

مدلسازی زون‌های کانه‌سازی و ارزیابی منابع مس و طلا در بخش جنوبی کانسار مس - طلا پورفیری دالی، استان مرکزی

سارا یوسفی فر*^۱، پیمان افضل^۲، احمد خاکزاد^۳، هوشنگ اسدی‌هارونی^۴
۱ - دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران
۲ - عضو هیات علمی گروه مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب
۳ - عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال
۴ - عضو هیات علمی گروه مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان
(* عهده دار مکاتبات - sara_yousefifar@yahoo.com)

چکیده

جدایش و مدلسازی زون‌های گوناگون کانه‌زایی و ارزیابی ذخایر و منابع آن‌ها در کانسارهای پورفیری اهمیت بسیاری دارد. در این نوشتار هدف اصلی، مدلسازی زون‌های کانه‌زایی موجود در بخش جنوبی کانسار دالی می‌باشد. براساس نتایج بدست‌آمده از حفاری اکتشافی در بخش جنوبی این کانسار تاکنون سه زون اکسیدان، انتقالی و نیز هیپوژن در این کانسار وجود دارد. برای مدلسازی بخش جنوبی کانسار نخست اطلاعات ۶ گمانه حفرشده در این بخش در یک پایگاه داده ساماندهی شدند. سپس با استفاده از نرم‌افزار RockWorks14 و تلفیق اطلاعات با داده‌های زمین‌شناسی سطحی مدل سه‌بعدی زون‌بندی در این کانسار ساخته شد. سپس با استفاده از روش مجذور عکس فاصله میزان منابع مس و طلا در هر سه زون به تفکیک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشانگر تمرکز بیشترین کانسنگ حاوی مس و طلا در زون هیپوژن می‌باشد. همچنین زون انتقالی در بخش‌هایی دارای غنی‌شدگی مس و طلا می‌باشد و می‌توان بخشی از زون انتقالی موجود را بعنوان زون غنی‌شده سوپرزن معرفی نمود.

واژگان کلیدی: مدلسازی، ارزیابی ذخیره مس و طلا، کانسار پورفیری دالی.

