

برنامه‌ریزی استوار استخراج بلوک‌های معدن روباز در شرایط عدم قطعیت - رویکرد مبتنی بر مجموعه عدم قطعیت جعبه‌ای

عارف علی‌پور^{۱*}، مجتبی مختاریان اصل^۲، علی اصغر خدایاری^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه

۳- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران

(دریافت: فروردین ۱۳۹۷، پذیرش: آبان ۱۳۹۸)

چکیده

برنامه‌ریزی زمانی استخراج بلوک‌های معدن روباز از کلیدی‌ترین تصمیم‌های مرتبط با این معادن است. غیرقطعی بودن برخی از پارامترها، لزوم توجه به برنامه‌ریزی در شرایط عدم قطعیت را ضروری ساخته است. در پژوهش حاضر ضمن بررسی اثر عدم قطعیت‌های رایج بر نتیجه برنامه‌ریزی استخراج، مقایسه‌ای بین برنامه‌ریزی قطعی و غیرقطعی استخراج بلوک‌های یک کانسار فرضی مس در حالت سه‌بعدی صورت گرفته است. برای صورت‌بندی مدل برنامه‌ریزی غیرقطعی از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه‌های محدب عدم قطعیت استفاده شده است. در این مدل، ارزش اقتصادی بلوک به عنوان ضریب متغیرهای تصمیم در تابع هدف و محدودیت ظرفیت استخراج و فرآوری به عنوان مقادیر سمت راست محدودیت‌ها، به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به ماهیت روش استوار، حول مقادیر اسمی پارامترهای غیرقطعی نرخ اغتشاش و نوسانی با دامنه ثابت در نظر گرفته شده و تدابیر لازم برای کنترل و ارضای محدودیت‌ها در نظر گرفته شده است. در نهایت طی یک برنامه پنج ساله، خروجی مدل در حالت‌های مختلف، شامل زمان استخراج هر بلوک، تناژ استخراج، تناژ فرآوری و عیار متوسط هر دوره با پاسخ مدل برنامه‌ریزی خطی قطعی مقایسه شده است. نتایج حاصل از برنامه‌ریزی استوار نشان می‌دهد که محدوده معدن متناسب با افزایش سطح محافظه‌کاری کوچک‌تر می‌شود.

کلمات کلیدی

برنامه‌ریزی استخراج بلوک، برنامه‌ریزی تولید، بهینه‌سازی استوار، عدم قطعیت جعبه‌ای

*عهده‌دار مکاتبات: a.alipour@mie.uut.ac.ir

۱- مقدمه

شود. استواری مدل به این معنی است که خروجی مدل نباید نسبت به مقادیر قطعی فرض شده برای پارامترها و ورودی‌های مدل حساسیت بالایی داشته باشد.

موارد استفاده از بهینه‌سازی استوار در مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن محدود بوده و این روش کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۰ کومرال [۱۵] با تعریف یک تابع چندهدفه استوار سناریو محور و به روش برنامه‌ریزی آرمانی اقدام به بهینه‌سازی کردن ارزش فعلی خالص و کمینه کردن کمینه انحراف از ظرفیت‌های استخراج و فرآوری کرد. در مدل مذکور هزینه‌ها و قیمت ماده معدنی به عنوان پارامترهای غیرقطعی و به صورت چند سناریوی خاص در قالب بهینه‌سازی استوار تصادفی در مدل کلی اعمال شده بود. بعدها با در نظر گرفتن عدم قطعیت عیار ماده معدنی گونه دیگری از مدل‌های استوار برای برنامه‌ریزی استخراج معدن روباز به کار گرفته شد. در پژوهش اخیر صورت گرفته توسط علی پور و همکاران، مدل برنامه‌ریزی استوار مبتنی بر مجموعه عدم قطعیت با در نظر گرفتن عدم قطعیت ارزش اقتصادی بلوک برای ارائه برنامه زمان‌بندی استوار بلوک‌های معدن مس ماروین با روش حل تقریبی الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷].

رویکرد اصلی در بهینه‌سازی استوار مقاوم‌سازی پاسخ در مقابل عدم قطعیت پارامترهاست. چنین پاسخی استوار و روش‌های بهینه‌سازی منجر به تولید این نوع پاسخ‌ها، بهینه‌سازی استوار خوانده می‌شود [۱۸]. در واقع، تصمیم استوار تصمیمی است که در مقابل عدم قطعیت محیط تاب می‌آورد، و نوسان عملکرد ناشی از آن کمینه می‌شود. در نقطه مقابل در برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر، نوسان عملکرد محدود نبوده و امکان تخطی از محدودیت‌ها وجود دارد. در بهینه‌سازی استوار نوع توزیع پارامترهای غیرقطعی مشخص نیست، اما بازه و حدود آنها مشخص است. به دلیل این ویژگی، گاهی از برنامه‌ریزی استوار با عنوان برنامه‌ریزی تصادفی مبهم نیز نام برده می‌شود.

در روش بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه‌های محدب^۴ پارامترهای غیرقطعی با استفاده از متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع متقارن و کران‌دار در بازه ۱- تا ۱ بازنمایی می‌شوند. در این روش ابتدا پارامترهای غیرقطعی به صورت مجموعه‌های محدب مدل شده و سپس با استفاده از تبدیلات مربوطه، هم‌ارز قطعی مدل استوار

برنامه‌ریزی زمانی معادن روباز و تعیین ترتیب استخراج بلوک‌های درون محدوده‌ی نهایی این معادن معمولاً بر مبنای بهینه‌کردن ارزش فعلی خالص^۱ صورت می‌گیرد. از سال ۱۹۶۰ تاکنون محققین مختلف برای برنامه‌ریزی زمانی استخراج بلوک‌های معادن روباز الگوریتم‌های مختلفی را با پایه‌های ابتکاری و ریاضی، و رویکردهای قطعی و غیرقطعی ارائه کرده‌اند. برخی از مهم‌ترین الگوریتم‌ها و روش‌های حل ارائه شده برای برنامه‌ریزی با رویکرد قطعی در مراجع [۱-۱۱] ارائه شده است.

