نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

دوره سوم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۴۳ تا ۵۵
Vol. 3, No. 3, Autumn 2018, pp. 43-55

طراحی بهره‌برداری معادن روباز با نگرش کاهش اثرات زیست‌محیطی در معدن مس سونگون

عباس سلحشور[۱]، عطاله بهرامی[۲*]، جعفر عبدالهی شریف[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی استخراج معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه
۲- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه
۳- استاد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

(دریافت ۱۳۹۷/۰۳/۳۱، پذیرش ۱۳۹۷/۰۸/۱۹)

چکیده

معادن به علت تولید پساب‌های اسیدی و سمی یکی از آلاینده‌ترین منابع محیط‌زیست به‌شمار می‌روند. توجه به تاثیرات زیست‌محیطی معدنکاری در تدوین برنامه‌ریزی تولید معدن، موجب کاهش اثرات زیان‌بار این صنعت بر محیط می‌شود. در این تحقیق به تدوین برنامه‌ریزی تولید معدن مس سونگون با نگرشی ویژه به پارامترها و تاثیرات زیست‌محیطی پرداخته شده است. بدین منظور با انجام مطالعات میدانی، آنالیزهای شیمیایی و جمع‌آوری داده‌های اکتشافی و نقشه‌برداری، اقدام به تدوین برنامه‌ریزی تولید زیست‌محیطی معدن شده است و بخش‌های مختلف ذخیره با دیدگاه تولید پساب ارزیابی شده‌اند. پس از مدلسازی ذخیره معدنی و تهیه مدل بلوکی، برای هر بلوک، عیار عناصر سنگین با روش کریجینگ و وزن و تاثیر پساب‌زایی بلوک‌ها با استفاده از روش آنتروپی تعیین شده است. مدل بلوکی حاصل برخلاف روش‌های متداول برنامه‌ریزی تولید که تنها شامل عیار ماده معدنی‌اند، با دیدگاه توان تولید پساب بلوک‌ها و درجه آلایندگی آن‌ها تهیه شده است. در نهایت، با طراحی برنامه‌ریزی تولید بر اساس تاثیرات زیست‌محیطی عناصر موجود در معدن مس سونگون، هشت فاز عملیاتی برای این کانسار طراحی شد. در این برنامه‌ریزی بلوک‌های پیت اول با عدد آلودگی میانگین ۱۱۴۱ و پیت آخر با عدد آلودگی میانگین ۵۲، به ترتیب بیشترین و کمترین استعداد را در تولید پساب مضر برای محیط زیست دارند.

کلمات کلیدی

برنامه‌ریزی تولید، آلایندگی، پساب، معدن سونگون.

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: a.bahrami@urmia.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر مسئله توسعه پایدار[1] (SD) صنایع، در بسیاری از کشورها بصورت ویژه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. بطور کلی توسعه پایدار یک صنعت به معنای در نظر گرفتن تمامی تاثیرات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی آن صنعت است [۳-۱]. لزوم حفاظت از محیط‌زیست اصل غیرقابل تردیدی است که در جهان امروز مورد پذیرش عامه بوده، و این ضرورت به موازات رشد صنایع و تکنولوژی و به دنبال آن بروز آلودگی‌ها، اهمیت بیشتری پیدا کرده است. روند رو به رشد فعالیت‌های صنعتی و معدنی (بخصوص در کشورهای در حال توسعه) از یک‌سو و عدم رعایت الزامات زیست‌محیطی از سوی دیگر، موجب شده است تا مقادیر هنگفتی از آلاینده‌های این صنایع به‌واسطه‌ی عواملی چون دفع غیراصولی ضایعات مراکز صنعتی، عدم استفاده از فناوری‌های جدید و غیره، از طریق پساب‌ها به محیط‌زیست وارد شوند. معادن به علت تولید پساب‌های اسیدی و سمی یکی از منابع مهم آلاینده محیط‌زیست بشمار می‌روند. پساب‌های اسیدی معدن از جمله بدترین مشکلات زیست‌محیطی ناشی از عملیات معدنکاری و سدهای باطله است که اثرات زیان‌باری بر روی کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی دارند [۴].

در میان روش‌های استخراج معدن، معدنکاری روباز گسترده‌ترین فعالیت استخراجی معدنی در سرتاسر جهان است، که بوسیله آن ذخیره معدنی و باطله همراه آن، از سطح زمین استخراج می‌شود. یکی از موضوعات اصلی در طراحی معادن روباز، تعیین حد نهایی پیت[2] و برنامه‌ریزی تولید معدن است [۵]. برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معادن روباز یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی است که براساس ویژگی‌های بلوک‌های استخراجی و جایگاه آنها در طول عمر معدن بنا نهاده شده است. روابط ریاضی با هدف بهینه کردن ارزش خالص فعلی[3] در عملیات معدنکاری، با توجه به شرایط عملیاتی مانند میزان ذخیره، شیب، ظرفیت معدنکاری و نرخ فرآوری ارائه شده است [۶]. در طراحی حد نهایی پیت براساس بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی به موضوع قابلیت توسعه توجه شایانی نشده است و تنها جنبه‌ای از برنامه توسعه پایدار که در طراحی حد نهایی معدن در نظر گرفته شده، جنبه اقتصادی آن است. این در حالی است که مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی فاکتورهای مهمی در صنایع معدنی هستند. در حقیقت برای دستیابی به عیار حد بهینه و بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی باید به جنبه‌های دیگر طراحی و استخراج معدن از جمله مسائل زیست‌محیطی توجه شود [۹-۷]. تحقیقات اندکی در رابطه با مطالعه پارامترهای توسعه پایدار در برنامه‌ریزی تولید معادن روباز صورت گرفته است [۱۴-۱۰]؛ که در این مطالعات نیز تنها به جنبه زیست‌محیطی مسئله استخراج معدن توجه شده است [۱۷-۱۵]، و به تاثیر توام برنامه‌ریزی تولید بلند مدت استخراج و فرآوری معدن بر محیط زیست، توجهی نشده است. بطور کلی برنامه‌ریزی تولیدی با دیدگاه کمینه نمودن حجم پساب تولیدی و مضرات زیست‌محیطی پساب، تاکنون انجام نگرفته است.

در این تحقیق سعی بر تدوین برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معادن روباز با نگرشی ویژه به مدلسازی کانسار براساس پارامترها و محدودیت‌های زیست‌محیطی شده است. با مدلسازی زیست‌محیطی کانسار می‌توان قبل از تولید، حجم و میزان سمیت مواد مضر موجود در پساب را تخمین، و اقدامات پیشگیرانه‌ای در این زمینه را مبذول نمود. هدف تمامی برنامه‌های زمان‌بندی استخراج، در نهایت حصول بیشترین ارزش خالص فعلی در طول عمر معدن است، اما در برنامه‌ریزی تولید زیست‌محیطی، هدف از برنامه‌ریزی استخراج علاوه بر حصول بیشترین ارزش خالص فعلی در طول عمر معدن، کمینه کردن اثرات زیست‌محیطی استخراج و فرآوری ماده معدنی بر محیط‌زیست است. اهداف اصلی از انجام این تحقیق، بهبود شرایط زیست‌محیطی گستره معدن مس سونگون، کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی دفع پساب در وضعیت فعلی و همچنین جلوگیری از ورود پساب به آب‌های جاری و نفوذ آن به آب‌های زیرزمینی منطقه است.