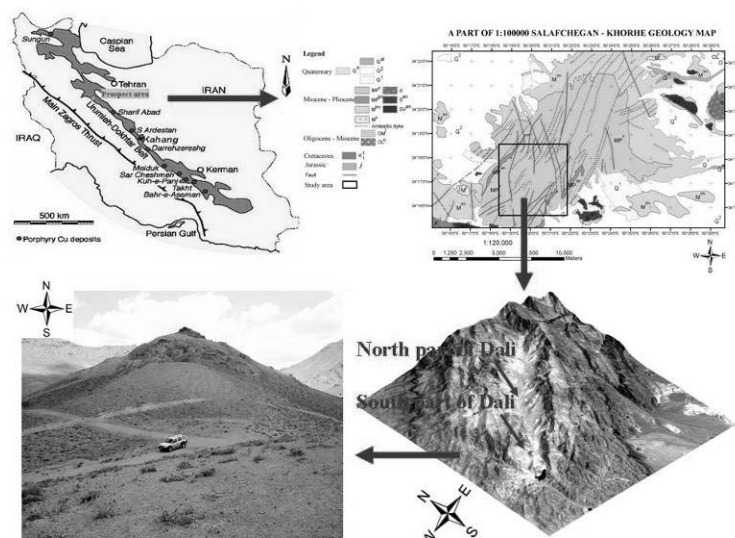
۱- مقدمه

باتوجه به افزایش شدید مصرف مس در دنیا و عدم تکافوی منابع فعلی آن تا ۳۰ سال آینده بخش مهمی از عملیات اکتشافی منابع مس بر روی کانسارهای مس متمرکز شده‌است. از سال ۱۹۰۴ به این سو مهمترین منابع مس در دنیا کانسارهای پورفیری هستند (Ghose, 2005). این کانسارها به دلیل میزان بسیار زیاد کانسنگ از یک سو و همچنین وجود عناصر ارزشمند همراه چون مولیبدن و طلا اهمیت فراوانی دارند. در ایران نیز اکتشاف این کانسارها جزو اولویت‌ها در سال‌های اخیر قرار گرفته است. از جمله این کانسارها کانسار مس-طلای دالی واقع در سلفچگان استان مرکزی می‌باشد. امروزه بحث مدلسازی کانسارها بخشی مهم در علوم زمین به خصوص در زمین‌شناسی اقتصادی و نیز اکتشاف معدن می‌باشد (Moon and et al., 2006). این کار اهمیت زیادی در ارزیابی عیار عناصر در بخش‌های مختلف یک کانسار دارد که نقش موثری در تشخیص مدل‌های توصیفی و عیار-ذخیره در یک کانسار و به دنبال آن‌ها تعیین تیپ کانسار می‌باشد (Stoker and Gilfillan, 2001). این مساله برای کانسارهای پورفیری به دلیل وسعت فراوان، تنوع سنگ‌شناسی و زون‌بندی موجود در آن‌ها اهمیت زیادی دارد. در حد فاصل زمین آمار و روش‌های سنتی و آمار کلاسیک روشی موسوم به مجذور عکس فاصله وجود دارد که دارای برخی خصوصیات زمین‌آمار می‌باشد. در این روش وزن اصلی برای تخمین فاصله نمونه‌ها از یکدیگر است (افضل

و همکاران، ۱۳۸۸). اگر به دلیلی مانند کم بودن تعداد نمونه‌ها، حالت نازک لایه ماده معدنی و... امکان استفاده از زمین‌آمار نباشد، این روش بهترین روش تخمین عیار می‌باشد (Davis, 2002). در این پژوهش مدل سه‌بعدی زون‌بندی کانسار ساخته شده است. سپس با استفاده از نتایج آنالیز حاصل از ۱۰۳۳ نمونه گرفته شده از مغزه‌های حفاری و با استفاده از روش مجذور عکس فاصله، ارزیابی منابع مس و طلا در سه زون اکسیدان، انتقالی و هیپوژن در بخش جنوبی کانسار دالی صورت پذیرفته‌است.

۲- مشخصات و زمین‌شناسی کانسار

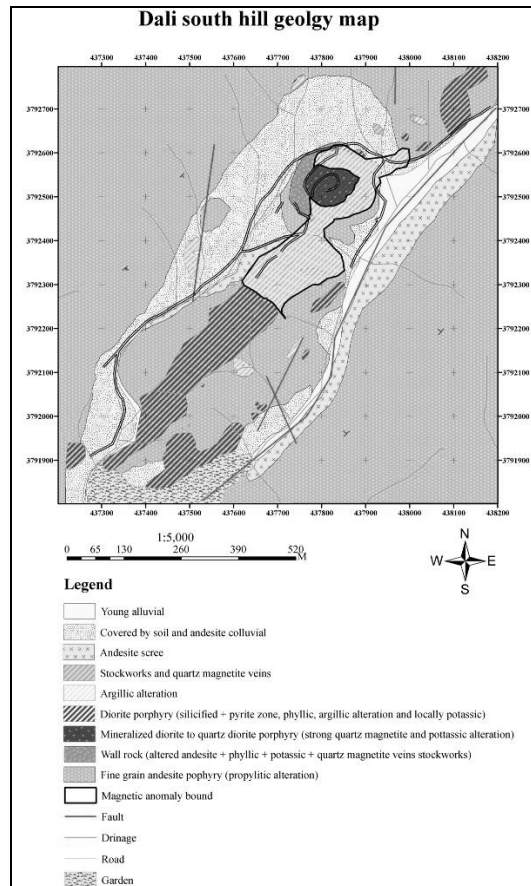
کانسار دالی از نظر زمین‌شناسی در جوار برخورد کمر بند ماگمایی ارومیه- دختر و زون دگرگونی سنندج- سیرجان قرار گرفته‌است. این کانسار در ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ سلفچگان - خورمه، در محدوده جغرافیایی $17^{\circ} 50'$ تا $26^{\circ} 50'$ طول‌های خاوری و $15^{\circ} 34'$ تا $22^{\circ} 34'$ عرض‌های شمالی و در ۱۲۰ کیلومتری جنوب غرب تهران و در ۶۰ کیلومتری شمال شرق شهرستان اراک (مسیر جاده اراک- سلفچگان) واقع شده است (علایی مهابادی و کهنسال، ۱۳۷۹). این کانسار در حال حاضر شامل دو بخش جنوبی و شمالی است که در این تحقیق بخش جنوبی این کانسار مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت بخش‌های شمالی و جنوبی کانسار دالی بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰ سلفچگان- خورمه، تصویر سه‌بعدی داده‌های IKONOS و تصویر محدوده مورد مطالعه (دید به سمت شمال)