در سال‌های اخیر برنامه‌ریزی استخراج معادن روباز با رویکرد غیرقطعی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است که مراجع [۱۲-۱۶] از جمله پژوهش‌های انجام شده در این حوزه هستند.

روش بهینه‌سازی استوار^۲ به عنوان یکی از رویکردهای تکامل یافته مواجهه با عدم قطعیت در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. قالب‌ها و روش‌های مختلفی از این روش در مسائل مختلف برنامه‌ریزی ریاضی وجود دارد. در تحقیقات گذشته در حوزه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی استخراج معدن با رویکرد غیرقطعی، غالباً از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده شده و رویکرد بهینه‌سازی استوار کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. در بهینه‌سازی تصادفی برخورد با محدودیت‌ها، برخورد نرم است و پاسخ مدل، اگرچه با احتمال کم، ممکن است غیرموجه باشد. در روش بهینه‌سازی استوار هر پارامتر غیرقطعی با استفاده از یک متغیر تصادفی مستقل کران‌دار با توزیع متقارن وارد مدل می‌شود و بسته به سطح محافظه‌کاری نوع برخورد مدل با محدودیت‌ها از نرم تا سخت متغیر است. در مدل‌های برنامه‌ریزی مبتنی بر رویکرد قطعی، موجه و بهینه بودن پاسخ مدل منوط به ثابت باقی ماندن پارامترهای مدل است. در مدل‌های مبتنی بر رویکرد غیرقطعی، عدم قطعیت پارامترها و انحراف مقادیر آنها نسبت به مقادیر فرض شده در مدل، ممکن است بهینگی^۳ پاسخ به دست آمده را از بین ببرد، یا با نقض محدودیت‌ها آن را از موجه بودن خارج کند. در روش‌های حل استوار تلاش می‌شود با ایجاد یک حاشیه‌ی نوسان ایمن برای پارامترها، از پاسخ مدل در مقابل نوسانات ناشی از عدم قطعیت پارامترها محافظت

۲- بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه عدم قطعیت محدب

رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه‌های عدم قطعیت [۲۱، ۲۳] یکی از کاراترین روش‌های استوارسازی است که از جمله مهم‌ترین پیشرفت‌های اخیر در این حوزه به شمار می‌رود. از زمان سویستر تاکنون مجموعه‌های مختلفی برای مدل کردن عدم قطعیت مورد استفاده قرار گرفته است. مجموعه‌های عدم قطعیت اشکال هندسی‌اند که با ماهیت مدلسازی خطی سازگارند. مجموعه جعبه‌ای ساده‌ترین و در عین حال سخت‌گیرترین مجموعه عدم قطعیت است.

در یک مدل برنامه‌ریزی خطی ساده امکان اعمال عدم قطعیت در ضرایب متغیرهای تصمیم تابع هدف، ضرایب متغیرهای تصمیم در سمت چپ محدودیت‌ها و مقادیر سمت راست محدودیت‌ها وجود دارد. مدل خطی رابطه (۱) را در نظر بگیرید:

$$\max \sum_j \tilde{c}_j x_j$$

Subject to (۱)

$$\sum_j \tilde{a}_{ij} x_j \leq \tilde{b}_i, \forall i$$

x_j یک متغیر پیوسته یا عدد صحیح است و پارامترهای مدل یعنی \tilde{c}_j ، \tilde{a}_{ij} و \tilde{b}_i مقادیر غیرقطعی‌اند. این مدل را با اندکی تغییر می‌توان به صورت رابطه (۲) بازنویسی کرد:

$$\max z$$

Subject to (۲)

$$z - \sum_j \tilde{c}_j x_j \leq 0$$

$$\tilde{b}_i x_0 + \sum_j \tilde{a}_{ij} x_j \leq 0, \forall i$$

$$x_0 = -1$$

یکی از محدودیت‌های مدل، مثلاً محدودیت زیر را در نظر بگیرید:

$$\sum_j \tilde{a}_{ij} x_j \leq b_i \quad (۳)$$

پارامتر غیرقطعی \tilde{a}_{ij} را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\tilde{a}_{ij} = a_{ij} + \xi_{ij}^G \hat{a}_{ij} \quad (۴)$$

در این رابطه a_{ij} مقدار اسمی پارامتر، \hat{a}_{ij} مقدار ثابت اغتشاش و نوسان و ξ_{ij}^G یک متغیر تصادفی مستقل مرتبط

صورت‌بندی می‌شود. نوع مجموعه‌های محدب متناسب با سطح حفاظت و میزان محافظه‌کاری انتخاب شده و متناسب با تغییرپذیری پارامترهای غیرقطعی، درصدی نوسان^۵ و اغتشاش^۶ حول مقدار اسمی آنها در نظر گرفته می‌شود. درجه استواری مدل با نوع و اندازه مجموعه عدم قطعیت و درصد نوسان و اغتشاش قابل تنظیم است [۱۹].

