«مجله علمی علوم و فنون سازندگی»

سال چهارم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه ۱ الی ۱۱

علمی – تخصصی

بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت معدن روباز به منظور کاهش انحرافات از اهداف تولید

محمد شمسی[۱*]، سید فرشید شجاعی، حسین اکبری جور

[۱] دانشجوی دکترا، دانشگاه صنعتی شاهرود

[۲] کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس

[۳] کارشناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱)

چکیده

بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت در معادن روباز با هدف تعیین توالی استخراج بلوک‌ها به منظور کاهش انحرافات از اهداف و یا جریمه‌های متحمله انجام می‌شود. این برنامه با در نظرگرفتن محدودیت‌های شیب و توان تولید برای رسیدن به طرح بلندمدت انجام می‌شود. نرم افزارNPV یکی از نرم افزارهایی است که برای برنامه‌ریزی تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم افزار به دلیل الگوریتم ابتکاری مبنی‌بر افزایش سود و کاهش زمان بازگشت سرمایه نمی‌تواند در برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت به نحو بهینه، توالی استخراج بلوک‌ها را تعیین کند. همچنین استفاده از رویکرد دپوسازی و سپس عملیات مخلوط‌سازی مواد به منظور تهیه خوراک مناسب برای کارخانه، دارای هزینه‌ها و معایبی است. در این مقاله یک مدل تحقیق در عملیاتی برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت ارایه شده است. تابع هدف مسئله، مینیمم‌سازی هزینه‌ی انحرافات و هزینه‌های عملیاتی را دنبال می‌کند. در صورت انحراف از اهداف، متغیرهای تصمیم مقدار انحراف را نشان می‌دهند. حاصل ضرب مقدار انحرافات در هزینه انحرافات در تابع هدف قرار دارند و مدل تعیین توالی استخراج را به طوری تعیین می‌کند که انحرافات حداقل باشند. مدل ارایه شده در نرم افزار گمز با استفاده از سالور سیپلکس پیاده‌سازی و حل شد. پس از مدت زمان دو ساعت و ۵۱ دقیقه با گپ نسبی ۰,۰۷ درصد، توالی استخراج بلوک‌ها در هر دوره سه‌ماهه بدون انحراف از اهداف تولید حاصل شد. سپس با استفاده از توالی به دست آمده از دوره‌ی سه ماهه اول، برای ۱۲ دوره هفتگی برنامه‌ریزی تولید انجام شد. این برنامه‌ریزی بدون در نظر گرفتن هزینه حمل بلوک‌ها انجام شد و مقدار انحرافات از اهداف تولید و مقدارتابع هدف به ازای ۱۲ دوره، همگی صفر هستند. پیاده‌سازی این مدل در معدن مورد نظر باعث کاهش هزینه‌های مخروط‌سازی مواد و ایجاد ارزش افزوده خواهد شد.

کلید واژه‌ها: معدن روباز، برنامه‌ریزی تولید، کاهش انحرافات، بهینه‌سازی.

.

۱. مقدمه

معادن یکی از اصلی‌ترین زیر بناهای اقتصادی هر کشوری بوده که دارای پتانسیل بالقوه در جهت اشتغال، کارآفرینی، تامین منابع مورد نیاز و عناصر استراتژیک، تامین بودجه و خودکفایی است[۱]. عدم بهینگی در اجراء فرایندهای معدن‌کاری سبب افت تولید و افزایش هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی می‌شود[۲]. بنابراین باید در تمام مراحل معدن‌کاری نهایت دقت را نمود و از روش‌های کارآمدی استفاده شود که هدر رفت این سرمایه ملی به کمترین حالت قابل امکان برسد.

یکی از مهم‌ترین مراحل معدنکاری فاز استخراج است. در این مرحله ابتدا باید به یک سوال بنیادین پاسخ داده شود که آیا ذخیره باید به روش سطحی استخراج شود و یا اینکه روش‌های زیرزمینی گزینه مناسب هستند. بیش از ۹۵ درصد از ذخایر فلزی، ۹۰ درصد از ذخایر غیرفلزی و ۶۰ درصد از ذخایر ذغال‌سنگ به روش‌های استخراج سطحی استخراج می‌شوند[۳]. چرا که در این روش به دلیل استفاده از ماشین‌آلات با ظرفیت و قدرت بالاتر و به دنبال آن نرخ تولید نسبتا بیشتر، هزینه عملیاتی نسبتا کمتر است[۴]. همچنین با توجه به افزایش جمعیت و افزایش تقاضای موادمعدنی، پیش‌بینی می‌شود روش استخراج روباز به عنوان یکی از محتمل-ترین گزینه‌های استخراج معادن باقی بماند. سابقه استفاده از روش روباز به ۴۳ هزار سال قبل توسط انسان‌های اولیه باز می‌گردد که در طول زمان و پیشرفت علم، روش‌های مختلفی برای ایجاد یک

طرح استخراج مناسب ارائه شده است[۵]. در روش استخراج روباز، پس از تخمین مشخصات کمی و کیفی ذخیره و در نهایت ساخت مدل بلوکی نوبت به تعیین محدوده‌نهایی می‌رسد.

تعیین محدوده نهایی اولین مرحله از فرایند طراحی معدن است. محدوده نهایی معدن روباز نشان دهنده شکل نهایی معدن در آخرین روز معدنکاری براساس شرایط فنی و اقتصادی پیش‌بینی شده است. از مهمترین دلایل تعیین محدوده نهایی، دانستن میزان ماده معدنی و باطله و همچنین ایجاد یک جواب موجه از لحاظ تحقیق در عملیاتی و نه بهینه برای تعیین توالی استخراج بلوک‌ها در طرح استخراج بلندمدت و یا برنامه‌ریزی تولید بلندمدت است.

برنامه‌ریزی تولید بلندمدت در معادن روباز عبارت است از توالی استخراج بلوک‌های موجود در محدوده نهایی جهت رسیدن به بیشترین ارزش خالص فعلی یا ماده معدنی یا سود در شرایطی که محدودیت‌های کیفیت و کمیت تولید و همچنین اولویت استخراج بلوک‌ها به منظور پایداری شیب رعایت شود[۶].

برنامه‌ریزی بلندمدت برای توجیه اقتصادی و راه‌اندازی طرح امری ضروری بوده، اما به دلیل وسعت زمانی نسبتا بزرگ، دارای خطای نسبتا زیاد است. همچنین عدم قطعیت‌های متعدد در آن دخیل هستند. این برنامه‌ریزی معمولا برای درک میزان کل ماده معدنی و باطله استخراجی، تخمین نوع و تعداد ماشین‌آلات مورد نیاز، تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی و طراحی کارخانه فرآوری با توجه به مشخصات کانسار، لازم است. اما در طول دوره زمانی استخراج معدن، ممکن است پارامترهای اقتصادی، فنی و حتی مشخصات کانسار و مهمتر از آن قراردادهای فروش و قراردادهای پیمانکار تغییر کنند. بنابراین نمی‌توان از برنامه بلند-مدتی که برای کل عمر معدن است به‌منظور استخراج ماهیانه استفاده نمود.

بنابراین نیاز به یک برنامه‌ریزی دقیق‌تر و افق زمانی کوتاه‌تر به منظور کاهش انحرافات کمی و کیفی از اهداف معدن است. در برنامه کوتاه‌مدت باید با توجه به اهداف تعیین شده در افق کوتاه-مدت به نحوی توالی استخراج بلوک‌ها تعیین شود که ضمن رعایت محدودیت پایداری شیب دیواره‌ها که یک محدودیت فنی است، حداقل انحراف از اهداف مدنظر تولید وجود داشته باشد. این اهداف معمولا شامل فراهم‌سازی تناژ و عیار ماده معدنی استخراجی مورد نیاز برای کارخانه فرآوری در شرایطی است که سایر محدودیت‌ها از قبیل محدودیت شیب و توان ماشین آلات موجود برآورده شود. از طرفی دیگر کارخانه فرآوری از لحاظ ورودی موادمعدنی در یک محدوده تناژی و عیاری بیشترین راندمان را دارد. به‌طوریکه اگر تناژ و عیار مواد ارسالی به کارخانه خارج از این محدوده باشد، موجب کاهش سود و ارزش خالص فعلی کلی پروژه می‌شود. در این مقاله مدلی برای برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت با در نظر گرفتن موارد مطرح شده ارایه می‌شود.