چینه‌شناسی کانسار دالی بر اساس نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰۰ سلفچگان - خورمه، نهشته‌های میوسن- پلیوسن است که شامل لایلی توف و برش‌های آندزیتی خاکستری تیره و نیز دایک‌های آندزیتی می‌باشد. روند این نفوذی‌ها شمال شرق - جنوب غرب با ساختاری تقریباً عمود بر ارومیه دختر قرار گرفته‌است و میزبان توده‌های ولکانیک و ساب‌ولکانیک با ترکیب حدواسط تا اسیدی می‌باشند (علایی مهابادی و کهنسال، ۱۳۷۹). توده‌های اخیر تحت تاثیر محلول‌های هیدروترمال، دچار دگرسانی و فرایند کانه‌زایی شده‌اند (آیتی، ف، ۱۳۸۷). کل زون آلتراسیون محدوده‌ای در حدود ۴ کیلومتر در ۱ کیلومتر را پوشش می‌دهد و با روند شمال شرق - جنوب غرب در امتداد یک دره گسلی قرار گرفته است. زون کانی‌سازی شده بخش جنوبی به شکل توده مخروطی با ترکیب هورنبلند دیوریت پورفیری تا کم و بیش کوارتز مونزونیت پورفیری (به صورت محلی) مشاهده می‌شود. ابعاد این توده در حدود ۲۲۵ در ۲۰۰ مترمربع بوده که توسط آلتراسیون پتاسیک، آلتراسیون فیلیک و رگه‌ها و استوک ورک‌های فراوان کوارتز- مگنتیت (پرکننده درزه و شکاف‌ها) مشخص شده است (شکل ۲). سه منطقه در غنی‌سازی این کانسار تشخیص داده شده است. زون اکسیدی که شامل

اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، اکسیدهای مس، مالاکیت و آزوریت می‌باشد. زون انتقالی که در این بخش از مقدار کانی‌های مالاکیت و آزوریت کاسته شده و تا حدی دارای کالکوسیت، کولیت، کالکوپیریت و پیریت می‌باشد. زون هیپوژن که شامل کاکوپیریت و تا حدی پیریت به عنوان کانی‌های عمده می‌باشند.



شکل ۲: نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰ بخش جنوبی کانسار دالی (پرشین گلد، ۱۳۸۷)

