# ارزیابی داده‌های ژئوشیمیایی به روش سامانه‌های ژئوشیمیایی دوقطبی به منظور ارزیابی قابلیت کانی‌سازی مس و فلزات همراه در محدوده اکتشافی میلاجرد، استان اصفهان

**معصومه حیات الغیبی*[۱]، حسن زمانیان[۱]، بهرام آقا ایراهیمی سامانی[۲]، ابراهیم طالع فاضل[۳]**

۱-گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
۲-سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران
۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۳
تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۵/۴

**چکیده**

منطقه میلاجرد در فاصله ۱۰۰ کیلومتری غرب شهرستان اردستان، به عنوان بخشی از ناحیه اکتشافی نایین-نطنز یکی از نواحی امید بخش معرفی شده در مدل‌سازی جامع فلززایی به روش GIS در پهنه نایین است. این منطقه متشکل از دو زون با خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی (مغناطیسی) است. منطقه اکتشافی طی عملیات اکتشاف ناحیه‌ای به عنوان محدوده مستعد شناسایی شده و عملیات پی‌جویی و کنترل میدانی این محدوده به روش لیتوژئوشیمی در شبکه عمومی ۱۰۰۰*۱۰۰۰ مترمربع طراحی و به اجرا در آمده است. در این عملیات ۱۷۶ نمونه خرده سنگی (chips) به وزن حدود ۱۵۰۰ گرم برداشت و پس از آماده سازی در آزمایشگاه کانپژوه به روش ICP, AES برای Au ,As ,Ag ,Ba ,Pb ,Zn ,Cu ,Mo ,Ni ,Co ,V ,Ti ,P ,Bi ,Cr ,Fe ,In ,La ,K ,Na ,Mg ,Mn ,S ,Sb Sc Sr ,Th, U, W, Zr آنالیز شده است. طبق شواهد، در این منطقه احتمال رخداد سه تیپ کانی‌سازی فلزی شامل نوع پورفیری Cu-Mo-(Au)، نوع دگرگونی همبری مس و فلزات همراه و نوع رگه‌ای اپی‌ترمال طلا می‌توان انتظار داشت. براساس تجربه جهانی، انطباق قابل توجهی میان میزان فلز تخلیه شده و مقدار انباشت آن فلز در زون غنی‌شده وجود دارد. طبق محاسبات این پژوهش، در منطقه اکتشافی میلاجرد میزان مس تخلیه شده حدود ۱۹۶۹۸۰۰ تن برآورد می‌شود و می‌تواند نشانگر وجود ۲۰۶۳۵۰۰ تن مس (با منشأ احتمالی سنگ‌های آتشفشانی-نفوذی ائوسن-میوسن) در زون‌های غنی‌شده باشد که موید قابلیت محدوده برای کانه‌سازی مس و فلزات همراه بوده و می‌تواند اجرای عملیات اکتشاف در آن را توجیه نماید.