۲. پیشینه تحقیق و اهداف

نرم‌افزارNPV یکی از نرم افزارهایی است که برای تعیین محدوده‌نهایی و برنامه‌ریزی تولید معادن روباز مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مزیت‌های این نرم افزار حل بهینه مسئله محدوده‌نهایی معادن روباز است. این نرم افزار با استفاده از الگوریتم لرچ و گروسمن پرسودترین محدوده قابل استخراج را به عنوان حد نهایی معدن روباز معرفی می‌کند. در برنامه‌ریزی تولید بلندمدت نیز اگر چه جواب بهینه معرفی نمی‌کند ولی جواب مناسبی از این نرم افزار حاصل می‌شود. مزیت عمده این الگوریتم رسیدن به یک جواب مناسب (نه بهینه) در زمان مناسب است. روش حل برنامه‌ریزی تولید در این نرم افزار به دلیل حل بر اساس روش ابتکاری الزاما دارای جواب بهینه نیست. اگر چه این روش ابتکاری است ولی اطلاعاتی از نحوه‌ی عملکرد این الگوریتم موجود نیست.

از معایب نرم افزارNPV میتوان اشاره کرد که این نرم‌افزار به دلیل حل بر اساس الگوریتم ابتکاری، محدودیت‌های دیکته شده را آزاد می‌کند تا در زمان قابل قبول جواب حاصل شود. بعلاوه صرفا سود مد نظر این الگوریتم است و نمی‌توان به ازای هر واحد انحراف از محدودیت مورد هدف قرار داده شده، جریمه‌ای که معدن متحمل می‌شود را محاسبه کرد. در برنامه‌ریزی تولید بلند مدت از آنجایی که هدف نرم افزار با غایت معدن مطابقت دارد(عمدتا هر دو بیشینگی سود)، جواب های حاصله تا حد خوبی برای رفع نیاز مناسب است. ولی زمانی که از این نرم افزار برای رسیدن به یک طرح کوتاه‌مدت استفاده می‌شود، عمدتا جواب‌های مناسبی دریافت نمی‌شود. دلیل آن متفاوت بودن هدف نرم افزار از انجام برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت و هدف بهینه از انجام برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت است.

زمانی میتوان برای بهینه‌سازی یک سیستم الگوریتمی ارائه داد که تمام فرایندهای سیستم را به طور توامان در نظر گرفت. حال اگر به دلایلی نتوان بهینگی را برای کل سیستم انجام داد، نیاز است بهینه‌سازی هر فرایند در راستای رسیدن به بهترین حالت خروجی کل سیستم باشد. در برنامه‌ریزی تولید بلندمدت زمان-بندی استخراج برای کل دوره‌های عمر معدن با توجه به ماکزیمم سازی سود بهینه می‌شود و در برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت باید هدف رسیدن به همان برنامه بلندمدت با کمترین انحرافات باشد تا به یک طرح بهینه دست یافت.

در نتیجه زمانی که این نرم افزار برای دوره‌های کوتاه مدت از همان رویکرد برنامه‌ریزی تولید بلندمدت استفاده می‌کند، مشکلاتی ایجاد می‌شود. وقتی طراح ظرفیت‌های عیاری و تناژی را برای یک دوره برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت به نرم افزار دیکته می‌کند،

چون: أولا: هدف نرم افزار در گام کوتاه‌مدت همچنان ماکزیمم‌سازی سود است، دوما: آزادسازی محدودیت‌ها را برای صرف زمان کم‌تر انجام می‌دهد، سوما: نداشتن قابلیت در نظر گرفتن هزینه‌ی ایجاد شده ناشی از هر واحد انحراف از محدودیت‌های مورد هدف قرار داده شده؛ توانایی ارائه یک طرح بهینه را ندارد.

یکی از عمده راهکارهای عملیاتی برای تامین تناژ و عیار مورد قبول کارخانه استفاده از ایده دپوسازی مواد قبل از ارسال مواد به کارخانه است. مزیت این ایده، احداث چندین دامپ با بازه عیاری مختلف است. زمانی که در جبه‌کار استخراجی مواد معدنی کم عیار وجود دارد، این مواد به دامپ کم‌عیار ارسال می‌شوند. همچنین در مواقع وجود مواد پرعیار، مواد به دامپ پرعیار ارسال می‌شوند. این دامپ‌ها همانند چندین انبار نگهداری هستند و میتوان در مواردی که به هر دلیلی امکان استخراج ماده معدنی وجود نداشته باشد، از آن‌ها برای تامین خوراک کارخانه استفاده کرد. بدین ترتیب برای فراهم‌سازی خوراک مناسب کارخانه، عملیات مخلوط‌سازی مواد کم‌عیار با مواد پر عیار انجام می‌شود. از معایب این روش میتوان به تغییر خواص مواد در دپوها و همچنین ایجاد هزینه‌های مخلوط-سازی، بارگیری و باربری مجدد اشاره نمود. بعلاوه ممکن است، هزینه‌های دیگری همچون تسطیح‌سازی و نگه‌داری دامپ نیز وجود داشته باشد. همچنین برای برداشت مواد با یک عیار مشخص از دامپ، اگر چه همه‌ی مواد معدنی دپوسازی شده در یک محدوده عیاری خاصی بوده‌اند، ولی معمولا نمیتوان موادمعدنی با عیار مشخصی را از دامپ برداشت.

از آنجا که مسئله برنامه‌ریزی تولید در معادن را میتوان به عنوان یک مسئله تصمیم‌گیری در مورد استخراج زمانی و مکانی بلوک‌ها و همچنین مقصد ارسال بلوک‌ها برای فراهم‌سازی ورودی مناسب کارخانه فرآوری دانست، میتوان با استفاده از شاخه ریاضی تحقیق در عملیات به حل این موضوع پرداخت.

اولین بار در سال ۱۹۶۸یک مدل بهینه‌سازی خطی به منظور برنامه‌ریزی تولید معادن روباز ارائه می‌شود[۷]. تابع هدف این مدل ماکزیمم‌سازی ارزش خالص فعلی با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول است. بنابراین بلوک‌های دارای مقادیر بیشتری از عیار، دارای اولویت نسبت به بلوک‌های کم ارزش هستند.

در سال ۲۰۰۷ مدل برنامه‌ریزی خطی دیگری برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید ارائه می‌شود[۸]. در این مدل نیز هدف اصلی افزایش جریان نقدینگی در طول عمر معدن است.

در سال ۲۰۱۰ مدلی عدد صحیح برای برنامه‌ریزی تولید کوتاه-مدت معادن روباز ارائه می‌شود[۹]. تابع هدف این مدل بیشینه-سازی مقدار عناصر مزاحم در دوره‌های اولیه را دنبال می‌کند. برای این منظور یک نرخ تنزیل مجازی تعریف می‌شود که باعث می‌شود استخراج بلوک‌هایی که درصد عناصر مزاحم بالاتری دارند زودتر انجام شود. چراکه استخراج بلوک‌های با درصد عناصر مزاحم بیشتر در سال‌های اول پروژه تضمین می‌کند در دوره‌های آتی احتمال برخورد به بلوک‌های با درصد عناصر مزاحم بالا کمتر است.