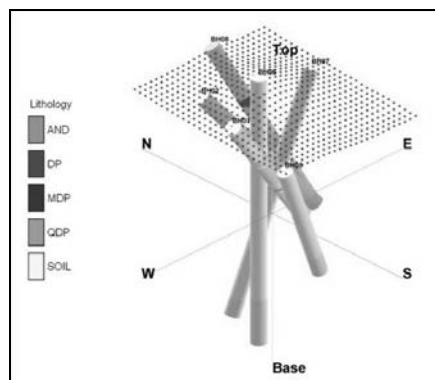
۳- روش پژوهش

مدلسازی سه‌بعدی و ارزیابی ذخیره بخش جنوبی کانسار براساس داده‌های موجود از ۶ گمانه اکتشافی صورت پذیرفته است. اطلاعات جمع‌آوری شده از گمانه‌های اکتشافی در نرم‌افزار Excel وارد شده و مورد دسته‌بندی قرار گرفته‌اند. ساختار پایگاه داده‌ها متناسب با نرم‌افزار مدل‌ساز RockWorks14 شده و اطلاعات موجود را برای پردازش وارد نرم‌افزار شد. در مرحله بعدی ابعاد پروژه تعیین شد. برای مدلسازی بهتر رویه توپوگرافی بخش جنوبی کانسار ساخته شد. همچنین از داده‌های زمین‌شناسی سطحی موجود در نقشه زمین‌شناسی برای تعیین و ترسیم مرزهای گسترش کانسارسازی استفاده شد. سپس با ترسیم گمانه‌های اکتشافی و پس از آن ترسیم نیمرخ‌های زمین‌شناسی و متصل نمودن زون‌های کانی‌سازی در آن مدل سه‌بعدی زون‌بندی کانسار ساخته شده‌است. سپس با توجه به وضعیت مدل سه‌بعدی و تعداد نمونه‌های آنالیز شده از دو عنصر مس و طلا در توده مربوطه با استفاده از روش مجذورعکس فاصله، میزان منابع این دو عنصر در بخش جنوبی محاسبه شده‌است.

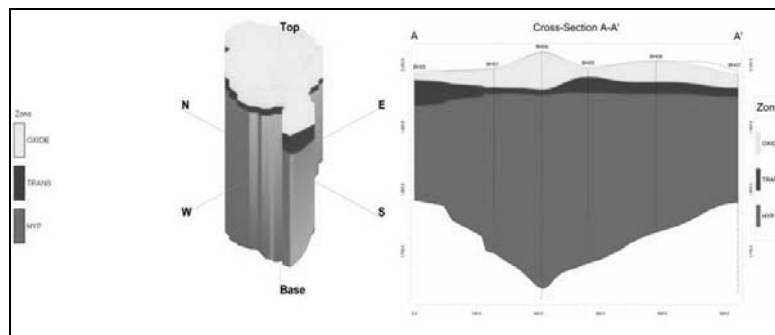
۴- مدل‌سازی سه‌بعدی کانسار براساس زون‌بندی

جهت انجام مدل‌سازی و ارزیابی کانسار باید ابعاد پروژه اکتشافی و ابعاد ریزبلوک‌ها در مدل بلوکی یک کانسار مشخص شود. این ابعاد در جهت X از ۴۳۷۷۰ تا ۴۳۷۹۳۵، در جهت Y از ۳۷۹۲۳۶۵ تا ۳۷۹۲۶۵۰ و در جهت ارتفاعی یا Z از ۱۶۱۰ تا ۲۰۳۰ متر می‌باشد. ابعاد ریزبلوک‌ها بر اساس فاصله بین گمانه‌ها و نیز قاعده ارایه شده توسط David (۱۹۷۰) $10 \times 10 \times 10$ در نظر گرفته شده است. رویه توپوگرافی به خصوص در مناطقی که دارای توپوگرافی شدیدی هستند موردنیاز است، زیرا در ارزیابی ذخیره، محاسبه حجم روباره و همچنین طراحی معدن تاثیر مستقیم می‌گذارد. حتی در نواحی با توپوگرافی آرام باید تاثیر توپوگرافی را در مدل‌سازی کانسار اعمال نمود (Davis, 2002). پس از ورود پایگاه داده‌ها به نرم افزار مدل سه‌بعدی گمانه‌ها ایجاد برای ارزیابی ذخیره و چک کردن مدل نهایی ساخته شد. در شکل ۳ مدل سه‌بعدی رویه توپوگرافی به همراه گمانه‌های حفاری موجود در بخش جنوبی کانسار دالی آورده شده است. برای ترسیم مرز کانه‌زایی نیاز به لایه زمین شناسی می‌باشد که بر اساس موقعیت گمانه‌ها و نیز برنژدهای ماده معدنی در سطح و عوارض کانی‌سازی سطحی مرز کانه‌زایی را مشخص شده است. سپس مقاطع زمین‌شناسی بخش جنوبی کانسار براساس دید زون‌بندی تهیه شده است و وضعیت تغییرات سه زون در مقاطع بخوبی مشاهده می‌شود. در شکل ۴ یک نیمرخ طولی از زون‌بندی در بخش جنوبی کانسار دالی آورده شده است. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود، زون هیپوزن دارای بیشترین ضخامت در این کانسار می‌باشد.