**واژه‌های کلیدی:** سامانه ژئوشیمیای دو قطبی، کانی‌سازی مس، لیتوژئوشیمی، میلاجرد، نایین.

*- نویسنده مسئول: Email: hayatalgheybi@yahoo.com

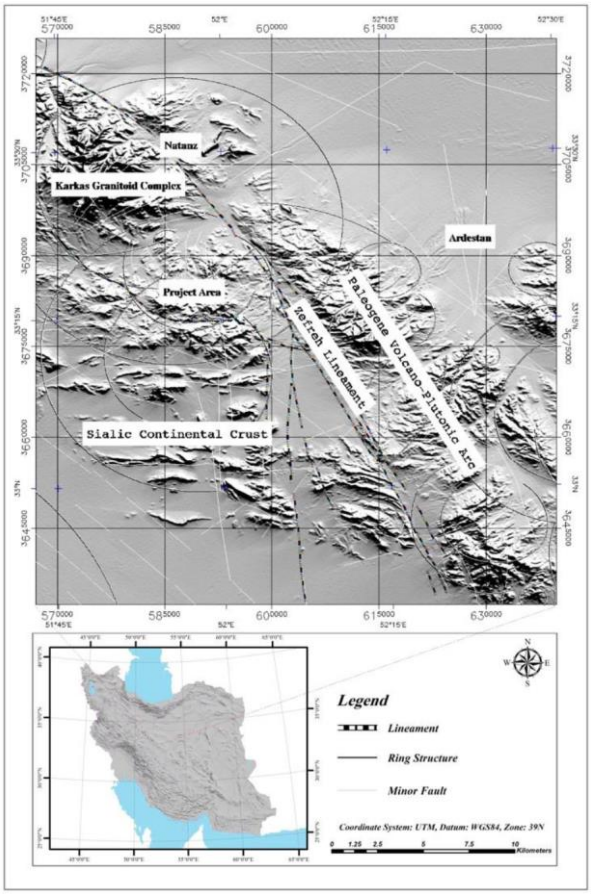
**مقدمه**

محدوده اکتشافی میلاجرد در مدل‌سازی فلززایی بواسطه دارا بودن دگرسانی‌های گرمابی و هاله دگرسانی اکسید آهن سه ظرفیتی به عنوان محدوده مستعد شناسایی شده و طی کنترل‌های میدانی مشخصات قابل توجهی را برای کانی‌سازی نشان می‌دهد. زمین‌شناسی منطقه میلاجرد از سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن تشکیل شده که خود شامل طبقات گدازه و سری توف، لیتیک توف و توف شیل است. در این محدوده استوک‌های نیمه‌عمیق دیوریت پورفیری تشکیل شده که بارزترین مشخصه آن گسترش دگرسانی‌های سریسیتی (فیلیک)، سیلیسی‌شدن، ژاروسیت و لیمونیت و رگه‌های کوارتز همراه با قالب‌های اکسیدی و هوازده از پیریت است. امروزه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ASTER، ژئوشیمی ایزوتوپ‌های پایدار (O، H و S) و تبادلات جرمی دگرسانی به بررسی و تفکیک پهنه‌های دگرسانی در یک کانسار می‌پردازند (نجفیان و همکاران، ۱۳۹۱؛ افشونی و همکاران، ۱۳۹۲؛ مهرابی و همکاران، ۱۳۹۳). در محدوده اکتشافی میلاجرد عملیات پی‌جویی و لیتوژئوشیمی در شبکه یک کیلومتری با هدف تعیین سامانه‌های ژئوشیمیایی دو قطبی (Goldberg and et al, 2007) انجام شده که نتایج آن در این پژوهش ارایه شده است. هدف از این مطالعه تعیین کانون‌های کانی‌سازی، مشخص کردن تیپ‌های احتمالی کانه‌زایی و ارزیابی پتانسیل آنها می‌باشد. با توجه به وسعت محدوده و بالا بودن هزینه‌های عملیات اکتشافی به روش ژئوشیمیایی سیستماتیک، نگارندگان با بهره‌گیری از روش‌های نوین و تجربه جهانی الگوی اکتشافی معرفی شده به نام سامانه‌های ژئوشیمیایی دو قطبی (Goldberg and et al, 1997, 2003)، را برگزیده‌اند. این روش مطابق مستندات موجود در مقیاس‌های مختلف، نتایج قابل توجهی داشته و لذا با تکیه بر نتایج حاصل از این شیوه در دیگر محدوده‌های اکتشافی کشور (سامانی و همکاران، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵) در این منطقه نیز اجرا شده است. در این روش، شبکه برداشت نمونه برحسب مساحت منطقه مورد مطالعه در ابعاد ذیل تعریف می‌شود. با توجه به تنوع واحدهای زمین‌شناسی و وسعت منطقه، شبکه ۱۰۰۰*۱۰۰۰ طراحی و با برداشت نمونه‌های لب‌پری به وزن حدود ۲ کیلوگرم انجام شده است. با توجه به هم پوشانی دگرسانی‌ها، هم آیندهای عناصر، منطقه‌بندی ژئوشیمیایی، ماگماتیسم گرانیتوئیدی و خاستگاه ژئودینامیک، علاوه بر کانی‌سازی‌های احتمالی نوع پورفیری-رگه‌ای گرمابی در محدوده به دلیل شکل‌گیری سامانه ژئوترمال در امتداد گسل‌های منطقه، امکان رخداد کانی‌سازی فلز گرانبها نوع اپی‌ترمال نیز وجود دارد که رویکردهای آن در محدوده شناسایی شده است.

**منطقه مورد مطالعه**

**زمین‌شناسی ناحیه‌ای**

محدوده اکتشافی میلاجرد در جایگاه ویژه‌ای از دیدگاه فلززایی جای دارد (Samani and et al, 2016) و همین ویژگی باعث بروز رویکرد پدیده‌های مختلف در این محدوده و پیرامون آن شده است. به‌طور کلی محدوده مورد مطالعه از سه محیط زمین‌شناسی متفاوت به شرح زیر تشکیل شده است (شکل ۱).



