فصل پنجم: مدل‌سازی ۹۱
۵-۱- مقدمه ۹۲
۵-۲- مدل‌سازی ۹۲
۵-۲-۱- تابع هدف: ۹۴
۵-۲-۲- متغیرهای تصمیم: ۹۵
۵-۲-۳- محدودیت‌ها: ۹۵
۵-۳- فرضیات حل مدل ۱۰۲
۵-۳-۱- تولید برنامه‌ریزی شده ۱۰۲
۵-۳-۲- وزن مخصوص ۱۰۲
۵-۳-۳- کارگاه‌های استخراجی ۱۰۲

۵-۳-۴- پیشروی در هر سیکل ۱۰۵
۵-۳-۵- متغیرهای تصمیم استخراج ۱۰۶
۵-۳-۶- متغیرهای تصمیم پر کردن ۱۰۸
۵-۳-۷- بارگیری و باربری ۱۱۰
۵-۳-۸- لنگه ایمنی ۱۱۰
۵-۴- حل مسئله ۱۱۱
۵-۴-۱- برنامه‌ریزی تولید سالانه ۱۲۰،۰۰۰ تن ۱۱۲
۵-۴-۲- برنامه‌ریزی تولید سالانه ۱۵۰،۰۰۰ تن ۱۱۴
۵-۴-۳- برنامه‌ریزی تولید سالانه ۱۸۰،۰۰۰ تن ۱۱۶
۵-۴-۴- برنامه‌ریزی تولید سالانه ۲۰۰،۰۰۰ تن ۱۱۸
۵-۴-۵- برنامه‌ریزی تولید سالانه ۲۲۰،۰۰۰ تن ۱۲۰
۶- فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۲۳
۶-۱- نتیجه‌گیری ۱۲۴
۶-۲- پیشنهادات ۱۲۵
۷- منابع ۱۲۷

فهرست شکل‌ها

شکل ۳-۱: موقعیت معدن انگوران ۶۳

شکل ۳-۲: شکل کلی کانسار انگوران، تونل ها و رمپ حفر شده در بخش زیرزمینی..... ۶۵

شکل ۳-۳: پلان ماده معدنی به همراه تونل‌های آماده‌سازی تراز ۲۷۴۰..... ۶۸

شکل ۳-۴: LHD مورد استفاده در معدن برای بارگیری و باربری..... ۷۱

شکل ۳-۵: نوار نقاله برای حمل مواد معدنی استخراج شده..... ۷۲

شکل ۳-۶: بچینگ در انتهای تونل ۲..... ۷۴

شکل ۳-۷: محل قرار گیری تأسیسات بچینگ و مسیر انتقال بتن ۷۵

شکل ۳-۸: کارگاه‌های استخراجی تراز ۲۷۳۷..... ۷۷

شکل ۵-۱: تنوع ماده معدنی در یک کارگاه..... ۹۳

شکل ۵-۲: پهنه انتخابی برای برنامه‌ریزی تولید..... ۱۰۳

فهرست جداول

جدول ۱-۱: تأثیر داده‌های مختلف بر روی انواع برنامه ۸

جدول ۳-۱: ذخیره قابل استخراج در بخش زیرزمینی به تفکیک ماده معدنی..... ۶۶

جدول ۳-۲: برنامه استخراج معدن زیرزمینی به تفکیک سال و تراز استخراجی ۶۷

جدول ۳-۳: مشخصات حفاری‌های انجام شده..... ۶۹

جدول ۳-۴: مقدار پیشروی در مواد معدنی مختلف..... ۷۰

جدول ۵-۱: وزن مخصوص مواد معدنی مختلف..... ۱۰۲

جدول ۵-۲: مشخصات کارگاه‌های استخراجی در پهنه جنوبی تراز ۲۷۳۷..... ۱۰۳

جدول ۵-۳ :متغیرهای تصمیم استخراج..... ۱۰۶

جدول ۵-۴ :متغیرهای تصمیم پر کردن..... ۱۰۹

جدول ۵-۵: مشخصات برنامه‌ریزی برای تولید ۱۲۰،۰۰۰ تن ماده معدنی ۱۱۲

جدول ۵-۶: برنامه‌ریزی استخراج برای ۱۲۰،۰۰۰ تن تولید سالانه..... ۱۱۳

جدول ۵-۷: برنامه‌ریزی پرکردن برای ۱۲۰،۰۰۰ تن تولید سالانه..... ۱۱۳

جدول ۵-۸: مشخصات برنامه‌ریزی برای تولید ۱۵۰،۰۰۰ تن ماده معدنی ۱۱۴

جدول ۵-۹: برنامه‌ریزی استخراج برای ۱۵۰،۰۰۰ تن تولید سالانه..... ۱۱۵

جدول ۵-۱۰: برنامه‌ریزی پرکردن برای ۱۵۰،۰۰۰ تن تولید سالانه..... ۱۱۵

جدول ۵-۱۱: مشخصات برنامه‌ریزی برای تولید ۱۸۰،۰۰۰ تن ماده معدنی..... ۱۱۶

جدول ۵-۱۲: برنامه‌ریزی استخراج برای ۱۸۰،۰۰۰ تن تولید سالانه..... ۱۱۷

جدول ۵-۱۳: برنامه‌ریزی پرکردن برای ۱۸۰،۰۰۰ تن تولید سالانه..... ۱۱۷

جدول ۵-۱۴: مشخصات برنامه‌ریزی برای تولید ۲۰۰،۰۰۰ تن ماده معدنی..... ۱۱۸

جدول ۵-۱۵: برنامه‌ریزی استخراج برای ۲۰۰،۰۰۰ تن تولید سالانه..... ۱۱۹

جدول ۵-۱۶: برنامه‌ریزی پرکردن برای ۲۰۰،۰۰۰ تن تولید سالانه..... ۱۱۹

جدول ۵-۱۷: مشخصات برنامه‌ریزی برای تولید ۲۲۰،۰۰۰ تن ماده معدنی ۱۲۰
جدول ۵-۱۸: برنامه‌ریزی استخراج برای ۲۲۰،۰۰۰ تن تولید سالانه ۱۲۱
جدول ۵-۱۹: برنامه‌ریزی پرکردن برای ۲۲۰،۰۰۰ تن تولید سالانه ۱۲۱
جدول ۶-۱- خلاصه برنامه‌ریزی میزان تولید مختلف ۱۲۴

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

در معادن روباز، برنامه‌ریزی تولید پس از تعیین محدوده نهایی معدن با توجه به اهداف مورد نظر مشخص می‌شود. اما در معادن زیرزمینی، علی‌الخصوص توده‌ای که تعداد زیادی کارگاه وجود داشته و ترتیب خاصی برای استخراج تعیین نمی‌شود، به صورت تجربی بلوک‌ها انتخاب و استخراج صورت می‌گیرد.

در معادن زیرزمینی بر خلاف معادن روباز، به دلیل وجود محدودیت‌های متنوع، میزان تولید نیز محدود خواهد بود. از جمله این محدودیت‌ها، می‌توان به محدودیت استفاده از ماشین‌آلات بارگیری و باربری با ظرفیت‌های زیاد، آتشباری، تهویه و ترابری اشاره کرد. بنابراین، برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت که راهی برای رسیدن به اهداف برنامه‌ریزی بلند مدت است، بایستی به دقت صورت پذیرد. در این راستا، ترتیب استخراج کارگاه‌ها با توجه به محدودیت‌های معدن‌کاری زیرزمینی مشخص می‌شود.

۱-۲- بیان مسئله

در معادن روباز، پس از مشخص شدن محدوده نهایی معدن، برنامه‌ریزی تولید به صورت دوره‌ای (معمولاً سالانه) صورت می‌گیرد. سپس با توجه به راه‌های دسترسی و رسیدن به هدف مورد انتظار، ترتیب استخراج بلوک‌ها مشخص می‌شود. اما در معادن زیرزمینی، علی‌الخصوص توده‌ای که تعداد زیادی کارگاه وجود داشته و ترتیب خاصی برای استخراج تعیین نمی‌شود، به صورت تجربی بلوک‌ها انتخاب شده و استخراج صورت می‌گیرد. در معادن زیرزمینی بر خلاف معادن روباز، به دلیل وجود محدودیت‌های متنوع میزان تولید نیز محدود خواهد بود. بنابراین، برنامه‌ریزی برای تولید مقدار مشخصی از ماده معدنی با عیار خاص، با توجه به نیاز بازار، بایستی مدنظر قرار گرفته شود.

۱-۲-۱- برنامه‌ریزی[۱]

به طور کلی ذخایر معدنی به دو صورت سطحی[۲] یا زیرزمینی[۳] یا ترکیبی از هر دو روش استخراج می‌شوند. برنامه‌ریزی با اهداف مختلف در معادن سطحی به طور گسترده‌ای انجام شده است اما در روش‌های زیرزمینی این برنامه‌ریزی که منجر به بهینه‌سازی طرح استخراج باشد جایگاه خود را پیدا نکرده است. هدف از برنامه‌ریزی در معادن سطحی، تهیه برنامه‌ی تولید سالانه است که به موجب آن می‌توان به یکی از اهداف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی[۴]، بیشینه کردن سود یا بیشینه کردن عمر معدن رسید.

پلان[۵] یا برنامه به طرح یا چارچوبی اطلاق می‌شود که برای دسترسی به هدف مشخص یا انجام کاری تهیه و تنظیم می‌شود. روش پیشنهادی در برنامه برای دسترسی به هدف یا انجام کاری باید از میان گزینه‌های متعددی که توسط تکنیک‌های موجود در بخش علوم و مهندسی ارائه می‌شوند انتخاب شود. این روش یا تصمیم از نظر فنی و اقتصادی باید بهترین روش یا تصمیم‌گیری برای انجام کار باشد. به این روند، برنامه‌ریزی گفته می‌شود. برنامه‌ریزی برای یک دوره خاص انجام می‌گیرد. لذا میزان دقت برنامه به کمیت و کیفیت داده‌های مربوط به آن دوره خاص وابسته است [۱].

برنامه‌ریزی شامل ۵ بخش می‌شود که عبارتند از:

۱) تعیین اهداف کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلند مدت
۲) جمع‌آوری داده
۳) طبقه‌بندی و فرموله کردن مساله

---

[۱] Planning
[۲] Open pit Mine
[۳] Underground Mine
[۴] NPV
[۵] Plan

۴) شناسایی روش‌هایی که قابلیت دسترسی به اهداف را فراهم می‌کنند

۵) پیگیری مراحل تا انتخاب بهترین روش برای دسترسی به هدف اصلی در دوره مورد نظر

تعاریف مختلفی در خصوص برنامه‌ریزی در معادن آمده است، از جمله مهمترین آن‌ها می‌توان به جانسون[۱] (۱۹۶۸)، کاوزنس[۲] (۱۹۷۹)، ماتیسون[۳] (۱۹۸۲)، هارتمن[۴] (۱۹۸۷)، وارد و بریون[۵] (۱۹۹۲)، استفان[۶] (۱۹۹۷)، باهاتاچاریا[۷] (۲۰۰۳) و ربولو[۸] (۲۰۰۹) اشاره کرد. اکثر این تعاریف، بر اساس برنامه‌ریزی بلند مدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت یا اجرایی تقسیم‌بندی شده‌اند. هر کدام از این برنامه‌ریزی‌ها با توجه به اهدافی تعیین می‌شوند. برای نمونه در برنامه‌ریزی بلند مدت، اهدافی مانند بیشینه کردن میزان استخراج ماده معدنی و بیشینه کردن NPV مطرح می‌شود. در برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت، مسائلی مانند میزان خوراک مورد نیاز کارخانه یا مقدار تقاضا مدنظر قرار می‌گیرد. برنامه‌ریزی میان‌مدت نیز، برنامه‌ای ارتباطی برای رسیدن از برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت به بلند مدت است. تعاریف مختلفی برای برنامه‌ریزی تولید معادن ارائه شده است که در زیر به بیان برخی از آن‌ها اشاره می‌شود:

الف) جانسون

جانسون (۱۹۶۸) برنامه‌ریزی معادن را به سه گروه بلند مدت، کوتاه‌مدت و عملیاتی تقسیم‌بندی کرده است. در مواقعی نیز یک برنامه‌ریزی میان‌مدت برای هماهنگی بین برنامه بلند مدت و کوتاه‌مدت تهیه می‌شود. برنامه‌ریزی بلند مدت برای تمام عمر معدن تهیه شده و آغاز کننده برنامه‌ریزی تولید

---

[۱] Johnson
[۲] Couzens
[۳] Mathieson
[۴] Hartman
[۵] Ward, Britton
[۶] Steffen
[۷] Bhattacharya
[۸] Rebollo

معدن است. این نوع از برنامه‌ریزی جامع‌ترین برنامه برای یک معدن است. از این برنامه به عنوان یک راهنما برای تحلیل اقتصادی معدن، جانمایی تأسیسات سطحی و تعیین پتانسیل اقتصادی معدن استفاده می‌شود. برنامه‌ی کوتاه‌مدت برای بازه‌های ۳ تا ۵ سال و گاهی ۱۰ سال با گام‌های یک ساله تهیه می‌شود. برنامه اجرایی یا عملیاتی بر اساس آخرین برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت و با توجه به شرایط موجود معدن برای دوره‌های کمتر از یک سال و گام‌های شش ماهه، ماهانه، هفتگی و روزانه تهیه می‌شود [۲].

ب) کاوزنس

بر اساس نظر کاوزنس (۱۹۷۹)، برنامه‌ریزی تولید منطبق با دو دوره یا فاصله زمانی مختلف وجود دارد. برنامه‌ریزی تولید عملیاتی یا کوتاه‌مدت، که برای عملیات یک معدن در حال کار ضروری است و برنامه‌ریزی بلند مدت، که اغلب برای مطالعات امکان‌سنجی یا بودجه‌ای انجام می‌گیرد. این برنامه‌ریزی جزء مهمی در فرآیند تصمیم‌گیری است [۳].

پ) ماتیسون

بر اساس نظریه ماتیسون (۱۹۸۲) اهداف اصلی برنامه‌ریزی تولید عبارتند از [۴]:

- استخراج ماده معدنی به نحوی که هزینه تولید هر واحد محصول در هر سال، حداقل ممکن باشد.
- حفظ قابلیت تداوم عملیاتی طرح، از طریق آماده بودن فضای عملیاتی کافی برای ماشین‌آلات، راه‌های دسترسی باربری و ...
- در دسترس قرار دادن کانسنگ به میزان کافی به عنوان تضمینی برای جبران یا مقابله با احتمال تخمین‌های نادرست از تناژ و عیار کانسنگ در مدل ذخیره

- تهیه یک برنامه زمان‌بندی راه‌اندازی منطقی و عملی قابل دسترس، با در نظر گرفتن آموزش نیروی انسانی، فعالیت‌های اولیه آماده‌سازی، تأمین و به‌کارگیری تجهیزات، تأسیسات و تسهیلات زیربنایی و پشتیبانی تدارکاتی
- بررسی کامل مزیت‌های اقتصادی برای گزینه‌های مختلف نرخ تولید و عیار حد
- مطالعه و بررسی جامع استراتژی پیش‌بینی شده برای معدنکاری، انتخاب ماشین‌آلات و تجهیزات و طرح آماده‌سازی به منظور برنامه‌ریزی پیشامدهای احتمالی

ت) هارتمن

هارتمن در سال ۱۹۸۷ برنامه‌ریزی معادن روباز را به دو صورت بلند مدت و کوتاه مدت تعریف کرده است. برنامه‌ریزی بلند مدت با هدف تعیین محدوده نهایی و شکل نهایی معدن تهیه می‌شود. سپس با تعدادی برنامه کوتاه مدت مسیر و گام‌های رسیدن به هدف نهایی را مشخص می‌کند [۵].

ث) وارد و بریتون

وارد و بریتون (۱۹۹۲) برنامه‌ریزی معادن را به برنامه‌های بلند مدت، میان‌مدت، کوتاه‌مدت و اجرایی تقسیم بندی کرده‌اند. این تقسیم بندی بر اساس زمان و طول دوره هر برنامه صورت گرفته است. آنها بر این باورند که این نوع طبقه‌بندی به علت وجود همپوشانی برخی از برنامه‌ها تا حدودی گنگ است و لذا این برنامه‌ها بر اساس تعاریف هر شرکت می‌تواند متفاوت باشد [۶].

ج) استفان

استفان (۱۹۹۷)، برنامه‌ریزی معادن را با هدف تامین تناژ مورد نیاز در هر سال تعریف کرده است. این تعریف، برنامه‌ریزی را در سه قالب (۱) برنامه تمام عمر معدن، (۲) برنامه بلند مدت و (۳) برنامه کوتاه مدت تقسیم‌بندی کرده است. هر یک از این برنامه‌ها با داشتن سطح ریسکی متفاوت، متأثر از هم هستند. در برنامه تمام عمر معدن، در مورد روش استخراج و تعیین ذخیره قابل استخراج با در نظر

گرفتن گزینه‌های مختلف تصمیم‌گیری می‌شود [۷ و ۸].

چ) باهاتاچاریا

بر اساس تعریف باهاتاچاریا (۲۰۰۳)، برنامه‌ریزی معادن در قالب ۵ طرح ارائه می‌شود [۱]:

- برنامه مفهومی[۱]

برنامه مفهومی به منظور ترسیم چارچوب فعالیت‌های معدن‌کاری برای سایر برنامه‌های معدن تهیه می‌شود و طولانی‌ترین دیدگاه را در مورد فعالیت‌های معدنی و مستقل از اهداف کوتاه‌مدت ارائه می‌دهد. در این برنامه حداکثر پتانسیل سایت از نظر گسترش ماده معدنی و استخراج مورد مطالعه و ارزیابی قرار می‌گیرد. مطالعات مفهومی به ازاء هر ۲۰ سال تجدید نظر می‌شود و برای یک دوره تا ۶۰ سال تهیه و میزان خطای آن ۵۰ درصد است.

- برنامه بلند مدت [۲]

برنامه بلند مدت به منظور استخراج ماده معدنی و فرآوری آن برای یک دوره ۱۰ تا ۲۰ سال تهیه می‌شود. لذا حجم اطلاعات و جزئیات آن به مراتب زیادتر از داده‌های برنامه مفهومی است. برنامه بلندمدت به ازاء هر ۵ تا ۱۰ سال باید تجدید نظر شود و میزان خطای آن ۲۵ درصد است.

- برنامه میان‌مدت[۳]

برنامه میان‌مدت برای یک دوره ۵ تا ۱۰ ساله تهیه می‌شود و ماهیتی اختصاصی دارد. ممکن است شامل بخشی از معدن مثلاً منطقه ویژه از نظر عیار، هیدرولوژی، ژئوتکنیکی شود یا اختصاص به جایگزینی ماشین‌آلات و تجهیزات معدن پیدا کند. در این برنامه اطلاعات از دقت و جزئیات بیشتری برخوردارند. برنامه میان‌مدت به ازای هر ۵ سال و در صورت نیاز در کمتر از این دوره قابل تجدید نظر

[۱] Conceptual plans

[۲] Long range plans

[۳] Intermediate range plans

بوده و میزان خطای آن ۱۵ درصد است.

- برنامه کوتاه‌مدت [1]

برنامه کوتاه‌مدت برای یک دوره یک یا چند ماهه تا ۵ سال تهیه می‌شود و برنامه‌ای است که با زمان اجرا فاصله کمی دارد و با توجه به امکانات موجود و موانع پیش‌رو تهیه می‌شود. بر همین اساس داده‌ها جزئی‌تر از برنامه بلند مدت و میان‌مدت و به واقعیت نزدیک‌ترند. اما برنامه کوتاه‌مدت باید در راستای میان‌مدت و بلند مدت تهیه و اجرا شود. در برنامه کوتاه‌مدت باید مشکلات اجرایی پیش‌رو دیده شوند و راه حل نیز ارائه شود. برنامه باید بخش بسیار محدود و خاص از معدن مثل استخراج از بلوک را پوشش دهد و خطای برنامه کوتاه‌مدت ۵ درصد و به ازای هر دو سال قابل تجدید نظر می‌باشد. جدول ۱-۱ تأثیر داده‌های مختلف در تهیه برنامه‌های مفهومی، بلند مدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱: تأثیر داده‌های مختلف بر روی انواع برنامه [۱]

نوع داده	مفهومی	بلند مدت	میان‌مدت	کوتاه‌مدت
زمین‌شناسی	زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد
هیدرولوژی	کم	متوسط	متوسط	زیاد
ژئوتکنیک	متوسط	زیاد	زیاد تا خیلی زیاد	خیلی زیاد
اقتصادی	متوسط	خیلی زیاد	خیلی زیاد	زیاد
محیط زیستی	کم	کم تا متوسط	زیاد	خیلی زیاد
عمران، مکانیک، برق	کم	کم تا متوسط	زیاد	زیاد
تحقیق در عملیات	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد
مهندسی معدن	گروهی که با جمع‌آوری داده‌ها اقدام به برنامه‌ریزی خواهند کرد			

[1] Short range plans

- برنامه روزانه

برنامه روزانه معدن بر اساس چارچوب برنامه کوتاه‌مدت و برای تأمین نیازهای روزانه معدن و کارخانه تهیه و تنظیم می‌شود. در تهیه این برنامه شرایط روزانه معدن مثل دسترسی به ماشین‌آلات، نیروی انسانی، شرایط جوی و اتفاقات غیر قابل پیش‌بینی مؤثرند. ضمن آنکه در کلیه برنامه‌ها، هدف اصلی کاهش هزینه تولید و کسب درآمد بیشتر است. اما در برنامه روزانه این قاعده می‌تواند مستثنی شود و عملکرد روزانه تأثیر کمی در چارچوب سایر برنامه‌های معدن دارد.

ح) ربولو

ربولو در سال ۲۰۰۹ برنامه‌ریزی معادن را از نظر زمانی به دو نوع بلند مدت و کوتاه مدت تقسیم می‌کند. برنامه بلند مدت برنامه‌ای برای آماده شدن برای آینده است. این برنامه یک برنامه جامع بوده و آینده‌نگری شرکت را نمایان می‌سازد. از سوی دیگر، برنامه کوتاه مدت برای بازه‌های یک ساله تهیه می‌شود و لذا برنامه‌ای است برای حال حاضر معدن. این برنامه در چارچوب برنامه بلند مدت و در شرایط فعلی پروژه تهیه می‌شود. علاوه بر برنامه بلند مدت و کوتاه‌مدت، برنامه میان‌مدت نیز برای دوره‌های ۵ تا ۱۰ سال تهیه می‌شود. این برنامه به نوعی ارتباط بین برنامه بلند مدت و کوتاه‌مدت نیز است [۹].

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

معادن سطحی ایران روز به روز در حال عمیق‌تر شدن هستند. بنابراین با توجه به بالا رفتن هزینه‌های تولید، معادن روباز غیر اقتصادی شده و به ناچار این گونه معادن به معادن زیرزمینی تبدیل می‌شوند. در چند دهه اخیر، فعالیت‌های زیادی در خصوص بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز انجام شده ولی در زمینه برنامه‌ریزی تولید در معادن زیرزمینی مطالعات بسیار کمی صورت گرفته است.

همانطور که قبل گفته شد، معادن روباز در حال تبدیل شدن به معادن زیرزمینی هستند. بنابراین، با توجه به وجود برنامه‌ریزی بلند مدت برای استخراج از معادن زیرزمینی، بایستی برنامه‌ریزی در این معادن به گونه‌ای صورت پذیرد تا کمترین انحراف از تولید برنامه‌ریزی شده با توجه به محدودیت‌های اجرایی عملیات استخراج زیرزمینی حاصل شود. اکثر معادن قدیمی ایران مثل انگوران، دارای کارخانه‌های فراوری هستند که خوراکشان از طریق همان معدن تأمین می‌شود بنابراین اگر چه پس از تعطیلی بخش روباز، بخش زیرزمینی قادر به تولید مانند بخش روباز نخواهد بود اما لازم است که میزان تولید برنامه‌ریزی شده را با حداقل انحراف برآورده سازند. بنابراین ضرورت دارد تا برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت و اجرایی برای معادن زیرزمینی تهیه شود.

معادن زیرزمینی دارای کارگاه‌های استخراج فراوانی هستند. بنابراین، بایستی برنامه‌ای با توجه به امکانات و محدودیت‌های هر معدن نوشته شود. با انجام این پروژه می‌توان اولویت و ترتیب استخراج از کارگاه‌ها را برای رسیدن به تولید برنامه‌ریزی شده، مشخص نمود.

هدف از انجام این پروژه و تحقیق، به دست آوردن روشی برای تعیین اولویت کارگاه‌های معادن زیرزمینی برای استخراج است. این اولویت بندی و برنامه‌ریزی تولید، بر اساس محدودیت‌های عملیاتی موجود در معادن زیرزمینی صورت می‌پذیرد. هدف این برنامه‌ریزی، که به صورت برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت مورد استفاده قرار می‌گیرد، کمینه کردن انحراف از تولید برنامه‌ریزی شده در طراحی بلندمدت معدن است.

معدن زیرزمینی سرب و روی انگوران، ذخیره‌ای توده‌ای شکل بوده و در هر تراز دارای کارگاه‌های استخراجی بسیاری می‌باشد، روش استخراج به صورت کند و آکند و کارگاه‌های استخراجی به بتن پر می‌شوند. اما، هم اکنون این کار بدون برنامه‌ریزی دقیق و به صورت کاملاً اتفاقی و فقط با رعایت کردن فاصله ایمنی بین کارگاه‌ها انجام می‌شود.

بنابراین یک برنامه‌ریزی تولید دقیق برای رسیدن به هدف برنامه‌ریزی شده تولید سالانه مورد نیاز

بود که در این پروژه به انجام آن پرداخته شده است.

۱-۴- روش تحقیق

مراحل انجام تحقیق به صورت زیر است:

- مطالعه طرح فعلی معدن
- فرموله کردن هدف پروژه (حداقل کردن انحراف از تولید برنامه بلند مدت)
- شناسایی عوامل محدود کننده اجرایی
- مدل‌سازی محدودیت‌های طرح
- حل مسأله و مشخص کردن محدودیت‌های موثر
- بررسی محدودیت‌های موثر از نظر فنی و تصحیح آنها در صورت امکان
- حل مسأله و مشخص کردن کارگاه‌های لازم برای استخراج و رسیدن به هدف پروژه

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

پژوهش حاضر به ۷ فصل تقسیم‌بندی شده است. در فصل اول به بیان کلیات مسئله از قبیل تعریف مسئله، ضرورت انجام تحقیق و روش انجام آن پرداخته شده است. در فصل دوم مروری بر مطالعات مهم در زمینه برنامه‌ریزی معادن زیرزمینی انجام شده و نتایج برخی از این مطالعات آورده شده است. در فصل سوم برای آشنایی بیشتر و بهتر با مطالعه موردی انتخاب‌شده، موقعیت جغرافیایی، اطلاعات زمین‌شناسی، مطالعات آماری و دلایل انتخاب مطالعه موردی مورد بحث قرار گرفته است. در فصل چهارم مبانی نظری مدل‌سازی و در فصل پنجم مدل‌سازی پروژه بیان شده است. در فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای مطالعات بعدی و فصل هفتم نیز منابع مورد استفاده ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر پیشینه پژوهش

۲-۱- مقدمه

در فصل ۱، برنامه‌ریزی تولید به طور مختصر از دیدگاه برخی صاحب‌نظران بخش معدن، بیان شد. در ادامه، به بررسی مقالات در زمینه برنامه‌ریزی تولید در معادن زیرزمینی با توجه به پارامترهای محدود کننده عملیات معدنکاری در برنامه‌ریزی تولید، پرداخته می‌شود.