از سال ۱۹۷۳ که سویستر^۷ [۲۰] یک روش برنامه‌ریزی استوار بدبینانه را توسعه داد، پیشرفت‌های زیادی در زمینه بهینه‌سازی استوار به وقوع پیوسته است. عمده مطالعات این حوزه به پژوهش‌های مولوی^۸، بن‌تال و نمیروفسکی^۹، آوریخ^{۱۰}، کوئی^{۱۱} و همکاران، برتسیماس و سیم^{۱۲}، وردریم و فلاذز^{۱۳}، چن^{۱۴} و همکاران، لی^{۱۵} و همکاران مربوط می‌شود [۲۱]. رویکرد برنامه‌ریزی استوار معمولاً رویکردی محافظه‌کارانه و ریسک‌گریزانه است. هرچند در توسعه روش‌ها می‌توان از این رویکرد کم‌وبیش فاصله گرفت. پاسخ استوار یک مسئله بهینه‌سازی باید موجه و بهینه باشد. موجه بودن به این معناست که جواب باید برای تمام حالت‌های ممکن پارامترهای غیرقطعی شدنی باقی بماند. بهینه‌بودن نیز بدین معناست که مقدار تابع هدف به ازای جواب استوار باید برای همه حالات ممکن عدم قطعیت (پارامترهای غیرقطعی)، نزدیک به مقدار بهینه بوده و حداقل انحراف را نسبت به مقدار بهینه واقعی داشته باشد. مسائل تصمیم، اغلب به دلیل خطا در اندازه‌گیری پارامترها، تغییرپذیری مستمر پارامترها، و مشکلات مربوط به پیش‌بینی وقایع آینده، با عدم اطمینان‌هایی همراه است. استوارسازی مدل یکی از راهکارهای مقابله با چنین شرایطی است. با استوار شدن مدل، حساسیت خروجی مدل نسبت به تغییر مقادیر پارامترهای ورودی کاهش می‌یابد و از ناموجه یا نابهینه شدن پاسخ مدل در مقابل تغییرپذیری پارامترها در یک بازه‌ی معین محافظت می‌شود [۲۲].

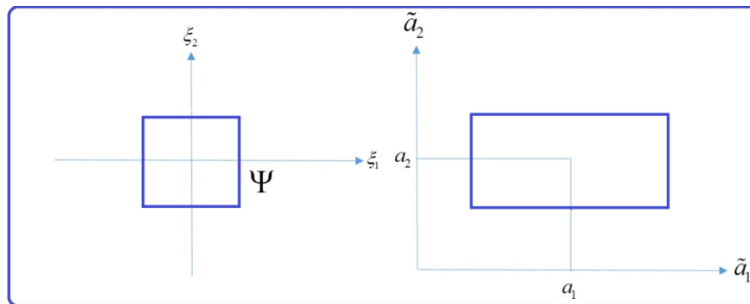
در این پژوهش، با محوریت مقایسه دقیق جواب‌های استوار و قطعی، برنامه زمان‌بندی استخراج یک کانسار فرضی مس متشکل از حدود شش هزار بلوک سه‌بعدی، اقدام به تحلیل دقیق و با استفاده از روش حل مستقیم صورت می‌گیرد.

$$\sum_j a_{ij}x_j + \Psi \sum_{j \in I_i} \hat{a}_{ij}u_j \leq b_i \quad (7)$$

$$-u_j \leq x_j \leq u_j$$

پارامتر کنترل کننده اندازه مجموعه عدم قطعیت و Ψ مبین سطح محافظه کاری است. مجموعه جعبه‌ای را اولین بار سویستر با اعمال $\Psi = 1$ معرفی کرد.

شکل ۱ مجموعه عدم قطعیت جعبه‌ای را برای پارامتر \tilde{a}_j که با $\tilde{a}_j = a_j + \xi_j \hat{a}_j$, $j = 1, 2$ تعریف می‌شود، نشان می‌دهد. \tilde{a}_j مقدار واقعی پارامتر، a_j مقدار اسمی پارامتر، ξ_j متغیر تصادفی عدم قطعیت و \hat{a}_j مقدار ثابت اغتشاش است. اگر پارامترهای غیرقطعی در بازه $\tilde{a}_{ij} \in [a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ محصور باشد، عدم قطعیت به صورت $\tilde{a}_{ij} = a_{ij} + \xi_j \hat{a}_{ij}$ نشان داده می‌شود.



شکل ۱: مجموعه عدم قطعیت جعبه‌ای

خطی قطعی است. این مدل با اعمال عدم قطعیت جعبه‌ای در ضرایب متغیرهای تصمیم در تابع هدف و مقادیر سمت راست محدودیت‌ها، به صورت رابطه (۸) درمی‌آید.

$$\max \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N V_{ij}x_{ij} - \Psi \left(\sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N \hat{V}_{ij}x_{ij} \right)$$

Subject to

$$x_{ij} \leq \sum_{k=1}^i x_{kj}, \forall i = 1, 2, \dots, T; \forall j = 1, 2, \dots, N; \forall i \in L_j$$

(L_j is the set of blocks that must be extracted prior to the mining of block j)

$$\sum_{j=1}^N (d_j + v_j)x_{ij} + \Psi \hat{C} \leq C, \forall i = 1, \dots, T : \text{Constraint of mining capacity}$$

$$C' \leq \sum_{j=1}^N (d_j + v_j)x_{ij} + \Psi \hat{C}', \forall i = 1, \dots, T : \text{Constraint of mining capacity}$$

$$\sum_{j=1}^N d_j x_{ij} + \Psi \hat{A} \leq A, \forall i = 1, \dots, T : \text{Constraint of processing capacity}$$

$$A' \leq \sum_{j=1}^N d_j x_{ij} + \Psi \hat{A}', \forall i = 1, \dots, T : \text{Constraint of processing capacity}$$

$$\sum_{i=1}^T x_{ij} \leq 1, \forall j = 1, \dots, N$$

با عدم قطعیت است. با جایگزینی این رابطه در سمت چپ محدودیت مدل داریم:

$$\sum_j a_{ij}x_j + \sum_j \xi_j \hat{a}_{ij}x_j \leq b_i \quad (8)$$

در بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه عدم قطعیت محذب، هدف یافتن پاسخ‌هایی است که به ازای همه مقادیر تصادفی ξ_{ij} در مجموعه عدم قطعیت U موجه و در مقابل هرگونه ناموجه بودن ایمن باشد.

$$\sum_j a_{ij}x_j + \max_{\xi_{ij} \in U} \left\{ \sum_j \xi_{ij} \hat{a}_{ij}x_j \right\} \leq b_i \quad (9)$$

همتای استوار برای محدودیت رابطه (۹) با توجه به نوع مجموعه عدم قطعیت صورت‌بندی می‌شود، اگر مجموعه عدم قطعیت جعبه‌ای باشد، همتای استوار به صورت رابطه (۷) است.