محققان دیگری در سال ۲۰۱۷ یک مدل عدد صحیح مختلط برای برنامه‌ریزی تولید معادن چندعنصری با هدف تولید محصولات متنوع با توجه به نیاز مصرف‌کنندگان ارایه می‌کنند[۱۰]. تابع هدف این مدل ماکزیمم‌سازی سود است و به نحوی فرآیند اختلاط بلوک‌ها انجام می‌شود که مناسب‌ترین مصرف‌کننده برای هر یک از بلوک‌ها در دوره‌های مختلف انتخاب شود. چون بلوک‌های معدن دارای ترکیبات عیاری متفاوتی هستند، خصوصیات کیفی مورد نیاز هر یک از مقاصد بررسی شده و مخلوط‌سازی بلوک‌ها به نحوی انجام می‌شود که دارای بیشترین سود باشد.

در مدل‌های بررسی شده هیچکدام توانایی انجام برنامه‌ریزی تولید یک معدن روباز را با هدف کاهش انحرافات از اهداف تعیین شده معدن را ندارند. اکثر مدل‌ها سود ناشی از فروش مواد معدنی را در نظر می‌گیرند، در عین حالی که هزینه‌های آشکار و پنهان هر واحد انحراف از تولید در آن‌ها مطرح نمی‌شود. به علاوه هر مدام از مدل‌ها در حالات و معادن خاص خود کاربرد دارند. به عنوان مثال مدلی با تابع هدف ماکزیمم‌سازی استخراج بلوک‌های با درصد عناصر مزاحم بیشتر در سال‌های اول پروژه، نمی‌تواند یک رویکرد مناسب برای معدن مورد مطالعه این تحقیق باشد.

بنابراین نیاز به یک مدل جامع تصمیم‌گیری است که ضمن در نظرگرفتن محدودیت‌ها و هدف بهینه بتواند بهترین سکانس تولید را در هر دوره کوتاه مدت معرفی کند. این مدل باید به نحوی باشد که ضمن در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی، یا سکانسی را معرفی کند که هیچ انحرافی از اهداف نداشته باشد تا بتوان به عالی‌ترین شکل ممکن به برنامه بلندمدتی که تضمین کننده سود است دست یافت و یا در صورتی که امکان پرهیز از انحرافات وجود نداشته باشد، با توجه به هزینه‌های متحمل شده به معدن، سکانسی از توالی استخراج بلوک‌ها را به نحوی معرفی کند که کمترین هزینه انحرافات را در پی داشته باشد. در این مقاله یک مدل تحقیق در عملیاتی به منظور بهینه‌سازی برنامه‌ریزی‌تولید کوتاه مدت معادن روباز با هدف مینیمم‌سازی انحرافات از اهداف به نحوی معرفی می‌شود که ضمن در نظر گرفتن عیار و تناژ هدف ورودی به کارخانه، محدودیت‌های توان تولید، نسبت باطله برداری و شیب پایدار؛ قادر به تعیین توالی بهینه استخراج بلوک‌ها بدون نیاز به عملیات مخلوط‌سازی و با در نظر گرفتن هزینه حمل است.

۳. روش تحقیق

در برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت انحرافات به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. در دسته اول انحرافات عیار مواد معدنی ارسالی به

کارخانه و در دسته دوم انحرافات تناژ مواد معدنی ارسالی به کارخانه فرآوری قرار می‌گیرند. کارخانه فرآوری برای فرآوری مقدار مشخصی از مواد معدنی ورودی طراحی می‌شود. اگر مواد ارسالی به کارخانه در این محدوده نباشند، انحراف از محدوده هدف وجود دارد و باعث کاهش راندمان و افزایش هزینه‌ها خواهد شد.

معمولا اگر تناژ و عیار ارسالی به کارخانه کمتر از حدهای پایینی ظرفیت ورودی مواد به کارخانه باشد، باعث ارزش از دست رفته می‌شود. به این معنا که پتانسیل برای فرآوری مقدار بیشتری از مواد بوده است ولی از آن استفاده نشده است. همچنین هزینه فرآوری افزایش می‌یابد چون به ازای هزینه‌های ثابت فرآوری (هزینه‌هایی که به تناژ محصول تولیدی مربوط نیستند) مقدار کمتری از مواد مورد فرآوری قرار می‌گیرند.

در مقابل اگر عیار و تناژ ارسالی به کارخانه بیشتر از حد بالایی ظرفیت ورودی مواد باشد، باعث کاهش راندمان و هدر رفت منابع خواهد شد. چرا که کارخانه معمولا در یک ظرفیت مشخص بیشیه راندمان را دارد. فاصله از آن باعث کاهش عملکرد و راندمان خواهد شد و ممکن است مواد معدنی بیشتری در ضایعات کارخانه قرار گیرند(هزینه پنهان).

بنابراین در برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت میتوان تهیه مقدار مناسب مواد ارسالی به کارخانه فرآوری را هدف استخراج قرار داد. سپس برنامه‌ای تهیه کرد که بتواند توالی استخراج بلوک‌های موجود در معدن را برای تهیه آن با کمترین انحرافات تعیین کند. محدودیت‌های این برنامه نیز توان عملیاتی از نظر میزان تجهیزات موجود، نسبت باطله‌برداری، همچنین شیب پایدار معدن خواهد بود.

از لحاظ تحقیق در عملیاتی حل یک مدل تصمیم‌گیری با چندین هدف به عنوان یک مسئله چندهدفه معرفی می‌شود. در مسئله برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت چهار هدف وجود خواهد داشت و با یک مسئله چندین هدفه روبرو هستیم. دو هدف اول حداقل-سازی انحرافات از حد پایینی عیار و تناژ مورد قبول کارخانه و دو هدف دوم حداقل‌سازی انحرافات از تناژ و عیار مواد معدنی ارسالی به کارخانه نسبت به حد بالایی مورد قبول کارخانه خواهد بود.

از آنجا که میتوان برای هر واحد از انحرافات به ازای هر کدام از اهداف جریمه در نظر گرفت، این چهار هدف در یک تابع هدف قرار گرفته شد. به این نحو که متغیرهایی در مدل اختصاص داده شد که به ازای هر واحد انحرافات از هر کدام از اهداف در هر دوره برنامه‌ریزی تولید، مقدار آنها با توجه به محدودیت‌های اعمالی به مدل مشخص شده و در تابع هدف جریمه ناشی از انحرافات محاسبه خواهد شد. مقدار واحد جریمه‌ها نیز با توجه زیان متحمل شده به معدن محاسبه شده است.

۴. مدل‌سازی

در این قسمت یک مدل عدد صحیح مختلط(MIP) به منظور برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت معادن روباز با هدف کاهش انحرافات از اهداف تولید ارایه می‌شود. برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت‌مدت میتواند برای دوره‌های هفتگی یا جتی سالیانه در نظر گرفته شود. این مدل بهترین سکانس از توالی استخراج بلوک‌ها را به نحوی تعیین می‌کند که مجموع هزینه ناشی از انحرافات و هزینه‌ی حمل بلوک‌ها به هر کدام از مقاصد در کمینه‌ترین حالت ممکن باشند. با توجه به بیان مسئله انجام شده در قسمت قبل؛ در این بخش به تعریف شمارنده‌ها، مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرها، تابع هدف و محدودیت‌های مدل تحقیق در عملیاتی پرداخته می‌شود.

۴-۱. شمارنده‌ها

شمارنده‌های لازم برای مسئله برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت با هدف کاهش انحرافات از اهداف تولید به صورت جدول(۱) تعریف می‌شوند.

۴-۲. مجموعه‌ها

مجموعه‌های لازم برای مسئله برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت با هدف کاهش انحرافات از اهداف تولید به صورت جدول(۲) تعریف می‌شوند.

جدول(۱). شمارنده‌های مدل برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت

شمارنده	توضیحات
t	شمارنده دوره‌های برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت است.
n	شمارنده بلوک‌های موجود در مدل بلوکی عیاری کانسار است.
d	شمارنده مقصد ارسال بلوک‌های استخراج شده است.
e	شمارنده اهداف مورد نظر برای برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت است.

۴-۳. پارامترها

پارامترهای لازم برای مسئله برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت با هدف کاهش انحرافات از اهداف تولید به صورت جدول(۳) تعریف می‌شوند.

