فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال ۲۰، شماره ۷۷، بهار ۱۴۰۵، صفحات ۲۹-۴۳

بهینه‌سازی، مدل‌سازی و ارزیابی ذخیره کانسار پلی‌متال عشوند (مس-طلا و آهن)

نسیم حیدریان دهکردی[۱و*]، شجاع‌الدین نیرومند[۲]، سعید میرزایی[۳] و شهرام ادیب[۴]

۱. استادیار، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی
۲. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران
۳. استاد، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی
۴. شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹

چکیده

کانسار پلی‌متال مس-طلا-آهن عشوند در ۱۰ کیلومتری شرق شهر نهاوند همدان در کمربند فلز زایی سنندج-سیرجان واقع شده است. قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه واحدهای کربناتی پرمین می‌باشند. توده نفوذی گرانیتوئیدی فلسیک با جنس گرانیت، گرانودیوریت تا کوارتزمونزونیت نیز بخش عمده واحدهای سنگی گستره را تشکیل داده است. ترکیب کانی‌شناسی شامل مگنتیت، پیریت، پیروتیت، کالکوپیریت، بورنیت، طلا، کالکوسیت، کوولیت، هماتیت، گوتیت، مالاکیت و آزوریت می‌باشد. نتایج نشان داد، کانه‌زایی در زون‌های کانه‌دار کانسار عشوند همراه با فاز اکسیدی و کانی مالاکیت است. گستره عشوند در مجموع به شش اولویت تقسیم شد که در این پژوهش مطالعات بر روی اولویت‌های یک، دو و شش انجام شد. مدل‌سازی گستره کانی‌سازی با توجه به عیار مس، طلا و آهن و با در نظر گرفتن عیار حد ۰/۱۵ درصد مس و ppb ۳۰۰ طلا و ۱۵ درصد آهن انجام گرفت. ذخیره قطعی کانسنگ مس ۹۰۲۲۱ تن با عیار متوسط ۰/۴۸ درصد مس و ذخیره قطعی ۴۳ تن کانسنگ طلا با متوسط عیار ppb ۸۵۰ و ذخیره قطعی ۳۸۴۱۵ تن کانسنگ آهن با متوسط عیار ۲۵ در صد آهن به دست آمد. همچنین مجموع ذخایر قطعی، احتمالی و ممکن ۷۵۱۸۳۹ تن با عیار متوسط ۰/۲۹ درصد کانسنگ مس برآورد شد. با توجه به مطالعات فنی اقتصادی انجام‌شده، اولویت اول اقتصادی می‌باشد و ذخیره قابل‌استخراج ۶۳۰۶۱۴ تن کانسنگ مس با عیار متوسط ۰/۳۵ درصد و عیار حد ۰/۱۵ درصد و نسبت باطله برداری ۴/۶۶ به یک خواهد بود. بر اساس نتایج حاصل کانسار عشوند به لحاظ مس، در گستره اقتصادی و قابل معدنکاری قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی ذخیره، کانسار پلی‌متال مس-طلا-آهن، عشوند، همدان

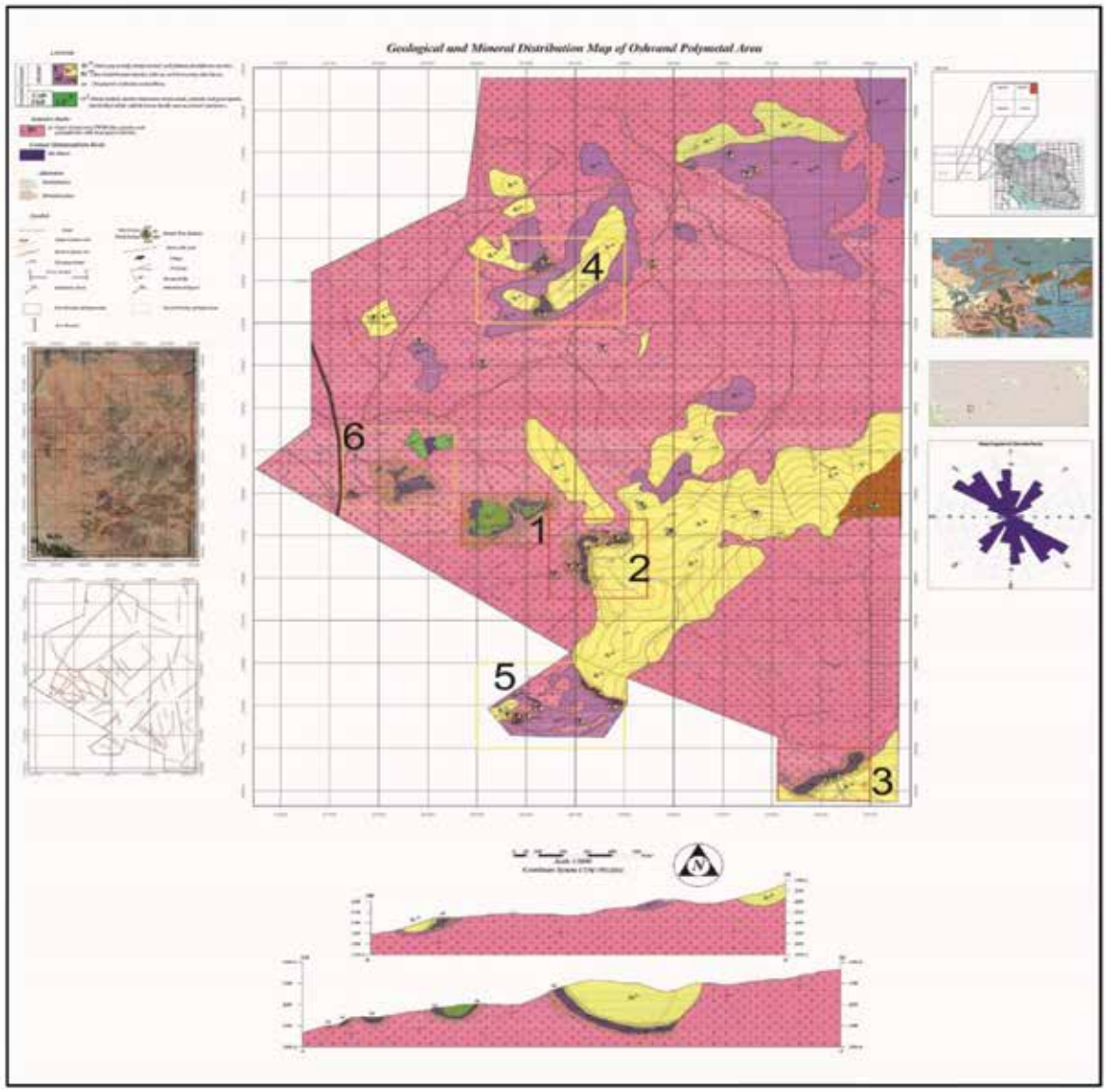
* نویسنده مرتبط: nasim.heydarian.d@ut.ac.ir

