مدل‌سازی ژئومتالورژی- رویکرد نوین در تلفیق اطلاعات زمین‌شناسی و متالورژی به‌منظور بهینه‌سازی ارزیابی ذخیره معدنی

امین‌حسین مرشدی

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

نویسنده مسئول: morshedy@yazd.ac.ir *

دریافت: ۹۵/۳/۲۳ پذیرش: ۹۵/۸/۲۵

چکیده

در پروژه‌های معدنی، جنبه‌های طراحی شامل مدلسازی زمین‌شناسی ذخیره معدنی، شیوه استخراج، روش فرآوری و در نهایت بازیابی و نرخ تولید محصول (کنسانتره) است؛ کلیه این موارد بر اقتصاد پروژه و ارزش کلی معدن تاثیر گذار هستند. برای طراحی مدل ذخیره معدنی، به‌طور معمول از پارامترهای عیار، تناژ و میزان تناژ بالاتر از عیارحد به‌عنوان ملاک اقتصادی استفاده می‌شود که به‌تنهایی نمی‌تواند جوابگو باشد. ژئومتالورژی با ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی و متالورژی، امکان تولید یک مدل پیش‌بینی کننده فضایی را برای خطوط فرآوری معدنی فراهم می‌کند. این زمینه نوظهور، با هدف تلفیق پارامترهایی از جمله سختی، قابلیت خردایش، بازیابی، درجه آزادی و بافت کانی‌ها، عیار عناصر و غیره تعریف شده است. مدلسازی ژئومتالورژیکی نیازمند توسعه یک ماتریس سه‌بعدی به صورت یک الگوی X-Y-Z که دو محور آن نشانگر عوامل زمین‌شناسی (از جمله نوع سنگ‌شناسی و دگرسانی) و محور سوم نشانگر پارامترهای بحرانی (از جمله سختی، بافت، درجه آزادی کانه، توزیع عناصر مزاحم و نظایر آن) است که در پهنه‌بندی کانسار از نظر خواص متالورژیکی حائز اهمیت است. به‌منظور اجرای مدلسازی متالورژی، توزیع فضایی پارامترهای خروجی معدنکاری، به صورت یک تابع (رابطه) غیرخطی از پارامترهای ورودی و با توجه به رابطه بین مقیاس نمونه‌برداری در حالت‌های کوچک مقیاس (آزمایشگاهی)، متوسط مقیاس (نیمه‌صنعتی) و بزرگ مقیاس (صنعتی)، تعیین شده است. الگوریتم پیشنهادی، بیانگر برتری به‌کارگیری رویکرد «زنجیره ارزش» در مدلسازی ژئومتالورژی در مقایسه با رویکرد رایج منطق مرحله‌ای در برنامه‌ریزی معدنی است.

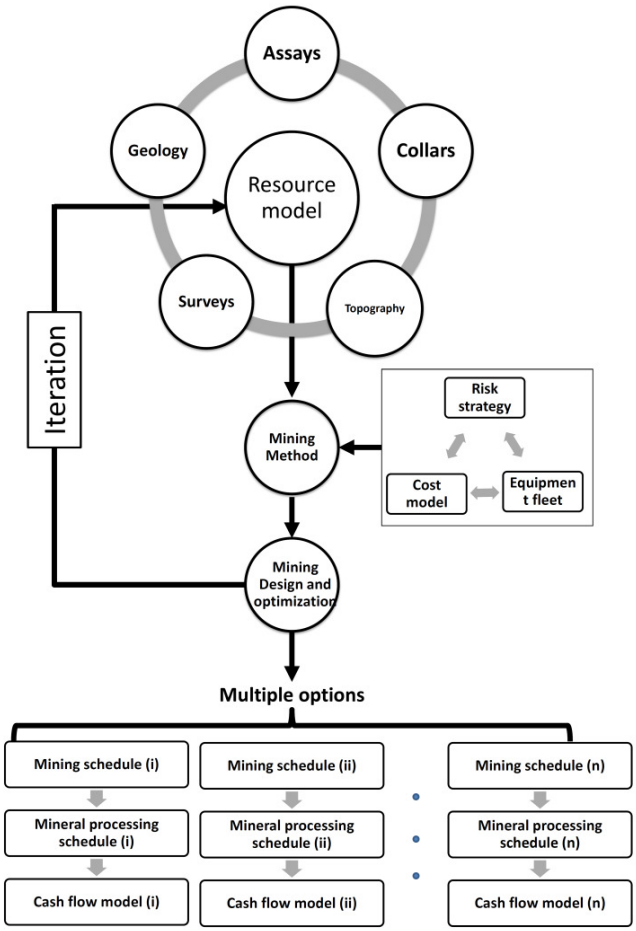
واژه‌های کلیدی: ژئومتالورژی، مدل زمین‌شناسی، تغییرپذیری فضایی، نرخ بازیابی، عدم قطعیت