جدول(۲). مجموعه‌های مدل برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت در معدن روباز

مجموعه	توضیحات
T	مجموعه دوره‌های برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت است. به طوری که $t \in T$ و $T = \{1,2, \dots, \lvert T \rvert\}$. $\lvert T \rvert$ بزرگترین مقدار مجموعه T و یا آخرین دوره برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت و یا تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی تولید را نشان می‌دهد.
N	مجموعه بلوک‌های موجود در مدل بلوکی کانسار را نشان می‌دهد که به ازای آن‌ها برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت انجام می‌شود. به طوری که $n \in N$ و $N = \{1,2, \dots, \lvert N \rvert\}$. $\lvert N \rvert$ بزرگترین مقدار مجموعه N و یا تعداد بلوک‌های موجود را نشان می‌دهد.
D	مجموعه مقاصد ارسال بلوک‌ها را نشان می‌دهد. به طوری که $d \in D$ و $D = \{1,2\}$ است. مقاصد ارسال بلوک‌ها را به قرار زیر تعریف می‌کنیم: $d = 1$: مقصد کارخانه فرآوری را نشان می‌دهد. $d = 2$: مقصد دامپ باطله را نشان می‌دهد.
E	مجموعه اهداف در نظرگرفته شده را نشان می‌دهد به طوری که $e \in E$ و $E = \{1,2,3,4\}$ است. شمارنده اهداف تعریف شده برای برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت را به قرار زیر تعریف می‌کنیم: $e = 1$: هدف کمینه‌سازی کمبود عیار متوسط ورودی به کارخانه فرآوری نسبت به حداقل عیار هدف ورودی به کارخانه فرآوری را نشان می‌دهد. $e = 2$: هدف کمینه‌سازی ازدیاد عیار متوسط ورودی به کارخانه نسبت به حداکثر عیار هدف ورودی به کارخانه را نشان می‌دهد. $e = 3$: هدف کمینه‌سازی کمبود تناژ ورودی به کارخانه نسبت به حداقل تناژ هدف ورودی به کارخانه را نشان می‌دهد. $e = 4$: هدف کمینه سازی ازدیاد تناژ ورودی به کارخانه نسبت به حداکثر تناژ هدف ورودی به کارخانه را نشان می‌دهد.
UB_n	مجموعه بلوک‌های بالاسری بلوک $n \in N$ را نشان می‌دهد که این بلوک‌ها باید قبل از استخراج بلوک n و یا به طور همزمان با استخراج بلوک n به منظور رعایت شیب پایدار استخراج شوند.

جدول(۳). پارامترهای مدل برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت در معدن روباز

پارامتر	توضیحات
xc_n	مختصه در راستای محور x بلوک $n \in N$ را نشان می‌دهد. این مختصه از مدل بلوکی کانسار فراخوانی می‌شود.
yc_n	مختصه در راستای محور y بلوک $n \in N$ را نشان می‌دهد. این مختصه از مدل بلوکی کانسار فراخوانی می‌شود.
zc_n	مختصه در راستای محور z بلوک $n \in N$ را نشان می‌دهد. این مختصه از مدل بلوکی کانسار فراخوانی می‌شود.
xc^{dump}	مختصه در راستای محور x محل قرارگیری دامپ باطله را نشان می‌دهد. این مختصه از محل دامپ باطله با استفاده از دوربین نقشه‌برداری و یا از روی نقشه توپوگرافی برداشت می‌شود.
yc^{dump}	مختصه در راستای محور y محل قرارگیری دامپ باطله را نشان می‌دهد. این مختصه از محل دامپ باطله با استفاده از دوربین نقشه‌برداری و یا از روی نقشه توپوگرافی برداشت می‌شود.
zc^{dump}	مختصه در راستای محور z محل قرارگیری دامپ باطله را نشان می‌دهد. این مختصه از محل دامپ باطله با استفاده از دوربین نقشه‌برداری و یا از روی نقشه توپوگرافی برداشت می‌شود.
xc^{mill}	مختصه در راستای محور x محل قرارگیری کارخانه فرآوری را نشان می‌دهد. این مختصه از محل استوک‌پایل کارخانه فرآوری با استفاده از دوربین نقشه‌برداری و یا از روی نقشه توپوگرافی برداشت می‌شود.
yc^{mill}	مختصه در راستای محور y محل قرارگیری کارخانه فرآوری را نشان می‌دهد. این مختصه از محل استوک‌پایل کارخانه فرآوری با استفاده از دوربین نقشه برداری و یا از روی نقشه توپوگرافی برداشت می‌شود.
zc^{mill}	مختصه در راستای محور z محل قرارگیری کارخانه فرآوری را نشان می‌دهد. این مختصه از محل استوک‌پایل کارخانه فرآوری با استفاده از دوربین نقشه‌برداری و یا از روی نقشه توپوگرافی برداشت می‌شود.
dh_n^{dump}	این پارامتر اختلاف ارتفاع حاصل میان بلوک $n \in N$ و دامپ باطله را نشان می‌دهد که به صورت معادله(۱) برای هر کدام از بلوک‌ها محاسبه می‌شود. $dh_n^{dump} = \sqrt{(zc_n - zc^{dump})^2} \quad for\ n \in N$ (۱)
dh_n^{mill}	این پارامتر اختلاف ارتفاع حاصل میان بلوک $n \in N$ و کارخانه فرآوری را نشان می‌دهد که به صورت معادله(۲) برای هر کدام از بلوک‌ها محاسبه می‌شود. $dh_n^{mill} = \sqrt{(zc_n - zc^{mill})^2} \quad for\ n \in N$ (۲)
dd_n^{dump}	این پارامتر اختلاف مسافت افقی حاصل میان بلوک $n \in N$ و دامپ باطله را نشان می‌دهد که به صورت معادله(۳) برای هر کدام از بلوک‌ها محاسبه می‌شود. $dd_n^{dump} = \sqrt{(xc_n - xc^{dump})^2 + (yc_n - yc^{dump})^2} \quad for\ n \in N$ (۳)
dd_n^{mill}	این پارامتر اختلاف مسافت افقی حاصل میان بلوک $n \in N$ و کارخانه فرآوری را نشان می‌دهد که به صورت معادله(۴) برای هر کدام از بلوک‌ها محاسبه می‌شود. $dd_n^{mill} = \sqrt{(xc_n - xc^{mill})^2 + (yc_n - yc^{mill})^2} \quad for\ n \in N$ (۴)