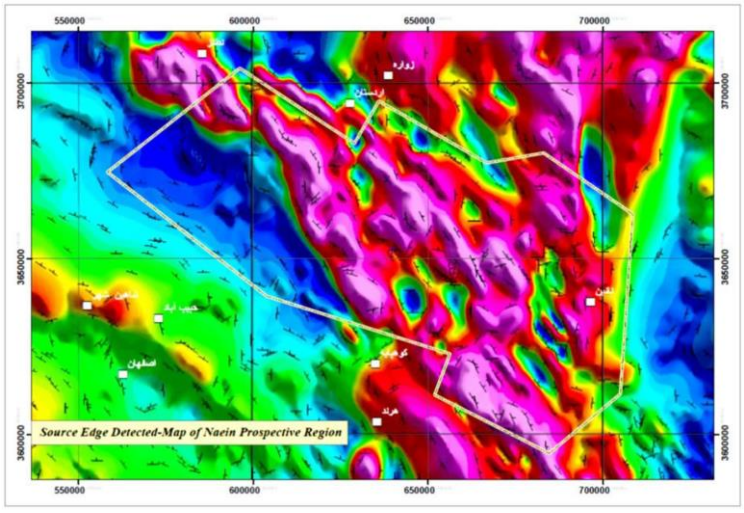

شکل ۱: جایگاه منطقه اکتشافی میلاجرد (project area) در جنوب کمپلکس گرانیتوئیدی کرکس

۱-منطقه متشکل از دو پهنه با صفات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی بوده که بازتاب تفاوت در سرشت پوسته و رویکردهای تکتونوماگمایی مؤثر بر آن است. زیر پهنه نخست در جنوب و باختر محدوده بلوک پوسته قاره‌ای (Sialic Crust) با پوشش پلاتفرم پالئوزوئیک با ویژگی‌های گندوانایی جای دارد که در زمان تریاس میانی در جایگاه اوراسیایی قرار گرفته و سازند نای‌بند با رخساره آواری زغال‌دار بر آن هشته شده است (Sengör 1990; Reyre 1973, 1976 and Mohafez, 1972; GSI). در این بخش به واسطه رخداد کوهزادی کیمرین میانی، عدم رسوبگذاری از ژوراسیک میانی تا کرتاسه زیرین وجود دارد و سازندهای کرتاسه با کنگلومرا و ماسه‌سنگ دربن، به صورت ناپیوستگی زاویه‌دار (Angular unconformity) روی سازند نای‌بند و طبقات کهن‌تر قرار گرفته است (Samani and et al, 2016).

۲- کمربند ولکانوپلوتونیک ملاحمد-کرکس به عنوان زیرپهنه دوم و سرشت متغیر از کالک آلکالن تا شوشونیتی (Hushmandzadeh, 1993) بخش خاوری و محدوده اکتشافی میلاجرد را تشکیل داده که سازندگان عمده آن سری آتشفشانی متوسط تا اسیدی ائوسن و نفوذی‌های ائوسن پسین تا میوسن است. اگرچه پی‌سنگ این کمربند مشخصات پوسته قاره‌ای دارد اما به واسطه فعالیت‌های ولکانیکی و پلوتونیکی در آن نوع بستر ترکیب متوسط یافته و بازتاب مشخصی را در نقشه‌های مغناطیسی نشان می‌دهد (شکل ۲) که کاملاً متفاوت از سیمای

مغناطیسی در باختر خطواره زفره است (سامانی و همکاران، ۱۳۹۳).