مقدمه

از گذشته، ناتوانی بسیاری از سرمایه‌گذاری‌های معدنی در پیش‌بینی جریان نقدینگی با وجود ارزیابی دقیق و پرهزینه پروژه‌ها به اثبات رسیده است. ریسک در پروژه‌های معدنی را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که تصمیم‌گیری در سطح بالایی از عدم قطعیت انجام می‌شود. صنایع مواد معدنی همچنان در راستای کارایی بیش‌تر، کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش قطعیت و کاهش ریسک گام برمی‌دارند، در حالی که با کانسارهای عیار پایین/ حجم زیاد و کانسنگ پیچیده روبرو هستیم و پایبندی به الزامات زیست‌محیطی و انتظارات اجتماعی از جمله کاهش مصرف انرژی و توسعه پایدار وجود دارد [۱]. در شکل ۱، مراحل مرسوم ارزیابی معدنی، از تشکیل مدل ذخیره پایه تا بررسی خروجی اقتصادی معدن نمایش داده شده است. عدم قطعیت در مدل جریان نقدینگی برگرفته از نوسانات قیمت مواد معدنی، شناخت هندسه و عیار کانسنگ و هم‌چنین بخش‌های عملیاتی معدنکاری برقرار است. پیش‌بینی دقیق قیمت آینده مواد معدنی می‌تواند بسیار دشوار باشد، با این حال، شناخت دقیق‌تر از کانسنگ، امکان بهبود برنامه‌ریزی راهبردی و توانایی در ساخت یک طرح عملیاتی انعطاف‌پذیر به منظور مقابله با عدم قطعیت‌های پنهان، تغییرپذیری کانسار و محدودیت‌های عملیاتی را فراهم می‌سازد.

در مدل‌های مرسوم دو یا سه‌بعدی بلوکی، ملاک ارزیابی اقتصادی، تناژ و عیار متوسط بخش‌های بالاتر از عیار حد کانسار و تقسیم‌بندی کانسار به بخش‌های کانسنگ و باطله است و منطق مرحله‌ای و زمان‌بندی شده از زمین‌شناسی تا درآمدزایی در معدنگاری به‌کار گرفته شده است. در روش‌های ارزیابی سنتی، تاثیر خصوصیات زمین‌شناسی، عناصر همراه و مزاحم و هم‌چنین پارامترهای فرآوری در سود نهایی (خروجی) نادیده گرفته

می‌شد [۴]. در مقاله حاضر، الگوریتمی جامع از مدل‌سازی ژئومتالورژی به‌عنوان یک رویکرد میان رشته‌ای در علوم زمین و معدن ارائه شده و قابلیت‌های آن نسبت به روش‌های متداول برنامه‌ریزی معدنی مورد ارزیابی قرار گرفته است.



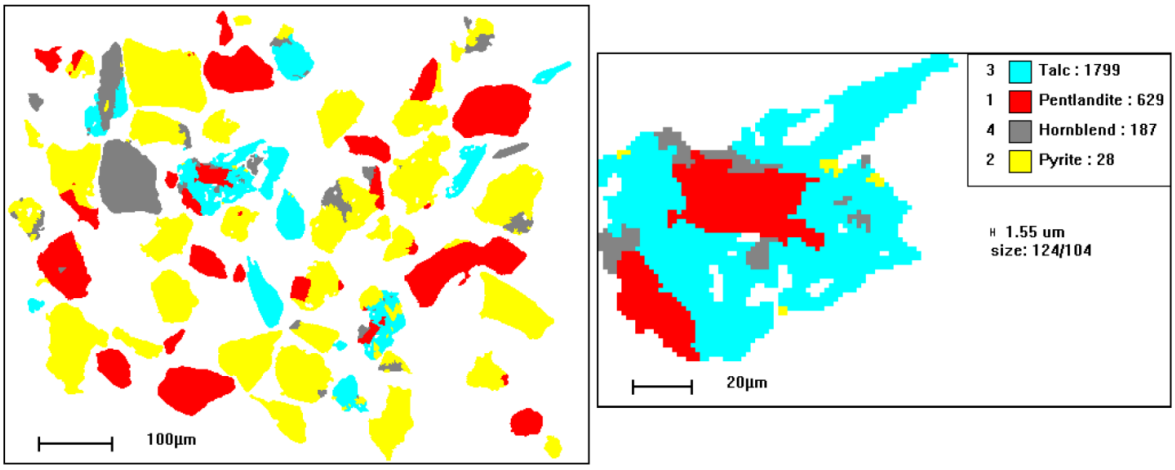
شکل ۱. مراحل رایج ارزیابی برنامه‌ریزی معدنی [۱۰،۴]

تعریف ژئومتالورژی

در سال‌های اخیر، همزمان با افزایش قدرت پردازنده‌ها و تاکید بر تجزیه و تحلیل ریسک اقتصادی، کارشناسان درصدد ورود عواملی جدید در مدل‌های فضایی شدند؛ علاوه بر عیار به‌عنوان کلیدی‌ترین عامل اقتصادی، تخمین فضایی عناصر مزاحم، نسبت عناصر اصلی (کلیدی) و عواملی از جمله بازیابی، میزان و ابعاد ورودی و خروجی سیستم فرآوری مد نظر قرار گرفت. به طور مثال، اصلی‌ترین مبانی شناخت کانسار، اطلاعات زمین‌شناسی است که خود می‌تواند تاثیر مثبت یا منفی بر میزانی بازیابی ماده معدنی داشته باشد. از این‌رو، نیاز به یک مقوله نوین میان رشته‌ای است که توانایی یکپارچه‌سازی طیف وسیعی از فعالیت‌های موجود معدنی را داشته باشد [۵]. ژئومتالورژی شامل اجزای مختلفی از جمله فرآوری معدنی، زمین‌شناسی اکتشافی، متالورژی، کنترل فرآیندها، مدل‌سازی منابع معدنی و زمین آمار است [۳]. استفاده از داده‌های زمین‌شناسی برای بهینه‌سازی خطوط فرآوری تبدیل به‌بخش قابل‌توجهی از رویکرد فرآوری مدرن شده است. با این حال، تعریف نحوه تحلیل و پیاده‌سازی به عنوان بخشی از عملیات روزانه مجتمع معدنی کمتر مورد بحث قرار گرفته است. ژئومتالورژی با رویکردی تلفیقی و میان رشته‌ای در حوزه‌های علوم زمین و متالورژی با استفاده از زمین آمار ارتباط برقرار کرده تا کلیه عملیات‌های معدنی بهینه شود. ژئومتالورژی در اصل یک روش کار، به‌منظور توسعه پروژه‌های موجود و جدید با استفاده از حداکثر اطلاعات موجود ارائه می‌کند، این موضوع نشانگر طرح یک رشته جدید با عنوان ژئومتالورژی است که در شکل فعلی آن فاقد انسجام و رویکرد عملیاتی است [۳]. زمینه نوظهور ژئومتالورژی یک فعالیت با افزایش ارزش خروجی‌ها از طریق