۳- صورت‌بندی مسئله زمان‌بندی استوار استخراج با اعمال مجموعه عدم قطعیت جعبه‌ای

مدل عمومی مسئله تعیین ترتیب استخراج بلوک‌های معادن روباز یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح دودویی

استخراج و فرآوری بر برنامه‌ریزی استخراج، لحاظ کردن عدم قطعیت آنها در برنامه‌ریزی، می‌تواند به واقعی‌تر شدن برنامه‌ها کمک کند.

اندازه مربوط به مجموعه عدم قطعیت و میزان اغتشاش و نوسان در نظر گرفته شده برای پارامترهای غیرقطعی کلیدی‌ترین بخش مدل غیرقطعی استوار را تشکیل می‌دهد.

۴- پیاده‌سازی مدل زمان‌بندی استوار استخراج روی یک مدل بلوکی سه‌بعدی

۴-۱- توصیف ملزومات

برای پیاده‌سازی رویکرد ارائه شده، کانسار مس مورد استناد بانک کتابخانه‌ای Min Lib و با مدل بلوکی زمین‌شناسی سه‌بعدی در نظر گرفته شده است. این کانسار از ۶۲۵۰ بلوک با ابعاد $10m \times 10m \times 10m$ تشکیل شده است. شیب پایداری دیواره‌های معدن در همه امتدادها ۴۵ درجه فرض می‌شود و افق برنامه‌ریزی استخراج پنج سال در نظر گرفته شده است. بیشینه و کمینه ظرفیت استخراجی معدن به ترتیب $1373/76$ و $961/631$ هزار تن در سال و بیشینه و کمینه ظرفیت فرآوری کارخانه به ترتیب $1125/6$ و $787/920$ هزار تن ماده معدنی در سال تعیین شده است. نرخ تنزیل ۱۰ درصد فرض می‌شود. پارامترهای فنی و اقتصادی مورد نیاز برای تعیین ارزش اقتصادی بلوک‌های معدن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات فنی و اقتصادی معدن

مقدار	عنوان
۸۵	نرخ بازبایی کارخانه فراوری (درصد)
۲۸	عیار مواد فراوری شده (درصد)
۱۰	افت ذوب برای هر تن مواد فراوری شده (کیلوگرم)
۵	افت تصفیه برای هر تن مس تصفیه نشده (کیلوگرم)
۱/۵	هزینه استخراج هر تن کانسنگ (دلار)
۵/۵	هزینه فراوری هر تن کانسنگ (دلار)
۰/۵	هزینه عمومی و اداری به ازای تن کانسنگ (دلار)
۰/۸	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و استهلاك به ازای تن کانسنگ (دلار)
۳۰	هزینه حمل هر تن ماده فراوری شده به کارخانه ذوب (دلار)
۹۲	هزینه ذوب هر تن ماده آراسته (دلار)
۲	هزینه حمل هر تن مس تصفیه نشده به کارخانه تصفیه (دلار)
۱۸۴	هزینه تصفیه برای هر تن مس تصفیه نشده (دلار)
۰/۰۱	هزینه فروش و تحویل هر کیلوگرم مس (دلار)
۰/۰۱	هزینه عمومی تصفیه هر کیلوگرم مس (دلار)

نمادهای به‌کار رفته در این مدل به شرح زیر است:

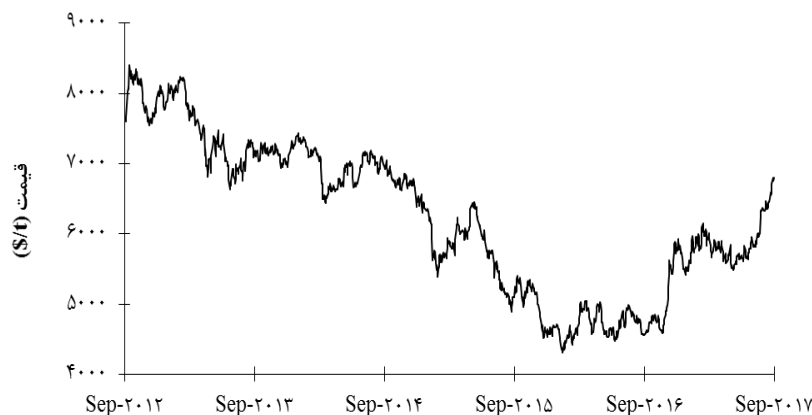
T	: تعداد دوره‌ی برنامه‌ریزی
N	: تعداد بلوک‌های معدن
J	: بلوک مورد بررسی
i	: دوره‌ی زمانی مورد بررسی
X_{ij}	: متغیر تصمیم، شاخصی که مشخص می‌کند بلوک J استخراج شود یا نشود؛ اگر استخراج شود در کدام i استخراج شود.
Ψ	: پارامتر کنترل‌کننده‌ی اندازه‌ی مجموعه‌ی عدم قطعیت جعبه‌ای
d_j	: وزن میزان کانسنگ در بلوک J
v_j	: وزن میزان باطله در بلوک J
C	: حداکثر ظرفیت استخراج در دوره‌ی i
A	: حداکثر ظرفیت فرآوری در دوره‌ی i
C'	: حداقل ظرفیت استخراج در دوره‌ی i
A'	: حداقل ظرفیت فرآوری در دوره‌ی i
V_{ij}	: ارزش فعلی خالص بلوک J در دوره‌ی i
r_j	: $d_j + v_j$
\hat{d}_j	: میزان اغتشاش ثابت d_j
\hat{v}_j	: میزان اغتشاش ثابت v_j
\hat{C}	: میزان اغتشاش ثابت C
\hat{A}	: میزان اغتشاش ثابت A
\hat{C}'	: میزان اغتشاش ثابت C'
\hat{A}'	: میزان اغتشاش ثابت A'
\hat{V}_{ij}	: میزان اغتشاش ثابت V_{ij}
\hat{r}_j	: میزان اغتشاش ثابت r_j