مقدمه

گستره عشوند واقع در ۱۰ کیلومتری نهاوند اولین کانسار فلزی معرفی‌شده در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نهاوند (موحدی، ۱۳۸۹) و اولین کانسار طلادار استان همدان است. گستره موردمطالعه، در بخش شمال غربی کمربند دگرگونی-ماگمایی سنندج-سیرجان قرار دارد (شکل ۱). این کمربند با طول حدود ۱۵۰۰ کیلومتر و عرض ۲۵۰ تا ۳۰۰ کیلومتر با توجه به موقعیت ژئودینامیکی میزبان مناسبی برای تشکیل کانسارهای مختلف ازجمله کانسارهای اسکارنی، سرب و روی و تعداد دیگری ذخایر ازجمله طلا، آهن و مس است (Camp and Griffis، 1982؛ نبوی، ۱۳۵۵). بر مبنای حفاری‌های اکتشافی و با توجه به برونزد ماده معدنی و شواهد و نمونه‌برداری سطحی انجام‌شده توسط شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران (۱۳۸۵)، گستره عشوند در مجموع به شش اولویت تقسیم شد (شکل ۱). شبکه حفاری در اولویت‌های یک، دو و شش طراحی و به تعداد ۲۲ حلقه گمانه اکتشافی به متراژ کلی ۸۳۴/۸۰ متر حفاری‌شده است. غفاری هاشمی و همکاران در سال ۱۳۹۰ بر مبنای مطالعات اولیه این کانسار را از نوع غیراقتصادی معرفی کردند و بیان داشتند که استخراج عناصر از این کانسار، با توجه به غنی‌شدگی و تناژ پایین، مقرون‌به‌صرفه و اقتصادی نمی‌باشد. طبیب‌زاده گناوه و همکاران (۱۳۹۵) و نجاتی (۱۳۹۵)، بر مبنای مدل‌سازی سه‌بعدی معکوس داده‌های مغناطیس‌سنجی، مقاومت ویژه و قطبش القایی، مطالعه موردی ذخیره پلی‌متال در گستره عشوند را انجام دادند. بر اساس نتایج حاصل، مدل سه‌بعدی مغناطیسی دید خوبی را نسبت به گسترش مغناطیس در منطقه در اختیار قرار داده که برای شناسایی مناطق کانی‌سازی مؤثر واقع شده است. موحدی و چیتگر در سال ۱۳۸۷، بر اساس مطالعات اکتشافی ژئوشیمیایی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ منطقه را بررسی و آن را از نوع چندفلزی معرفی کردند. یزدی و همکاران در سال ۱۳۸۹ و موحدی و همکاران در سال‌های ۱۳۹۸، ۱۳۹۹، کانی‌شناسی، ژئومتری و زمین‌شیمی کانسار عشوند را بررسی کردند. در سال ۱۳۹۹، موحدی و همکاران زمین‌شیمی کانسار عشوند را نیز مورد بررسی قرار دادند. بر این اساس، گسترش واحدهای کربناته و عیار بالای ماده معدنی نشان از وجود ذخیره اقتصادی در این منطقه دارد. علایی کاخکی و همکاران در سال ۱۴۰۱ از معکوس‌سازی‌های لی-اولدنبرگ و هموار برای شناسایی کانسار عشوند با کمک داده‌های IP/Rs استفاده کردند. در سال ۱۴۰۱ موحدی و همکاران مطالعاتی را با عنوان دما-فشارسنجی و شیمی کانی‌های گارنت و پیروکسن کانسار عشوند انجام دادند، بر این اساس، ترکیب شیمیایی گارنت‌های منطقه عشوند مشابه گارنت‌های موجود در ذخایر اسکارنی مس-طلا-آهن است. بر اساس بررسی گزارش‌های، مقالات و پایان‌نامه‌های انجام‌شده در این گستره، برخی از نتایج بیانگر اقتصادی بودن و برخی بیانگر غیراقتصادی بودن کانسار عشوند می‌باشند. علی‌رغم مطالعات انجام‌شده، هنوز اطلاعات دقیق و جامعی در خصوص میزان ذخیره قطعی کانسار عشوند و فاز همراه با کانی‌زایی در دست نیست. بر این اساس، مطالعات بهینه‌سازی، مدل‌سازی و ارزیابی کانسار پلی‌متال عشوند به لحاظ مس، طلا و آهن موضوع این پژوهش قرار گرفت.

روش مطالعه

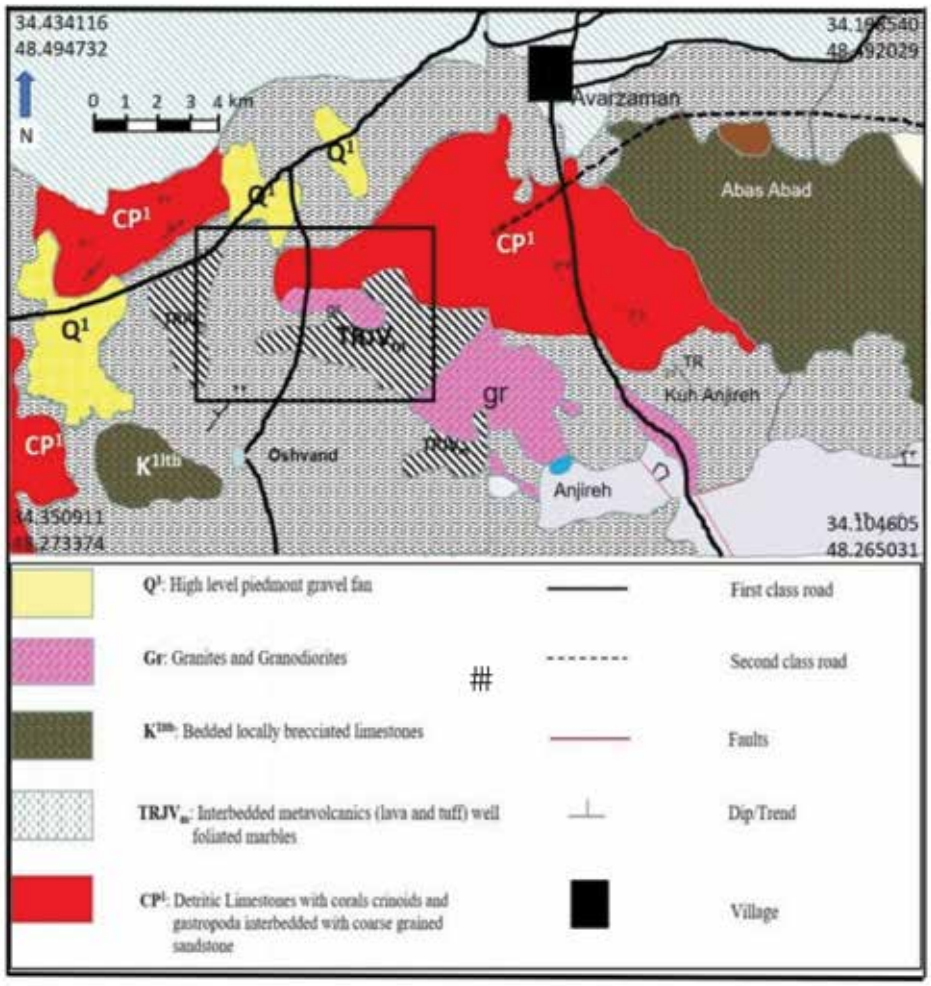
این پژوهش بر مبنای مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی انجام‌شده است. با توجه به برونزد ماده معدنی و شواهد و نمونه‌برداری سطحی، شبکه حفاری در اولویت‌های یک، دو و شش طراحی و به تعداد ۲۲ حلقه گمانه اکتشافی به متراژ کلی ۸۳۴/۸۰ متر حفاری شد و برای مدل‌سازی و تخمین ذخیره از این داده‌ها استفاده شد. در این پژوهش، ۱۰۰ نمونه از ۲۲ گمانه و نمونه‌های سطحی و تعداد۴۰ نمونه برای تهیه مقاطع صیقلی، ۳۰ نمونه برای تهیه مقاطع نازک و ۵۰ نمونه برای تجزیه به روش‌های XRD، XRF و ICP-MS انتخاب شدند. محاسبه ذخیره کانسار عشوند بر مبنای اطلاعات ۲۲ گمانه انجام شد. پس از انجام عملیات واریوگرافی با استفاده از نرم‌افزار WinGslib، ذخیره کلی کانسار با استفاده از نرم‌افزار Datamine محاسبه شد.



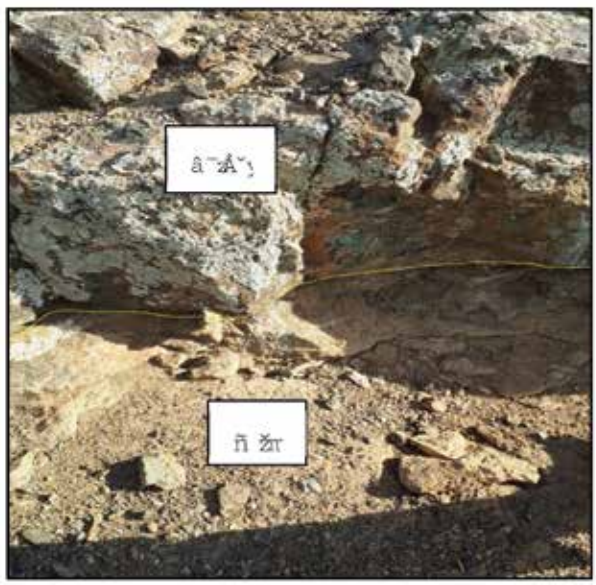
شـــکل ۱. نقشـــه زمین‌شناســـی منطقه موردمطالعه، موقعیت شـــش اولویت گســـتره موردمطالعه بر روی نقشـــه نمایش داده شده است (موحدی، ۱۳۸۹)

زمین‌شناسی

کانسار عشـــوند نهاوند ازجمله کانســـارهای موجود در کمربند فلز زایی سنندج-سیرجان است که در شمال غرب آن واقع است. این کمربند به طول حدود ۱۵۰۰ کیلومتر و عرض ۲۵۰ تا ۳۰۰ کیلومتر در شـــمال زمین‌درز زاگرس با راستای شمال غربی-جنوب شرقی قرار دارد. بر این اساس، گستره موردمطالعه خصوصیاتی بینابین هر دو کمربند متالوژنیکی را نشان می‌دهد. در شکل ۲، نقشه ساده‌شده زمین‌شناسی گســـتره موردمطالعه ارائه شده است (موحدی و چیتگری، ۱۳۸۷). واحدهای کربناتی با سن پرمین، قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه می‌باشند که شامل سنگ آهک‌های مرمری شـــده نازک لایه با رنگ کرم مایل به خاکستری هستند. در مـــرز واحدهای کربناته و آهکی با توده نفوذی گرانیتوئیدی، پهنه کانی‌زایی اسکارنی رخ داده است (شکل ۳).