۲-۲- برنامه‌ریزی معدنکاری زیرزمینی مس

ویلیامز و همکارانش[۱] (۱۹۷۳) یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید معادن زیرزمینی ارائه کرده‌اند. روش پیشنهادی آن‌ها برای کاهش اختلاط و کاهش هزینه‌های تولید مؤثر است [۱۰]. در این مقاله، هدف و اصلی‌ترین محدودیت‌های زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

هدف: برطرف کردن نوسان ماه به ماه در تناژ معدنکاری برای هر سینه‌کار.

(۱-۲)

$$Min \sum_{I} \sum_{J=۱}^{۱۲} |ORE(I,J) - ORE(I,J-۱)|$$

محدودیت‌ها:

ماده معدنی هدف

(۲-۲)

$$\sum_{I} ORE(I,J) = T_J \text{ for all } J$$

محدودیت ماده معدنی

(۳-۲)

$$\sum_{J} ORE(I,J) \leq L_I$$

[۱] Williams JK, Smith L, Wells PM

محدودیت پروفیل

(۴-۲)

$$\sum_{J=1}^{N} ORE(I,J)$$

و

(۵-۲)

$$D_I = F_I \times \sum_{J=1}^{N} ORE(I,J)$$

(۶-۲)

$$D_{I+1} = F_{I+1} \times \sum_{J=1}^{N} ORE(I+1,J)$$

(۷-۲)

$$G_I + D_I - D_{I+1} \geq P_I$$

۲-۳- مدلی برای برنامه‌ریزی تولید معادن زیرزمینی زغالسنگ

ادوارد لی[1] (۱۹۸۸) رساله دکتری خود را در زمینه برنامه‌ریزی تولید معادن زیرزمینی زغال‌سنگ انجام داد. دو مدل برنامه‌ریزی خطی در این رساله توضیح داده شده است. مدل اول برای برنامه‌ریزی تولید ماهانه و مدل دوم برای برنامه‌ریزی تولید هفتگی و اختلاط محصولات تولیدی برای دستیابی به دپوهای ماده معدنی با کیفیت مناسب. اهداف این دو مدل، کمینه کردن هزینه‌های تولید بوده است [۱۱]. در این رساله، هدف و اصلی‌ترین محدودیت‌های زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

[1] Lee, E

هدف:

کمینه کردن هزینه‌های تولید

(۸-۲)

$$\text{Min}\left\{\text{TCOST} = \sum_{k=1}^{K} \text{TC}(k)\right\}$$

محدودیت‌ها:

برای تعیین هر یک از برنامه‌های تولید ماهانه معدن، باید پنج محدودیت زیر رعایت شود.

۱) تولید در یک بازه زمانی به علاوه موجودی پایان یافته دوره زمانی قبلی، حداقل باید تقاضای موجودی و موجودی آن دوره را برآورده کند.

(۹-۲)

$$P(k,t) = r(k,t) + I(k,t) - I(k,t-1) \quad \forall k, \quad \forall t$$

۲) تولید ماهانه در یک معدن نمی‌تواند از ظرفیت ماهانه آن معدن فراتر رود.

(۱۰-۲)

$$P(k,t) \leq C(k,t) \quad \forall k, \quad \forall t$$

۳) موجودی نمی‌تواند از حداکثر مقدار مشخص شده تجاوز کند.

(۱۱-۲)

$$I(k,t) \leq B(k,t) \quad \forall k, \quad \forall t$$

۴) موجودی باید همیشه از حداقل سطح ذخیره مشخص شده فراتر رود.

(۱۲-۲)

$$I(k,t) \geq b(k,t) \quad \forall k, \quad \forall t$$

۵) مجموع سطح تولید ماهانه و موجودی ترازها در تمام دوره‌های زمانی t باید از معدن مورد نیاز در طی دوره زمانی T برآورده یا فراتر رود.

(۱۳-۲)

$$R(k) = \sum_{t=1}^{T} r(k,t) \qquad \forall k$$

متغیرها:

r(k,t): نیاز استخراج از معدن k در دوره t

P(k,t): تراز تولیدی معدن k در دوره t

I(k,t): تراز موجودی از معدن k در دوره t

C(k,t): حداکثر ظرفیت خروجی ماهانه از معدن k در دوره t

B(k,t): حداکثر ذخیره قابل دسترسی از معدن k در دوره t

b(k,t): حداقل ذخیره تراز مورد نظر از معدن k در دوره t

c(k): هزینه تولید یک تن از معدن k

h(k): هزینه حفظ ذخیره یک تن از معدن k

R(k): نیاز تولید معدن k، بیش از افق برنامه‌ریزی شده

(۱۴-۲)

$$R(k) = \sum_{t=۱}^{۱۲} r(k,t)$$

TC(k): تمامی هزینه‌های تامین نیازهای R(k) برای معدن k و

TCOST تمام هزینه‌های تولیدی نیازهای معدن k و حفظ ترازهای ذخیره k.

(۱۵-۲)

$$TCOST = \sum_{k=۱}^{K} TC(k)$$

که در آن کل هزینه تولید مورد نیاز R(k) برابر است با معادله زیر:

(۱۶-۲)

$$TC(k) = \sum_{t=۱}^{T} [c(k)P(k,t) + h(k)I(k,t)] \qquad \forall k$$

۲-۴- مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای برنامه‌ریزی تولید معادن زیرزمینی

تروت[۱] (۱۹۹۵) مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلطی برای برنامه‌ریزی تولید معادن زیرزمینی به روش ترکیبی استخراج از طبقات فرعی و روش کند و آکند ارائه کرد. با اجرای این برنامه در یک معدن با ۵۵ کارگاه فعال توانست باعث افزایش ۲۳ درصدیNPV شود [۱۲]. در این مقاله، هدف و اصلی‌ترین محدودیت‌های زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

هدف:

بیشینه کردن NPV

[۱] Trout, L

(۱۷-۲)

$$\text{Max} \sum_{i=1}^{I} \sum_{t=EES_i}^{ELF_i} \sum_{m=1}^{M} N_t . S_{mt} . G_{im} . W_{mt} . e_{it} - \sum_{i=1}^{I} \sum_{t=EES_i}^{ELF_i} N_t . VE_i . e_{it} - \sum_{i=1}^{I} \sum_{t=EES_i}^{ELS_i} N_t . FE_i . v_{it}$$
$$- \sum_{i=1}^{I} \sum_{t=FES_i}^{FLF_i} \sum_{z=1}^{Z} N_t . VF_i . f_{zit} - \sum_{i=1}^{I} \sum_{t=FES_i}^{FLF_i} \sum_{z=1}^{Z} N_t . FF_i . w_{it}$$

که جمله دوم، کاهش هزینه‌های متغیر استخراج، جمله سوم، کاهش هزینه‌های ثابت استخراج، جمله چهارم، کاهش هزینه متغیر پر کردن و جمله پنجم، کاهش هزینه ثابت پر کردن را منتج خواهد شد.

متغیرها:

انتخاب متغیرها، اطلاعات مورد نیاز برای برنامه را نشان داد. راه حل بهینه، مقادیر عددی را به متغیرهای تصمیم‌گیری اختصاص داده و سپس به اطلاعات معنی‌دار که از آن زمان برنامه تهیه شد، تبدیل شده است. باینری زیر (صفر و یک) و متغیرهای پیوسته مورد استفاده قرار گرفت.

a_{it}
- ۱ اگر استخراج از کارگاه i در دوره زمانی t برنامه‌ریزی شده باشد.
- ۰ در غیر اینصورت

b_{it}
- ۱ اگر کارگاه i در دوره زمانی t خالی باشد.
- ۰ در غیر اینصورت

c_{it}
- ۱ اگر پر کردن کارگاه i در دوره زمانی t برنامه‌ریزی شده باشد.
- ۰ در غیر اینصورت

v_{it} ۱ اگر استخراج از کارگاه i در دوره زمانی t آغاز شده باشد.

۰ در غیر اینصورت

فرمول اطمینان داد که ارزش این متغیر همیشه باینری می‌باشد و بنابراین v_{it} به عنوان یک متغیر پیوسته تعریف شد.

w_{it} ۱ اگر پر کردن کارگاه i در دوره زمانی t شروع شده باشد.

۰ در غیر اینصورت

باز هم فرمول اطمینان داد که این متغیر یا صفر یا یک باشد و بنابراین wit به عنوان یک متغیر پیوسته تعریف شده است.

e_{it} تناژ ماده معدنی از کارگاه i در دوره زمانی t (تن). راه حل بهینه تنها مقادیر غیر صفر را برای این متغیر مرتبط می‌کند زمانی که متغیر استخراج کارگاه (a_{it}) در یک دوره زمانی مشابه غیر صفر باشد.

fz_{it} مقدار اجزای پر کننده z مورد نیاز برای کارگاه i در دوره زمانی t (تن). مقدار غیر صفر fz_{it} تنها زمانی مجاز است که متغیر پر کردن کارگاه c_{it} نیز غیر صفر باشد.

(۱۸-۲)

$$a_{it} \geq ۰, \quad b_{it} \geq ۰, \quad c_{it} \geq ۰, \quad e_{it} \geq ۰, \quad f_{zit} \geq ۰, \quad v_{it} \geq ۰, \quad w_{it} \geq ۰$$

For all z, i, t.

* متغیر استخراج کارگاه (a_{it}) و متغیر تناژ استخراج (e_{it}) برای $t>=EES_i$ و $T<=ELF_i$ تعریف شده‌اند.

* متغیر تخلیه کارگاه b_{it} برای $t>=EEF_i+۱$ و $t<=FLS_i-۱$ تعریف شده است.

* متغیر پرکردن کارگاه c_{it} و متغیر تناژ پر کردن fz_{it} برای $t>=FES_i$ و $t<=FLF_i$ تعریف شده است.

* متغیرهای شروع استخراج v_{it} برای $t>=EES_i$ و $t<=ELS_i$ تعریف شده است.

* متغیرهای شروع پرکردن w_{it} برای $t>=FES_i$ و $t<=FLS_i$ تعریف شده است.

محدودیت‌ها:

۱) مدت زمان استخراج

(۱۹-۲)

$$\sum_{t=EES_i}^{ELF_i} a_{it} - L_i \sum_{q=EES_t}^{ELS_i} v_{iq} = ۰ \qquad (i = ۱, ۲, \dots, I).$$

۲) مدت زمان پر کردن

(۲۰-۲)

$$\sum_{t=FES_i}^{FLF_i} c_{it} - D_i \sum_{q=FES_t}^{FLS_i} w_{iq} = ۰ \qquad (i = ۱, ۲, \dots, I).$$

۳) دوره آغاز استخراج

(۲۱-۲)

$$v_{it} - a_{iq} \leq ۰$$

$$(i = ۱, ۲, \dots, I; t = EES, EES_i, \dots, ELS_i; q = t, t+۱, \dots, t+L_i-۱$$

۴) دوره شروع پر کردن

(۲۲-۲)

$$w_{it} - c_{iq} \leq ۰$$

$$(i = ۱, ۲, \dots, I; t = FES, FES_i, \dots, FLS_i; q = t, t+۱, \dots, t+D_i-۱$$

پارامترها:

i شماره شناسایی کارگاه ۱ و ۲ و .... I. I تعداد کل کارگاه‌ها است.

K کد نوع ذخیره ۱ و ۲ و ...، k. k تعداد انواع ذخیره.

m نوع کانی ۱ و ۲ و ...

t دوره زمان برنامه‌ریزی، ۱ و ۲ و .... یک دوره ساختگی (T+۱) از مدت زمان نامتناهی به افق برنامه اضافه شد تا راه‌حل‌های امکان‌پذیر و تولید سقف را که فراتر از افق برنامه‌ریزی شده از پیش تعریف شده را در نظر بگیرد.

z شماره اجزا پر کردن.

اطلاعات:

داده های ورودی زیر توسط مدل MIPPS مورد نیاز بود.

ρz چگالی مواد پرکننده z (کیلوگرم بر مترمکعب)

CM_{mt} هدف شامل تناژ فلز از کانی m در دوره زمانی t (تن)

D_i زمان مورد انتظار برای پر کردن کارگاه i (دوره)

EEF_i مدت زمان اولیه پایان استخراج برای کارگاه i (دوره)

EES_i مدت زمان اولیه زمان شروع استخراج برای کارگاه i (دوره)

ELF_i مدت زمان آخرین زمان پایان استخراج کارگاه i (دوره)

ELS_i مدت زمان آخرین زمان شروع برای کارگاه i (دوره)

EPL_i حداقل تناژ استخراج از کارگاه i در زمان t (تن)

EPU_{it} حداکثر تناژ استخراج از کارگاه i در زمان t (تن)

FE_i هزینه ثابت استخراج کارگاه i ($)

FEF_i مدت زمان اولیه پایان پرکردن برای کارگاه i (دوره)

FES_i مدت زمان اولیه شروع پرکردن برای کارگاه i (دوره)

FF_i هزینه ثابت پرکردن کارگاه i ($)

FLF_i مدت زمان آخرین زمان پایان پرکردن کارگاه i (دوره)

FLS_i مدت زمان آخرین زمان شروع پرکردن کارگاه i (دوره)

$FPLz_{it}$ حداقل تناژ مواد پرکننده z در کارگاه i در دوره زمانی t (تن)

$FPUz_{it}$ حداکثر تناژ مواد پرکننده z در کارگاه i در دوره زمانی t (تن)

G_{im} عیار ماده معدنی در تیپ کانی m در کارگاه i (٪)

H_t محدودیت باربری سنگ معدن در دوره t (تن)

L_i طول استخراج مورد انتظار برای کارگاه i

MR_i حداقل ذخیره قابل استخراج در کارگاه i (تن)

N_t ضریب ارزش فعلی نزولی در دوره t، که تعریف می شود:

(۲۳-۲)

$$\frac{۱}{۱ + n^t}$$

در اینجا:

n نرخ بهره مؤثر در هر دوره

Q_{zt} حداکثر تناژ از اجزا پر کردن z در دسترس در زمان t (تن)

S_{mt} درآمد هر تن از نوع فلز m در دوره t (دلار بر زمان)

VE_i هزینه متغیر استخراج کارگاه i (دلار بر تن)

VF_i هزینه متغیر پرکردن کارگاه i (دلار بر مترمکعب)

V_i حجم کارگاه i (مترمکعب)

W_{mt} بازیابی متالورژی از نوع کانی m در دوره زمانی t (٪)

۲-۵- برنامه‌ریزی تولید در معدن کرونا

کوچتا و همکارانش[1] (۲۰۰۴) یک مدل جستجو محور برای برنامه‌ریزی تولید معدن کرونا ارائه کردند. این مدل برای برنامه‌ریزی بلند مدت در معدن کرونا با روش استخراج تخریب در طبقات فرعی ارائه شده است [۱۳]. در این مقاله، هدف و اصلی‌ترین محدودیت‌های زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

هدف:

کمینه کردن انحراف از تولید برنامه‌ریزی شده

(۲۴-۲)

$$\text{Min} \sum_{k,t} \underline{z}_{kt} + \overline{z}_{kt}$$

محدودیت‌ها:

۱) استخراج معادن مواد معدنی B۱، B۲ و D۳ در هر دوره زمانی و انحراف‌های مربوطه از مقدار تولید برنامه‌ریزی شده را دنبال می‌کند.

(۲۵-۲)

$$\sum_{b \in B_t} r_{bk} y_{bt} + \underline{z}_{kt} - \overline{z}_{kt} = d_{kt} \qquad \forall k \text{ and } t \in T_{\acute{b}}$$

۲) تعیین توالی عمودی بین طبقات فرعی استخراجی معادن.

(۲۶-۲)

$$\sum_{t \in T_b} y_{bt} \geq y_{\acute{b}\acute{t}} \qquad \forall b, \acute{b} \in B_b^v \ , \ \acute{t} \in T_{\acute{b}} \ , \ b \neq \acute{b}$$

[1] Kuchta, M; A. Newman; E. Topal

۳) ترتیب توالی افقی بین بلوک‌های تولید مجاور.

(۲۷-۲)

$$\sum_{t\in T_b} y_{bt} \le y_{\acute{b}\acute{t}} \qquad \forall b,\acute{b}\in B_b^R \ ,\ \acute{t}\in T_{\acute{b}} \ ,\ b\neq \acute{b}$$

(۲۸-۲)

$$\sum_{t\in T_b} y_{bt} \le y_{\acute{b}\acute{t}} \qquad \forall b,\acute{b}\in B_b^L \ ,\ \acute{t}\in T_{\acute{b}} \ ,\ b\neq \acute{b}$$

۴) عدم فعالیت LHD بیش از تعداد مجاز در گروه چاه فعال.

(۲۹-۲)

$$\sum_{a\in A_v}\sum_{b\in B_a}\sum_{t\in T_b} P_{abv}y_{bt} \le LHD_v \quad \forall v,$$

$$\underline{z}_{kt}\ ,\overline{z}_{kt} \ge ۰ \quad \forall k\ ,t$$

$$y_{bt} \quad \text{binary}\ \forall b\ ,t$$

۵) به طور خاص، به محدودیت اول که نیاز به بلوک b دارد اضافه می‌شود، تا اگر در تاریخ شروع آن در اواخر افق زمانی قرار بگیرد، در بعضی از نقاط در طول افق شروع به استخراج کنیم.

(۳۰-۲)

$$\sum_{t} y_{bt} = ۱ \qquad \forall b \middle| \bar{t}_b \le T$$

۶) به محدودیت دوم اجازه می‌دهد که اگر تاریخ شروع آن فراتر از افق زمانی اتفاق افتد ، بلوک b را در بعضی از نقاط در طول افق شروع به استخراج کند.

(۳۱-۲)

$$\sum_{t} y_{bt} \leq ۱ \qquad \forall b | \bar{t}_b > T$$

$$y_{bt} = ۱ \qquad \forall b | \underline{t}_b = \bar{t}_b$$

شاخص‌ها:

a: موقعیت دستگاه

b, b′: بلوک تولید

k: نوع ماده معدنی

t: دوره زمانی (ماه)

v: گروه چاه

مجموعه‌ها:

T_b: مجموعه‌ای از دوره‌های زمانی واجد شرایط که بلوک تولید b می‌تواند استخراج شود.

B_t: مجموعه‌ای از بلوک‌های تولیدی واجد شرایط که در دوره زمانی t می‌توانند استخراج شوند.

B_a: مجموعه‌ای از بلوک‌های تولیدی در داخل موقعیت دستگاه a.

B_b^v: مجموعه‌ای از بلوک‌های تولیدی که دسترسی به آنها توسط بلوک تولیدی b از نظر عمودی محدودیت ایجاد کرده است.

B_b^R: مجموعه‌ای از بلوک‌های تولیدی که دسترسی به آنها توسط بلوک تولیدی b از سمت راست محدود شده است.

B_b^L: مجموعه‌ای از بلوک‌های تولیدی که دسترسی به آنها توسط بلـوک تولیـدی b از سـمت چـپ محدود شده است.

A_v: مجموعه‌ای از موقعیت دستگاه‌ها شامل در گروه چاه v.

پارامترها:

r_{bk}: مقدار ماده معدنی نوع k در بلوک b (تن)

d_{kt}: تقاضای ماده معدنی نوع k در دوره زمانی t (تن)

$\underline{t}_b$: نزدیکترین زمان شروع بلوک تولیدی b.

$\bar{t}_b$: آخرین زمان شروع بلوک تولیدی b.

T: طول افق برنامه‌ریزی

LHDv: حداکثر تعداد LHDهای فعال همزمان در هر چاه گروه v.

P_{abv} { ۱ اگر بلوک b از موقعیت دستگاه‌های a در چاه گروه v است. ؛ ۰ در غیر اینصورت }

متغیرهای تصمیم‌گیری:

y_{bt} { ۱ اگر ما معدنکاری را از بلوک تولیدی b در دوره زمانی t شروع کرده باشیم. ؛ ۰ در غیر اینصورت }

$\bar{z}_{kt}$: مقدار استخراج بیش از مقدار دلخواه ماده معدنی نوع k در دوره زمانی t.

$\underline{z}_{kt}$: مقدار استخراج کمتر از مقدار دلخواه ماده معدنی نوع k در دوره زمانی t.

۲-۶- بهینه‌سازی برنامه‌ریزی بلند مدت معادن زیرزمینی

سال ۲۰۰۷ نیومن و کوچتا مدل ارائه شده در سال ۲۰۰۴ خود را بهینه کرده و از تکنیک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط استفاده و در یک معدن واقعی اجرا کردند [۱۴].

هدف:

به حداقل رساندن انحراف بین مقادیر تولید واقعی و برنامه‌ریزی شده.

(۳۲-۲)

$$\text{Min} \sum_{k,t} \underline{z}_{kt} + \sum_{k,t} \overline{z}_{kt}$$

$\overline{z}_{kt}$: مقدار استخراج بیش از مقدار دلخواه ماده معدنی نوع k در دوره زمانی t.

$\underline{z}_{kt}$: مقدار استخراج کمتر از مقدار دلخواه ماده معدنی نوع k در دوره زمانی t.

محدودیت‌ها:

۱) انحراف از مقادیر مورد نیاز برای هر نوع سنگ و دوره زمانی را ردیابی می‌کند.

(۳۳-۲)

$$\sum_{a \in A_t} \sum_{t' \in T_{a,} \le t} r_{at'tk} y_{at'} + \underline{z}_{kt} - \overline{z}_{kt} = d_{kt} \qquad \forall k, t$$

۲) محدودیت‌های ترتیب‌بندی عمودی و افقی.

(۳۴-۲)

$$\sum_{t \in T_{a,} \le t'} y_{at} \geq y_{\acute{a}t'} \qquad \forall a, \acute{a} \in A_a^V, \ t' \in T_{\acute{a}} \ , \ \acute{a} \neq a$$

(۳۵-۲)

$$\sum_{\acute{t}\in T_{\acute{a}},\le t} y_{\acute{a}\acute{t}} \ge y_{at} \qquad \forall a,\acute{a} \in A_a^R,\ \ t \in T_a\ ,\ \acute{a} \ne a$$

(۳۶-۲)

$$\sum_{\acute{t}\in T_{\acute{a}},\le t} y_{\acute{a}\acute{t}} \ge y_{at} \qquad \forall a,\acute{a} \in A_a^L,\ \ t \in T_a\ ,\ \acute{a} \ne a$$

۳) عدم فعالیت LHD بیش از تعداد مجاز در گروه چاه فعال.

(۳۷-۲)

$$\sum_{a\in A_v\cap A_t} \sum_{\acute{t}\in T_a,\le t} \rho_{a\acute{t}t} y_{a\acute{t}} \le LHD_v \qquad \forall t, v,$$

۴) با ثابت کردن مقادیر متغیر مرتبط، ماشین‌های فعال را در برنامه تولید قرار می‌دهد.

(۳۸-۲)

$$y_{at} = ۱ \quad \forall a \ni \underline{t}_a = \bar{t}_a,$$

۵) اگر آخرین زمان شروع ممکن آن بیش از طول افق زمانی اتفاق افتد، اطمینان حاصل می‌کند که قرار گرفتن ماشین بیش از یک بار در طول افق استخراج رخ نمی‌دهد.

(۳۹-۲)

$$\sum_{۱} y_{at} \le ۱ \quad \forall a \ni \bar{t}_a > \mathcal{T}$$

۶) اگر آخرین زمان شروع کار در افق زمانی قرار بگیرد، لازم است که ماشین در برخی از نقاط در طول افق شروع به استخراج نماید.

(۴۰-۲)

$$\sum_{۱} y_{at} = ۱ \quad \forall a \ni \underline{t}_a \leq \mathcal{T}$$

۷) مطابق موارد مناسب، عدم انعطاف پذیری و یکپارچگی متغیرها را نیز اعمال می‌کند.

(۴۱-۲)

$$\overline{Z}_{kt}, \underline{Z}_{kt} \geq ۰ \quad \forall k, t$$

$$y_{at} \quad \text{binary} \quad \forall a, t.$$

پارامترها:

a و a': موقعیت دستگاه.

k: نوع ماده معدنی.

t و t': دوره زمانی (ماه).

v: گروه چاه.

مجموعه‌ها:

Ta: مجموعه دوره‌های زمانی در هر موقعیت ماشین a که معدنکاری را می‌تواند شروع کند.

At: مجموعه‌ای از موقعیت‌های ماشین که می‌تواند در زمان دوره t استخراج کند.

A_a^V: مجموعه‌ای از موقعیت‌های ماشین که دسترسی آن توسط موقعیت ماشین a به صورت عمودی محصور شده است.

A_a^R: مجموعه‌ای از موقعیت‌های ماشین که توسط محدودیت سمت راست به موقعیت ماشین a اجبار شده است.

A_a^L: مجموعه‌ای از موقعیت‌های ماشین که توسط محدودیت سمت چپ به موقعیت ماشین a اجبار شده است.

Av: مجموعه‌ای از موقعیت‌های ماشین شامل در گروه چاه v.

پارامترها:

rat'tk: ذخیره ماده معدنی نوع k قابل دسترس در زمان t در موقعیت ماشین a در زمان t' که ماشین شروع به معدنکاری کند.

dkt: تقاضای ماده معدنی نوع k در دوره زمانی t (هزار تن).

$\underline{t}_a$: نزدیکترین زمان شروع برای موقعیت ماشین a.

$\bar{t}_a$: آخرین زمان شروع برای موقعیت ماشین a.

T: طول افق برنامه‌ریزی.

LHDv: حداکثر تعداد LHDهای فعال همزمان در هر چاه گروه v.

متغیرهای تصمیم‌گیری:

Pat't
- ۱ اگر ماشین a معدنکاری را در زمان دوره t در زمان t' شروع کرده باشد.
- ۰ در غیر اینصورت

yat
- ۱ اگر معدنکاری ماشین a در دوره زمانی t شروع شده باشد.
- ۰ در غیر اینصورت

۲-۷- برنامه‌ریزی در زمینه معادن زیرزمینی

سال ۲۰۱۰ شولز و همکارش[۱] مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت معادن زیرزمینی ارائه کردند. در این مدل هدف کمینه کردن زمان پروژه و محدودیت‌ها بسیار متنوع بودند که از آن جمله می‌توان به ترتیب استخراج در معدن، ظرفیت تولید و ایمنی اشاره کرد. این مدل در یکی از معادن پتاس آلمان که به روش اتاق و پایه استخراج می‌شود پیاده شد که براساس این مدل استفاده از دو دستگاه استخراج کننده بهترین گزینه است [۱۵].

هدف:

کمینه کردن زمان پروژه

محدودیت‌ها:

- ترتیب استخراج در معدن
- ظرفیت تولید
- ایمنی

۲-۸- راه‌حل برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید کوتاه و بلند مدت معدن زیرزمینی

سال ۲۰۱۱ مارتینز و نیومن[۲] بر اساس مدل ارائه شده توسط نیومن و کوچتا در سال ۲۰۰۷، مدلی ارائه کردند که برنامه‌ریزی بلند مدت و کوتاه‌مدت برای معدن بزرگ سنگ آهن را انجام می‌دهد [۱۶].

هدف:

کمینه کردن انحراف از تولید پیش‌بینی شده‌ی ماهانه

[۱] Marco Schulze; Jürgen Zimmermann

[۲] Martinez MA; Newman AM

(۴۲-۲)

$$\text{Min} \sum_{k,t} p_t(\underline{z}_{kt} + \overline{z}_{kt})$$

محدودیت‌ها:

۱) برای هر درجه و دوره زمانی مقدار ماده معدنی اضافی یا کمتر از تقاضای برنامه‌ریزی را ذخیره می‌کند. جمله اول در سمت چپ محدودیت مقدار ماده معدنی حاصل از دستگاه را نشان می‌دهد، در جمله دوم میزان سنگ معدنی حاصل از بلوک های تولید را ثبت می‌کند.