۳- خطواره یا زون تکتونوماگمایی زفره بارزترین مرزبندی را بین دو پهنه مورد اشاره در فوق، به وجود آورده است. این عارضه زمین‌ساختی خود همراه با پدیده‌های ماگمایی و دگرنهادی بوده که آنرا متمایز از دو بلوک مجاور می‌سازد. در روند این زون پدیده متاسوماتیسم سیلیسی (Si-metasomatism) موجب تشکیل کوارتز و پلاژیوکلاز به واسطه کنش سیلیکا با آهک‌های کرتاسه شده است. در محل رنگان (33.2677°N,52.10467°E) گستره وسیع و بزرگی از لوکومتاسوماتیت‌ها به وجود آمده که در نقشه زمین‌شناسی اردستان، تحت عنوان ریوداسیت معرفی شده است (رادفر، ۱۳۷۸). گستردگی وسیع نهاده‌های تراورتن در منطقه در حقیقت حاصل آزاد شدن مقادیر بالای گاز $CO_2$ و تشکیل سیالات حاوی بی‌کربنات کلسیم بوده که توانسته به عنوان رسوبات چشمه‌ای گرمابی برجای گذاشته شود (سامانی، ۱۳۹۵). این ویژگی نه تنها در این منطقه، بلکه در امتداد خطواره تکتونوماگمایی زفره و ادامه شمال باختری (منطقه دلیجان-راونج با مختصات 34.15129°N,50.74769°E و جنوب‌خاوری (منطقه غرب ندوشن با مختصات 31.7558°N,53.3749°E)، نیز قابل مشاهده است. در این منطقه پدیده متاسوماتیسم سیلیسی نقش اصلی را در شکل دهی سامانه ژئوترمال تراورتن‌ساز، زایش کانسارهای آهن نوع متاسوماتیت و به وجود آوردن توده‌های لوکومتاسوماتیت دارد (سامانی، ۱۳۷۰، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۲).




شکل ۲: نقشه کناره منشأ مغناطیسی (Source edge) و تفاوت بارز بین شدت میدان مغناطیسی سامانه ولکانوپلوتونی پالئوژن (رنگ قرمز) و پوسته سیالی قاره‌ای (رنگ آبی-سبز). کمپلکس گرانیتوئیدی کرکس در منتهی‌الیه شمال باختری به رنگ سرخابی دیده می‌شود (با تغییرات از سامانی و همکاران، ۱۳۹۳).

## مواد و روش‌ها

منطقه میلاجرد در فاصله ۱۰۰ کیلومتری غرب شهرستان اردستان، به عنوان بخشی از ناحیه اکتشافی نایین-نطنز یکی از نواحی امید بخش معرفی شده در مدل‌سازی جامع فلززایی به روش GIS در پهنه نایین است. منطقه مورد مطالعه به کمربند چین‌خورده آلپی (مدیترانه‌ای) تعلق دارد و محدوده‌ای با ساختار ناهمگن در هم از نوع پهنه

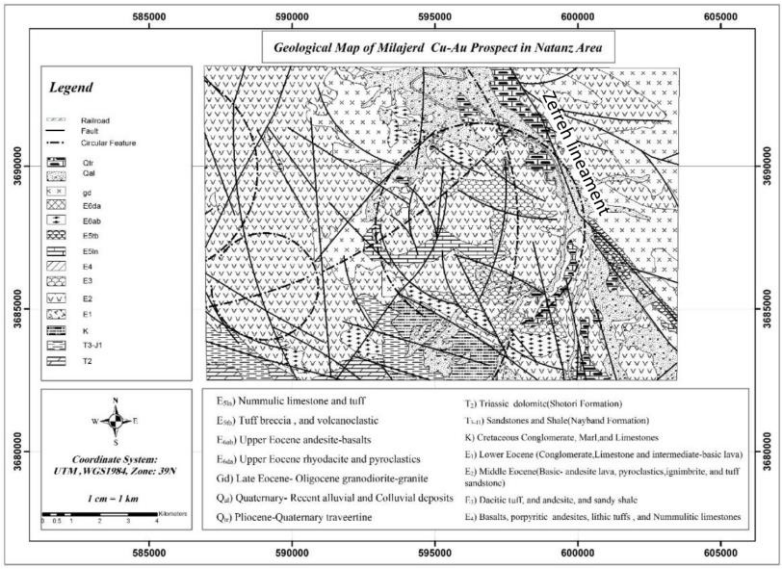
- چین در ایران مرکزی است که خود بخشی از کمربند آتش‌فشانی- نفوذی ایران مرکزی را می‌سازد. منطقه اکتشافی میلاجرد طی عملیات اکتشاف ناحیه‌ای به عنوان محدوده مستعد شناسایی شده و عملیات پی‌جویی و کنترل میدانی این محدوده به روش لیتوژئوشیمی در شبکه عمومی ۱۰۰۰*۱۰۰۰ مترمربع طراحی و به اجرا در آمده است. در این عملیات ۱۷۶ نمونه خرده سنگی (chips) به وزن حدود ۱۵۰۰ گرم برداشت و پس از آماده سازی در آزمایشگاه کانپژوه به روش ICP AES برای Au ,As ,Ag ,Ba ,Pb ,Zn ,Cu ,Mo ,Ni ,Co ,V ,Ti ,P ,Bi ,Cr ,Fe ,In ,La ,K ,Na ,Mg ,Mn ,S ,Sb ,Sc ,Sr ,Th ,U ,W ,Zr آنالیز شده است. رویکرد اصلی برای ارزیابی پتانسیل محدوده، تهیه اطلاعات ژئوشیمیایی و تعیین قابلیت و استعداد معدنی با استفاده از هاله‌های اولیه است که بازتاب آن در زون غنی‌شده و تهی‌شده مجاور آن تجلی می‌یابد. این زون‌ها به صورت سامانه واحدی بنام "سامانه ژئوشیمیایی دوقطبی" همجوار مطرح و مولد کانسار به حساب می‌آیند. این عملیات به عنوان یک روش مناسب برای مرحله تولید پروژه متفاوت از روش‌های سنتی پی‌جویی بوده و اطلاعات حاصل از آن از سطح اطمینان بالاتری نسبت به دیگر روش‌ها در مرحله پی‌جویی برخوردار است.