۲- روش تحقیق (مدلسازی و برنامه‌ریزی زیست‌محیطی)

مدل یک کانسار، ترکیبی از پارامترهای برداشت شده از کانسار است که براساس پیش‌فرض‌های زمین‌شناسی، اکتشافی و اقتصادی یک کانسار را معرفی می‌کند [۱۸]. امروزه به منظور مدلسازی، طراحی و برنامه‌ریزی معادن، از روش‌های کامپیوتری استفاده می‌شود. Micromine[4] نرم‌افزاری جامع و کاربردی جهت عملیات اکتشاف و طراحی سه‌بعدی معدن است که ابزارهای مختلفی جهت مدلسازی، تخمین، طراحی، بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی فراهم کرده است. داده‌های ورودی موردنیاز نرم‌افزار ماکروماین جهت طراحی و برنامه‌ریزی، شامل داده‌های اکتشافی و نقشه‌برداری هستند. پس از ورود اطلاعات مربوطه به نرم‌افزار طی چندین عملیات شامل اعتبارسنجی

داده‌ها، تهیه مدل سطحی توپوگرافی، نمایش موقعیت گمانه‌ها و شبیه‌سازی ماده معدنی، مدل بلوکی خالی ماده معدنی تشکیل می‌گردد. مدل بلوکی مبنای کاربرد تکنیک‌های کامپیوتری برای برآورد عیار و تناژ و تهیه مدل سه‌بعدی کانسار، بصورت مجموعه‌ای از بلوک‌ها است. در نهایت نیز عیار بلوک‌ها براساس داده‌های خام ورودی به نرم افزار و با استفاده از روش کریجینگ محاسبه و به هر بلوک تخصیص داده می‌شود.

به منظور ایجاد یک مدل زیست‌محیطی برای یک کانسار، پس از تعیین عناصر موجود در کانسار، به کنترل اطلاعات عیاری عناصر با استانداردهای مجاز آنها پرداخته می‌شود. برای تعیین درجه آلایندگی هر یک از عناصر با در نظر گرفتن عیار عنصر و حدود مجاز آلایندگی آن، نقش مؤثر آن در تولید پساب محاسبه می‌شود. پس از آن به تعیین وزن هر یک از عناصر در ایجاد پساب‌های سمی در کانسار پرداخته می‌شود. آنتروپی[5] یکی از روش‌های وزن‌دهی بوده که براساس پراکندگی در مقادیر هر شاخص استوار است. آنتروپی در نظریه اطلاعات، یک معیار عدم اطمینان است که با تابع توزیع احتمال P_i بیان می‌شود. اندازه‌گیری این عدم اطمینان(E_i)، توسط شانون[6]، به صورت رابطه (۱) بیان شده است [۱۹]:

$$E_i = S(P_1, P_2, \dots, P_n) = -k \sum_{i=1}^{n} [p_i \times I_n p_i] \qquad (۱)$$

که در آن:

k: مقداری ثابت است که به منظور قرارگیری E_i (آنتروپی) در بازه صفر تا یک اعمال می‌شود.

E از توزیع احتمال P_i بر اساس مکانیزم آماری محاسبه شده و مقدار آن در صورت تساوی P_iها با یکدیگر (یعنی P_i=1/n)، ماکزیمم مقدار ممکن خواهد بود که با استفاده رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$-k \sum_{i=1}^{n} P_i - ln\, P_i = -k \left\{ \frac{1}{n} ln \frac{1}{n} + \frac{1}{n} ln \frac{1}{n} + \cdots + \frac{1}{n} ln \frac{1}{n} \right\} = -k \times ln \frac{1}{n} \qquad (۲)$$

در این رابطه k :

$$k = \frac{1}{ln\, m} \qquad (۳)$$

سپس مسئله تعیین تأثیر عناصر سنگین، و تعیین مؤثرترین پارامتر در آلایندگی پساب کانسار بصورت یک مسئله تصمیم‌گیری، فورموله می‌شود؛ بصورتی که ماتریس تصمیم‌گیری حاوی اطلاعاتی بوده که آنتروپی می‌تواند بعنوان معیاری برای ارزیابی آن بکار رود. با فرض ماتریس تصمیم‌گیری بصورت جدول ۱:

جدول ۱: ماتریس تصمیم‌گیری

	C_1	...	C_n
A_1	a_{11}		a_{1n}
...	...	...	...
A_m	a_{m1}		a_{mn}

P_{ij} (تابع توزیع شاخص ijام) با استفاده از رابطه ۴ قابل محاسبه قابل محاسبه خواهد بود:

$$P_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} a_{ij}} \quad ; \forall\, i, j \qquad (۴)$$

که در آن:

m: تعداد گزینه‌های مورد بررسی

a_{ij}: امتیاز شاخص i برای گزینه j است.

سپس آنتروپی شاخص j ام (E_j) براساس (۵) محاسبه می‌گردد:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^{m} [P_{ij}\, ln\, P_{ij}] \quad ; \forall\, i, j \qquad (۵)$$

عدم اطمینان یا درجه انحراف (d_j) از اطلاعات به دست آمده برای شاخص j بیان می‌کند که شاخص مربوطه، چه میزان اطلاعات مفید برای تصمیم‌گیری، در اختیار تصمیم گیرنده قرار می‌دهد. مقدار d_j از رابطه (۶) حاصل می‌شود:

$$dj = 1 - E_j \quad ; \forall\, j \qquad (۶)$$

سپس مقدار وزن شاخص W_j با استفاده از رابطه ۷ تعیین می‌گردد [۱۹]:

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j} \quad ; \forall\ j \qquad (۷)$$

با استفاده از روش آنتروپی، E_j، d_j و W_j برای میزان آلودگی هر عنصر در بلوک‌ها، به منظور تدوین مدل زیست‌محیطی محاسبه می‌شود. پس از تعیین وزن عناصر در ایجاد پساب صنعتی با استفاده از روش آنتروپی، وزن هر عنصر (W_j) به مقدار مؤثر در تولید پساب همان عنصر در هر بلوک ضرب شده، و عدد آلودگی هر عنصر برای بلوک‌ها به دست می‌آید. از مجموع اعداد آلودگی تمامی عناصر هر بلوک، عدد آلودگی کل آن بلوک محاسبه و مدل بلوکی زیست‌محیطی کانسار ایجاد می‌گردد.

در فرایند تدوین برنامه‌ریزی تولید یک معدن، مرحله نهایی برنامه‌ریزی تولید (پس از تشکیل مدل بلوکی ذخیره)، فازبندی یا تعیین کاواک‌های لانه‌ای است. فرآیند فازبندی معادن روباز، درون محدوده نهایی معدن انجام می‌گیرد. اولین فاز معدن قسمتی از ذخیره است که عیار آن حداکثر مقدار بوده و استخراج آن در بردارنده بیشترین سود برای معدن است. با پیشروی از فاز یک به فازهای نهایی معدن، سود خالص حاصل از استخراج به ازای واحد وزن کانسنگ کاهش می‌یابد؛ به طوری که آخرین فاز معدن که مطابق محدوده نهایی آن است، کمترین سود را به همراه خواهد داشت. تعیین بهترین و بهینه‌ترین طرح راهبردی برای یک معدن روباز مستلزم حل مسائل ریاضی پیچیده‌ای است که به متغیرهای زیادی وابسته‌اند.