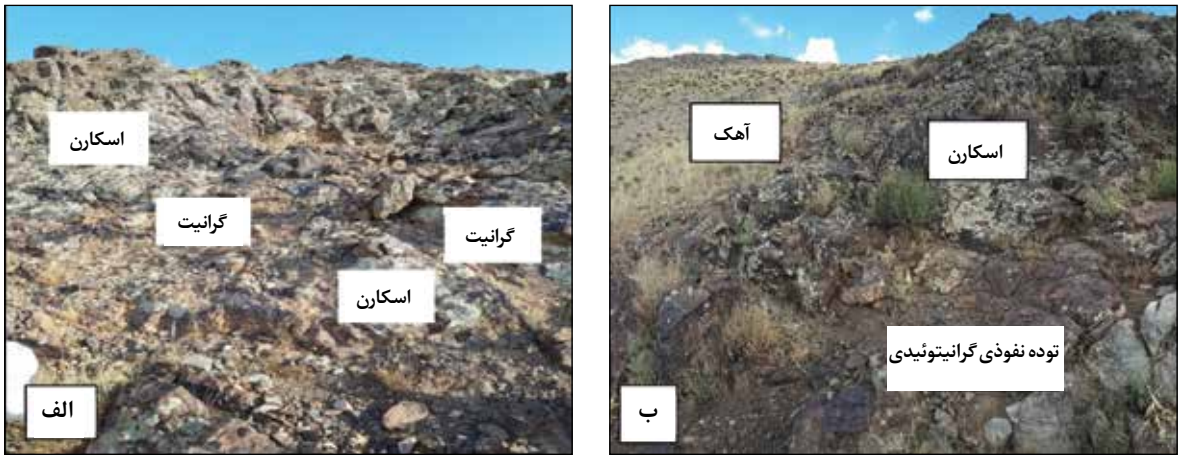


شکل ۲. نقشه ساده‌شده زمین‌شناسی منطقه موردمطالعه (با تغییرات از موحدی و چیتگری، ۱۳۸۷)، چهارگوش مربع گستره موردمطالعه را نشان می‌دهد



شکل ۳. نمایی از رخداد پهنه کانی‌زایی اسکارنی در بخش بالادستی واحد آهکی

عمده‌تریـــن واحدهای ســـنگی گســـتره را ســـنگ‌های گرانیتوئیدی تشـــکیل داده‌اند و با باتولیـــت بزرگ گرانیتی همدان مرتبط هســـتند. توده‌های گرانیتوئیدی بیان‌شده به درون مجموعه کربناتی نفوذ کرده و در تماس با این بخش‌ها، تبادل یونی و تشـــکیل زون اســـکارنی رخ داده است (شکل ۴). توده‌هـــای گرانیتوئیدی گســـتره دارای ترکیب گرانیت، گرانودیوریت تا کوارتزمونزونیت می‌باشند. نمونه‌های برداشتی از توده نفوذی اغلب دارای رنگ خاکســـتری روشـــن است و بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل ارتوز در زمینه‌ای از کانی‌های بیوتیت و فلدسپار پتاسیم قابل مشاهده هستند. نمونه‌های برداشتی در مطالعات میکروســـکوپی، بافت دانه‌ای دارند و بیشـــترین حجم ســـنگ را ارتوز، پلاژیوکلاز و کوارتز تشکیل داده‌اند. کلینوپیروکسن، آمفیبول و بیوتیت نیز با مقادیر کمتر در نمونه‌ها قابل مشاهده هستند. در بخش‌های نزدیک به پهنه کانی‌زایی به‌طور عمده اپیدوتیتی شدن و در برخی بخش‌ها، آرژیلی شدن در توده گرانیتوئیدی قابل مشاهده است.



شکل ۴. الف) دورنمایی از توده نفوذی گرانیتوئیدی، ب) نمایی از توده نفوذی به همراه پهنه کانی‌زایی اسکارنی در گستره موردمطالعه (دید به سمت شمال شرق)

توالی پاراژنزی

اغلب ذخایر اسکارن به دلیل تنوع کانی‌شناسی بالا، چند مرحله از رخداد کانه‌زایی را نشان می‌دهند. با توجه به وجود ســـنگ‌های آذرین و دگرگونی متنوع، در نتیجه آزاد شدن ســـیال گرمابی از توده نفوذی، دچار تغییرات ژئوشیمیایی و کانی‌شناســـی می‌شوند. فرایند متاسوماتیسم در این مرحله رخ می‌دهد و منجر به تشکیل طیف وسیعی از کانی‌ها مانند کانی‌های سولفیدی، اکسیدی، کربناته و نظایر آن می‌شود. تعییـــن توالی پاراژنتیک نه‌تنها در بهره‌برداری از کانســـنگ اهمیت دارد، بلکه برای توضیح تاریخچه زمین‌شناسی یک کانسار و اکتشاف کانسارهای جدید نیز دارای اهمیت است. کانسار اسکارن عشوند از نظر کانی‌شناسی دارای تنوع بالایی است. از متداول‌ترین نوع کانی‌ها در این منطقه می‌توان به کلسیت، دولومیت، کوارتز، مگنتیت، اپیدوت، پیروکسن، گارنت و کلریت اشاره کرد. ترکیب کانی‌شناسی فلزی شامل مگنتیـــت، پیریت، پیروتیت، کالکوپیریـــت، بورنیت، طلا، کالکوسیت، کوولیت، هماتیت، گوتیت، مالاکیت و آزوریت می‌باشـــد. نتایج نشـــان داد، کانه‌زایی در زون‌های کانه‌دار کانسار عشوند همراه با فاز اکسیدی و کانی مالاکیت است.

بحث

پردازش آماری اولیه داده‌ها

تخمین ذخیره دقیق کانســـــارهای فلزی از مهم‌تریـــن مراحـــل طراحـــی و تصمیم‌گیری در کانســـــارهای فلزی به شمار می‌رود. شـــناخت کامل یک کانســـار، مستلزم انجام یک ســـری عملیات پردازشـــــی و مدل‌سازی اســـــت. این کار بـــه دلیل پیچیدگی‌هـــــای موجـــود، زمان‌بـــر بودن و مشـــــکل بودن محاســـبات مربوطه، همواره با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصـــی، دقیق‌تر و ســـریع‌تر انجام می‌شـــود

(Rossi and Deutsch، 2014). مهم‌ترین کاربرد مدل‌سازی، تعیین پارامترهای لازم برای طراحی و برنامه‌ریزی تولید معدن است (احمدی، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۳). تجزیه و تحلیل و پردازش آماری داده‌ها یکی از مهم‌ترین مراحل تخمین‌ذخیره است. در تمام روش‌های محاسبه ذخیره شامل روش‌های هندسی (کلاسیک) و زمین‌آماری، اطلاع از نحوه توزیع آماری داده‌ها ضروری است (حسنی پاک، ۱۳۸۳). به‌طورکلی داده‌های منطقه به‌طور عمده شامل داده‌های عمقی عیارسنجی مغزه‌های به‌دست‌آمده از گمانه‌های اکتشافی است. به‌منظور تعیین نحوه توزیع داده‌های عیارسنجی مس، مطالعات آماری با استفاده از نرم‌افزارهای Statistica و GS^{+} بر روی داده‌ها صورت گرفت. با توجه به نمونه‌گیری از ماده معدنی مس، آهن و طلا و همچنین نمونه‌گیری از باطله و ارسال آنها به آزمایشگاه شرکت مطالعات مواد معدنی زرآزما برای اندازه‌گیری چگالی، وزن مخصوص برای مس، طلا $\frac{gr}{cm^2}$ ۲/۷ و برای آهن $\frac{gr}{cm^2}$ ۳/۵ به دست آمد. برای ساخت مدل بلوکی شرایط کانسار بررسی شد. به‌طورکلی معدنکاری انتخابی تخمین عیار بلوک‌های بزرگ نسبت به بلوک‌های کوچک، آسان‌تر و عیار تخمینی آنها به عیار واقعی نزدیک‌تر است، اما انتخاب ابعاد خیلی بزرگ برای بلوک‌ها نیز در کار برنامه‌ریزی معدنی مسئله‌ساز خواهد بود (Chanderman et al.، 2017). بر این اساس، انتخاب ابعاد بلوک‌ها بسیار مهم است. در این کانسار فاصله متوسط گمانه‌ها حدود ۱۰۰ متر می‌باشد، در نتیجه بهترین ابعاد بلوک مطابق جدول ۱ است.

