

Determining the depth and time of optimum transition from open-pit to underground mining in Songun copper mine

Naser Badakhshan¹, Kourosch Shahriar^{2*}, Sajjad Afraei³

1. Postdoctoral, Amirkabir University of Technology, Department of Mining Engineering, Iran
Naserbadakhshan@aut.ac.ir
2. Professor, Amirkabir University of Technology, Department of Mining Engineering, Iran
k.shahriar@aut.ac.ir
3. Assistant professor, Amirkabir University of Technology, Department of Mining Engineering, Iran
sajjad.afraei@aut.ac.ir

Received: 2024/01/17 - Accepted: 2024/05/19

Abstract

The most important issue, in the case of deposits with high axial expansion, is determining the "optimum transition depth from open-pit to underground mining (OTD)." The main objectives of the research are providing a framework-based method (mathematical model) to determine environmental costs and propose an optimization trick for combined mining options and transition planning (optimum transition depth), development, implementation and validation of the optimization framework based on the Mixed integer linear programming (MILP). The result of the MILP is to determine the most suitable mining option(s) for the mining of the ore and to schedule the extraction in such a way as to maximize the NPV. Python and MATLAB programming platforms were chosen to implement the MILP, and a large-scale meta-heuristic optimization solver was presented for this research. The MILP planned the Songun copper mine reserve with sequentially combined mining over a mine life of 13 years. The optimum transition depth from open-pit to underground mining was 950.

Keywords

Optimum Transition Depth (OTD), Combined Open Pit– underground mining, Mixed Integer Linear Programming (MILP), Environmental Costs.

* Corresponding Author



1- Introduction

Mineral deposits close to the surface with deep expansion and high slope can be mined by open-pit (OP), underground (UG), or a combination of these two methods. The transition from OP mining to UG operations is one of the challenging issues of mining engineering. Mines that are capable of transitioning will eventually reach a transition point where a decision must be made whether to expand the pit or switch to underground mining. The most important issue, in this case, is determining the OTD. The main goal of the paper is to determine the optimum transition time and depth from OP to UG mining with the aim of maximizing net present value (NPV). In general, two approaches are usually adopted to determine the optimum mining option and transition depth. The first approach is to continue OP mining until it is economically viable, and then start underground mining. The second approach is the result of this idea that parts of the reserve that are located at intermediate depths and are supposed to be mined in the OP may be mined more profitably if underground methods are used. In this research, mixed integer linear programming (MILP) method was used to determine the optimum transition depth and time. The MILP planned the Songun copper mine reserve with sequentially combined mining over a mine life of 13 years. The optimum transition depth from OP to UG mining was 950.

2- Methods

In this research, a mathematical programming model was developed based on the MILP optimization framework to determine the optimum transition depth and time and production planning. The MILP framework is based on the Competitive Economic Evaluation (CEE) approach, the CEE optimization technique allows the optimizer to select the optimizer depth and time, production planning, and the most suitable mining option(s) and extraction strategy for the deposit.

3- Findings and Argument

The evaluation of the Sungun copper deposit using the MILP model revealed that a sequential combined mining operation would be the preferred mining option, offering the highest NPV, amounting to 7.51 billion USD (inclusive of environmental costs). A mine life considering environmental costs of 13 years (9 years OP and 4 years UG) is best represented by a sequential OP-UG mining option. Figure 1 illustrates a cross-sectional view of the ore body with independent OP, independent UG mining, and combined OP and UG sections. The initial 71 horizons were allocated for OP mining, with horizons 72-85 slated for UG mining.

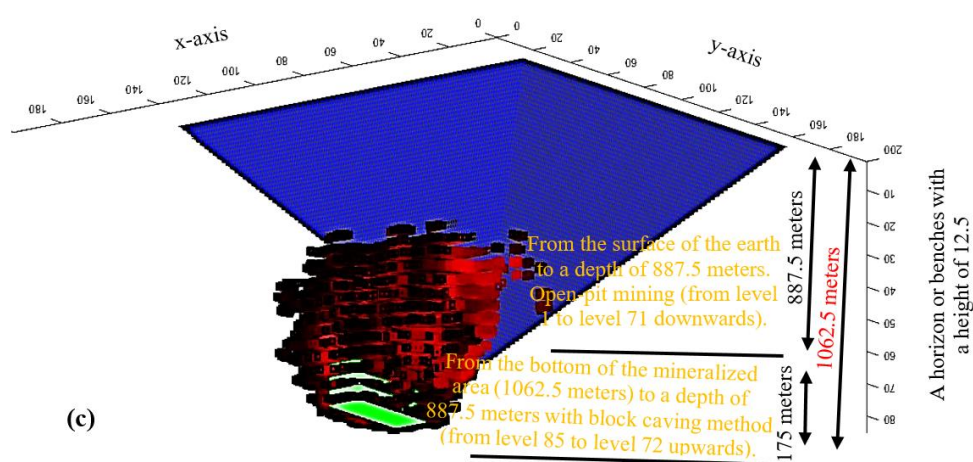


Figure 6. Cross-sectional view of the block model and mining options: (a) Independent OP mining; (b) Independent BC mining; (c) Sequential OP and BC mining

4- Conclusions

Over the years, the challenges of production scheduling, determining the optimal mining approach, and optimizing the transition depth from OP to UG operations have gained increasing significance in the realm of mine design. This study primarily aimed to optimize the transition from OP to UG mining, a challenge that necessitated the development of a novel MILP model. An impartial MILP framework was developed to evaluate the strategic approach to a mineral deposit that encompassed both OP and UG mining. The evaluation of the mine using the MILP model revealed that a sequential combined mining operation emerged as the preferred choice, boasting the highest NPV. The MILP planned the Songun copper mine reserve with sequentially combined mining over a mine life of 13 years. The optimum transition depth from open-pit to underground mining was 950. To achieve a comprehensive and precise economic evaluation, it is suggested that future iterations of this methodology consider quantifying and incorporating social considerations alongside ore price uncertainty into the model, ultimately contributing to methodological improvements.

References

- Chung, J., Asad, M. W. A., & Topal, E. (2022). Timing of transition from open-pit to underground mining: A simultaneous optimisation model for open-pit and underground mine production schedules. *Resources Policy*, 77, 102632.
- Afum, B. O., & Ben-Awuah, E. (2021). A review of models and algorithms for surface-underground mining options and transitions optimization: some lessons learnt and the way forward. *Mining*, 1(1), 112-134.
- Khaboushan, A. S., Osanloo, M., & Esfahanipour, A. (2020). Optimization of open pit to underground transition depth: An idea for reducing waste rock contamination while maximizing economic benefits. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123530.
- Khaboushan, A. S., & Osanloo, M. (2020). A set of classified integer programming (IP) models for optimum transition from open pit to underground mining methods. *Natural Resources Research*, 29(3), 1543-1559.
- Badakhshan, N., Shahriar, K., Afraei, S., & Bakhtavar, E. (2023). Determining the environmental costs of mining projects: A comprehensive quantitative assessment. *Resources Policy*, 82, 103561.
- Li, X., Wang, Y., Yang, S., Xiong, J., & Zhao, K. (2021). Research progress in the mining technology of the slowly inclined, thin to medium thick phosphate rock transition from open-pit to underground mine. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 6(1), 319-334.
- Ross, I. T., & Stewart, C. A. (2020, December). Issues with transitioning from open pits to underground caving mines. In *MassMin 2020: Proceedings of the Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining* (pp. 221-238). University of Chile.
- Ren, S. T., Liu, Y., Yang, X. Y., Tong, D. G., & Ren, G. F. (2022). Extended Ultimate-Pit-Limit Methodology for Optimizing Surface-to-Underground Mining Transition in Metal Mines. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 1-9.
- Bakhtavar, E., Namin, F. S., & Oraee, K. (2010). Practical final pit depth considering the future underground mining-a case study. In *2010 SME Annual Meeting & Exhibit, Phoenix, AZ* (pp. 153-156).

- Bakhtavar, E., Shahriar, K., & Oraee, K. (2008, June). A model for determining optimal transition depth over from open-pit to underground mining. In Proceedings of the 5th International Conference on Mass Mining (pp. 393-400).
- Bakhtavar, E., Shahriar, K., & Mirhassani, A. (2012). Optimization of the transition from open-pit to underground operation in combined mining using (0-1) integer programming. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112 (12), 1059-1064.
- Newman, A. M., Yano, C. A., & Rubio, E. (2013). Mining above and below ground: Timing the transition. *IIE Transactions*, 45(8), 865-882.
- Bakhtavar, E. (2013). Transition from open-pit to underground in the case of Chah-Gaz iron ore combined mining. *Journal of Mining Science*, 49, 955-966.
- Chung, J., Topal, E., & Ghosh, A. K. (2016). Where to make the transition from open-pit to underground? Using integer programming. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(8), 801-808.
- Badakhshan, N., Shahriar, K., Afraei, S., & Bakhtavar, E. (2023). Evaluating the impacts of the transition from open-pit to underground mining on sustainable development indexes. *Journal of Sustainable Mining*, 22(2), 154.



مقاله پژوهشی

تعیین عمق و زمان بهینه گذار از روش استخراج روباز به زیرزمینی در معدن مس سونگون

ناصر بدخشانی^۱، کورش شهریار^{۲*}، سجاد افرائی^۳

۱. پژوهشگر پسا دکتری، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، Naserbadakhshan@aut.ac.ir

۲. استاد تمام دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، k.shahriar@aut.ac.ir

۳. استادیار دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، sajjad.afraei@aut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۳۰

چکیده

ذخایر معدنی نزدیک به سطح با گسترش عمقی و شیب زیاد، قابلیت استخراج با روش روباز، زیرزمینی و یا ترکیبی از این دو روش را دارد. گذار از معدن روباز به زیرزمینی یکی از مسایل چالش برانگیز مهندسی معدن است. معادنی که قابلیت گذار را دارند، در نهایت به یک نقطه گذار می‌رسند که در آن باید تصمیم‌گیری شود که آیا کاواک گسترش باید یا به استخراج زیرزمینی تغییر روش دهند. مهم‌ترین مساله در این حالت تعیین "عمق بهینه گذار از استخراج روباز به زیرزمینی" است. هدف اصلی این تحقیق ارائه روش بهینه‌سازی برای گزینه‌های استخراج ترکیبی و برنامه‌ریزی گذار بر اساس مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) است. نتیجه نهایی حاصل از به‌کارگیری MILP، تعیین عمق و زمان بهینه گذار و زمان‌بندی استخراج با هدف بهینه‌سازی ارزش خالص فعلی است. بستر برنامه‌نویسی پایتون و متلب برای اجرای MILP انتخاب و یک حل‌کننده بهینه‌سازی تقسیم و غلبه در مقیاس بزرگ برای این تحقیق ارائه شد. ارزیابی معدن مس سونگون با استفاده از مدل MILP برای دو حالت با در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی و بدون در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی انجام شد. نتایج ارزیابی نشان داد که در حالت اول عمق گذار (۸۸۷/۵ متر یا ۷۱ افق) کمتر از حالتی است که هزینه‌های زیست‌محیطی لحاظ نمی‌شود (۹۵۰ متر یا ۷۶۱ افق). با بررسی هر دو حالت، تغییری در عمر معدن مشاهده نشد. MILP معدن مس سونگون را برای استخراج ترکیبی متوالی (غیرهمزمان) در طول عمر ۱۳ سال برنامه‌ریزی کرد. ارزش خالص فعلی حاصل از اجرای MILP، ۵۱/۷ میلیارد دلار و نسبت باطله‌برداری کلی استخراج روباز برای استخراج ترکیبی در حالت اول ۱/۶۴ حاصل شد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که MILP از استخراج باطله‌های بیش از حد برای دسترسی به کانسنگ با تغییر از گزینه روباز به زیرزمینی جلوگیری و عمر معدن، زمان دسترسی به منابع مالی و بازگشت سرمایه را کاهش می‌دهد. نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که ارزش خالص فعلی مدل MILP بیش‌ترین حساسیت را به ترتیب نسبت به تغییرات قیمت مس، هزینه‌های استخراج و هزینه‌های زیست‌محیطی نشان داد.

کلمات کلیدی

عمق بهینه گذار، استخراج ترکیبی روباز، تخریب بلوکی، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP)، هزینه‌های زیست‌محیطی.

فهرست علایم اختصاری

معادل فارسی	نام کامل	علامت
تحلیل سلسله مراتبی	Analytical Hierarchy Process	AHP
نسبت باطله برداری مجاز	Allowable Stripping Ratio	ALSR
استخراج دستی و در مقیاس کوچک	Artisanal and Small-Scale Mining	ASM
نسبت باطله برداری سربه سری	Break Even Stripping Ratio	BESR
ارزش اقتصادی بلوک	Block Economic Value	BEV
نقطه (دهانه) تخلیه	Draw Point	DP
ارزیابی اثرات زیست محیطی	Environmental Impact Assessment	EIA
گاز گلخانه‌ای	Greenhouse Gas	GHG
شاخص مقاومت زمین شناسی	Geological Strength Index	GSI
قابلیت گرمایش جهانی	Global Warming Potential	GWP
دارای ارزش حفاظتی بالا	High Conservation Values	HCV
شاخص توسعه انسانی	Human Development Index	HDI
برنامه ریزی عدد صحیح	Integer Programming	IP
نرخ بازگشت سرمایه	Invest Return Rate	IRR
نسبت باطله برداری نشانه دار شده	Indicated Stripping Ratio	ISR
ارزیابی چرخه حیات	Life Cycle Assessment	LCA
الگوریتم لرج و گروسمن	Lerch & Grossman	LG
ماشین LHD استخراج زیرزمینی	Load Haul Dump	LHD
عمر معدن	Life of Mine	LOM
برنامه ریزی خطی	Linear Programming	LP
استخراج بزرگ مقیاس	Large - Scale mining	LSM
تصمیم گیری چند معیاره	Making Multi-Criteria Decision	MCDM
برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط	Mixed Integer Linear Programming	MILP
برنامه ریزی عدد صحیح مختلط	Mixed Integer Programming	MIP
چرخه حیات معدن	Mine Life Cycle	MLC
ارزیابی چرخه حیات معدن	Mine Life Cycle Assessment	MLCA
برنامه ریزی ریاضی	Mathematical Programming	MP
استخراج متوسط مقیاس	Medium - Scale mining	MSM
ارزش خالص فعلی	Net Present Value	NPV
استخراج روباز	Open-Pit Mining	OP
محدوده بهینه استخراج روباز	Optimum Pit Limit	OPL
استخراج ترکیبی روباز - زیرزمینی	Combined Open-Pit and Underground	OPUG
نسبت باطله برداری کلی (سراسری)	Overall Stripping Ratio	OSR
عمق بهینه گذار	Optimum Transition Depth	OTD
خروجی معدن	Run-of-Mine	ROM
زیرگراف‌های متصل قوی	Strongly Connected Subgraphs	SCS
توسعه پایدار	Sustainable Development	SD
برنامه ریزی عدد صحیح تصادفی	Stochastic Integer Programming	SIP
واحد استخراج انتخابی	Selective Mining Unit	SMU
استخراج کوچک مقیاس	Small - Scale mining	SSM
استخراج زیرزمینی	Underground Mining	UG
محدوده نهایی استخراج	Ultimate Pit Limit	UPL
سه بعدی	Three-dimensional	3D

۱- مقدمه

پس از آن، استخراج زیرزمینی را آغاز کرد. این رویکرد حاصل این اندیشه است که کاواک اقتصادی معدن به همراه تجهیزیات استخراج روباز و نیروی انسانی کارآموده را به عنوان گزینه‌های نقد نباید تا حد امکان با چالش روبه‌رو کرد. رویکرد دوم حاصل این اندیشه است که بخش‌هایی از ذخیره که در اعماق میانی قرار گرفته‌اند و قرار است به صورت روباز استخراج شوند را ممکن است بتوان در صورت به‌کارگیری روش‌های زیرزمینی با سود بیشتری استخراج کرد. به عبارت دیگر، ممکن است برای استخراج بخش‌هایی از یک ذخیره، هم روش روباز و هم روش زیرزمینی صرفه اقتصادی داشته باشد اما روش زیرزمینی نسبت به روباز، سودآورتر باشد [۳ و ۴]. مساله تعیین زمان یا عمق گذار از روباز به زیرزمینی زمانی مطرح می‌شود که کانسار قابلیت استخراج ترکیبی به هر دو روش روباز و زیرزمینی را داشته باشد. عمق گذار به عمقی گفته می‌شود که از جنبه فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی استخراج کانسار بالای آن به روش روباز و در زیر آن به روش زیرزمینی مطلوب‌تر باشد. تغییر در شرایط زمین‌شناسی، اطلاعات اکتشافی، میزان بازبایی، ظرفیت تولید و به‌ویژه پارامترهای اقتصادی مانند قیمت و هزینه‌ها در هر زمان می‌تواند به تغییر زمان و عمق گذار منجر شود. در معدنی که امکان استخراج ترکیبی روباز و زیرزمینی وجود دارد، مدیرها و کارشناس‌های برنامه‌ریزی معدن باید پیش از رسیدن به سال‌های انتهایی استخراج روباز، اطلاعات کافی در مورد عمق یا زمان گذار کسب کنند و تمهیدات لازم اندیشیده شود. مساله تعیین عمق گذار در استخراج ترکیبی غیرهم‌زمان پررنگ‌تر و پرچالش‌تر است که پس از اتمام استخراج روباز قرار است ادامه عملیات استخراج با یکی از روش‌های زیرزمینی پر تولید و کم هزینه (مانند تخریب بلوکی و تخریب طبقات فرعی) انجام شود. در حالی که در استخراج ترکیبی هم‌زمان با توجه به لزوم استفاده از روش‌های کم تولید و پر هزینه زیرزمینی (با پر کردن بتنی) اغلب امکان رقابت با روش روباز در قیمت تمام‌شده کم‌تر وجود ندارد. بنابراین در این حالت، معمولاً گذار در عمقی انجام می‌شود که روش روباز از جنبه خاصی مانند اقتصادی دیگر مطلوبیت نداشته باشد. شکل ۱ برخی از مهم‌ترین روش‌های زیرزمینی استفاده شده در استخراج ترکیبی روباز- زیرزمینی را در حالت هم‌زمان و غیرهم‌زمان نشان می‌دهد [۳].

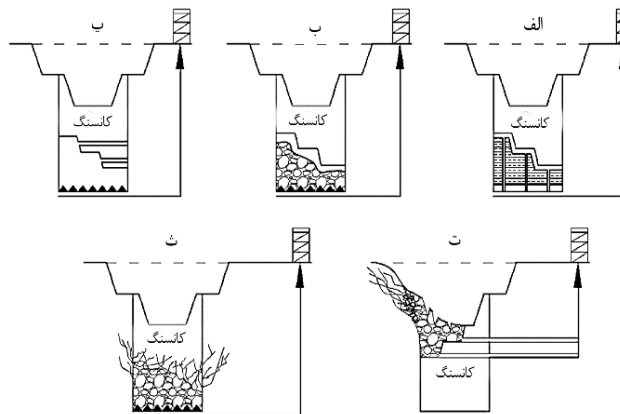
تصمیم‌گیری برای آن که کجا و چه زمانی استخراج روباز متوقف و استخراج زیرزمینی آغاز شود، با عنوان مساله گذار از

برای استخراج کانسارها در شرایط گوناگون روش‌های مختلفی در دو دسته سطحی و زیرزمینی به کار می‌رود. پیش از انجام هرگونه فعالیتی در رابطه با آماده‌سازی و استخراج کانسار باید در مورد روش استخراج مناسب از میان روش‌های سطحی، زیرزمینی و یا ترکیبی از آن‌ها تصمیم‌گیری شود. اگر کانسار دارای رخنمون باشد و یا از نزدیکی سطح زمین شروع شده باشد برای استخراج آن تاکید بر روش‌های سطحی است، در حالی که برای استخراج کانسارهای واقع در عمق زیاد روش‌های زیرزمینی اولویت دارند. در حالت سوم، اگر کانسار از سطح زمین و یا نزدیک آن شروع و تا عمقی زیادی امتداد پیدا کند که به دلیل افزایش نسبت باطله‌برداری استخراج آن به تنهایی با روش سطحی (اغلب روباز) اقتصادی نباشد، گزینه استخراج ترکیبی سطحی- زیرزمینی در اولویت است [۱].