مطالب فوق مربوط به فازبندی اقتصادی براساس بیشترین ارزش خالص فعلی است، که برنامه‌ریزی معادن بر این اصول پایدار است. در پژوهش حاضر با هدف برنامه‌ریزی تولید زیست‌محیطی معادن روباز از دیدگاه تولید باطله‌های استخراجی معدن و پساب‌های تولیدی ناشی از فرایندهای فرآوری مواد معدنی، اولین فاز برنامه‌ریزی قسمتی از ذخیره است، که پساب تولیدی از آن بیشترین خطرات را برای محیط‌زیست به همراه دارد. با پیشروی از فاز اول به سمت فازهای پایینی از خطرات زیست‌محیطی به ازای هر بلوک ماده معدنی کاسته می‌شود. آخرین فاز معدن که مطابق محدوده نهایی معدن است کمترین خطرات را برای محیط زیست خواهد داشت.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- معدن و مجتمع فرآوری مس سونگون

معدن مس سونگون و کارخانه فرآوری آن در استان آذربایجان شرقی و فاصله ۱۳۰ کیلومتری از شهر تبریز واقع شده است (شکل ۱). کانی‌سازی اصلی کانسار شامل کانی‌های مس و مولیبدن است. ذخیره احتمالی این معدن بیش از یک میلیارد تن و ذخیره قابل استخراج آن (با توجه به اکتشافات انجام گرفته) حدود ۷۹۶ میلیون تن برآورد شده است. در مجموع کل ذخایر قطعی، احتمالی و ممکن در محدوده کانسار سونگون حدود ۱٫۷ میلیارد تن کانسنگ مس با عیار ۰٫۶۱ درصد است. در این معدن غیر از فلز با ارزش مس، فلزات مولیبدن، طلا، نقره و دیگر عناصر با اهمیت به صورت فلزات همراه موجود هستند. با توجه به مشخصات کانسار و به دلیل تولید بالا و لزوم استفاده از ماشین‌آلات عظیم‌الجثه استخراج معدن به روش روباز طراحی شده است.

شکل۱: موقعیت معدن مس سونگون

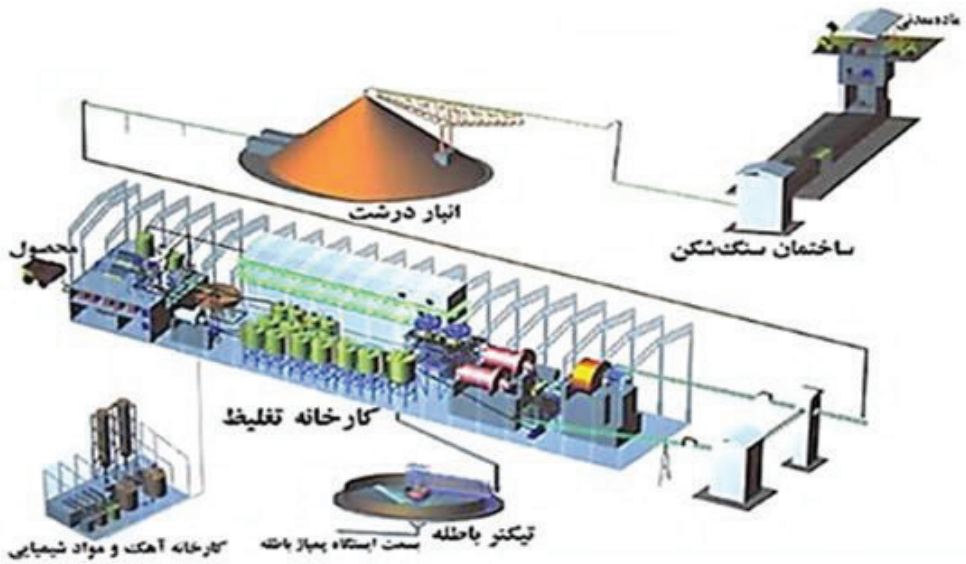
در شکل ۲ شمای کلی عملیات فرآوری مجتمع مس سونگون ارائه شده است. در این مجتمع پس از خردایش و آسیاکنی کانسنگ استخراجی از معدن، عملیات پرعیارسازی مس در سلول‌های فلوتاسیون انجام شده و کنسانتره مس با عیار ۳۰ درصد بعنوان محصول نهایی به انبار کنسانتره ارسال می‌گردد. باطله حاصل نیز پس از انجام فرایند آبگیری با

استفاده از تیکنر، بصورت پالپ به سد باطله منتقل می‌شود. با توجه به اهمیت زیست‌محیطی منطقه به علت وجود مراتع، زمین‌های کشاورزی و رودخانه‌های متعدد در محدوده معدن و مجاورت با منطقه حفاظت شده ارسباران، پساب تولیدی کارخانه سونگون و ذخیره آن در سد باطله، تهدید بزرگی از نظر زیست‌محیطی برای منطقه بشمار می‌رود [۴]. در بررسی‌های زیست‌محیطی، بیش‌ترین نگرانی متوجه فلزاتی است که اغلب با ذخایر سولفیدی فلزات پایه نظیر مس، سرب، روی و . . . همراه هستند. غلظت برخی از این فلزات در آب‌های حاصل از زهکشی معادن بیش از حد مجاز است. از طرف دیگر فرآیند فلوتاسیون بعنوان یکی از مراحل فرآوری به دلیل استفاده از مواد شیمیایی تحت عناوین کلکتورها، تنظیم‌کننده‌های بازی یا اسیدی، بازداشت‌کننده‌ها، فعال‌کننده‌های سطح و کف‌سازها، دارای اثرات گسترده زیست‌محیطی است.

برای انجام مطالعات کانه‌آرایی و برای تعیین استعداد آلایندگی بخش‌های مختلف کانسار مس سونگون، با راهنمایی تیم زمین‌شناسی مستقر در مجتمع مس سونگون، نمونه‌هایی، از زون‌های سوپرژن[۷]، هیپوژن[۸] و زون شسته شده معدن مس سونگون تهیه شد. سپس برای تعیین میزان و نوع باطله تولیدی، با توجه به خواص نمونه‌ها آزمایش‌های فرآوری شامل لیچینگ (بر روی فراکسیون‌های دانه‌بندی ۰٫۵- ـ ۰ ، ۱- ـ ۰٫۵+ ، ۲- ـ ۱+ میلی‌متر) و فلوتاسیون (ذرات با اندازه کمتر از ۰٫۵۰۰ میلیمتر) بر روی آن‌ها انجام گرفت. آزمایش‌های فلوتاسیون بر روی نمونه‌های مربوط به زون‌های سوپرژن و هیپوژن انجام گرفت و شرایط آزمایش با توجه به شرایط عملیاتی مورد استفاده در مجتمع فرآوری مس سونگون، انتخاب شده است (pH محلول برابر ۱۱، *Z11*[۹] و *Flomin7240*[۱۰] به‌عنوان کلکتور و *A70*[۱۱] و *A65*[۱۲] بعنوان کفساز استفاده شده‌اند). در جدول ۲ نتایج مربوط به آنالیزهای عیاری میزان مس برای هر آزمایش آمده است. در جدول ۳ نیز نتایج مربوط به عملیات لیچینگ انجام گرفته بر روی فراکسیون‌های مختلف دانه‌بندی زون شسته شده کانسار سونگون آمده است. با توجه به جدول ۳ می‌توان گفت که عملیات اسیدشویی مجدد نتیجه مناسبی برای حصول کنسانتره مس بر روی زون لیچینگ نداشته است. بنابراین این زون بیشترین باطله ممکن را تولید می‌کند.

بر اساس آنالیزهای شیمیایی انجام گرفته بر روی کنسانتره و باطله‌های آزمایش‌های فرآوری (فلوتاسیون و لیچینگ)، مس، مولیبدن، گوگرد، سرب، روی، آرسنیک، آهن و نقره فراوان‌ترین عناصر موجود در معدن مس سونگون‌اند.