بهبود برنامه‌ریزی معدن و استفاده از منابع معدنی است. ژئومتالورژی شامل یک رویکرد کمی و جامع در راستای توصیف کانسنگ از نظر ویژگی‌های بحرانی فرآوری از جمله خردایش، آسیا، آزادی، بازیابی، کیفیت محصول و مدیریت زیست‌محیطی است [۶]. در حالی‌که مطالعات کانی‌شناسی به‌عنوان بررسی‌های اولیه و پایه محسوب می‌شود، اما مشخصه‌های به‌دست آمده از این بخش شامل بافت، درجه آزادی کانی‌ها و هم‌چنین ابعاد و دانه‌بندی آن‌ها، نقش مهمی در مطالعات امکان‌سنجی فرآوری معدنی از جمله قابلیت خردشوندگی، جداسازی، شناورسازی، انحلال و نظایر آن ایفا می‌کنند. در شکل ۲، نحوه توزیع دوبعدی، درجه آزادی و بافت کانی‌ها (در ابعاد میکرومتر) نمایش داده شده است.

نتایج کلیدی با به کارگیری رویکرد ژئومتالورژی، موجب ارتقا فرآیند تخمین، افزایش قطعیت، کاهش ریسک‌های فنی، ارتقا بهینه‌سازی اقتصادی تولید مواد معدنی و توسعه پایدار معدنی می‌شود. از مبانی مشترک بین تعاریف ژئومتالورژی می‌توان به بحث تلفیقی بودن داده‌هایی از جنس متفاوت و به کارگیری رویکرد «زنجیره ارزش» از تعریف منابع معدنی تا بازاریابی و فروش است [۱].



شکل ۲. نقشه دوبعدی توزیع ذرات و کانی‌های موجود در نمونه میکروسکوپی

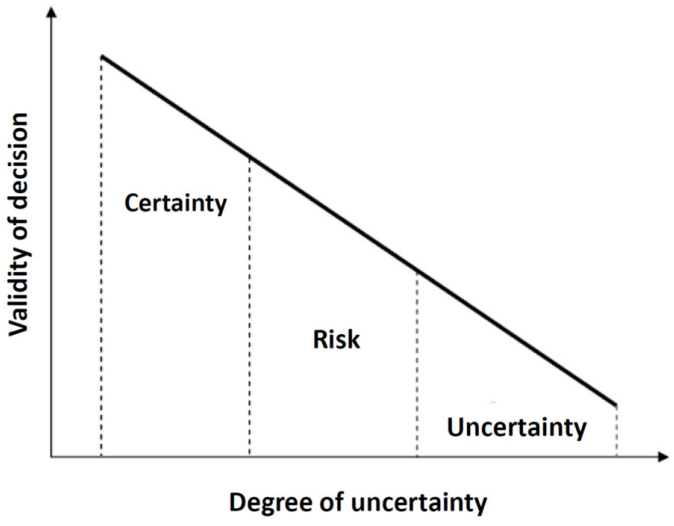
ژئومتالورژی و عدم قطعیت در مدل‌سازی منابع معدنی

بدنه کانسنگ، اساس دارایی‌های سرمایه‌گذاری و سودآوری معدنی است که وابسته به شیوه استخراج بهینه آن است. در حوزه مطالعات پیش امکان‌سنجی و امکان‌سنجی، ارزیابی پروژه نمایانگر ارزش اقتصادی منابع معدنی و طراحی بهینه عملیات معدنکاری است. طراحی بهینه عملیات شامل تصمیم‌گیری در تعیین روش استخراج و فرآوری است که به طور کلی بیش‌ترین تاثیر را در مقوله اقتصاد یک پروژه معدنی خواهد داشت. طراحی بهینه، انتخاب مطلوب‌ترین گزینه‌های اقتصادی و سناریوی ممکن و در نهایت حداکثر ارزش دارایی را در بر خواهد داشت. اما باید توجه داشته که اساس ارزیابی پروژه و طرح‌های عملیاتی مرحله بعد، مدل ذخیره معدنی است [۱]. مدل‌سازی منابع معدنی، بیانگر توزیع فضایی کانی‌سازی و مبنای تمام شاخص‌های ارزش‌گذاری معدنی است که در طول فرآیند بهینه‌سازی طراحی در نظر گرفته می‌شود. برنامه‌ریزی معدنی بر اساس تناژ و عیار و کلیه تجزیه و تحلیل‌های اقتصادی مرحله بعد، براساس نتایج تخمین فضایی ذخیره است. به‌منظور ارزیابی موثر یک منبع معدنی، مدل طراحی شده باید به‌صورت شاخص معرف اطلاعات زمین‌شناسی کانسنگ و تغییرپذیری ویژگی‌ها و پارامترهایی ارزش‌گذاری ذخیره باشد. فراتر از مقوله رابطه تناژ و عیار کانسنگ، باید عوامل مرتبط با پارامترهای برگرفته از سودآوری اقتصادی از جمله خروجی، هزینه‌های معدنکاری، فرآوری و بازیابی متالورژی را در نظر گرفت. عدم شناخت کافی از زمین‌شناسی و تخمین منابع، موجب عدم دقت تخمین فضایی ذخیره معدنی و عدم قطعیت در شناخت آن می‌شود. عدم تعیین ارزش برای ارزیابی‌ها در طول طراحی عملیاتی، عدم قطعیت را افزایش می‌دهد [۴].