در رابطه (۸) عدم قطعیت ضرایب متغیرهای تصمیم در تابع هدف و مقادیر سمت راست محدودیت‌ها بر اساس منطق مجموعه عدم قطعیت جعبه‌ای در قالب جملات اضافی در تابع هدف و محدودیت‌ها لحاظ شده است. در پژوهش‌های گذشته بیشتر بر عدم قطعیت قیمت و ارزش اقتصادی بلوک تاکید شده است، در این پژوهش عدم قطعیت ظرفیت‌های عملیاتی نیز مورد توجه قرار گرفته است.

ظرفیت استخراج تابع ظرفیت کارکرد ماشین‌آلات چالزنی و آتشیاری و ظرفیت ناوگان بارگیری و باربری است. ظرفیت عملی این تجهیزات و سیستم‌ها به طور معمول کم‌تر از ظرفیت اسمی آنها است و ممکن است تحت تأثیر شرایط محیطی نوسان داشته باشد، بنابراین با عدم قطعیت همراه است. با توجه به اثرگذار بودن تغییرات ظرفیت

و برای برنامه‌ریزی تولید از متوسط این قیمت استفاده شده است. پارامترهای آمار توصیفی قیمت روزانه‌ی مس برای سال‌های یاد شده در جدول ۲ ارائه شده است.

برای تعیین قیمت مس، با توجه به طول افق برنامه‌ریزی از تغییرات روزانه قیمت مس در پنج سال اخیر یعنی بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ استفاده شده (شکل ۲)



شکل ۲: نمودار تغییرات قیمت مس در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷

جدول ۲: پارامترهای آمار توصیفی قیمت روزانه مس برای سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
اندازه نمونه	۱۲۷۲	حداقل	۴۳۱۰/۵
میانگین	۶۲۰۵/۸	(Q1) %۲۵	۵۲۵۵
پرش	۱/۱۶۵۳E+۶	%۵۰ (میانه)	۶۱۳۴
انحراف استاندارد	۱۰۷۹/۵	(Q3) %۷۵	۷۰۹۵
ضریب تغییرات	۰/۱۷۳۹۵	حداکثر	۸۴۰۰

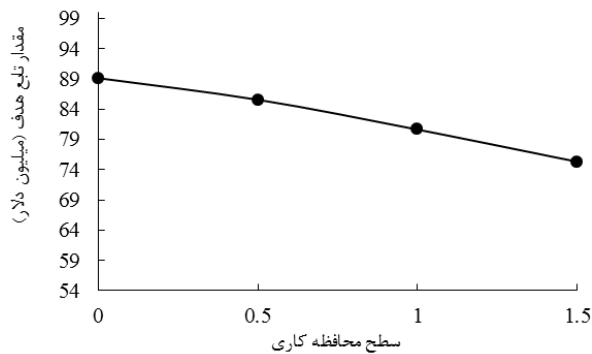
برای ارزش اقتصادی بلوک، ظرفیت استخراج و ظرفیت فرآوری در نظر گرفته می‌شود.

۴-۲- پیاده‌سازی مدل پیشنهادی

با توجه به بزرگی و پیچیدگی محاسباتی مدل که از تعداد متغیرهای عدد صحیح ناشی می‌شود، نیاز به نرم‌افزاری با توانایی حل مدل‌های پیچیده ضروری است، در تحلیل این مدل‌ها، بعضاً از روش‌های تقریبی ولی سریع نظیر: روش‌های ابتکاری و فراابتکاری استفاده می‌شود که جواب آنها تقریبی است؛ در اینجا و با توجه به هدف پژوهش، استفاده از روش حل دقیق مبنا قرار گرفته و بسته نرم‌افزاری IBM ILOG CPLEX Optimization Studio به منظور پیاده‌سازی و حل مدل استفاده شده است. این بسته، یک ابزار نرم‌افزاری پیشرفته برنامه‌ریزی ریاضی است؛ و اغلب به صورت غیررسمی CPLEX نامیده می‌شود. این بسته، توانایی تحلیل مدل‌های برنامه‌ریزی خطی بزرگ‌مقیاس، برنامه‌ریزی عدد صحیح، برنامه‌ریزی محدب درجه دو و ... در شرایط مقید و نامقید را دارد.