(۴۳-۲)

$$\sum_{a\in A_t}\sum_{t'\in T_{a,\le t}} r_{at't k} y_{at'} + \sum_{b\in B_t} \frac{R_{bk}}{\sum_{\hat{k}\in K} R_{b\hat{k}}} x_{bt} + \underline{Z}_{kt} - \overline{Z}_{kt} = d_{kt} \qquad \forall k \in K,\ t \in T$$

۲) لازم است که برای هر دوره زمانی در کوتاه مدت (به طور معمول، ۶ ماه) ، مقدار مورد نظر از ماده معدنی، صرف نظر از درجه، استخراج شود.

(۴۴-۲)

$$\sum_{a\in A_t}\sum_{k\in K}\sum_{t'\in T_{a,\le t}} r_{at't k} y_{at'} + \sum_{b\in B_t} x_{bt} = \sum_{k\in K} d_{kt} \qquad \forall t \in T$$

۳) حداکثر تعداد مکان‌های فعال ماشین را در هر گروه چاه و مدت زمان محدود می‌کند.

(۴۵-۲)

$$\sum_{a\in A_v\cap A_{t'}}\sum_{t'\in T_{a,}\le t} \rho_{at't} y_{at'} + \sum_{a\in A_v}\sum_{l\in L_a\cap L_t} (1 - w_{l\hat{t}}) \le LHD_v \qquad \forall v \in V,\ \ t \in T_l,\ \ \hat{t} \in \hat{T}_l$$

۴) محدود کردن قرارگیری بلند مدت ماشین‌آلات که در یک بازه زمانی می‌توانند آغاز به کار کنند.

(۴۶-۲)

$$\sum_{a\in IA\cap A_t} y_{at} \le LHD_t \qquad \forall t \in T$$

۵) از استخراج بیش از ذخایر موجود در یک بلوک جلوگیری می‌کند.

(۴۷-۲)

$$\sum_{t\in T_b} x_{bt} \le \sum_{k\in K} R_{bk} \qquad \forall b \in B$$

۶) مربوط به پایان دادن خاک کشی تا پایان استخراج از بلوک.

(۴۸-۲)

$$\sum_{b\in B_l}\sum_{u\le t} X_{bu} \ge \sum_{b\in B_l}\sum_{k\in K} R_{bk} w_{lt} \qquad \forall l \in L, \quad t \in T_l$$

۷) پیشگیری از تولید بلوک در یک خط خاک‌کشی از شروع معدنکاری تا همه بلوک‌ها استخراج شوند.

(۴۹-۲)

$$\sum_{u\le t} X_{bu} \quad \le \quad \sum_{k\in K} R_{bk} W_{\hat{l}t} \qquad \forall l \in L^c, \quad b \in B_l, \quad \hat{l} \in L_l, \quad t \in T_{\hat{l}}$$

۸) به ترتیب حداکثر و حداقل نرخ تولید ماهانه را اعمال می‌کند.

(۵۰-۲)

$$\sum_{b\in B_a\cap B_t} X_{bt} \quad \le \quad \overline{C}_{at} \qquad \forall a \in A, \quad l \in L_a, \quad t \in T_l$$

(۵۱-۲)

$$\sum_{b\in B_a\cap B_t} X_{bt} \quad \geq \quad \underline{C}_{at}(1-W_{lt}) \quad \forall a\in A,\quad l\in L_a,\quad t\in T_l$$

۹) به ترتیب، تقدم توالی عمودی و افقی، بین مکان‌های دستگاه مدل شده با برنامه کوتاه مدت و بلند مدت را اجرا کنید.

(۵۲-۲)

$$W_{lt} \quad \geq \quad y_{\tilde{a}t} \quad \forall a\in A,\quad \tilde{a}\in A_a^v,\quad l\in L_a^v,\quad t\in T_{\tilde{a}}$$

(۵۳-۲)

$$\sum_{t\in T_{\tilde{a}},\leq \hat{t}} y_{\tilde{a}t} \quad \geq \quad W_{l\hat{t}} \quad \forall a\in A,\quad \tilde{a}\in A_a^H,\quad l\in L_a^H,\quad \hat{t}\in T_l$$

۱۰) به ترتیب، تقدم توالی عمودی و افقی، بین مکان‌های دستگاه مدل شده با برنامه بلند مدت

(۵۴-۲)

$$\sum_{t\in T_a} y_{at} \quad \geq \quad y_{\acute{a}\acute{t}} \quad \forall a\in A,\quad \acute{a}\in A_a^v,\quad \acute{t}\in T_{\acute{a}},\quad \acute{a}\neq a$$

(۵۵-۲)

$$\sum_{t\in T_{\acute{a}}} y_{\acute{a}\acute{t}} \quad \geq \quad y_{at} \quad \forall a\in A,\quad \acute{a}\in A_a^H,\quad t\in T_a,\quad \acute{a}\neq a$$

۱۱) از قرارگیری ماشین بیش از یکبار در افق جلوگیری می‌کند.

(۵۶-۲)

$$\sum_{t\in T_a} y_{at} \quad \leq \quad 1 \quad \forall a\in A \ni T_a\cap \overline{T}\neq \emptyset$$

۱۲) مورد خاصی از محدودیت سابق است و در صورتی که تاریخ شروع واجد شرایط آن کاملاً در افق برنامه‌ریزی مدل قرار بگیرد، نیاز به قرارگیری ماشین دقیقاً یک بار در طول افق را دارد.

(۵۷-۲)

$$\sum_{t \in T_a} y_{at} \quad = \quad ۱ \quad \forall a \in A \ni T_a \subseteq T$$

۱۳) اطمینان حاصل می‌کند که خاک‌کشی در زمان خود به پایان می‌رسد.

(۵۸-۲)

$$W_{lt} \quad = \quad ۱ \quad \forall l \in L, \quad t \in \widehat{T}_l$$

۱۴) یکپارچگی و عدم منفی بودن پارامترها.

(۵۹-۲)

$$\underline{Z}_{kt}, \overline{Z}_{kt} \quad \geq \quad ۰ \quad \forall k, t; \quad X_{bt} \geq ۰ \quad \forall b, t$$

$$W_{lt} \quad \text{binary} \quad \forall l, t; \quad y_{at} \quad \text{binary} \quad \forall a, t$$

مجموعه‌ها:

K: مجموعه عیارهای ماده معدنی.

V: مجموعه گروه‌های چاه.

A: مجموعه موقعیت ماشین‌آلات.

A_v: مجموعه موقعیت ماشین‌ها در چاه گروه v.

A_a^v:مجموعه ماشین‌آلاتی که تاریخ شروع محدود به موقعیت عمودی ماشین a است.

A_a^H: مجموعه‌ای از موقعیت ماشین که تاریخ شروع آن توسط مجاورت بـه قـرار گـرفتن ماشـین a اجباری است.

A_t: مجموعه ای از موقعیت ماشین که می‌تواند در دوره زمانی t آغاز شود.

B: مجموعه‌ای از بلوک‌های تولیدی.

B_a: مجموعه‌ای از بلوک‌های تولیدی در موقعیت ماشین a.

B_l: مجموعه‌ای از بلوک‌های تولید در خط تخلیه L .

B_t: مجموعه‌ای از بلوک‌های تولیدی که می‌توانند در دوره زمانی t تولید شوند.

L: مجموعه‌ای از خطوط تخلیه L.

L_a: آخرین (به عنوان مثال، عمیق ترین موقعیت) خط تخلیه در موقعیت ماشین a.

L^c: مجموعه‌ای از خطوط تخلیه محدود شده توسط یک خط تخلیه دیگر.

L_l: مجموعه‌ای از خطوط تخلیه است که به صورت عمودی خط تخلیه L را محدود می‌کند.

L_a^v: خطی که تاریخ دقیق آن مانع قرار دادن ماشین‌آلات a در معدن به طور عمودی می‌شود.

L_t: مجموعه‌ای از خطوط که می‌تواند در زمان دوره‌ی t معدنکاری شود.

T: مجموعه‌ای از دوره‌های زمانی که افق زمانی بلند مدت را تشکیل می‌دهند.

T: مجموعه‌ای از دوره‌های زمانی که افق زمانی کوتاه مدت را تشکیل می‌دهند.

T_a: مجموعه‌ای از دوره‌های زمانی که در آن موقعیت ماشین a می تواند شروع به کار کند.

T_b: مجموعه‌ای از دوره‌های زمانی که بلوک تولید b می‌تواند استخراج شود.

پارامترها:

Pt: پنالتی همراه با انحراف در دوره زمانی t.

LHD_t: حداکثر تعداد مأموریت‌های ماشین که در دوره زمانی T می‌تواند آغاز شود.

LHD_v: حداکثر تعداد موقعیت ماشین‌های فعال در گروه چاه v .

d_{kt}: هدف تعیین شده برای ماده معدنی عیار k در دوره زمانی t.

r_{aftk}: ذخیره از ماده معدنی عیار k قابل دسترسی در زمان t در موقعیت ماشین a با توجه به اینکه در زمان t ماشین شروع به استخراج کرده است.

$\rho_{a\acute{t}t}$ } ۱ اگر موقعیت دستگاه a شروع به معدنکاری کرده باشد در زمان 't و استخراج در زمان t شروع شده باشد.
۰ در غیر اینصورت

R_{bk}: ذخیره ماده معدنی عیار k در بلوک تولیدی b.

$\underline{C}_{at}$: حداقل نرخ تولید ماشین در موقعیت a در دوره زمانی t.

$\overline{C}_{at}$: حداکثر نرخ تولید ماشین در موقعیت a در دوره زمانی t.

متغیرهای تصمیم:

$\overline{Z}_{kt}$: مقدار استخراج بیش از مقدار دلخواه ماده معدنی نوع k در دوره زمانی t.

$\underline{Z}_{kt}$: مقدار استخراج کمتر از مقدار دلخواه ماده معدنی نوع k در دوره زمانی t.

X_{bt}: مقدار ماده معدنی استخراج شده بلوک تولیدی b در دوره زمانی t.

W_{lt} } ۱ اگر ما معدنکاری همه بلوک‌های تولیدی در خط تخلیه l در دوره زمانی t را به اتمام رسانده باشیم.
۰ در غیر اینصورت.

۲-۹- برنامه‌ریزی تولید کوتاه و بلند مدت برای معادن زیرزمینی

سال ۲۰۱۲ نیرینگ و همکارانش[۱] مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت و میان‌مدت معادن زیرزمینی با روش استخراج از طبقات فرعی ارائه کردند که در آن برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت هدف کمینه کردن میزان انحراف عیار ورودی کارخانه و برای برنامه‌ریزی میان مدت هدف بیشینه کردن NPV است. این مدل در یک معدن واقعی و به روش استخراج از طبقات فرعی استخراج می‌شود اجرا و نتایج آن با شرایط قبل مقایسه شده است [۱۷].

هدف:

کمینه کردن انحراف از عیار ورودی به کارخانه.

[۱] Nehring, E; Topal, M. Kizil

(۶۰-۲)

$$\text{Max: } \sum_{d,t} n_t \times \ dcf_d \times v_{dt} + \sum_{s,t} n_t \times cf_s \times w_{st} + \sum_{i} (a_i \times pena + b_i \times penb) \times w$$

در این مقاله، اهداف مختلفی بررسی شده است که در اینجا یکی از آن‌ها آورده می‌شود.

محدودیت‌ها:

۱) محدودیت ظرفیت ناوگان ماشین‌آلات یا چاه.

(۶۱-۲)

$$\sum_{d \in a_t} dr_d \times v_{dt} + \sum_{s \in \beta_t} r_s \times w_{st} \leq sc_t \qquad \forall t$$

۲) پایین‌ترین حد محدودیت عیار خوراک آسیاب.

(۶۲-۲)

$$\sum_{d \in a_t} dgl_d \times dr_d \times v_{dt} + \sum_{s \in \beta_t} gl_s \times r_s \times w_{st} \geq ۰ \qquad \forall t$$

۳) بالاترین حد محدودیت عیار خوراک آسیاب.

(۶۳-۲)

$$\sum_{d \in a_t} dgu_d \times dr_d \times v_{dt} + \sum_{s \in \beta_t} gu_s \times r_s \times w_{st} \leq ۰$$

۴) محدودیت فعالیت آماده‌سازی داخلی و خارجی.

(۶۴-۲)

$$\sum_{d \in a_t} edm_d \times v_{dt} + \sum_{s \in \beta_t} idm_s \times w_{st} \leq dc_t \qquad \forall t$$

۵) محدودیت فعالیت حفاری تولیدی.

(۶۵-۲)

$$\sum_{s\in\beta_t} drl_s \times w_{st} \le drc_t \qquad \forall t$$

۶) محدودیت دسترسی به پرکننده.

(۶۶-۲)

$$\sum_{s\in\beta_t} bk_s \times w_{st} \le dkc_t \qquad \forall t$$

۷) غیرمنفی و عدد صحیح بودن مقدار محدودیت.

(۶۷-۲)

$$v_{dt}\,, w_{st} = \text{binary integer}$$

مجموعه‌ها:

t: دوره زمانی برنامه میان مدت.

d: تطبیق آماده‌سازی خارجی میان مدت.

s: تعیین کارگاه‌های میان مدت.

a_t: مجموعه موارد آماده‌سازی منطقه واجد شرایط d که می‌توانند در دوره زمانی میان مدت t استخراج شوند.

β_t: مجموعه‌ای از کارگاه‌های واجد شرایط که می‌توانند در دوره زمانی میان مدت t استخراج شوند.

پارامترها:

n_t: نرخ بهره ارزش فعلی برای دوره زمانی t .

dcf_d: جریان نقدینگی از هر مورد آماده‌سازی منطقه d .

cf_s: جریان نقدینگی از هر کارگاه s.

pena: ضریب جریمه ($) برای هر تن انحراف بالاتر از هدف.

penb: ضریب جریمه ($) برای هر تن انحراف پایین‌تر از هدف.

W: ضریب وزنی جریمه در کوتاه مدت.

dr_d: ذخیره استخراج (t) برای هر مورد آماده‌سازی منطقه d .

r_s: ذخیره استخراج (T) برای هر کارگاه s.

sc_t: ظرفیت حرکت ناوگان شافت / LHD / کامیون (t) برای هر دوره زمانی t.

dgl_d: تفاوت بین خوراک سنگ معدنی کم عیار برنامه‌ریزی شده و عیار هر محصول آماده‌سازی منطقه d.

gl_s: تفاوت بین خوراک سنگ معدنی کم عیار و عیار هر کارگاه s .

dgu_d: تفاوت بین خوراک سنگ معدنی پرعیار و عیار هر محصول آماده‌سازی منطقه d .

edm_d: طول هر آماده‌سازی منطقه d.

idm_s: طول آماده‌سازی داخلی مورد نیاز برای هر کارگاه s.

dc_t: ظرفیت ناوگان آماده‌سازی برای هر دوره زمانی t.

drl_s: طول حفاری تولیدی مورد نیاز برای هر کارگاه s.

drc_t: ظرفیت ناوگان حفاری برای هر دوره زمانی t.

bk_s: پر کننده مورد نیاز برای هر کارگاه s.

bkc_t: پر کننده در دسترس برای هر دوره زمانی t.

متغیرهای تصمیم:

v_{dt}
- ۱ اگر تولید از آماده‌سازی d در دوره زمانی t برنامه‌ریزی شده باشد.
- ۰ در غیر اینصورت

w_{st}
- ۱ اگر تولید از کارگاه s در دوره زمانی t برنامه‌ریزی شده باشد.
- ۰ در غیر اینصورت

۲-۱۰- برنامه‌ریزی ریاضی برای بهینه‌کردن ترتیب استخراج در روش تخریب توده‌ای

رساله دکتری پوررحیمیان[۱] در سال ۲۰۱۳ در مورد بهینه‌سازی ترتیب استخراج در معادن به روش تخریب توده‌ای انجام شد. در این رساله با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط مدل برنامه‌ریزی بلند مدت برای روش تخریب توده‌ای ارائه شده است. هدف در این مدل بیشینه کردن NPV است و محدودیت‌های مدل شامل یک سری محدودیت اجرایی روش استخراج می‌باشد. [۱۸]

[۱] Pourrahimian, Y

هدف:

بیشینه کردن NPV.

(۶۸-۲)

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{cl=1}^{CL}\left[\frac{CLEV_{cl}}{(1+i)^{t}}\right]U_{cl,t}$$

محدودیت‌ها:

۱) تضمین می‌کند که ظرفیت معدن از تناژ کل مواد استخراج شده از گروه‌ها در هر دوره در محدوده قابل قبول باشد.

(۶۹-۲)

$$\underline{M}_t \le \sum_{cl=1}^{CL} U_{cl,t} \times (Ton_{cl}) \le \overline{M}_t \qquad \forall t \in \{1,\dots,T\}$$

۲) حداکثر تعداد گروه کارگاهی فعال را در هر دوره معین از برنامه کنترل می‌کند. در طول عمر معدن، هر گروه می‌تواند در سه موقعیت مختلف باشد: باز ، فعال و بسته.

(۷۰-۲)

$$A_{cl,t} \le L.\,U_{cl,t}$$

$$L \ge \left(\frac{\max\{Ton_{cl}\}}{\min\{\text{number of drawpoints witjin a cluster}\} \times \text{minimumdraw rate}}\right)$$

$$\forall t \in \{1,\dots,T\}, \quad cl \in \{1,\dots,CL\}$$

$$U_{cl,t} \le A_{cl,t} \qquad \forall t \in \{1,\dots,T\}, \quad cl \in \{1,\dots,CL\}$$

$$\sum_{cl=1}^{CL} A_{cl,t} \le N_{Acl,t} \qquad \forall t \in \{1,\dots,T\}$$

۳) برای همه اعضای مجموعه Scl اعمال می‌شود. اگر جمع قسمت‌های استخراج شده از هر گروه

متعلق به مجموعه Scl تا دوره در نظر گرفته شده t، برابر یا بیشتر از حداقل نرخ طرح مجاز برای گروه باشد، می‌توان استخراج را شروع کرد.

(۷۱-۲)

$$Z_{cl,t} - \sum_{j=1}^{t} U_{k,j} \leq 1 - \left(\frac{\min\{\text{number of drawpoints within a cluster}\} \times \text{minimumdraw rate}}{\max\{Ton_{cl}\}} \right)$$

$$\forall cl \in \{1, \dots, CL\}, \quad t \in \{1, \dots, T\}, \quad k \in S^{cl}$$

۴) تضمین می‌کند که هر گروه کارگاهی یک بار در طول عمر معدن باز شود.

(۷۲-۲)

$$\sum_{t=1}^{T} Z_{cl,t} = 1 \qquad \forall cl \in \{1, \dots, CL\}$$

۵) تضمین می‌کند که اگر استخراج از گروه کارگاه‌ها در طول دوره یا بعد از آن آغاز شود، حداقل بخشی از آن استخراج می‌شود تا زمانی که تمام مواد موجود استخراج شود. در غیر این صورت گروه باید بسته شود.

(۷۳-۲)

$$A_{cl,t} - A_{cl,(t-1)} \leq Z_{cl,t} \qquad \forall cl \in \{1, \dots, CL\}, \quad t \in \{2, \dots, T\}$$

۶) برای دوره زمانی ۱ استفاده می‌شود.

(۷۴-۲)

$$A_{cl,1} - Z_{cl,1} \leq 0.5 \qquad \forall cl \in \{1, \dots, CL\}$$

۷) تعداد گروه‌های کارگاهی جدید باز شده در هر دوره توسط این محدودیت کنترل می‌شود.

(۷۵-۲)

$$A_{cl,t} \times \left(NDP_{cl} \times \underline{DR}_{k,t}\right) \leq U_{cl,t} \times (Ton_{cl}) \leq \left(NDP_{cl} \times \overline{DR}_{k,t}\right)$$

(۷۶-۲)

$$\forall cl \in \{1, \dots, CL\}, \qquad t \in \{1, \dots, T\}, \qquad k \in S^{cl}$$

(۷۷-۲)

$$\underline{N}_{Ncl,t} \leq \sum_{cl=1}^{CL} Z_{cl,t} \leq \overline{N}_{Ncl,t} \qquad \forall t \in \{2, \dots, T\}$$

(۷۸-۲)

$$\sum_{cl=1}^{CL} Z_{cl,t} \leq N_{Acl,1}$$

(۷۹-۲)

$$\sum_{t=1}^{T} U_{cl,t} = 1 \qquad \forall cl \in \{1, \dots, CL\}$$

مجموعه‌ها:

S^{cl}: برای هر گروه cl، یک مجموعه وجود دارد، Scl، گروه‌های کارگاهی سابق را تعریف می‌کند که باید قبل از استخراج Cl آغاز شوند.

شاخص‌ها:

$Cl \in \{1,\dots,CL\}$: اندیس گروه‌ها.

k: فهرست برای یک گروه متعلق به مجموعه Scl .

$t \in \{1,\dots,T\}$: فهرست برای دوره‌های زمان‌بندی.

پارامترها:

CL: حداکثر تعداد گروه‌ها در مدل.

$CLEV_{cl}$: ارزش اقتصادی گروه cl.

$\underline{DR}_{d,t}$: حداقل نرخ ممکن طرح منطقه d در زمان t.

$\overline{DR}_{d,t}$: حداکثر نرخ ممکن طرح منطقه d در زمان t.

$\underline{DR}_{k,t}$: حداقل نرخ تخلیه از شوت ممکن از خاک‌کشی متعلق به مجموعه Scl در دوره t.

$\overline{DR}_{k,t}$: حداکثر نرخ تخلیه از شوت ممکن از خاک‌کشی متعلق به مجموعه Scl در دوره t.

i: نرخ بهره.

$\underline{M}_t$: حد پایین ظرفیت معدن در دوره t .

$\overline{M}_t$: حد بالای ظرفیت معدن در دوره t .

$N_{Acl,t}$: حداکثر تعداد مجاز گروه‌های فعال در دوره t.

$\underline{N}_{Ncl,t}$: حد کمتر برای تعداد گروه‌های جدید، استخراج از آن‌ها می‌تواند در دوره t شروع شود.

$\overline{N}_{Ncl,t}$: حد بالا برای تعداد گروه‌های جدید، استخراج از آن‌ها می‌تواند در دوره t شروع شود.

NDP_{cl}: تعداد ستون‌های طرح در گروه cl.

T: حداکثر تعداد دوره‌های زمان‌بندی.

Ton_{cl}: تناژ کل مواد در گروه cl .

متغیرهای تصمیم:

$A_{cl,t} \in \{۰،۱\}$ ۱ اگر متغیر تصمیم دودویی برابر گروه در دوره t فعال باشد.
۰ در غیر اینصورت

$U_{cl,t} \in [۰،۱]$ ۱ اگر متغیر تصمیم‌گیری مداوم، نمایانگر بخشی از گروهی است که در دوره t استخراج می شود.
۰ در غیر اینصورت

$Z_{cl,t} \in \{۰،۱\}$ ۱ اگر استخراج از گروه کارگاهی در دوره t شروع شود.
۰ در غیر اینصورت

۲-۱۱- برنامه‌ریزی استخراج و پرکردن یک معدن پیچیده زیرزمینی

سال ۲۰۱۴ سولیوان و نیومن[۱] با استفاده از روش ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح و پیرو مدل ارائه شده توسط مارتینز و نیومن در سال ۲۰۱۱، مدلی برای برنامه‌ریزی تولید استخراج و پرکردن محل استخراج شده ارائه دادند. هدف مدل، بیشینه کردن میزان تولید فلز محتوا در طول عمر معدن با محدودیت‌های بیشینه کردن تولید و میزان پرکردن کارگاه‌های استخراج ماهانه، میزان بیشینه و کمینه تولید فلز و زمان‌بندی بین استخراج و پرکردن کارگاه‌ها است. معدن روی لیشین که با ترکیبی از روش‌های اتاق و پایه، استخراج از طبقات فرعی و کند و آکند استخراج می‌شود، با استفاده از این روش برنامه‌ریزی شد [۱۹ و ۲۰].

[۱] O’Sullivan, D; Newman, A

هدف:

بیشینه کردن میزان تولید فلز محتوا.

(۸۰-۲)

$$\max\left\{\sum_{a\in A^{M}}\sum_{t\in\hat{T}_a}\sum_{\hat{t}\in T} g_a\, v_{at\hat{t}} y_{at}(1+r)^{-\hat{t}}\right\}$$

محدودیت‌ها:

۱) اطمینان از اینکه برنامه‌ریزی استخراج یا پر کردن فقط یکبار صورت می‌گیرد.

(۸۱-۲)

$$\sum_{t\in\hat{T}_a} y_{at} \le 1 \qquad \forall a \in \mathcal{A}^{M} \cup \mathcal{A}^{B}$$

۲) نیاز به تولید برنامه‌ریزی شده در محدوده بیشتر یا کمتر از خوراک کارخانه در دوره زمانی مشخص.

(۸۲-۲)

$$\underline{e} \le \sum_{a\in\mathcal{A}^{M}}\sum_{t\in\hat{T}_a} v_{at\hat{t}}\, y_{at} \le \overline{e} \qquad \forall \hat{t} \in T$$

۳) راندمان فلز را در محدوده عملیاتی کارخانه حفظ می‌کند.

(۸۳-۲)

$$\underline{g} \le \sum_{a\in\mathcal{A}^{M}}\sum_{t\in\hat{T}_a} g_a v_{at\hat{t}}\, y_{at} \le \overline{g} \qquad \forall \hat{t} \in T$$

۴) استفاده از مواد پر شده در هر دوره را مشخص و اطمینان حاصل می‌کند بیش از میزان دسترسی، استفاده نخواهد شد.

(۸۴-۲)

$$\sum_{a\in\mathcal{A}^B}\sum_{t\in\hat{T}_a} p_{at\hat{t}}\, y_{at} \le \overline{p} \qquad \forall \hat{t} \in T$$

۵) محدودیت‌های ترتیب توالی که قوانین تقدم را بین فعالیت‌ها اعمال می‌کنند.

(۸۵-۲)

$$y_{at} \le \sum_{u\in\hat{T}_{á}:u\le t-t_{á}^{m}-t_{á}^{b}} y_{áu}$$

(۸۶-۲)

$$\forall á \in \overline{\mathcal{P}}_a, a \in \mathcal{A}^M \cup \mathcal{A}^B,\ \ t \in \hat{T}_{á}$$

(۸۷-۲)

$$y_{at} \le \sum_{u\in\hat{T}_{á}:u\le t-t_{á}^{m}-t_{á}^{b}} y_{áu} + \left(1 - \sum_{u\in\hat{T}_{á}} y_{áu}\right)$$

(۸۸-۲)

$$\forall á \in \tilde{\mathcal{P}}_a, a \in \mathcal{A}^M \cup \mathcal{A}^B,\ \ t \in \hat{T}_{á}$$

(۸۹-۲)

$$y_{at} \le 1 - \sum_{u\in\hat{T}_{á}:u\le t-t_{a}^{m}-t_{a}^{b}} y_{áu}$$

(۹۰-۲)

$$\forall á \in \hat{\mathcal{P}}_a, a \in \mathcal{A}^M \cup \mathcal{A}^B,\ \ t \in \hat{T}_{á}$$

(۹۱-۲)

$$y_{at}\ \text{binary} \qquad \forall a \in \mathcal{A}^M \cup \mathcal{A}^B,\ \ t \in \hat{T}_{á}$$

شاخص‌ها:

a: فعالیت استخراج یا پر کردن. ۱ و ... و n.

t,t': دوره. ۱ و ... و T.

A^M: مجموعه فعالیت‌های استخراج.