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده برای ساخت مدل بلوکی در گستره موردنظر

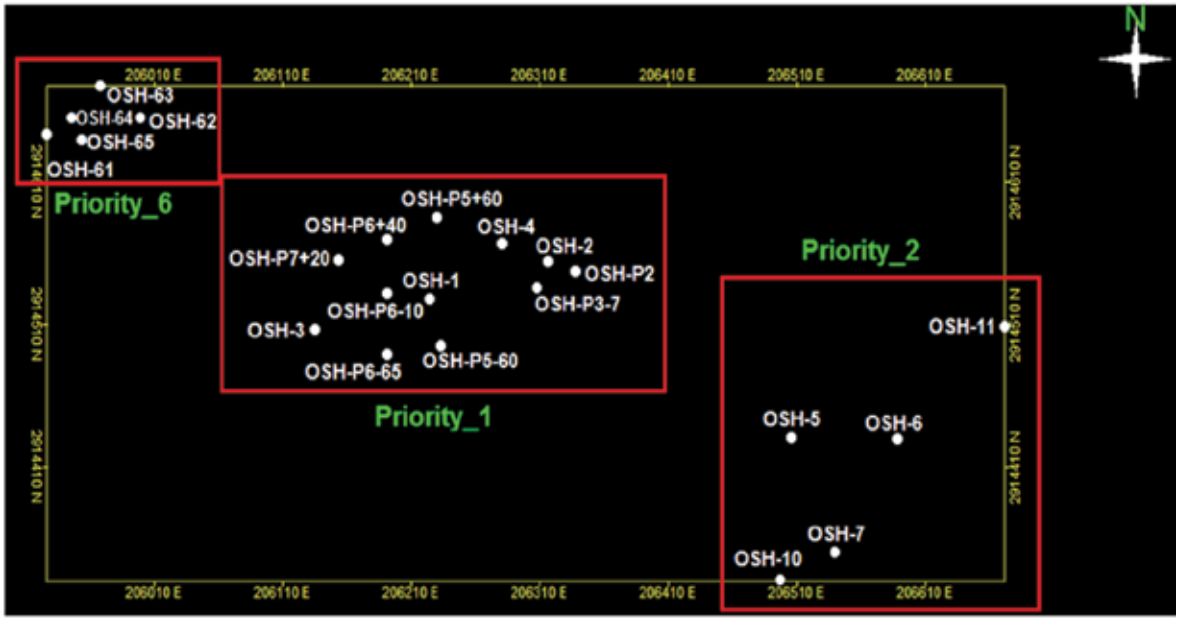
پارامتر	مقدار
X ORIGIN	۲۶۷۷۵۰
Y ORIGIN	۳۷۸۸۶۰۱
Z ORIGIN	۲۱۳۹
اندازه ابعاد بلوک در راستای X	۲۵
اندازه ابعاد بلوک در راستای Y	۲۵
اندازه ابعاد بلوک در راستای Z	۱۲/۵
اندازه ریز بلوک در راستای X	۵
اندازه ریز بلوک در راستای Y	۵
اندازه ریز بلوک در راستای Z	۲/۵

پارامترهای محاسبه ذخیره

در این پژوهش ارزیابی ذخیره با استفاده از اطلاعات ۲۲ گمانه و با متراژ ۸۳۴/۸۰ متر انجام شد. پس از انجام عملیات واریوگرافی با استفاده از نرم‌افزار WinGslib، ذخیره کلی کانسار با استفاده از نرم‌افزار Datamine محاسبه شد. به‌منظور دستیابی به تخمین هرچه صحیح‌تر می‌بایست پارامترهای تخمین مانند واریوگرام، بیضوی جستجو، تعداد نمونه‌های به‌کاربرده شده برای تخمین، ابعاد بلوکی کانسار و دیگر پارامترهای تخمین به‌درستی ارزیابی‌شده و مورد استفاده قرار گیرند. براساس واریوگرام‌های امتدادی رسم شده در جهات مختلف، مقدار شعاع تجسس بیشینه در راستای با آزیموت صفر درجه برابر با ۱۳۰ متر، مقدار شعاع تجسس متوسط در راستای با آزیموت ۹۰ درجه برابر با ۱۰۰ متر و مقدار شعاع تجسس کمینه در راستای قائم با آزیموت صفر درجه برابر با ۴۰ متر منظور شد و بر اساس آن نسبت‌های ناهمسانگردی برابر با ۱/۳ و ۱/۲۵ به دست آمد.

مدل‌سازی سه‌بعدی کانسار

مدل‌سازی و تخمین ذخیره کانسار جزو مهم‌ترین فعالیت‌های معدنکاری است که پیش‌نیاز طراحی معدن و برنامه‌ریزی تولید در طول بهره‌برداری از آن است (مدنی و یعقوب‌پور، ۱۳۸۰). بنابراین محاسبه ذخیره مهم‌ترین هدف عملیات اکتشافی است و امکان‌پذیری استخراج کانسار منوط به داشتن ذخیره بالا و با وضعیت مناسب است (Hulse، 1992). از طرف دیگر، تخمین عیار نیز، یکی از مراحل بسیار مهم در محاسبات ذخیره در تمامی ذخایر معدنی است (Rossi and Deutsch، 2014). از منظر دیگر، مقادیر عیار تأثیر قابل‌توجهی بر روی برنامه‌ریزی‌ها، طراحی و مدیریت معدن دارند. تخمین ذخیره کانسارها، اساس ارزیابی اقتصادی منابع معدنی را فراهم می‌کند. از سویی سودآوری ذخیره به صحت برآورد ذخیره بستگی دارد (احمدی و شاه زمانی، ۱۴۰۴). در شکل ۵ نقشه سه‌بعدی پراکندگی گمانه‌های اکتشافی در سه اولویت موردمطالعه



شکل ۵. موقعیت گمانه‌های اکتشافی در سه اولویت اول، دوم و ششم روی زمین

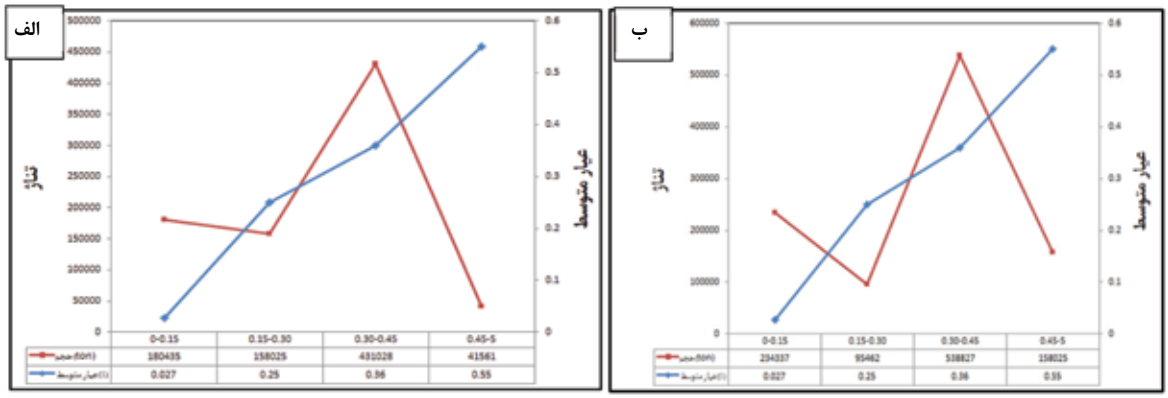
نشـــان داده شده است که برای مدل‌سازی بلوکی سه‌بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نرم‌افزار Datamine تخمین عیار در مـــدل بلوکی بـــا روش‌های تخمیـــن نزدیک‌ترین نقاط، عکس مجذور فاصله و کریجینگ امکان‌پذیر اســـت. به‌طورکلی تمام روش‌های تخمین به فایل‌های مدل بلوکی، اطلاعات گمانه‌ها، حجم جستجو و پارامترهای تخمین نیاز دارند اما روش کریجینگ به اطلاعـــات اضافه پارامترهای مدل واریوگرام نیز نیاز دارد. به‌منظور ارزیابی ذخیره کانسار عشوند از روش‌های تخمین کلاسیک عکس مجذور فاصله و زمین‌آماری کریجینگ استفاده شد.

محاســـبه ذخیره به روش عکس مجـــذور فاصله و زمین‌آماری کریجینگ معمولی

در ایـــن پژوهش ارزیابی مس، طلا و آهن با اســـتفاده از روش کریجینگ معمولی انجام شـــد. نتایج محاسبه ذخیره کانسار به روش عکس مجذور فاصله برای مس در اولویت اول به روش عکس مجذور فاصله در جدول ۲ آورده شده است. شکل ۶-الف، منحنی عیار-تناژ مس با روش عکس مجذور فاصله را نشـــان می‌دهد. بر این اساس، با افزایش عیار حد، تناژ کاهش می‌یابد. نتایج محاسبه ذخیره به روش زمین‌آماری کریجینگ معمولی نیز در جدول ۳ آورده شـــده است. شکل ۶-ب، منحنی عیار-تناژ مس با روش کریجینگ معمولی را نشان می‌دهد، با افزایش عیار حد، تناژ نیز کاهش می‌یابد.