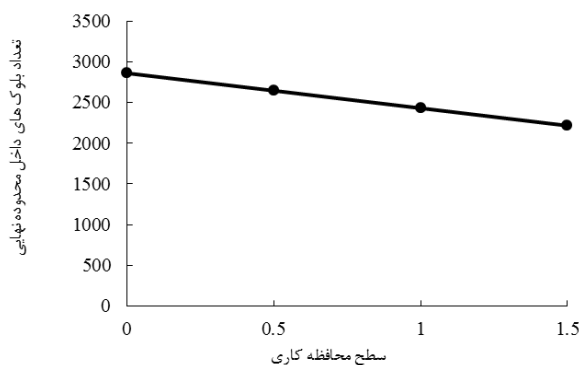
طول افق برنامه‌ریزی پنج‌ساله به دلیل محدودکردن دوره زمانی برنامه‌ریزی تولید تعیین شده است، بدیهی است با افزایش دوره زمانی برنامه‌ریزی، به لحاظ حل، سایز و پیچیدگی مدل برنامه‌ریزی خطی زمان‌بندی استخراج افزایش پیدا می‌کند، که ناگزیر استفاده از روش‌های ابتکاری و غیر دقیق را به دنبال دارد؛ با توجه به اینکه هدف اصلی پژوهش حاضر، ارائه جواب‌های دقیق استوار است، لذا اقدام به استفاده از یک مدل کوچک و با تعداد دوره برنامه‌ریزی محدود شده است. بدیهی است افزایش سایز مدل و تعداد دوره برنامه‌ریزی، افزایش متغیرهای دو دویی عدد صحیح را در پی دارد، که منجر به پیچیدگی محاسباتی و عدم حل مدل می‌شود. دسترسی به ابزارهای محاسباتی پیشرفته و با قدرت محاسباتی بالا می‌تواند گره‌گشای تحلیل مدل‌های پیچیده باشد. با این تفاسیر، لازم به ذکر است که، استفاده از نمودار دراز مدت تغییرات قیمت مس، می‌تواند نتیجه این پژوهش را دستخوش تغییر کند. مقدار نوسان و اغتشاش اعمالی در مدل برنامه زمان‌بندی استوار نیز معادل ۲۰، ۱۵ و ۱۰ درصد به ترتیب

ارزش فعلی خالص برنامه‌ریزی استخراج تعیین شده است، این در حالی است که ارزش تابع هدف استوار، صرفاً مقدار عددی تابع هدف مدل پیشنهادی است و از حل مدل به دست می‌آید.

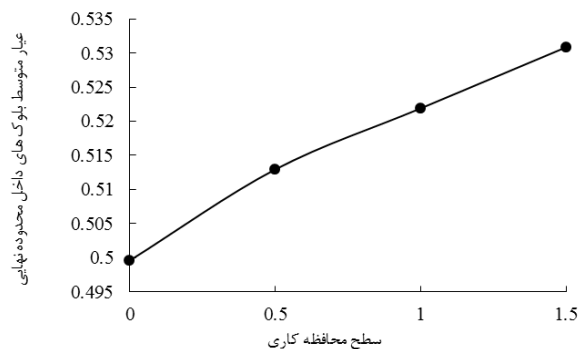


شکل ۴: ارزش فعلی خالص دلاری مربوط به بلوک‌های منتخب برنامه‌ریزی در سطوح مختلف محافظه کاری

در شکل‌های ۵ و ۶ نیز به ترتیب تعداد بلوک‌های قابل استخراج طی دوره پنج ساله استخراجی (کل بلوک‌های منتخب) و عیار متوسط متناظر آن، در سطوح مختلف محافظه کاری نشان داده شده است.



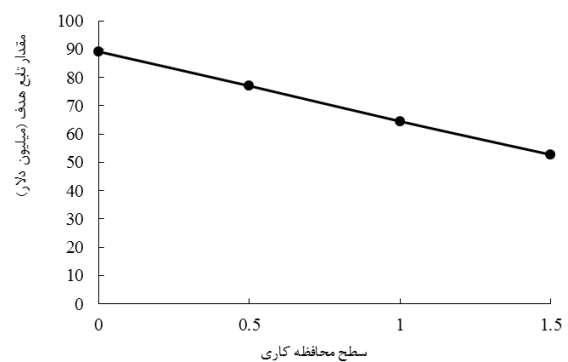
شکل ۵: تعداد کل بلوک‌های منتخب مربوط به برنامه‌ریزی تولید در سطوح محافظه کاری مختلف



شکل ۶: عیار متوسط بلوک‌های منتخب مربوط به برنامه‌ریزی تولید با در نظر گرفتن سطوح محافظه کاری مختلف

پروژه به روزرسانی مستمر این بسته، توسط شرکت IBM پیگیری می‌شود. این بسته پیشرفته، در سال ۲۰۰۴ جایزه رتبه اول موسسه معتبر تحقیق در عملیات و علم مدیریت را کسب کرده است؛ و با توجه به توانمندی آن، به عنوان ابزار تحلیل این پژوهش به کار گرفته شده است.

به طور معمول خروجی حل مدل برنامه‌ریزی استخراج، به صورت برچسب‌گذاری دوره و زمان‌بندی استخراج بیان می‌شود، در اینجا از دوره زمانی پنج ساله به منظور برنامه‌ریزی استخراج مدل بلوکی استفاده شده است. با حل مدل، بلوک‌های استخراجی هر سال در قالب متغیر عدد صحیح مربوطه مشخص می‌شوند، لذا مقدار تابع هدف استوار، ارزش فعلی خالص مربوط به بلوک‌های منتخب برنامه‌ریزی، تعداد بلوک‌های مرتبط با هر دوره و مجموع بلوک‌های منتخب برنامه‌ریزی به همراه عیار متوسط بلوک‌های منتخب، قابل تعیین هستند. نتایج حل مدل پیشنهادی در قالب جدول‌ها و شکل‌های مختلف ارائه شده است. مقدار تابع هدف استوار مدل پیشنهادی، برای کل بلوک‌های منتخب افق برنامه‌ریزی پنج ساله با در نظر گرفتن سطوح محافظه کاری مختلف در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳: مقدار تابع هدف استوار مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن سطوح محافظه کاری مختلف