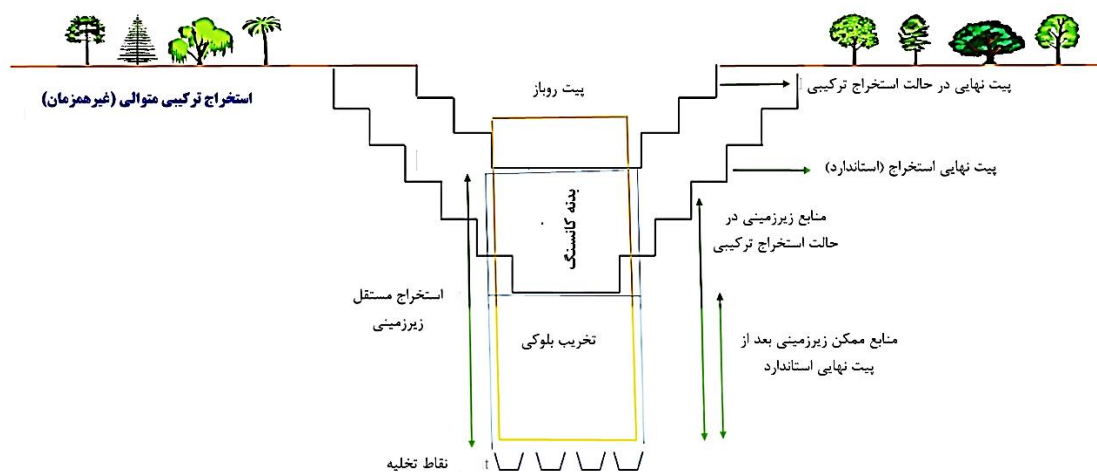
زمان‌بندی تولید هر سیستم استخراج تاثیر زیادی بر اقتصادی بودن عملیات دارد. دو هدف اصلی زمان‌بندی استخراج، توسعه اقتصادی‌ترین استراتژی بهره‌برداری از مواد معدنی است که بازده سرمایه‌گذاری و دستیابی به بازبایی منابع را به حداکثر می‌رساند. با این حال، بهینه‌سازی استراتژی استخراج منابع تا حد زیادی به نوع عملیات استخراج بستگی دارد. هنگامی که کانسار معدنی به عنوان یک رخنمون ظاهر می‌شود و تا عمق زیادی گسترش می‌یابد، چنین ذخایری می‌تواند با استخراج روباز یا استخراج زیرزمینی یا هر دو مورد بهره‌برداری قرار گیرند. دو حالت متوالی (غیرهم‌زمان) و موازی (هم‌زمان) که بدنه کانسنگ قابل استفاده برای هر دو گزینه استخراج روباز و زیرزمینی باشد، وجود دارد. بهره‌برداری متوالی فرآیند استخراجی را توصیف می‌کند که در آن استخراج زیرزمینی به دنبال استخراج روباز یا بالعکس انجام می‌شود، در حالی که بهره‌برداری موازی یا هم‌زمان نشان می‌دهد که استخراج روباز و استخراج زیرزمینی به موازات هم و هم‌زمان اتفاق می‌افتد. یک الگوریتم یا مدل بهینه‌سازی که به‌طور جامع و هم‌زمان یک معدن روباز، عمق بهینه‌گذار و معدن زیرزمینی بهینه‌سازی شده را برای چنین توده‌های سنگی تعیین می‌کند، سود عمده‌ای برای صنعت معدن دارد [۲].

به‌طور کلی معمولاً دو رویکرد برای تعیین گزینه استخراج و عمق گذار بهینه اتخاذ می‌شود. رویکرد اول آن است که روش استخراج روباز را تا جایی که صرفه اقتصادی دارد، ادامه داد و

استخراج روباز به زیرزمینی (و به طور خلاصه مساله گذار) شناخته می‌شود [۳ و ۴]. شکل ۲ مقایسه‌ای از توزیع منابع در روش‌های روباز مستقل، زیرزمینی مستقل و ترکیبی متوالی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- گذار از استخراج روباز به روش‌های مختلف استخراج زیرزمینی: الف) استخراج روباز - کند و پرکردن، ب) استخراج روباز - استخراج انباره‌ای؛ پ) استخراج روباز - استخراج از طبقات فرعی؛ ت) استخراج روباز - تخریب طبقات فرعی و ث) استخراج روباز - تخریب بلوکی [۱].



شکل ۲- توزیع ذخیره در روش استخراج ترکیبی

به زیرزمینی تاکید شده است. بر اساس آخرین جنبه نیز حالت ترکیبی هم‌زمان/غیرهم‌زمان روباز و زیرزمینی می‌تواند اساس دسته‌بندی باشد. برخی از روش‌ها تنها برای حل مساله استخراج ترکیبی و تعیین عمق گذار در حالت هم‌زمان ارایه شده‌اند و برای حالت غیرهم‌زمان کاربرد ندارند یا بالعکس. اگرچه بیش‌تر راه‌حل‌ها بدون اشاره به استخراج ترکیبی هم‌زمان و غیرهم‌زمان ارایه شده‌اند. راه‌حل‌های بر پایه برنامه‌ریزی تولید (ارزش خالص فعلی) با توجه به در نظر گرفتن بُعد زمانی استخراج می‌توانند در هر دو حالت استخراج ترکیبی هم‌زمان و غیرهم‌زمان استفاده شوند. خلاصه‌ای از روش‌های ارایه‌شده با رویکردهای مختلف در جدول ۱ و مقایسه آن با مطالعه فعلی در زمینه گذار از معدن روباز به زیرزمینی در جدول ۷ آورده شده است.

تحقیقات قبلی در مورد بهینه‌سازی گزینه‌های استخراج و تعیین عمق بهینه گذار از استخراج روباز به زیرزمینی را می‌توان از جنبه‌های مختلف مانند ماهیت، بُعد زمانی، هم‌زمانی و یا غیرهم‌زمانی استخراج روباز و زیرزمینی دسته‌بندی کرد. از جنبه ماهیت، راه‌حل‌های موجود را می‌توان به دو دسته کلی تجریدی - ابتکاری و برنامه‌ریزی ریاضی تقسیم کرد. از جنبه بُعد زمانی، برخی از راه‌حل‌ها بدون توجه به بُعد زمانی پول تنها سود را ملاک مقایسه دو روش روباز و زیرزمینی قرار داده‌اند. در حالی‌که در راه‌حل‌های جدیدتر به‌طور واقع‌تر NPV ملاک مقایسه دو روش استخراج بوده است. در این راه‌حل‌ها به ویژه در مدل‌های ریاضی، هدف‌ها و محدودیت‌های برنامه‌ریزی تولید روباز و زیرزمینی ملاک اصلی بوده است. در این مدل‌ها بر تعیین زمان بهینه گذار از روباز

جدول ۱- خلاصه تحقیقات انجام شده در زمینه گذار (۵ تا ۱۵)

ارایه دهنده (ها)	سی و همکاران	چانگ و همکاران	سلطانی و همکاران	آفوم و بن آوه	داغ دلن و همکاران	مکنیل و کوپولوس	بخت آور و همکاران	کینگ و همکاران	نیومن و همکاران	روبرت و همکاران	بخت آور و همکاران
سال	۲۰۲۲	۲۰۲۲	۲۰۲۰	۲۰۱۹	۲۰۱۸	۲۰۱۷	۲۰۱۷	۲۰۱۶	۲۰۱۳	۲۰۱۳	۲۰۱۲
غیرهمزمانی/ یا غیرهمزمانی استخراج	همزمان	همزمان	همزمان/ غیرهمزمان	همزمان	غیرهمزمان	غیرهمزمان	غیرهمزمان	همزمان	غیرهمزمان	همزمان	همزمان
بعد زمانی پول	لحاظ نشده	لحاظ شده	لحاظ شده	لحاظ شده	لحاظ شده	لحاظ شده	لحاظ شده	لحاظ شده	لحاظ نشده	لحاظ شده	لحاظ نشده
روش استخراج زیرزمینی ترکیب شده	روباز-کارگاه باز	روباز-کندن و باز	روباز-تخریب بلوکی	روباز-کارگاه باز	روباز-کندن و باز	روباز-تخریب بلوکی	روباز-کندن و باز	روباز-تخریب بلوکی	روباز-تخریب بلوکی	روباز-کارگاه باز	مشخص نشده
تمرکز تحقیق	بهینه سازی گذار از استخراج سطحی به زیرزمینی در معادن فلزی با روش توسعه یافته محدوده کاواک نهایی (UPL)	به دست آوردن نقطه و دوره گذار بهینه از استخراج روباز به زیرزمینی	تعیین عمق بهینه گذار با در نظر گرفتن عدم قطعیت اقتصادی و زمین شناسی - مقایسه مدل های سناریو محور و یکپارچه	به حداکثر رساندن ارزش خالص فعلی به همراه بهینه سازی زمان بندی و موقعت سه بعدی لنگه تاج	تعیین عمق بهینه گذار از معدن روباز به هدف حداکثر رساندن ارزش فعلی خالص	بهینه سازی گذار از معدن روباز به زیرزمینی	استفاده از مدل ریاضی تصادفی با هدف برنامه ریزی تولید بلندمدت برای تعیین زمان بهینه گذار	تعیین عمق گذار از معدن روباز به زیرزمینی با استفاده از مدل ریاضی (نخستین مدل ریاضی ارائه شده)	تعیین عمق گذار از طریق مجموعه ای از شبکه یکپارچه طولانی ترین مسیر، با هدف حداکثر کردن سود	رتبه بندی مناسب بلوک ها برای استراتژی های استخراج سطحی و زیرزمینی	بهینه سازی گذار از عملیات روباز به زیرزمینی در استخراج استفاده از برنامه ریزی عدد صحیح (۰-۱)
رویکرد استفاده شده (ماهیت)	رویکرد	ترکیبی	برنامه ریزی ریاضی	برنامه ریزی ریاضی	برنامه ریزی ریاضی	برنامه ریزی ریاضی	برنامه ریزی ریاضی	برنامه ریزی ریاضی	برنامه ریزی ریاضی	برنامه ریزی ریاضی	برنامه ریزی ریاضی
مدل / الگوریتم	محدوده کاواک نهایی (UPL)	محدوده کاواک نهایی (UPL)	برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP)	برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP)	برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP)	برنامه ریزی عدد صحیح مختلط (MILP)	برنامه ریزی تصادفی (SP)	برنامه ریزی عدد صحیح (IP)	طولانی ترین شبکه یکپارچه (MIP)	برنامه ریزی عدد صحیح مختلط (IP)	برنامه ریزی عدد صحیح (IP)
نرم افزار کاربردی	متلب و سیپلکس	متلب و سیپلکس	متلب و سیپلکس	متلب و سیپلکس	متلب و سیپلکس	متلب و سیپلکس	متلب و سیپلکس	متلب و سیپلکس	هوش مصنوعی	استوپسایزور - کامت	متلب و سیپلکس
هزینه زیست محیطی	لحاظ نشده	لحاظ نشده	لحاظ نشده	لحاظ نشده	لحاظ نشده	لحاظ نشده	لحاظ نشده	لحاظ نشده	لحاظ نشده	لحاظ نشده	لحاظ نشده
NPV	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
IRR	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
سود	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-
عمر معدن	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
نرخ تولید	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
نسبت باطله برداری	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
محدوده کاواک نهایی	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓
مبنای برنامه ریزی (بلوک/افق)	افق	بلوک	بلوک	بلوک	بلوک	بلوک	بلوک	بلوک	افق	بلوک	بلوک
زمان بندی تولید	ندارد	OPUG	OPUG	OPUG	OPUG	OPUG	OPUG	OPUG	OPUG	OPUG	ندارد
مکان و/یا زمان گذار	مکان	هر دو	هر دو	هر دو	هر دو	هر دو	هر دو	هر دو	مکان	مکان	مکان
بعد روش	سه بعدی	سه بعدی	سه بعدی	سه بعدی	سه بعدی	سه بعدی	سه بعدی	سه بعدی	سه بعدی	سه بعدی	سه بعدی
نوع ماده معدنی	آهن	طلا	آهن	طلا	طلا	مس	آهن	آهن	مس	نامشخص	مس
نکات قابل توجه	تعیین عمق گذار تقریبی - عدم توضیح کامل نرم افزار و نحوه محاسبه -	عدم توجه به مسایل زیست محیطی - اجرای مدل روی یک مطالعه موردی کوچک مقیاس	تعیین عمق گذار بر اساس افق که بدترین حالت برای تعیین عمق گذار است - توجه به مسایل زیست محیطی	قرار دادن کانستگ طلا به عنوان لنگه تاج بدون توجه اقتصادی - عدم توجه به مسایل زیست محیطی	الگوریتم حل خطی و با استفاده از شاخه و حد	عدم توجه به مسایل زیست محیطی - مبنای بر سناریوهای از پیش تعیین شده	در نظر گرفتن لنگه تاج در روش غیرهمزمان که غیر منطقی است - عدم توجه به مسایل زیست محیطی	تعیین عمق گذار بر اساس افق - عدم توجه به مسایل زیست محیطی - ساده سازی زیاد	جزییات MIP ارائه نشده است.	مدلی مبتنی بر برنامه ریزی ریاضی، با در نظر گرفتن ارزش اقتصادی بلوک روش های OP و UG	

پروژه و زمان بندی استخراج راهبردی برای مواد معدنی روباز و/یا زیرزمینی

- گنجاندن موارد از قبیل: پیشگیری، کاهش و جبران اثرات نامطلوب زیست محیطی، آماده سازی دسترس ی اولیه زیرزمینی، آماده سازی عملیاتی زیرزمینی، محدودیت های کیفیت یا ترکیب عیار کانسنگ، تقدم جهت استخراج افقی و قائم، توالی استخراج مواد معدنی در چارچوب بهینه سازی
- ایجاد کدها/ ابزارهای کامپیوتری برای پیاده سازی مدل فرموله شده برای پروژه های گزینه های استخراج ترکیبی معادن بزرگ مقیاس در پایتون

مهم ترین نوآوری تحقیق تعیین هزینه های زیست محیطی پیشگیری، کاهش و جبران اثرات نامطلوب زیست محیطی ناشی فعالیت استخراج در طول چرخه حیات معدن (قبل، حین و بعد از استخراج) و در نظر گرفتن آن حین تعیین زمان و عمق گذار بهینه است. تاکنون روشی برای تعیین هزینه های زیست محیطی ارائه نشده و در هیچ کدام از مطالعات انجام شده در زمینه گذار، هزینه های زیست محیطی لحاظ نشده است.

همچنین این تحقیق برخلاف مطالعات پیشین، برای تعیین عمق و زمان گذار و زمان بندی استخراج با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی، به جای بلوک، تناژ کانسنگ ارسالی به کارخانه فرآوری را اساس کار قرار داده است که این امر منجر به افزایش بسیار زیاد دقت نتایج می شود. مشارکت های اصلی این تحقیق، ارائه یک چارچوب یکپارچه (رویکرد کمی) برای تعیین هزینه پیشگیری، کاهش و جبران اثرات نامطلوب زیست محیطی ناشی از فعالیت های استخراج در طول چرخه حیات معدن (قبل از استخراج، حین استخراج و پس از استخراج) و تعیین عمق و زمان گذار و گزینه استخراج بهینه است. روش بهینه سازی پیشنهادی به نام CEE و توسعه یک چارچوب بهینه سازی بر اساس MILP برای گزینه های استخراج روباز- زیرزمینی و برنامه ریزی گذار است. چارچوب MILP آماده سازی های اولیه و ثانویه و محدودیت های ترکیب عیار را در بهینه سازی گزینه های استخراج و مساله برنامه ریزی گذار ادغام می کند. این تحقیق بیش تر الزامات ژئوتکنیکی را در مدل MILP برای اجرای عملی معرفی می کند. NPV پروژه پس از بهینه سازی به حداکثر می رسد و زمان بندی استخراج بخش روباز و زیرزمینی، تمام محدودیت های فنی و اقتصادی مشخص شده را برآورده می کند.

در این تحقیق مدل برنامه ریزی ریاضی بر اساس چارچوب بهینه سازی MILP برای تعیین عمق و زمان گذار بهینه و زمان بندی استخراج توسعه داده شد. چارچوب MILP بر اساس رویکرد ارزیابی اقتصادی رقابتی (CBE) است، تکنیک بهینه سازی CBE به بهینه ساز اجازه می دهد تا عمق و زمان بهینه گذار، زمان بندی استخراج و مناسب ترین گزینه (های) استخراج و استراتژی استخراج را برای کانسار انتخاب کند. گزینه های استخراج ارزیابی شده عبارت اند از OP مستقل، UG مستقل، OPUG همزمان، OPUG متوالی و ترکیبی از OPUG همزمان و متوالی. چارچوب پیشنهادی MILP شامل آماده سازی تهویه معدن UG مورد نیاز، نگهداری سنگ و تقویت آماده سازی عملیاتی (افق، راهرو حمل کانسنگ و باطله، میانبرها) و کارگاه ها است. آماده سازی تهویه معدن UG اغلب شامل یک سری دوپل های بالارو و آماده سازی راهروهای جانبی و ساخت کنترل های تهویه می شود [۱۶]. به طور خلاصه، ویژگی های چارچوب پیشنهادی MILP عبارت اند از:

- رویکرد بهینه سازی CEE بی طرفانه.
- ارزیابی اقتصادی با در نظر گرفتن هزینه های جبران اثرات زیست محیطی ناشی از فعالیت استخراج در طول چرخه حیات معدن (قبل از استخراج، حین استخراج و بعد از استخراج).
- زمان بندی تولیدی با استراتژی استخراج گزینه استخراج انتخابی وابسته به زمان.
- گنجاندن زمان بندی ساخت زیرساخت های معدنی ضروری زیرزمینی (تهویه اصلی، الزامات آماده سازی سرمایه ای و عملیاتی) در رابطه.
- هدف اصلی این تحقیق توسعه یک چارچوب نظری برای انتخاب گزینه های بهینه استخراج، تعیین عمق و زمان بهینه گذار از استخراج روباز به زیرزمینی و ارزیابی استراتژی استخراج برای کانسار بزرگ مقیاس با استفاده از چارچوب بهینه سازی برنامه ریزی ریاضی است. اهداف مطالعه بر موارد زیر متمرکز است:
- ارائه مدل ریاضی برای تعیین هزینه های جبران اثرات زیست محیطی ناشی از فعالیت استخراج در طول چرخه حیات معدن
- ارائه و توسعه یک فرآیند بهینه سازی برای گزینه (های) استخراج روباز، زیرزمینی و ترکیبی و برنامه ریزی گذار
- ایجاد چارچوب بهینه سازی با هدف حداکثر سازی NPV

۲- روش شناسی

فعالیت‌های معدنی می‌تواند هزینه‌های زیست‌محیطی قابل توجهی داشته باشد و به دلیل هزینه‌های بالای پیشگیری، کاهش یا جبران اثرات نامطلوب زیست‌محیطی، استخراج معدن را غیراقتصادی کند. برای ارزیابی دقیق امکان‌سنجی اقتصادی یک معدن، گنجاندن هزینه‌های زیست‌محیطی در مطالعات امکان‌سنجی ضروری است. با این حال، کمی کردن هزینه‌های زیست‌محیطی به ازای هر تن کانسنگ استخراج‌شده (ولید باطله برداشت‌شده) یک چالش مهم است. بخش اول این تحقیق یک روش با رویکرد کمی را پیشنهاد می‌کند که عوامل حیاتی مانند شاخص توسعه انسانی، مقیاس معدن، موقعیت معدن، روش استخراج، نوع ماده معدنی و حساسیت‌های زیست‌محیطی و اکوسیستمی را در نظر می‌گیرد. هدف از این بخش تعیین هزینه‌های مرتبط با پیشگیری، کاهش یا جبران اثرات نامطلوب ناشی از فعالیت‌های معدنی و آسیب‌های زیست‌محیطی به محل معدن و محیط اطراف به ازای هر تن کانسنگ استخراج‌شده به روش روباز و زیرزمینی در مراحل قبل از استخراج، حین استخراج و بعد از استخراج در طول عمر پروژه است. این مطالعه شامل ارزیابی زیست‌محیطی با استراتژی‌هایی برای کاهش و کنترل اثرات زیست‌محیطی نمی‌شود. در عوض، چارچوبی را برای محاسبه هزینه‌های زیست‌محیطی استخراج یک تن کانسنگ با در نظر گرفتن این هزینه‌ها در ارزش اقتصادی بلوک پیشنهاد می‌کند. این مطالعه یک ارزیابی دقیق از امکان‌سنجی پروژه اولیه می‌دهد و امکان انتخاب اقتصادی‌ترین گزینه را فراهم می‌کند. با در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی در مراحل اولیه استخراج (به عنوان مثال، برنامه‌ریزی و طراحی)، تعیین امکان‌پذیری پروژه، کاهش ریسک‌های اقتصادی و به حداقل رساندن عدم قطعیت اقتصادی پروژه ضروری است. روش پیشنهادی برای محاسبه هزینه‌های زیست‌محیطی می‌تواند برای انتخاب بهترین گزینه به منظور استخراج بلوک در حالت استخراج ترکیبی مورد استفاده قرار گیرد. به طور کلی، این مطالعه اهمیت در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی در فعالیت‌های معدنی را برجسته می‌کند و روشی را برای محاسبه دقیق این هزینه‌ها پیشنهاد می‌دهد تا امکان تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر در صنعت معدن را فراهم سازد. بخش دوم این فصل رویکرد CEE و مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه را برای حل گزینه‌های استخراج روباز - زیرزمینی و مساله بهینه‌سازی عمق گذار معرفی می‌کند. رابطه ریاضی شامل نمایش تابع چند هدفه و محدودیت‌ها

در این بخش مستند شده است. این مدل NPV پروژه معدنی را که مناسب برای روش‌های استخراج روباز یا روش‌های استخراج زیرزمینی یا هر دو است، به حداکثر می‌رساند. یک چارچوب MILP چند هدفه بر اساس روش پیشنهادی CEE که در حل گزینه‌های استخراج و مساله بهینه‌سازی عمق گذار استفاده می‌شود، رابطه‌بندی شد. استراتژی بهینه‌سازی CEE یک رویکرد بی‌طرفانه و نارباب است که فرصت عادلانه‌ای را برای هر بلوک استخراجی در مدل بلوکی به منظور انتخاب گزینه استخراج روباز مستقل، استخراج زیرزمینی مستقل، استخراج متوالی ترکیبی فراهم می‌کند. آماده‌سازی زیرزمینی بخشی ضروری از معادن زیرزمینی است زیرا زیرساختی را فراهم می‌کند که تولید کانسنگ را می‌توان انجام داد. آماده‌سازی زیرزمینی در مدل لحاظ شده است. در استخراج زیرزمینی دو نوع آماده‌سازی دسترسی اولیه یا آماده‌سازی سرمایه‌ای و دسترسی ثانویه یا آماده‌سازی عملیاتی وجود دارد. عمر مورد انتظار آماده‌سازی بین این دو نوع متمایز است. آماده‌سازی دسترسی اولیه آماده‌سازی بازکننده‌های دائمی‌تر یک معدن است در حالی که آماده‌سازی عملیاتی ماهیت موقتی دارد و تمایل دارد با نیازهای یک کارگاه تولید همراه باشد. آماده‌سازی سرمایه‌ای یا دسترسی اولیه شامل چاه‌ها، رمپ‌ها، نقاط تخلیه، بالارو، آماده‌سازی تونل انتقال کانسنگ و سایر دسترسی‌های معدن مانند دسترسی‌های افقی اصلی است، در حالی که آماده‌سازی عملیاتی شامل راهروهای حمل کانسنگ و باطله، افق‌ها و میانبرها است. آماده‌سازی دسترسی اولیه مانند آماده‌سازی تهویه معدن و نگهداری توده سنگ ژئوتکنیکی در آماده‌سازی عملیاتی و کارگاه‌هایی که می‌توانند پویایی گزینه‌های استخراج سطحی - زیرزمینی و مساله بهینه‌سازی گذار را تغییر دهند، در رابطه MILP به عنوان محدودیت گنجانده شده‌اند. تابع چند هدفه مدل MILP پیشنهادی موارد زیر را تعیین می‌کند:

- مناسب‌ترین گزینه (های) استخراج برای کانسار.
- زمان‌بندی استخراج برای گزینه استخراج بهینه.
- زمان‌بندی کانسنگ تحویل داده‌شده از معدن روباز به کارخانه فرآوری.
- زمان‌بندی کانسنگ تحویل داده‌شده از معدن زیرزمینی به کارخانه فرآوری.
- زمان‌بندی آماده‌سازی عملیاتی و سرمایه‌ای.
- عمر معدن.
- حداکثر ارزش خالص فعلی پروژه معدن با لحاظ کردن هزینه‌های زیست‌محیطی.