بر اساس نتایج آزمایش‌های فرآوری میانگین وزن باطله تولیدی زون‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است. بنابراین عیار عناصر مضر همراه ماده معدنی که به سد باطله منتقل خواهند شد نیز برای زون‌های مختلف متفاوت خواهد بود. در نتیجه استعداد پساب‌زایی بلوک‌های مختلف معدن مس سونگون با توجه به نوع کانسنگ موجود، ترکیب شیمیایی کانسنگ، روش فرآوری، مواد شیمیایی موردنیاز برای فرآیند فلوتاسیون،



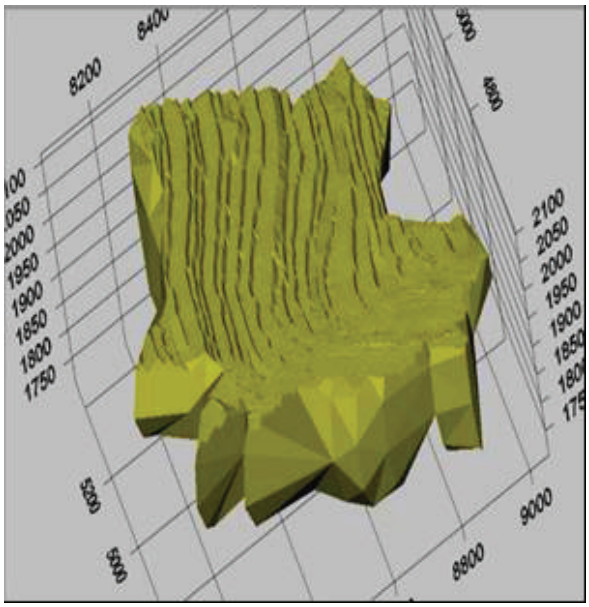
شکل ۲: شمای کلی عملیات فرآوری معدن مس سونگون [۴]

عیار عناصر مضر همراه کانسنگ و ضریب بازیابی فرآوری از یکدیگر متفاوت است. به بیان دیگر می‌توان گفت عوارض زیست‌محیطی دو بلوک مجاور در معدن با ترکیب شیمیایی مختلف، با یکدیگر متفاوت است.

۳-۲- مدلسازی زیست‌محیطی معدن مس سونگون

با محاسبه ضرایب بازیابی فرآوری و نیز تعیین حجم مواد شیمیایی مورد نیاز برای فرآوری کانسنگ استخراجی، در ادامه به مدلسازی ذخیره سونگون با ملاحظات زیست‌محیطی و بررسی توان پساب‌زایی بخش‌های مختلف ذخیره پرداخته شده است. داده‌های ورودی مورد نیاز نرم‌افزار Micromine برای انجام مدلسازی، شامل داده‌های اکتشافی و نقشه‌برداری (اطلاعات مربوط به عمق و مختصات گمانه‌های اکتشافی، آنالیز عیاری عناصر در طول گمانه‌ها، شیب و جهت شیب گمانه‌های اکتشافی و توپوگرافی سطح زمین) از گروه زمین‌شناسی معدن مس سونگون تهیه شد. داده‌های موجود پس از اعتبارسنجی به نرم‌افزار ماکروماین وارد شده است. شکل ۳ حجم سه‌بعدی شبیه‌سازی شده ماده معدنی در کانسار مس سونگون با احتساب حجم استخراج شده از ابتدای عمر معدن تاکنون را نمایش می‌دهد (حجم ماده معدنی شبیه‌سازی شده قبل از استخراج حدودا ۱۰۹ میلیون و در حال حاضر ۹۲ میلیون مترمکعب است).

مدل بلوکی خالی که حاوی مختصات مرکز بلوک‌ها بدون عیار آن‌هاست، از روی شکل سه بعدی نهایی ماده معدنی ساخته می‌شود. هر چه ابعاد بلوک‌ها کوچکتر در نظر گرفته شود مدل ساخته شده دقیق‌تر است ولی با افزایش تعداد بلوک‌ها پردازش داده‌ها توسط نرم‌افزار سخت و زمان‌بر خواهد بود. ابعاد بلوک‌های مدل بلوکی سونگون برای برقراری تعادل بین دقت مدلسازی و محدودیت‌های یاد شده، ۱۵×۱۵×۱۵ متر در نظر گرفته شد. شکل ۴ مدل بلوکی خالی معدن مس سونگون را نشان می‌دهد.



شکل ۳: تصویری سه بعدی از ماده معدنی، معدن مس سونگون (شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Micromine)

جدول ۲: آنالیز عیاری محصولات فرآیند فلوتاسیون زون‌های مختلف کانسار مس سونگون در زمان‌های مختلف کنسانتره‌گیری

زمان کنسانتره‌گیری (ثانیه) / عیار تجمعی مس (٪)	۲۰	۹۰	۱۸۰	۳۶۰	۶۰۰	۹۰۰
زون سوپرژن	۱۵٫۸۵	۱۴٫۷۱	۱۳٫۵۲	۱۱٫۴۶	۱۰٫۴۴	۹٫۶۸
زون هیپوژن	۱۱٫۶۶	۱۰٫۷۵	۹٫۵۸	۸٫۲۷	۷٫۱۳	۶٫۰۰

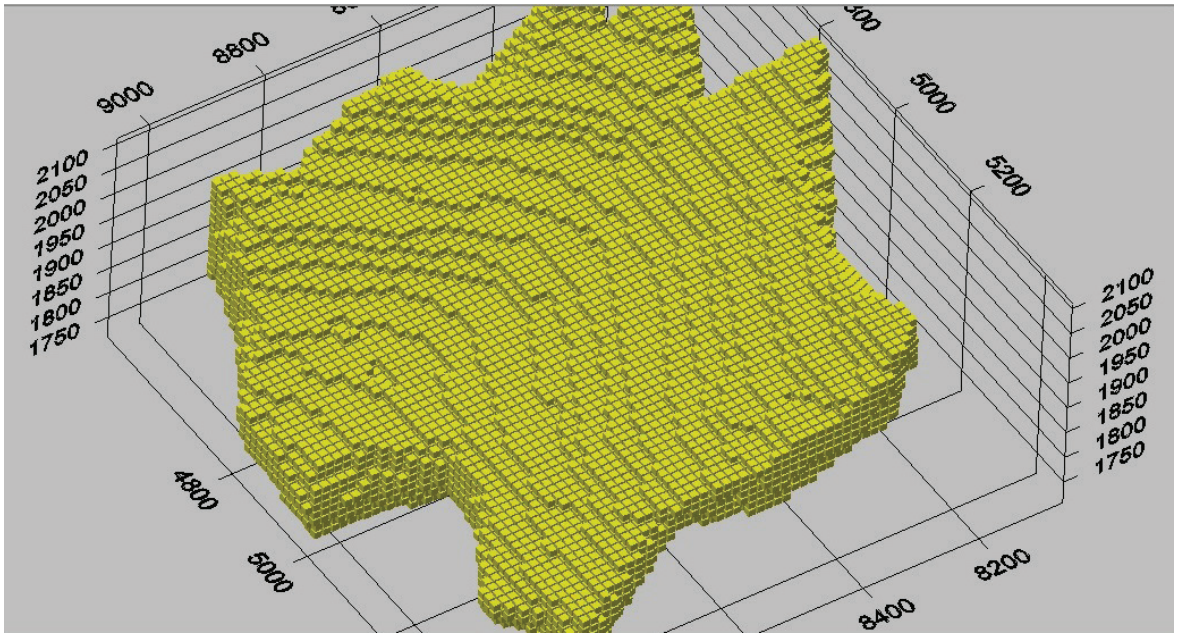
جدول ۳: نتایج آزمایش اسیدشویی زون لیچینگ کانسار مس سونگون

بازیابی مس (٪)	عیار باطله (٪)	درصد وزنی باطله	عیار کنسانتره (٪)	درصد وزنی کنسانتره	اندازه ذرات (میلیمتر)
۴۰٫۵۰	۰٫۰۲	۶۵٫۴۸	۰٫۱۷۹	۳۴٫۵۲	۰ ـ ۰٫۵۰۰
۶۴٫۴۴	۰٫۰۱	۶۵٫۹۶	۰٫۲۴۲	۳۴٫۰۴	۰٫۵۰۰ ـ ۱
۶۳٫۵۰	۰٫۰۱	۶۸٫۵۷	۰٫۲۵۳	۳۱٫۴۳	۱ ـ ۲