ac^{ore}	این پارامتر هزینه عملیاتی به ازای ارسال یک تن ماده‌معدنی به کارخانه را نشان می‌دهد. این هزینه ناشی از عملیات چالزنی، انفجار، بارگیری و تخیله و فرآوری میتواند باشد و به مسافت حمل وابسته نیست.
ac^{waste}	این پارامتر هزینه عملیاتی به ازای ارسال یک تن باطله به دامپ را نشان می‌دهد. این هزینه ناشی از عملیات چالزنی، انفجار، بارگیری و تخیله است و به مسافت حمل وابسته نیست.
$c^{dd,ore}$	این پارامتر هزینه عملیاتی حمل یک تن ماده معدنی به ازای یک متر اختلاف مسافت افقی را نشان می‌دهد.
$c^{dd,waste}$	این پارامتر هزینه عملیاتی حمل یک تن باطله به ازای یک متر اختلاف مسافت افقی را نشان می‌دهد.
$c^{dh,ore}$	این پارامتر هزینه عملیاتی حمل یک تن ماده معدنی به ازای یک متر اختلاف ارتفاع را نشان می‌دهد.
$c^{dh,waste}$	این پارامتر هزینه عملیاتی حمل یک تن باطله به ازای یک متر اختلاف ارتفاع را نشان می‌دهد.
$ts_{d,n}$	این پارامتر تمام هزینه‌های عملیاتی ارسال بلوک $n \in N$ را به مقصد $d \in D$ نشان می‌دهد و از روابط(۵) و (۶) قابل محاسبه است. $ts_{d,n} = ac^{ore} + (dh_n^{mill} * c^{dh,ore}) + (dd_n^{mill} * c^{dd,ore}) \quad for\ d = 1, n \in N$ (۵) اگر بلوک به مقصد کارخانه فرآوری ارسال شود ($d = 1$) آنگاه هزینه عملیاتی ارسال بلوک به کارخانه و سپس فرآوری آن برابر است با: مجموع هزینه چالزنی، انفجار، بارگیری، باربری و فرآوری که در بخش اول معادله قرار دارند به اضافه‌ی هزینه انتقال ماده‌معدنی به ازای هر متر اختلاف ارتفاع در مقدار اختلاف ارتفاع (بخش دوم معادله) به اضافه‌ی هزینه انتقال ماده‌معدنی به ازای هر متر اختلاف مسافت افقی در مقدار اختلاف مسافت افقی بین بلوک و کارخانه فرآوری. $ts_{d,n} = ac^{waste} + (dh_n^{dump} * c^{dh,waste}) + (dd_n^{dump} * c^{dd,waste}) \quad for\ d = 2, n \in N$ (۶) اگر بلوک به مقصد دامپ باطله ارسال شود ($d = 2$) آنگاه هزینه عملیاتی ارسال بلوک به دامپ باطله برابر است با: مجموع هزینه چالزنی، انفجار، بارگیری، باربری که در بخش اول معادله محاسبه می‌شوند و هزینه انتقال باطله به ازای هر متر اختلاف ارتفاع در مقدار اختلاف ارتفاع (بخش دوم معادله) و هزینه انتقال باطله به ازای هر متر اختلاف مسافت افقی در مقدار اختلاف مسافت افقی بین بلوک و دامپ باطله.
g_n	این پارامتر عیار واقع در بلوک $n \in N$ را نشان می‌دهد که برای هر کدام از بلوک‌ها از مدل بلوکی کانسار فراخوانی می‌شود.
w_n	این پارامتر وزن بلوک $n \in N$ را نشان می‌دهد که برای هر کدام از بلوک‌ها از مدل بلوکی کانسار فراخوانی می‌شود.
$g_{goalmax}$	این پارامتر حد بالایی عیار هدف ورودی به کارخانه در هر دوره برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت را نشان می‌دهد.
$g_{goalmin}$	این پارامتر حد پایینی عیار مورد هدف ورودی به کارخانه در هر دوره برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت را نشان می‌دهد.
$ore_{goalmax}$	این پارامتر حد بالایی تناژ ماده معدنی هدف ورودی به کارخانه در هر دوره برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت را نشان می‌دهد.
$ore_{goalmin}$	این پارامتر حد پایینی تناژ ماده معدنی هدف ورودی به کارخانه در هر دوره برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت را نشان می‌دهد.
c_e	این پارامتر هزینه یک واحد انحراف از هدف $e \in E$ را نشان می‌دهد.

جدول(۴). متغیرهای مدل برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت در معدن روباز

متغیر	توضیحات
Z	یک متغیر آزاد در علامت است که مقدار تابع هدف مدل بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.
$X_{d,t,n}$	یک متغیر باینری است. در صورت ارسال بلوک $n \in N$ در دوره $t \in T$ به مقصد $d \in D$ مقداری برابر با یک خواهد داشت و در غیر این صورت مقدار آن صفر خواهد بود.
$S_{t,e}$	یک متغیر عدد صحیح مثبت است. این متغیر مقدار انحراف از هدف $e \in E$ در دوره $t \in T$ را نشان می‌دهد. به طوریکه: $S_{t,1}$: معادل فلز ناشی از کمبود عیار ورودی به کارخانه در هر دوره $t \in T$ است. $S_{t,2}$: معادل فلز ناشی از ازدیاد عیار ورودی به کارخانه در هر دوره $t \in T$ است. $S_{t,3}$: معادل تناژ ناشی از کمبود ماده معدنی ارسالی به کارخانه در هر دوره $t \in T$ است. $S_{t,4}$: معادل تناژ ناشی از ازدیاد ماده معدنی ارسالی به کارخانه در هر دوره $t \in T$ است.

$$Min\ Z = \sum_{t\in T}\sum_{e\in E} c_e * S_{t,e} + \sum_{d\in D}\sum_{t\in T}\sum_{n\in N} ts_{d,n} * w_n * X_{d,t,n} \quad (۷)$$

$$\sum_{d\in D} X_{d,t,n} \le \sum_{d\in D}\sum_{t'\le t} X_{d,t',n'} \qquad for: t \in T, n \in N, n' \in UB_n \quad (۸)$$

$$\sum_{n\in N} w_n * X_{d,t,n} * (g_n - g_{goalmin}) + S_{t,1} \ge 0 \qquad for: d = 1, t \in T \quad (۹)$$

$$\sum_{n\in N} w_n * X_{d,t,n} * (g_{goalmax} - g_n) + S_{t,2} \ge 0 \qquad for: d = 1, t \in T \quad (۱۰)$$

$$\sum_{n\in N} w_n * X_{d,t,n} - ore_{goalmin} + S_{t,3} \geq 0 \qquad for: d = 1, t \in T \quad (۱۱)$$

$$ore_{goalmax} - \sum_{n\in N} w_n * X_{d,t,n} + S_{t,4} \geq 0 \qquad for: d = 1, t \in T \quad (۱۲)$$

$$\sum_{d\in D}\sum_{t\in T} X_{d,t,n} \leq 1 \quad for: n \in N \quad (۱۳)$$

$$\sum_{n\in N}\sum_{d\in D} w_n * X_{d,t,n} \leq (1 + stripp\ ratio) ore_{goalmax} \qquad fort \in T \quad (۱۴)$$

۴-۴. متغیرها

متغیرهای لازم برای مسئله برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت با هدف کاهش انحرافات از اهداف تولید به صورت جدول(۴) تعریف می‌شوند.

۴-۵. تابع هدف

تابع هدف مسئله به صورت کمینه‌سازی انحرافات از اهداف تولید با توجه به مقدار هر واحد انحراف و جریمه ناشی از هر واحد انحراف و همچنین هزینه حمل تعریف می‌شود. معادله(۷) تابع هدف مسئله بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. این تابع به صورت مینیمم سازی متغیر Z که مقدار تابع هدف را نشان می‌دهد، تعریف می‌شود. این تابع به دو قسمت اصلی تقسیم می‌شود که با یکدیگر جمع می‌شوند.

در بخش اول، مجموع هزینه انحرافات از اهداف تولید با توجه به هزینه هر واحد انحراف از هر کدام از اهداف در مقدار آن انحراف، محاسبه می‌شود. بنابراین زمانی که این تابع در کمینه‌ترین مقدار خود باشد، مقادیر متغیرهای انحرافات از اهداف تولید در بهترین حالت ممکن یعنی کمترین مقدار بهینه ممکن هستند.

از آنجا که فاصله‌ی حمل نیز به عنوان یکی از عوامل تاثیرگذار در برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت معدن بوده و میتواند در اولویت استخراج بلوک‌ها تاثیرگذار باشد، در بخش دوم تابع هدف هزینه عملیاتی ارسال هر بلوک به هر کدام از مقاصد ارسال بلوک در نظر گرفته می‌شود. بنابراین علاوه‌بر درنظر گرفتن هزینه انحرافات در تابع هدف، هزینه عملیاتی استخراج که به مسافت و موقعیت مکانی بلوک‌ها وابسته است، در نظر گرفته می‌شود.

۴-۶. محدودیت ها

معادله(۸) محدودیت شیب استخراج بلوک‌ها را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر این محدودیت اطمینان حاصل می‌کند، زمانی یک بلوک میتواند استخراج شود که تمام بلوک‌های واقع در محدوده شیب مجاز بالاسری آن بلوک در دوره‌های قبلی و یا به طور همزمان استخراج شوند.