در شکل ۴، ارزش فعلی خالص برنامه به روش حل دقیق و با در نظر گرفتن سطوح محافظه کاری مختلف ارائه شده است. ارزش مذکور مربوط به ارزش دلاری شمارش شده بلوک‌ها و با قیمت اعمالی و هزینه‌های مندرج در جدول ۱ بوده و با مقدار ارزش تابع هدف استوار مدل پیشنهادی متفاوت است. به عبارتی ساده‌تر بلوک‌های دوره‌های مختلف با توجه به سال استخراج ارزش‌گذاری شده و مجموع ارزش کل بلوک‌های پنج سال به عنوان

در جدول ۳ خروجی برنامه‌ریزی تولید کانسار شامل مقدار تابع هدف، ارزش فعلی خالص برنامه، عیار متوسط و تعداد بلوک‌های منتخب در طول دوره زمان‌بندی پنج ساله در سطوح مختلف محافظه‌کاری نشان داده شده است. در جدول ۴ نیز خروجی برنامه‌ریزی تولید در سطوح مختلف محافظه‌کاری به تفکیک سال‌های برنامه ارائه شده است. جدول ۳: خروجی برنامه‌ریزی تولید شامل، مقدار تابع هدف، ارزش فعلی خالص بلوک‌های منتخب، عیار متوسط و تعداد بلوک‌های منتخب در طول دوره زمان‌بندی پنج ساله در سطوح مختلف محافظه‌کاری

سطح محافظه‌کاری	تعداد بلوک‌های قابل استخراج	عیار متوسط (درصد)	ارزش فعلی خالص (میلیون دلار)	مقدار تابع هدف استوار (میلیون دلار)
۰	۲۸۶۰	۰/۴۹۹	۸۹/۱۴	۸۹/۱۴
۰/۵	۲۶۴۵	۰/۵۱۲	۸۵/۵۷	۷۷/۰۱
۱	۲۴۳۰	۰/۵۲۱	۸۰/۶۴	۶۴/۵۱
۱/۵	۲۲۱۵	۰/۵۳۰	۷۵/۳۱	۵۲/۷۲

جدول ۴: خروجی برنامه‌ریزی تولید شامل، مقدار تابع هدف، عیار متوسط و تعداد بلوک‌های منتخب به تفکیک سال در سطوح مختلف محافظه‌کاری

سطح محافظه‌کاری	سال	تعداد بلوک‌های منتخب	عیار متوسط (درصد)	مقدار تابع هدف استوار (میلیون دلار)
۰	۱	۵۷۲	۰/۶۲۳	۲۸/۶۱
	۲	۵۷۲	۰/۵۰۰	۱۹/۰۴
	۳	۵۷۲	۰/۴۸۷	۱۶/۵۶
	۴	۵۷۲	۰/۴۷۰	۱۴/۲۸
	۵	۵۷۲	۰/۴۱۵	۱۰/۶۴
۰/۵	۱	۵۲۹	۰/۶۴۱	۲۷/۵۱
	۲	۵۲۹	۰/۵۱۳	۱۸/۱۸
	۳	۵۲۹	۰/۴۹۵	۱۵/۷۰
	۴	۵۲۹	۰/۴۸۴	۱۳/۷۳
	۵	۵۲۹	۰/۴۲۹	۱۰/۴۴
۱	۱	۴۸۶	۰/۶۶۵	۲۶/۴۳
	۲	۴۸۶	۰/۵۲۲	۱۷/۱۴
	۳	۴۸۶	۰/۵۰۰	۱۴/۴۸
	۴	۴۸۶	۰/۴۷۷	۱۲/۴۷
	۵	۴۸۶	۰/۴۴۳	۱۰/۱۱
۱/۵	۱	۴۴۳	۰/۶۸۹	۲۵/۱۸
	۲	۴۴۳	۰/۵۳۱	۱۵/۸۰
	۳	۴۴۳	۰/۴۹۳	۱۳/۰۷
	۴	۴۴۳	۰/۴۷۸	۱۱/۴۴
	۵	۴۴۳	۰/۴۶۱	۹/۸۰

دوره برنامه‌ریزی و به تبع آن محدوده معدن با افزایش سطح محافظه‌کاری کاهش می‌یابد. در واقع با اعمال رویکرد بدبینانه، طرح معدن کوچک‌تر می‌شود. در شکل ۸ نیز یک مقطع عرضی در راستای شرقی- غربی دیده می‌شود.

در شکل ۷ یک مقطع عرضی دو بُعدی از کانسار و محدوده معدن در راستای شمالی- جنوبی به همراه زمان استخراج هر کدام از بلوک‌های منتخب (اعداد درج شده بر روی بلوک‌ها) در سطوح محافظه‌کاری مختلف نشان داده شده است. همان‌طوری که دیده می‌شود تعداد بلوک‌های هر



شکل ۷: ترتیب استخراج بلوک‌های معدن در سطوح محافظه‌کاری مختلف در یک مقطع شمالی - جنوبی



شکل ۸: ترتیب استخراج بلوک‌های معدن در سطوح محافظه‌کاری مختلف در یک مقطع شرقی - غربی

زمان‌بندی استخراج یک کانسار سه‌بعدی حاوی ۶۲۵۰ بلوک طی یک دوره پنج ساله پیاده‌سازی شده و برای حل مدل از روش حل دقیق استفاده شده است؛ نتایج اصلی تحلیل صورت گرفته، در ادامه گزارش می‌شود:

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه عدم قطعیت جعبه‌ای بر روی مدل برنامه

Computers and Operations Research in the Mineral Industry. 147-159.