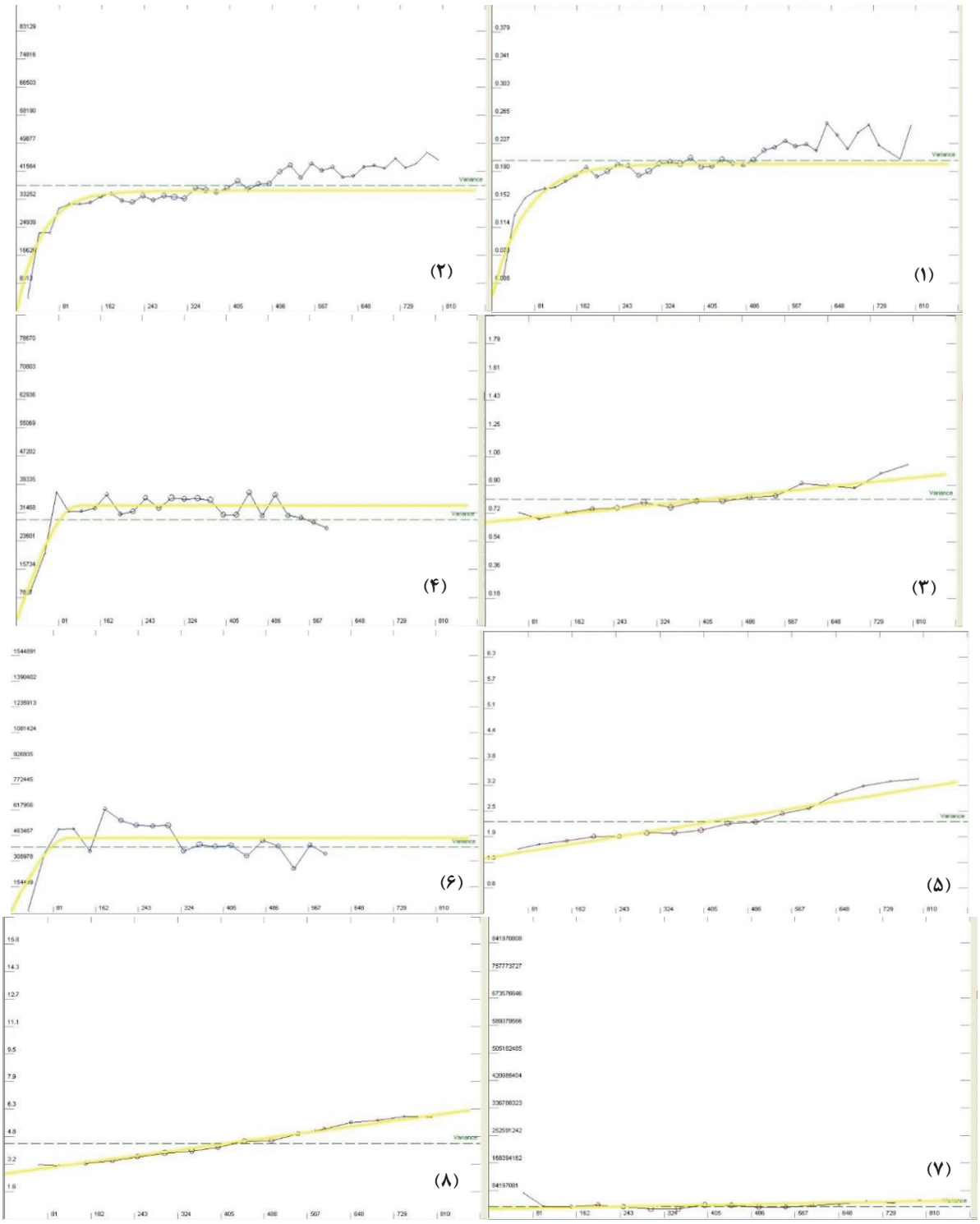
شناخت کامل توزیع فضایی یک پارامتر زمانی میسر است که تمامی نقاط آن فضا قابل دسترس باشند و پارامتر مورد نظر در نقاط یاد شده با ابزارهایی با دقت بسیار زیاد اندازه‌گیری شود. واضح است که انجام چنین امری از نظر فنی و اقتصادی غیر عملی است. بنابراین لازم است تا از فضای مورد نظر نمونه‌برداری انجام گیرد. این کار در عملیات اکتشافی با حفر ترانشه و یا گمانه و برداشت نمونه و اندازه‌گیری پارامترهای موردنظر در آزمایشگاه صورت می‌گیرد. اما حجم نمونه‌های برداشت شده در مقایسه با حجم کل آن بسیار کوچک است. بنابراین شناخت کامل چنین فضایی با توجه به حجم بسیار کوچک فضای نمونه‌برداری امکان‌پذیر نیست. به عبارت دیگر تعیین پارامترهای مختلف این فضا با ابهام یا عدم قطعیت همراه است و تنها می‌توان مقدار آن‌ها را تخمین زد. برای تخمین، از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد که از مهم‌ترین روش‌های تخمین می‌توان به نزدیک‌ترین نقاط، روش‌های عکس فاصله و روش‌های زمین‌آماری (کریجینگ) اشاره کرد. برای ایجاد مدل بلوکی زمین‌شناسی کانسار مس سونگون از روش کریجینگ جهت تخمین عیار بلوک‌ها استفاده شد.

نخستین قدم در عملیات زمین‌آماری شناخت و مدلسازی ساختار فضایی کمیت مورد نظر به‌وسیله واریوگرام است. با استفاده از واریوگرام تداوم کانی‌سازی، شعاع تاثیر و همسانگردی کانسار قابل بررسی است. تخمین زمین‌آماری به روش کریجینگ به مشخصات مدل واریوگرام برازش شده وابسته است [۲۰]. در این تحقیق با بررسی گام‌ها و واریوگرام‌های رسم شده، در نهایت بهترین واریوگرام برازش داده شده برای هشت عنصر اصلی موجود در کانسار مس سونگون شامل مس، مولیبدن، نقره، آرسنیک، آهن، سرب، روی و گوگرد تعیین شده است (شکل ۵). بر اساس واریوگرام‌های رسم شده و مدل‌های برازش داده شده بر آن‌ها، پراکندگی عیار برای مس، مولیبدن، آرسنیک و سرب کروی است و در مورد بقیه عناصر از مدل خطی پیروی می‌کند. با توجه به واریوگرام هر عنصر و با استفاده از روش کریجینگ عیار تک تک عناصر برای بلوک‌های مدل بلوکی خالی کانسار تخمین زده شده است.

با توجه به اینکه قسمت اعظم کانسنگ تولیدی در مجتمع مس سونگون به دمپ باطله هدایت می‌شود، باید با توجه به عیار توده معدنی و ضریب بازیابی فرآیند فرآوری و نیز آنالیز شیمیایی کنسانتره تولیدی، به تعیین میزان عناصر وارده به پساب پرداخت. بدین منظور عیارهای تخمین زده شده با استفاده از روش کریجینگ، برای هر عنصر در ضریب بازیابی همان عنصر ضرب و مقدار موثر آن‌ها در تولید پساب محاسبه شده است. در جدول ۴ ضرایب بازیابی به‌کار رفته در تعیین درجه آلایندگی عناصر در محصولات کنسانتره و باطله ارایه شده است.