۲-۱- روش‌شناسی و اطلاعات مورد نیاز برای تعیین هزینه‌های زیست‌محیطی

از آن‌جا که هدف این مطالعه ارایه یک مدل جامع با رویکرد کمی است که به طور جهانی در کشورهای و معادن مختلف قابل استفاده باشد، عوامل مختلفی در ارتباط با کشور و معادن در محاسبات در نظر گرفته شده است. سیاست‌ها و قوانین زیست‌محیطی در کشورهای مختلف به دلایل مختلف متفاوت است و این قوانین و سیاست‌ها می‌توانند بر هزینه‌های زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی تاثیر بگذارند. به‌عبارت دیگر، هزینه‌های مرتبط با آسیب‌های زیست‌محیطی بسته به شاخص توسعه انسانی یک کشور متفاوت است. در کشورهایی که شاخص توسعه انسانی بالاتری دارند، هزینه‌ها بیشتر است و بالعکس. معادن بر اساس میزان تولید سالانه به سه دسته بزرگ، متوسط و کوچک تقسیم‌بندی می‌شوند و طبیعی است که هر چه تولید سالانه و مقیاس معدن بزرگ‌تر باشد، آلودگی و هزینه‌های زیست‌محیطی نیز بیش‌تر می‌شود. موقعیت جغرافیایی معدن بسته به مجاورت آن با مناطق مسکونی مانند شهرها یا روستاها و ارتباط آن با مناطق و اکوسیستم‌های حساس به محیط‌زیست نیز بر هزینه‌های

زیست‌محیطی تاثیر می‌گذارد. علاوه بر این، نوع ماده معدنی فلزی استخراج‌شده نیز بر آلودگی محیط‌زیست و هزینه‌های مربوطه تاثیر می‌گذارد. جدول ۲ عواملی را نشان می‌دهد که بر هزینه‌های زیست‌محیطی استخراج در کشورهای مختلف تاثیر می‌گذارد.

تحقیقات قبلی مهم‌ترین اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از فعالیت استخراج و راه‌های جلوگیری و کنترل آن‌ها را شناسایی کرده‌اند. با این حال، تحقیقات قبلی در تعیین هزینه‌های پیشگیری، جبران و کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی در طول مطالعه امکان‌سنجی، برنامه‌ریزی و طراحی برای تعیین عمق گذار از معدن روباز به زیرزمینی دستاوردی نداشتند. برای پرداختن به این چالش، این مطالعه رویکرد کمی جدیدی برای محاسبه هزینه‌های زیست‌محیطی جلوگیری، کاهش یا جبران اثرات نامطلوب استخراج بر کیفیت هوا، آب، اکولوژی، زمین و اقتصاد به ازای هر تن کانسنگ استخراج‌شده با استفاده از روش‌های استخراج سطحی یا زیرزمینی پیشنهاد می‌کند. این هزینه‌ها باید هنگام تعیین ارزش اقتصادی بلوک در نظر گرفته شوند.

جدول ۲- عوامل موثر بر هزینه‌های زیست‌محیطی در مدل فعلی

عوامل	نماد	بازه تغییرات عددی	شرح
شاخص توسعه انسانی (HDI)	F_{Hd}	صفر تا ۱	سازمان ملل متحد شاخص توسعه انسانی را برای اندازه‌گیری توسعه انسانی در یک کشور تدوین کرد. HDI با نگاه کردن به توسعه انسانی یک کشور، مانند آموزش، سلامت و امید به زندگی، کمی‌سازی می‌شود. HDI در مقیاس صفر تا ۱ تنظیم شده است و اکثر کشورهای توسعه یافته دارای امتیاز بالای ۰٫۸ هستند. HDI می‌تواند برای تعیین بهترین کشورها برای زندگی استفاده شود زیرا کشورهای توسعه یافته معمولاً کیفیت زندگی بالاتری را به ساکنان خود ارایه می‌دهند.
مقیاس استخراج	F_{Ms}	صفر تا ۱	مقیاس معدن در این مطالعه بر اساس تولید سالانه معدن تعیین می‌شود.
موقعیت معدن نسبت به آبادی	F_{Lm}	صفر تا ۱	موقعیت معدن در ارتباط با مناطق مسکونی شهری یا روستایی بر اساس فاصله آن‌ها (کیلومتر) تعیین می‌شود.
روش استخراج	F_{Mm}	صفر تا ۱	روش‌های استخراج بر اساس روش‌های پیشنهادی هارتمن برای معادن فلزی سطحی و زیرزمینی است.
نوع ماده معدنی	F_{Tm}	صفر تا ۱	بسته به نوع ماده معدنی، تاثیر آن متفاوت خواهد بود.
حساسیت‌های زیست‌محیطی و اکوسیستمی منطقه معدن	F_{EES}	صفر تا ۱	حساسیت‌های زیست‌محیطی و اکوسیستمی شامل نزدیکی معدن به رودخانه، قرار گرفتن در مسیر آب‌های زیرزمینی، نزدیکی به گونه‌های گیاهی خاص منطقه، گونه‌های جانوری در حال انقراض و نظایر آن است.

F_{LM} : موقعیت معدن نسبت به آبادی.

F_{MM} : روش استخراج.

F_{TM} : نوع ماده معدنی.

F_{EES} : حساسیت‌های زیست‌محیطی و اکوسیستمی منطقه معدن.

در این مدل ۱۲ جزء از فعالیت استخراج و ۲۵ مولفه محیط زیست که آسیب می‌بینند، لحاظ شده است. برای افزایش دقت مدل می‌توان این موارد را افزایش داد. این روش فرض می‌کند که هزینه زیست‌محیطی استخراج یک تن کانسنگ برابر با هزینه زیست‌محیطی برداشت یک تن باطله است.

۲-۲- روش‌شناسی و اطلاعات مورد نیاز مدل MILP

چارچوب MILP در این بخش معرفی می‌شود. مجموعه و شاخص‌های مورد استفاده در رابطه‌بندی توضیح داده شده و پارامترها و متغیرهای تصمیم مورد نیاز برای پیاده‌سازی مدل MILP تعریف شده است. روش مدل‌سازی پارامترهای اقتصادی، تابع هدف و مجموعه‌ای از محدودیت‌ها در چارچوب MILP مورد بحث قرار گرفته‌اند. در این بخش چارچوب MILP برای تعیین عمق بهینه گذار با هدف دستیابی به حداکثر NPV ارائه شد. در ادامه این مورد شرح داده شده است.

مدل MILP یکپارچه پیشنهادی در این تحقیق برای تعیین زمان‌بندی و توالی استخراج واحدهای استخراج در طول عمر معدن برای استخراج روباز و زیرزمینی و تعیین عمق بهینه گذار از استخراج روباز به زیرزمینی استفاده شد. تابع هدف مدل MILP ارزش خالص فعلی پروژه معدنی را هم‌زمان برای هر دو بخش روباز و زیرزمینی (با ارسال یکنواخت و نزدیک به حد مطلوب تناژ و عیار مورد نیاز کارخانه فرآوری) به حداکثر می‌رساند. محدودیت مدل MILP پیشنهادی، ظرفیت استخراج، ظرفیت فرآوری، عیار حد کارخانه فرآوری، شیب ژئوتکنیکی، آماده‌سازی‌های سرمایه‌ای و عملیاتی بخش زیرزمینی، تقدم تخلیه نقاط تخلیه، وضعیت نقاط تخلیه (فعال یا غیرفعال بودن)، آهنگ تخلیه، روابط تقدم (برای استخراج) برای استخراج روباز و زیرزمینی را کنترل می‌کند. ظرفیت استخراج تابعی از ذخیره کانسنگ (مواد مینرالیزه شده)، ظرفیت فرآوری و ظرفیت ناوگان معدنی برای عملیات طراحی شده است. محدودیت‌های ظرفیت فرآوری، برنامه تولید کانسنگ را در هر دوره مشخص کرده و تضمین می‌کند که مواد خروجی از معدن (RoM) تناژ تعیین شده برای کارخانه فرآوری را برآورد کند. بر

عدم قطعیت به عنوان یک مفهوم عمومی، اصطلاحی است که عدم اطمینان در تصمیم را منعکس می‌کند و بازه باز میان اطمینان کامل و عدم اطمینان محض را در بر می‌گیرد. به عبارت دیگر، عدم قطعیت توصیف‌کننده کیفیت دانش انسان در رابطه با مورد خاصی است. نبود آگاهی سرچشمه اصلی عدم قطعیت است. در این بخش از قاعده ترکیب دمپستر شیفتر برای تعیین عدم قطعیت استفاده شده است. که در رابطه ۱ بیان شده است.

$$U_{ij} = pls_{ij} - bel_{ij} \quad (1)$$

که در آن:

U_{ij} : عدم قطعیت تاثیر فعالیت استخراج i بر مولفه زیست‌محیطی j .

pls_{ij} : حد بالای احتمال وقوع.

bel_{ij} : حد پایین احتمال وقوع.

حد بالا و پایین احتمال وقوع بر اساس سناریوهای از پیش تعیین شده و نظرات متخصصان تعیین می‌شود. هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های استخراج را می‌توان با استفاده از رابطه‌های ۲ و ۳ محاسبه کرد.

$$C_E = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{25} C_{ij} \times (1 - U_{ij}) \times (F_{HD} \times F_{MS} \times F_{LM} \times F_{MM} \times F_{TM} \times F_{EES}) \quad (2)$$

$$\text{Max } (F_{HD} \times F_{MS} \times F_{LM} \times F_{MM} \times F_{TM} \times F_{EES}) = 1 \quad (3)$$

که در آن:

C_E : هزینه‌های زیست‌محیطی استخراج یک تن کانسنگ (دلار بر تن).

C_{ij} : هزینه اثرات نامطلوب فعالیت استخراج i بر بخش j محیط زیست.

U_{ij} : عدم قطعیت تاثیر نامطلوب فعالیت استخراج i بر بخش j محیط‌زیست (احتمال تاثیر فعالیت استخراج i بر بخش j محیط‌زیست در شدت فعالیت استخراج i بر بخش j محیط‌زیست).

F_{HD} : شاخص توسعه انسانی (HDI).

F_{MS} : مقیاس استخراج.

قابل استخراج) و کیفیت (عیار) مناسب باشد، استخراج با استفاده از یکی از روش‌های استخراج زیرزمینی (اغلب روش‌های پر تولید زیرزمینی) ادامه می‌یابد.

در شرایط زیر، یک معدن سطحی (اغلب روباز) می‌تواند جذابیت کمتری برای بهره‌برداری داشته باشد و روش استخراج زیرزمینی (معمولاً تخریب بلوکی) جایگزین روش سطحی شود. این شرایط عبارت‌اند از:

- زمانی که برای دسترسی به کانسنگ نیاز به باطله‌برداری بیش از حد باشد (نسبت باطله‌برداری زیاد)
- فضای انباشت (ذخیره‌سازی) باطله محدود باشد.
- شکست در دیواره کاواک رخ دهد.
- در مواقعی که ملاحظات زیست‌محیطی مهم‌تر از سود ناشی از بهره‌برداری باشد [۱۷].

در میان روش‌های استخراج زیرزمینی، روش استخراج غیرانتخابی تخریب بلوکی به دلیل آهنگ تولید بالا و هزینه عملیاتی پایین می‌تواند به عنوان یک جایگزین مناسب برای ادامه استخراج کانسنگ انتخاب شود. مهم‌ترین مساله در حالت استخراج ترکیبی روباز-زیرزمینی تعیین عمق بهینه گذار از استخراج روباز به زیرزمینی (OTD) است. زمان‌بندی و برنامه‌ریزی تولید و اجرای گذار از استخراج روباز به زیرزمینی برای یک معدن بزرگ مقیاس حدود ۲۰ سال ممکن است طول بکشد، بنابراین این موضوع باید در سال‌های اولیه عمر معدن (از مراحل پیش‌امکان‌سنجی و امکان‌سنجی) مورد مطالعه قرار گیرد. این بدان معنی است که گذار از روش روباز به زیرزمینی باید حتی به عنوان بخشی از بازنگری‌های سالانه در طول عمر معدن در نظر گرفته شود [۱۸].

مدل پایه‌ای که برای نوشتن مدل فعلی از آن الهام گرفته شده است مربوط به مدل آفوم^۱ (۲۰۱۹) [۳] است که برای مورد با مقیاس کوچک در حالت هم‌زمان و بدون توجه به هزینه‌های زیست‌محیطی و نزدیک کردن عیار و تناژ ارسالی به کارخانه به حد مطلوب عیار و تناژ مورد نیاز کارخانه فرآوری ارائه شده است. تابع هدف مدل MILP ارزش خالص فعلی پروژه معدنی را هم‌زمان برای هر دو بخش روباز و زیرزمینی به حداکثر می‌رساند. مقدار کانسنگ فرآوری شده با متغیرهای تصمیم‌گیری پیوسته $\bar{x}_{i,j,k}^t$ و $\bar{x}_{i,j,k}^t$ به ترتیب برای معدن روباز و

اساس عیار حد کارخانه فرآوری، محدودیت عیار مورد نیاز برای ترکیب (اختلاط خودخواسته) از هر گزینه استخراج در محدوده اهداف عیار پایین و بالا برای عملیات تعریف می‌شود. جزییات مدل MILP یکپارچه پیشنهادی در ادامه به‌طور مفصل شرح داده شده است.

چارچوب MILP یک روش ارزیابی مبتنی بر رویکرد بهینه‌سازی است که به آن CEE گفته می‌شود. استراتژی بهینه‌سازی CEE یک رویکرد ناریب و بی‌طرفانه است که فرصت عادلانه‌ای را برای هر واحد استخراجی به منظور انتخاب با یک گزینه استخراج (رو باز یا زیرزمینی) فراهم می‌کند. فرآیند CEE هر واحد استخراج ذخیره معدنی را ارزیابی می‌کند و از نظر اقتصادی تصمیم به انتخاب واحدهای استخراجی مناسب برای استخراج روباز، واحدهای استخراجی مناسب برای استخراج زیرزمینی و بلوک‌های استخراج نشده می‌گیرد.

به‌طور خلاصه نقاط قوت چارچوب MILP ارائه شده در این پژوهش شامل موارد زیر است:

- رویکرد بهینه‌سازی بی‌طرفانه (ناریب) - ارزیابی اقتصادی رقابتی.
- در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی (به ازای تن کانسنگ استخراجی و تن باطله برداشت شده) در فرآیند بهینه‌سازی.
- در نظر گرفتن افزایش هزینه‌های (استخراج، زیست‌محیطی و عملیاتی) مرتبط با افزایش عمق استخراج در فرآیند بهینه‌سازی.
- زمان‌بندی تولید یکپارچه برای گزینه‌های استخراج روباز و زیرزمینی.
- لحاظ کردن ملاحظات اصلی استخراج زیرزمینی (آماده‌سازی‌های سرمایه‌ای و عملیاتی).
- رویکرد واقعی، عملی و قابل اجرا در معادن بزرگ مقیاس با قابلیت استخراج ترکیبی روباز-زیرزمینی.

در ذخایر فلزی که شیب و گسترش عمقی زیادی دارند، استخراج کانسار در بخش سطح یا نزدیک سطح ابتدا با روش‌های استخراج سطحی (اغلب روباز) شروع می‌شود و با عمیق‌تر شدن معدن، نسبت باطله برداشت شده به ازای یک تن کانسنگ استخراجی به حدی می‌رسد که استخراج به روش سطحی دیگر توجیه اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی ندارد. بعد از این عمق در صورتی که ذخیره از نظر کمیت (حجم و تناژ

1- Afum, B. O

استخراج زیرزمینی $\varphi_{i,j,k}^t$ در رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ ارایه شد. به‌طور مشابه، هزینه‌های استخراج تمام مواد معدنی داخل بلوک در دوره t با به‌کارگیری روش استخراج روباز $\bar{U}_{i,j,k}^t$ و استخراج زیرزمینی $\underline{U}_{i,j,k}^t$ به‌ترتیب در رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ آورده شد. رابطه‌های ۱۶ و ۱۷ به‌ترتیب هزینه‌های اضافی آماده‌سازی‌های سرمایه‌ای A_C^t و عملیاتی A_d^t استخراج زیرزمینی را تعریف می‌کند.

$$BEV_{i,j,k}^t = (\bar{R}_{i,j,k}^t - \check{r}) - (\bar{E}_{i,j,k}^t + \bar{\varphi}_{i,j,k}^t + \bar{U}_{i,j,k}^t) \quad (4)$$

$$BEV_{i,j,k}^t = (R_{i,j,k}^t - \check{r}) - (E_{i,j,k}^t + \varphi_{i,j,k}^t + U_{i,j,k}^t) \quad (5)$$

$$\bar{R}_{i,j,k}^t = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \bar{O}_{i,j,k} \times \bar{G}_{i,j,k} \times R \times (P - \zeta) - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \bar{O}_{i,j,k} \times B \quad (6)$$

$$R_{i,j,k}^t = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K O_{i,j,k} \times G_{i,j,k} \times R \times (P - \zeta) - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K O_{i,j,k} \times B \quad (7)$$

$$\bar{E}_{i,j,k}^t = (\bar{O}_{i,j,k} + \bar{W}_{i,j,k}) \times \bar{V}_k^t \quad (8)$$

$$E_{i,j,k}^t = (O_{i,j,k} + W_{i,j,k}) \times V_k^t \quad (9)$$

$$\bar{V}_{k+1}^t = \bar{V}_k^t \times (1 + \alpha(k+1)) \quad (10)$$

$$V_{k+1}^t = V_k^t \times (1 + \alpha(k+1)) \quad (11)$$

$$\bar{\varphi}_{i,j,k}^t = \bar{O}_{i,j,k} \times C_P^t \quad (12)$$

$$\varphi_{i,j,k}^t = O_{i,j,k} \times C_P^t \quad (13)$$

$$\bar{U}_{i,j,k}^t = (\bar{O}_{i,j,k} + \bar{W}_{i,j,k}) \times \bar{H}^t \quad (14)$$

$$U_{i,j,k}^t = (O_{i,j,k} + W_{i,j,k}) \times H^t \quad (15)$$

$$A_C^t = D_\mu \times F_C^t \quad (16)$$

$$A_d^t = D_\pi \times F_d^t \quad (17)$$

زیرزمینی کنترل می‌شود. به‌طور مشابه، مواد استخراج‌شده با استفاده از روش روباز و زیرزمینی نیز با متغیرهای تصمیم‌گیری $\bar{y}_{i,j,k}^t$ و $\bar{y}_{i,j,k}^t$ کنترل می‌شود. متغیرهای پیوسته استخراج و فرآوری جبران کسری (کمبود) بلوک‌های استخراج روباز و زیرزمینی را در دوره‌های مختلف عمر معدن تضمین می‌کند.