## نتایج

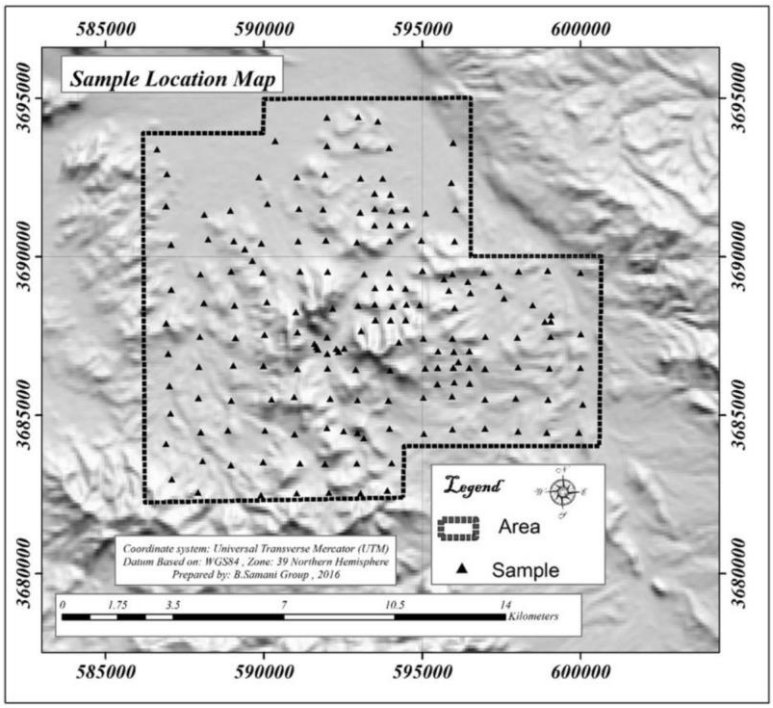
### زمین‌شناسی منطقه

زمین‌شناسی محدوده اکتشافی میلاجرد به صورت یک سامانه ولکانوپلوتونی فروافتاده بوده که با خطواره میلاجرد از سامانه ولکانوپلوتونیک کرکس جدا می‌شود. در این محدوده نهاده‌های آتشفشانی- رسوبی ائوسن به صورت واحدهای دارای لایه‌بندی و انباشته‌های گدازه تحت نفوذ ماگماتیسم گرانیتوئید قرار گرفته است (شکل ۳). نفوذ توده‌های گرانیتوئید باعث دگرگونی همبری (هورنفلسی‌شدن) در سنگ‌های پیرامون و پدیده‌های دگرسانی گرمابی با تشکیل کانی‌های رسی، پیروفیلیت، سیلیس همراه با پیریت‌زایی شده است (سامانی، ۱۳۷۰). این رخداد با زایش کانسنگ مس و دیگر فلزات همراه بوده که تفصیل آن در این پژوهش ارایه می‌شود. پدیده‌های گرمابی همراه با رخداد تکتونو-ماگماتیسم زفره می‌تواند شرایط مناسبی را برای زایش طلا نوع اپی‌ترمال (احتمالاً نوع کارلین) به وجود آورده باشد که آثاری از آن در منطقه یافت شده است (مهرابی و همکاران، ۱۳۹۳). زمین‌ساخت منطقه نتیجه دو چرخه ساختاری متفاوت، یکی تکتونو-ماگماتیسم پالئوژن و دیگری بازپویایی تکتونوماگمایی نئوژن است که رویکرد خطواره‌ای زفره مربوط به زمان نئوژن می‌باشد. این رویداد از نوع امتدادلغز با تشکیل کانون‌های فشاری و کششی در روند آنست که از بارزترین عوارض آن می‌توان کوهسار کرکس به عنوان کانون فشاری (Contraction) و باتلاق گاوخونی را نماد اختصاصی کششی (Extension)، برشمرد. این عارضه ساختاری از نوع راستگرد بوده و خود همراه با سامانه‌های گسلی انشعابی دوجانبه (Extensional duplex) بوده (Samani and et al, 2016)، که بخشی از آنها در نقشه شکل ۳ نشان داده شده است. سیالات گرمابی در روند این سامانه‌های گسسته منجر به بروز دگرسانی‌های گرمابی خطی همراه با کانی‌سازی شده است. محدوده میلاجرد که در دو ورقه اردستان و طرق و در جنوب بزرگراه نطنز-اصفهان جای دارد در واقع یک حوضه فرونشسته آتشفشانی (Vibrated Volcanic Basin) است که محل انباشت واحدهای سنگ چینه‌ای ائوسن به شمار می‌رود. این سامانه آتشفشانی با کنترل ساختاری شمال باختری و با کنگلومرای پی (واحد $E_1$) بر روی سازندهای تریاس