شکل ۴: تصویر مدل بلوکی خالی ماده معدنی سونگون در محیط نرم‌افزار Micromine



شکل ۵: تصویر واریوگرام عناصر اصلی موجود در کانسار مس سونگون؛ ۱)مس، ۲) مولیبدن، ۳) نقره، ۴) آرسنیک، ۵) آهن، ۶) سرب، ۷) روی و ۸) گوگرد

برای تعیین درجه آلایندگی هر یک از عناصر با در نظر گرفتن عیار عنصر و حدود مجاز آلایندگی آن (جدول ۵)، نقش موثر عنصر در تولید پساب با استفاده از روش آنتروپی با در نظر گرفتن دیدگاه کارشناسی متخصصین برای وزن‌دهی به پارامترها، تعیین شده است. با استفاده از روش آنتروپی E_j، d_j و W_j برای تعداد واحدهای آلودگی هر عنصر در بلوک‌ها به شرح جدول ۶ است. بر اساس جدول ۶ میزان تأثیر عناصر در آلودگی پساب به ترتیب از روی، آرسنیک، سرب، مولیبدن، مس و نقره به گوگرد و آهن در حال کاهش است.

پس از تعیین وزن عناصر در ایجاد پساب صنعتی در گستره معدن مس سونگون با روش آنتروپی، وزن هر عنصر(W_j) به مقدار موثر در تولید پساب همان عنصر در هر بلوک ضرب شده و عدد آلودگی هر عنصر، برای بلوک‌ها تعیین شده است. از مجموع اعداد آلودگی تمامی عناصر یک بلوک، عدد آلودگی کل بلوک محاسبه و مدل بلوکی زیست‌محیطی کانسار ساخته شده است. در شکل ۶ میزان تاثیر هر بلوک در آلودگی پساب (عدد آلودگی هر بلوک) در مدل بلوکی زیست‌محیطی سه بعدی کانسار با استفاده از مقیاس رنگی و در محیط نرم‌افزار Micromine نمایش داده شده است. با توجه به شکل، میزان مواد مخرب زیست‌محیطی موثر در تولید پساب، پراکندگی یکسانی در گستره کانسار نداشته و تمرکز خاصی (بخش قرمز رنگ) دارد.

Micromine نرم‌افزاری جامع و کاربردی برای عملیات اکتشاف و طراحی سه بعدی معدن است که ابزارهای مختلفی برای مدلسازی، تخمین، طراحی، بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی فراهم کرده است. Micromine سبب افزایش دانش و آگاهی مهندسان از پروژه‌ها می‌شود، در نتیجه عملیات روی نواحی مورد نظر به صورت موثرتری انجام می‌شود و اعتبار مدل و نتایج حاصل از آن بالا است. ساختار مدولار[۱۳] Micromine به این معنی است که سیستم امکان مطابقت با نیازهای شما را دارد. همزمان با اینکه حجم فعالیت‌های شما افزایش می‌یابد و نیازمندی‌های شما تغییر می‌کند، Micromine نیز هم‌گام با شما گسترش می‌یابد.

۳-۳- برنامه‌ریزی زیست‌محیطی معدن مس سونگون

پس از وزن‌دهی به عناصر مضر، تعیین اعداد آلودگی هر بلوک (با استفاده از روش آنتروپی تعداد واحدهای آلودگی هر عنصر در بلوک‌ها محاسبه شده است) و مدلسازی زیست‌محیطی ذخیره، برنامه‌ریزی زیست‌محیطی ذخیره در حال استخراج معدن مس سونگون با دیدگاه رتبه‌بندی بلوک‌هایی که در تولید پساب مضر، بیشترین نقش را دارند در هشت فاز انجام گرفته است.

جدول ۶: نتایج وزن‌دهی میزان آلودگی عناصر به روش آنتروپی

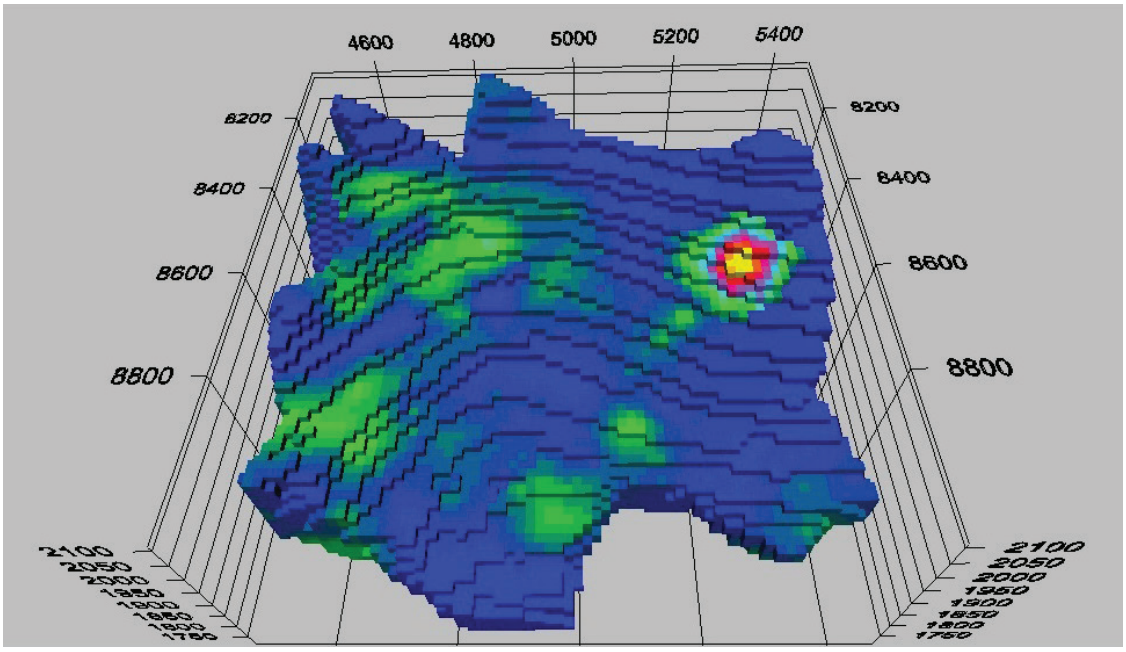
عنصر	Cu	Mo	S	As	Pb	Fe	Zn	Ag
بازیابی عنصر در کنسانتره ٪	۸۷	۶۰	۳۱	۱۰	۱۰	۲۱	۱۰	۱۰
بازیابی عنصر در باطله ٪	۱۳	۴۰	۶۹	۹۰	۹۰	۷۹	۹۰	۹۰

جدول ۵: استاندارد مجاز WHO برای عناصر موجود در معدن مس سونگون

عنصر	Ag	Zn	Fe	Pb	As	S	Mo	Cu
استاندارد مجاز سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران (ppm)	۱	۲	۳	۱	۰٫۱	۱۶۷	۰٫۰۱	۱

جدول ۴: بازیابی عناصر موجود در کنسانتره و باطله آزمایش‌های فرآوری مجتمع مس سونگون

	Ag	Zn	Fe	Pb	As	S	Mo	Cu
Ej	۰/۹۸۷۴۸	۰/۷۸۹۳۹	۰/۹۹۶۶۷	۰/۹۳۸۳۷	۰/۹۳۰۲۹	۰/۹۹۰۰۸	۰/۹۶۱۰۲	۰/۹۸۶۰۶
Dj	۰/۰۱۲۵۱	۰/۲۱۰۶۰	۰/۰۰۳۳۲	۰/۰۶۱۶۲	۰/۰۶۹۷۰	۰/۰۰۹۹۱	۰/۰۳۸۹۷	۰/۰۱۳۹۳
Wj	۰/۰۲۹۷۵	۰/۵۰۰۷۲	۰/۰۰۷۹۰	۰/۱۴۶۵۱	۰/۱۶۵۷۲	۰/۰۲۳۵۷	۰/۰۹۲۶۶	۰/۰۳۳۱۳