محدودیت مدل MILP پیشنهادی، ظرفیت استخراج، ظرفیت فرآوری، عیار حد کارخانه فرآوری، شیب ژئوتکنیکی، آماده‌سازی‌های سرمایه‌ای و عملیاتی بخش زیرزمینی، تقدم تخلیه نقاط تخلیه، وضعیت نقاط تخلیه (فعال یا غیرفعال بودن)، آهنگ تخلیه، روابط تقدم (جهت استخراج) برای استخراج روباز و زیرزمینی را کنترل می‌کند. ظرفیت استخراج تابعی از ذخیره کانسنگ (مواد مینیرالیزه‌شده)، ظرفیت فرآوری و ظرفیت ناوگان معدنی برای عملیات طراحی شده است. محدودیت‌های ظرفیت فرآوری، برنامه تولید کانسنگ را در هر دوره مشخص کرده و تضمین می‌کند که مواد خروجی از معدن (RoM) تناژ تعیین‌شده برای کارخانه فرآوری را برآورد کند. بر اساس عیار حد کارخانه فرآوری، محدودیت عیار مورد نیاز برای ترکیب (اختلاط خودخواسته) از هر گزینه استخراج در محدوده اهداف عیار پایین و بالا برای عملیات تعریف می‌شود.

۱-۲-۲- مدل‌سازی ارزش اقتصادی بلوک‌ها (BEV) و هزینه‌های آماده‌سازی

ارزش اقتصادی بلوک (واحد استخراجی) تابعی از مقدار بازیابی کلی مواد معدنی موجود در بلوک، درآمد حاصل از فروش محصول نهایی، هزینه‌های زیست‌محیطی، هزینه‌های استخراج، هزینه‌های فرآوری و هزینه‌های پالایش و فروش وابسته به گزینه استخراج است. ارزش اقتصادی بلوک در استخراج روباز و زیرزمینی به‌ترتیب با $BEV_{i,j,k}^t$ و $BEV_{i,j,k}^t$ نشان داده شده و به‌صورت رابطه‌های ۴ و ۵ تعریف شد. درآمدهای حاصل از فروش محصول نهایی در بلوک استخراج‌شده در دوره t با استفاده از روش روباز $\bar{R}_{i,j,k}^t$ و استخراج زیرزمینی $R_{i,j,k}^t$ به‌ترتیب در رابطه‌های ۶ و ۷ بیان شد. هزینه‌های زیست‌محیطی تمام مواد داخل بلوک در دوره t با به‌کارگیری روش استخراج روباز $\bar{E}_{i,j,k}^t$ و استخراج زیرزمینی $E_{i,j,k}^t$ در رابطه‌های ۸ و ۹ بیان شد. هزینه‌های زیست‌محیطی از هر افق (سطح) استخراج برای روباز و زیرزمینی از طریق روابط ۱۰ و ۱۱ ارایه شد. هزینه فرآوری کانسنگ داخل بلوک در دوره t با به‌کارگیری روش استخراج روباز $\bar{\varphi}_{i,j,k}^t$ و

۲-۲-۲- تابع هدف مدل MILP

تابع هدف مدل MILP که در رابطه ۱۸ نشان داده شده است، ارزش خالص فعلی پروژه معدن را برای حالت استخراج ترکیبی غیرهمزمان حداکثر می‌کند. برای تعیین ارزش خالص

(۱۸)

z = max

$$\sum_{t=1}^T \left(\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left(\frac{(\bar{R}_{i,j,k}^t - \bar{Y})}{(1+DR)^t} \times \bar{x}_{i,j,k}^t - \frac{(\bar{E}_{i,j,k}^t + \bar{\varphi}_{i,j,k}^t + \bar{W}_{i,j,k}^t)}{(1+DR)^t} \times \bar{y}_{i,j,k}^t \right) \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left(\frac{(R_{i,j,k}^t - \bar{Y})}{(1+DR)^t} \times x_{i,j,k}^t - \frac{(E_{i,j,k}^t + \varphi_{i,j,k}^t + W_{i,j,k}^t)}{(1+DR)^t} \times y_{i,j,k}^t \right) \\ & - \left(\sum_{s=1}^{SF} \left(\frac{A_c^t}{(1+DR)^t} \times a_c^t \right) + \sum_{d=1}^D \left(\frac{A_d^t}{(1+DR)^t} \times a_d^t \right) \right) - \\ & \left(\frac{Z_1^t}{(1+DR)^t} \times \eta_1^t \times \left| \bar{N}_1^t - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (\bar{O}_{i,j,k} \times \bar{x}_{i,j,k}^t) \right| + \frac{Z_1^t}{(1+DR)^t} \times \eta_2^t \times \left| \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (\bar{O}_{i,j,k} \times \bar{x}_{i,j,k}^t) - \bar{N}_1^t \right| \right) + \\ & \left(\frac{Z_2^t}{(1+DR)^t} \times \eta_3^t \times \left| \frac{\bar{N}_2^t \times \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \bar{x}_{i,j,k}^t - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \bar{G}_{i,j,k} \times \bar{x}_{i,j,k}^t}{100} + \frac{\hat{Z}_2^t}{(1+DR)^t} \times \eta_4^t \times \left| \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (\bar{G}_{i,j,k} \times \bar{x}_{i,j,k}^t) - \bar{N}_2^t \times \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \bar{x}_{i,j,k}^t}{100} \right| \right) \right) - \\ & \left(\frac{Z_1^t}{(1+DR)^t} \times \eta_1^t \times \left| N_1^t - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (O_{i,j,k} \times x_{i,j,k}^t) \right| + \frac{\hat{Z}_1^t}{(1+DR)^t} \times \eta_2^t \times \left| \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (O_{i,j,k} \times x_{i,j,k}^t) - N_1^t \right| \right) + \\ & \left(\frac{Z_2^t}{(1+DR)^t} \times \eta_3^t \times \left| \frac{N_2^t \times \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{i,j,k}^t - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K G_{i,j,k} \times x_{i,j,k}^t}{100} + \frac{\hat{Z}_2^t}{(1+DR)^t} \times \eta_4^t \times \left| \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (G_{i,j,k} \times x_{i,j,k}^t) - N_2^t \times \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{i,j,k}^t}{100} \right| \right) \right) \end{aligned} \right)$$

الف - محدودیت‌های استخراج روباز

این محدودیت‌ها به‌طور همزمان برای تعیین عمق و زمان بهینه‌گذار از استخراج روباز به زیرزمینی و اجرای استراتژی گزینه‌های استخراج باهم کار می‌کنند.

محدودیت‌های استخراج روباز در روابط ۱۹ تا ۲۸، برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی استخراج را در بخش روباز کنترل می‌کند. رابطه ۱۹ محدودیت ظرفیت استخراج برای عملیات استخراج روباز است. استخراج روباز با متغیر تصمیم‌گیری پیوسته $\bar{y}_{i,j,k}^t$ کنترل می‌شود. این نابرابری تضمین می‌کند که کل تناژ مواد سنگی استخراج‌شده در هر دوره در محدوده قابل قبول کران پایین و بالای ظرفیت کل تجهیزات (ناوگان) موجود برای عملیات معدن روباز است. رابطه ۲۰ محدودیت ظرفیت فرآوری کانسنگ (بار ورودی) ارسال‌شده به کارخانه است که مقدار بار ورودی آسیاب از گزینه استخراج روباز را کنترل می‌کند. محدودیت فرآوری برای گزینه روباز با متغیر تصمیم‌گیری پیوسته $\bar{x}_{i,j,k}^t$ کنترل می‌شود. این نابرابری تضمین می‌کند که کانسنگ یکنواخت در طول عمر معدن در اهداف قابل قبول کران بالا و پایین کانسنگ که از گزینه استخراج روباز در هر دوره تحویل کارخانه فرآوری می‌شود، تغذیه شود. رابطه ۲۱ محدودیت اختلاط عیار را برای استخراج

رابطه ۱۸ NPV پروژه را برای طول عمر معدن به حداکثر می‌رساند. انحراف تناژهای تولید و عیارهای تولید از حد مطلوب تناژ و عیار ارسالی به کارخانه فرآوری برای دوره‌های مختلف به‌صورت هزینه در تابع بیان شده است که با بیشینه کردن NPV، انحراف خودکار به حداقل می‌رساند. برنامه‌ریز معدن در مورد جریمه‌ها برای انحراف از حد مطلوب تناژ و عیار ارسالی به کارخانه فرآوری تصمیم می‌گیرد. این امر بستگی به اولویت‌های شرکت دارد، جریمه‌های بالاتر منجر به انحرافات کم‌تر اما به‌طور بالقوه زمان محاسباتی طولانی‌تر و NPV کم‌تر می‌شود. همچنین، انتظار می‌رود NPV‌های بالاتر و زمان محاسباتی کم‌تر برای حل مساله در هنگام انتخاب مقادیر کم‌تر برای جریمه‌ها صرف کند.

۳-۲-۲- محدودیت‌ها

محدودیت‌های مدل MILP پیشنهادی در ۶ دسته زیر ارایه شده است:

- الف - محدودیت‌های استخراج روباز
- ب - محدودیت‌های استخراج زیرزمینی
- پ - محدودیت‌های تعامل استخراج روباز و زیرزمینی
- ت - محدودیت‌های آماده‌سازی سرمایه‌ای زیرزمینی
- ث - محدودیت‌های آماده‌سازی عملیاتی زیرزمینی
- ج - محدودیت‌های غیرمنفی

خواهد بود. رابطه‌های ۲۳ تا ۲۵، رابطه تقدم عمودی استخراج بلوک استخراج و شیب ژئوتکنیکی استخراج مناسب برای گزینه استخراج روباز، بلوک‌های پوشاننده آن که باید قبل از برداشتن بلوک زیرین استخراج شود (محدودیت شیب) را اعمال می‌کند. رابطه ۲۶ تضمین می‌کند که یک بلوک فقط یک‌بار در طول عمر معدن روباز استخراج می‌شود. رابطه ۲۷ تضمین می‌کند که وقتی یک یا چند بلوک در آن افق با روش روباز استخراج می‌شود، کل افق متعلق به گزینه استخراج روباز است. رابطه ۲۸ تضمین می‌کند وقتی یک افق برای استخراج روباز در نظر گرفته می‌شود، افق بلافاصله بالای آن برای استخراج روباز در نظر گرفته می‌شود.

روبار نشان می‌دهد. این نابرابری تضمین می‌کند که کانسنگ با عیار مناسب در هر دوره به کارخانه فرآوری تحویل داده شود. برنامه عیار کانسنگ در هر دوره تضمین می‌کند که مواد خروجی از معدن مشخصات کیفی (از نظر عیار) کارخانه فرآوری را برآورد می‌کند. بر اساس عیار حد کارخانه فرآوری، الزامات عیار حد برای اختلاط مناسب کانسنگ از هر گزینه استخراج در اهداف پایین و بالا برای عملیات معدن تعریف می‌شود. رابطه ۲۲ ارتباط بین کانسنگ معدن و تناژهای واحد استخراجی (بلوک‌های استخراج) که تصمیمات استخراج و فرآوری روباز را کنترل می‌کند، تعریف می‌کند. بنابراین متغیر پیوسته $\bar{x}_{i,j,k}^t$ همیشه کوچک‌تر یا مساوی با متغیر $\bar{y}_{i,j,k}^t$

$$\bar{M}_U^t \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [(\bar{O}_{i,j,k} + \bar{W}_{i,j,k}) \times \bar{y}_{i,j,k}^t] \leq \bar{M}_N^t \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (19)$$

$$\bar{P}_U^t \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (\bar{O}_{i,j,k} \times \bar{x}_{i,j,k}^t) \leq \bar{P}_N^t \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (20)$$

$$\bar{G}_U^t \leq \left[\frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (\bar{G}_{i,j,k} \times \bar{O}_{i,j,k} \times \bar{x}_{i,j,k}^t)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (\bar{O}_{i,j,k} \times \bar{x}_{i,j,k}^t)} \right] \leq \bar{G}_N^t \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (21)$$

$$\bar{x}_{i,j,k}^t - \bar{y}_{i,j,k}^t \leq 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{1, \dots, K\} \quad (22)$$

$$\bar{\beta}_{i,j,k}^t - \sum_{t=1}^T \bar{\alpha}_{i,j,k}^t \leq 0 \quad \forall S \in \Delta_{i,j,k}(S), i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{1, \dots, K\} \quad (23)$$

$$\sum_{t=1}^T \bar{\beta}_{i,j,k}^t - \bar{\beta}_{i,j,k-1}^t \leq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{1, \dots, K\} \quad (24)$$

$$\bar{\beta}_{i,j,k}^t - \bar{\beta}_{i,j,k}^{t+1} \leq 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{1, \dots, K\} \quad (25)$$

$$\sum_{t=1}^T \bar{\beta}_{i,j,k}^t \leq 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{1, \dots, K\} \quad (26)$$

$$\left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \bar{\beta}_{i,j,k}^t \right) \times \frac{1}{JS} - \bar{\alpha}_{i,j,k}^t \leq 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{1, \dots, K\} \quad (27)$$

$$\bar{\alpha}_{i,j,k}^t - \bar{\alpha}_{i,j,k-1}^t \leq 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{1, \dots, K\} \quad (28)$$

معدن برای عملیاتی استخراج در دوره‌های مختلف است. استخراج زیرزمینی با متغیر تصمیم‌گیری پیوسته $\bar{y}_{i,j,k}^t$ کنترل می‌شود. این نابرابری تضمین می‌کند که کل تناژ مواد سنگی

ب- محدودیت‌های استخراج زیرزمینی

روابط ۲۹ تا ۳۷ برای کنترل عملیات گزینه استخراج زیرزمینی به کار گرفته شدند. رابطه ۲۹ محدودیت ظرفیت

مشخص شد (جنوب شرقی به سمت شمال غربی). هنگامی که تقدم نقاط تخلیه (بلوک‌های افق زیرزمینی یا آخرین افق بخش تخریب بلوکی) با استفاده از این روش تعیین شد با استفاده از رابطه ۳۳ تقدم زمانی بین نقاط تخلیه در مدل بهینه‌سازی پیاده و اطمینان حاصل شد که یک جهت استخراج مناسب در طول عمر معدن دنبال می‌شود. علاوه بر تقدم بین نقاط تخلیه (بلوک‌های آخرین افق بخش زیرزمینی)، واحدهای استخراجی بالای این نقاط تخلیه باید بر اساس اولویتی استخراج شوند که با استفاده از مکان‌های عمودی آن‌ها در ستون‌های تخلیه تعریف شوند (توالی ترتیب استخراج). به عبارت دیگر، یک بلوک (واحد استخراجی) را نمی‌توان از نقطه تخلیه استخراج کرد مگر این که تمام بلوک‌های واقع در زیر (در همان ستون تخلیه) قبلاً استخراج شده باشند. این تقدم عمودی با رابطه ۳۴ بیان شد. رابطه ۳۵ محدودیت ذخایر برای استخراج زیرزمینی را تعریف می‌کند. این نابرابری تضمین می‌کند که هر بلوک $x_{i,j,k}^t$ در افق k فقط یک بار در طول عمر زیرزمینی استخراج می‌شود. رابطه ۳۶ زمانی که یک بلوک یا چند بلوک در آن افق با استخراج زیرزمینی استخراج می‌شوند، تضمین می‌کند که افق به گزینه استخراج زیرزمینی تعلق دارد. رابطه ۳۷ تضمین می‌کند که وقتی یک افق برای استخراج زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود، افق بلافاصله پایین آن برای استخراج زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود.

استخراج شده در هر دوره در محدوده قابل قبول بالا و پایین ظرفیت کل تجهیزات موجود برای عملیات استخراج زیرزمینی باشد. رابطه ۳۰ محدودیت ظرفیت فرآوری است که مقدار بار ورودی آسیاب را از گزینه استخراج زیرزمینی کنترل می‌کند. رابطه ۳۰ تضمین می‌کند که سطح تولید کانسنگ از استخراج زیرزمینی از ظرفیت کل از پیش تعیین شده تجاوز نکند. رابطه ۳۱ محدودیت ترکیب (اختلاط) عیار را برای استخراج زیرزمینی نشان می‌دهد. برنامه عیار کانسنگ در هر دوره اطمینان حاصل می‌کند که مواد ROM مشخصات کیفی کانسنگ معدن برای کارخانه فرآوری را برآورد می‌کند. بر اساس عیارهای حد کارخانه فرآوری الزامات محدودیت عیار برای اختلاط مناسب کانسنگ معدن از هر گزینه معدنی در اهداف بین عیار پایین و بالاتر برای عملیات معدن تعریف می‌شود. رابطه ۳۲ ارتباط بین کانسنگ و تناژهای بلوک استخراج زیرزمینی که تصمیم‌گیری‌های استخراج و فرآوری زیرزمینی را کنترل می‌کند، تعریف می‌کند. بنابراین متغیر پیوسته $x_{i,j,k}^t$ همیشه کوچک‌تر یا مساوی با متغیر پیوسته $y_{i,j,k}^t$ است. برای تقدم جانبی واحدهای استخراج (که هر بلوک در آخرین افق محدوده زیرزمینی یک نقطه تخلیه فرض شده است) یک جهت استخراج مناسب در طرح ارائه شده باید تعریف شود. در این تحقیق برای استخراج بر اساس مقادیر دلاری محتوای فلز در ستون‌های تخلیه بخش تخریب بلوکی

$$M_U^t \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [(O_{i,j,k} + W_{i,j,k}) \times y_{i,j,k}^t] \leq M_N^t \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (29)$$

$$P_U^t \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (O_{i,j,k} \times x_{i,j,k}^t) \leq P_N^t \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (30)$$

$$G_U^t \leq \left[\frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (G_{i,j,k} \times O_{i,j,k} \times x_{i,j,k}^t)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (O_{i,j,k} \times x_{i,j,k}^t)} \right] \leq G_N^t \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (31)$$

$$x_{i,j,k}^t - y_{i,j,k}^t \leq 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{1, \dots, K\} \quad (32)$$

$$\alpha_{i,j,k}^t + \alpha_{i,j,k}^{t-1} = 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{1, \dots, K\}, t \in \{1, \dots, T\} \quad (33)$$

$$\alpha_{i,j,k}^t - \alpha_{i,j,k+1}^t \leq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{1, \dots, K\} \quad (34)$$

$$\sum_{t=1}^T x_{i,j,k}^t \leq 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{1, \dots, K\} \quad (35)$$

$$\left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \beta_{i,j,k}^t \right) \times \frac{1}{PS} - \alpha_{i,j,k}^t \leq 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{1, \dots, K\} \quad (36)$$

$$\beta_{i,j,k}^t - \beta_{i,j,k-1}^t \leq 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{1, \dots, K\} \quad (37)$$

می کند که هر بلوک استخراج به وسیله یک گزینه استخراج استخراج می شود. رابطه ۳۹ تضمین می کند که یک افق برای استخراج روباز یا زیرزمینی در نظر گرفته می شود. به عبارت دیگر این رابطه تضمین می کند که یک افق هم زمان نمی تواند هم برای استخراج روباز و هم استخراج زیرزمینی در نظر گرفته شود.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (\bar{\beta}_{i,j,k}^t + \underline{\beta}_{i,j,k}^t) = 1 \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

$$\bar{\alpha}_{i,j,k}^t + \underline{\alpha}_{i,j,k}^t = 1 \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{1, \dots, K\} \quad (39)$$

افق و تحولات عملیاتی در هر افق را کنترل می کند. روابط ۴۱ تا ۴۳ تضمین می کند که مجموعه ای از آماده سازی های سرمایه ای که نمایانگر بخش بالاتر از یک طبقه است باید قبل از شروع آماده سازی های سرمایه ای ε_c^t آن افق تکمیل شود. رابطه ۴۴ تضمین می کند که آماده سازی عملیاتی افق $d_{d,s}^t$ که آماده سازی سرمایه ای را به هم مرتبط می کند، تنها پس از تکمیل مجموعه ای از آماده سازی سرمایه ای مورد نیاز $\sum_{t=1}^T d_c^t$ در بالا در آن افق آغاز می شود. رابطه ۴۵ تضمین می کند که هر بخش از آماده سازی دسترسی اولیه (چاه یا رمپ) در طول عمر معدن زیرزمینی استفاده می شود.