شناخت زمین‌شناسی از کانسار، یک جزء حیاتی در راستای درک کلی و بهره‌برداری بهتر از امکانات فرآوری مواد معدنی است. در دهه اخیر، طرح‌های نوین مختلف با تمرکز بر روش‌های تلفیق اطلاعات در راستای کنترل مسائل اقتصادی گسترش یافته است. مدل‌سازی ژئومتالورژی، یک فرآیند در راستای کمی‌سازی تغییرپذیری کانسار با توجه به سنگ‌های درونگیر، هاله‌های دگرسانی، ساختارهای زمین‌شناسی و اثرات کانی‌شناسی بر نتایج خروجی فرآوری و بازیابی است. این امر مستلزم کمی‌سازی کانسارها از لحاظ پارامترهای فرآوری مانند سختی، انرژی خردایش، کاهش ابعاد، درجه آزادی و بازیابی است. هدف از تلفیق در ژئومتالورژی، بهینه‌سازی پتانسیل‌های عملیاتی با ترکیب اقدامات معدنکاری و فرآوری مرتبط با مدل کانسار که منعکس کننده ارزش اقتصادی و کاهش ریسک و عدم قطعیت مرتبط با عملیات مرحله بعد است. جدول ۱، بیانگر آزمایش‌ها و پارامترهایی است که در فرآیند مدل‌سازی کانسنگ تاثیرگذار است [۱۰].

عدم قطعیت در منابع معدنی، موجب کاهش اطمینان در درآمدهای مالی حاصل از سرمایه‌گذاری معدنی می‌شود. پیش‌بینی درآمد براساس عیار تخمینی، نرخ خروجی و بازیابی و عدم قطعیت موجود در پیش‌بینی این پارامترها، ریسک در پیش‌بینی جریان نقدینگی را در پی خواهد داشت. یک مدار فرآوری برای یک کانسار به طور ویژه طراحی می‌شود، تا با دستیابی به مطلوب‌ترین نرخ خروجی و بازیابی، شرایط بهینه‌سازی مقوله اقتصادی یک پروژه معدنی را فراهم کند. تغییرپذیری در کانسنگ برگرفته از تنوع در کانی‌ها، بافت و هوازدگی، می‌تواند بر رفتار کانسنگ در مدار فرآوری و متعاقب آن بر بازدهی و نرخ خروجی موثر باشد [۷]. ژئومتالورژی رویکردی است که می‌تواند با تلفیق زمین‌شناسی، طراحی عملیاتی، برنامه‌ریزی معدنی و متالوژی با هدف بهبود شناخت منابع معدنی، ریسک پروژه را کاهش دهد. پیچیدگی‌های مرتبط با تغییرپذیری کانسار، امکان طراحی عملیاتی با شناخت بیش‌تر از اقتصاد منابع معدنی و کمینه‌سازی ریسک از طریق ارائه گزینه‌های انعطاف‌پذیر را فراهم می‌سازد [۱ و ۵].

وجود عدم قطعیت در مهندسی معدن واضح است که موجب بروز عدم قطعیت در نتایج حاصل از آن می‌شود؛ از سوی دیگر تصمیم‌گیری باید بر مبنای همین نتایج غیرقطعی صورت گیرد، بنابراین شناخت اختلاف بین عدم قطعیت و ریسک حائز اهمیت است. عدم قطعیت به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن نه تنها مجموعه رویدادهای ممکن نامعلوم است، بلکه احتمال رویدادهای معلوم نیز نامشخص است. به عبارت دیگر نه مجموعه رویدادهای ممکن شناخته شده است و نه احتمال وقوع آن‌ها، برعکس واژه ریسک زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که نه فقط مجموعه رویدادهای ممکن قابل تخمین بوده، بلکه احتمال وقوع هریک از آن‌ها نیز معلوم است و آنچه نمی‌توان با قطعیت تعیین کرد این است که کدام یک از رویدادها تحقق خواهد یافت (شکل ۳) [۹].



شکل ۳. سطح اعتبار تصمیم‌گیری به عنوان تابعی از درجه عدم قطعیت [۹]

جدول ۱. آزمایش‌های مرتبط با توصیف ویژگی‌های کانسنگ [۱۰]

زمینه	ویژگی مورد بررسی	آزمایش‌های مرتبط
زمین‌شناسی	توزیع مصالح و ارتباط اجزا زمین	نقشه‌برداری، لاگ حفاری و نظایر آن
شیمی	عیار	عیارسنجی مغزه
کانی‌شناسی	پهنه‌بندی و خصوصیات کانی‌های موجود (مواردی نظیر اندازه، بافت و ساخت)	تصویربرداری میکروسکوپی
خصوصیات فیزیکی	سختی و قابلیت خردشوندگی	اندیس کار باند، آزمایش پرتاب وزنه و نظایر آن
پاسخ فرآوری	بازیابی	آزمایش‌های مرتبط با فلوتاسیون، هیدرومتالورژی و نظایر آن
ژئوتکنیک	خصوصیات ساختاری و آماده‌سازی سایت	لوژون، شاخص کیفی سنگ و جریان آب زیرزمینی