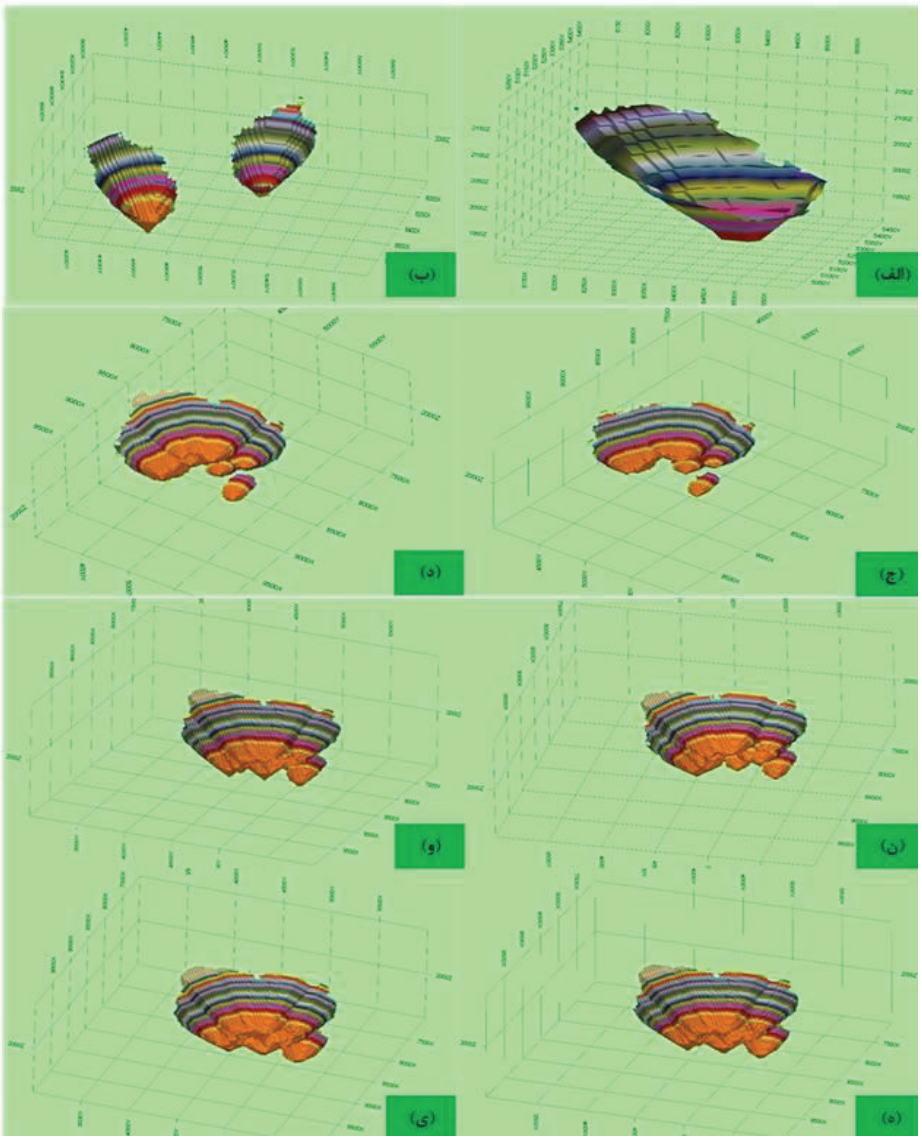


شکل ۶: میزان مواد مخرب زیست‌محیطی مؤثر در تولید پساب در مدل بلوکی زیست‌محیطی معدن مس سونگون

فاز اول کوچک‌ترین کاواک با بیشترین عدد آلودگی را شامل می‌شود. پساب حاصل از بلوک‌های ماده معدنی واقع در داخل این پیت بیشترین خطرات زیست‌محیطی ممکن را به همراه دارند. در جدول ۷ و شکل ۷ـ الف به ترتیب مشخصات و تصویر پیت اول ارایه شده است. در فاز دوم با توجه به تمرکز مواد مضر زیست‌محیطی در دو منطقه، این مرحله برنامه‌ریزی به دو پیت جدا از هم، که تمرکز مواد مضر در این دو منطقه را نشان می‌دهد، تقسیم شده است. عدد آلودگی میانگین این پیت تقریبا نصف عدد آلودگی پیت فاز اول است (جدول ۷ و شکل ۷ـ ب). در فاز سوم، پیت‌های مرحله دوم با هم ادغام و همچنین یک پیت با اندازه کوچک (در مقایسه با پیت‌های قبلی) که نقطه تمرکز دیگری از مواد مستعد برای تولید پساب مضر است، به آن اضافه شده است. استعداد تولید پساب مضر زیست‌محیطی این پیت نسبت به فاز قبلی کمتر است (جدول ۷ و شکل ۷ـ ج). مرحله چهارم با توجه به خروج از نقطه تمرکز اصلی، عدد آلودگی کل پیت کاهش قابل توجهی داشته است (تقریبا $\frac{1}{4}$ پیت قبلی). در این فاز به دلیل وجود یک تپه در مورفولوژی منطقه تعدادی بلوک با ارزش صفر، به محدوده پیت اضافه شده است. بنابراین عدد آلودگی میانگین پیت کاهش غیرعادی داشته است (جدول ۷ و شکل ۷ـ د). عدد آلودگی کل پیت در فاز پنجم دارای کاهش اندکی نسبت به فاز چهار بوده، در حالیکه تعداد بلوک‌های این فاز $\frac{1}{2}$ فاز چهارم است. بنابراین عدد آلودگی میانگین پیت نسبت به مرحله قبل افزایش یافته است که این نشان از غیرعادی بودن کاهش عدد آلودگی فاز چهارم دارد (جدول ۷ و شکل ۷ـ ن). فاز ششم نسبت به فاز پنج تغییرات خاصی نداشته و تعداد بلوک‌ها و عدد آلودگی میانگین، کاهش اندکی داشته است (جدول ۷ و شکل ۷ـ و). روند نزولی استعداد تولید پساب مضر در فاز ۷ نیز ادامه داشته و عدد آلودگی میانگین نسبت به مرحله قبل حدودا ۱۰۰ واحد کاهش یافته است (جدول ۷ و شکل ۷ـ ه). فاز هشتم مرحله آخر برنامه‌ریزی است که بلوک‌های آن با عدد آلودگی میانگین ۵۲ واحد، کمترین تاثیر در پساب‌زایی را نسبت به سایر مراحل یاد شده دارد. اطلاعات مربوط به این فاز در جدول ۷ و شکل ۷ـ ی آمده است.

۴- نتیجه‌گیری

پساب‌های اسیدی ناشی از عملیات معدنکاری و سدهای باطله فرآوری مواد معدنی، از جمله مهم‌ترین اثرات نامطلوب معادن بر محیط زیست است، که تاثیرات زیان‌باری بر روی کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی دارند. در بین معادن موجود در گستره استان آذربایجان شرقی، معدن مس سونگون با ظرفیت استخراج سالیانه ۱۴ میلیون تن و همچنین با در



شکل ۷: تصاویر سه بعدی پیت‌های طراحی شده براساس برنامه‌ریزی زیست‌محیطی معدن مس سونگون؛ الف) فاز اول، ب)فاز دوم، ج) فاز سوم، د) فاز چهارم، ن) فاز پنجم، و) فاز ششم، ه) فاز هفتم، ی) فاز هشتم