$$Q_c^t \leq \sum_{c=1}^C (D_\mu \times d_c^t) \leq \hat{Q}_c^t \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (40)$$

$$\varepsilon_c^t - \sum_{t=1}^T d_c^t \leq 0 \quad \forall s \in \rho(S) \in \{1, \dots, C\} \quad (41)$$

$$\sum_{t=1}^T d_c^t - \varepsilon_c^t \leq 0 \quad \forall c \in \{1, \dots, C\} \quad (42)$$

$$\varepsilon_c^t - \varepsilon_c^{t+1} \leq 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, c \in \{1, \dots, C\} \quad (43)$$

$$d_{d,s}^t - \sum_{t=1}^T d_c^t \leq 0 \quad s \in \omega(S), c \in \{1, \dots, C\}, d \in \{1, \dots, D\} \quad (44)$$

$$\sum_{t=1}^T \varepsilon_c^t = 1 \quad \forall c \in \{1, \dots, C\} \quad (45)$$

تعریف می کند و تضمین می کند که طول کل آماده سازی عملیاتی مورد نیاز در هر دوره برای آماده سازی معدن زیرزمینی است. رابطه های ۴۷ تا ۴۹ روابط تقدم جانبی آماده سازی عملیاتی زیرزمینی مورد نیاز برای بهره برداری کانسنگ را کنترل می کند. رابطه ۵۰ تضمین می کند که در هر دوره، مجموعه ای از آماده سازی های عملیاتی $\sum_{t=1}^T d_{d,s}^t$

پ- محدودیت های تعاملات استخراج روباز و زیرزمینی

روابط ۳۸ و ۳۹ تعامل بین عملیات معدن روباز و زیرزمینی را مدیریت می کند. رابطه ۳۸ نشان دهنده تقابل بلوک های استخراج روباز و زیرزمینی است. این نامعادله (نابرابری) تضمین

(38)

ت- محدودیت های آماده سازی سرمایه ای زیرزمینی

محدودیت های آماده سازی سرمایه ای زیرزمینی تعریف شده در روابط ۴۰ تا ۴۵ تضمین می کند که آماده سازی سرمایه ای مورد نیاز زمانی در نظر گرفته می شود که استخراج زیرزمینی گزینه استخراج ترجیحی باشد. رابطه ۴۰ محدودیت های ظرفیت آماده سازی سرمایه ای را برای استخراج زیرزمینی تعریف می کند. این نابرابری تضمین می کند که طول کل آماده سازی مورد نیاز در هر دوره در محدوده قابل قبول کران بالا و پایین کل ظرفیت تجهیزات موجود برای آماده سازی معدن زیرزمینی باشد. ۴۱ تا ۴۳ روابط تقدم بین بخش های آماده سازی سرمایه ای منجر به هر

(40)

(41)

(42)

(43)

(44)

(45)

ث- محدودیت های آماده سازی عملیات زیرزمینی

این مجموعه از محدودیت ها از روابط ۴۶ تا ۵۲ الزامات آماده سازی عملیاتی شامل طول هر آماده سازی عملیاتی (راهرو مواد معدنی، افق و میانبر) و روابط تقدم جانبی با دنباله استخراج بلوک را تعریف می کند. رابطه ۴۶ محدودیت ظرفیت آماده سازی عملیاتی را برای استخراج زیرزمینی

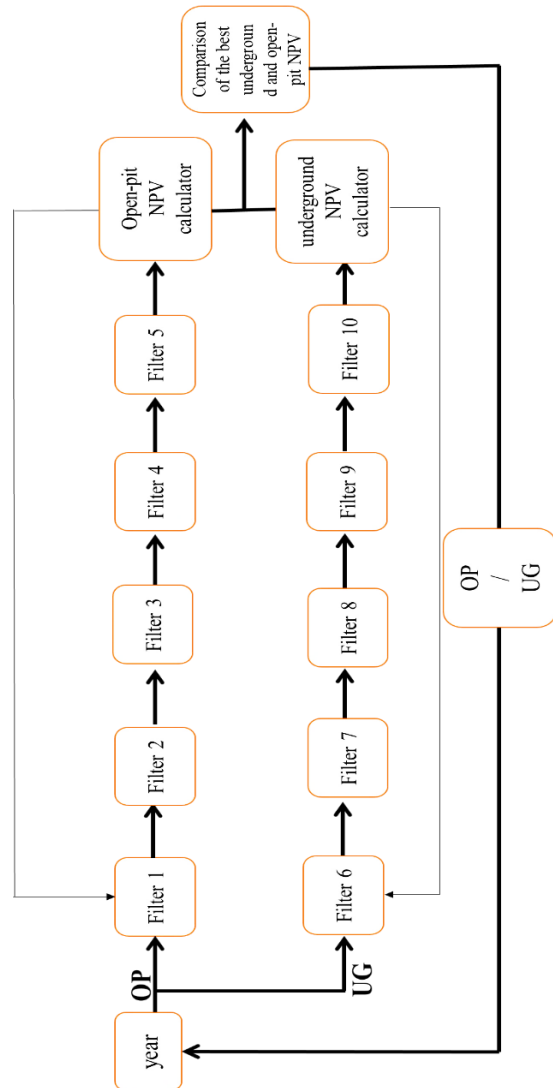
محدودیت تناژ استخراج، تناژ فرآوری و عیار کانسنگ) بررسی می‌شود. محدودیت‌هایی مانند جهت استخراج در جهت عمودی (به سمت بالا)، جهت استخراج در جهت افقی (جنوب شرقی - شمال غربی)، نقاط تخلیه فعال، حداکثر نقاط تخلیه فعال، محدودیت اختلاف ارتفاع ستون تخلیه، اولویت زمانی آماده‌سازی و نظایر آن. اگر این محدودیت‌ها رعایت شود، از این فیلتر عبور می‌کند.

- **فیلتر ۸:** این فیلتر تناژ استخراج شده را محاسبه می‌کند و در صورتی که در محدوده مشخص شده باشد (بخش UG) از آن عبور می‌کند.
- **فیلتر ۹:** این فیلتر ابتدا تناژ فرآوری را محاسبه می‌کند و در صورتی که در محدوده داده شده باشد (بخش UG) از آن عبور می‌کند.
- **فیلتر ۱۰:** در این فیلتر عیار کانسنگ در صورتی که عیار حد را برآورده کند (بخش UG) از آن عبور می‌کند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین هزینه‌های زیست‌محیطی

مطالعات پیشین مهم‌ترین اثرات نامطلوب زیست‌محیطی معدن و راه‌های پیشگیری و کنترل آن‌ها را شناسایی کرده است [۶]. با این حال، این تحقیقات نتوانسته‌اند هزینه‌های این اثرات را در طول مطالعه امکان‌سنجی، برنامه‌ریزی و طراحی برای تعیین عمق گذار از معدن روباز به زیرزمینی تعیین کنند. برای پرداختن به این چالش، این مطالعه روشی را برای محاسبه هزینه‌های زیست‌محیطی جلوگیری، کاهش یا جبران اثرات نامطلوب معدن بر کیفیت هوا، آب، اکولوژی، زمین و اقتصاد به ازای هر تن کانسنگ استخراج‌شده با استفاده از معادن سطحی یا زیرزمینی پیشنهاد می‌کند. این هزینه‌ها باید هنگام تعیین ارزش اقتصادی بلوک در نظر گرفته شود. هزینه‌های زیست‌محیطی استخراج معدن را می‌توان با استفاده از رابطه ۲ محاسبه کرد. داده‌ها و اطلاعات حاصل از مطالعه موردی معدن مس سونگون برای اجرای رابطه ۲ و تعیین هزینه‌های زیست‌محیطی جلوگیری، کاهش یا جبران اثرات نامطلوب زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی مورد استفاده قرار گرفت [۶]. هزینه‌های زیست‌محیطی جلوگیری، کاهش یا جبران اثرات نامطلوب زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی به ازای هر تن کانسنگ استخراج‌شده برای روش روباز تعیین شد. علاوه بر این، از آنجا که معدن مورد مطالعه قابلیت تخریب بلوکی را داشت، هزینه‌های زیست‌محیطی جلوگیری، کاهش یا جبران اثرات



شکل ۳- فرآیند و فیلترهای در نظر گرفته‌شده در حل‌کننده

- **فیلتر ۳:** این فیلتر تناژ استخراج شده را محاسبه می‌کند و در صورتی که در محدوده مشخص شده باشد (بخش OP) از آن عبور می‌کند.
- **فیلتر ۴:** این فیلتر ابتدا تناژ فرآوری را محاسبه می‌کند و در صورتی که در محدوده داده شده باشد (بخش OP) از آن عبور می‌کند.
- **فیلتر ۵:** در این فیلتر عیار کانسنگ در صورتی که عیار حد را برآورده کند (بخش OP) از آن عبور می‌کند.
- **فیلتر ۶:** در این فیلتر محدودیت‌های آماده‌سازی عملیاتی و آماده‌سازی سرمایه‌ای بررسی می‌شود. محدودیت‌های مربوط به ظرفیت ناوگان و اولویت آماده‌سازی بررسی می‌شود. اگر محدودیت‌ها برآورده شوند، اجازه عبور از فیلتر داده می‌شود.
- **فیلتر ۷:** در این فیلتر تمامی محدودیت‌های UG (به‌جز

را برای سیاست‌گذاران و شرکت‌های معدنی ارائه دهد تا تصمیمات آگاهانه‌ای اتخاذ کنند که حفاظت از محیط زیست و پایداری را در اولویت قرار می‌دهند.

۳-۲- تعیین عمق و زمان بهینه گذار (مطالعه موردی: معدن مس سونگون)

معدن مس سونگون در ۳۰ کیلومتری شهرستان ورزقان از توابع استان آذربایجان شرقی و در ۱۲۰ کیلومتری تبریز مرکز آن استان واقع شده است. این معدن از نظر آب و هوایی جزو اقلیم‌های سرد و کوهستانی محسوب می‌شود. کانسار مس سونگون در زون آتشفشانی ارومیه - دختر که بخشی از کمربند متالورژی آلپ هیمالیاست، قرار دارد. ذخیره این کانسار از نوع مس پورفیری و سنگ میزبان کانی‌سازی کوارتز مونزونیت متعلق به دوران سوم زمین‌شناسی و کانی‌های عمده آن کالکوسیت، کالکوپیریت، بورنیت و کولیت است.

چارچوب کامل MILP همانطور که در رابطه‌های ۴ تا ۵۳ ارائه شده است، در ذخیره مس سونگون پیاده‌سازی شد. مدل بلوکی زمین‌شناسی معدن مس سونگون دارای بلوک‌های با ابعاد مختلف بود که به ابعاد بلوک واحد $12/5 \times 25 \times 25$ متر تبدیل شد. برای یکپارچه‌سازی ابعاد بلوک ابتدا برنامه‌ای در محیط متلب نوشته شد. این کد به رایانه وارد شد و روی داده‌های مدل بلوکی اولیه معدن مس سونگون اعمال و بلوک‌های با ابعاد $12/5 \times 25 \times 25$ ایجاد شد. کل تناژ ماده معدنی طبق آخرین مدل بلوکی معدن که در حال حاضر با آن کار می‌کنند، 1400896037 تن با میانگین عیار $0/55$ درصد است. حداقل عیار ماده معدنی $0/18$ و حداکثر مقدار آن $2/8$ درصد است. وزن مخصوص باطله $2/4$ و برای ماده معدنی حداقل $2/23$ و حداکثر $3/3$ است. تعداد کل بلوک ماده معدنی قبل از یکپارچه‌سازی 3559583 است. شکل ۴ هیستوگرام آماری مدل ماده معدنی را نشان می‌دهد. شکل ۵ طرحی از کانسار معدن مس سونگون که بلوک‌های معدنی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه توزیع عیار ماده معدنی از سمت جنوب‌غربی به سمت شمال‌شرقی روند کاهشی را نشان می‌دهد به همین دلیل جهت استخراج در بخش زیرزمینی (تخریب بلوکی) از سمت جنوب‌غربی به سمت شمال‌شرقی در نظر گرفته شد. کانسار مس سونگون در مقاطع بالای مدل بلوکی کانی‌سازی عیار پایین را نشان می‌دهد، در حالی که بخش‌های میانی و پایین عیار بالاتر را نشان می‌دهد. جدول ۳ توصیف پارامتری مطالعه موردی معدن مس سونگون است.

نامطلوب زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی برای روش تخریب بلوکی با توجه به اطلاعات معدن تعیین شد.

۳-۱-۱- هزینه‌های زیست‌محیطی گزینه روباز

هزینه‌های زیست‌محیطی جلوگیری، کاهش یا جبران اثرات نامطلوب زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی گزینه روباز برابر است با:

$$C_E = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{25} C_{ij} \times (1 - U_{ij}) \times (F_{HD} \times F_{MS} \times F_{LM} \times F_{MM} \times F_{TM} \times F_{EES}) = 0.189349 \times 0.95428 (0.783 \times 1 \times 0.75 \times 1 \times 0.2753 \times 1) = 0.02927 \text{ \$/ton Ore (and Waste)}$$

۳-۱-۲- هزینه‌های زیست‌محیطی گزینه تخریب بلوکی

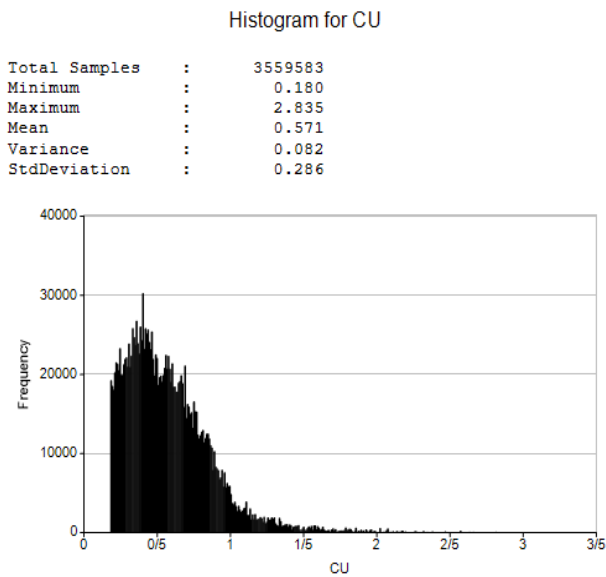
هزینه‌های زیست‌محیطی جلوگیری، کاهش یا جبران اثرات نامطلوب زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی گزینه تخریب بلوکی برابر است با:

$$C_E = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{25} C_{ij} \times (1 - U_{ij}) \times (F_{HD} \times F_{MS} \times F_{LM} \times F_{MM} \times F_{TM} \times F_{EES}) = 0.189349 \times 0.95428 (0.783 \times 1 \times 0.75 \times 0.732673 \times 0.2753 \times 1) = 0.02145 \text{ \$/ton Ore}$$

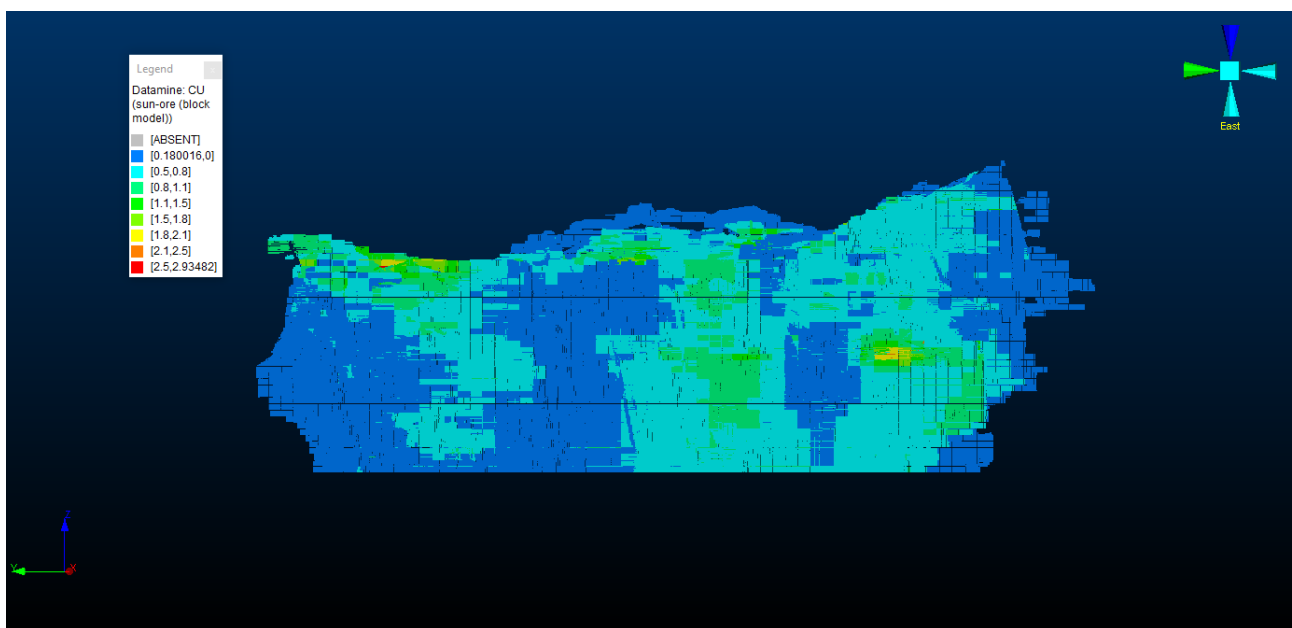
نتایج نشان داد که هزینه‌های زیست‌محیطی جلوگیری، کاهش یا جبران اثرات نامطلوب زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی به ازای هر تن کانسنگ استخراج شده به ترتیب $0/03$ و $0/02$ دلار برای گزینه‌های استخراج روباز و تخریب بلوکی حاصل شد. از آنجا که اثرات نامطلوب زیست‌محیطی فعالیت‌های روباز بیش‌تر از فعالیت‌های تخریب بلوکی است، بودجه بیش‌تری برای پیشگیری، کاهش و جبران اثرات زیست‌محیطی روباز در مقایسه با تخریب بلوکی مورد نیاز است. بر اساس رابطه ۲ می‌توان نتیجه گرفت که عواملی مانند شاخص توسعه انسانی، مقیاس معدن، موقعیت معدن نسبت به سکونت‌گاه، روش استخراج، نوع ماده معدنی و حساسیت‌های زیست‌محیطی و اکوسیستمی منطقه معدنی بر مقدار نهایی تعیین شده برای هزینه‌های زیست‌محیطی جلوگیری، کاهش یا جبران اثرات نامطلوب زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی تاثیر می‌گذارند. بنابراین هر چه معدن در کشور توسعه‌یافته و پرجمعیت‌تر باشد، نزدیک به مناطق مسکونی و در منطقه‌ای با حساسیت بالا قرار گیرد، هزینه‌های زیست‌محیطی پیشگیری، کاهش یا جبران اثرات نامطلوب زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی بیش‌تر می‌شود. علاوه بر این، هزینه‌های زیست‌محیطی جلوگیری، کاهش یا جبران اثرات نامطلوب زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی با افزایش مقیاس معدن افزایش می‌یابد. این مطالعه می‌تواند بینش‌های ارزشمندی

جدول ۳- توصیف پارامتری معدن مس سونگون

مقدار	واحد	شرح
۱۴۰۰۸۹۶۰۳۷	تن	کل مواد معدنی مینیرالیزه شده
۳۵۵۹۵۸۳ (قبل از یکپارچه سازی) ۲۲۸۴۰۳۵ (بعد از یکپارچه سازی)	تعداد	کل بلوک های عیاردار
۱۴۳۰۴۸۵۷	تعداد	مجموع کل بلوک های عیاردار و باطله محض
۲۴۵۲	-	تراز بالا
۱۴۰۰	-	تراز پایین
۶۳۴	تعداد	افق یا پله با ارتفاع ۱۲/۵ متر
۰/۱۸	درصد	حداقل عیار مس
۲/۸۳۴	درصد	حداکثر عیار مس
۰/۵۴۹	درصد	میانگین عیار مس
۰/۰۸۲	درصد	واریانس
۰/۲۸۶	درصد	انحراف استاندارد



شکل ۴- هیستوگرام آماری مدل ماده معدنی



شکل ۵- برش مقطعی شمال شرقی - جنوب غربی

۳-۲-۱- داده های اقتصادی، فنی، استخراج و فرآوری برای معدن مس سونگون

ظرفیت فرآوری سالانه بر اساس ظرفیت کارخانه پیشنهادی برای معدن تعیین می شود، در حالی که ظرفیت های استخراج سالانه از نسبت باطله و کانسنگ کانسار استنباط می شود. با توجه به عمیق تر شدن محدوده استخراج هزینه افزایشی پله ۰/۰۳ دلار به ازای هر پله ۱۲/۵ متری به عنوان هزینه متغیر

معدن روباز استفاده شد. داده های اقتصادی، فنی، استخراجی و فرآوری مورد استفاده برای ارزیابی ذخایر مس همانطور که در جدول ۴ خلاصه شده است با استفاده از داده های مربوط به معدن مس سونگون و گزارش های مطالعات پیش امکان سنجی برخی شرکت های معدنی برآورد شد. تمام پارامترهای اقتصادی مورد استفاده در محاسبات به دلار آمریکا است.