سپس با استفاده از نرم‌افزار RockWorks14 بخش‌های متناظر هر زون کانی‌سازی به یکدیگر وصل شده و مدل سه‌بعدی بلوکی زون‌بندی کانسار ترسیم می‌گردد (شکل ۴). همانگونه که گفته شد برای اینکه یک مدل زون‌بندی نزدیک به واقعیت وجود داشته باشد نخست توپوگرافی سطحی بر مدل اعمال شده و سپس با استفاده از مرز گسترش ماده معدنی مدل برش می‌خورد. برای اینکه دقت بیشتری بر مدل‌سازی اعمال گردد یک گرید نیز براساس کمربندی زون هیپوزن گرفته شده در گمانه‌ها ساخته شده و بر مدل اعمال شده است.



شکل ۳: مدل سه بعدی گمانه‌های حفاری و رویه توپوگرافی



شکل ۴: نیمرخ طولی زون‌های کانی‌سازی در بخش جنوبی کانسار دالی و مدل سه‌بعدی زون‌ها در بخش جنوبی کانسار دالی

۵- روش مجذور عکس فاصله برای ارزیابی ذخیره

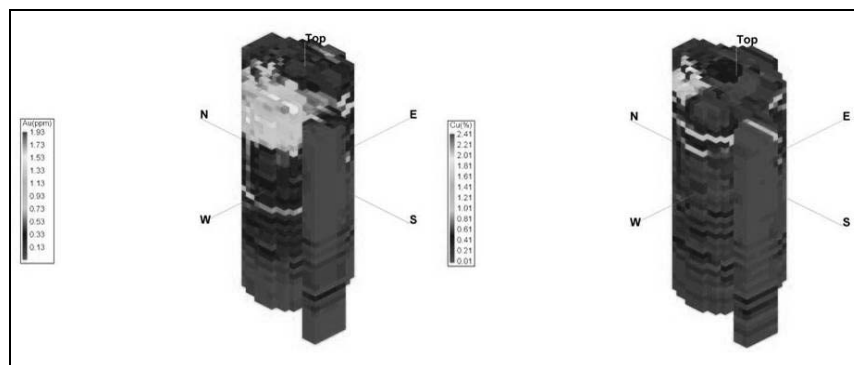
در این روش بحث توزیع عیار در جهت‌های مختلف در فضا حایز اهمیت است. این نخستین روشی بود که بر اساس تاثیر نمونه‌ها بر یکدیگر ارایه شد. در این روش امکان تاثیر عیار تمام نقاط همسایه در برآورد عیار یک نقطه فراهم می‌آید. پارامتر اصلی در این امر فاصله نقاط نمونه برداری از یکدیگر است (دایی جواد، ۱۳۸۴). این روش برای محاسبه ذخیره کانسارهایی به کار می‌رود که اطلاعات اکتشافی (مانند تعداد گمانه‌های اکتشافی و تعداد آنالیزهای شیمیایی) به اندازه کافی موجود نباشند و اکتشاف در مراحل مقدماتی باشد. این روش بهترین روش ارزیابی ذخیره برای کانسارهای رسوبی-لایه‌ای است (David, 1977). در این روش‌ها شعاع تاثیر بر اساس توزیع و تغییرپذیری فضایی عیار تعیین نمی‌شود و تابع شبکه برداشت می‌باشد. این روش با استفاده از بحث‌های آماری بهبود یافته و طبق رابطه زیر امکان تاثیر عیار تمام نقاط همسایه در برآورد عیار یک نقطه فراهم می‌آید.

$$g = \frac{\sum (g_i/d_i^2)}{\sum d_i^{-2}} \quad (1)$$

طبق رابطه (۱) تاثیر عیارهای اطراف به نسبت مجذور عکس فاصله از مرکز بلوک تا آن عیارها تغییر می‌کند. بر اساس فرمول g عیار مورد محاسبه، g_i عیار معلوم در فاصله d_i از نقطه مورد محاسبه می‌باشد.