محدودیت موجود در اجرای ژئومتالورژی

برای دستیابی به حداکثر ارزش افزوده، لزوم ارتقا در مدل‌سازی جاری ژئومتالورژی احساس می‌شود که محدودیت‌های مورد نظر عبارتند از [۵]:

۱) عدم تعریف مناسب پهنه‌بندی کانسار از لحاظ خصوصیات متالورژیکی: کانسارهای فلزات پایه و گرانبها معمولاً شامل سیستم‌های پیچیده چند متغیره است که موجب پیچیدگی در فرآیند مدل‌سازی می‌شود. یک کانسار می‌تواند شامل واحدهای مختلف سنگ‌شناسی، انواع دگرسانی‌های مختلف، کانی‌زایی و کنترل کننده‌های ساختاری مختلف باشد که همه بر نتایج خروجی تاثیرگذار است. استفاده از مرزهای از پیش تعیین شده (به عنوان مثال پهنه‌های سنگ‌شناسی/عیاری) برای کنترل توزیع شاخص‌های کارآیی متالورژی و کارهای آزمایشگاهی، بدون ارزیابی صحیح از رابطه بین تعریف پهنه و ویژگی‌های فرآوری، موجب افزایش عدم قطعیت می‌شود. به طور معمول، هیچ ارتباط مستقیم و شفافی بین تعریف زمین‌شناسی کانسنگ و کارایی فرآوری خروجی وجود ندارد.

۲) فقدان پروتکل و استاندارد نمونه‌برداری و کمبود نمونه‌های متالورژی: به‌طور معمول، پروتکل‌ها و حمایت در زمینه آزمایش‌های متالورژی و انتخاب نمونه‌ها ضعیف انجام می‌شود. مجموعه نمونه ژئومتالورژیکی، اغلب دارای محدودیت (کمتر از ۱۰۰ نمونه) در مجموعه نمونه‌برداری می‌باشد و با توجه به این امر، ارزیابی تغییرپذیری درون پهنه دشوار است. آزمون‌های کنونی متالورژی مستلزم به‌نمونه‌ها با جرم زیاد است که اغلب با ترکیب نمونه‌های مغزه به دست می‌آید و این ترکیب می‌تواند تغییرپذیری در اعماق مختلف را با هم ادغام کند که امکان جدایش آن در مراحل بعد وجود ندارد.

۳) فقدان یک روش متحد برای تلفیق پارامترهای اساسی موثر در فرآوری: یک روش تعریف شده و قابل قبول صنعت، برای انجام مطالعات ژئومتالورژی وجود ندارد. تعدادی از سازمان‌ها، روش‌های محدود و شامل فرض‌های متعدد ارائه داده‌اند که با توجه به‌محرمانه بودن و دلایل تجاری، جزییات کامل منتشر نشده است.

۴) فقدان یک روش زمین آماری پذیرفته شده برای تعیین توزیع فضایی ویژگی‌های ژئومتالورژی غیر جمع‌پذیر و غیر خطی: به‌منظور توسعه روش‌های زمین آماری برای تعمیم و توزیع فضایی ویژگی‌های غیرجمع‌پذیر به کل ذخیره، از داده‌ها برای آدرس‌دهی به ذخیره استفاده می‌شود. این در حالی است که اگر برای مدل‌سازی تغییرپذیری و واریوگرافی اطلاعات کافی وجود نداشته باشد، نیاز به‌یک روش زمین آماری سطح بالا برای تولید نتایج بهینه نسبی است.

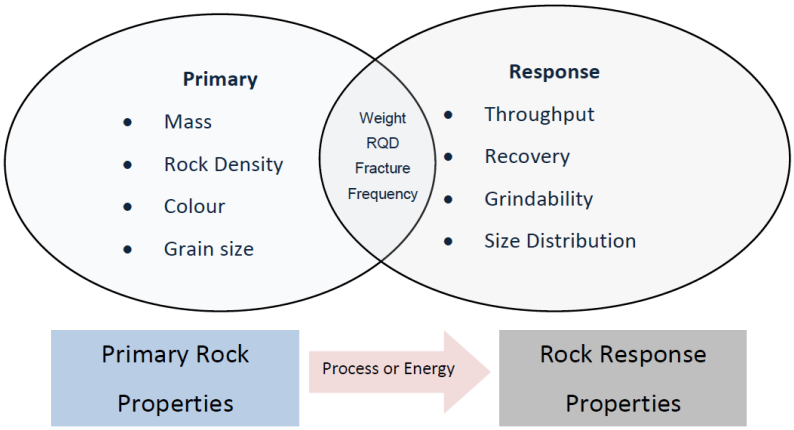
ویژگی‌های ژئومتالورژی

رابطه ژئومتالورژی با برنامه‌ریزی عملیاتی و طراحی کارخانه فرآوری، بر اساس شناخت ویژگی‌هایی است که در ارزش‌گذاری ذخیره معدنی تاثیرگذار هستند. این ویژگی‌ها شامل خصوصیات مواد، علاوه بر ویژگی‌های رایج مانند عیار است. در ادامه نمونه‌هایی از ویژگی‌های ژئومتالورژیکی عبارتند از [۱]:

- غلظت و توزیع عناصر مزاحم (تاثیرگذار در جریمه محصول (کنسانتره) فروخته شده و هم‌چنین میزان کارایی یا فرآیند فرآوری)؛
- سختی و قابلیت خردشوندگی؛
- اندازه دانه‌ها و منحنی دانه‌بندی؛
- بافت، درجه آزادی و اندازه کانی‌ها؛
- بازیابی متالورژی؛

- مصرف واکنش‌گرها؛
- ویژگی‌های ذوب.