جدول ۴- داده‌های اقتصادی، فنی، استخراجی و فرآوری برای ارزیابی ذخیره مس

ردیف	پارامتر	واحد	مقدار
۱	هزینه زیست‌محیطی جبران، کاهش و پیش‌گیری اثرات نامطلوب زیست‌محیطی معدن روباز	دلار بر تن	۰/۰۳
۲	هزینه زیست‌محیطی جبران، کاهش و پیش‌گیری اثرات نامطلوب زیست‌محیطی معدن زیرزمینی	دلار بر تن	۰/۰۲
۳	هزینه استخراج روباز	دلار بر تن	۲/۲۵
۴	هزینه استخراج زیرزمینی	دلار بر تن	۴/۵
۵	هزینه فرآوری	دلار بر تن	۵/۵
۶	هزینه فروش	دلار بر کیلوگرم	۰/۶
۷	هزینه (جریمه) برای انحراف مطلوب یا ارسال بیش از حد کانسنگ به کارخانه فرآوری از اهداف مورد انتظار (حد مطلوب تناژ کانسنگ ارسالی)	دلار بر تن	۱/۵
۸	هزینه (جریمه) برای انحراف نامطلوب یا مقدار کمبود کانسنگ ارسالی به کارخانه فرآوری از اهداف مورد انتظار (حد مطلوب تناژ کانسنگ ارسالی)	دلار بر تن	۴
۹	هزینه (جریمه) برای انحراف مطلوب یا ارسال کانسنگ به کارخانه فرآوری با عیار بیش از اهداف مورد انتظار (حد مطلوب عیار ارسالی)	دلار بر تن	۰
۱۰	هزینه (جریمه) برای انحراف نامطلوب یا ارسال کانسنگ به کارخانه فرآوری با عیار کم‌تر از اهداف مورد انتظار (حد مطلوب عیار ارسالی)	دلار بر کیلوگرم	۱۲
۱۱	هزینه اضافی (بالاسری) به ازای هر تن کانسنگ برای استخراج و فرآوری در دوره t	دلار بر تن	۱/۵
۱۲	قیمت فروش مس	دلار بر کیلوگرم	۸
۱۳	نرخ تنزیل	درصد	۲۰/۵
۱۴	حقوق دولتی	دلار بر کیلوگرم	۰/۸۰۰
۱۵	بازیابی فرآوری	درصد	۸۷
۱۶	حداکثر ظرفیت استخراج کانسنگ در بخش روباز	میلیون تن بر سال	۴۶
۱۷	حداقل ظرفیت استخراج کانسنگ در بخش روباز	میلیون تن بر سال	۳۷
۱۸	حداکثر ظرفیت استخراج سنگ در بخش روباز	میلیون تن بر سال	۱۴۰
۱۹	حداقل ظرفیت استخراج سنگ در بخش روباز	میلیون تن بر سال	۳۷
۲۰	حداکثر ظرفیت استخراج کانسنگ در بخش زیرزمینی	میلیون تن بر سال	۲۵
۲۱	حداقل ظرفیت استخراج کانسنگ در بخش زیرزمینی	میلیون تن بر سال	۱۵
۲۲	حداکثر ظرفیت استخراج سنگ در بخش زیرزمینی	میلیون تن بر سال	۳۰
۲۲	حداقل ظرفیت استخراج سنگ در بخش زیرزمینی	میلیون تن بر سال	۱۵
۲۳	هزینه افزایشی پله نسبت به تراز مینا (تراز سنگ شکن معدن سونگون)	دلار بر تن	۰/۰۳
۲۴	هزینه آماده‌سازی عملیاتی	دلار بر متر	۳۵۰۰
۲۵	هزینه آماده‌سازی سرمایه‌ای (دسترسی اولیه)	دلار بر متر	۷۵۰۰
۲۶	حداکثر آماده‌سازی عملیاتی	متر در سال	۱۵۰۰۰
۲۷	حداقل آماده‌سازی عملیاتی	متر در سال	۰
۲۸	حداکثر آماده‌سازی سرمایه‌ای (دسترسی اولیه یا چاه)	متر در سال	۹۰
۲۹	حداقل آماده‌سازی سرمایه‌ای (دسترسی اولیه یا چاه)	متر در سال	۰

ردیف	پارامتر	واحد	مقدار
۳۰	حداکثر آماده‌سازی چاه تهویه اصلی	متر در سال	۱۲۰
۳۱	حداقل آماده‌سازی چاه تهویه اصلی	متر در سال	۰
۳۲	هزینه آماده‌سازی تهویه اصلی	دلار بر متر	۸۰۰
۳۳	هزینه نگهداری آماده‌سازی عملیاتی بازکننده‌ها	دلار بر متر	۵۰۰
۳۴	هزینه نگهداری نقاط تخلیه	دلار بر تن	۸۰
۳۵	فاکتور تاخیر نگهداری سنگ برای آماده‌سازی عملیاتی	طول در سال	۰/۲۵
۳۶	فاکتور تاخیر نگهداری نقاط تخلیه	تن در سال	۰/۱
۳۷	رقیق‌شدگی در بخش روباز	درصد	۸
۳۸	بازیابی استخراج بخش روباز	درصد	۹۷
۳۹	رقیق‌شدگی در بخش زیرزمینی	درصد	۲۰
۴۰	بازیابی استخراج بخش زیرزمینی	درصد	۸۸
۴۱	حد مطلوب تناژ کانسنگ ارسالی به کارخانه فرآوری با روش روباز در دوره t	میلیون تن بر سال	۵۶
۴۲	حد مطلوب تناژ کانسنگ ارسالی به کارخانه فرآوری با روش زیرزمینی در دوره t	میلیون تن بر سال	۲۵
۴۳	حد مطلوب عیار کانسنگ ارسالی به کارخانه فرآوری با روش روباز در دوره t	درصد	۰/۸
۴۴	حد مطلوب عیار کانسنگ ارسالی به کارخانه فرآوری با روش زیرزمینی در دوره t	درصد	۱/۳
۴۵	حد بالای ظرفیت مورد نیاز فرآوری کانسنگ حاصل از استخراج روباز در دوره t	میلیون تن بر سال	۵۶
۴۶	حد پایین ظرفیت مورد نیاز فرآوری کانسنگ حاصل از استخراج روباز در دوره t	میلیون تن بر سال	۲۸
۴۷	حد بالای ظرفیت مورد نیاز فرآوری کانسنگ حاصل از استخراج زیرزمینی در دوره t	میلیون تن بر سال	۲۵
۴۸	حد پایین ظرفیت مورد نیاز فرآوری کانسنگ حاصل از استخراج زیرزمینی در دوره t	میلیون تن بر سال	۱۵
۴۹	حد بالای میانگین عیار قابل قبول عنصر برای استخراج روباز در دوره t	درصد	۰/۶
۵۰	حد پایین میانگین عیار قابل قبول عنصر برای استخراج روباز در دوره t	درصد	۰/۱۸
۵۱	حد بالای میانگین عیار قابل قبول عنصر برای استخراج زیرزمینی در دوره t	درصد	۱/۳
۵۲	حد پایین میانگین عیار قابل قبول عنصر برای استخراج زیرزمینی در دوره t	درصد	۰/۵۴
۵۳	ابعاد بلوک در راستای z	متر	۱۲/۵
۵۴	ابعاد بلوک در راستای y	متر	۲۵
۵۵	ابعاد بلوک در راستای x	متر	۲۵

۲-۲-۳- نتایج و بحث

دلار) بیشتر از گزینه استخراج مستقل OP و ۵/۸ برابر گزینه مستقل UG (یعنی ۶/۲۱ میلیارد دلار بیشتر) بود. NPV گزینه استخراج ترکیبی بدون در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی تقریباً ۷/۰ درصد (۰/۵ میلیارد دلار) بیشتر از گزینه مستقل استخراج OP و ۵/۸ برابر گزینه مستقل UG (یعنی ۶/۳ میلیارد دلار بالاتر) بود (جدول ۵). بنابراین، عمر معدن با در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی و بدون توجه به هزینه‌های زیست‌محیطی ۱۳ سال (۹ سال OP و ۴ سال UG) به بهترین وجه با یک گزینه استخراج متوالی OP-UG مورد بهره‌برداری قرار

ارزیابی معدن مس سونگون با استفاده از مدل MILP نشان داد که عملیات استخراج ترکیبی متوالی با بالاترین NPV ۷/۵ میلیارد دلار (با در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی) و ۷/۶ میلیارد دلار (بدون در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی) گزینه معدنی ترجیحی خواهد بود. مدل MILP یکپارچه برای ارزیابی بدنه کانسنگ برای یک گزینه OP مستقل و یک گزینه مستقل UG اصلاح شد. NPV گزینه استخراج ترکیبی با در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی تقریباً ۵/۸ درصد (۰/۴ میلیارد

می‌گیرد. دلیل نزدیک بودن ارزش خالص فعلی حالت روباز مستقل با حالت ترکیبی مربوط به شکل ذخیره است که گسترش عمقی زیاد ندارد. تفاوت اصلی عمر معدن و دسترسی به منابع مالی است که در حالت ترکیبی بسیار سریع‌تر از استخراج مستقل روباز است.

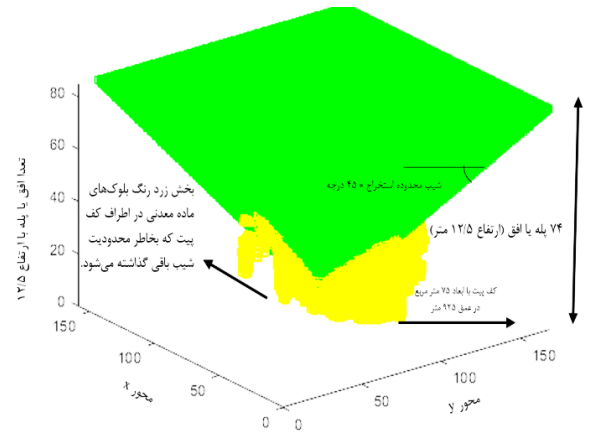
جدول ۵- نتایج مدل MILP یکپارچه برای معدن مس سونگون

گزینه استخراج	NPV (میلیارد دلار)	NPV در مقایسه با OPUG	عیار میانگین (درصد)	تناژ فرآوری شده (میلیون تن)	تناژ کل سنگ (باطله و ماده معدنی بر حسب میلیارد تن)	منابع برداشت شده نسبت به کل کانسنگ (۱/۴ میلیون تن) به درصد	عمر معدن (سال)	افق (عمق)	با در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی		
									استخراج روباز	استخراج زیرزمینی	استخراج ترکیبی
استخراج روباز	۷۱	- ۰/۴۱	۰/۴۶	۷۱۸	۳/۳۶	۵۲	۲۵	۷۴ (۹۲۵ متر)			
استخراج زیرزمینی	۱۳	- ۶/۲	۰/۴۷	۲۲۰	۰/۲۹	۱۶	۱۰	۸۵ تا ۵۱ رو به بالا (۴۲۵ متر)			
استخراج ترکیبی	۷/۵	-	۰/۴۶	۴۹۸	۱/۳	۳۶	۱۳	تا افق ۷۱ روباز (۸۸۷/۵) و از ۷۲ تا ۸۵ زیرزمینی (۱۷۵ متر)			
گزینه استخراج	NPV (میلیارد دلار)	NPV در مقایسه با OPUG	عیار میانگین (درصد)	تناژ فرآوری شده (میلیون تن)	تناژ کل سنگ (باطله و ماده معدنی بر حسب میلیارد تن)	منابع برداشت شده نسبت به کل کانسنگ (۱/۴ میلیون تن) به درصد	عمر معدن (سال)	افق (عمق)	بدون در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی		
استخراج روباز	۷۱	- ۰/۵	۰/۴۷	۷۲۰	۳/۴۸	۵۱/۳۴	۲۵	۷۷ (۹۶۲/۵ متر)			
استخراج زیرزمینی	۱۳	- ۶/۳	۰/۴۷	۲۲۰	۰/۲۹	۱۵/۵۴	۱۰	۸۵ تا ۵۴ رو به بالا (۳۸۷/۵ متر)			
استخراج ترکیبی	۷/۶	-	۰/۴۶	۵۰۰	۱/۳	۳۵/۶۵	۱۳	تا افق ۷۶ روباز (۹۵۰) و از ۷۷ تا ۸۵ زیرزمینی (۱۱۲/۵ متر)			

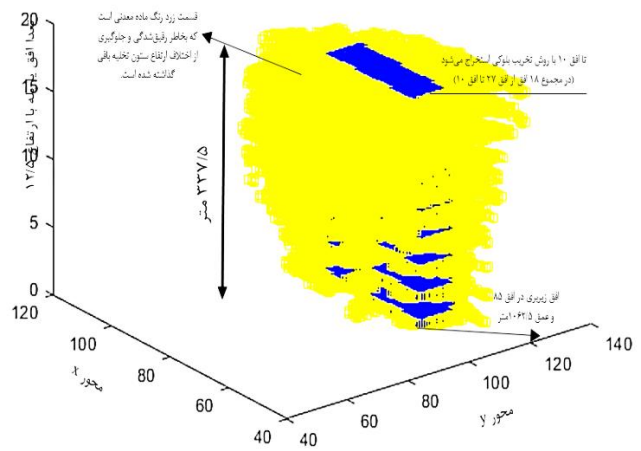
معدن زیرزمینی مستقل و محدوده ترکیبی روباز و محدوده تخریب بلوکی که پایین‌تر از کف کاواک روباز است را نشان می‌دهد. ۷۱ افق (یا پله) اول با روش روباز استخراج در نظر گرفته شد در حالی که افق‌های ۷۲ تا ۸۵ با روش استخراج تخریب بلوکی در نظر گرفته شد.

عمر معدن گزینه استخراج مستقل روباز ۲۵ سال بود که به ترتیب حدود ۲/۵ و ۲ برابر عمر معدن گزینه استخراج مستقل زیرزمینی و گزینه استخراج ترکیبی روباز - زیرزمینی بود. شکل ۵، یک نمای مقطعی از بدنه کانسنگ که محدوده کاواک روباز مستقل، محدوده

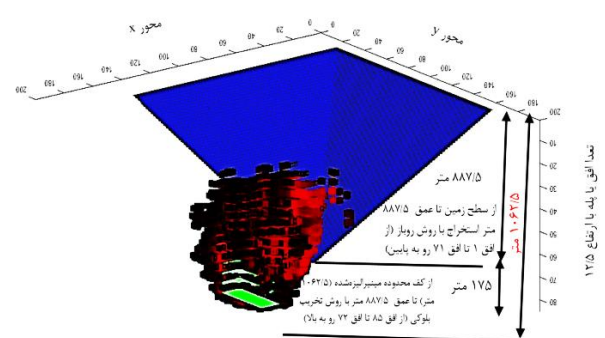
شکل ۶ استراتژی استخراج (فرآوری) کانسنگ و میانگین عیار کانسنگ فرآوری شده با هر گزینه استخراج در معدن مس سونگون را نشان می‌دهد. در شکل ۶، روند سالانه میانگین عیار کانسنگ استخراج شده و فرآوری شده با هر دو گزینه استخراج نشان می‌دهد که روش بهینه‌سازی، مانند تمام موارد استخراج، مواد با عیار نسبتاً بالا را بر بلوک‌های با عیار پایین‌تر در سال‌های اولیه عمر معدن اولویت‌بندی می‌کند. عمر معدن در حالت استخراج ترکیبی ۱۳ سال تعیین شده است. استخراج معدن ۴۹۷ میلیون تن که حدود ۳۵/۵۲ درصد از کل ذخایر معدنی موجود ۱/۴ میلیارد تن را تشکیل می‌دهد، به‌دست آمده است. حدود ۴۰۳ میلیون تن کانسنگ توسط عملیات استخراج روباز استخراج می‌شود در حالی که ۹۴ میلیون تن کانسنگ با عملیات استخراج زیرزمینی استخراج می‌شود. کانسنگ باقی‌مانده (۹۰۳ میلیون تن - حدود ۷۴ درصد) به‌دلیل برخی محدودیت‌ها به کارخانه فرآوری ارسال نشد. زمان‌بندی کل مواد سنگ استخراج شده شامل کانسنگ و سنگ‌های باطله در شکل ۷ نشان داده شده است. در سال ۶، باطله کم‌تری به منظور دسترسی به مواد معدنی برای استخراج روباز قبل از تغییر به گزینه سودآورتر استخراج زیرزمینی برداشت می‌شود. بنابراین، در سال ۶ عمر معدن مقدار فشار کم‌تری برای دسترسی به مواد معدنی برای استخراج وجود دارد که باعث می‌شود عملیات استخراج روباز بازدهی بیش‌تری داشته باشد.



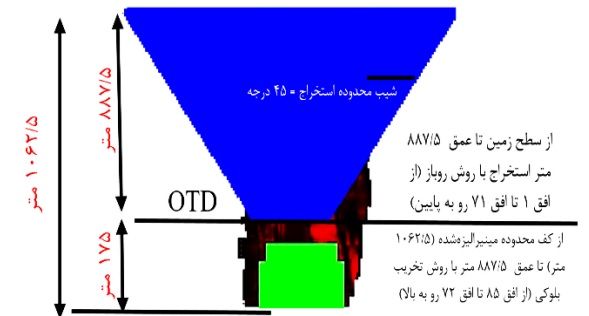
الف - محدوده روباز در استخراج روباز مستقل معدن مس سونگون



ب - محدوده استخراج زیرزمینی در استخراج زیرزمینی مستقل



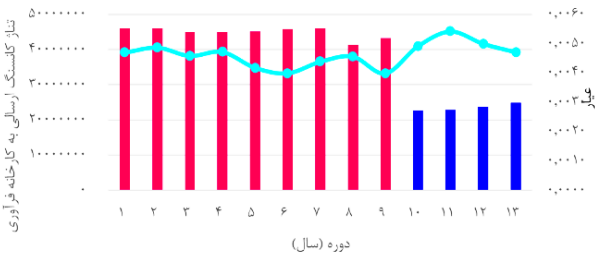
پ - محدوده روباز و محدوده تخریب بلوک در حالت استخراج ترکیبی



ت - مقطع محدوده روباز و محدوده تخریب بلوک در حالت استخراج ترکیبی

شکل ۵ - نمای مقطعی از مدل بلوکی

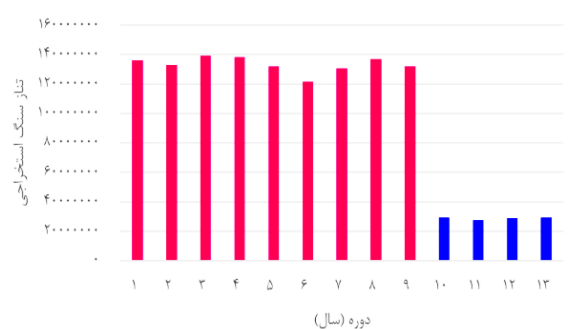
تراز کانسنگ استخراجی روباز (قرمز) تراز کانسنگ استخراج تخریب بلوکی (آبی)
عیار کانسنگ استخراج شده در حالت ترکیبی (خط سبز)



شکل ۶ - استراتژی استخراج (فرآوری) کانسنگ و میانگین عیار

کانسنگ فرآوری شده با هر گزینه

تراز سنگ استخراج شده از بخش روباز (قرمز) تراز سنگ استخراج شده از بخش تخریب بلوکی (آبی)



شکل ۷ - برنامه زمان‌بندی استخراج (کانسنگ و باطله) برای هر

گزینه معدن

جدول ۶ زمان بندی تولید کانسنگ، سنگ (باطله و کانسنگ) و میانگین عیار در سال های مختلف عمر معدن برای سه حالت استخراج مستقل روباز، استخراج مستقل زیرزمینی و استخراج ترکیبی را ارائه کرده است.