جدول ۲. خلاصه نتایج محاسبه ذخیره کانسار به روش عکس مجذور فاصله برای مس در اولویت اول

نوع ماده معدنی	عیار حد (٪)	حجم (m^3)	عیار متوسط (٪)	چگالی ($\frac{gr}{cm^3}$)	تناژ (تن)
باطله	۰-۰/۱۵	۶۶۸۲۸	۰/۰۲۷	۲/۷	۱۸۰۴۳۵
کم‌عیار	۰/۱۵-۰/۳۰	۵۸۵۲۸	۰/۲۵	۲/۷	۱۵۸۰۲۵
متوسط عیار	۰/۳۰-۰/۴۵	۱۵۹۶۴۰	۰/۳۶	۲/۷	۴۳۱۰۲۸
پر عیار	۰/۴۵-۵	۱۵۳۹۳	۰/۵۵	۲/۷	۴۱۵۶۱
مجموع		۳۰۰۳۸۹			۸۱۱۰۴۹



شکل ۶. الف) منحنی عیار-تناژ مس با روش عکس مجذور فاصله و ب) منحنی عیار-تناژ به روش کریجینگ معمولی برای مس در اولویت اول

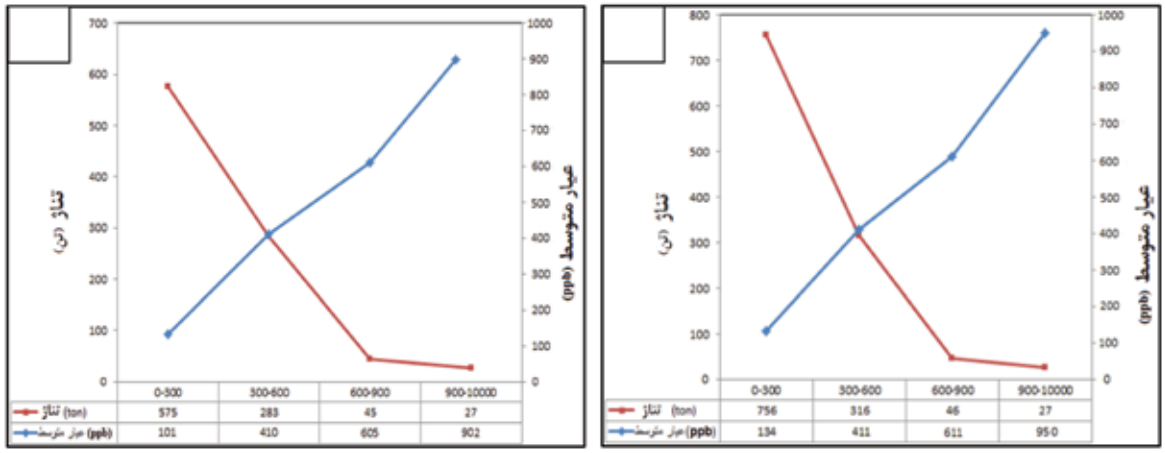
جدول ۳. خلاصه نتایج محاسبه ذخیره کانسار به روش کریجینگ معمولی برای مس در اولویت اول

نوع ماده معدنی	عیار حد (٪)	حجم (m^3)	عیار متوسط (٪)	چگالی ($\frac{gr}{cm^3}$)	تناژ (تن)
باطله	۰-۰/۱۵	۸۶۷۹۱	۰/۰۲۹	۲/۷	۲۳۴۳۳۷
کم‌عیار	۰/۱۵-۰/۳۰	۳۵۳۵۶	۰/۲۸	۲/۷	۹۵۴۶۲
متوسط عیار	۰/۳۰-۰/۴۵	۱۹۹۵۶۵	۰/۳۸	۲/۷	۵۳۸۸۲۷
پر عیار	۰/۴۵-۵	۵۸۵۲۸	۰/۵۹	۲/۷	۱۵۸۰۲۵
مجموع		۳۸۰۲۴۲			۱۰۲۶۶۵۱

به منظور مشـــاهده میزان منبع کلی محاســـبه ذخیره به روش عکس مجـــذور فاصله، نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. شـــکل ۷-الف، منحنی عیار-تناژ طلا به روش عکس مجذور فاصله را نشان می‌دهد، با افزایش عیار حد، تناژ کاهش می‌یابد. نتایج محاسبه طلا به روش زمین‌آماری کریجینگ به شـــرح جدول ۵ اســـت. شکل ۷-ب، منحنی عیار-تناژ طلا به روش کریجینگ معمولی را نشان می‌دهد. بر این اساس، با افزایش عیار حد، تناژ کاهش می‌یابد.

جدول ۴. خلاصه نتایج محاسبه ذخیره کانسار به روش عکس مجذور فاصله برای طلا در اولویت اول

نوع ماده معدنی	عیار حد (ppb)	حجم (m^3)	عیار متوسط (ppb)	چگالی ($\frac{gr}{cm^3}$)	تناژ (تن)
باطله	۰-۳۰۰	۲۱۳	۱۰۱	۲/۷	۵۷۵
کم‌عیار	۳۰۰-۶۰۰	۱۰۵	۴۱۰	۲/۷	۲۸۳
متوسط عیار	۶۰۰-۹۰۰	۱۷	۶۰۵	۲/۷	۴۵
پر عیار	۹۰۰-۱۰۰۰	۱۰	۹۰۲	۲/۷	۲۷
مجموع		۳۴۵			۹۳۰



شـــکل ۷. الـــف) منحنی عیار-تناژ طلا به روش عکس مجذور فاصله برای طـــلا در اولویت اول و ب) منحنی عیار-تناژ طلا به روش کریجینگ معمولی

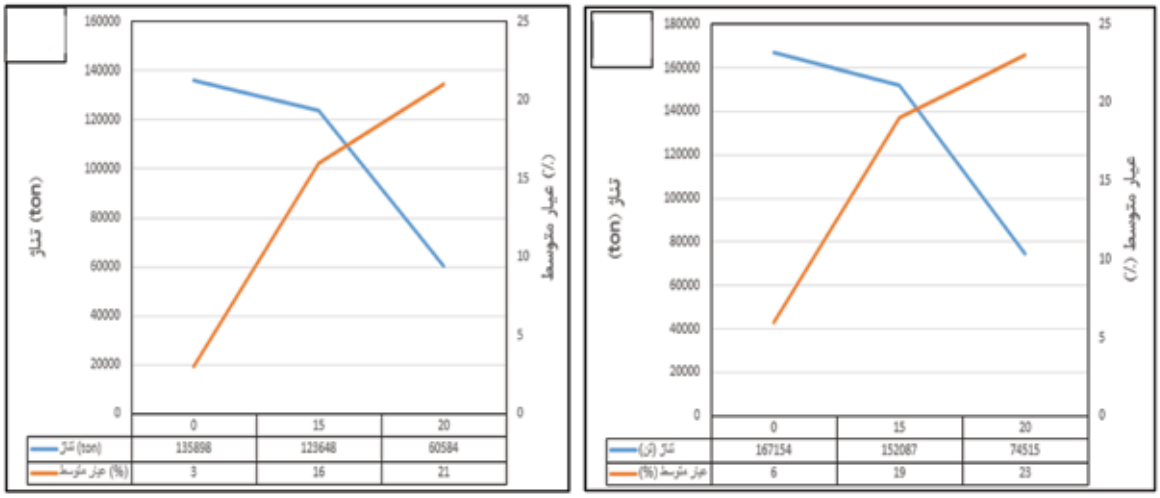
جدول ۵. خلاصه نتایج محاسبه ذخیره کانسار به روش کریجینگ معمولی برای طلا در اولویت اول

نوع ماده معدنی	عیار حد (ppb)	حجم (m^3)	عیار متوسط (ppb)	چگالی ($\frac{gr}{cm^3}$)	تناژ (تن)
باطله	۰-۳۰۰	۲۸۰	۱۳۴	۲/۷	۷۵۶
کم‌عیار	۳۰۰-۶۰۰	۱۱۷	۴۱۱	۲/۷	۳۱۶
متوسط عیار	۶۰۰-۹۰۰	۱۷	۶۱۱	۲/۷	۴۶
پر عیار	۹۰۰-۱۰۰۰	۱۰	۹۵۰	۲/۷	۲۷
مجموع		۴۲۴			۱۱۴۵

خلاصه نتایج محاســـبه ذخیره کانســـار به روش عکس مجذور فاصله برای آهـــن در اولویت اول در جدول ۶ آورده شده است. شـــکل ۸-الف، منحنی عیار-تناژ آهن به روش عکس مجذور فاصله را نشان می‌دهد که با افزایش عیار حد، تناژ کاهش می‌یابد. نتایج محاسبه آهن به روش زمین‌آماری کریجینگ به شـــرح جدول ۷ اســـت. شکل ۸-ب، منحنی عیار-تناژ آهن به روش کریجینگ معمولی را نشان می‌دهد که با افزایش عیار حد، تناژ کاهش می‌یابد.