[6] Tolwinski, B. and Golosinski T. (1995). Long term open pit scheduler. Mine Planning and Equipment Selection 1995, 265.

[7] Ramazan, S., Dagdelen K., and Johnson T. (2005). Fundamental tree algorithm in optimising production scheduling for open pit mine design. Mining Technology, 114(1), 45-54.

[8] Akaike, A. and Dagdelen K. (1999). A strategic production scheduling method for an open pit mine. proceedings of the 28th Application of Computers and Operation Research in the Mineral Industry, 729-738.

[9] Godoy, M. and Dimitrakopoulos R. (2004). Managing risk and waste mining in long-term production scheduling of open-pit mines. SME transactions, 316(3).

[10] Roman, R. (1974). The role of time value of money in determining an open pit mining sequence and pit limits. in Proc. 12th Symp. Application Computers and Operation Research in the Mineral Industry.

[11] Tolwinski, B. and Underwood R. (1996). A scheduling algorithm for open pit mines. IMA Journal of Management Mathematics, 7(3), 247-270.

[12] Dowd, P. (1994). Risk assessment in reserve estimation and open-pit planning. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy(Section A: Mining Industry), 103.

[13] Dimitrakopoulos, R., Farrelly C., and Godoy M. (2002). Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open-pit design. Mining Technology, 111(1), 82-88.

[14] Lamghari, A. and Dimitrakopoulos R. (2012). A diversified Tabu search approach for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty. European Journal of Operational Research, 222(3), 642-652.

[15] Kumral, M. (2010). Robust stochastic mine production scheduling. Engineering Optimization, 42(6), 567-579.

[16] Mokhtarian Asl, M. and Sattarvand J. (2016). Commodity price uncertainty propagation in open-pit mine production planning by Latin hypercube sampling method. Journal of Mining and Environment, 7(2), 215-227.

[17] Alipour, A., Khodaiari A.A., Jafari A., and Tavakkoli-Moghaddam R. (2017). Robust production scheduling in open-pit mining under uncertainty: a box counterpart approach. Journal of Mining and Environment, 8(2), 255-267.

- اساساً روش استوار جعبه‌ای یک رویکرد بدبینانه محسوب می‌شود، در ادبیات این حوزه، سطح محافظه‌کاری یک، معادل مدل سویستر است. بسته به نوع رویکرد، امکان استفاده از سطوح مختلف محافظه‌کاری وجود دارد.

- در حالتی که سطح محافظه‌کاری برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده، محدوده‌ای شامل ۲۶۴۵ بلوک به دست آمده است، در حالی که، این تعداد بلوک در حالت مدل قطعی (سطح محافظه‌کاری صفر)، معادل ۲۸۶۰ بلوک تعیین شده است.

- به تبع کاهش تعداد بلوک و محدوده معدن در حالت برنامه‌ریزی استوار، بلوک‌های پرعیارتر انتخاب شده است، عیار متوسط برنامه‌ریزی تولید صورت گرفته، معادل ۰/۴۹ و ۰/۵۱ درصد به ترتیب برای سطح محافظه‌کاری صفر و ۰/۵ به دست آمده است.

- روند کاهشی مقدار تابع هدف و ارزش فعلی خالص برنامه‌ریزی متناسب با افزایش سطح محافظه‌کاری مدل کاملاً مشهود است.

مراجع

[1] Lerchs, H. and FI G. (1964). Optimum design of open-pit mines. in Operations Research. Inst Operations Research Management Sciences 901 Elkridge Landing Rd, Ste 400, Linthicum Hts, Md 21090-2909, B59-&.

[2] Gershon, M. (1987). An open-pit production scheduler: algorithm and implementation. Min. Eng.(Littleton, Colo.);(United States), 39(8).

[3] Wang, Q. and Sevim H. (1992). Enhanced production planning in open pit mining through intelligent dynamic search. Institute of Mining Metallurgy (ed), 23, 461-471.

[4] Denby, B., Schofield D., and Surme T. (1998). Genetic algorithms for flexible scheduling of open pit operations. in Computer applications in the minerals industries. International symposium. 605-616.

[5] Johnson, T.B., Dagdelen K., and Ramazan S. (2002). Open pit mine scheduling based on fundamental tree algorithm. in APCOM 2002: 30 th International Symposium on the Application of

[21] Li, Z., Ding R., and Floudas C.A. (2011). A comparative theoretical and computational study on robust counterpart optimization: I. Robust linear optimization and robust mixed integer linear optimization. *Industrial & engineering chemistry research*, 50(18), 10567-10603.

[22] Bertsimas, D. and Sim M. (2004). The price of robustness. *Operations research*, 52(1), 35-53.

[23] Li, Z., Tang Q., and Floudas C.A. (2012). A comparative theoretical and computational study on robust counterpart optimization: II. Probabilistic guarantees on constraint satisfaction. *Industrial & engineering chemistry research*, 51(19), 6769-6788.

[18] Bertsimas, D., Pachamanova D., and Sim M. (2004). Robust linear optimization under general norms. *Operations Research Letters*, 32(6), 510-516.

[19] Ben-Tal, A. and Nemirovski A. (2002). Robust optimization—methodology and applications. *Mathematical Programming*, 92(3), 453-480.

[20] Soyster, A.L. (1973). Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations research*, 21(5), 1154-1157.

-
- 1 Net present value (NPV)
 - 2 Robust Optimization
 - 3 Optimality
 - 4 Convex set-based
 - 5 Violation
 - 6 Perturbation
 - 7 Soyster
 - 8 Mulvey
 - 9 Ben-Tal and Nemirovski
 - 10 Averbakh
 - 11 Ghaoui
 - 12 Bertsimas and Sim
 - 13 Verderame and Floudas
 - 14 Chen
 - 15 Li