معادله(۹) محدودیت حداقل عیار موادمعدنی ارسالی به کارخانه فرآوری($d = 1$) را در نظر می‌گیرد. به عبارت دیگر به ازای مجموعه بلوک‌هایی که در هر دوره برنامه‌ریزی تولید $t \in T$ به کارخانه فرآوری ارسال می‌شوند ($d = 1$)، مقدار تفاضل فلز موجود در بلوک ($w_n * g_n$) از مقدار حد پایینی فلز ورودی به کارخانه($w_n * g_{goalmin}$) به اضافه‌ی مقدار کمبود فلز ارسالی به کارخانه($S_{t,1}$) باید عددی بزرگ‌تر مساوی صفر باشد. این محدودیت به گونه‌ای تنظیم شده است که مقدار کمبود فلز ارسالی به کارخانه نسبت به فلز مورد هدف تولید در هر دوره برنامه‌ریزی تولید محاسبه شود تا در تابع هدف به ازای هر واحد کمبود فلز جریمه مورد نظر لحاظ شود. اگر در یک دوره مقدار فلز استخراج شده از مقدار فلز حد پایینی ورودی به کارخانه بیشتر باشد، مقدار متغیر انحراف $S_{t,1}$ به ازای آن دوره صفر خواهد شد. چرا که هدف مدل مینیمم‌سازی انحرافات است.

معادله(۱۰) محدودیت حداکثر عیار مواد معدنی ارسالی به کارخانه فرآوری($d = 1$) را در نظر می‌گیرد. به عبارت دیگر این معادله در نظر می‌گیرد، به ازای مجموعه بلوک‌هایی که در هر دوره برنامه‌ریزی‌تولید$t \in T$ به کارخانه فرآوری ارسال می‌شوند($d = 1$)، تفاضل مقدار حد بالایی فلز ورودی به کارخانه($w_n * g_{goalmax}$) از فلز موجود در بلوک ($w_n * g_n$) به اضافه‌ی مقدار ازدیاد فلز ارسالی به کارخانه($S_{t,2}$) باید عددی بزرگتر مساوی صفر باشد. بنابراین اگر در یک دوره مقدار فلز استخراج شده از مقدار فلز حد بالایی ورودی به کارخانه کمتر باشد، مقدار متغیر انحراف $S_{t,2}$ به ازای آن دوره صفر خواهد شد و در غیر این‌صورت مقدار انحراف محاسبه خواهد شد.

معادله(۱۱) محدودیت تناژ ارسالی به کارخانه فرآوری ($d = 1$) در هر دوره برنامه‌ریزی تولید ($t \in T$) را نشان می‌دهد. این معادله در نظر می‌گیرد، مجموع تناژ موادمعدنی ارسالی به کارخانه فرآوری منهای تناژ هدف حد پایینی مواد معدنی ورودی به کارخانه($ore_{goalmin}$) به اضافه‌ی مقدار کمبود تناژ مواد ارسالی به کارخانه($S_{t,3}$)، باید عددی بزرگتر مساوی صفر باشد. به عبارت دیگر این معادله مقدار کمبود تناژ مواد ارسالی به کارخانه فرآوری نسبت به تناژ هدف حد پایینی ورودی به کارخانه را تعیین می‌کند. طبیعتا

در هر دوره برنامه‌ریزی تولید اگر مقدار تناژ استخراج شده بیشتر از حد پایینی ظرفیت ورودی کارخانه باشد، مقدار متغیر $S_{t,3}$ برابر با صفر خواهد شد.

معادله(۱۲) محدودیت تناژ ارسالی به کارخانه فرآوری ($d = 1$) در هر دوره برنامه‌ریزی تولید ($t \in T$) را نشان می‌دهد. این معادله در نظر می‌گیرد به ازای هر کدام از دوره‌های برنامه‌ریزی تولید، تفاضل تناژ هدف حد بالایی مواد معدنی ورودی به کارخانه از مقدار مواد معدنی ارسال شده به کارخانه به‌اضافه‌ی مقدار ازدیاد تناژ ورودی به کارخانه باید عددی بزرگ‌تر مساوی صفر باشد. بنابراین اگر مقدار حد بالایی کارخانه بزرگتر از مقدار ورودی به کارخانه در یک دوره باشد، متغیر $S_{t,4}$ در آن دوره مقداری برابر با صفر خواهد داشت. ولی اگر مقدار ورودی به کارخانه از حد بالایی کارخانه بیشتر باشد، این متغیر دارای مقدار ازدیاد تناژ ارسالی به کارخانه خواهد شد.

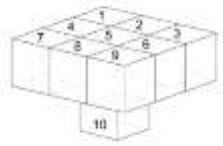
معادله(۱۳) تحت عنوان محدودیت ذخیره شناخته می‌شود. به این ترتیب که هر کدامیک از بلوک‌ها موجود در مدل بلوکی کاندیدا برای برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت ($n \in N$) به ازای تمام دوره‌های برنامه‌ریزی تولید تعریف شده و تمام مقاصد، حداکثر یک‌بار میتواند استخراج شوند. به عبارت دیگر یک بلوک میتواند استخراج بشود و یا نشود و در صورتی که استخراج شود فقط یک‌بار میتواند استخراج شود.

معادله(۱۴) محدودیت وجود منابع برای استخراج مجموع ماده معدنی و باطله را نشان می‌دهد. معمولا در هر معدن تعداد مشخصی از ماشین آلات استخراجی(دستگاه چالزن، کامیون و شاول) با ظرفیت مشخص وجود دارد. بنابراین مجموع استخراج ماده معدنی و باطله باید در محدوده ظرفیت استخراج و توان عملیاتی معدن در هر دوره برنامه‌ریزی تولید باشد. در این معادله میتوان با حداکثر نسبت باطله‌برداری مجاز، را در نظر گرفت.

۵. حل مدل و نتایج

برای تعیین پارامترهای مختصاتی، عیاری و تناژی بلوک‌ها، مدل بلوکی عیاری یک ذخیره در ایران مرکزی مورد بررسی قرار گرفت. این مدل دارای بلوک‌هایی با ابعاد ۵ متر در جهت محور شرق، ۵ متر در جهت محور شمال و دارای ابعاد مختلف در جهت عمق هستند. جهت برنامه‌ریزی تولید و ارائه یک طرح قابل کار، تصمیم‌گیری در مورد استخراج بلوک‌ها با این ابعاد مورد نیاز نیست. زیرا در هر مرحله از استخراج ماده معدنی و یا باطله از جبه‌کارهای استخراجی نمیتوان بلوک‌هایی با این ابعاد را استخراج کرد. همچنین بلوک‌های با ابعاد کوچک باعث افزایش تعداد متغیرها در مدل‌ریاضی برنامه‌ریزی تولید و صرف زمان زیاد برای حل خواهد شد. بدین منظور ارتفاع بلوک‌ها، مطابق با ارتفاع پله‌های معدن در نظر گرفته شد.

در حالت سه بعدی یک بلوک در صورتی میتواند استخراج شود که ۹ بلوک بالای سر آن نیز استخراج شده باشند(همزمان و یا در دوره‌های قبل استخراج شده باشند). بنابراین همانطور که در شکل(۱) قابل مشاهده است؛ در صورتی بلوک شماره ۱۰ می‌تواند استخراج شود که ۹ بلوک شماره‌گذاری‌شده بالای سرآن نیز استخراج شوند. با توجه به الگوی شیب ۱:۹و شیب پایدار معدن، طول و عرض بلوک‌ها محاسبه شد.



شکل(۱). نمایش شماتیک از توالی استخراج بلوک‌ها با توجه به محدودیت شیب

برای محاسبه مقادیر واحدی هزینه انحرافات از هر کدام اهداف به ترتیب زیر عمل شد.