راهبرد نمونه‌برداری مناسب، اساس مدل‌سازی و برآورد فرآیند مرتبط برای هر دو مدل عیاری و هم‌چنین مدل‌های چند متغیره پیچیده ژئومتالورژی است. به منظور مدل‌سازی تغییرپذیری و میانگین‌گیری متغیرهای ژئومتالورژی (با درجه مشخصی از عدم قطعیت)، لازم است نمونه‌ی معرف از پهنه‌های اصلی سنگ‌شناسی یا کانی‌شناسی در کانسار با اندازه و ابعاد مناسب گرفته شود. در طراحی نمونه‌برداری ژئومتالورژی، نیازمند توجه به‌تاثیر افزایش مقیاس و رابطه بین آزمون‌های مقیاس آزمایشگاهی و عملکرد در مقیاس کارخانه (صنعتی) است. علی‌رغم اینکه تقریباً میانگین عیار مغزه و بلوک معدنی برابر است، تغییرپذیری کمتر عیار در ابعاد بزرگ‌تر، بیش‌تر است. بنابراین مغزه حفاری دارای مقادیر کرانی بالا و پایینی (پراکندگی بالا) بیش‌تر نسب به بلوک است. خصوصیات شیمیایی اساس تعریف یک کانسار است و برخی خصوصیات شیمیایی نشان‌دهنده، خروجی فرآیندهای فرآوری هستند. با توجه به اینکه خصوصیات کانی‌شناسی، رابط اساسی بین زمین‌شناسی و متالورژی است، خصوصیات کلیدی کانی‌شناسی (نوع کانی، ساخت و بافت، درجه آزادی، اندازه دانه و نظایر آن) زیربنای هر مطالعه ژئومتالورژیکی است؛ برای مثال، فرآیند آسیا نیمی از هزینه‌های فرآوری مواد معدنی را دربرمی‌گیرد. بنابراین این خصوصیات اهمیت ویژه‌ای در پروژه دارند و برخی استانداردها و تست‌های صنعتی پذیرفته شده در این بخش وجود دارد. مشخص‌کردن داده‌های فرآوری و متالورژی، به طور اساسی برای شناخت و تعیین روش فرآوری به کار گرفته می‌شود تا بتوان به محتوای فلزی موجود در کانسنگ دست یافت. در شکل ۴، رابطه تبدیلی بین پارامترهای اولیه سنگ و پاسخ‌های متناظر آن در طی فرآوری یا متالورژی نمایش داده شده است [۲ و ۸].



شکل ۴. ویژگی‌های اولیه و خروجی‌های متناظر آن در ژئومتالورژی [۲]

مدل‌سازی ژئومتالورژی

همانطور که در مبحث قبلی بیان شد، هیچ شناخت منسجمی در صنعت در مورد نحوه اجرای برنامه‌های ژئومتالورژی وجود ندارد، بعضی از شرکت‌ها به منظور رفع این شکاف، روش‌ها و الگوریتم‌هایی در این زمینه ارائه کرده‌اند. یکی از جنبه‌های مهم مدل‌های ارائه شده، اغلب برگرفته از دیدگاه تجاری بوده است و در چند معدن در سراسر جهان به کار گرفته شده است. ویلیامز و ریچاردسون [۱۰]، رویکردی را با استفاده از مدل‌سازی ژئومتالورژی، برای بررسی تغییرپذیری کانسنگ و کمی‌سازی تاثیرپذیری عوامل مختلفی از جمله زمین‌شناسی، کانی‌شناسی در فرآیندهای خردایش، خروجی‌های استخراج فلزی و بازیابی فلزی ارائه کرده‌اند [۱۰]. در صورت استفاده از رویکرد ماتریس ژئومتالورژی، مواردی است که می‌بایست در نظر گرفته شود. مقوله اول در این رویکرد، ویژگی‌های از پیش تعیین شده زمین‌شناسی از جمله سنگ‌شناسی و دگرسانی بوده که معرف پهنه‌های ژئومتالورژی است. این امر ممکن است به‌صورت طبقه‌بندی‌های تعیین شده توسط ماتریس ژئومتالورژی مناسب باشد، اما لزوماً با پاسخ‌های فرآوری مرتبط نیست. روش‌های طبقه‌بندی مبتنی بر پهنه‌های زمین‌شناسی، پهنه‌های متالورژی را بدون هیچگونه اعتبار سنجی به پهنه‌های زمین‌شناسی (از قبل موجود) مرتبط می‌کند. در این زمینه، یک الگوریتم چهار مرحله‌ای برای

مدل‌سازی ژئومتالورژی پیشنهاد شده است که در ادامه بیان شده است [۵،۱۰]:

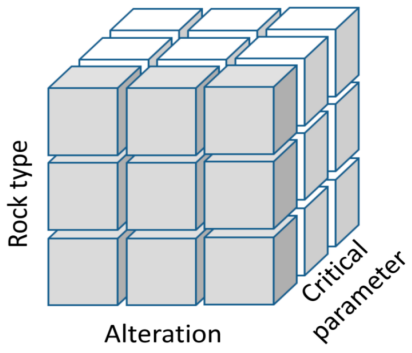
۱. توسعه یک ماتریس ژئومتالورژی به صورت یک الگوی X-Y-Z که دو محور آن نشانگر عوامل زمین‌شناسی (از جمله نوع سنگ‌شناسی و دگرسانی) و محور سوم نشانگر پارامترهای بحرانی (از جمله سختی، بافت، درجه آزادی کانه، توزیع عناصر مزاحم و نظایر آن) است که بیانگر ارزش یا دشواری فرآوری مواد معدنی، با استفاده از مدل زمین‌شناسی کانسار است (شکل ۵).