جدول ۶. خلاصه نتایج محاسبه ذخیره کانسار به روش عکس مجذور فاصله برای آهن در اولویت اول

نوع ماده معدنی	عیار حد (٪)	حجم (m^3)	عیار متوسط (٪)	چگالی ($\frac{gr}{cm^3}$)	تناژ (تن)
باطله	۰	۳۸۸۲۸	۳	۳/۵	۱۳۵۸۹۸
کم‌عیار	۱۵	۳۵۳۲۸	۱۶	۳/۵	۱۲۳۶۴۸
پر عیار	۲۰	۱۷۳۰۹	۲۱	۳/۵	۶۰۵۸۴
مجموع		۹۱۴۶۵			۳۲۰۱۳۰



شکل ۸. الف) منحنی عیار-تناژ آهن به روش عکس مجذور فاصله برای آهن در اولویت اول و ب) منحنی عیار-تناژ به روش کریجینگ معمولی برای آهن در اولویت اول

جدول ۷. خلاصه نتایج محاسبه ذخیره کانسار به روش کریجینگ معمولی برای آهن در اولویت اول

نوع ماده معدنی	عیار حد (٪)	حجم (m^3)	عیار متوسط (٪)	چگالی ($\frac{gr}{cm^3}$)	تناژ (تن)
باطله	۰	۴۷۷۵۸	۶	۳/۵	۱۶۷۱۵۴
کم‌عیار	۱۵	۴۳۴۵۳	۱۹	۳/۵	۱۵۲۰۸۷
پر عیار	۲۰	۲۱۲۹۰	۲۳	۳/۵	۷۴۵۱۵
مجموع		۱۱۲۵۰۲			۳۹۳۷۵۶

در اولویت ۲، با توجه به تعداد خیلی کم نمونه‌های عیاری، محاسبه ذخیره با استفاده از روش‌های زمین‌آماری مناسب نبود. بنابراین برای اینکه تخمین مناسب‌تری صورت گیرد، از روش عکس مجذور فاصله استفاده شد (جدول ۸). بر این اساس، با افزایش عیار حد، تناژ کاهش می‌یابد.

جدول ۸. خلاصه نتایج محاسبه ذخیره مس به روش عکس مجذور فاصله در اولویت دوم

نوع ماده معدنی	عیار حد (٪)	حجم (m^3)	عیار متوسط (٪)	چگالی ($\frac{gr}{cm^3}$)	تناژ (تن)
باطله	۰-۰/۱۵	۲۳۲۶۹۲	۰/۱۴	۲/۷	۶۲۸۲۷۰
متوسط عیار	۰/۱۵-۰/۳۰	۴۱۲۰۸	۰/۲۴	۲/۷	۱۱۱۲۶۲
پر عیار	۰/۳۰-۱	۲	۰/۴۷	۲/۷	۶
مجموع		۲۷۳۹۰۲			۷۳۹۵۳۸

خلاصه نتایج محاسبه ذخیره مس به روش عکس مجذور فاصله در اولویت ششم در جدول ۹ آورده شده است. بر این اساس، با افزایش عیار حد، تناژ کاهش می‌یابد.

جدول ۹. خلاصه نتایج محاسبه ذخیره مس به روش عکس مجذور فاصله در اولویت ششم

نوع ماده معدنی	عیار حد (٪)	حجم (m^3)	عیار متوسط (٪)	چگالی ($\frac{gr}{cm^3}$)	تناژ (تن)
باطله	۰-۰/۱۵	۳۶۱۲۳۶	۰/۰۲۳	۲/۷	۹۷۵۳۳۷
کم‌عیار	۰/۱۵-۰/۳۰	۳۶۳۲	۰/۱۷	۲/۷	۹۸۰۶
متوسط عیار	۰/۳۰-۱	۵۶	۰/۳۵	۲/۷	۱۵۱
مجموع		۳۶۴۹۲۴			۹۸۵۲۹۴

محاسبه ذخیره به روش مقاطع قائم

در کانسار عشـــوند، بر مبنای اطلاعات زمین‌شناسی، تکتونیک، مطالعات ژئوفیزیک، حفریات اکتشافی و مشخص شدن ابعاد کانی‌ســـازی ازجمله عمق، ضخامت، گسترش طولی و درصد عیار، اقدام به ارزیابی ذخیره به روش مقاطع قائم با عیار حد ۰/۱۵ درصد مس شـــده است. برای تخمین ذخیره از روش مقاطع قائم با اســـتفاده از شش پروفیل در اولویت اول در گســـتره استفاده‌شده است که میزان ذخیره ماده معدنی با این روش ۵۰۶۰۰۰ تن با عیار متوســـط ۰/۲۲ درصد مس به دســـت آمد. در ایـــن پژوهش تخمین ذخیره با اســـتفاده از روش مقاطع قائم با استفاده از ۴ پروفیل در گستره انجام‌شده است که میزان ذخیره ماده معدنی با این روش ۲۸۲ تن با عیار متوسط ppb ۳۷۲ طلا به دست آمد. ارزیابـــی ذخیره به روش مقاطع قائـــم با عیار حد ۱۵ درصد آهن انجام شد. در این پژوهش تخمین ذخیره با استفاده از روش مقاطع قائم با استفاده از پنج پروفیل انجام‌شده است که میزان ذخیره ماده معدنی با این روش ۱۷۴۲۰۴ تن با عیار متوسط ۱۶ درصد آهن به دست آمد.

مقایسه روش‌های محاسبه ذخیره به روش زمین‌آماری و مقاطع

برتری روش مقاطع نســـبت به متوسط گیری ریاضی آن است که قطعه با تناژ بالاتر نسبت به قطعه‌ای با تناژ پایین‌تر تأثیر بیشتری در محاسبه‌ی عیار متوسط داشته و در نتیجه عیار متوســـط محاسبه شـــده با این روش به عیار متوسط واقعی نزدیک‌تر خواهد بود. تخمین ذخیره در این کانسار با دو روش زمین‌آمـــاری و مقاطع انجام و نتایج حاصل از این روش‌ها با یکدیگر مقایسه شـــدند. مدل‌سازی گستره کانی ســـازی و تخمین ذخیره با دو روش کلاسیک و زمین‌آماری شامل کریجینگ معمولی انجام شد. ذخیره قطعی کانسنگ مس ۹۰۲۲۱ تن با متوســـط عیار ۰/۴۸ درصد مس و ذخیره قطعی کانســـنگ طلا ۴۳ تن با متوســـط عیار ppb ۸۵۰ و ذخیره قطعی کانسنگ آهن ۳۸۴۱۵ تن با متوسط عیار ۲۵ درصد آهن به دســـت آمد. همچنین مجموع ذخایر قطعی، احتمالی و ممکن ۷۵۱۸۳۹ تن با عیار متوسط ۰/۲۹ درصد کانســـنگ مس برآورد شـــد. میزان ذخیره ماده معدنی با استفاده از روش مقاطع برای مس ۵۰۶۰۰۰ تن با عیار متوسط ۰/۲۲ درصد، برای طلا ۲۸۲ تن با عیار متوســـط ppb ۳۷۲ و آهن ۱۷۴۲۰۴ تن با عیار متوسط ۱۶ درصد به دست آمد. به‌طورکلـــی، روش عکس مجذور فاصله فاقد ابزارهای مورد نیاز برای استخراج ساختار فضایی است. روش زمین‌آماری کریجینگ با در نظر گرفتن ساختار فضایی منطقه، تخمین را محاسبه می‌کند.

رده‌بندی بر اساس استاندارد

در این پژوهش برای رده‌بندی طبق دستورالعمل شماره ۳۷۹ وزارت صمت از اســـتاندارد CMMI و ســـازمان ملل متحد (UNFC) استفاده شد. برای رده‌بندی کانسار عشوند ابعاد شبکه‌ی گمانه‌ها به‌عنوان ملاک اصلی بررسی شد و با شبکه گمانه‌ای ۵۰×۵۰ از چهار طرف برای رده‌ی اندازه‌گیری شـــده، با شـــبکه گمانه‌ای ۱۰۰×۱۰۰ از دو طرف برای رده‌ی

شناسایی‌شده و با شبکه گمانه‌ای ۱۵۰×۱۵۰ از دو طرف برای رده استنباط شده مدل سه‌بعدی تهیه شد. سایر بلوک‌هایی که در ابعاد فوق جای نمی‌گیرند در رده‌ی پتانسیل اکتشافی لحاظ شدند. به‌طورکلی ذخایر معدنی بر اساس میزان دقت تخمین به سه گروه قطعی، احتمالی و ممکن رده‌بندی می‌شوند. بنابراین ذخایر رده قطعی دارای بیشترین و ذخایر رده ممکن دارای کمترین درجه اعتماد می‌باشند. در این پژوهش برای رده‌بندی ذخیره معدنی عشوند از معیار تعداد نمونه‌های شرکت‌کننده در تخمین استفاده‌شده است. اساس این روش آن است که هرچه تعداد نمونه شرکت‌کننده در تخمین کم شود، دقت تخمین نیز کاهش می‌یابد. در جدول ۱۰، رده‌بندی ذخیره ماده معدنی (مس، طلا و آهن) در اولویت‌های یک، دو و شش در منطقه آورده شده است. در جدول ۱۱ نیز رده‌بندی کلی ذخیره ماده معدنی برای مس، طلا و آهن در گستره مطالعاتی ارائه شده است. ولمر بر اساس خطای به‌دست‌آمده، کانسار را به بخش‌های اندازه‌گیری شده، مشخص‌شده و استنباط شده به شرح ذیل رده‌بندی کرده است.

رده‌بندی اندازه‌گیری شده (قطعی): اولویت‌هایی که خطای تخمین آن‌ها زیر ۲۰ درصد باشد.

رده‌بندی مشخص‌شده (احتمالی): اولویت‌هایی که خطای تخمین آن‌ها بین ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد.

رده‌بندی استنباط شده (ممکن): اولویت‌هایی که خطای تخمین آن‌ها بیش از ۳۰ درصد باشد.