درصورتی که انحراف منفی از عیار مورد هدف کارخانه داشته باشیم و یا به عبارت دیگر عیار استخراجی کمتر از عیار مورد هدف تولید باشد، باعث هزینه ارزش از دست رفته و همچنین جریمه خواهد شد. با در نظر گرفتن قیمت فلز مس، راندمان استخراج، راندمان کارخانه فرآوری و ذوب، هزینه‌های فروش، ذوب، استخراج، فرآوری، ترقیق و در نظر گرفتن جریمه ناشی از عدم تامین فلز مورد نیاز مورد قرارداد؛ مجموعا جریمه کمبود یک تن فلز برجا ۴۰۰۰ دلار بر تن محاسبه شد.

در صورتی که انحراف مثبت از عیار هدف ورودی به کارخانه داشته باشیم، ۱۰ دلار بر هر تن فلز برجا جریمه ناشی از عدم کارکرد مناسب کارخانه و همچنین هزینه انبارداری در نظر گرفته شد.

اگر تناژ مواد ارسالی به کارخانه کم‌تر از مقدار ظرفیت کارخانه باشد، موجب خسارت ناشی از ارزش از دست رفته و یا به عبارت دیگر تعویق درآمد خواهد شد. مجموعا ۱۰ دلار بر تن ماده‌معدنی برجا جریمه به ازای هر تن کمبود ماده معدنی در نظر گرفته شد.

اگر تناژ مواد ارسالی به کارخانه فرآوری بیشتر از مقدار ظرفیت کارخانه باشد، موجب می‌شود کارخانه نتواند به درستی عملیات فرآوری را انجام دهد و همچنین موجب هزینه انبارداری می‌شود. بدین منظور جریمه ۱ دلار بر تن به ازای هر تن ماده معدنی اضافی در نظر گرفته می‌شود.

مدل MIP با استفاده از لپ تاپ ایسوس (k551 با رم ۶ گیگابایت از نوع DDR3، با مشخصات سری و قدرت پردازنده

Intel(R)Core(TM) i7-4500 U CPU)در نرم افزار گمز[۱] ورژن ۲۴,۱,۲ برای ۴ دوره سه ماهه کدنویسی و به اجرا گذاشته شد. پس از مدت زمان دو ساعت و ۵۱ دقیقه در گپ نسبی ۰,۰۷۴ درصد، توسط کاربر متوقف شد. وضعیت حل مدل در حالت ابتیمم قرار گرفت. این مدل دارای ۱۴۲۶۵ متغیر و ۲۸۴۵۸ محدودیت است.

مطابق با نتایج حاصل از حل مدل در جدول(۵) توالی استخراج بلوک‌ها در هر دوره سه ماهه بدون انحراف از اهداف تولید حاصل شده است و مقدار انحرافات همگی صفر هستند. از آنجایی که هزینه استخراج و حمل هر بلوک در مدل بهینه‌سازی مورد نظر قرار گرفته شده است، مقدار عددی هزینه در تابع هدف ناشی از هزینه حمل و استخراج است و جریمه‌ای ناشی از انحرافات از اهداف تولید در تابع هدف وجود ندارد.

جدول(۵). نتایج حل مدل برای ۴ دوره سه ماهه

دوره سه ماه	ماده معدنی استخراج شده(تن)	باطله استخراج شده(تن)	عیار میانگین استخراج شده (درصد)
۱	٤٢٤,٩٢٨	٦٩٠,٥٠٨	۰.۳۰۰
۲	٤٢٤,٩٢٨	۳۹۸۳۷۰	۰.۳۰۰
۳	٤٢٤,٩٢٨	۳۷,۱۸۱	۰.۳۰۰
٤	٤٢٤,٩٢٨	۲۱,۲٤٦	۰.۳۰۰

مقدار ماده معدنی استخراج شده در هر دوره عدد یکسان ۴۲۴۹۲۸ تن است. از آنجا که تصمیم‌گیری در مورد استخراج هر کدام از بلوک‌ها در مدل برنامه‌ریزی تولید یک متغیر دودویی[۲] است، یک بلوک یا استخراج می‌شود و یا استخراج نمی‌شود. بنابراین مقدار تناژ ماده‌معدنی استخراجی در هر دوره، حاصل مجموع تناژ بلوک‌هایی است که در آن دوره استخراج شده است. به همین دلیل اعداد تناژ دارای مقادیر یکان، دهگان و صدگان هستند. از آنجا که مقدار ماده‌معدنی استخراج شده در هر دوره مابین حد پایینی و حد بالایی ورودی به کارخانه است، مقدار(تناژی) انحرافات از بازه تناژ مورد هدف تولید صفر است.

باطله برداری انجام شده ناشی از حل این مدل به گونه‌ای اتفاق افتاد است که در دو دوره‌ی اول مقادیر بیشتری باطله استخراج شده است. دلیل آن آزادسازی ماده‌معدنی زیرین برای استخراج بلوک‌های ماده معدنی در دوره‌های بعدی است. چون در دوره‌های سوم و چهارم مقادیر ماده معدنی قابل استخراج وجود داشته است، برای به تعویق انداختن هزینه‌های عملیاتی باطله‌برداری کم‌تری انجام شده است.

عیار میانگین استخراج شده در هر دوره برنامه‌ریزی تولید برابر با ۰,۳ درصد است. این عیارها مابین عیار حد پایینی و بالایی مواد معدنی ارسالی به کارخانه فرآوری است. بنابراین مقدار انحرافات (کمبود و یا ازدیاد فلز نسبت به بازه فلز ارسالی به کارخانه) صفر است.

مقدار تابع هدف به ازای انحرافات از اهداف تولید صفر است و مدل بهینه‌سازی سکانس برداشت بلوک‌ها را به نحوی تعیین کرده است که در دوره‌های برنامه‌ریزی تولید انحرافاتی وجود ندارد.

در ادامه افق‌های برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت به دوره‌های زمانی کوچکتری تقسیم شدند. بدین ترتیب بلوک‌هایی که در دوره اول سه‌ماهه استخراج می‌شوند، تفکیک شده و سپس برای برنامه-ریزی تولید هفتگی مد نظر قرار گرفتند. این برنامه‌ریزی تولید برای ۱۲ دوره با نسبت باطله‌برداری حداکثر ۲ نسبت به بیشترین ماده معدنی قابل قبول کارخانه انجام شد. بازه عیار مورد قبول کارخانه بین ۰,۳ تا ۰,۴ درصد و بازه تناژی کارخانه بین ۲۶۰۰۰ تا ۴۳۰۰۰ تن در نظر گرفته شد. همچنین در این برنامه‌ریزی تولید هفتگی هزینه‌های حمل از تابع هدف حذف شدند. این مدل پس مدت زمان حدودا ۲۵ ثانیه و با مقدار انحرافات و تابع هدف برابر با صفر به جواب رسید. از آنجا که تعداد بلوک‌های اختصاص داده شده برای ۱۲ دوره برنامه‌ریزی تولید هفتگی کمتر از بلوک‌های اختصاص داده شده برای ۴ دوره برنامه‌ریزی تولید سه ماهه است، مدل در زمان کمتری به جواب بهینه می‌رسد. نتایج حاصل شده از حل مدل در جدول(۶) آورده شده است.

همانطور که در جدول(۶) قابل مشاهده است، مقدار ماده‌معدنی استخراج شده در تمام دوره‌ها در بین ظرفیت بیشینه و کمینه ورودی هدف کارخانه فرآوری قرار دارد. مقدار ماده معدنی به ازای تمام دوره‌ها مقداری برابر دارد ولی در دوره‌های اولیه نسبتا باطله برداری بیشتری به منظور آزادسازی ماده معدنی زیرین انجام شده است. عیار ماده معدنی ارسالی به کارخانه فرآوری نیز در بازه قابل قبول قرار دارد و مقدار انحرافات همگی صفر هستند.