۲. استفاده از ماتریس ژئومتالورژی به‌عنوان دستورالعمل و راهنمای نمونه‌برداری و ترکیب آن برای انجام آزمایش‌های بیش‌تر به طوری که ماتریس مورد نظر، تغییرپذیری زمین‌شناسی کانسنگ را ارزیابی کند و می‌تواند برای نمونه‌گیری معرف آزمایش‌های متالورژی راهنما باشد.

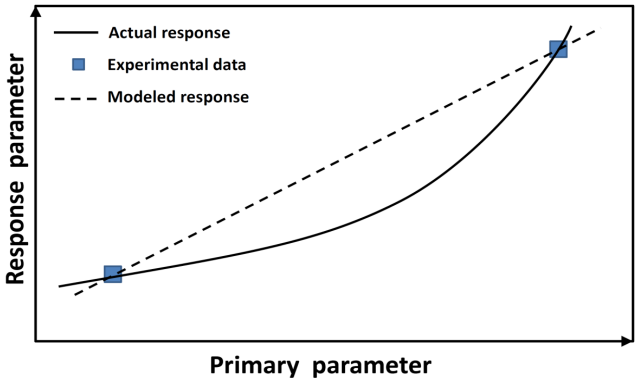
۳. ویژگی نمونه کانسنگ، برای انتخاب مشخصه‌های زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی، کانی‌شناسی و متالورژی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴. اضافه کردن این داده‌ها به مدل سه‌بعدی برای برنامه‌ریزی معدن و پیش‌بینی وضعیت اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یک واقعیت مهم نحوه بررسی متغیرهای ژئومتالورژی است که می‌توان آن‌ها را به صورت خطی میانگین‌گیری (بر اساس خاصیت جمع‌پذیری) کرد. در این موارد، از روش‌هایی مانند میانگین‌گیری حسابی، میانگین‌گیری وزن‌دار و یا دیگر ترکیبات خطی مانند کریجینگ استفاده می‌شود. برخی از متغیرها غیرقابل جمع‌پذیر هستند، برای مثل بازیابی که دارای یک رابطه چند جمله‌ای با عیار است. رویکرد دیگر برای اجرای مدل‌سازی صحیح متغیرهای ژئومتالورژی، در نظر گرفتن متغیرهای جمع‌پذیر است که قادر به پیش‌بینی متغیرهای غیرقابل جمع‌پذیر است و تعریف یک چارچوب پاسخ برای خصوصیات اولیه است که به‌منظور طبقه‌بندی متغیرهای ژئومتالورژی ارائه شده است. بحث قابل توجه دیگر این است که ممکن است ابعاد و مقیاس بین ویژگی اولیه و پاسخ متناظر آن هم خوانی وجود نداشته باشد [۳ و ۵]. بنابراین با توجه به ویژگی جمع‌پذیر بودن پارامترهای اولیه و عدم جمع‌پذیری در پارامترهای خروجی (پاسخ)، استفاده از مدل‌سازی‌های خطی باعث افزایش عدم قطعیت و خطا در فرآیند مدل‌سازی می‌شود و می‌بایست رابطه غیرخطی بین پارامترهای اولیه و پاسخ را مد نظر قرار داد (شکل ۶).

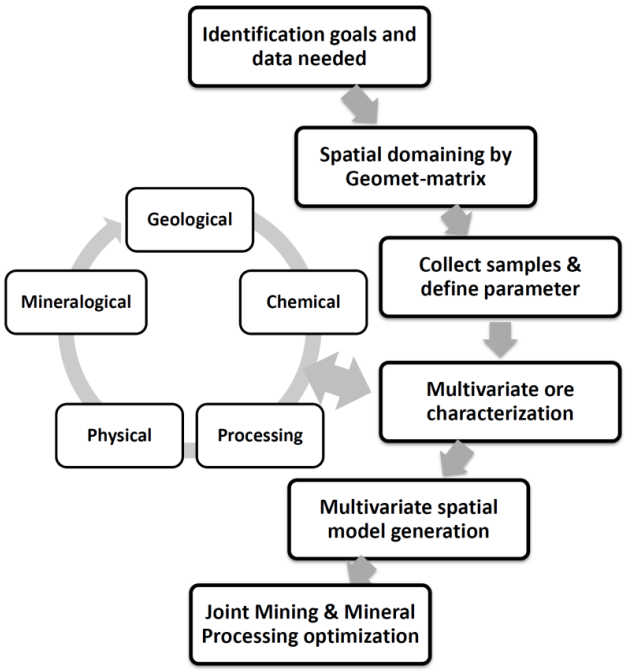


شکل ۵. نمونه‌ای از توسعه ماتریس ژئومتالورژی [۵]



شکل ۶. واقعیت پاسخ غیرخطی در مقابل پارامتر اولیه

انتخاب دقیق ابزارهای مناسب مدل‌سازی فضایی، به دلیل رفتارهای کاملاً متفاوت ویژگی‌های ژئومتالورژی ضروری است. در برخی از این موارد ممکن است مدل‌سازی متغیرهای غیرقابل جمع‌پذیر یا غیرخطی مستلزم استفاده از رویکردهای تخمین‌گرهای غیرخطی و روش‌های شبیه‌سازی باشند. در مواردی ممکن است شبیه‌سازی نسبت به تخمین‌گرها اولویت داشته باشد چرا که مقادیر متوسط متغیر مورد نظر به‌صورت محلی حائز اهمیت نیست، بلکه فراوانی مقادیر کرانی متغیر در تحقّق‌های مختلف شبیه‌سازی مدنظر باشد. با توجه به اینکه هر کانسار دارای شرایط و خصوصیات مختص به‌خود است، شناخت خروجی‌های اقتصادی مورد نظر برای اتخاذ ابزار درست زمین آماری ضروری است. در شکل ۷، الگوریتمی براساس جمع‌بندی رویکردهای گوناگون مدل‌سازی ژئومتالورژی ارائه شده است.