A^B: مجموعه فعالیت‌های پر کردن.

T: مجموعه تمام دوره‌های زمانی.

$\hat{T}_a$: مجموعه دوره‌های محدود شده در هر فعالیت a می‌تواند شروع شود.

$\overline{\mathcal{P}}_a$: مجموعه فعالیت‌هایی که باید قبل از فعالیت a باشند.

$\tilde{\mathcal{P}}_a$: مجموعه فعالیت‌هایی که در صورت بروز هر یک از فعالیت‌ها باید قبل از فعالیت a باشد.

$\hat{\mathcal{P}}_a$: مجموعه فعالیت‌هایی که نباید قبل از فعالیت‌های a باشد.

پارامترها:

$v_{at\hat{t}}$: حجم سنگ به دست آمده در دوره $\hat{t}$، با توجه به اینکه فعالیت استخراج a در زمان t را شروع کردیم.

g_a: متوسط عیار ماده معدنی تولیدی از فعالیت استخراجی a.

$\overline{e}$ و $\underline{e}$: به ترتیب حداکثر و حداقل تناژ مجاز ماده معدنی استخراجی در یک ماه (تن).

$\overline{g}$ و $\underline{g}$: به ترتیب، حداکثر و حداقل فلز تولیدی مجاز توسط آسیا در یک ماه (تن).

t_a^m: تعداد دوره‌های مورد نیاز برای فعالیت استخراجی a (ماه).

t_a^b: تعداد دوره‌های مورد نیاز برای فعالیت پر کردن a (ماه).

$p_{at\tilde{t}}$: پرکردن در دوره $\tilde{t}$ اعمال می‌شود، با توجه به اینکه فعالیت پر کردن را در زمان t شروع کردیم.

$\overline{\mathcal{P}}$: مواد موجود برای پر کردن در هر ماه (مترمکعب).

r: نرخ بهره برای کاهش ارزش فلز تولید شده در دوره های بعدی.

متغیر تصمیم:

$$y_{at} \begin{cases} 1 & \text{اگر فعالیت a در دوره t آغاز شود.} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

۲-۱۲- برنامه‌ریزی تولید معادن زیرزمینی با لحاظ کردن محدودیت‌های تهویه

سال ۲۰۱۵ بریکی[1] رساله دکتری خود را در زمینه برنامه‌ریزی تولید معادن زیرزمینی به پایان رساند. در این تحقیق مدل ریاضی عدد صحیح با هدف بیشینه کردن میزان طلای تولیدی در یک معدن طلا که به روش کند و آکند استخراج می‌شود، ارائه شده است. بر اساس این هدف آماده‌سازی، استخراج و پرکردن کارگاه برنامه‌ریزی شده است. در بین محدودیت‌های این مدل محدودیت هوای مورد نیاز برای استخراج و پرکردن کارگاه‌ها نیز لحاظ و بدین ترتیب در این برنامه‌ریزی تولید محدودیت تهویه نیز لحاظ شده است [۲۱].

هدف:

بیشینه کردن میزان طلای تولیدی.

(۹۲-۲)

$$\text{Max} \sum_{a\in A}\sum_{t\in T} c_{at}y_{at}$$

محدودیت‌ها:

۱) فعالیت‌ها حداقل یک بار شروع می‌شود.

[1] Brickey, A

(۹۳-۲)

$$\sum_{t\in T} y_{at} \le ۱ \qquad \forall a \in A$$

۲) روابط تقدم فعالیت‌ها.

(۹۴-۲)

$$\sum_{t\acute{}\le t} y_{at\acute{}} \le \sum_{t\acute{}=۱}^{t-\bar{d}_{a\acute{a}}+۱} y_{\acute{a}t\acute{}} \qquad \forall a \in A, \acute{a} \in p_a, \quad t \in T$$

۳) محدودیت مصرف منابع.

(۹۵-۲)

$$\sum_{a\in A} \sum_{t\acute{}=t-\hat{d}_a+۱}^{t} q_{ar} y_{at\acute{}} \le \hat{r}_{rt} \qquad \forall r \in R, t \in T$$

۴) شرایط یکپارچه‌سازی.

(۹۶-۲)

$$y_{at} \in \{۰,۱\} \qquad \forall a \in A, t \in T$$

مجموعه‌ها:

A: مجموعه تمام فعالیت‌ها.

p_a: مجموعه‌ای از روابط حق تقدم فعالیت‌ها.

R: مجموعه‌ای از کلیه منابعی که برای انجام فعالیت‌ها مصرف می‌شوند.

T: مجموعه‌ای از دوره‌های زمانی که در آن می‌توان فعالیت‌ها را آغاز کرد.

پارامترها:

$\hat{d}_a$: مدت فعالیت. تعداد دوره‌های زمانی مورد نیاز برای انجام فعالیت a را نشان می دهد.

c_{at}: مقادیر هدف فعالیت. مقدار عینی اگر فعالیت a در دوره زمانی t آغاز شود.

$\overline{d}_{aá}$: تأخیر در رابطه با اولویت فعالیت. تعداد دوره‌های زمانی را که باید پس از شروع فعالیت a' و قبل از شروع فعالیت a گذر شود، نشان می‌دهد.

$\hat{r}_{rt}$: در دسترس بودن منابع در هر دوره زمانی.

q_{ar}: مصرف فعالیت - منابع.

متغیرها:

y_{at}: متغیر دودویی برای هر a عضو A و t عضو T.

۲-۱۳- جمع بندی محدودیت‌ها

همانطور که در بخش قبل آورده شد، برخی مقالات مربوط به برنامه‌ریزی معادن زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفتند. در این بررسی، تعداد زیادی محدودیت عملیاتی که در معادن زیرزمینی به آن‌ها برخورد خواهیم داشت مشاهده می‌شود.

در ادامه، به بیان محدودیت‌های مهم آورده شده پرداخته و به صورت اجمالی برای تفهیم بهتر آن محدودیت و اثر آن بر روی تولید و برنامه‌ریزی معادن زیرزمینی توضیحاتی داده می‌شود. لازم به ذکر است، اکثر این محدودیت‌ها مستقل نبوده و با یکدیگر در ارتباط هستند.

۲-۱۳-۱- محدودیت باربری

یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌ها در معادن زیرزمینی، محدودیت باربری است. بر خلاف معادن روباز که امکان استفاده از ماشین آلات غول‌پیکر برای حمل و نقل باطله و مواد معدنی وجود دارد، در معادن زیرزمینی به دلیل وجود فضاهای کوچک و محدود، ماشین آلات کوچکتر با ظرفیت کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

این محدودیت را می‌توان با توجه به نوع بازکننده‌های معدن و با استفاده از تجهیزات مکانیزه مانند اسکیپ در چاه، نوار نقاله در تونل‌های افقی و شیب‌دار، استفاده از ماشین‌آلات با ظرفیت بیشتر جبران کرد.

۲-۱۳-۲- محدودیت ذخیره هر بلوک

با توجه به مشخصات یک ذخیره معدنی و طراحی صورت گرفته برای استخراج آن، معدن به بلوک‌هایی برای استخراج تقسیم‌بندی و کار آماده‌سازی هر بلوک انجام می‌شود. هر بلوک دارای ذخیره مشخصی است و پس از اتمام کار آماده‌سازی بلوک بعدی آغاز می‌شود. گاهی در زمان طراحی می‌توان این بلوک‌بندی را به گونه‌ای انجام داد تا قبل از پایان ذخیره یک بلوک کار آماده‌سازی بلوک دیگر

شروع شده و پیوستگی استخراج رعایت شود تا تأخیری در تولید ماهانه صورت نگیرد.

۲-۱۳-۳- محدودیت حفاری

منظور از محدودیت حفاری، حفاری چال‌های آتشباری و پیشروی است. با توجه به تعداد کارگاه‌های موجود، تیم‌های حفاری محدودی می‌توانند در معدن عملیات حفاری را انجام دهند. این محدودیت، به طور مستقیم با آتشباری و تعداد پرسنل رابطه دارد.

۲-۱۳-۴- محدودیت آتشباری

در برخی معادن، در هنگام آتشباری به دلیل مسائل ایمنی، کارگاه‌های نزدیک به محل آتشباری تعطیل شده و عملیات در آن‌ها متوقف می‌شود. پس داشتن آتشباری‌های متعدد باعث افزایش وقفه در کارگاه‌های فعال و کاهش تولید خواهد شد. بنابراین، معمولاً عملیات آتشباری را در هنگام تعویض شیفت‌های معدنی انجام داده که برای افزایش آن، نیاز به افزایش تعداد پرسنل آتشبار است.

۲-۱۳-۵- محدودیت تهویه

تهویه در معادن به چند دلیل انجام می‌شود. اصلی‌ترین دلیل آن تأمین هوای مورد نیاز کارگران و رقیق کردن گازهای حاصل از آتشباری است. پس در نتیجه با بالا رفتن تعداد عملیات آتشباری و به‌تبع آن افزایش پرسنل، میزان هوای بیشتری برای تهویه نیاز است. این محدودیت با افزایش قدرت فن اصلی تهویه قابل حل است اما افت‌های موضعی فشار، موارد فنی و حتی اقتصادی، این امکان را فراهم نمی‌آورد تا بتوان از فن‌های بسیار بزرگ برای تأمین هوا استفاده کرد.

۲-۱۳-۶- محدودیت توالی استخراج

در برخی موارد، شرایط و مشخصات ذخیره‌ی معدنی و نیز طراحی معدن، باعث می‌شود که استخراج برخی بلوک‌ها، منوط به استخراج بلوک‌های دیگری باشد. به طور مثال، در معادن زیرزمینی،

استخراج پایه‌های باقی گذاشته شده در معدن، منوط به استخراج کل کارگاه‌های استخراج بوده و در انتها پایه‌ها قابل بازیابی خواهند بود.

۲-۱۳-۷- محدودیت توالی پر کردن

این محدودیت نیز مانند محدودیت توالی استخراج وجود دارد. علاوه بر تداخل پر کردن کارگاه‌های استخراج، زمان نیز در این محدودیت وجود دارد. زمان مورد نیاز تا نشست کامل مواد پرکننده و در مواردی که از بتن استفاده می‌شود، زمان مورد نیاز برای خشک شدن و رسیدن به مقاومت حداکثری بتن.

۲-۱۳-۸- محدودیت ظرفیت و تعداد ماشین‌آلات

در معادن زیرزمینی، به دلیل محدودیت فضا، استفاده از ماشین‌آلات غول پیکر و بزرگ امکان‌پذیر نیست. بنابراین، ماشین‌آلات مورد استفاده در معادن زیرزمینی دارای ظرفیت‌های کم و خاصی هستند.

ضمناً به همان دلیل محدودیت فضا، امکان استفاده از تعداد زیاد ماشین‌آلات نیز میسر نیست.

۲-۱۳-۹- محدودیت مقدار استخراج ماده معدنی

در تمام فعالیت‌های معدنی، هدف سودآوری بیشتر است. بنابراین، ماندن ماده معدنی در داخل معدن و استخراج نکردن آن به دلیل نبود بازار و عدم فروش، کم هزینه‌تر از استخراج و نگهداری آن در دپوهای ماده معدنی است. در این حالت، سرمایه‌گذاری بیشتری انجام شده ولی هیچگونه برگشت سرمایه به دلیل فروش نرفتن ماده معدنی انجام نمی‌شود.

بنابراین، بهتر است میزان استخراج سالانه ماده معدنی به گونه‌ای برنامه‌ریزی شود تا حتی‌الامکان، از دپوی ماده معدنی اجتناب شود.

۲-۱۳-۱۰- محدودیت انتقال مواد پر کننده

یکی از روش‌های استخراج معادن زیرزمینی، کندن و پر کردن است.انتقال مواد پرکننده به داخل زمین و استفاده از آن‌ها در کارگاه‌های استخراج، توسط واگن و ریل، نوارنقاله یا وسایل و تجهیزات دیگر انجام می‌شود که هر یک از آن‌ها دارای محدودیت‌های ظرفیت هستند.

برنامه‌ریزی در پرکردن معدن، باید به صورتی انجام شود تا از حداکثر ظرفیت انتقال مواد پرکننده استفاده شود. ضمن اینکه، طراحی استخراج نیز بایستی با این ظرفیت هماهنگی داشته باشد.

۲-۱۳-۱۱- محدودیت دسترسی به مواد پر کننده

در برخی معادن، مواد پرکننده از باطله‌های معدن روباز استفاده می‌شود. در اینصورت به توجه به حجم باطله‌برداری‌های انجام شده در معادن روباز، محدودیتی از نظر دسترسی و ظرفیت مواد پرکننده نخواهد بود. اما برخی دیگر از معادن، از باطله‌های قسمت‌های آماده‌سازی معادن زیرزمینی یا باطله‌های کارخانه‌ی فرآوری استفاده می‌کنند که در این حالت مقدار مواد پرکننده محدود خواهد بود.

بنابراین برنامه‌ریزی باید به گونه‌ای صورت پذیرد تا نیازی به حمل باطله از سایر نقاط به معدن نباشد.

۲-۱۳-۱۲- محدودیت پرسنل

تمامی فعالیت‌های معدنی توسط پرسنل آن معدن صورت می‌گیرد. افزایش تولید، نیازمند افزایش تعداد پرسنل خواهد شد. اما به دلیل محدودیت فضا و همچنین محدودیت‌های ایمنی، تعداد پرسنل را نمی‌توان بدون حد و مرز افزایش داد.

۲-۱۳-۱۳- محدودیت تعداد کارگاه همزمان

برای افزایش تولید و رسیدن به یک برنامه‌ی مشخص در سال، بایستی تعدادی کارگاه استخراج به صورت همزمان استخراج شوند. تعداد کارگاه‌های همزمان، منوط به محدودیت‌هایی است. مانند

محدودیت توالی استخراج، توالی پر کردن، تعداد پرسنل و ... .

در برخی از معادن نیز که به صورت اتاق و پایه استخراج می‌شوند، محدودیت‌های فنی تعداد کارگاه‌های استخراج را کنترل خواهند کرد.

۲-۱۳-۱۴- محدودیت عیار مورد نیاز

در معادن زیرزمینی بر خلاف معادن روباز، امکان دسترسی راحت و آسان به بلوک‌های ماده معدنی وجود ندارد. ضمن اینکه در طراحی و برنامه‌ریزی معادن، علاوه بر تناژ استخراجی، عیار ماده معدنی نیز مشخص می‌شود که بر اساس اطلاعات اکتشافی و مدلسازی‌های انجام شده تعیین می‌شود.

بنابراین، در حین استخراج ماده معدنی، بایستی عیار مورد نیاز برای فروش ماده نیز تأمین شود. این محدودیت، می‌تواند تأثیر زیادی در روند استخراج و برنامه‌ریزی تولید داشته باشد.

۲-۱۳-۱۵- محدودیت اختلاط

در بسیاری از موارد، اختلاط باعث کاهش عیار ماده معدنی و از بین رفتن آن می‌شود. در معادن زیرزمینی به دلیل عدم دسترسی آسان به مواد معدنی، امکان اختلاط نیز زیاد است. به طور مثال، در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ، لیچه یا باطله میان لایه‌های زغال، به راحتی با زغال‌سنگ مخلوط شده و درصد خاکسر را بالا می‌برند که منجر به کاهش کیفیت زغال و کاهش قیمت فروش می‌شود.

یا در معادن با ذخیره توده‌ای شکل و توزیع عیار غیریکنواخت، عیار به صورت مقطعی تغییر می‌کند. در واقع ممکن است در یک سیکل آتشباری در مقایسه با سیکل دیگر، عیار به طور قابل توجهی تغییر کند. این مسئله بر روی محدودیت آتشباری تأثیر مستقیم خواهد داشت که در زمان برنامه‌ریزی باید به آن دقت شود.

۲-۱۳-۱۶- محدودیت ایمنی

معادن زیرزمینی همیشه با مخاطرات زیادی درگیر بوده است. فضاهای محدود، نصب نگهداری،

وجود گازهای قابل انفجار، گازهای حاصل از آتشباری و ... از این جمله موارد هستند.

موارد ذکر شده، به راحتی می‌توانند امر استخراج را تحت تأثیر قرار داده و استخراج را محدودیت‌هایی مواجه سازند.

همانطور که در قسمت‌های قبل ذکر شد، محدودیت‌های زیادی در طراحی، برنامه‌ریزی و استخراج ماده معدنی وجود دارد. این محدودیت‌ها به طور مستقل از هم عمل نخواهند کرد و به طور مستقیم یا غیرمستقیم به یکدیگر ارتباط دارند.

به طور مثال، افزایش تولید منوط به افزایش تعداد آتشباری و آن نیز نیازمند افزایش تعداد پرسنل و تهویه است. محدودیت در یکی از این موارد به راحتی مابقی را تحت تأثیر قرار داده و آن‌ها را نیز محدود می‌کند.

راه حل عبور از این محدودیت‌ها، بررسی آن‌ها به صورت یکپارچه بوده و تأثیرات آن‌ها روی یکدیگر نیز مدنظر قرار گیرد.

فصل سوم

مطالعه موردی

۳-۱- مقدمه

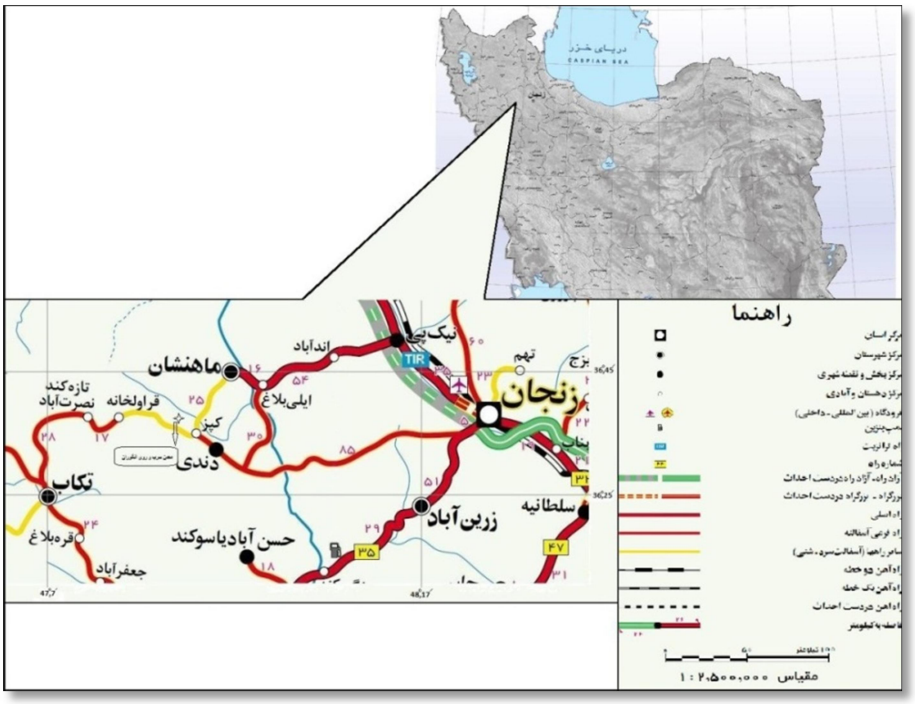
در این پروژه، برنامه‌ریزی معدن زیرزمینی سرب و روی انگوران به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. این معدن به صورت روباز از سال‌ها پیش مورد استخراج قرار گرفته و هم‌اکنون نیز به صورت روباز و زیرزمینی به صورت همزمان در حال استخراج می‌باشد.

میزان ذخیره بخش زیرزمینی حدود ۲ میلیون تن برآورد شده است که از تراز ۲۷۴۰ تا ۲۷۰۰ ادامه دارد. در ادامه، به معرفی معدن و طرح استخراج می‌پردازیم.

لازم به ذکر است که این فصل از پروژه، از طرح استخراج تهیه شده توسط پیمانکار معدن اخذ شده است. این طرح از طرف پیمانکار به شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران به عنوان مالک معدن و پروانه بهره‌برداری ارائه شده است.

۳-۲- معرفی معدن سرب و روی انگوران

معدن سرب و روی انگوران در طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۲۴ دقیقه و عرض جغرافیایی آن ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه در استان زنجان، جنوب غرب شهر زنجان و در ۳۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان دندی قرار گرفته است.



شکل ۳-۱: موقعیت معدن انگوران

نزدیک‌ترین روستا به معدن، روستای قلعه جوق و نزدیک‌ترین شهر بـه آن دنـدی اسـت. کارخانـه تغلیظ معدن انگوران در نزدیکی همین شهر قرار دارد. راه اصـلی دسترسـی (زنجـان، دنـدی، معـدن) دارای مسافتی در حدود ۱۲۰ کیلومتر است.

معدنکاری در معدن انگوران به صدها سال پیش باز می‌گردد. اما از فعالیـت‌هـای اسـتخراجی ایـن معدن در گذشته دور نظیر سایر معادن ایران اطلاعات چندانی در دست نیست.

۳-۳- مشخصات کانسار

کانسار انگوران از نظر کیفی، یکی از کانسارهای شاخص جهان به شمار می‌رود. این کانسـار طبـق تصور کلی بصورت یک عدسی بین شیست‌های کمرپایین (سریسیت-کلریت و شیسـت) و آهـک‌هـای دوباره متبلور گرافیت‌دار قرار دارد. در حقیقت باید گفت شکل اولیه این کانسار، عدسی ماننـد بـوده و پس از آلتراسیون، اکنون شکل کاملاً نامنظمی دارد.

این کانسار از سه بخش اکسیدی، سـولفوری و مخلـوط تشـکیل شـده اسـت. بخـش اکسـیدی در بالاترین قسمت کانسار، بخش سولفوری در پایین‌ترین قسمت و بخش مخلوط بین آن دو قرار گرفتـه

است.

از لحاظ کانی‌شناسی، بخش سولفوره و بخش کربناته شامل کانی‌های زیر می‌باشند:

بخش سولفوره: اسفالریت + گالن + اسمیتزونیت + پیریت + آرسنوپیریت + کوارتز

بخش کربناته: اسمیتزونیت + سروزیت + همیمورفیت + میمتیت + کلسیت + کوارتز

کانسار انگوران از لحاظ جایگاه تکتونیکی، در بخش مرکزی یک تاقدیس برگشته پلانجدار قرار دارد.

۳-۴- اکتشافات

از مجموع فعالیت‌های اکتشافی که تاکنون در منطقه انگوران و بر روی کانسار موجود در این منطقه انجام شده است، تنها اکتشافات فیزیکی کانسار که با حفر گمانه‌های اکتشافی و مطالعه مغزه‌های آنها بدست آمده تا اندازه‌ای قابل اعتماد می‌باشد. نتایج بدست آمده از سایر موارد که اکثراً در مرحله اکتشاف مقدماتی انجام شده‌اند، چندان در خور توجه نیستند.

کانسار انگوران با یک شبکه حفاری ۵۰ ×۵۰ متر توسط ۹۵ حلقه گمانه قائم و دو حلقه گمانه مایل با شیب ۷۰ درجه و در مجموع به طول ۱۴۵۰۰ متر، اکتشاف شده است.

مغزه‌های بدست آمده از ۶۶ گمانه از ۹۷ گمانه حفر شده در اثر یک حادثه آتش سوزی که در انبار این مغزه‌ها رخ داده کاملاً از بین رفته‌اند. اما مغزه‌های مربوط به ۳۱ گمانه باقیمانده در شرایط نسبتاً خوبی نگهداری می‌شوند بطوریکه امکان انجام مطالعات مختلفی از جمله مطالعات ژئومکانیکی بر روی آنها وجود دارد. اغلب مغزه‌های فوق با قطر HQ تهیه شده‌اند اما در بعضی از مقاطع مغزه‌هایی با قطر NQ و BQ با بازیابی کمتر نیز وجود دارد.

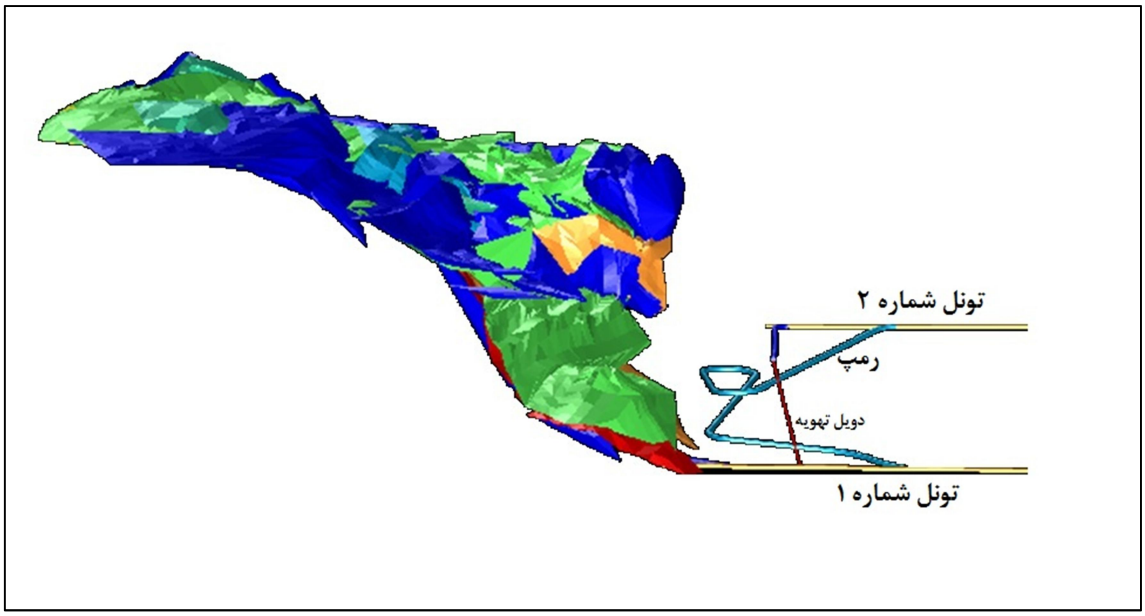
علاوه بر گمانه‌های اکتشافی ذکر شده، در سال ۱۳۷۶ پنج گمانه دیگر (T1 تا T5) در مسیر تونل‌هایی که به منظور باز کردن معدن زیرزمینی طراحی شده، حفر گردیده است. این گمانه‌ها به منظور شناخت وضعیت ژئومکانیکی مسیر احداث تونل‌های طراحی شده برای استخراج بخش سولفوره

کانسار به روش زیرزمینی بـوده و کار عیار سنجـی بر روی مغـزه‌های حاصل از آنها انجام نشده است.

۳-۵- شکل کانسار

کانسار انگوران در بخش مرکزی یک تاقدیس، بین دو بخش دگرگونی شیستی و آهکی واقع شـده است. در کمر بالای کانسار، طبقات آهکی قرار دارند و شیب کلی آن‌ها حدود ۲۰-۲۵ درجه به سـمت جنوب شرق است. در کمر پایین، شیست‌های دگرگونی قرار دارند که شیب کلی آن‌ها ۱۰-۲۵ درجه و در همان جهت جنوب شرق است.

شکل هندسی کانسار که با استفاده از نرم افزار دیتاماین و بر اساس اطلاعات حاصل از گمانـه‌هـای اکتشافی مشخص شده، تقریباً مشابه یک عدسی یا گلابی وارونه و دارای شـیبی درحـدود ۲۰ تـا ۳۰ درجه بطرف جنوب شرق است. در مقاطع افقی، بزرگترین طول کانسار در جهت شمال شرق - جنوب غرب و بزرگترین عرض آن در جهت شمال غرب – جنوب شرق است.