جدول ۷: مشخصات فازهای (پیت) برنامه‌ریزی معدن مس سونگون

شماره فاز(پیت)	عمر پیت (ماه)	عدد آلودگی میانگین هر بلوک	عدد آلودگی پیت (فاز)	تعداد بلوک‌های ماده معدنی	تعداد کل بلوک‌ها	حجم (مترمکعب)
۱	۲	۱۱۴۱	۱۶۸۹۵۹۵	۱۲۷۰	۱۴۸۱	۳۲۲۹۸۴۰
۲	۹	۵۶۷	۳۳۵۰۱۷۶	۳۷۰۸	۵۹۰۷	۱۴۹۰۴۸۵۲
۳	۲۹	۵۰۸	۸۹۱۶۳۰۶	۱۱۴۸۲	۱۷۵۶۶	۴۸۶۹۷۳۱۵
۴	۱۳	۳۱۷	۲۳۲۸۷۳۸	۲۷۰۷	۷۳۵۳	۲۱۰۹۴۶۷۰
۵	۸	۴۲۳	۱۸۲۵۳۸۷	۲۹۰۰	۴۳۱۲	۱۲۷۸۳۳۰۲
۶	۷	۴۲۰	۱۵۸۸۷۵۴	۲۳۴۲	۳۷۸۵	۱۱۳۵۵۸۳۷
۷	۵	۳۰۲	۸۷۱۲۲۶	۱۴۲۲	۲۸۸۸	۸۸۱۸۸۲۱
۸	۵	۵۲	۴۳۵۸۲۸	۶۶۹	۸۳۴۴	۷۸۲۲۳۵۰

نظر گرفتن باطله حاصل از فرآیند فلوتاسیون که برای فرآوری این کانسنگ استخراجی به‌کار برده می‌شود، سالیانه بالغ بر ۳۰ میلیون مترمکعب پساب تولید می‌کند. پساب تولیدی حاوی فلزات سنگین و گوگرد است که خطرات زیان‌باری به اکوسیستم منطقه وارد می‌کنند. در این مقاله سعی شده است، تولید معدن از جنبه تولید پساب بررسی شود. با ترکیب این برنامه با برنامه‌ریزی تولید معدن می‌توان برنامه‌ای بهینه از دیدگاه تولید و مسایل زیست‌محیطی به‌دست آورد. با انجام مطالعات میدانی، آزمایش‌های فرآوری و همچنین مدلسازی و برنامه‌ریزی زیست‌محیطی برای کانسار مس سونگون نتیجه شد، که حجم باطله و به تبع آن حجم پساب تولیدی از زون لیچینگ کانسار مس سونگون بیشترین مقدار و زون سوپرژن کمترین مقدار باطله را دارد.

بر اساس مدل بلوکی زیست‌محیطی کانسار سونگون، میزان مواد مخرب زیست‌محیطی در مناطق مختلف معدن متفاوت بوده و در محل تمرکز این مواد، طبیعتا اثرات زیست‌محیطی پساب حاصل از استخراج بلوک‌های آن، نسبت به مناطق دیگر بیشتر است. با طراحی برنامه‌ریزی تولید براساس تاثیرات زیست‌محیطی عناصر موجود در معدن سونگون، ۸ فاز عملیاتی برای این کانسار طراحی و تعیین شد. در این برنامه‌ریزی بلوک‌های پیت اول با عدد آلودگی میانگین ۱۱۴۱ و پیت آخر با عدد آلودگی میانگین ۵۲، بیشترین و کمترین استعداد را در تولید پساب مضر برای محیط زیست دارند. با توجه به مدل بلوکی زیست‌محیطی تهیه شده و پیت‌های برنامه‌ریزی زیست‌محیطی می‌توان خطرات ناشی از استخراج و فرآوری مناطق مختلف و یا هر بلوک را پیش‌بینی و مدیریت کرد تا اثرات مخرب آن، کنترل و کاهش داده شود.

پژوهش حاضر برنامه‌ریزی تولید بر اساس کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی پساب (باطله کارخانه فرآوری) را بررسی کرد، پژوهشگران آتی می‌توانند در برنامه‌ریزی تولید زیست‌محیطی باطله‌ای که به کارخانه فرآوری نمی‌رود و حتی اثرات مخرب زیست‌محیطی حاصل از تغییرات توپولوژی منطقه را نیز دخالت دهند.

۵- مراجع

[1] Galvic, P., and Lukman, R. (2007). "*Review of sustainability terms and their definitions*". Journal Cleaner Production, 15: 1875-1885.

[2] Cowell, S. J., Wehrmeyer, W., Argust, P. W., Graham, J., and Robertson, S. (1999). "*Sustainability and the primary extraction industries: theories and practice*". *Resource Policy,* 25: 277-286.

[3] Botin, J. A. (2009). "*Sustainable Management of Mining Operations*". Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), pp. 392.

[۴] جعفرپور، ا.؛ ۱۳۹۴؛ **"کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی پساب معدن مس سونگون با استفاده از فرآیندهای گیاه‌پالایی و تأثیر آن در برنامه‌ریزی تولید معدن"**. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی ارومیه.

[5] Amankwah, H. (2011). "*Mathematical Optimization Models and Methods for Open-pit Mining*". *Linkoping Studies in Science and Technology*, pp. 50.

[6] Gilani, S. O., and Sattarvand, J. (2015). "*Integrating geological uncertainty in long-term open pit mine production planning by ant colony optimization*". *Journal of Computer & Geoscience*, 87: 31-40.

[7] Osanloo, M., Rashidinejad, F., and Rezai, B. (2008). "*Incorporating environmental issues into optimum cut-off grades modeling at porphyry copper deposits*". Resource Policy, 222–229.

[8] Asad, M. W. A., and Topal, E. (2011). "*Net present value maximization model for optimum cut-off grade policy of open pit mining operations*". Journal South of Africa Institute Mining and Metallurgy, 111: 741–750.

[9] Mansouri, M., Osanloo, M., and Gheisari, N. (2014). "*Establishing a Sustainable Model to Reduce the Risk of Mine Closure, Mine Plan*". Medical Equipment Insights, 1427–1436.

[10] Hilson, G., and Basu, A. (2003). "*Devising indicators of sustainable development for the mining and minerals industry: an analysis of critical background issues*". International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 10: 319-331.

[11] Laurence, D. (2011). "*Establishing a sustainable mining operation: an overview*". Journal Cleaner Production, 19: 278-284.

[12] Rajaram, V., Dutta, S., and Parameswaran, K. (2005). "*Sustainable Mining Practices: a Global Perspective*". Taylor and Francis Group, London UK.

[13] Horowitz, L. (2006). "*Mining and sustainable development*". Journal Cleaner Production, 14(3-4): 307-308.

[14] Eggert, R. (2006). "*Mining, sustainability and sustainable development*". Maxwell, P.M. (Ed.), Australian Mineral Economics, AusIMM Monograph, pp. 24.

[15] Gholamnejad, J. (2008). "*Determination of the optimum cutoff grade considering environmental cost*". International journal of Environment Applied Science, 3(3): 186–194.

[16] Dogan, T., Bascetin, A., and Sertabipoglu, Z. (2009). "*The effects of changing block size on ore quality control and environmental impacts*". Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES), Alberta, Canada.

[17] Badiozamani, M. M., and Askari-Nasab, H. (2014). "*Integration of reclamation and tailings management in oil sands surface mine planning*". Environmental Modelling & Software, 51: 45-58.

[۱۸] یوسفی، م.؛ کامکار روحانی، ا.؛ ۱۳۸۹؛ **"اصول روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی"**. انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیر کبیر.

[۱۹] مؤمنی.، م.؛ ۱۳۸۵؛ **"مباحث نوین تحقیق در عملیات"**. چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران.

[۲۰] عطائی، م.؛ حسینی، م.ع.؛ ۱۳۹۰؛ **"طراحی محدوده و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز"**. چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیر کبیر.

---

۱ Sustainable Development (SD)

۲ Ultimate Pit Limit (UPL)

۳ Net Present Value (NPV)

۴ مایکروماین

۵ Entropy

۶ Shannon

۷ Supergene

۸ Hypogene

۹ Sodium isopropyl xanthate ($(CH_3)_2CHOCS_2Na$)

۱۰ Sodium Di Sec Butyl Dithiophosphate + Sodium Mercaptobenzothiazole

۱۱ Poly propylene glycol

۱۲ Methyl Isobutyl carbonyl

۱۳ Modular