جدول ۶- زمان بندی تولید کانسنگ، سنگ (باطله و کانسنگ) و میانگین عیار در سال های مختلف عمر معدن برای سه حالت استخراج مستقل روباز، استخراج مستقل زیرزمینی و استخراج ترکیبی

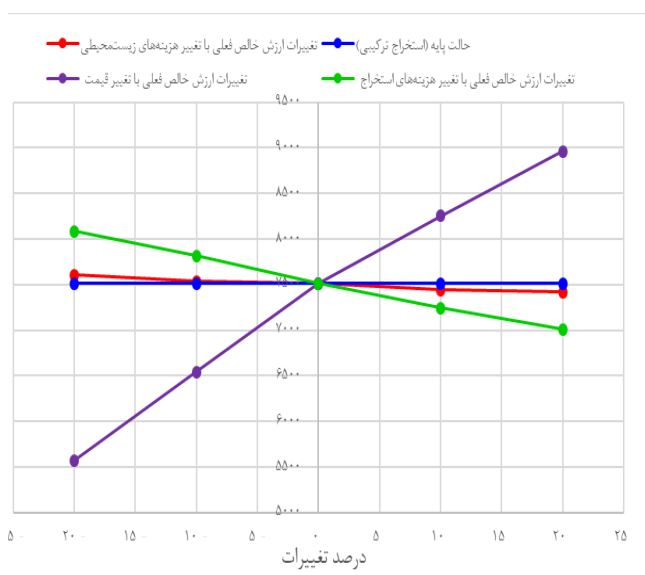
گزینه استخراج	سال	تناژ کانسنگ استخراج شده (میلیون تن)	تناژ سنگ برداشت شده (میلیون تن)	میانگین عیار (درصد)	ابعاد کف محدوده استخراجی در OP و UG (متر مربع)	ارزش خالص فعلی (میلیون دلار)
استخراج روباز مستقل	۱	۴۶	۱۳۶	۰/۴۷	۱۰۰	۱۴۵۰
	۲	۴۶	۱۳۳	۰/۴۹	۱۲۵	۱۲۴۰
	۳	۴۵	۱۴۰	۰/۴۶	۷۵	۹۹۲
	۴	۴۵	۱۳۹	۰/۴۷	۷۵	۷۹۷
	۵	۴۵	۱۳۲	۰/۴۲	۷۵	۶۳۵
	۶	۴۶	۱۲۱	۰/۴۰	۵۰	۳۲۴
	۷	۴۶	۱۳۱	۰/۴۴	۱۵۰	۲۴۰
	۸	۴۱	۱۳۷	۰/۴۶	۷۵	۳۳۷
	۹	۴۳	۱۳۲	۰/۴۰	۷۵	۲۶۲
	۱۰	۳۶	۱۳۹	۰/۴۷	۷۵	۲۰۳
	۱۱	۳۲	۱۴۰	۰/۴۵	۵۰	۱۵۸
	۱۲	۳۰	۱۳۹	۰/۴۸	۵۰	۸۰
	۱۳	۲۵	۱۳۹	۰/۴۶	۷۵	۸۸
	۱۴	۲۶	۱۳۹	۰/۴۳	۷۵	۷۳
	۱۵	۲۲	۱۲۸	۰/۵۳	۷۵	۵۸
	۱۶	۲۷	۱۳۰	۰/۴۱	۵۰	۴۴
	۱۷	۱۹	۱۲۶	۰/۴۹	۷۵	۳۲
	۱۸	۱۶	۱۴۰	۰/۵۵	۵۰	۲۲
	۱۹	۱۸	۱۳۷	۰/۴۹	۱۰۰	۲۱
	۲۰	۱۸	۱۱۴	۰/۴۴	۷۵	۱۵
۲۱	۱۱	۱۴۰	۰/۵۲	۱۲۵	۹	
۲۲	۱۰	۱۳۹	۰/۴۸	۷۵	۷	
۲۳	۹	۱۱۸	۰/۵۴	۱۲۵	۶	
۲۴	۸	۱۴۰	۰/۴۳	۷۵	۳	
۲۵	۷	۱۴۰	۰/۴۰	۷۵	۲	
استخراج زیرزمینی مستقل (سال ۶ از پایین ترین افق شروع می شود)	۶	۲۳	۲۹	۰/۴۹	۵۰۰	۲۶۱
	۷	۲۳	۲۸	۰/۵۴	۴۵۰	۲۳۶
	۸	۲۴	۲۹	۰/۵۰	۴۲۵	۱۸۵
	۹	۲۵	۳۰	۰/۴۷	۳۷۵	۱۵۰
	۱۰	۲۵	۳۰	۰/۴۸	۳۷۵	۱۲۸

گزینه استخراج	سال	تناژ کانسنگ استخراج شده (میلیون تن)	تناژ سنگ برداشت شده (میلیون تن)	میانگین عیار (درصد)	ابعاد کف محدوده استخراجی در OP و UG (متر مربع)	ارزش خالص فعلی (میلیون دلار)
استخراج ترکیبی	۱۱	۲۴	۳۰	۰/۵۱	۳۷۵	۱۱۰
	۱۲	۲۱	۳۰	۰/۴۸	۳۷۵	۸۱
	۱۳	۲۱	۲۹	۰/۴۳	۳۵۰	۶۰
	۱۴	۱۸	۲۹	۰/۴۴	۳۵۰	۴۸
	۱۵	۱۷	۲۷	۰/۴۰	۳۵۰	۳۳
	۱	۴۶	۱۳۶	۰/۴۷	۱۰۰	۱۴۵۰
	۲	۴۶	۱۳۳	۰/۴۹	۱۲۵	۱۲۴۰
	۳	۴۵	۱۳۹	۰/۴۶	۷۵	۹۹۲
	۴	۴۵	۱۳۹	۰/۴۷	۷۵	۷۹۷
	۵	۴۵	۱۳۲	۰/۴۲	۷۵	۶۳۵
	۶	۴۶	۱۲۱	۰/۴۰	۵۰	۵۲۴
	۷	۴۶	۱۳۱	۰/۴۴	۱۵۰	۴۴۰
	۸	۴۱	۱۳۷	۰/۴۶	۷۵	۳۳۷
	۹	۴۳	۱۳۲	۰/۴۰	۷۵	۲۶۲
	۱۰	۲۳	۲۹	۰/۴۷	۴۲۵	۲۶۲
زیرزمینی	۱۱	۲۳	۲۸	۰/۵۰	۳۷۵	۲۳۶
	۱۲	۲۴	۲۹	۰/۵۴	۳۵۰	۱۸۵
	۱۳	۲۵	۲۹	۰/۴۹	۳۵۰	۱۵۰

۳-۲-۳- تجزیه و تحلیل حساسیت بیت برای معدن مس سونگون

حساسیت نتایج به قیمت مس، هزینه استخراج و هزینه زیست‌محیطی استخراج ترکیبی با مدل MILP ارزیابی شد. این تجزیه و تحلیل حساسیت برای بررسی پارامترهای اقتصادی انتخاب شده که بر انتخاب گزینه(های) استخراج کانسار تاثیر می‌گذارد، انجام شد. نمودار حساسیت در شکل ۸ نشان داده شده است. در شکل ۸، مدل MILP بیش‌ترین حساسیت را نسبت به قیمت بازار مس دارد و به دنبال آن به ترتیب نسبت به هزینه‌های استخراج بخش روباز و زیرزمینی و هزینه‌های زیست‌محیطی بخش روباز و زیرزمینی دارد. برای معدن مس سونگون، حدود ۱۰ درصد افزایش در قیمت مس (از ۸ به ۸/۸ دلار در هر کیلوگرم) افزایش ۷۴۵ میلیون دلار NPV گزینه استخراج ترکیبی را نشان داد. به‌طور مشابه، هنگامی که هزینه استخراج حدود ۲۰ درصد کاهش داده شد، ۵۷۶ میلیون دلار NPV گزینه استخراج ترکیبی را افزایش داد. با این حال، NPV نسبت به تغییرات هزینه‌های زیست‌محیطی

حساسیت کم‌تری نشان داد، زیرا تغییری قابل توجهی در NPV استخراج ترکیبی ایجاد نکرد.



شکل ۸- ارزیابی حساسیت پارامترهای اقتصادی منتخب مورد استفاده در اجرای MILP

۴- نتیجه گیری

هدف اصلی در این تحقیق بهینه‌سازی عمق گذار از استخراج روباز به زیرزمینی است. در این راستا سعی شد با بررسی و مطالعه انواع روش‌های بهینه‌سازی در این زمینه، بهترین روش بهینه‌سازی انتخاب و برای تعیین عمق بهینه گذار از استخراج روباز به زیرزمینی در معدن مس سونگون به کار گرفته شود. با توجه به مطالعات انجام‌شده، به‌طور خلاصه چهار روش معمول بهینه‌سازی عبارت از مدل‌های تمرین عملیاتی، مدل‌های بازی، مدل‌های شبیه‌سازی، مدل‌های برنامه‌ریزی تحلیلی یا ریاضی است. در این مطالعه، با توجه به مطالعه روش‌های بهینه‌سازی و بررسی شرایط مساله تعیین عمق گذار، از روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط که یکی از روش‌های رایج مدل‌های برنامه‌ریزی تحلیلی یا ریاضی است، استفاده شد. این مدل‌ها مساله را به‌طور کامل در شکل‌های ریاضی معمولاً با استفاده از یک معیار یا تابع هدف به همراه مجموعه‌ای از محدودیت‌ها که بر تصمیم‌گیری تأثیر می‌گذارد، نشان می‌دهند. رابطه ریاضی به تعیین راه‌حل بهینه در حضور مجموعه‌ای از محدودیت‌ها کمک می‌کند. اگرچه مدل‌های ریاضی مساله را بسیار ساده می‌کنند اما هزینه کم‌تری دارند و توسعه آن‌ها آسان است. برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، شکل خاص از IP است که در آن برخی از متغیرهای تصمیم برای گرفتن اعداد صحیح و برخی دیگر پیوسته محدود می‌شوند. متغیرهای پیوسته نشان می‌دهند که متغیرها می‌توانند کسری را به عنوان بخشی از فرآیند حل انتخاب کنند. با توجه به قدرت فرمولاسیون MILP و توانایی بالای روش در تولید راه‌حل‌های بهینه تولید (برخلاف مدل‌های مبتنی بر سناریو، مدل‌های عدد صحیح راه‌حل‌های دقیقاً بهینه تولید می‌کنند). به عنوان مدلی برای حل مساله گزینه‌های استخراج سطحی-زیرزمینی و مسایل بهینه‌سازی گذار در این تحقیق پیشنهاد شد. ساختار فرمول MILP با تابع هدف و مجموعه‌ای از محدودیت‌ها برای دستیابی به تصمیمات استخراج که معمولاً از متغیرهای پیوسته و اعداد صحیح تشکیل شده است، به خوبی تعریف شد.

بررسی مطالعات پیشین که به عنوان بخشی از این رساله انجام شد، محدودیت‌هایی را در بدنه دانش فعلی در گزینه‌های استخراج و بهینه‌سازی عمق گذار نشان داد. بررسی ادبیات نشان داد که احتمالاً تلاش قبلی برای فرموله کردن یک چارچوب برنامه‌ریزی ریاضی کلی بی‌طرفانه با در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی با ظرفیت تعیین اینکه آیا یک ذخیره معدنی باید با موارد زیر مورد بهره‌برداری قرار گیرد یا نه وجود نداشته است: استخراج مستقل روباز، استخراج

مستقل زیرزمینی، استخراج ترکیبی هم‌زمان با لنگه تاج، استخراج ترکیبی متوالی با و بدون لنگه تاج و ترکیبی از استخراج هم‌زمان و متوالی با لنگه تاج و/یا بدون لنگه تاج. مهم‌ترین محدودیت‌های مطالعات پیشین در زمینه گزینه‌های استخراج و چارچوب بهینه‌سازی گذار شامل یک یا چند مورد از موارد زیر است:

- عدم توجه به هزینه‌های پیشگیری.
- کاهش یا جبران اثرات نامطلوب زیست‌محیطی.
- جامع نبودن مدل‌های پیاده‌سازی و ساده‌سازی بیش از حد.
- عدم آرایه روش برای پیاده‌سازی در ذخایر واقعی بزرگ مقیاس.
- نتایج وابسته به سناریوهای از پیش تعیین‌شده.
- محاسبه ارزش خالص فعلی بر اساس بلوک (حذف متغیرهای پیوسته و استفاده از متغیر باینری).
- آرایه روش برای حالت دو بعدی.

بنابراین، این تحقیق در تلاش برای به‌کارگیری یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی در قالب برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای کمک به بدنه دانش و آرایه درک بهتری در زمینه گزینه‌های استخراج و بهینه‌سازی عمق گذار در مرحله پیش امکان‌سنجی پروژه معدن، پیشگام است. در مقایسه نتایج مدل با روش‌های قبلی تعیین حد روباز - زیرزمینی با توجه به جدول ۱ (از جمله نقاط ضعف و قوت مدل آرایه شده) ویژگی مدل آرایه‌شده در این تحقیق مطابق جدول ۷ است.

یک چارچوب برنامه‌ریزی ریاضی ناریب (بی‌طرفانه) به منظور ارزیابی استراتژیک یک ذخیره معدنی مناسب برای عملیات استخراج ترکیبی روباز و زیرزمینی توسعه داده شد. چارچوب بهینه‌سازی بر روی دو مطالعه موردی (ذخیره مس فرضی و معدن مس سونگون) پیاده‌سازی و آزمایش شد. اهداف این تحقیق که در مقدمه بیان شد در محدوده تحقیق محقق شده و نتایج زیر حاصل شد:

- معدن مس سونگون برای حالت استخراج ترکیبی روش روباز و تخریب بلوکی در حالت غیرهم‌زمان مناسب ارزیابی شد. عمق بهینه گذار برابر با ۸۸۷/۵ در تراز ۱۵۷۵ تعیین شد. در حالت استخراج ترکیبی NPV برابر با ۷/۵۱ میلیارد دلار شد. میزان تناژ باطله برداشت‌شده و کانسنگ استخراج‌شده در بخش روباز به ترتیب ۴۰۳/۵ و ۷۹۶/۴ میلیون تن باطله در طول عمر ۹ سال تعیین شد. برای بخش زیرزمینی تناژ کانسنگ استخراج‌شده و تناژ باطله برداشت‌شده به ترتیب برابر با ۹۴/۱ و ۲۱/۵ میلیون تن در طول عمر ۴ سال تعیین شد.

جدول ۷- ویژگی مدل ارایه شده در این تحقیق

ارایه دهنده(ها)		مطالعه فعلی
همکاران		۲۰۲۳
سال		۲۰۲۳
همزمانی و/یا غیرهمزمانی استخراج		غیرهمزمان
بُعد زمانی پول		لحاظ شده
روش استخراج		رو باز - تخریب
زیرزمینی ترکیب شده		بلوکی
تمرکز تحقیق		تعیین عمق گذار با بهینه‌سازی زمانبندی تولید و در نظر گرفتن هزینه های زیست محیطی
رویکرد		برنامه ریزی ریاضی
رویکرد استفاده شده (ماهیت)		مدل الگوریتم عدد صحیح مختلط (MILP)
نرم افزار کاربردی		پایتون ۵
هزینه زیست محیطی		✓
NPV		✓
IRR		✓
سود		-
عمر معدن		✓
نرخ تولید		✓
نسبت		-
باطله برداری		-
محدوده پیت نهایی		-
مبنای برنامه ریزی (بلوک/افق)		بلوک
زمان بندی تولید		OPUG
مکان و/یا زمان گذار		هر دو
بعد روش		سه بعدی
نوع ماده معدن		مس
نکات قابل توجه		لحاظ کردن هزینه های جبران اثرات نامطلوب زیست محیطی در طول چرخه حیات معدن - اجرا مدل در یک معدن بزرگ مقیاس واقعی - کد نویسی مدل در محیط پایتون

- ارزیابی معدن مس سونگون با استفاده از مدل MILP برای دو حالت با در نظر گرفتن هزینه های زیست محیطی و بدون در نظر گرفتن هزینه های زیست محیطی انجام شد. نتایج ارزیابی نشان داد که در صورت در نظر گرفتن هزینه های زیست محیطی عمق گذار (۸۸۷/۵ متر یا ۷۱ افق) کمتر از حالتی است که هزینه های زیست محیطی لحاظ نمی شود (۹۵۰ متر یا ۷۶ افق). با بررسی هر دو حالت، تغییری در عمر معدن مشاهده نشد.
 - مدل NPV بیشترین حساسیت را نسبت به قیمت بازار مس داشت و به دنبال آن به ترتیب نسبت به هزینه های استخراج بخش روباز و زیرزمینی و هزینه های زیست محیطی بخش روباز و زیرزمینی نشان داد.
 - رویکرد کمی برای تعیین هزینه های پیشگیری، کنترل و جبران اثرات نامطلوب زیست محیطی فعالیت استخراج در طول چرخه حیات معدن (قبل، حین و بعد از استخراج) توسعه داده شد.
 - روش بهینه سازی CEE به عنوان ستون فقرات گزینه های استخراج روباز - زیرزمینی و فرآیند برنامه ریزی گذار اجرا شد.
 - چارچوب بهینه سازی چند هدفه MILP بی طرفانه، NPV پروژه معدن را به حداکثر رساند در حالی که یک زمان بندی استخراج استراتژیک برای کانسنگ بخش روباز و زیرزمینی ایجاد کرد.
 - چارچوب MILP فرآیند CEE را برای انتخاب گزینه (های) استخراج بهینه (برای بهره برداری از یک ذخیره معدنی) از جمله استخراج مستقل روباز، استخراج مستقل زیرزمینی و استخراج ترکیبی متوالی بدون لنگه تاج به کار گرفت.
 - مدل MILP به طور همزمان موارد زمان و عمق بهینه گذار، استراتژی استخراج و برنامه زمانی برای گزینه (های) استخراج بهینه، عمر معدن، NPV پروژه معدن، الزامات آماده سازی دسترسی ثانویه زیرزمینی و الزامات آماده سازی دسترسی ثانویه زیرزمینی را تعیین می کند
 - چارچوب MILP یک گردش کار سیستمی را برای ارتقا همزمان بازیابی ذخیره و حداکثر بازگشت سرمایه در پروژه های معدنی فراهم کرد.
- مهم ترین محدودیت و ضعف تحقیق عدم توجه به اثرات نامطلوب فعالیت استخراج بر ملاحظات اجتماعی (عدم توجه به هزینه های اجتماعی) و عدم قطعیت های زمین شناسی و اقتصادی است.

تشکر و قدردانی

از متخصصان و پرسنل مجتمع مس سونگون برای همکاری و کمک در جمع‌آوری داده‌ها تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

منابع

1. بخت‌آور، ع. (۱۴۰۰). استخراج ترکیبی روباز و زیرزمینی، ارومیه، دانشگاه صنعتی ارومیه.
2. Chung, J., Asad, M. W. A., & Topal, E. (2022). Timing of transition from open-pit to underground mining: A simultaneous optimisation model for open-pit and underground mine production schedules. *Resources Policy*, 77, 102632.
3. Afum, B. O., & Ben-Awuah, E. (2021). A review of models and algorithms for surface-underground mining options and transitions optimization: some lessons learnt and the way forward. *Mining*, 1(1), 112-134.
4. Khaboushan, A. S., Osanloo, M., & Esfahanipour, A. (2020). Optimization of open pit to underground transition depth: An idea for reducing waste rock contamination while maximizing economic benefits. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123530.
5. Khaboushan, A. S., & Osanloo, M. (2020). A set of classified integer programming (IP) models for optimum transition from open pit to underground mining methods. *Natural Resources Research*, 29(3), 1543-1559.
6. Badakhshan, N., Shahriar, K., Afraei, S., & Bakhtavar, E. (2023). Determining the environmental costs of mining projects: A comprehensive quantitative assessment. *Resources Policy*, 82, 103561.
7. Li, X., Wang, Y., Yang, S., Xiong, J., & Zhao, K. (2021). Research progress in the mining technology of the slowly inclined, thin to medium thick phosphate rock transition from open-pit to underground mine. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 6(1), 319-334.
8. Ross, I. T., & Stewart, C. A. (2020, December). Issues with transitioning from open pits to underground caving mines. In *MassMin 2020: Proceedings of the Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining* (pp. 221-238). University of Chile.
9. Ren, S. T., Liu, Y., Yang, X. Y., Tong, D. G., & Ren, G. F. (2022). Extended Ultimate-Pit-Limit Methodology for Optimizing Surface-to-Underground Mining Transition in Metal Mines. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 1-9.
10. Bakhtavar, E., Namin, F. S., & Oraee, K. (2010). Practical final pit depth considering the future underground mining-a case study. In *2010 SME Annual Meeting & Exhibit, Phoenix, AZ* (pp. 153-156).
11. Bakhtavar, E., Shahriar, K., & Oraee, K. (2008, June). A model for determining optimal transition depth over from open-pit to underground mining. In *Proceedings of the 5th International Conference on Mass Mining* (pp. 393-400).
12. Bakhtavar, E., Shahriar, K., & Mirhassani, A. (2012). Optimization of the transition from open-pit to underground operation in combined mining using (0-1) integer programming. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112 (12), 1059-1064.
13. Newman, A. M., Yano, C. A., & Rubio, E. (2013). Mining above and below ground: Timing the transition. *IIE Transactions*, 45(8), 865-882.
14. Bakhtavar, E. (2013). Transition from open-pit to underground in the case of Chah-Gaz iron ore combined mining. *Journal of Mining Science*, 49, 955-966.
15. Chung, J., Topal, E., & Ghosh, A. K. (2016). Where to make the transition from open-pit to underground? Using integer programming. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(8), 801-808.
16. Badakhshan, N., Shahriar, K., Afraei, S., & Bakhtavar, E. (2023). Evaluating the impacts of the transition from open-pit to underground mining on sustainable development indexes. *Journal of Sustainable Mining*, 22(2), 154.

ضمائم

نمادها برای شاخص‌ها، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم به شرح جدول ۳-۸ تا ۳-۱۱ است.