۶- مدل سه بعدی عیاری مس و طلا

این مدل بر اساس زون‌ها ساخته شده است زیرا استحصال مس و طلا در هر زون بر اساس روش خاصی انجام می‌شود. در کانسارهای پورفیری این مساله که بیشترین حجم مس و طلا در کدام زون می‌باشد حایز اهمیت است. پس از مدلسازی سه بعدی عیاری مس و طلا در هر زون بر اساس احجام بدست‌آمده مس و طلا و با توجه به وزن مخصوص هر زون، تخمین و ارزیابی مقدماتی این کانسار برای مس و طلا صورت گرفته است (شکل ۵). وزن مخصوص در زون اکسیدان $2/42 \text{ g/cm}^3$ ، در زون انتقالی $2/55 \text{ g/cm}^3$ و در زون هیپوزن $2/51 \text{ g/cm}^3$ بر اساس میانگین عیار آن‌ها و نتایج آنالیز وزن مخصوص در نظر گرفته شده است. قبل از محاسبه ذخیره، بایستی حداقل عیار موردقبول را که به عیار حد موسوم است، تعیین نمود. عیار حد کانسار بایستی با دقت و با توجه به تمام مسائل انتخاب شود زیرا این عیار نقش مهمی در میزان ذخیره و ارزش اقتصادی کانسار به عهده دارد. برای طلا عیارهای حد $0/5$ ، 1 و 2 ppm و برای مس عیارهای حد $0/25$ ، $0/3$ ، $0/7$ و 1 درصد در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: مدل توزیع عیار مس و طلا در بخش جنوبی کانسار دالی

بر اساس پردازش‌ها و محاسبات صورت‌گرفته کانسنگ مس با عیار حد $0/3$ ٪ برابر با $8/3$ میلیون تن و کانسنگ طلا با عیار حد $0/5 \text{ ppm}$ برابر با $4/5$ میلیون تن می‌باشد (جدول ۱ و ۲). این نتایج نشان می‌دهد که بیش از 600000 تن کانسنگ موجود در این بخش کانسار دارای عیار طلای بیش از 1 ppm می‌باشد و حدود $4/4$ میلیون تن کانسنگ

حاوی مس با عیار بیش از ۰/۴ درصد وجود دارد. در این کانسار بیشترین میزان کانسنگ مس و طلا در زون هیپوژن می‌باشد و پس از آن در زون‌های اکسیدی و انتقالی تمرکز یافته است. زون انتقالی در بخش‌هایی دارای غنی شدگی عیاری در مس و طلا می‌باشد و به آن می‌توان عنوان زون غنی شده سوپرژن داد.

جدول ۱: ارزیابی مقدماتی منابع مس در بخش جنوبی کانسار دالی

عیار (%)	زون اکسید	زون انتقالی	زون هیپوژن	مجموع کانسنگ (تن)
< ۰/۲۵	۸۱۰۷۰۰	۶۶۰۹۶۰	۹۷۶۳۹۰۰	۱۱۲۳۵۵۶۰
< ۰/۳	۵۹۰۴۸۰	۵۵۰۲۹۰	۷۱۹۶۱۷۰	۸۳۳۶۹۶۰
< ۰/۴	۳۱۲۱۸۰	۳۷۴۸۵۰	۳۶۶۲۰۹۰	۴۳۴۹۱۲۰
< ۰/۷	۵۳۲۴۰	۱۵۷۰۸۰	۸۵۰۸۹۰	۱۰۶۱۲۱۰
< ۱	۳۱۴۶۰	۷۹۵۶۰	۳۱۶۲۶۰	۴۲۷۲۸۰