شکل ۳-۲: شکل کلی کانسار انگوران، تونل ها و رمپ حفر شده در بخش زیرزمینی [گزارشات شرکت معدن زمین]

۳-۶- کلیات طرح استخراج

۳-۶-۱- مقدار ذخیره قابل استخراج در بخش زیرزمینی

طبق آخرین مدل‌سازی‌های انجام شده توسط مشاور معدن زیرزمینی، میزان ذخیره قابل استخراج در بخش زیرزمینی به تفکیک نوع ماده معدنی به شرح جدول ۳-۱ می‌باشد.

جدول ۳-۱: ذخیره قابل استخراج در بخش زیرزمینی به تفکیک ماده معدنی [گزارش شرکت معدن زمین]

نوع ماده معدنی	وزن مخصوص	تناژ (تن)	عیار روی (٪)	عیار سرب (٪)	عیار سیلیس (٪)	درصد از کل ذخیره
سولفوره	۳/۷	۱،۳۶۴،۳۰۸	۳۹/۱	۲/۷	۱۳/۸	٪۶۹/۷
مخلوط	۳/۲	۵۱۸،۰۲۷	۳۳/۲	۳/۰	۱۶/۶	٪۲۶/۵
شیست مینرالیزه	۲/۶	۴۲،۴۷۰	۸/۵	۰/۹	۴۵/۳	٪۲/۲
کربنات برشی	۲/۹	۲۰،۲۰۹	۲۵/۶	۴/۵	۱۵/۸	٪۱/۰
مخلوط کم عیار	۲/۸	۱۲،۳۲۰	۱۵/۶	۰/۴	۳۱/۴	٪۰/۶
جمع کل	۳/۵	۱،۹۵۷،۳۳۴	۳۶/۷	۲/۸	۱۸/۶	٪۱۰۰

۳-۶-۲- محدوده مورد طراحی

طرح ارائه شده در گزارش پیمانکار معدن، بمنظور استخراج ماده معدنی زیر معدن روباز و مابین افق‌های ۲۷۲۱ الی ۲۷۴۵ می‌باشد بگونه‌ای که دسترسی به ترازهای زیر ۲۷۲۱ نیز وجود داشته باشد. با توجه به همزمانی استخراج معادن روباز و زیرزمینی، نیاز می‌باشد که بخش زیرزمینی، از بالاترین تراز به پایین‌ترین تراز حفر گردد تا تأثیرات بخش روباز بر روی زیرزمینی و بالعکس به کمترین مقدار خود رسیده و همچنین با توجه به بتن‌ریزی ترازهای بالا ایجاد سقف مصنوعی و پایدار و پیوسته، عملیات معدنکاری زیر یک سقف ایمن انجام پذیرد.

۳-۶-۳- حدود ظرفیت تولید

ذخیره‌ای که مبنای محاسبات برنامه تولید قرار گرفته است بر اساس حجم ماده معدنی مابین ترازهای ۲۷۲۱ الی ۲۷۴۵ با وزن مخصوص متوسط ۲/۸، تقریباً ۱،۲۷۰،۰۰۰ تن می‌باشد که با توجه به برنامه تجهیز و راه‌اندازی مجدد بخش زیرزمینی و همچنین تجهیزات و ماشین‌آلات مد نظر به تفکیک سال استخراج و تراز استخراجی در جدول ۳-۲ ارائه گردیده است.

جدول ۳-۲: برنامه استخراج معدن زیرزمینی به تفکیک سال و تراز استخراجی [گزارش پیمانکار معدن]

سال	تولید (تن)	تراز ۲۷۴۱	تراز ۲۷۳۷	تراز ۳۷۳۳	تراز ۲۷۲۹	تراز ۲۷۲۵	تراز ۲۷۲۱	آماده‌سازی‌ها
اول	۵۱،۵۰۰	۴۴،۵۴۵	–	–	–	–	۵،۴۵۵	۱،۵۰۰
دوم	۱۰۴،۰۰۰	۵۰،۶۵۴	۳۴،۲۱۶	–	–	–	۱۵،۱۳۱	۴،۰۰۰
سوم	۱۵۰،۰۰۰	۴۳،۳۹۹	۱۰۶،۶۰۱	–	–	–	–	–
چهارم	۱۵۰،۰۰۰	–	۹۳،۰۴۷	۵۶،۹۵۳	–	–	–	–
پنجم	۱۵۰،۰۰۰	–	–	۱۲۸،۵۸۱	۲۱،۴۱۹	–	–	–
ششم	۱۵۰،۰۰۰	–	–	۵۶،۲۱۵	۹۳،۷۸۵	–	–	–
هفتم	۱۵۰،۰۰۰	–	–	–	۸۴،۹۷۲	۶۵،۰۲۸	–	–
هشتم	۱۵۰،۰۰۰	–	–	–	۱۱،۷۲۹	۹۷،۴۲۰	۴۰،۸۵۱	–
نهم	۱۵۰،۰۰۰	–	–	–	–	۵۷،۳۱۱	۹۲،۶۸۹	–
دهم	۶۴،۵۴۸	–	–	–	–	–	۶۴،۵۴۸	–
یازدهم	۰	–	–	–	–	–	–	–
دوازدهم	۰	–	–	–	–	–	–	–
جمع (ظرفیت واقعی)	۱،۲۷۰،۰۴۹	۱۳۸،۵۹۸	۲۳۳،۸۶۴	۲۴۱،۷۴۹	۲۱۱،۹۰۵	۲۱۹،۷۵۹	۲۱۸،۶۷۴	۵،۵۰۰

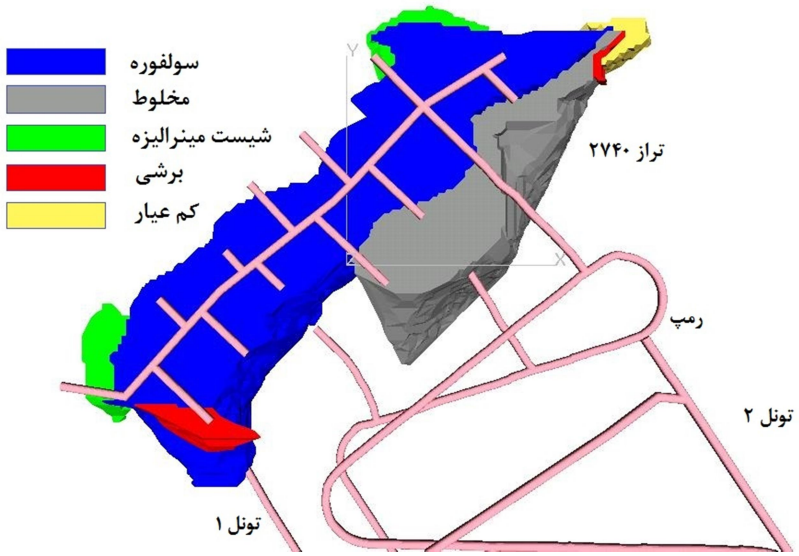
۳-۶-۴- برنامه زمانی کار

تعداد روز کاری در سال با کسر تعطیلات رسمی و غیر رسمی (تعمیر و نگهداری، شرایط بد آب و هوا)، ۳۲۵ روز و در ۳ شیفت ۸ ساعته در هر شبانه‌روز می‌باشد.

۲ ساعت از هر شیفت ۸ ساعته، به آتشکاری و حداکثر ۱ ساعت نیز به استقرار (رفت و آمد) کارگران و پرسنل اجرایی در داخل کارگاه تخصیص می‌یابد. از این رو، ساعت کاری مفید در هر شیفت، ۵ ساعت بوده و در هر شبانه‌روز، ۱۵ ساعت می‌باشد.

۳-۶-۵- مشخصات ماده معدنی

ماده معدنی بخش زیرزمینی بصورت توده‌ای بوده که ادامه ماده معدنی بخش روباز می‌باشد و تا تراز ۲۷۰۰ ادامه دارد. حد روباز زیرزمینی معدن سرب و روی انگوران، در تراز ۲۷۴۰ متر (کف تراز) قرار دارد که دو بخش روباز و زیرزمینی را از یکدیگر جدا نموده است.



شکل ۳-۳: پلان ماده معدنی به همراه تونل‌های آماده‌سازی تراز ۲۷۴۰ [گزارش شرکت معدن زمین]

۳-۷- طرح آماده‌سازی معدن

طرح آماده‌سازی معدن متأثر از پارامترهایی از قبیل نوع و هندسه ماده معدنی، موقعیت ماده معدنی، روش استخراج، و تجهیزات بارگیری و باربری است. به منظور آماده‌سازی معدن، بازکننده‌های اصلی و تعدادی از بازکننده‌های طبقه‌ای قبلاً حفر شده که مشخصات آن‌ها به شرح جدول ۳-۳ می‌باشد.

جدول ۳-۳: مشخصات حفاری‌های انجام شده [گزارش شرکت معدن زمین]

نام بازکننده	سطح مقطع (m^2)	شیب	طول (m)	حجم (m^3)	تراز ابتدا	تراز انتها
تونل بازکننده شماره ۱	۷/۵	۴ در ۱۰۰۰	۱،۱۶۵	۸،۷۳۷/۵	۲۷۰۰/۵	۲۷۰۵/۵
تونل بازکننده شماره ۲	۷/۵	۴ در ۱۰۰۰	۱،۱۶۲	۸،۷۱۵	۲۷۷۵	۲۷۸۰
رمپ اصلی	۹/۲-۱۱/۲	۴ تا ۱۱ درصد	۸۱۲	۷،۴۷۰-۹،۰۹۴	۲۷۰۴/۲	۲۷۸۰
تونل هوارو	۷/۵	۴ در ۱۰۰۰	۷۳	۵۴۷/۵	۲۷۰۰/۵	۲۷۰۰/۸
تونل تهویه	۷	۴ در ۱۰۰۰	۱۳۵	۹۴۵	۲۷۷۹/۸۵	۲۷۷۹/۴۵
دویل تهویه	۲	۴۷ درجه	۱۰۲	۲۰۴	۲۷۷۹/۶	۲۷۰۴/۶
تونل دسترسی افق ۲۷۲۱	۱۰/۸	۴ در ۱۰۰۰	۵۷	۶۱۵/۶	۲۷۲۱	۲۷۲۱/۲۴
تونل دسترسی افق ۲۷۳۰	۱۰/۸	۴ در ۱۰۰۰	۹۵	۱،۰۲۶	۲۷۳۰	۲۷۳۰/۱۲
تونل دسترسی افق ۲۷۴۱	۱۰/۸	۴ در ۱۰۰۰	۱۱۱	۱،۱۹۸/۸	۲۷۴۰	۲۷۴۰/۲

۳-۸- مقدار پیشروی

با توجه به محاسبات صورت گرفته توسط کارشناسان فنی پیمانکار، میزان پیشروی در مواد معدنی مختلف به شرح جدول ۳-۴ تعیین شده است. دلیل کمتر بودن پیشروی در تراز ۲۷۴۱، نبود سقف بتنی می‌باشد اما در ترازهای پایین‌تر به جهت وجود سقف ایمن، میزان پیشروی نیز بیشتر است.

جدول ۳-۴: مقدار پیشروی در مواد معدنی مختلف

تراز	بخش اکسیده (متر)	بخش سولفوره (متر)
۲۷۴۱	۱	۱/۶
۲۷۲۱-۲۷۳۷	۲/۳	۲/۷

۳-۹- ترابری

۳-۹-۱- لودر LHD

سیستم بارگیری در نظر گرفته شده برای این معدن با توجه به روش استخراج و نوع حفریات استخراجی، لودر می‌باشد. با در نظر گرفتن محدودیت‌های طراحی، تهویه و ایمنی، مناسبترین لودر برای این معدن، لودر LHD می‌باشد که علاوه بر قدرت بالا و ظرفیت زیاد در بارگیری و مانور بالا در حرکت و جایگیری، آلودگی کمی داشته و مشکل تهویه نخواهد داشت. از این رو، علاوه بر برطرف کردن نیازهای طراحی و تولید (حداقل ابعاد کارگاه‌های استخراجی)، مشکلات تهویه و ایمنی را نیز حل نموده است.

شکل ۳-۴: LHD مورد استفاده در معدن برای بارگیری و باربری

با توجه به سیکل کاری لودر (۱۰ دقیقه)، ظرفیت پاکت لودر (۵ مترمکعب) و سایر ضرایب و وزن مخصوص مواد معدنی مختلف، حداکثر بارگیری و باربری در هر شبانه روز، ۷۵۲ تن برآورد شده است.

۳-۹-۲- نوار نقاله، لوکوموتیو و واگن

با توجه به بالا بودن تناژ استخراجی روزانه و نیاز به انتقال سریع آن، طولانی بودن مسیر حمل مواد معدنی استخراج شده و همچنین، محدودیت ابعادی و ترافیکی مسیر حمل و محدودیت تهویه، نیاز است که بارگیری به صورت پیوسته و با کمترین آلودگی باشد. لذا سیستم باربری مورد نظر در این معدن، نوارنقاله است که به عنوان سیستم باربری اصلی می‌باشد. در شرایط تعمیر و نگهداری و توقف نوارنقاله، از سیستم باربری لوکوموتیو و واگن بعنوان جایگزین نوار تا زمان راه اندازی مجدد آن استفاده می‌شود. محل نصب نوارنقاله، در سقف تونل شماره ۱ که تونل باربری محسوب می‌شود در مجاورت با ریل است و از ابتدا تا انتهای تونل خواهد بود. طول این نوار مطابق با طول تونل شماره ۱ (۱،۱۶۵ متر) می‌باشد.

شکل ۳-۵: قسمت انتهایی نوار نقاله برای حمل مواد معدنی استخراج شده در بیرون تونل یک

ظرفیت باربری نوارنقاله، ۱۰۰ تن بر ساعت می‌باشد. با توجه به محدودیت ظرفیت تولید توسط لودر، معادل با ۵۰/۲ تن بر ساعت می‌باشد، ظرفیت واقعی باربری نوارنقاله نیز ۵۰/۲ تن بر ساعت است. از این رو، حداکثر توان تولید سالانه معدن نیز، ۲۴۴،۵۳۰ تن بر سال خواهد بود.

نحوه‌ی انتقال مواد معدنی استخراج شده از کارگاه‌های استخراجی در ترازهای مختلف، توسط دویل‌های کانه‌ریز به انتهای تونل شماره ۱ یا تونل باربری حفر شده در تراز ۲۷۲۱ بوده و از آنجا به ابتدای نوار نقاله منتقل و سپس به بیرون معدن حمل خواهد شد.

۳-۱۰- پر کردن

در بسیاری از معادن زیرزمینی، معمولاً فضای خالی شده ناشی از استخراج ماده‌معدنی در کارگاه‌ها توسط مواد مختلفی پر می‌شود. مواد مورد استفاده برای پر کردن، غالباً از جنس یا نوع مواد در دسترس بوده که با استفاده از روش‌های مختلفی از قبیل دستی، مکانیکی، پنوماتیکی و هیدرولیکی در داخل فضای خالی کارگاه جانمایی می‌شود. دلایل متعددی برای پرکردن فضاهای زیرزمینی ایجاد شده ناشی از معدنکاری وجود دارد که در محدوده وسیعی از قبیل فراهم کردن یک نگهدارنده

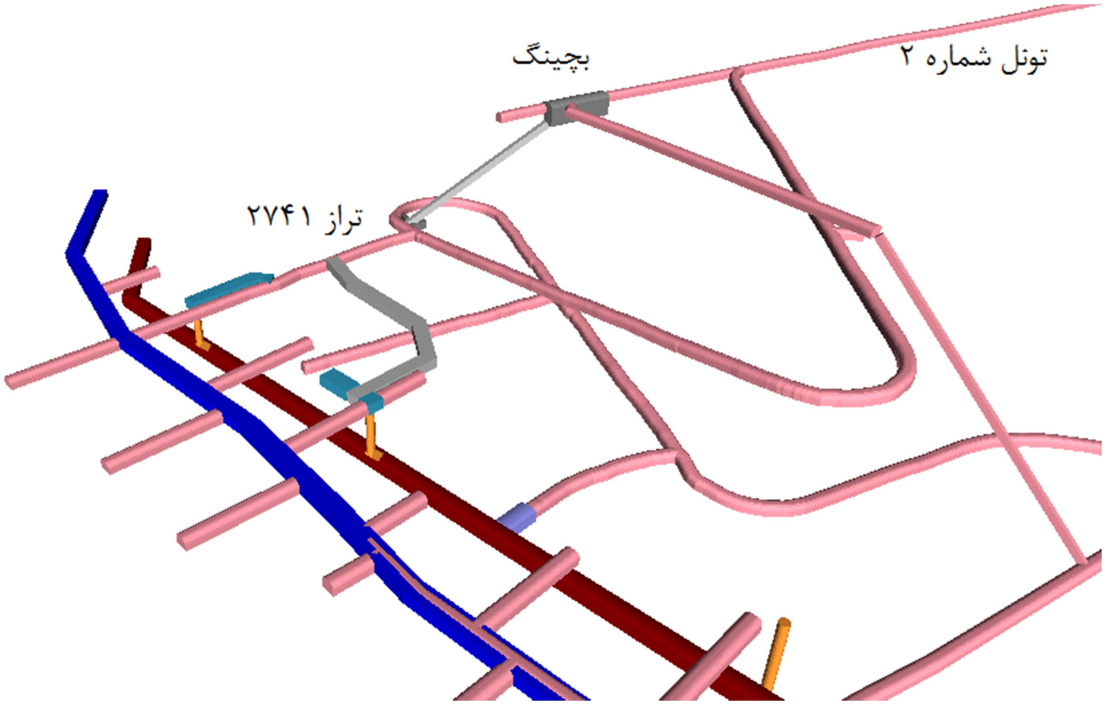
منطقه‌ای تا دفن باطله‌ها متغیر است. مهمترین وظایف ماده پرکننده در کارگاه‌های استخراج شامل نگهداری سنگ دیواره و پایه‌ها، ایجاد سقف مصنوعی و یکپارچه، فراهم کردن سکوی کار در روش کندن و آکندن، افزایش ضریب بازیابی از طریق بازیابی پایه‌ها، فراهم نمودن شرایط استخراج انتخابی بیشتر، جلوگیری از جابجایی، تغییرشکل و شکستگی و یا به طور کلی نشست سطح زمین، کنترل بهتر جریان تهویه و آتش‌سوزی در معادن، کمک به جلوگیری از پدیده انفجار سنگ، ابزار ضروری برای کمک به نگهداری ناپایداری‌های ساختاری و کاهش در هزینه‌های بازسازی معادن است.

با بررسی همه جانبه این مسئله بمنظور ساخت کمربالای مصنوعی مقاوم و یکپارچه و شرایط استفاده از سایر تکنیک‌های پر کردن، ملاحظه گردید که بهترین روش پر کردن برای این معدن، پر کردن با بتن است. لازم به ذکر است در اینجا به منظور صرفه جویی اقتصادی و کاهش هزینه‌های پرکردن، بتن با حداقل مقاومت (۱۵ تا ۲۰ مگاپاسکال) در نظر گرفته شده تا هزینه‌های مربوطه نیز تا حدود زیادی کاهش یابد. قابل ذکر است بخش عمده هزینه‌های پر کننده سیمانی، هزینه سیمان آن است.

موقعیت در نظر گرفته شده برای سنگ شکن و ماسه‌شویی نیز در فضای باز واقع در ورودی تونل شماره ۲ می‌باشد و مصالح اولیه نیز از دپوی باطله معدن روباز که در بالای تونل شماره ۲ مستقر شده، استفاده می‌شود. مصالح سیمان، از طریق سیلوهای واقع در نزدیکی دهانه ورودی تونل شماره ۲ تهیه و مصالح ماسه نیز از طریق واگن به محل تجهیزات بچینگ داخل معدن (انتهای تونل شماره ۲) انتقال خواهد یافت.

شکل ۳-۶: حفر مغار و نصب تجهیزات بچینگ در انتهای تونل ۲

بتن‌ریزی کارگاه‌های تراز ۲۷۴۰، از مسیر دستک ۲۷۴۰ و گالری مربوطه انجام می‌گیرد. بتن‌ریزی کارگاه‌های ترازهای پایین‌تر نیز از دویل کانه‌ریز ۳، دویل تهویه ۳ و سایر راه‌های ارتباطی به کارگاه‌ها انتقال می‌یابد.



شکل ۳-۷: محل قرار گیری تأسیسات بچینگ و مسیر انتقال بتن [گزارش طراحی پیمانکار]

با توجه به روش استخراج (کند و آکند رو به پایین)، به منظور ایجاد سقف مصنوعی بتنی، موقعیت کارگاه‌های موجود در تراز زیرین باید در اولویت قرار گیرد. از اینرو، حفاری کارگاه‌های ترازهای مختلف با زاویه ۳۰ درجه نسبت به هم انجام می‌شود. علاوه بر این، به دلیل منقطع بودن بخش‌های بتن‌ریزی، قسمت‌بندی کارگاه به نحوی انجام می‌شود که محل اتصال دو قسمت متوالی در وسط سقف (دیواره‌های) کارگاه پایینی قرار گیرد. با توجه به این نکات، طول هر قسمت بتن‌ریزی بین ۱۰ تا ۲۰ متر در نظر گرفته می‌شود.

برای تعیین ظرفیت کارخانه تولید بتن، می‌بایست حداکثر حجم روزانه حفاری و بالتبع آن، بتن‌ریزی تعیین گردد. این حجم مطابق با محاسبات، از سال سوم به بعد بوده و بر اساس دو گزینه حجم برنامه‌ای و حجم حداکثری به ترتیب، ۱۷۰ و ۲۷۷ متر مکعب در روز می‌باشد. لذا، ظرفیت بتن‌ریزی می‌بایست بر اساس ۲۷۷ متر مکعب در روز طراحی گردد تا شرایط توسعه طرح را در آینده ایجاد نماید.

ظرفیت بچینگ انتخابی، پمپ و بتن بصورت اسمی، ۴۰ متر مکعب بر ساعت می‌باشد که با توجه

به تجربه مشابه پیمانکار در یک پروژه معدن زیرزمینی دیگر، ظرفیت عملیاتی آن در حدود ۳۰ مترمکعب بر ساعت می‌باشد.

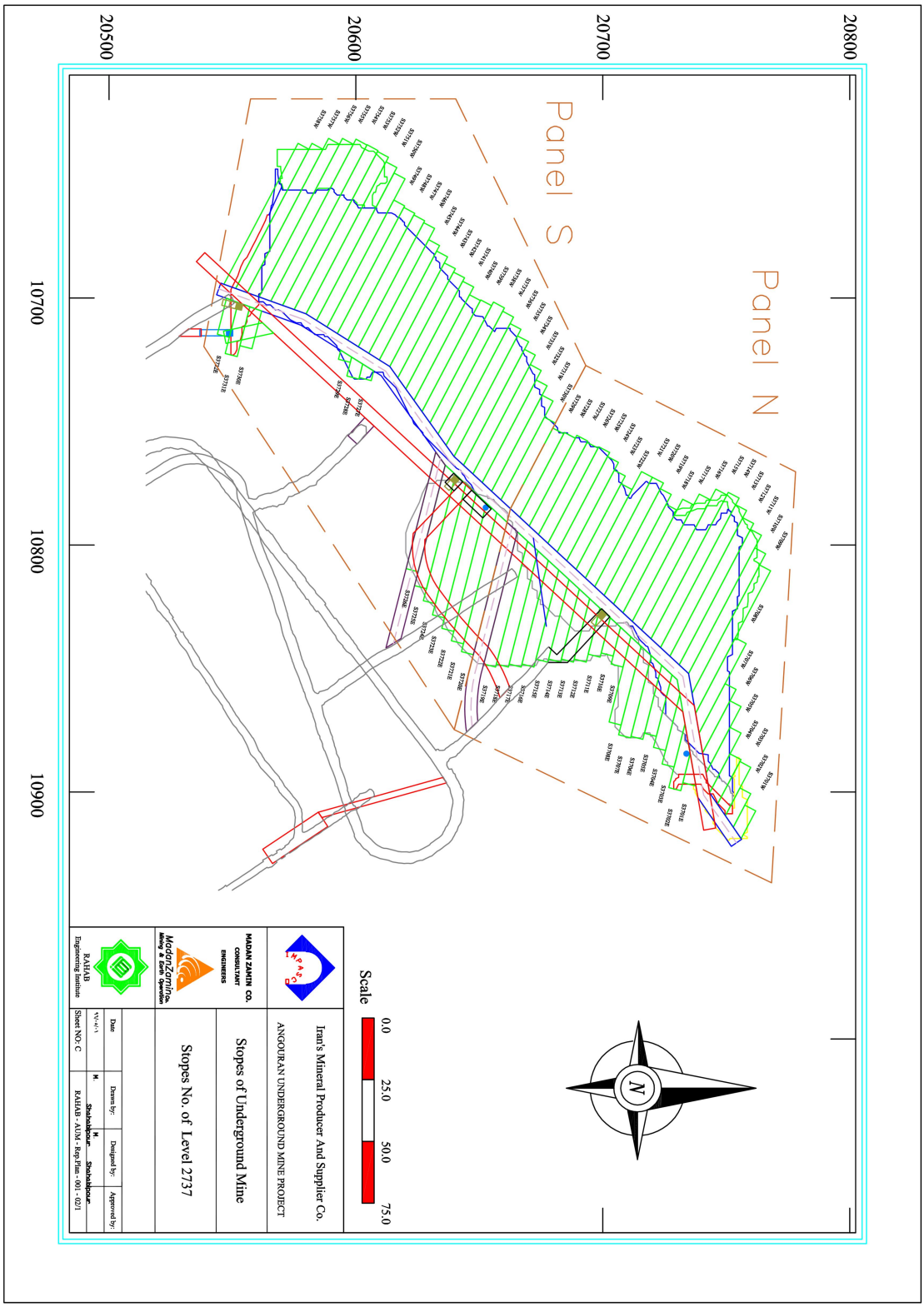
۳-۱۱- مراحل حفاری و بتن‌ریزی

بر اساس شکل و گسترش ماده معدنی و به جهت افزایش تعداد کارگاه‌های استخراجی در ترازهای مختلف، هر تراز به دو پهنه شمالی (N) و جنوبی (S) تقسیم‌بندی شده است. در هر تراز نیز فقط کارگاه‌های موجود در یک پهنه به طور همزمان استخراج می‌شوند. به عنوان مثال در تراز ۲۷۳۷، ابتدا پهنه جنوبی حفاری، استخراج و بتن‌ریزی شده و سپس فرآیند مشابه برای پهنه شمالی اجرا می‌گردد. البته برخی از حفریات نظیر آماده‌سازی‌ها (به عنوان مثال، دویل‌های تهویه و کانه‌ریز) به منظور استفاده‌های بعدی پر نمی‌شوند.

موقعیت کارگاه‌های استخراجی در کارگاه‌های معدن زیرزمینی انگوران به گونه‌ای است که بین دو کارگاه در حال استخراج، یک لنگه ۱۰ متری (دوکارگاه استخراج) باقی گذاشته می‌شود و این لنگه می‌تواند از جنس ماده معدنی (کارگاه استخراج نشده) یا بتن (کارگاه پر شده) باشد.

۳-۱۲- کارگاه‌های تراز ۲۷۳۷

با توجه طراحی صورت گرفته توسط پیمانکار معدن، نقشه و جانمایی کارگاه‌های تراز ۲۷۳۷ به صورت شکل ۳-۸ می‌باشد. این تراز به دلیل اینکه هنوز کار استخراجی در آن صورت نگرفته و قابلیت انجام برنامه ریزی را دارد انتخاب شده است.