به‌منظور اعلام ذخیره کلی کانسار، ذخیره قطعی هر سه گستره بررسی شد که در این صورت برای مس کل ذخیره قطعی کانسار حدود ۹۰۲۲۱ تن با متوسط عیار ۰/۳۰ درصد مس می‌باشد. برای طلا ذخیره قطعی ۴۳ تن با متوسط عیار ppb ۸۵۰ و ذخیره قطعی آهن ۳۸۴۱۵ تن با متوسط عیار ۲۵ در صد آهن می‌باشد. با توجه به مطالعات فنی اقتصادی صورت گرفته در گستره اولویت اول، کل ذخیره قابل‌استخراج با عیار حد ۰/۱۵ درصد مس حدود ۶۳۰۶۱۴ تن با عیار متوسط ۰/۳۵ درصد مس و نسبت باطله برداری ۴/۶۶ به یک خواهد بود. بر اساس نتایج حاصل، عشوند در گستره اقتصادی و قابل معدن کاری قرار می‌گیرد.

جدول ۱۰. رده‌بندی ذخیره ماده معدنی (مس، طلا و آهن) در اولویت‌های ۱، ۲ و ۶

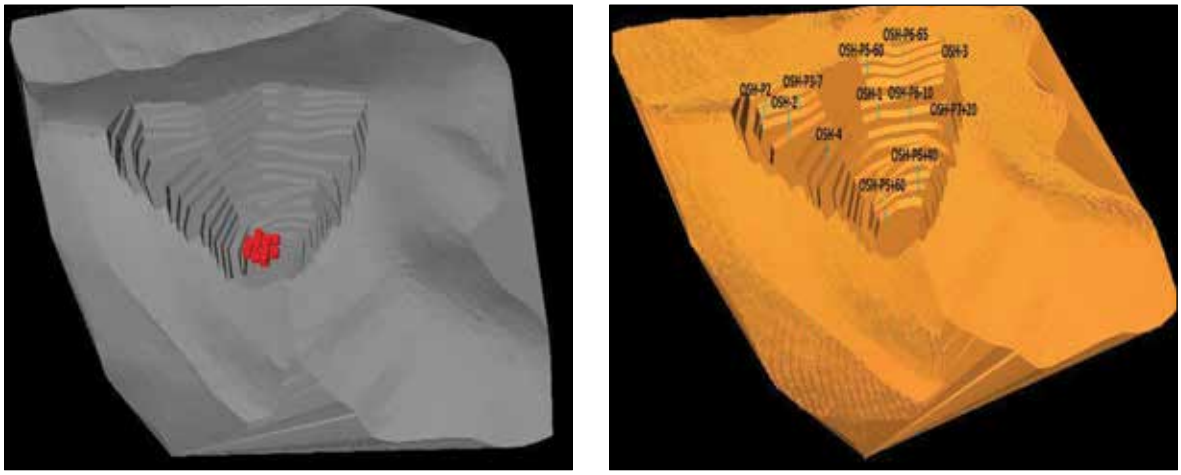
ماده معدنی آهن (تن)	عیار متوسط آهن (٪)	ماده معدنی طلا (تن)	عیار متوسط طلا (ppb)	ماده معدنی مس (تن)	رده‌بندی	عیار متوسط مس (٪)	گستره
۳۸۴۱۵	۲۵	۴۳	۸۵۰	۷۵۶۷۴	قطعی	۰/۴۹	
۸۳۲۳۴	۲۰	۹۲	۵۸۰	۱۶۳۹۶۰	احتمالی	۰/۳۶	اولویت اول
۱۹۸۴۸۰	۱۳	۲۲۰	۳۹۸	۳۹۰۹۸۰	ممکن	۰/۲۵	
-	-	-	-	۱۳۳۵۲	قطعی	۰/۴۷	
-	-	-	-	۲۸۹۳۰	احتمالی	۰/۲۴	اولویت دوم
-	-	-	-	۶۸۹۸۶	ممکن	۰/۱۸	
-	-	-	-	۱۱۹۵	قطعی	۰/۳۸	
-	-	-	-	۲۵۸۹	احتمالی	۰/۲۲	اولویت ششم
-	-	-	-	۶۱۷۳	ممکن	۰/۱۷	

جدول ۱۱. رده‌بندی کلی ذخیره ماده معدنی مس، طلا و آهن در منطقه عشوند

ماده معدنی آهن (تن)	عیار متوسط آهن (٪)	ماده معدنی طلا (تن)	عیار متوسط طلا (ppb)	ماده معدنی مس (تن)	عیار متوسط مس (٪)	رده‌بندی
۳۸۴۱۵	۲۵	۴۳	۸۵۰	۹۰۲۲۱	۰/۴۸	قطعی
۸۳۲۳۴	۲۰	۹۲	۵۸۰	۱۹۵۴۷۹	۰/۳۴	احتمالی
۱۹۸۴۸۰	۱۳	۲۲۰	۳۹۸	۴۶۶۱۳۹	۰/۲۳	ممکن

مدل توپوگرافی گستره معدن

مـــدل بلوکی ســـه‌بعدی که بـــه نرم‌افزار بهینه‌ســـازی وارد می‌شـــود، علاوه بر اطلاعات مربوط به کانســـار، باید نشان‌دهنده شـــکل توپوگرافی نیز باشد. برای این منظور با استفاده از آخرین نقشه‌های توپوگرافی در دسترس، یک مدل بلوکی سه‌بعدی از رویه توپوگرافی به مدل بلوکی کانسار افزوده شد. بدیهی است بلوک‌های واقع در بین سطح توپوگرافی و سطح کانسار به عنوان بلوک‌های باطله تلقی شده و در مدل اقتصادی به صورت بلوک‌هایی با ارزش منفی وارد می‌شوند. شکل ۹ مرز پیت طراحی‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۹. نمایی از حد نهایی معدن و مدل سه‌بعدی پیت به همراه گمانه‌ها

بهینه‌سازی

در مطالعات بهینه‌سازی اســـتخراج معادن، حد نهایی معدن گســـتره‌ای اســـت که ارائه‌کننده بیشـــترین جریان نقدینگی باشد (حسنی پاک، ۱۳۸۳). تعیین این حد بر روی مدل بلوکی اقتصادی کانســـار صورت می‌پذیرد و طی آن با کنار هم قرار گرفتن بلوک‌ها با ارزش‌های اقتصادی مختلف، نهایتاً حدی محاسبه می‌شود که در مجموع دارای بیشترین جریان نقدینگی باشد. از این مرحله به بعد، گسترش بیشتر معدن نتیجه‌ای جز کاهش جریان نقدینگی نخواهد داشت، لذا این حد به عنوان حد نهایی گسترش معدن تلقی می‌شود. از آنجا که در حد نهایی که از این طریق محاســـبه می‌شود ارزش زمانـــی پول دخالتی نـــدارد، نمی‌توان آن را به عنوان حد نهایی بهینه اســـتخراج در نظر گرفت. بنابراین، باید با لحاظ کردن توالی استخراج معدن و ارزش زمانی درآمدها و هزینه‌ها، حد نهایی بهینه معدن را مشخص کرد. حد نهایی معدن (جریان نقدینگی بیشینه) برای عیار حد ۰/۱۵ درصد مس محاسبه و نتایج آن به‌طور خلاصه عبارتند از: عیار حد سر به ســـری مس ۰/۱۵ درصد، ذخیره قابل‌استخراج مس ۷۵۱۸۳۹ هزار تن ماده معدنی و عیار متوســـط ذخیره ۰/۲۵ درصد مس. هزینه‌های معدنکاری و پارامترهای بهینه‌سازی نیز شامل هزینه فروش مس در حدود ۲۰ دلار بر تن، هزینه باطله برداری ۱ دلار بر تن، هزینه استحصال مس ۴ دلار بر تـــن، بازیابی کارخانه ۵۵ درصد، نرخ بهره ۱۰ درصد دلاری، روزهای کاری ۳۵۰ روز و شیب ژئوتکنیک در تمام جهات ۳۵ درجه می‌باشد.