جدول(۶). نتایج حل مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت برای ۱۲ دوره هفتگی

شماره دوره هفتگی	ماده معدنی استخراج شده (تن)	باطله استخراج شده(تن)	عیار میانگین استخراج شده (درصد)
۱	۲٦,٥٥٨	٧٤,٣٦٢.٤	۰,۳۱۸
۲	۲٦,٥٥٨	٥٣,١١٦.٠	۰,۳۱۱
۳	۲٦,٥٥٨	٦٣,٧٣٩.٢	۰,۳۰۹

[۱] Gams

[۲] Binary variable

٤	٢٦,٥٥٨	٣٧,١٨١.٢	٠,٣٢٢
٥	٢٦,٥٥٨	٦٣,٧٣٩.٢	٠,٣٠٤
٦	٢٦,٥٥٨	٣١,٨٦٩.٦	٠,٣١٧
٧	٢٦,٥٥٨	٢٦,٥٥٨.٠	٠,٣٠٢
٨	٢٦,٥٥٨	٢١,٢٤٦.٤	٠,٣٠٩
٩	٢٦,٥٥٨	٥,٣١١.٦	٠,٣٠٨
١٠	٢٦,٥٥٨	٢١,٢٤٦.٤	٠,٣١٢
١١	٢٦,٥٥٨	٠	٠,٣٠٠
١٢	٢٦,٥٥٨	٠	٠,٣٠٦

۶. نتیجه‌گیری

مدل‌های تحقیق در عملیاتی به طور موثری میتوانند در فرایند معدنکاری و بخصوص برنامه‌ریزی تولید معادن مورد استفاده قرار گیرند. این مدل‌ها میتواند با روش‌ها و الگوریتم‌های حل دقیق به جواب بهینه سرتاسری دست یابند.

برای بهینه سازی هر سیستمی باید بهینه سازی سرتاسری بر روی تمام اجزا و فرایندهای آن انجام شود تا اثرات هر فرایند به طور توامان بر بقیه فرایندها در نظر گرفته شود. در برنامه‌ریزی تولید معادن نیز باید بهینه‌سازی برای کل عمر معدن انجام شود، تا اثرات هر عملیاتی که امروز انجام می‌شود در دوره‌ها و سال های بعدی نیز دیده شود. اما برنامه‌ریزی تولید در افق کوتاه مدت به‌منظور استخراج کل ذخیره معدن نیاز به دوره‌های عملیاتی زیادی دارد. همچنین تعداد بلوک‌های موجود در مدل بلوکی کانسار زیاد هستند و نمیتوان مدل برنامه‌ریزی تولید را برای کل عمر معدن و کل بلوک‌ها مورد استفاده قرار داد. بنابراین برنامه‌ریزی تولید در دوره‌های کوتاه‌مدت برای کل عمر معدن انجام نمی‌شود. ابتدا برنامه‌ریزی تولید بلندمدت که معمولا هر کدام از دوره‌های این برنامه یک تا پنج سال است، برای کل عمر معدن انجام می شود. سپس در هر کدام از دوره‌های برنامه بلند مدت، برنامه‌ی کوتاه‌مدت به نحوی انجام می‌شود که حداقل انحراف از قراردادها و برنامه‌ریزی تولید بلندمدت بوجود آید. از آنجایی که برنامه کوتاه‌مدت در راستای اهداف بلند مدت است، بیشینگی سود و بهینه‌سازی را تضمین می‌کند.

در برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت تهیه بازه مناسب مواد ارسالی به کارخانه فرآوری که بر اساس طرح استخراج بلندمدت و قراردادهای فروش تهیه شده، هدف استخراج است. در این مقاله مدلی ارایه شد که توالی استخراج بلوک‌های موجود در معدن را برای تهیه این بازه با کمترین انحرافات تعیین کند.

برای در نظر گرفتن هزینه حمل در برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت، معادلاتی قبل از مدل بهینه سازی تعریف شدند که مسافت‌های قائم و افقی حمل هر کدام از بلوک‌ها را به هرکدام از مقاصد محاسبه می‌کنند. با در نظر گرفتن هزینه واحد حمل و مقدار مسافت حمل و تناژ هر بلوک؛ هزینه‌ی عملیاتی حمل هر بلوک به هر کدام از مقاصد در تابع هدف مد نظر قرار گرفته شد. مدل بهینه‌سازی در مورد مقصد ارسال بلوک‌ها نیز تصمیم می‌گیرد. به عبارت دیگر مدل تعیین می‌کند که کدام بلوک در چه دوره‌ای به کدام مقصد ارسال شود. بنابراین اگر یک بلوک دارای مقادیر کمی از عیار و یا باطله باشد، با توجه به این که میانگین عیار ارسالی به کارخانه را کاهش می‌دهد و معدن متحمل جریمه ناشی از کمبود عیار می‌شود، مدل از ارسال این بلوک به کارخانه فرآوری جلوگیری می‌کند.

لازم به ذکر است که در صورت وجود عناصر مزاحم در فرآیند فرآوری، مدل این قابلیت را داراست که با اضافه کردن یک محدودیت، بازه عناصر مزاحم ورودی به کارخانه فرآوری را در برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت لحاظ کند. به این ترتیب که عیار متوسط عناصرمزاحم بلوک‌هایی که به کارخانه فرآوری ارسال می‌شوند، اگر بیشتر از حد قابل تحمل عملیات فرآوری باشد، جریمه ناشی از آن در تابع هدف لحاظ بشود.

این تحقیق ضمن ارائه یک مدل بهینه؛ دارای قابلیت‌های استفاده در معادن دیگر، تغییر سریع پارامترها و منطبق بر اصل ثابت شده کاهش انحرافات در افق کوتاه‌مدت است. همچنین در مواردی که به دلیل تغییر خاصیت مواد در استوک‌پایل امکان دپوسازی موادمعدنی نباشد، این مدل کارایی مناسبی میتواند داشته باشد. اجرای این مدل در معدن مورد مطالعه با حذف عملیات مخلوط‌سازی مواد، ارزش افزوده ۳۳۰ میلیون تومان ماهیانه ایجاد می‌کند.

۷. مراجع

[1] M. Samavati, DL. Essam, M. Nehring, and R. Sarker,"Open-pit mine production planning and scheduling: A research agenda," In Data and Decision Sciences in Action: Proceedings of the Australian Society for Operations Research Conference, pp. 221-226, 2018.

[2] J. Ziyaei, and A. Moniri, "A Simulation based on multi-criteria decision-making for the problem of choosing a haulage fleet, a case study of Zaghdere copper mine," Scientific Journal of Science and Construction Techniques, vol. 1 no. 2 pp. 77-89, 2021. (In Persian).

[3] RV. Ramani, "Surface mining technology: progress and prospects," Procedia Engineering, vol. 46 pp. 9-21, 2012.

[4] M. Paricheh, and M. Osanloo, "Concurrent open-pit mine production and in-pit crushing–conveying system planning," Engineering optimization, vol. 52 no.10 pp. 1780-1795, 2020.

[5] AM. Newman, E. Rubio, R. Caro, A. Weintraub, and K Eurek, "A review of operations research in mine planning," Interfaces, vol. 40 no.3 pp. 222-245, 2010.

[6] M. Shamsi, Y. Pourrahimian, and M. Rahmanpour, "Optimisation of open-pit mine production scheduling considering

optimum transportation system between truck haulage and semi-mobile in-pit crushing and conveying," International Journal of Mining, Reclamation and Environment, vol. 36 no. 2 pp. 142-158, 2022.

[7] TB. Johnson, "Optimum Production Scheduling," 8th International Symposium on Computers and Operations research, 1969.

[8] K. Fytas, J. Hadjigeorgiou, and J. Collins, "Production scheduling optimization in open pit mines," International Journal of Surface Mining and Reclamation, vol. 7 no. 1 pp. 1-9, 1993.

[9] J. Gholamnejad, and AY. Bafghi, "A practical short-term production scheduling model for open pit mines," International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM, 2008.

[10] M. Jamshidi, and M. Osanloo, "Multiple destination influence on production scheduling in multi-element mines," International Journal of Engineering, vol. 31 no. 1 pp. 173-180, 2018.