شکل ۳-۸: کارگاه‌های استخراجی تراز ۲۷۳۷ [گزارش طراحی پیمانکار معدن]

۳-۱۳- جمع‌بندی

در این فصل، به طور اجمالی معدن زیرزمینی سرب و روی انگوران مورد تشریح قرار گرفته و بخش‌هایی از طرح شرکت پیمانکار که برای انجام مدل‌سازی و برنامه‌ریزی تولید نیاز بود آورده شده است. در فصل بعد، مدل‌سازی انجام شده و نتایج با استفاده از پارامترهای این فصل، به دست می‌آید.

فصل چهارم

مبانی نظری

۴-۱- مقدمه

برای رسیدن به یک هدف مشخص با محدودیت‌های بسیاری چون محدودیت منابع، انرژی، نیروی انسانی، مواد، سرمایه و غیره در نظر گرفته شود.

بروز انقلاب صنعتی موجب رشد سازمان‌ها گردید. با افزایش تخصص و گسترش پیچیدگی سازمان‌ها و شرکت‌ها، تصمیم‌گیری و همچنین تخصیص منابع بین فعالیت‌های بخش‌های مختلف آن به منظور دستیابی به حداکثر کارایی، مشکل شده و نیاز به سیستماتیک نمودن تصمیمات داشت. از این‌رو به مرور زمان بحث تحقیق در عملیات[۱] پایه‌گذاری گردید. در حین جنگ جهانی دوم متخصصان و دانشمندان انگلیسی و آمریکایی به صورت سازمان یافته استفاده از مباحث علمی تحقیق در عملیات را در مأموریت‌های خود مورد استفاده قرار دادند.

تحقیق در عملیات یا پژوهش عملیاتی مجموعه‌ای از تکنیک‌های کمّی است که با استفاده از روش‌های علمی به مدیران در تصمیم‌گیری کمک می‌کند.

در این حوزه به منظور تجزیه و تحلیل و بهبود عملکرد از روش‌های ریاضی و علمی استفاده می‌شود. البته هدف تحقیق در عملیات صرفاً بهبود وضع موجود نیست بلکه هدف آن تشخیص بهترین راه حل ممکن است. ایده اصلی تحقیق در عملیات یافتن بهترین پاسخ برای مسائل پیچیده‌ای است که به زبان ریاضی مدل‌سازی شده‌اند که باعث بهبود یا بهینه‌سازی عملکرد سیستم می‌شوند.

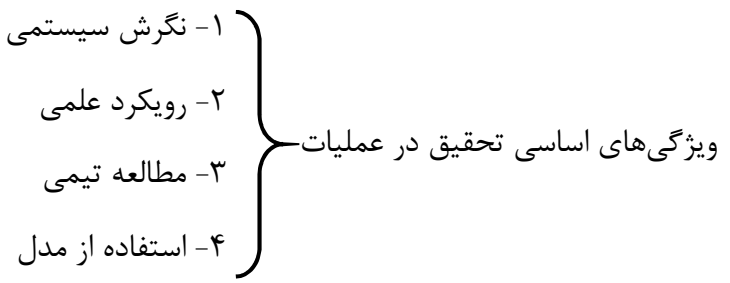
۴-۲- تعریف تحقیق در عملیات (OR)

از اواسط دهه پنجاه میلادی، همراه با گسترش کاربرد تحقیق در عملیات در نتیجه جنگ جهانی دوم، تعاریف متعددی از تحقیق در عملیات ارائه شده است اما هنوز تعریف واحدی از آن وجود ندارد. طبق نظر انجمن تحقیق در عملیات انگلستان، عبارتست از کاربرد روش‌های علم در مسائل پیچیده پدید آمده برای هدایت و مدیریت سیستم‌های بزرگ شامل انسان، ماشین، مواد و پول، در صنعت،

[۱] Operation Reasearch

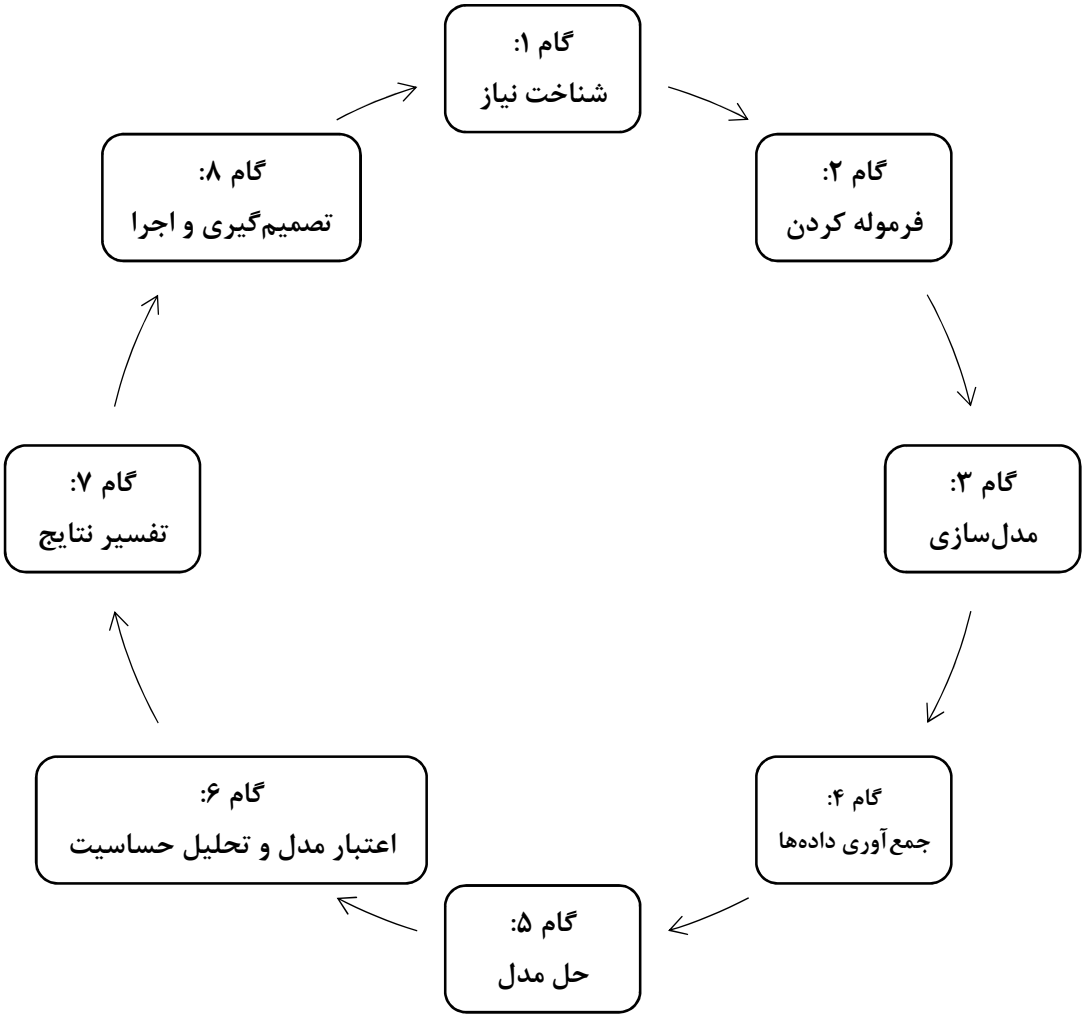
تجارت، دولت و دفاع. طبق نظر انجمن تحقیق در عملیات آمریکا، تحقیق در عملیات رویکردی علمی برای تصمیم‌گیری است که برای دستیابی به بهترین طراحی و عملیات سیستم‌ها (معمولاً در شرایط تخصیص منابع محدود) از تصمیم‌گیری علمی استفاده شود. [۲۲]

۴-۲-۱- ویژگی‌های اساسی تحقیق در عملیات



۴-۳- فرآیند تصمیم‌گیری و حل مسائل تحقیق در عملیات

مطابق تقسیم‌بندی گرین، فرآیند حل مسائل OR در ۸ گام قابل اجراست که گام‌های ۱ و ۲ به فعالیت‌های قبل از مدل‌سازی، گام‌های ۳ تا ۶ به فعالیت‌های حین مدل‌سازی و گام‌های ۷ و ۸ به فعالیت‌های بعد از مرحله مدل‌سازی طبقه‌بندی شده است.



نمودار ۴-۱: مدل گرین جهت حل مسائل تحقیق در عملیات [۲۳]

۴-۳-۱- گام اول- تعریف مسئله

فرآیند تصمیم‌گیری با درک نیاز برای اخذ تصمیم شروع می‌شود. برخی از نیازها منجر به عمل می‌شوند و بعضی از فعالیت‌ها نیازمند بهبود هستند. درک نیاز برای تصمیم ممکن است عینی یا ذهنی باشد.

۴-۳-۲- گام دوم- فرموله‌کردن

اولین کار، مطالعه سیستم مربوطه و خوب تعریف کردن مسئله مورد نظر است. این کار شامل

تعیین هدف مناسب، محدودیت‌ها، روابط بین زمینه مورد مطالعه با دیگر زمینه‌های سازمان، راه‌های ممکن جایگزین، محدودیت‌های زمانی برای تصمیم‌گیری و عواملی از این قبیل است.

جنبه بسیار مهم در فرموله کردن و تنظیم مسئله، تعیین "هدف مناسب" است.

۴-۳-۳- گام سوم- مدل‌سازی

قدم بعد از فرموله کردن مسئله، بیان و ارائه مسئله در قالب یک مدل ریاضی است. مدل ریاضی به وضوح ساختاری ریاضی ارائه می‌کند که داده‌ها را (متغیرهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل، محدودیت‌ها و پارامترها) به ستاده‌ها (ارزش معیارهایی که با تابع هدف بیان شده است) مرتبط می‌کند.

۴-۳-۴- گام چهارم- جمع‌آوری داده‌ها

بعد از ساختن مدل، معمولاً جمع‌آوری داده‌ها برای فرآیند مدل‌سازی ضروری است. جمع‌آوری داده‌ها ممکن است قبل از این مرحله شروع شده باشد، اما اکنون باید داده‌ها را تکمیل کرد.

۴-۳-۵- گام پنجم- حل مدل

حل مدل، بخش مهمی از تحقیق در عملیات است. در بسیاری از مسائل، حل مدل ساده‌ترین جنبه فرآیند تصمیم‌گیری است و این امر به طور وسیعی به گسترش الگوریتم و تکنیک‌های حل ریاضی وابسته است.

۴-۳-۶- گام ششم- اعتبار مدل و تحلیل حساسیت

بعد از حل مدل، تجزیه و تحلیل ضرورت دارد. تحلیل باید به همران میزان که بر اهتبار حل تأکید می‌کند بر اعتبار مدل نیز تأکید داشته باشد. اعتبار مدل بستگی به دقت در محیط مسئله دارد و رویه‌ای است که از تشکیل مدل شروع می‌شود و تا خاتمه کار ادامه می‌یابد.

۴-۳-۷- گام هفتم- تفسیر نتایج

این مرحله شامل بررسی اساسی اهداف یا معیارها و ارزیابی آن‌ها در پرتو نتایج مدل است.

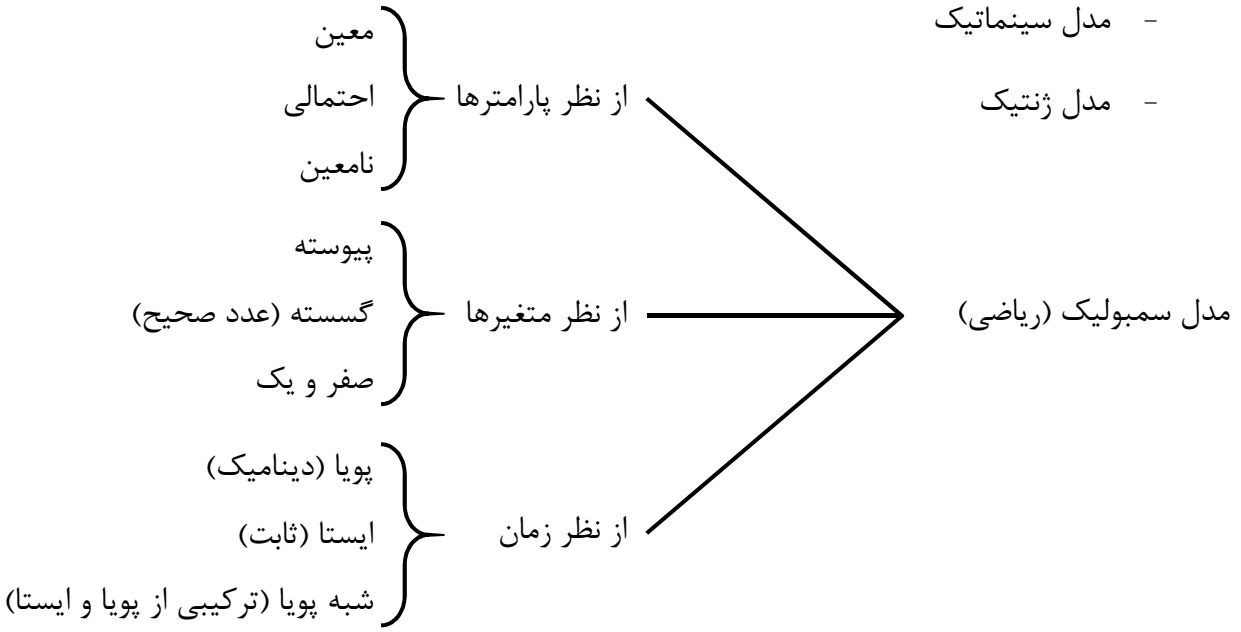
۴-۳-۸- گام هشتم- تصمیم‌گیری و اجرا

تصمیم‌گیرنده غالباً هنگام تصمیم‌گیری نهایی به اطلاعات زیادی دست می‌یابد. این داده‌ها می‌توانند برای استنتاج داده‌ها از طریق تحلیل کمّی کاملاً ذهنی باشند. هر تغییری نیازمند آموزش‌های لازم به افراد درگیر است و از طرفی ممکن است با استقبال یا مقاومت برخی افراد روبرو شود. اگر اجرا موفق نباشد، همه مراحل قبلی در نمودار تصمیم‌گیری بی اثر خواهد بود. ارزیابی حل جز از طریق اجرا ممکن نیست. [۲۳]

۴-۴- مدل‌سازی مسائل

مدل، نمایش خاصی از یک واقعیت می‌باشد و انواع مختلفی دارد.

- مدل شماتیک
- مدل آنالوگ (قیاسی)
- مدل ریاضی (سمبولیک)
- مدل سینماتیک
- مدل ژنتیک



۴-۵- برنامه‌ریزی خطی[۱] (LP)

برنامه‌ریزی خطی، یا بهینه‌سازی خطی، یکی از معروف‌ترین و مهم‌ترین روش‌های برنامه‌ریزی در بین مدل‌های ریاضی می‌باشد که به پیدا کردن مقدار کمینه یا بیشینه از یک تابع خطی روی یک فضای محدب می‌پردازد. به بیان ساده‌تر به وسیله برنامه‌سازی خطی می‌توان بهترین نتیجه (مثلاً بیشترین سود یا کمترین هزینه) را در شرایط خاص و با محدودیت‌های خاص به دست آورد.

یکی از روش‌های متداول برای بهینه کردن تابع هدف با توجه به محدودیت‌های مختلف، برنامه‌ریزی خطی است. برنامه‌ریزی خطی طبیعی‌ترین مکانیزم برای فرمول‌بندی انواع متعددی از مسائل با صرف اندک کوشش محسوب می‌شود. برنامه‌ریزی خطی شامل مدلی است که دارای یک تابع هدف و چند محدودیت است که روابطی خطی بین متغیرها وجود دارد.

در حل مسائل به روش برنامه‌ریزی خطی سه گام اساسی باید در نظر گرفته شود. در اولین مرحله مسئله باید به گونه‌ای تعریف شود که با استفاده از برنامه‌ریزی خطی قابل حل باشد. در دومین مرحله مسئله باید در قالب یک مدل ریاضی فرموله شود. در سومین مرحله باید مسئله حل شود. یک مدل ریاضی به خودی خود ارزش کاربردی و تحلیلی ندارد. اهمیت و ارزش مدل به نتایج آن است که پس از حل به دست می‌آید.

۴-۵-۱- بخش‌های اصلی مدل برنامه‌ریزی خطی

هر مدل از سه جزء متغیرهای تصمیم، تابع هدف و محدودیت‌ها تشکیل شده است.

۴-۵-۱-۱- متغیرهای تصمیم[۲]

متغیرهای تصمیم نمادهای ریاضی هستند که سطح فعالیت هر مؤسسه را بیان می‌کنند. در حقیقت مقدارشان توسط تصمیم گیرنده (پس از حل مسئله) تعیین می‌شود و تحت کنترل تصمیم

[۱] Linear Programming

[۲] Decision Variables

گیرنده قرار دارند. این متغیرها را نمی‌توان مقادیر دلخواه یا نامحدود فرض کرد. آن‌ها معمولاً با شرایط معینی محدود می‌شوند که محدودیت نامیده می‌شوند. این متغیرها می‌توانند به صورت مثبت، به ندرت منفی یا آزاد در علامت مورد استفاده قرار گیرند.

۴-۵-۱-۲- تابع هدف [۱]

تابعی است که از متغیرهای تصمیم تشکیل شده و بیانگر هدف مسئله است؛ لذا تابع هدف به صورت یک رابطه ریاضی است که هدف مؤسسه را در قالب متغیرهای تصمیم توصیف می‌کند. این تابع معمولاً بیانگر حداکثر کردن (Max) یا حداقل نمودن (Min) عملکرد مدل می‌باشد.

۴-۵-۱-۳- محدودیت [۲] (قیود)

محدودیت‌های مدل بیان کننده روابط بین متغیرهای تصمیم می‌باشد که به وسیله محیط عملیات به مؤسسه تحمیل می‌شود. موانع ایجاد شده برای متغیرها معمولاً به صورت بزرگتر مساوی (≥)، کوچکتر مساوی (≤) یا مساوی (=) نمایش داده می‌شود.

[۱] Objective Function

[۲] Constraints

۴-۵-۲- مدل عمومی برنامه‌ریزی خطی

مراحل فرموله کردن مسئله به شرح زیر است:

الف: تعریف متغیرهای تصمیم

ب: تعیین تابع هدف

پ: تعیین محدودیت‌ها

برای یک مسئله برنامه‌ریزی خطی با m محدودیت و n متغیر تصمیم‌گیری، مدل عمومی مسئله به شرح زیر است:

تابع هدف: $\text{Max (Min)}Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n$

محدودیت‌های کارکردی:
$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n (\leq , = , \geq) b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n (\leq , = , \geq) b_2 \\ \quad . \qquad . \qquad . \\ \quad . \qquad . \qquad . \\ \quad . \qquad . \qquad . \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n (\leq , = , \geq) b_m \end{cases}$$

متغیرهای تصمیم: $x_1, x_2, \dots, x_n$ (آزاد در علامت ≤ 0 یا ≥ 0)

یا به شکل خلاصه

تابع هدف: $$\text{Max (Min)}Z = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j \ (\leq , = , \geq) b_1 & i = 1, 2, \dots, m \\ x_j \ \left(\text{آزاد در علامت } \leq 0 \text{ یا } \geq 0\right) & j = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

و در حالت ماتریسی

$$\text{تابع هدف: } \text{Max (Min)} Z = cx$$

$$s.t: Ax\ (\leq, =, \geq) b$$

$$x \geq ۰ \text{ یا } x \leq ۰ \text{ آزاد در علامت } x$$

که در آن:

$$x = \begin{bmatrix} x_۱ \\ x_۲ \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

$$c = [c_۱, c_۲, \cdots, c_n]$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{۱۱} & a_{۱۲} & a_{۱n} \\ a_{۲۱} & a_{۲۲} & a_{۲n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m۱} & a_{m۲} & a_{mn} \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} b_۱ \\ b_۲ \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}$$

۴-۶- تعریف پارامترها و متغیرها

Z: نمایشگر ارزش تابع هدف (تابع معیار) می‌باشد که به صورت معادله خطی نوشته و پس از حل معادله مقدار آن مشخص می‌شود.

x_j (متغیر تصمیم): نمایشگر مقدار عملکرد یا سطح یک فعالیت می‌باشد که مقادیر آن پس از حل معادله مشخص می‌شود.

c_j (ضرایب هزینه یا سود): ارزش هر واحد فعالیت در تابع هدف می‌باشد. این ضریب عددی در

معادله معلوم است.

a_{ij} (ضرایب تکنولوژیکی): مقداری از منبع i که برای انجام یک واحد فعالیت j به کار رفته و عددی معلوم در معادله است.

b_j: مقادیر معلوم سمت راست محدودیت‌ها که موجودی منابع یا سقف تقاضا را بیان می‌دارد. [۲۲]

لازم به ذکر است، که برنامه‌ریزی تولید انجام شده در این پروژه، به صورت برنامه‌ریزی خطی با عدد صحیح می‌باشد.

فصل پنجم:

مدل‌سازی پروژه

۵-۱- مقدمه

همانطور که در فصول قبل بیان شد، برنامه‌ریزی استخراج معادن زیرزمینی، با توجه به رو به اتمام بودن ذخایر روباز معادن، بسیار حائز اهمیت است.

در این فصل، با توجه به مبانی مدل‌سازی ریاضی ارائه شده در فصل قبل، متغیرهای تصمیم، تعیین شده و سپس تابع هدف و محدودیت‌های مورد نظر مدل‌سازی می‌شوند.

۵-۲- مدل‌سازی

مدل‌سازی ریاضی یکی از روش‌های کاربردی در حل مسائل تحقیق در عملیات است. برای استفاده از این روش، نیاز به تعریف ۳ بخش می‌باشد.

- متغیرهای تصمیم
- تابع هدف
- محدودیت‌ها

بر اساس توضیحات ذکر شده در فصل ۳، برنامه‌ریزی عملیات معدنی در تراز ۲۷۳۷ معدن زیرزمینی سرب و روی انگوران انجام خواهد شد. روش استخراج به صورت اتاق و پایه‌های نواری به همراه پر کردن با بتن می‌باشد. برنامه‌ریزی صورت گرفته به عنوان برنامه بلندمدت برای این معدن، تولید سالانه ۱۲۰,۰۰۰ تن ماده معدنی بدون در نظر گرفتن عیار یا نوع ماده معدنی مشخصی می‌باشد.

با توجه به اینکه ذخیره زیرزمینی انگوران از مواد معدنی مختلف با وزن مخصوص‌های متفاوت تشکیل شده است، لازم است کارگاه‌های استخراج، به بخش‌های کوچکتری تقسیم شده تا بتوان برنامه‌ریزی درستی از تناژ استخراجی به عمل آورد.

شکل ۵-۱: تنوع ماده معدنی در یک کارگاه

همانطور که در شکل ۵-۱ مشخص است، به عنوان نمونه، در این کارگاه‌ها، ابتدا ماده معدنی سولفوره (رنگ آبی) با وزن مخصوص ۳/۷ تن بر مترمکعب و سپس شیست مینرالیزه (رنگ سبز) با وزن مخصوص ۲/۶ تن بر مترمکعب وجود دارد. این بدین معنی می‌باشد که یک متر پیشروی در ماده معدنی سولفوره با فرض سطح مقطع ۲۰ مترمربع، ۷۴ تن ماده معدنی و در بخش شیست مینرالیزه، ۵۲ تن استخراج صورت می‌گیرد که تأثیر به سزایی در امر برنامه‌ریزی تولید سالانه خواهد داشت.

در ادامه این فصل، به بیان هدف، متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌ها پرداخته می‌شود:

۵-۲-۱- تابع هدف:

تابع هدف به صورت حداقل کردن میزان اضافه تولید و کسری تولید معدن نسبت به برنامه‌ریزی بلند مدت تعریف شده است. در اینجا بایستی اختلاف تولید برنامه‌ریزی شده و تولید واقعی معدن با توجه به محدودیت‌های تعریف شده، به صفر میل کند.

(۱-۵)

$$\min \sum_{t=1}^{T} \overline{Z} + \underline{Z}$$

(۲-۵)

$$TPL_t - TPR_t - \overline{Z}_t + \underline{Z}_t = 0 \qquad \forall t \in T$$

TPL_t: تولید برنامه‌ریزی شده در زمان t (تن).

TPR_t: تولید واقعی در زمان t (تن).

$\overline{Z}_t$: اضافه تولید در زمان t ام.

$\underline{Z}_t$: کسری تولید در زمان t ام.

t: دوره زمانی (۱، ۲، ۳، ....، T).

۵-۲-۲- متغیرهای تصمیم:

X_{ijt}
- ۱ در صورتیکه عملیات استخراج زیرمجموعه j از کارگاه i در زمان t برنامه‌ریزی شده باشد.
- ۰ در غیر اینصورت

Y_{it}
- ۱ در صورتیکه عملیات پر کردن کارگاه i در زمان t برنامه‌ریزی شده باشد.
- ۰ در غیر اینصورت

در این بخش، متغیرهای تصمیم به دو متغیر تقسیم شده است.

یک متغیر که به دلیل اختلاف وزن مخصوص مواد معدنی مختلف، دارای زیرمجموعه می‌باشد، و دیگری بر اساس حجم کارگاه به دوره‌های زمانی مشخص تقسیم شده‌اند.

۵-۲-۳- محدودیت‌ها:

۵-۲-۳-۱- تولید کل معدن

تولید کل معدن، به تعداد کارگاه‌های در حال کار و همچنین میزان ماده معدنی قابل استخراج با توجه به میزان پیشروی و وزن مخصوص در بخش‌های مختلف بستگی دارد. برای این منظور، کارگاه‌های استخراج به بخش‌های کوچکتر تقسیم شده است. ابعاد این بخش‌ها، با توجه به بازه‌ی زمانی برنامه‌ریزی کوتاه مدت، میزان پیشروی در ماده‌ی معدنی خاص و وزن مخصوص آن ماده، تعیین شده است. به طور مثال، پیشروی در بخش سولفوره به دلیل سختی بالاتر، در هر سیکل آتشباری کمتر از بخش کربناته است. همینطور می‌توان گفت به دلیل وزن مخصوص بالاتر در بخش سولفوره، به تعداد کارگاه استخراج کمتری نسبت به بخش کربناته برای رسیدن به تولید برنامه‌ریزی شده نیاز است.

(۳-۵)

$$TPR_t = \sum_{i=1}^{I} X_{ijt} P_{ij} \qquad \forall t \in T \qquad \forall j \in J_i$$

$$S = a \times h$$

$$P_{ij} = S \times L_{ij} \times \rho_{ij}$$

i: شماره کارگاه (۱، ۲، ۳، ....، I).

j: شماره زیرمجموعه کارگاه (۱، ۲، ۳، ....، J_i).

P_{ij}: تولید کارگاه i ام (تن).

J_i: تعداد زیرمجموعه‌های کارگاه i ام.

S: سطح مقطع کارگاه (متر).

h: ارتفاع کارگاه (متر).

a: عرض کارگاه (متر).

ρ_{ij}: چگالی سنگ در کارگاه i در زیرمجموعه‌ی j با توجه به جنس سنگ (تن بر مترمکعب).

L_{ij}: پیشروی در کارگاه i در زیرمجموعه‌ی j با توجه به جنس سنگ در یک دوره زمانی واحد (متر).

۵-۲-۳-۲- محدودیت سیستم باربری

با توجه به نوع سیستم باربری در این معدن، دو نوع محدودیت وجود دارد. یکی محدودیت حمل توسط LHD و دیگری محدودیت حمل توسط نوار نقاله. این محدودیت، نشان می‌دهد که میزان تولید از کارگاه‌ها نمی‌تواند از ظرفیت باربری بیشتر باشد.

(۴-۵)

$$TPR_t \leq LHD_t \qquad \forall t \in T$$

(۵-۵)

$$TPR_t \leq HC_t \qquad \forall t \in T$$

LHD_t: ظرفیت باربری LHDدر دوره زمانی t ام (تن).