جدول ۲: ارزیابی مقدماتی منابع طلا در بخش جنوبی کانسار دالی

عیار (%)	زون اکسید	زون انتقالی	زون هیپوژن	مجموع کانسنگ (تن)
< ۰/۵	۳۶۳۰۰۰	۴۳۹۶۲۰	۳۷۳۶۱۳۵	۴۵۳۸۷۵۵
< ۱	۴۱۱۴۰	۱۵۱۴۷۰	۴۱۲۸۹۵	۶۰۵۵۰۵
< ۲	.	۲۰۴۰	.	۲۰۴۰

۷- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدلسازی و ارزیابی منابع حاوی مس و طلا در بخش جنوبی کانسار پورفیری دالی نشانگر این است که باتوجه به وسعت کمی که مورد اکتشاف قرار گرفته، این کانسار می‌تواند پتانسیل زیادی داشته باشد. بیش از ۸/۳ میلیون تن کانسنگ مس در این کانسار وجود دارد که دارای عیار ۰/۳ درصد و بیشتر است. همچنین حدود ۴/۵ میلیون تن کانسنگ طلا با عیار حد ۰/۵ ppm در بخش جنوبی کانسار نشانگر پتانسیل بالای طلا در این کانسار است که در نوع خود در ایران یک پدیده است. مطالعات نشان می‌دهد که بخش بزرگ کانسنگ حاوی مس و طلا در زون هیپوژن قرار دارد. اما در در بخشی از زون انتقالی عیار مس و عیار طلا بسیار بالا می‌رود که این نشانگر احتمال وجود یک زون غنی‌شده سوپرژن در این کانسار است که تاکنون ثبت نشده است. بر اساس نتایج بدست‌آمده می‌توان گفت این کانسار دارای پتانسیل بالایی است و می‌توان با گسترش اکتشافات در سطح و عمق به یک کانسار بزرگ پورفیری مس-طلا در مرکز ایران دست یافت.

۸- منابع

- ۱- افضل، پ؛ محوی، م.ر. و اسفندیاری، ب.، ۱۳۸۸، ارزیابی ذخیره تیتانیوم و وانادیوم در توده مرکزی کانسار سنگ‌آهن آنومالی شمالی بافق، فصلنامه علمی-پژوهشی زمین و منابع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد لاهیجان (شماره ۲).
- ۲- آیتی، ف.، ۱۳۸۷، پایان نامه دکتری گرایش پترولوژی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان به بررسی پترولوژی و ژئوشیمی توده‌های آذرین (ولکانیک - ساب‌ولکانیک) در ورقه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سلفچگان - خورهه.
- ۳- دایی جواد، ح.، ۱۳۸۴، مدلسازی اندیس مس- طلای دالی و کاربرد آن در پتانسیل‌یابی نواحی مجاور با استفاده از داده‌های استر و GIS، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد.
- ۴- شرکت پرشین‌گلد، عملیات حفاری در اندیس مس-طلای دالی، استان مرکزی، گزارش چاپ نشده، ۱۳۸۷.
- ۵- علایی مهابادی، س. و کهنسال، ر.، ۱۳۷۹، نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ چهارگوش سلفچگان - خورهه، ۱۳۷۹، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.
- 6- David, M., 1977, Geostatistical Ore Reserve Estimation, Amsterdam: Elsevier, 283 p.
- 7- Davis, J.C., 2002, Statistics and data analysis in Geology, 3rd edition. John Wiley & Sons Inc., New York, 639 pp.
- 8- Ghose, A., 2005a, Meta-Trends in Global Mining Industry-Where do we Go from Here?, First Iraninan Mining Engineering Conference, Tehran, 1-7.
- 9- Moon, Ch.J.; Whateley, M.K.G. and Evans, A.M., 2006, Introduction to Mineral Exploration, Blackwell, Oxford.
- 10- Stoker, P.T. and Gilfillan, J.F., 2001, Mineral Resource and Ore Reserve Estimation, AusIMM, Australia.