نتیجه‌گیری

سرمایه‌گذاری‌ها و پیشرفت پروژه‌های معدنی بستگی به کمیت و کیفیت منابع و ذخایر معدنی دارد، بنابراین اطلاع از اعتبار تخمین ذخیره معدنی بر اساس روش‌های گوناگون اهمیت فراوانی دارد. مدل‌سازی و تخمین ذخیره کانسار جزو

مهم‌ترین فعالیت‌های معدنکاری است که پیش‌نیاز طراحی معدن و برنامه‌ریزی تولید در طول بهره‌برداری از آن است، بنابراین محاسبه ذخیره مهم‌ترین هدف عملیات اکتشافی است و امکان‌پذیری استخراج کانسار منوط به داشتن ذخیره بالا و با وضعیت مناسب است. بر اساس نتایج این پژوهش، کانسار عشوند از نوع اسکارن پلی‌متال (مس-طلا-آهن) است و در اثر تزریق توده نفوذی فلسیک در سنگ‌های کربناته و تبادل یونی بین آنها تشکیل شده است. این کانسار از دو بخش سولفیدی و اکسیدی تشکیل شده است. عیار بخش سولفیدی بسیار ناچیز و عمده کانی‌زایی مس در اولویت اول و همراه با فاز اکسیدی و در کانی مالاکیت رخ داده است. کانسار عشوند از نظر آهن و طلا اقتصادی نیست و این فلزات به‌طور عمده به صورت پاراژنز در همراهی با کانی‌زایی می‌باشند. به‌منظور اعلام ذخیره کلی کانسار، ذخیره قطعی هر سه گستره در نظر گرفته شد که در این صورت برای مس کل ذخیره قطعی کانسار حدود ۹۰۲۲۱ تن با متوسط عیار ۰/۳۰ درصد مس می‌باشد. برای طلا ذخیره قطعی ۴۳ تن با متوسط عیار ppb ۸۵۰ و ذخیره قطعی آهن ۳۸۴۱۵ تن با متوسط عیار ۲۵ در صد آهن می‌باشد. با توجه به مطالعات فنی اقتصادی انجام‌شده در گستره اولویت اول، کل ذخیره قابل‌استخراج با عیار حد ۰/۱۵ درصد مس حدود ۶۳۰۶۱۴ تن با عیار متوسط ۰/۳۵ درصد مس و نسبت باطله‌برداری ۴/۶۶ به یک است. بر اساس نتایج حاصل، عشوند در گستره اقتصادی و قابل معدنکاری قرار می‌گیرد. با بررسی و مدل‌سازی گمانه‌ها در گستره مشخص شد در منطقه‌ای که امید بیشتری برای وجود کانسار با عیار بالا می‌رفت، گمانه‌های کمتری حفر شده بود. بنابراین پیشنهاد می‌شود که در بخش جنوبی کانسار که عیار بالا دارد، تعدادی گمانه یا چاه دیگر حفر شود تا میزان ذخیره با اعتماد بالاتری به دست آید. با توجه به نتایج حاصل از تخمین کریجینگ، پیشنهاد می‌شود که در نیمه جنوب غربی، مطالعات جامع‌تری انجام شود تا بتوان کل کانسار را به این روش تخمین زد. با توجه به اینکه کانسار در نیمه جنوب شرقی بسته نشده و امکان وجود بخش‌های پر عیار در آن بخش‌ها دور از انتظار نیست، بنابراین انجام حفاری‌های تکمیلی پیشنهاد می‌شود. با توجه به مدل‌های بلوکی به‌دست‌آمده، مشاهده شد که در بخش شمالی کانسار ماده معدنی وجود ندارد، بنابراین نیازی به انجام کار اکتشافی جدیدی در این گستره نیست. بنابراین پیشنهاد می‌شود برای پیدا کردن مناطق آنومال طلا، در نیمه شرقی و برای اکتشاف آهن در نیمه جنوب غربی کانسار گمانه‌های بیشتری حفر شود. مس در جنوب و غرب کانسار پر عیار می‌باشد، بنابراین پیشنهاد می‌شود در این دو بخش گمانه‌های بیشتری حفر شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان مقاله از حمایت‌های مادی و معنوی شرکت محترم تهیه و تولید مواد معدنی ایران به ویژه جناب آقای دکتر کریم‌نژاد سرخی، جناب آقای مهندس مرادی و سرکار خانم مهندس فرشیدپور تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

- احمدی، ر.، ۱۳۹۹. مقایسه نتیجه روش‌های زمین‌آماری خطی و غیرخطی در مدل‌سازی و ارزیابی ذخیره کانسار مس ناربا‌غی شمالی ساوه، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۴، ۵۶، ۵۹-۴۳.
- احمدی، ر.، ۱۴۰۳. بکارگیری تکنیک‌های مختلف به منظور اکتشاف، مدل‌سازی و تخمین ذخیره کانسار گچ در ناحیه شمال غرب تفرش، استان مرکزی، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۸، ۷۰، ۱۸-۱.
- احمدی، ر. و شاه زمانی، ه.، ۱۴۰۴. طراحی اندازه و ابعاد بهینه بلوک‌های تخمین ذخیره بر اساس معیارهای مختلف (موردمطالعه: کانسار طلای زرزیمای موچش)، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۹، ۷۴، ۲۲-۱.
- حسنی پاک، ع. الف.، ۱۳۸۳. اصول اکتشافات ژئوشیمیایی، دانشگاه تهران. ۴۰۱.
- طبیب زاده گناوه، م.، نجاتی کلاته، ع. و عرب امیری.، ۱۳۹۵. اکتشاف کانسار پلی متال در منطقه عشوند نهاوند با استفاده از مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیس‌سنجی، مقاومت ویژه و قطبش القایی، دومین همایش زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، ۲۱.
- شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۸۵. گزارش اکتشافی اولیه در گستره کانسار عشوند جهت

ارزیابی مواد و منابع معدنی، ۹۵.

- علایی کاخکی، ز.، نجاتی کلاته، ع.، عرب امیری، ع. و جعفری، ف.، ۱۴۰۱. استفاده از معکوس‌سازی‌های لی اولدنبرگ و هموار برای شناسایی کانسار پلی متال منطقه عشوند نهاوند با کمک داده‌های IP/Res. دوفصلنامه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۸، ۱.

- غفاری هاشمی، س. ط.، یزدی، م.، فودازی، م. و تقی‌لو، ع.، ۱۳۸۹. تعیین ذخیره اسکارن پلی متال و اندیس طلای عشوند، نهاوند. پنجمین همایش ملی زمین‌شناسی و محیط زیست، ۱۸.

- غفاری هاشمی، س. ط.، یزدی، م.، فودازی، م. و تقی‌لو، ع.، ۱۳۹۰. کاربرد روش‌های آماری تک متغیره اکتشافات ژئوشیمیایی فلزات پایه در منطقه عشوند همدان. دومین همایش علوم زمین و نکوداشت استاد پیشگام علم زمین‌شناسی ایران دکتر عبدالکریم قریب، ۱۵.

- مدنی، ح. و یعقوب‌پور، ع.، ۱۳۸۰. تخمین و ارزیابی ذخایر معدنی، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۲۱۹.

- موحدی.م. و چیتگری.ا.، ۱۳۸۷. اکتشاف اسکارن پلی متال طلا، مس، روی، آهن عشوند، نهاوند. بیست و هفتمین گردهمایی علوم زمین، ۱۲.

- موحدی، م. و چیتگری.ا.، ۱۳۸۷. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، گزارش نهائی پروژه اکتشافات به روش ژئوشیمی- معدنی در گستره عشوند، ۲۳۵ .

- موحدی، م.، ۱۳۸۹. گزارش زمین‌شناسی منطقه نهاوند در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- موحدی، م.، ۱۳۹۱. تعیین ذخیره اسکارن پلی متال و طلای اندیس عشوند، نهاوند. فصلنامه زمین‌شناسی محیط زیست، ۱۷، ۱۵-۲.

- موحدی، م.، یزدی، م. و بهزادی، م.، ۱۳۹۹. کانی‌شناسی و تعیین زون‌های اسکارنی در نهشته مس-طلا-آهن عشوند نهاوند. دوازدهمین همایش زمین‌شناسی دانشگاه پیام نور، قزوین، ایران، ۱۸.

- موحدی، م.، یزدی، م. و بهزادی، م.، ۱۳۹۹. کانی‌شناسی، ژئومتری و ژئوشیمی مس، طلا و آهن نهشته اسکارنی عشوند، نهاوند، ایران. بیست و هفتمین همایش ملی بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دانشگاه بیرجند، ایران، ۲۳.

- موحدی، م.، یزدی م. و بهزادی، م.، ۱۴۰۱. دما-فشارسنجی و شیمی کانیهای گارنت و پیروکسن کانسار اسکارن عشوند نهاوند، غرب ایران، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۱۷.

- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵. دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۰۹.

- نجاتی کلاته، ع.، ۱۳۹۵. مدل‌سازی سه‌بعدی معکوس داده‌های مغناطیس سنجی، مقاومت ویژه و قطبش القایی؛ مطالعه موردی: ذخیره پلی متال در گستره عشوند همدان. ایران، ۱۶۷.

- یزدی، م.، غفاری، ط.، فودازی، م.، موحدی، م. و تقی‌لو.، ۱۳۸۹. تعیین ذخیره اسکارن پلی متال و طلای اندیس عشوند، نهاوند، پنجمین همایش ملی زمین‌شناسی و محیط زیست، اسلام شهر، ۲۸.

- Camp, V.E. and Griffis, R.J., 1982. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. Lithos, 15, 221-239.

- Chanderman, L., Dohm, C.E. and Minnitt, R.C.A., 2017. 3D geological modelling and resource estimation for a gold deposit in Mali. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 117 (2): 189-197, http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2017/v117n2a10.

- Hulse, D.E., 1992. The consequence of block size decisions by ore body modeling. The 23rd International Symposium on the Application and Operation Research in the Mineral Industry (APCOM23), 225-232.

- Rossi, M.E. and Deutsch, C.V., 2014. Mineral resource estimation, 1st Edition, Springer Dordrecht Heidelbrg New York London, 48.