HC_t: ظرفیت باربری در دوره زمانی t ام (تن).

۵-۲-۳-۳- محدودیت ذخیره کارگاه i ام

در این قسمت نیز، با توجه به وزن مخصوص هر بخش از یک کارگاه و طول‌های مختلف زیرمجموعه‌های آن، ذخیره کارگاه به دست می‌آید. این محدودیت، اجازه‌ی استخراج بیش از ظرفیت کارگاه را نمی‌دهد. در حقیقت حداکثر دفعاتی که X_{ijt} به عنوان متغیر تصمیم استخراج یک کارگاه انتخاب می شود، محدود به ذخیره‌ی کارگاه و اتمام استخراج آن کارگاه می‌باشد.

(۶-۵)

$$R_i = \sum_{j=1}^{J_i} S \times L_{ij} \times \rho_{ij} \qquad \forall i \in I \quad \text{ذخیره کارگاه}$$

(۷-۵)

$$\sum_{t=1}^{T} X_{ijt} \times P_{ij} = R_i \; \forall i \in I \qquad \forall j \in J_i$$

R_i: ذخیره کارگاه i ام (تن).

۵-۲-۳-۴- محدودیت استخراج تا انتهای کارگاه

در این قسمت، با توجه به تعداد زیرمجموعه‌های کارگاه i بایستی متغیر تصمیم استخراج به نحوی انتخاب شود که کل ذخیره‌ی کارگاه به اتمام برسد. همچنین، ترتیب استخراج زیرمجموعه‌های یک کارگاه را مشخص می‌کند.

(۸-۵)

$$X_{ijt} \geq X_{i,j+1,t} \quad \forall i \in I \quad , \quad \forall j \in J_i$$

(۹-۵)

$$\sum_{t=1}^{\acute{t}} X_{it} = \sum_{t=1}^{\acute{t}} \sum_{j=1}^{J} X_{ijt} \quad \forall i \in I \quad , \quad \forall j \in J_i \quad , \quad \acute{t} \in T$$

۵-۲-۳-۵- محدودیت پر کردن کارگاه i ام پس از استخراج آن

روش استخراج این معدن که به صورت کندن و پر کردن می‌باشد، پس از استخراج هر کارگاه، سریعا بایستی نسبت به پر کردن آن اقدام نمود. این محدودیت، نشان می‌دهد که پس از استخراج کارگاه i ام، متغیر تصمیم برای پر کردن آن بایستی مقدار ۱ را انتخاب نماید.

(۱۰-۵)

$$\sum_{t=1}^{\acute{t}} X_{ijt} - J_i + Y_{i(t+1)} = 1$$

۵-۲-۳-۶- محدودیت اتمام بتن‌ریزی کارگاه

با محاسبه حجم کارگاه، تعداد بتن‌ریزی لازم برای پر کردن کارگاه در زمان‌های مختلف تعیین می‌شود. به طور مثال، از نظر فنی، بایستی ۲۰ مترمکعب بتن در هر مرحله ریخته شود تا علاوه بر راندمان بالای پر کردن، بتن بتواند به حداکثر مقاومت خود برسد.

(۱۱-۵)

$$V_i = S \times K_i$$

$$\sum_{t=1}^{T} ABK_{it} = V_i \qquad \forall i \in I$$

K_i: طول کارگاه i ام (متر).

ABK_{it}: ظرفیت بتن‌ریزی در کارگاه i ام در زمان t. (مترمکعب) (از نظر فنی، به طور مثال فقط ۲۰ مترمکعب در هر بار می‌توان بتن‌ریزی کرد تا بتن هم به طور مناسب پر شود و هم به مقاومت مورد نظر برسد).

V_i: حجم کارگاه i ام (مترمکعب).

۵-۲-۳-۷- کل بتن مورد نیاز برای کارگاه‌های پر شونده در زمان t ام

در این بخش، برنامه‌ریزی پرکردن کارگاه‌های مختلف پس از استخراج در زمان‌های مختلف صورت می‌گیرد.

(۱۲-۵)

$$BKF_t = \sum_{i=1}^{I} Y_{it} \times ABK_{it} \qquad \forall t \in T$$

BKF_t: بتن مورد نیاز در دوره‌ی زمانی t ام (متر مکعب).

۵-۲-۳-۸- محدودیت ظرفیت بچینگ پلانت در زمان t ام

ظرفیت واحد تولید بتن در این معدن با توجه به محدودیت حمل مصالح، سیمان، آب و همچنین ظرفیت طراحی شده برای این واحد تعیین می‌شود. میزان بتن‌ریزی برنامه‌ریزی شده در معدن، نبایستی بیشتر از ظرفیت واحد ساخت بتن باشد.

(۱۳-۵)

$$BPC_t = CE_t + SD_t + W_t$$

$$BKF_t \leq BPC_t$$

BPC_t: ظرفیت بتن‌سازی دستگاه بچینگ پلانت در دوره‌ی زمانی t.

CE_t: ظرفیت انتقال سیمان در زمان t ام.

SD_t: ظرفیت انتقال مصالح خشک در زمان t ام.

W_t: ظرفیت انتقال آب در زمان t ام.

۵-۲-۳-۹- محدودیت فاصله کاری بین کارگاه‌ها

با توجه به نحوه استخراج کارگاه‌ها، بایستی برای ایمنی کار، لنگه‌هایی بین کارگاه‌ها بـه عنـوان پایه قرار گیرد. در واقع کارگاه‌های فعال اعم از در حال استخراج یا پرکردن، بایستی با فاصله‌ای معـین از یکدیگر کار کنند.

(۱۴-۵)

$$\sum_{i-q}^{i+q} (X_{it} + Y_{it}) = ۱ \qquad \forall t \in T$$

q: تعداد کارگاه مورد نیاز برای لنگه بین کارگاه‌ها.

در ادامه، با بیان پارامترهای مربوطه، اقدام به حل مسئله و ارائه برنامه‌ریزی تولید خواهیم نمود.

۵-۳- فرضیات حل مدل

برای حل مدل مذکور، ابتدا به طرح استخراج معدن که توسط پیمانکار تهیه و ارائه شده است مراجعه گردید، بنابراین برای حل مدل، از اطلاعات و آمار ارائه شده در طرح پیمانکار استفاده می‌شود. این اطلاعات به شرح زیر جمع‌آوری شده است:

۵-۳-۱- تولید برنامه‌ریزی شده

برای این معدن، استخراج سالانه ۱۲۰،۰۰۰ تن ماده معدنی برنامه‌ریزی شده است. (TPL)

۵-۳-۲- وزن مخصوص

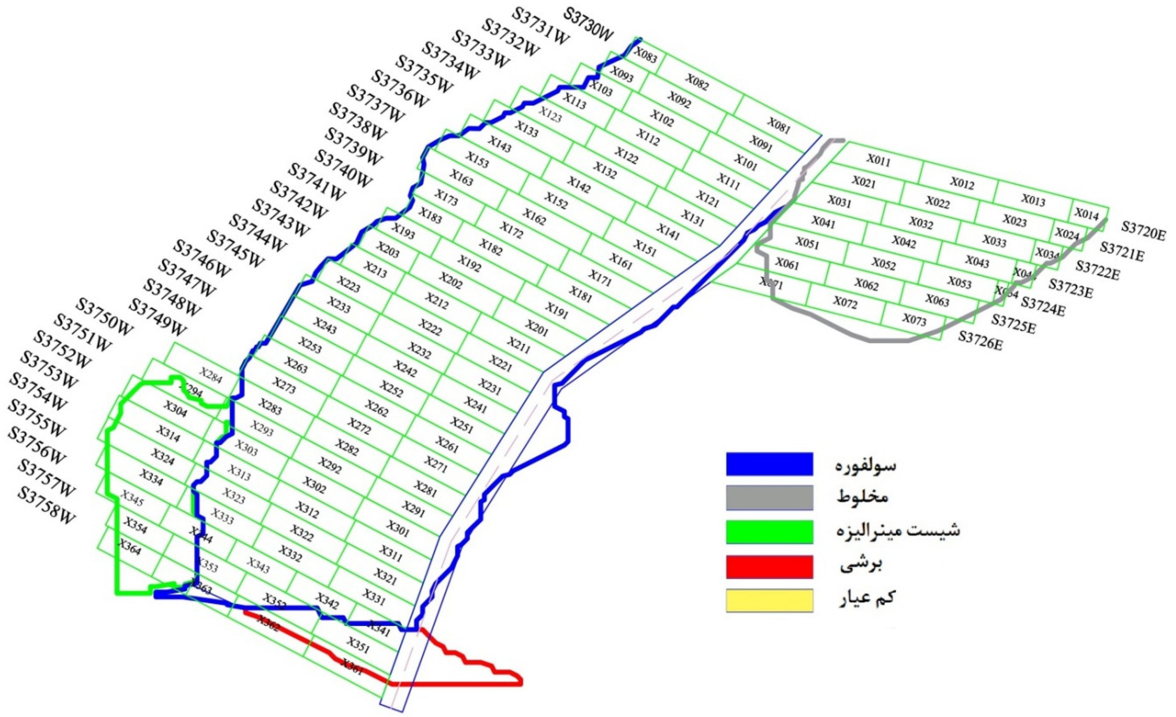
با توجه به تنوع مواد معدنی در معدن زیرزمینی انگوران، وزن مخصوص هر یک از مواد در جدول ۵-۱ آورده شده است.

جدول ۵-۱: وزن مخصوص مواد معدنی مختلف

ماده معدنی	وزن مخصوص (تن بر مترمکعب)
سولفوره	۳/۷
مخلوط	۳/۲
شیست مینرالیزه	۲/۶
برشی	۲/۹
کم عیار	۲/۸

۵-۳-۳- کارگاه‌های استخراجی

برای سهولت کار و استفاده از برنامه‌ریزی تولید، کارگاه‌های استخراجی پهنه جنوبی تراز ۲۷۳۷ انتخاب شده است. در این تراز تاکنون، هیچگونه عملیات استخراجی صورت نگرفته است. در شکل ۵-۲ پهنه انتخابی به همراه شماره کارگاه‌های زیرمجموعه آن آورده شده است.



شکل ۵-۲: پهنه انتخابی برای برنامه‌ریزی تولید و زیرمجموعه‌های کارگاهی

در جدول ۵-۲ ابعاد، طول، حجم و تناژ هر کارگاه با توجه به ماده معـدنی تشـکیل دهنـده و وزن مخصوص آن مشخص شده است.

جدول ۵-۲: مشخصات کارگاه‌های استخراجی در پهنه جنوبی تراز ۲۷۳۷

ردیف	شماره کارگاه	a عرض (m)	h ارتفاع (m)	Ki طول (m)	Vi حجم (m^3)	Ri تناژ (تن)	ماده معدنی
۱	S۳۷۲۰E	۵	۴	۵۶/۶۸	۱۱۳۴	۳۶۲۷	مخلوط
۲	S۳۷۲۱E	۵	۴	۶۵/۱۵	۱۱۲۳	۳۵۹۴	مخلوط
۳	S۳۷۲۲E	۵	۴	۵۴/۹۶	۱۰۹۹	۳۵۱۷	مخلوط
۴	S۳۷۲۳E	۵	۴	۵۳/۲۳	۱۰۶۵	۳۴۰۶	مخلوط
۵	S۳۷۲۴E	۵	۴	۵۱/۳۳	۱۰۲۷	۳۲۸۵	مخلوط
۶	S۳۷۲۵E	۵	۴	۴۹/۰۱	۹۸۰	۳۱۳۷	مخلوط
۷	S۳۷۲۶E	۵	۴	۴۶/۶۳	۹۳۳	۲۹۸۴	مخلوط
۸	S۳۷۳۰W	۵	۴	۳۸/۴۵	۷۶۹	۲۸۴۵	سولفوره

ردیف	شماره کارگاه	a عرض (m)	h ارتفاع (m)	Ki طول (m)	Vi حجم (m^3)	Ri تناژ (تن)	ماده معدنی
۹	S۳۷۳۱W	۵	۴	۴۴/۵۶	۸۹۱	۳۲۹۸	سولفوره
۱۰	S۳۷۳۲W	۵	۴	۴۷/۵۹	۹۵۲	۳۵۲۲	سولفوره
۱۱	S۳۷۳۳W	۵	۴	۵۰/۶۲	۱۰۱۲	۳۷۴۶	سولفوره
۱۲	S۳۷۳۴W	۵	۴	۵۳/۶۴	۱۰۷۳	۳۹۷۰	سولفوره
۱۳	S۳۷۳۵W	۵	۴	۵۵/۸۴	۱۱۱۷	۴۱۳۲	سولفوره
۱۴	S۳۷۳۶W	۵	۴	۵۶/۸۹	۱۱۳۸	۴۲۱۰	سولفوره
۱۵	S۳۷۳۷W	۵	۴	۵۷/۴۲	۱۱۴۸	۴۲۴۹	سولفوره
۱۶	S۳۷۳۸W	۵	۴	۵۶/۴۶	۱۱۲۹	۴۱۷۸	سولفوره
۱۷	S۳۷۳۹W	۵	۴	۵۲/۳۰	۱۰۴۶	۳۸۷۱	سولفوره
۱۸	S۳۷۴۰W	۵	۴	۴۹/۵۶	۹۹۱	۳۶۶۷	سولفوره
۱۹	S۳۷۴۱W	۵	۴	۵۰/۶۲	۱۰۱۲	۳۷۴۶	سولفوره
۲۰	S۳۷۴۲W	۵	۴	۴۹/۶۷	۹۹۳	۳۶۷۵	سولفوره
۲۱	S۳۷۴۳W	۵	۴	۴۸/۷۱	۹۷۴	۳۶۰۴	سولفوره
۲۲	S۳۷۴۴W	۵	۴	۵۰/۰۱	۱۰۰۰	۳۷۰۰	سولفوره
۲۳	S۳۷۴۵W	۵	۴	۵۲/۲۰	۱۰۴۴	۳۸۶۳	سولفوره
۲۴	S۳۷۴۶W	۵	۴	۵۶/۹۸	۱۱۴۰	۴۲۱۷	سولفوره
۲۵	S۳۷۴۷W	۵	۴	۵۷/۵۰	۱۱۵۰	۴۲۵۵	سولفوره
۲۶	S۳۷۴۸W	۵	۴	۵۷/۹۰	۱۱۵۸	۴۲۸۴	سولفوره
۲۷	S۳۷۴۹W	۵	۴	۵۸/۲۷	۱۱۶۵	۴۳۱۲	سولفوره
۲۸	S۳۷۵۰W	۵	۴	۶۷/۶۴	۱۳۵۳	۵۰۰۵	سولفوره
۲۹	S۳۷۵۱W	۵	۴	۶۹/۷۳	۱۳۹۵	۴۷۲۶	سولفوره، شیست مینرالیزه
۳۰	S۳۷۵۲W	۵	۴	۷۱/۹۷	۱۴۳۹	۴۸۱۸	سولفوره، شیست مینرالیزه
۳۱	S۳۷۵۳W	۵	۴	۷۳/۱۴	۱۴۶۳	۴۸۹۹	سولفوره، شیست مینرالیزه
۳۲	S۳۷۵۴W	۵	۴	۷۳/۷۴	۱۴۷۵	۱۹۴۳	سولفوره، شیست مینرالیزه
۳۳	S۳۷۵۵W	۵	۴	۷۲/۱۵	۱۴۴۳	۴۸۴۷	سولفوره، شیست مینرالیزه
۳۴	S۳۷۵۶W	۵	۴	۷۰/۲۱	۱۴۰۴	۴۵۷۴	سولفوره، شیست مینرالیزه، برش
۳۵	S۳۷۵۷W	۵	۴	۶۶/۰۲	۱۳۲۰	۴۰۲۹	سولفوره، شیست مینرالیزه، برش
۳۶	S۳۷۵۸W	۵	۴	۶۴/۰۹	۱۲۸۲	۳۷۸۹	سولفوره، شیست مینرالیزه، برش

۵-۳-۴- پیشروی در هر سیکل (Lij)

با توجه به طراحی صورت گرفته، میزان پیشروی در سولفوره، ۲/۷ متر و در ماده معدنی مخلوط و سایر مواد، ۲/۳ متر در هر سیکل آتشباری پیش‌بینی شده است.

با توجه به طرح پیمانکار، در سال ۲۴۸ روز مفید کاری وجود خواهد داشت که آتشباری انجام می‌پذیرد.

پارامتر j در متغیرهای تصمیم، به عنوان دوره زمانی در نظر گرفته شده است. برای سهولت حل مسئله، این پارامتر، ۱۰ روز در ماه فرض شده است. با این حساب در یک دوره زمانی j، که معادل ۶/۹ روز کاری مفید خواهد بود، میزان پیشروی در ماده معدنی سولفوره معادل ۱۸/۶ متر و در مخلوط و سایر مواد معدنی به دلیل نیاز به نصب تجهیزات نگهداری، ۱۵/۸ متر می‌شود.

با در نظر گرفتن وزن مخصوص‌های مختلف، حداکثر تولید در بخش سولفوره ۱،۳۷۶ تن در دوره زمانی j و در سایر مواد، ۱،۰۱۴ تن در دوره زمانی j می‌باشد.

۵-۳-۵- متغیرهای تصمیم استخراج

کارگاه‌های استخراج بر اساس دوره زمان‌بندی شده و میزان ذخیره موجود در آن‌ها و همچنین حداکثر تولید در دوره زمانی j، به صورت جدول ۵-۳ نام‌گذاری شده و به عنوان متغیر تصمیم استخراج تعیین شده‌اند.

جدول ۵-۳ :متغیرهای تصمیم استخراج

شماره کارگاه	متغیرهای تصمیم استخراج X_{ij}				
ذخیره کارگاه (تن)	میزان تولید P_{ij} (تن)				
S۳۷۲۰E	X۰۱۱	X۰۱۲	X۰۱۳	X۰۱۴	-
۳،۶۲۷	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	۵۸۵	-
S۳۷۲۱E	X۰۲۱	X۰۲۲	X۰۲۳	X۰۲۴	-
۳،۵۹۴	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	۵۵۲	-
S۳۷۲۲E	X۰۳۱	X۰۳۲	X۰۳۳	X۰۳۴	-
۳،۵۱۷	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	۴۷۵	-
S۳۷۲۳E	X۰۴۱	X۰۴۲	X۰۴۳	X۰۴۴	-
۳،۴۰۶	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	۴۷۵	-
S۳۷۲۴E	X۰۵۱	X۰۵۲	X۰۵۳	X۰۵۴	-
۳،۲۸۵	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	۲۴۳	-
S۳۷۲۵E	X۰۶۱	X۰۶۲	X۰۶۳	-	-
۳،۱۳۷	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	-	-
S۳۷۲۶E	X۰۷۱	X۰۷۲	X۰۷۳	-	-
۲،۹۸۴	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	۹۵۶	-	-
S۳۷۳۰W	X۰۸۱	X۰۸۲	X۰۸۳	-	-
۲،۸۴۵	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	۹۵۶	-	-
S۳۷۳۱W	X۰۹۱	X۰۹۲	X۰۹۳	-	-
۳،۲۹۸	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	۹۵۶	-	-
S۳۷۳۲W	X۱۰۱	X۱۰۲	X۱۰۳	-	-
۳،۵۲۲	۱،۰۱۴	۱،۰۱۴	۹۵۶	-	-
S۳۷۳۳W	X۱۱۱	X۱۱۲	X۱۱۳	-	-
۳،۷۴۶	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۹۹۴	-	-

شماره کارگاه	متغیرهای تصمیم استخراج X_{ij}				
S۳۷۳۴W	X۱۲۱	X۱۲۲	X۱۲۳	-	-
۳،۹۷۰	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۹۹۴	-	-
S۳۷۳۵W	X۱۳۱	X۱۳۲	X۱۳۳	-	-
۴،۱۳۲	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	-	-
S۳۷۳۶W	X۱۴۱	X۱۴۲	X۱۴۳	-	-
۴،۲۱۰	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	-	-
S۳۷۳۷W	X۱۵۱	X۱۵۲	X۱۵۳	-	-
۴،۲۴۹	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	-	-
S۳۷۳۸W	X۱۶۱	X۱۶۲	X۱۶۳	-	-
۴،۱۷۸	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	-	-
S۳۷۳۹W	X۱۷۱	X۱۷۲	X۱۷۳	-	-
۳،۸۷۱	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	-	-
S۳۷۴۰W	X۱۸۱	X۱۸۲	X۱۸۳	-	-
۳،۶۶۷	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	-	-
S۳۷۴۱W	X۱۹۱	X۱۹۲	X۱۹۳	-	-
۳،۷۴۶	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	-	-
S۳۷۴۲W	X۲۰۱	X۲۰۲	X۲۰۳	-	-
۳،۶۷۵	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	-	-
S۳۷۴۳W	X۲۱۱	X۲۱۲	X۲۱۳	-	-
۳،۶۰۴	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۸۵۲	-	-
S۳۷۴۴W	X۲۲۱	X۲۲۲	X۲۲۳	-	-
۳،۷۰۰	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۸۵۲	-	-
S۳۷۴۵W	X۲۳۱	X۲۳۲	X۲۳۳	-	-
۳،۸۶۳	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۸۵۲	-	-
S۳۷۴۶W	X۲۴۱	X۲۴۲	X۲۴۳	-	-
۴،۲۱۷	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۸۵۲	-	-
S۳۷۴۷W	X۲۵۱	X۲۵۲	X۲۵۳	-	-
۴،۲۱۷	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۸۵۲	-	-
S۳۷۴۸W	X۲۶۱	X۲۶۲	X۲۶۳	-	-
۴،۲۵۵	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۸۵۲	-	-

شماره کارگاه	متغیرهای تصمیم استخراج X_{ij}				
S۳۷۴۹W	X۲۷۱	X۲۷۲	X۲۷۳	-	-
۴،۲۸۴	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	-	-
S۳۷۵۰W	X۲۸۱	X۲۸۲	X۲۸۳	X۲۸۴	-
۵،۰۰۵	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۸۷۷	-
S۳۷۵۱W	X۲۹۱	X۲۹۲	X۲۹۳	X۲۹۴	-
۴،۷۲۶	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۸۷۷	-
S۳۷۵۲W	X۳۰۱	X۳۰۲	X۳۰۳	X۳۰۴	-
۴،۸۱۸	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۸۷۷	-
S۳۷۵۳W	X۳۱۱	X۳۱۲	X۳۱۳	X۳۱۴	-
۴،۸۹۹	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۹۳۳	۱،۰۱۴	-
S۳۷۵۴W	X۳۲۱	X۳۲۲	X۳۲۳	X۳۲۴	-
۴،۹۴۳	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۹۳۳	۱،۰۱۴	-
S۳۷۵۵W	X۳۳۱	X۳۳۲	X۳۳۳	X۳۳۴	-
۴،۸۴۷	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۹۳۳	۱،۰۱۴	-
S۳۷۵۶W	X۳۴۱	X۳۴۲	X۳۴۳	X۳۴۴	X۳۴۵
۴،۵۷۴	۴۱۱	۱،۳۷۶	۱،۳۷۶	۲۰۸	۱،۰۱۴
S۳۷۵۷W	X۳۵۱	X۳۵۲	X۳۵۳	X۳۵۴	-
۴،۰۲۹	۱،۰۱۴	۴۹۴	۱،۳۷۶	۱،۰۱۴	-
S۳۷۵۸W	X۳۶۱	X۳۶۲	X۳۶۳	X۳۶۴	-
۳،۷۸۹	۱،۰۱۴	۴۹۴	۱،۳۷۶	۱،۰۱۴	-

۵-۳-۶- متغیرهای تصمیم پر کردن

با توجه به ظرفیت بتن‌ریزی تجهیزات موجود در معدن، و حجم هر کارگاه که در جدول ۵-۲ آورده شده است، متغیرهای تصمیم پر کردن تعیین و مشخص می‌شود.

ظرفیت بچینگ (BPCt) که در بخش ۳-۱۰ آورده شده است روزانه ۲۷۷ مترمکعب بتن می‌باشد، بنابراین، به طور متوسط می‌توان ۴ کارگاه را با ظرفیت روزانه ۶۰ مترمکعب پر کرد.

بتن‌ریزی به صورت روزانه انجام می‌گردد، بتن مورد استفاده در کف کارگاه با عیار سیمان بالاتری بوده و به مرور به نزدیک شدن به سقف کارگاه برای پر کردن کامل آن، از بتن با عیار سیمان کمتر و

رقیق‌تر استفاده می‌شود.

محاسبات برای پر کردن کارگاه‌های استخراج، ۶۰۰ مترمکعب بتن در دوره زمانی ۱۰ روزه j بـرای هر کارگاه (ABKit) در نظر گرفته شده است. بر این اساس، متغیرهای تصمیم پر کردن کارگـاه‌هـای استخراج که حاصل تقسیم حجم آن به ظرفیت بتن‌ریزی می‌باشد، به صورت جدول ۵-۴ خواهد بود.

جدول ۵-۴ :متغیرهای تصمیم پر کردن

شماره کارگاه	متغیرهای تصمیم استخراج Yij		
S۳۷۲۰E	Y۰۱۱	Y۰۱۲	-
S۳۷۲۱E	Y۰۲۱	Y۰۲۲	-
S۳۷۲۲E	Y۰۳۱	Y۰۳۲	-
S۳۷۲۳E	Y۰۴۱	Y۰۴۲	-
S۳۷۲۴E	Y۰۵۱	Y۰۵۲	-
S۳۷۲۵E	Y۰۶۱	Y۰۶۲	-
S۳۷۲۶E	Y۰۷۱	Y۰۷۲	-
S۳۷۳۰W	Y۰۸۱	Y۰۸۲	-
S۳۷۳۱W	Y۰۹۱	Y۰۹۲	-
S۳۷۳۲W	Y۱۰۱	Y۱۰۲	-
S۳۷۳۳W	Y۱۱۱	Y۱۱۲	-
S۳۷۳۴W	Y۱۲۱	Y۱۲۲	-
S۳۷۳۵W	Y۱۳۱	Y۱۳۲	-
S۳۷۳۶W	Y۱۴۱	Y۱۴۲	-
S۳۷۳۷W	Y۱۵۱	Y۱۵۲	-
S۳۷۳۸W	Y۱۶۱	Y۱۶۲	-
S۳۷۳۹W	Y۱۷۱	Y۱۷۲	-
S۳۷۴۰W	Y۱۸۱	Y۱۸۲	-
S۳۷۴۱W	Y۱۹۱	Y۱۹۲	-
S۳۷۴۲W	Y۲۰۱	Y۲۰۲	-
S۳۷۴۳W	Y۲۱۱	Y۲۱۲	-
S۳۷۴۴W	Y۲۲۱	Y۲۲۲	-
S۳۷۴۵W	Y۲۳۱	Y۲۳۲	-
S۳۷۴۶W	Y۲۴۱	Y۲۴۲	-
S۳۷۴۷W	Y۲۵۱	Y۲۵۲	-

شماره کارگاه	متغیرهای تصمیم استخراج Yij		
S۳۷۴۸W	Y۲۶۱	Y۲۶۲	-
S۳۷۴۹W	Y۲۷۱	Y۲۷۲	-
S۳۷۵۰W	Y۲۸۱	Y۲۸۲	Y۲۸۳
S۳۷۵۱W	Y۲۹۱	Y۲۹۲	Y۲۹۳
S۳۷۵۲W	Y۳۰۱	Y۳۰۲	Y۳۰۳
S۳۷۵۳W	Y۳۱۱	Y۳۱۲	Y۳۱۳
S۳۷۵۴W	Y۳۲۱	Y۳۲۲	Y۳۲۳
S۳۷۵۵W	Y۳۳۱	Y۳۳۲	Y۳۳۳
S۳۷۵۶W	Y۳۴۱	Y۳۴۲	Y۳۴۳
S۳۷۵۷W	Y۳۵۱	Y۳۵۲	Y۳۵۳
S۳۷۵۸W	Y۳۶۱	Y۳۶۲	Y۳۶۳

۵-۳-۷- بارگیری و باربری

سیستم بارگیری و باربری در این معدن توسط لودرهای LHD، دویل و نوار نقاله صورت می‌گیـرد. بر این اساس، لودرهای مذکور، مواد معدنی را از داخل کارگاه‌های استخراج به دویل‌ها منتقل و از آنجا بر روی نوار نقاله ریخته و به خارج از معدن انتقال داده می‌شوند.