شکل ۷. الگوریتم زنجیره‌ای اجرای مدل‌سازی ژئومتالورژی [۵، ۶ و ۸]

نتیجه‌گیری

ارزیابی یک پروژه معدنکاری، به‌عنوان یک امر پیچیده محسوب می‌شود که شامل متغیرها و پارامترهای متعددی است. مدل‌سازی ژئومتالورژی با اختصاص ویژگی‌های متالورژی در مدل‌های ذخیره معدن، امکان طراحی و بهینه‌سازی واقع گرایانه معدن و در نهایت کنترل عدم قطعیت را فراهم می‌کند. ژئومتالورژی یک رویکرد تلفیقی است که شامل اجزای مختلفی از جمله فرآوری معدنی، زمین‌شناسی اکتشافی، متالورژی، کنترل فرآیندها، مدل‌سازی منابع معدنی و زمین‌آمار است. در مطالعه ژئومتالورژی، تعریف پهنه‌بندی و ماتریس ژئومتالورژی براساس خصوصیات سنگ‌شناسی، آلتراسیون و در نهایت پارامترهای بحرانی نقش مهمی را ایفا می‌کند. با توجه به جمع‌پذیر بودن پارامترهای اولیه و حالت غیرخطی پارامترهای پاسخ، یافتن ارتباط بین پارامترهای اولیه و پاسخ‌های متناظر مربوط به‌کارآیی و خروجی فرآیند معدنکاری ضروری است، اما توجه به عدم هم خوانی بین ابعاد ویژگی اولیه و خروجی (پاسخ) متناظر آن و افزایش مقیاس نمونه از مغزه به کارخانه حائز اهمیت است. هدف نهایی مدل‌سازی ژئومتالورژی، طراحی یک مدل ذخیره معدنی که هر سلول آن، شامل هزینه معدنکاری، فرآوری و درصد بازیابی تخمینی کارخانه باشد.

منابع

[1] Chibaya, Ashley. “Geometallurgical analysis-Implications of operating flexibility (A case for Geometallurgy for Orapa A/K1 deposit). PhD Dissertation, University of the Witwatersrand, 126 pp.

[2] Coward, S. Dunham, S. Vann, J. Stewart, M (2009) The Primary-Response Framework for Geometallurgical Variables. Seventh

International Mining Geology Conference, Perth, WA, 109-113.
[3] David, D (2007) The Importance of Geometallurgical Analysis in Plant Study, Design and Operational Phases. Ninth Mill Operators' Conference, Fremantle, WA: 241-248.
[4] Dunham, S., and J. Vann (2007) Geometallurgy, geostatistics and project value—does your block model tell you what you need to know. Project evaluation conference, Melbourne, Victoria, 19-20.
[5] Keeney, Luke (2010) The Development of a Novel Method for Integrating Geometallurgical Mapping and Orebody Modelling. PhD Dissertation, The University of Queensland, 214pp.
[6] Lamberg, P (2011) Particles – the bridge between geology and metallurgy. In: Conference in Mineral Engineering, Proceedings, Luleå, Sweden, 8–9 February, pp. 1–16.
[7] Lund, C., Lamberg, P (2014) Geometallurgy–A tool for better resource efficiency. European Geologist, 37: 39-43.
[8] Lund, C., Lamberg, P., Lindberg, T (2015) Development of a geometallurgical framework to quantify mineral textures for process prediction. Minerals Engineering, 82: 61-77.
[9] Myers, Jeffrey C (1999)"Geostatistical error management: quantifying uncertainty for environmental sampling and mapping", Van Nostrand Reinhold, New York, 573 pp.
[10] Williams, S., Richardson. J (2004) Geometallurgical Mapping: A new approach that reduces technical risk. Proceedings of the 36th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors, Ottawa, Canada, Vol. 2022, p. 241268.

Geometallurgical modeling – A novel approach of combining geological and metallurgical information to optimize resource evaluation

A. H. Morshedy

Faculty of Mining and Metallurgy Engineering, University of Yazd

* morshedy@yazd.ac.ir

Recieved: 2016/6/12 Accepted: 2016/11/15

Abstract

Design aspects of the mining projects, including resource geological modelling, mining methodology, mineral processing and production rates have a significant impact on the project economics and overall value. To generate a resource model, typically tonnes, grade and the tonnes/grade above the cut-off are applied as the economic criterion, which are not adequate alone. Geometallurgy combines geological and metallurgical information to provide spatially-based predictive model for mineral processing plants. This novel field has been introduced to integrate the various parameters such as hardness, grindability, recovery, liberation, concentrations, mineral texture, etc. Geometallurgical modeling requires to develop matrix an x-y-z plot where two of the axes represent geological factors (e.g., rock type and alteration) and the third axis represents critical parameters (hardness, texture, liberation degree of ore, distribution of penalty elements, etc.) that plays an important role for deposit domaining. The spatial distribution of response parameters is determined based on the primary parameters, which must consider nonlinear relationships and conversion scales between the experimental, pilot or industrial modes. The proposed algorithm represents a "value chain" approach in geometallurgical model compared to the common concept of mine planning evaluations.

Keywords: Geometallurgy, Geological model, Spatial variability, Recovery rate, Uncertainity