جدول ۱- نمادهای استفاده‌شده در مدل برای شاخص‌ها

ردیف	شاخص	نماد شاخص
۱	شاخص برای دوره‌های زمان‌بندی در مدل	$t \in \{1, \dots, T\}$
۳	شاخص ردیفی بلوک‌های استخراج در راستای محور X در مدل	$i \in \{1, \dots, I\}$
۴	شاخص ردیفی بلوک‌های استخراج در راستای محور Y در مدل	$j \in \{1, \dots, J\}$
۵	شاخص ردیفی بلوک‌های استخراج در راستای محور Z در مدل	$k \in \{1, \dots, K\}$
۶	شاخص برای نمایش موقعیت بلوک‌ها در مدل	i, j, k
۷	شاخص برای آماده‌سازی‌های سرمایه‌ای زیرزمینی در مدل	$\underline{c} \in \{1, \dots, \underline{C}\}$
۸	شاخص برای آماده‌سازی‌های عملیاتی زیرزمینی در مدل	$\underline{d} \in \{1, \dots, \underline{D}\}$
۹	تعداد واحد استخراج در یک افق برای بخش روباز	$js \in \{1, \dots, JS\}$
۱۰	تعداد واحد استخراج در یک افق برای بخش زیرزمینی	$ps \in \{1, \dots, PS\}$
۱۱	شاخص برای استخراج روباز	—
۱۲	شاخص برای استخراج زیرزمینی	—
۱۳	شاخص برای استخراج ترکیبی (غیر همزمان)	—

جدول ۲- نمادهای استفاده‌شده در مدل برای مجموعه‌ها

ردیف	مجموعه	نماد مجموعه
۱	مجموعه‌ای از تمام بلوک‌های (واحد استخراجی) استخراج روباز در مدل	$\bar{B} = \{1, \dots, \bar{B}\}$
۲	مجموعه‌ای از تمام بلوک‌های استخراج روباز در افق L در مدل	$\bar{B}_L = \{1, \dots, \bar{B}_L\}$
۳	مجموعه‌ای از تمام بلوک‌های استخراج تخریب بلوکی در مدل	$\underline{B} = \{1, \dots, \underline{B}\}$
۴	مجموعه‌ای از تمام بلوک‌های استخراج تخریب بلوکی در افق L در مدل	$\underline{B}_L = \{1, \dots, \underline{B}_L\}$
۵	مجموعه‌ای از تمام آماده‌سازی‌های سرمایه‌ای زیرزمینی در مدل	$\underline{C} = \{1, \dots, \underline{C}\}$
۶	مجموعه‌ای از تمام آماده‌سازی‌های عملیاتی زیرزمینی در مدل	$\underline{D} = \{1, \dots, \underline{D}\}$
۷	مجموعه‌ای از تمام آماده‌سازی‌های عملیاتی زیرزمینی در افق L در مدل	$\underline{D}_L = \{1, \dots, \underline{D}_L\}$
۸	برای هر بلوک (i, j, k) استخراج روباز یک مجموعه $\Delta_{i,j,k}(S) \subset \bar{B}$ وجود دارد که بلوک‌های قبل از آن را تعریف می‌کند که باید قبل از استخراج بلوک i, j, k استخراج شود. در این مجموعه s تعداد کل بلوک‌های استخراج در مجموعه $\Delta_{i,j,k}(S)$ است.	$\Delta_{i,j,k}(S)$
۹	مجموعه‌ای از توسعه تهویه اصلی زیرزمینی مقطعی در مدل	$VD = \{1, \dots, VD\}$
۱۰	مجموعه‌ای از متغیرهای پیشین بلافاصل (S) در مدل	$S = \{1, \dots, S\}$
۱۱	برای هر بلوک (i, j, k) استخراج زیرزمینی یک مجموعه $\nabla_{i,j,k}(S) \subset \underline{B}$ وجود دارد که بلوک‌های بالاتر از آن را تعریف می‌کند که باید بعد از استخراج بلوک i, j, k استخراج شود. در این مجموعه s تعداد کل بلوک‌های استخراج در مجموعه $\nabla_{i,j,k}(S)$ است.	$\nabla_{i,j,k}(S)$
۱۲	برای هر افق یک مجموعه $\bar{L}_{i,j,k}(S) \subset \bar{B}$ وجود دارد که تعداد کل بلوک‌های استخراج را در آن افق که	$\bar{L}_{i,j,k}(S)$

ردیف	مجموعه	نماد مجموعه
	برای استخراج روباز در دسترس است، تعیین می‌کند. در این مجموعه s تعداد کل بلوک‌های استخراج در مجموعه $\bar{L}_{i,j,k}(S)$ است.	
۱۳	برای هر افق یک مجموعه $L_{i,j,k}(S) \subset B$ وجود دارد که تعداد کل بلوک‌های (کارگاه‌ها) استخراج را در آن افق که برای استخراج زیرزمینی در دسترس است، تعیین می‌کند. در این مجموعه s تعداد کل بلوک‌های استخراج (کارگاه‌ها) در مجموعه $L_{i,j,k}(S)$ است.	$L_{i,j,k}(S)$
۱۴	برای هر افق یک مجموعه $\rho(S) \subset C$ وجود دارد که تعداد آماده‌سازی‌های سرمایه‌ای زیرزمینی را در آن افق تعریف می‌کند که باید قبل از شروع آماده‌سازی عملیاتی در آن افق پیشروی کند. در این مجموعه s تعداد کل آماده‌سازی‌های سرمایه‌ای در مجموعه $\rho(S)$ است.	$\rho(S)$
۱۵	برای هر افق یک مجموعه $\omega(S) \subset D$ وجود دارد که تعداد آماده‌سازی‌های عملیاتی زیرزمینی را در آن افق تعریف می‌کند که باید قبل از استخراج بلوک (کارگاه) i, j, k پیشروی کند. در این مجموعه s تعداد کل آماده‌سازی‌های عملیاتی در یک افق در مجموعه $\omega(S)$ است.	$\omega(S)$

جدول ۳- نمادهای استفاده‌شده در مدل برای پارامترها

ردیف	پارامتر	نماد پارامتر
۱	درآمد حاصل از فروش محصول نهایی بخش روباز در بلوک i, j, k در دوره t ، منهای هزینه استخراج بلوک i, j, k به عنوان کانسنگ و فرآوری آن	$\bar{R}_{i,j,k}^t$
۲	درآمد حاصل از فروش محصول نهایی بخش زیرزمینی در بلوک (کارگاه) i, j, k در دوره t ، منهای هزینه استخراج بلوک i, j, k به عنوان کانسنگ و فرآوری آن	$R_{i,j,k}^t$
۳	هزینه‌های زیست‌محیطی بخش روباز در بلوک i, j, k در دوره t (کانسنگ + باطله) به ازای هر تن	$\bar{E}_{i,j,k}^t$
۴	هزینه‌های زیست‌محیطی بخش زیرزمینی در بلوک (کارگاه) i, j, k در دوره t (کانسنگ + باطله) به ازای هر تن	$E_{i,j,k}^t$
۵	هزینه برداشت همه مواد در بلوک استخراج i, j, k با روش روباز در دوره t به عنوان باطله	$\bar{U}_{i,j,k}^t$
۶	هزینه برداشت همه مواد در بلوک استخراج i, j, k با روش زیرزمینی در دوره t به عنوان باطله	$U_{i,j,k}^t$
۷	هزینه آماده‌سازی سرمایه‌ای زیرزمینی در دوره t	\bar{A}_c^t
۸	هزینه آماده‌سازی عملیاتی زیرزمینی در دوره t	A_d^t
۹	میانگین عیار عناصر در بخش کانسنگ بلوک استخراج i, j, k با روش روباز	$\bar{G}_{i,j,k}$
۱۰	میانگین عیار عناصر در بخش کانسنگ بلوک استخراج (کارگاه) i, j, k با روش زیرزمینی	$G_{i,j,k}$
۱۱	تناژ کانسنگ در بلوک استخراج i, j, k (مواد مینیرالیزه شده) با روش روباز	$\bar{O}_{i,j,k}$
۱۲	تناژ کانسنگ در بلوک استخراج i, j, k (مواد مینیرالیزه شده) با روش زیرزمینی	$O_{i,j,k}$
۱۳	تناژ باطله در بلوک استخراج i, j, k (مواد غیر مینیرالیزه) با روش روباز	$\bar{W}_{i,j,k}$
۱۴	تناژ باطله در بلوک استخراج i, j, k (مواد غیر مینیرالیزه) با روش زیرزمینی	$W_{i,j,k}$
۱۵	طول آماده‌سازی سرمایه‌ای μ	D_μ
۱۶	طول آماده‌سازی عملیاتی π	D_π
۱۷	حد بالای میانگین عیار قابل قبول عنصر برای استخراج روباز در دوره t	\bar{G}_n^t
۱۸	حد پایین میانگین عیار قابل قبول عنصر برای استخراج روباز در دوره t	\bar{G}_u^t
۱۹	حد بالای میانگین عیار قابل قبول عنصر برای استخراج زیرزمینی در دوره t	G_n^t
۲۰	حد پایین میانگین عیار قابل قبول عنصر برای استخراج زیرزمینی در دوره t	G_u^t

ردیف	پارامتر	نماد پارامتر
۲۱	حد بالای ظرفیت مورد نیاز فرآوری کانسنگ حاصل از استخراج روباز در دوره t	\bar{P}_n^t
۲۲	حد پایین ظرفیت مورد نیاز فرآوری کانسنگ حاصل از استخراج روباز در دوره t	\bar{P}_U^t
۲۳	حد بالای ظرفیت مورد نیاز فرآوری کانسنگ حاصل از استخراج زیرزمینی در دوره t	P_n^t
۲۴	حد پایین ظرفیت مورد نیاز فرآوری کانسنگ حاصل از استخراج زیرزمینی در دوره t	P_U^t
۲۵	حد بالای استخراج قابل دسترسی روباز در دوره t	\bar{M}_n^t
۲۶	حد پایین استخراج قابل دسترسی روباز در دوره t	\bar{M}_U^t
۲۷	حد بالای استخراج قابل دسترسی زیرزمینی در دوره t	M_n^t
۲۸	حد پایین استخراج قابل دسترسی زیرزمینی در دوره t	M_U^t
۲۹	حد بالای آماده‌سازی سرمایه‌ای (چاه) برای معدن زیرزمینی در دوره t	\bar{Q}_c^t
۳۰	حد پایین آماده‌سازی سرمایه‌ای (چاه) برای معدن زیرزمینی در دوره t	Q_c^t
۳۱	حد بالای آماده‌سازی عملیاتی برای معدن زیرزمینی در دوره t	\bar{Q}_D^t
۳۲	حد پایین آماده‌سازی عملیاتی برای معدن زیرزمینی در دوره t	Q_D^t
۳۳	بازیابی فرآوری	R
۳۴	قیمت فروش محصول معدنی	P^t
۳۵	هزینه فروش محصول معدنی	C^t
۳۶	هزینه اضافی (بالاسری) به ازای هر تن کانسنگ برای استخراج و فرآوری در دوره t	B^t
۳۷	هزینه به ازای پله یا افق استخراج یک تن مواد سنگی با روش استخراج روباز در دوره t	\bar{H}_L^t
۳۸	نرخ تنزیل	DR
۳۹	هزینه استخراج یک تن مواد سنگی با روش استخراج روباز در دوره t	\bar{H}^t
۴۰	هزینه استخراج یک تن مواد سنگی با روش استخراج زیرزمینی در دوره t	\underline{H}^t
۴۱	هزینه ساخت یک واحد طول آماده‌سازی سرمایه‌ای در حین استخراج زیرزمینی در دوره t	F_c^t
۴۲	هزینه ساخت یک واحد طول آماده‌سازی عملیاتی در حین استخراج زیرزمینی در دوره t	F_D^t
۴۳	حد مطلوب تناژ کانسنگ ارسالی به کارخانه فرآوری با روش روباز در دوره t	\bar{N}_1^t
۴۴	حد مطلوب تناژ کانسنگ ارسالی به کارخانه فرآوری با روش زیرزمینی در دوره t	\underline{N}_1^t
۴۵	هزینه (جریمه) برای انحراف مطلوب یا ارسال بیش از حد کانسنگ به کارخانه فرآوری از اهداف مورد انتظار (حد مطلوب تناژ کانسنگ ارسالی)	Z_1^t
۴۶	هزینه (جریمه) برای انحراف نامطلوب یا مقدار کمبود کانسنگ ارسالی به کارخانه فرآوری از اهداف مورد انتظار (حد مطلوب تناژ کانسنگ ارسالی)	Z_1^t
۴۷	حد مطلوب عیار کانسنگ ارسالی به کارخانه فرآوری با روش روباز در دوره t	\bar{N}_2^t
۴۸	حد مطلوب عیار کانسنگ ارسالی به کارخانه فرآوری با روش زیرزمینی در دوره t	\underline{N}_2^t
۴۹	هزینه (جریمه) برای انحراف مطلوب یا ارسال کانسنگ به کارخانه فرآوری با عیار بیش از اهداف مورد انتظار (حد مطلوب عیار ارسالی)	Z_2^t
۵۰	هزینه (جریمه) برای انحراف نامطلوب یا ارسال کانسنگ به کارخانه فرآوری با عیار کم‌تر از اهداف مورد انتظار (حد مطلوب عیار ارسالی)	Z_2^t
۵۲	هزینه فرآوری یک تن کانسنگ در دوره t	C_p^t

ردیف	پارامتر	نماد پارامتر
۵۳	هزینه فرآوری کانسنگ داخل بلوک i, j, k در دوره t با به کارگیری روش استخراج روباز	$\bar{\varphi}_{i,j,k}^t$
۵۴	هزینه فرآوری کانسنگ داخل بلوک i, j, k در دوره t با به کارگیری روش استخراج تخریب بلوکی	$\varphi_{i,j,k}^t$
۵۵	هزینه‌های زیست‌محیطی یک تن کانسنگ استخراجی با روش روباز در دوره t	\bar{V}_k^t
۵۶	هزینه‌های زیست‌محیطی یک تن کانسنگ استخراجی با روش زیرزمینی در دوره t	V_k^t
۵۷	فاکتور هزینه افزایش زیست‌محیطی به ازای هر پله	α
۵۸	حقوق دولتی	\check{T}

جدول ۴- نمادهای استفاده‌شده در مدل برای متغیرهای تصمیم

ردیف	متغیر تصمیم	نماد متغیر تصمیم
۱	متغیر پیوسته، نشان‌دهنده بخشی از بلوک معدنی i, j, k است که باید به عنوان کانسنگ استخراج‌شده و در دوره t از طریق استخراج روباز فرآوری می‌شود.	$\bar{x}_{i,j,k}^t \in [0, 1]$
۲	متغیر پیوسته، نشان‌دهنده بخشی از بلوک معدنی i, j, k است که باید به عنوان کانسنگ استخراج‌شده و در دوره t از طریق استخراج زیرزمینی فرآوری می‌شود.	$x_{i,j,k}^t \in [0, 1]$
۳	متغیر پیوسته، نشان‌دهنده بخشی از بلوک استخراج i, j, k است که در دوره t از طریق استخراج روباز استخراج می‌شود. کسری از y هم کانسنگ و هم باطله موجود در بلوک استخراج را مشخص می‌کند.	$\bar{y}_{i,j,k}^t \in [0, 1]$
۴	متغیر پیوسته، نشان‌دهنده بخشی از بلوک استخراج i, j, k است که در دوره t از طریق استخراج زیرزمینی استخراج می‌شود. کسری از y هم کانسنگ و هم باطله موجود در بلوک استخراج را مشخص می‌کند.	$y_{i,j,k}^t \in [0, 1]$
۵	متغیر پیوسته، نشان‌دهنده بخشی از آماده‌سازی سرمایه‌ای c است که در دوره t برای بخش زیرزمینی پیشروی می‌کند.	$d_c^t \in [0, 1]$
۶	متغیر پیوسته، نشان‌دهنده بخشی از آماده‌سازی عملیاتی d است که در دوره t برای بخش زیرزمینی پیشروی می‌کند.	$d_d^t \in [0, 1]$
۷	متغیر عدد صحیح باینری؛ اگر یک بلوک استخراج i, j, k یا همه بلوک‌های استخراجی در یک افق با استفاده از روش روباز در دوره t استخراج شوند برابر یک در غیر اینصورت صفر است.	$\bar{a}_{i,j,k}^t \in \{0, 1\}$
۸	متغیر عدد صحیح باینری؛ اگر یک بلوک استخراج i, j, k یا همه بلوک‌های استخراجی در یک افق با استفاده از روش زیرزمینی در دوره t استخراج شوند برابر یک در غیر اینصورت صفر است.	$a_{i,j,k}^t \in \{0, 1\}$
۹	متغیر عدد صحیح باینری؛ اگر آماده‌سازی عملیاتی d در یک افق در دوره t توسعه داده شود، برابر یک است در غیر اینصورت صفر است.	$\delta_d^t \in \{0, 1\}$
۱۰	متغیر عدد صحیح باینری که اولویت استخراج بلوک استخراج را برای روش استخراج روباز کنترل می‌کند. اگر استخراج بلوک استخراج i, j, k شروع شده باشد یا در دوره t شروع شده باشد، $\bar{\beta}_{i,j,k}^t$ برابر یک است در غیر اینصورت صفر است.	$\bar{\beta}_{i,j,k}^t \in \{0, 1\}$
۱۱	متغیر عدد صحیح باینری که اولویت استخراج بلوک استخراج را برای روش استخراج زیرزمینی کنترل می‌کند. اگر استخراج بلوک استخراج i, j, k شروع شده باشد یا در دوره t شروع شده باشد، $\beta_{i,j,k}^t$ برابر یک است در غیر اینصورت صفر است.	$\beta_{i,j,k}^t \in \{0, 1\}$
۱۲	متغیر عدد صحیح باینری که اولویت آماده‌سازی سرمایه‌ای برای استخراج زیرزمینی را کنترل می‌کند. اگر c شروع شده باشد یا در دوره t شروع شده باشد ε_c^t برابر است با یک در غیر اینصورت صفر است.	$\varepsilon_c^t \in \{0, 1\}$
۱۳	متغیر عدد صحیح باینری که اولویت آماده‌سازی عملیاتی برای استخراج زیرزمینی را کنترل می‌کند. اگر d	$\varepsilon_d^t \in \{0, 1\}$

ردیف	متغیر تصمیم	نماد متغیر تصمیم
	شروع شده باشد یا در دوره t شروع شده باشد ε_d^t برابر است با یک در غیر اینصورت صفر است.	
۱۴	اگر تناژ کانسنگ ارسالی از بخش روباز به کارخانه فرآوری بیش تر از حد مطلوب تناژ بار ورودی ارسالی به کارخانه باشد برابر یک در غیر اینصورت برابر صفر است.	$\bar{\eta}_1^t \in \{0, 1\}$
۱۵	اگر تناژ کانسنگ ارسالی از بخش روباز به کارخانه فرآوری کم تر از حد مطلوب تناژ بار ورودی ارسالی به کارخانه باشد برابر یک در غیر اینصورت برابر صفر است.	$\bar{\eta}_2^t \in \{0, 1\}$
۱۶	اگر عیار کانسنگ ارسالی از بخش روباز به کارخانه فرآوری بیش تر از حد مطلوب عیار بار ورودی ارسالی به کارخانه باشد برابر یک در غیر اینصورت برابر صفر است.	$\bar{\eta}_3^t \in \{0, 1\}$
۱۷	اگر عیار کانسنگ ارسالی از بخش روباز به کارخانه فرآوری بیش تر از حد مطلوب عیار بار ورودی ارسالی به کارخانه باشد برابر یک در غیر اینصورت برابر صفر است.	$\bar{\eta}_4^t \in \{0, 1\}$
۱۸	اگر تناژ کانسنگ ارسالی از بخش زیرزمینی به کارخانه فرآوری بیش تر از حد مطلوب تناژ بار ورودی ارسالی به کارخانه باشد برابر یک در غیر اینصورت برابر صفر است.	$\underline{\eta}_1^t \in \{0, 1\}$
۱۹	اگر تناژ کانسنگ ارسالی از بخش زیرزمینی به کارخانه فرآوری کم تر از حد مطلوب تناژ بار ورودی ارسالی به کارخانه باشد برابر یک در غیر اینصورت برابر صفر است.	$\underline{\eta}_2^t \in \{0, 1\}$
۲۰	اگر عیار کانسنگ ارسالی از بخش زیرزمینی به کارخانه فرآوری بیش تر از حد مطلوب عیار بار ورودی ارسالی به کارخانه باشد برابر یک در غیر اینصورت برابر صفر است.	$\underline{\eta}_3^t \in \{0, 1\}$
۲۱	اگر عیار کانسنگ ارسالی از بخش زیرزمینی به کارخانه فرآوری بیش تر از حد مطلوب عیار بار ورودی ارسالی به کارخانه باشد برابر یک در غیر اینصورت برابر صفر است.	$\underline{\eta}_4^t \in \{0, 1\}$