با توجه به تعداد لودرها و ظرفیت نوار نقاله، امکان بارگیری و باربری (HCt) حداکثر ۷۵۲ تن ماده معدنی در روز وجود دارد که با احتساب ۳۰ روز در ماه، می‌توان میزان بارگیری و بـاربری در سـال را ۲۴۴،۵۳۰ تن در نظر گرفت.

۵-۳-۸- لنگه ایمنی

با توجه به طراحی‌های صورت گرفته بر اساس مقاومت دیواره‌ها و سقف کارگاه‌های استخراج، تعداد ۲ کارگاه به عنوان لنگه (۱۰ متر)، مابین کارگاه‌های استخراجی (q) فاصله گذاشته می‌شود.

۵-۴- حل مسئله

برای حل مسئله، از نرم افزار MATLAB استفاده شده است. در این نرم‌افزار، ماتریس‌هایی تشکیل که در زیر آورده شده است.

ماتریس a (۲۱۳۹×۱۲۴۲): در این ماتریس، ضرایب محدودیت‌های مورد نظر به صورت عددی درج می‌شوند. در این مسئله، ماتریس a دارای ستون، به عنوان متغیرهای تصمیم و سطر به عنوان ضرایب محدودیت می‌باشد.

ماتریس b (۲۱۳۹×۱): این ماتریس فقط دارای یک ستون بوده و سطرهای آن با ماتریس a برابر است. این ماتریس، پاسخ نامعادله در ماتریس a می‌باشد.

ماتریس ae (۶×۱۲۴۲): در این ماتریس از پارامترهای P_{ij} برای تعیین میزان تولید استفاده می‌شود.

ماتریس be (۶×۱): این ماتریس دارای یک ستون، و سطرهایی برابر با تعداد دوره زمانی مورد نظر و مقادیر آن برابر با میزان تولید در آن دوره زمانی می‌باشد.

ماتریس c (۱×۱۲۴۲): در این ماتریس، ضرایب مربوط به پارامترهای تابع هدف آورده شده است.

ماتریس intcon (۱×۱۲۳۰): در این ماتریس، متغیرها به صورت شماره درج شده است.

ماتریس‌های lb و ub (۱×۱۲۴۲): در این دو ماتریس، به ترتیب حد پایین و بالای هر یک از متغیرها تعیین می‌شود.

این مسئله دارای ۱۲۳۰ متغیر X_{ij} و Y_j بوده است.

محدودیت‌های ذکر شده در ابتدای فصل به کار گرفته شد و مسئله برای تولیدهای مختلف ۱۲۰،۰۰۰، ۱۵۰،۰۰۰، ۱۸۰،۰۰۰، ۲۰۰،۰۰۰ و ۲۲۰،۰۰۰ تن ماده معدنی مورد استفاده قرار گرفت.

۵-۴-۱- برنامه‌ریزی تولید سالانه ۱۲۰،۰۰۰ تن

در ۶ دوره زمانی مورد نظر برای حل مسئله، برنامه‌ریزی استخراج و پر کردن کارگاه‌ها برای تولید سالانه ۱۲۰،۰۰۰ تن ماده معدنی سرب و روی بدین ترتیب صورت گرفت. در این برنامه‌ی تولید، میزان استخراج در دوره ۱۰ روزه، ۳،۳۵۰ تن می‌باشد.

جدول ۵-۵: مشخصات برنامه‌ریزی برای تولید ۱۲۰،۰۰۰ تن ماده معدنی

دوره زمانی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
تعداد کارگاه‌های استخراجی	۳	۳	۳	۳	۳	۳
میزان تولید	۳،۴۰۴	۳،۴۰۴	۳،۳۴۶	۳،۳۳۷	۳،۱۶۳	۳،۳۴۷
تعداد کارگاه‌های پرشونده	-	-	-	۲	۳	۱

میزان تولید برنامه‌ریزی شده در جدول ۵-۵، به طور متوسط ۳،۳۳۳ تن در ۱۰ روز می‌باشد که با برنامه سالانه تطابق قابل قبولی دارد.

تولید ماهانه با این روش برنامه‌ریزی، ۱۰،۰۰۰ تن خواهد بود که کمتر از ۲۰،۳۰۴ تن در ماه، حداکثر ظرفیت بارگیری و باربری معدن می‌باشد.

هیچگونه محدودیتی از نظر بارگیری و باربری و نیز ظرفیت پر کردن برای این میزان تولید سالانه وجود ندارد و می‌توان به سادگی به مرحله اجرا درآورد.

همچنین برای اجرای این برنامه، بایستی ۳ سینه‌کار در هر ۱۰ روز، حفاری و آتشباری انجام شود.

جداول جدول ۵-۶ وجدول ۵-۷ به ترتیب برنامه‌ریزی استخراج و برنامه‌ریزی پر کردن کارگاه‌ها را در ۶ دوره زمانی نشان می‌دهد.

منظور از ID در جداول شماتیک زیر، شماره کارگاه‌ها می‌باشد.

جدول ۵-۶: برنامه‌ریزی استخراج برای ۱۲۰،۰۰۰ تن تولید سالانه

																۶				۶				۳						
		۶														۵				۵				۲						
		۵														۴				۴				۱						
۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۳۲	۳۱	۳۰	۲۹	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	ID
راهروی دسترسی																														

۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ID
۱						۱	
۲						۲	
۳						۳	
						۴	

جدول ۵-۷: برنامه‌ریزی پرکردن برای ۱۲۰،۰۰۰ تن تولید سالانه

																							۵						
																							۴						
۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۳۲	۳۱	۳۰	۲۹	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	ID
راهروی دسترسی																														

۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ID
۴						۵	
۵						۶	

۵-۴-۲- برنامه‌ریزی تولید سالانه ۱۵۰،۰۰۰ تن

در ۶ دوره زمانی مورد نظر برای حل مسئله، برنامه‌ریزی استخراج و پر کردن کارگاه‌ها برای تولید سالانه ۱۵۰،۰۰۰ تن ماده معدنی سرب و روی بدین ترتیب صورت گرفت. در این برنامه‌ی زمان‌بندی، میزان استخراج در دوره ۱۰ روزه، ۴،۲۰۰ تن می‌باشد.

جدول ۵-۸: مشخصات برنامه‌ریزی برای تولید ۱۵۰،۰۰۰ تن ماده معدنی

دوره زمانی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
تعداد کارگاه‌های استخراجی	۳	۳	۴	۴	۳	۴
میزان تولید	۴،۱۲۸	۴،۱۲۸	۴،۱۸۷	۴،۱۷۷	۴،۱۲۸	۴،۲۲۱
تعداد کارگاه‌های پرشونده	-	-	-	۲	۳	۲

میزان تولید برنامه‌ریزی شده در جدول ۵-۸، به طور متوسط ۴،۱۶۱ تن در ۱۰ روز می‌باشد که با تولید برنامه‌ریزی شده‌ی ۴،۲۰۰ تن مطابقت دارد.

تولید ماهانه با این روش برنامه‌ریزی، ۱۲،۴۸۳ تن خواهد بود که کمتر از ۲۰،۳۰۴ تن در ماه، حداکثر ظرفیت بارگیری و باربری معدن می‌باشد.

در این برنامه‌ریزی نیز، هیچگونه محدودیت اجرایی وجود نداشته و معدن می‌تواند با اجرای این برنامه، ۱۵۰،۰۰۰ تن سرب و روی از معدن زیرزمینی تولید نماید.

برای اجرای این برنامه، بایستی در حدود ۴ سینه‌کار فعال در هر ۱۰ روز، حفاری و آتشباری انجام شود.

جداول جدول ۵-۹ و جدول ۵-۷ به ترتیب برنامه‌ریزی استخراج و برنامه‌ریزی پر کردن کارگاه‌ها را در ۶ دوره زمانی نشان می‌دهد.

جدول ۵-۹: برنامه‌ریزی استخراج برای ۱۵۰،۰۰۰ تن تولید سالانه

							۴																							
		۶					۳							۳				۳				۵							۶	
		۵					۲							۲				۲				۴							۵	
		۴					۱				۶			۱		۶		۱				۳							۴	
۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۳۲	۳۱	۳۰	۲۹	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	ID
راهروی دسترسی																														

۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ID

جدول ۵-۱۰: برنامه‌ریزی پرکردن برای ۱۵۰،۰۰۰ تن تولید سالانه

														۵				۵												
							۶							۵				۵												
							۵							۴				۴				۶								
۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۳۲	۳۱	۳۰	۲۹	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	ID
راهروی دسترسی																														

۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ID

۵-۴-۳- برنامه‌ریزی تولید سالانه ۱۸۰،۰۰۰ تن

در ۶ دوره زمانی مورد نظر برای حل مسئله، برنامه‌ریزی استخراج و پر کردن کارگاه‌ها برای تولید سالانه ۱۸۰،۰۰۰ تن ماده معدنی سرب و روی بدین ترتیب صورت گرفت. در این برنامه‌ی زمان‌بندی، میزان استخراج در دوره ۱۰ روزه، ۵،۰۰۰ تن می‌باشد.

جدول ۵-۱۱: مشخصات برنامه‌ریزی برای تولید ۱۸۰،۰۰۰ تن ماده معدنی

دوره زمانی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
تعداد کارگاه‌های استخراجی	۴	۴	۵	۵	۴	۴
میزان تولید	۵،۱۴۲	۵،۱۴۲	۴،۹۷۸	۵،۰۱۴	۴،۹۸۰	۴،۹۹۵
تعداد کارگاه‌های پرشونده	-	-	-	۳	۴	۲

میزان تولید برنامه‌ریزی شده در جدول ۵-۱۱، به طور متوسط ۵،۰۴۲ تن در ۱۰ روز می‌باشد که با تولید برنامه‌ریزی شده ۵،۰۰۰ تن در ۱۰ روز مطابقت دارد.

تولید ماهانه با این روش برنامه‌ریزی، ۱۵،۱۲۶ تن خواهد بود که کمتر از ۲۰،۳۰۴ تن حداکثر ظرفیت بارگیری و باربری معدن می‌باشد.

تنها محدودیتی که این برنامه ممکن است با آن مواجه شود، وجود ۵ سینه‌کار استخراجی است که می‌توان با اضافه نمودن تیم‌های حفاری و آتشباری، به این میزان تولید دست یافت.

برای اجرای این برنامه، بایستی در حدود ۵ سینه‌کار در هر ۱۰ روز، حفاری و آتشباری انجام شود.

جداول جدول ۵-۱۲ و جدول ۵-۱۳ به ترتیب برنامه‌ریزی استخراج و برنامه‌ریزی پر کردن کارگاه‌ها را در ۶ دوره زمانی نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱۲: برنامه‌ریزی استخراج برای ۱۸۰،۰۰۰ تن تولید سالانه

		۶				۶				۶					۵				۳				۳					۳	
		۵				۵				۵					۴				۲				۲					۲	
		۴				۴				۴					۳				۱				۱		۶			۱	
۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۳۲	۳۱	۳۰	۲۹	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	ID
راهروی دسترسی																														

۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ID
				۱			
				۲			
				۳			
				۴			

جدول ۵-۱۳: برنامه‌ریزی پرکردن برای ۱۸۰،۰۰۰ تن تولید سالانه

															۶				۵				۵					۵	
															۴				۴				۴					۴	
۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۳۲	۳۱	۳۰	۲۹	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	ID
راهروی دسترسی																														

۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ID
				۵			
				۶			

۵-۴-۴- برنامه‌ریزی تولید سالانه ۲۰۰،۰۰۰ تن

در ۶ دوره زمانی مورد نظر برای حل مسئله، برنامه‌ریزی استخراج و پر کردن کارگاه‌ها برای تولید سالانه ۲۰۰،۰۰۰ تن ماده معدنی سرب و روی بدین ترتیب صورت گرفت. در این برنامه‌ی زمان‌بندی، میزان استخراج در دوره ۱۰ روزه، ۵،۶۰۰ تن می‌باشد.

جدول ۵-۱۴: مشخصات برنامه‌ریزی برای تولید ۲۰۰،۰۰۰ تن ماده معدنی

دوره زمانی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
تعداد کارگاه‌های استخراجی	۴	۴	۵	۵	۵	۶
میزان تولید	۵،۵۰۴	۵،۵۰۴	۵،۶۲۹	۵،۶۵۷	۵،۶۲۲	۵،۶۱۱
تعداد کارگاه‌های پرشونده	-	-	-	۳	۴	۱

میزان تولید برنامه‌ریزی شده در جدول ۵-۱۴، به طور متوسط ۵،۵۸۸ تن در ۱۰ روز می‌باشد که با برنامه ۵،۶۰۰ تن در ۱۰ روز اختلاف بسیار اندکی دارد.

تولید ماهانه با این روش برنامه‌ریزی، ۱۶،۷۶۴ تن خواهد بود که کمتر از ۲۰،۳۰۴ تن حداکثر ظرفیت بارگیری و باربری معدن می‌باشد.

تنها محدودیت اجرایی نشدن این برنامه‌ریزی نیز مانند تولید سالانه ۱۸۰،۰۰۰ تن، وجود ۶ کارگاه استخراجی می‌باشد که در صورت کسری نیرو، می‌توان با به‌کارگیری نیروهای بیشتر، می‌توان به این ظرفیت تولید دسترسی پیدا کرد.

همچنین برای اجرای این برنامه، بایستی در حدود ۶ سینه‌کار در هر ۱۰ روز، حفاری و آتشباری انجام شود.

جداول جدول ۵-۱۵ و جدول ۵-۱۶ به ترتیب برنامه‌ریزی استخراج و برنامه‌ریزی پر کردن کارگاه‌ها را در ۶ دوره زمانی نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱۵: برنامه‌ریزی استخراج برای ۲۰۰،۰۰۰ تن تولید سالانه

								۴																					
۶				۶				۳						۳						۳					۶				
۵				۵				۲						۲						۲					۵				
۴				۴				۱						۱						۱					۴				
۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۳۲	۳۱	۳۰	۲۹	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	ID
راهروی دسترسی																													

۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ID
		۵				۳	
		۶				۴	
						۵	
						۶	

جدول ۵-۱۶: برنامه‌ریزی پرکردن برای ۲۰۰،۰۰۰ تن تولید سالانه

								۶						۵				۵				۵							
								۵						۴				۴				۴							
۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۳۲	۳۱	۳۰	۲۹	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	ID
راهروی دسترسی																													

۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ID

۵-۴-۵- برنامه‌ریزی تولید سالانه ۲۲۰،۰۰۰ تن

در ۶ دوره زمانی مورد نظر برای حل مسئله، برنامه‌ریزی استخراج و پر کردن کارگاه‌ها برای تولید سالانه ۲۲۰،۰۰۰ تن ماده معدنی سرب و روی بدین ترتیب صورت گرفت. در این برنامه‌ی زمان‌بندی، میزان استخراج در دوره ۱۰ روزه، ۶،۱۰۰ تن می‌باشد.

جدول ۵-۱۷: مشخصات برنامه‌ریزی برای تولید ۲۲۰،۰۰۰ تن ماده معدنی

دوره زمانی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
تعداد کارگاه‌های استخراجی	۵	۵	۶	۶	۴	۵
میزان تولید	۶،۱۵۶	۶،۱۵۶	۶،۰۲۲	۶،۱۱۱	۵،۵۰۴	۶،۱۳۶
تعداد کارگاه‌های پرشونده	-	-	-	۳	۵	۲

میزان تولید برنامه‌ریزی شده در جدول ۵-۱۷، به طور متوسط ۶،۰۷۴ در ۱۰ روز می‌باشد که با برنامه سالانه مطابقت دارد.

تولید ماهانه با این روش برنامه‌ریزی، ۱۸،۲۲۲ تن خواهد بود که کمتر از ۲۰،۳۰۴ تن حداکثر ظرفیت بارگیری و باربری معدن می‌باشد.

علاوه بر تعداد زیاد کارگاه‌های فعال در امر استخراج، محدودیت اجرایی نشدن این برنامه‌ریزی، وجود ۵ کارگاه پرشونده در یک دوره است که در صورت افزایش ظرفیت بچینگ و تولید و انتقال بتن، می‌توان به این ظرفیت تولید دسترسی پیدا کرد.

همچنین برای اجرای این برنامه، بایستی در حدود ۶ سینه‌کار در هر ۱۰ روز، حفاری و آتشباری انجام شود.

جداول جدول ۵-۱۸ و جدول ۵-۱۹ به ترتیب برنامه‌ریزی استخراج و برنامه‌ریزی پر کردن کارگاه‌ها را در ۶ دوره زمانی نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱۸: برنامه‌ریزی استخراج برای ۲۲۰،۰۰۰ تن تولید سالانه

	۶				۴																								
	۵				۳				۶				۳				۳				۶				۶				
	۴				۲				۵				۲				۲				۵				۵				
	۳				۱				۴				۱	۶			۱				۴				۴				
۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۳۲	۳۱	۳۰	۲۹	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	ID
راهروی دسترسی																													

۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ID
۱				۱			
۲				۲			
۳				۳			
				۴			

جدول ۵-۱۹: برنامه‌ریزی پرکردن برای ۲۲۰،۰۰۰ تن تولید سالانه

					۶								۵				۵												
					۵								۴				۴												
۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۳۲	۳۱	۳۰	۲۹	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	ID
راهروی دسترسی																													

۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ID
۴				۵			
۵				۶			

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

همانطور که در بخش قبل محاسبه گردید، برنامه‌ریزی برای تولید سالانه ۱۲۰،۰۰۰ تن ماده معدنی سرب و روی از معدن زیرزمینی انگوران، با مدل‌سازی ریاضی و حل آن توسط نرم افزار MATLAB انجام و نشان داد که با انجام عملیات معدنکاری در ۳ کارگاه استخراج، به سهولت قابل اجرا می‌باشد.

یکی از دلایلی که میزان متوسط برنامه‌ریزی انجام شده با برنامه‌ریزی بلند مدت تفاوت دارد، اجبار در استخراج بلوک‌ها با تولید مشخص در دوره زمانی مشخص است. البته در برنامه‌ریزی‌های صورت گرفته، اختلاف بین این دو عدد کمتر از ۱ درصد بوده و کاملا مورد قبول می‌باشد.

برای داشتن برنامه‌ریزی دقیق‌تر و اطمینان از رسیدن به تولید برنامه‌ی بلندمدت، لازم است دوره‌ی زمانی با دقت بالاتری انتخاب شود.

در ادامه‌ی کار حل مسئله، با عدم در نظر گرفتن محدودیت تعداد کارگاه‌های پرشونده، محاسبات مجدد تکرار و با افزایش میزان تولید برنامه‌ریزی شده‌ی سالانه، می‌توان نتیجه گرفت که تولید بیشتر مواد معدنی با افزایش نیروهای عملیاتی و نیز افزایش ظرفیت بچینگ قابل دسترسی بوده و این میزان تا ۲۲۰،۰۰۰ تن در سال قابل افزایش است.

جدول ۶-۱- خلاصه برنامه‌ریزی میزان تولید مختلف

میزان استخراج	تولید ۱۰ روزه	برنامه ۱۰ روزه (طبق مدل)	اختلاف	تعداد کارگاه استخراجی	تعداد کارگاه پرشونده
۱۲۰،۰۰۰	۳،۳۵۰	۳،۳۳۳	-٪۵/۰	۳	۳
۱۵۰،۰۰۰	۴،۲۰۰	۴،۱۶۱	-٪۱	۴	۳
۱۸۰،۰۰۰	۵،۰۰۰	۵،۰۴۲	+٪۸/۰	۵	۴
۲۰۰،۰۰۰	۵،۶۰۰	۵،۵۸۸	-٪۲/۰	۶	۴
۲۲۰،۰۰۰	۶،۱۰۰	۶،۰۷۴	-٪۴/۰	۶	۵

برای داشتن یک تولید یکنواخت، لازم است برنامه‌ریزی تولید در کل معـدن و بـا در نظـر گـرفتن ترازهای مختلف و محدودیت‌های آن انجام شود. در اینصورت، قبل از اتمام ذخیـره‌ی یـک تـراز، کـار آماده‌سازی ترازهای دیگر آغاز شده و کسری تولید از تراز بعدی جبران می‌گردد.

۶-۲- پیشنهادات

برای ادامه بهتر این پایان نامه و کارهای صورت گرفته در زمینه برنامه‌ریزی کوتاه مدت در معـدن زیرزمینی سرب و روی انگوران، می‌توان محدودیت‌های دیگری را نیز مورد بررسی قرار داد.

از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به، میزان تهویه مورد نیاز برای افزایش پرسنل و میزان گازهـای حاصل از آتشباری، گازهای حاصل از تردد ماشین‌آلات بـارگیری و بـاربری داخـل معـدن، عیـار مـاده معدنی و نیز نوع آن، میزان اختلاط در مرزهای مواد معدنی مختلف اشاره نمود.

همچنین، به دلیل ارزش بالای ماده معدنی استخراجی از این معدن، تابع هدف را تغییـر داده و بـا توجه به عیار بخش‌های مختلف و ارزش آن‌ها، تابع هدفی با بیشینه کردن NPV طراحی و مدل‌سازی نمود.

منابع

[۱] اصانلو، مرتضی؛ (۱۳۸۹)، روش‌های استخراج معادن سطحی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دو جلدی، ویرایش سوم، ۱۰۷۴ صفحه.

[۲] T.B. Johnson; ۱۹۶۸, Optimum open pit mine production scheduling, Ph.D. Thesis, Dept. of IEOR, University of California, Berkeley, ۱۳۱ pages.

[۳] هوسترولید، ویلیام؛ کوچتا، مارک؛ ۱۳۸۳؛ طراحی و برنامه‌ریزی معادن روباز، ترجمه علی‌اصغر خدایاری، مهدی یاوری شهرضا، انتشارات دانشگاه صنایع و معادن ایران، فصل ششم، ص ۵۳۵.

[۴] عطائی، محمد؛ حسینی، سید محمدعلی؛ ۱۳۹۰، طراحی محدوده و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.

[۵] Hartman, H. L., ۱۹۸۷; Introductory mining engineering. A Wiley-Interscience publication, pp. ۱۵۴-۱۵۹.

[۶] Ward M. H., and Britton S.G., ۱۹۹۲; Management and administration, in Hartman H.L. (Senior Editor), SME Mining Engineering Handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc., Littleton, Colorado, Chapter ۸,۶, pp. ۶۴۱-۶۵۸.

[۷] Steffen, O. K. H. ۱۹۹۷; Planning of open pit mines on a risk basis, The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, (April), pp. ۴۷-۵۶.

[۸] Seymour, C; ۱۹۹۷; Risk based selection of pit shells for scheduling, Optimizing with Whittle, Perth, pp. ۱۲۹-۱۴۰.

[۹] Rebollo, J L.; ۲۰۰۹; Strategic issuies in the mining and metals industries, in Botin, H.A. (Editor), Sustainable management of mining operations, SME, pp. ۳۳-۷۰.

[۱۰] Williams JK, Smith L, Wells PM; ۱۹۷۳; Planning of underground copper mining. ۱۰th Internat. Appl. Sympos. Appl. Comput. Mineral Indust. (APCOM), Johannesburg, South Africa, pp. ۲۵۱–۲۵۴.

[۱۱] Lee, E; ۱۹۸۸; an integrated model for production planning and scheduling in underground coal mining, A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Business Administration at the University of Kentucky.

[۱۲] Trout, L. P; ۱۹۹۵; Underground mine production scheduling using mixed integer programming. Proceedings of the ۲۵th International APCOM Symposium, Melbourne. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. pp. ۳۹۵–۴۰۰.

[۱۳] Kuchta, M; A. Newman; E. Topal; ۲۰۰۴; Implementing a production schedule at LKAB's Kiruna Mine. Interfaces ۳۴(۲) pp.۱۲۴–۱۳۴.

[۱۴] Newman, A; M. Kuchta; ۲۰۰۷; Using aggregation to optimize longterm production planning at an underground mine. Eur. J. Oper. Res. ۱۷۶(۲) pp.۱۲۰۵–۱۲۱۸.

[۱۵] Marco Schulze; Jürgen Zimmermann; ۲۰۱۰; Scheduling in the Context of Underground Mining , Operations Research Proceedings, DOI ۱۰,۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۶۴۲-۲۰۰۰۹-۰_۹۶.

[۱۶] Martinez MA; Newman AM; ۲۰۱۱; A solution approach for optimizing long- and short-term production scheduling at LKAB's Kiruna mine. Eur. J. Oper. Res. ۲۱۱(۱): pp.۱۸۴–۱۹۷.

[۱۷] Nehring, E; Topal, M. Kizil; ۲۰۱۲; Integrated short- and medium-term underground mine production scheduling; The Journal of The Southern African Institute

of Mining and Metallurgy, VOLUME ۱۱۲, pp. ۳۶۵-۳۷۸.

[۱۸] Pourrahimian, Y; ۲۰۱۳; Mathematical programming for sequence optimization in block cave mining, A thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Mining Engineering, Department of Civil Environmental Engineering, University of Alberta.

[۱۹] O'Sullivan, D; Newman, A; ۲۰۱۴; Extraction and Backfill Scheduling in a Complex Underground Mine, Interfaces ۴۴(۲), pp. ۲۰۴–۲۲۱.

[۲۰] O'Sullivan, D; ۲۰۱۳; An optimization based decomposition heuristic for solving complex underground mine scheduling problems. Ph.D. thesis, Colorado School of Mines.

[۲۱] Brickey, A; ۲۰۱۵; Underground production scheduling optimization with ventilation constraints, A thesis submitted to the Faculty and the Board of Trustees of the Colorado School of Mines in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Mining and Earth Systems Engineering).

[۲۲] عطائی، محمد؛ ۱۳۹۳، برنامه‌ریزی خطی و کاربردهای آن (برای مهندسین معدن)، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۲۳] محمدرضا مهرگان؛ ۱۳۹۲، پژوهش عملیاتی: برنامه‌یزی خطی و کاربردهای آن، نشر کتاب دانشگاهی.

Abstract

Open pit mines are being extracted at the fastest rate and soon will reach their economical boardess due to these days consumerism at it’s highest. There force, underground mining, which can be the only solution, must be planned before the open pit mines have reached their end.

In this project, the lead and zink mine of Angouran, with annual production ۱۲۰،۰۰۰ tons, is considered as the case study. Numerical modeling in Matlab software has been taken into account for this project.

After soluing the matter at hard, it was clear that the production can be almostdoubled to ۲۲۰،۰۰۰ tons by adapting the mine forces and increasing baching and concreting.

Moreover, it is worth to mention that this expansion and development is planned for a period of two months, therefore more efficient extraction to the mines highest potential is achievable in longer periods.

Keywords: Short-term scheduling, underground mines, deviation from production plans.

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

MSc Thesis in Mineral Exploitation

Short-term mine scheduling for underground mines to minimize deviation from long-term production plans. (case study: Angouran Lead & Zink underground mine)

By: Farshid Babakhani

Supervisors:
Dr Mohammad Ataei
Dr Farhang Sereshki

January ۲۰۲۰