پسین-ژوراسیک زیرین جای گرفته است. در شمال و شمال باختری این محدوده، در شمال بزرگراه نطنز-نائین بستر پی‌سنگ از سازندهای مزوزوئیک ساخته شد (مهرابی و همکاران، ۱۳۹۳). اما سازندگان عمده‌ای از ائوسن در آن گسترش دارد. این بلوک تحت نفوذ توده‌های آذرین کرکس، کمرسیاه با سرشت دیوریت گرانیت، گرانودیوریت، دیوریت مونزونیت، گرانودیوریت، ریولیت و ریوداسیت قرار گرفته (Berberian and et al, 1982) و در واقع همتافت ماگمایی کرکس (Karkas Magmatic Complex) را می‌سازد که توانسته موجب خیزش و بالا آمدگی منطقه شده و سازندهای پالئوزوئیک نیز رخنمون پیدا کنند. در سمت خاور خطواره زفره ارتفاعات میلاجرد جای دارد که در واقع بلندی‌های بین رودخانه گل آباد در جنوب باختری و دشت اردستان را در شمال خاوری می‌سازد. در نقشه زمین‌شناسی دو سامانه از ساختار حلقوی که معلول پدیده باز پویایی تکتونوماگمایی در محدوده است دیده می‌شود (شکل ۳). ساختارهای حلقوی (O'Driscoll and Campble, 1997)، معلول آزاد شدن انرژی از کانون‌های مختلف است که مجرای مناسبی برای شکل‌گیری توده‌های نفوذی (نظیر باتولیت، استوک، دایک‌های مخروطی و تنوره‌های انفجاری)، ایجاد می‌کند. دگرشکلی ناشی از جایگیری این توده‌ها موجب تشکیل گسل‌های متحدالمرکز و بیضوی شکل (Oval shape) در سطح زمین شده که این سازوکار گسلی نقش کلیدی در شکل دهی سامانه گرمابی کانه‌ساز دارند. در سمت باختر گسل زفره در منطقه فسخود-ملک آباد، بخشی از پوسته قاره‌ای (Continental Crust) گندوانایی رخنمون دارد که سری منظمی از سازندهای پالئوزوئیک، سازند شتری ($TR_2$)، رسوبات زغال‌دار تریاس پسین-ژوراسیک ($TR_3$-$J_1$) زیرین با لایه‌هایی از زغالسنگ و سری منظمی از واحدهای عموماً آهکی کرتاسه (K) رخنمون دارد (Samani and et al, 2016). واحدهای سنگ-چینه‌ای ائوسن در این محدوده شامل ۶ سری اصلی بوده که خلاصه لیتولوژی آنها در نقشه زمین‌شناسی شکل ۳ نشان داده شده است.




شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی منطقه اکتشافی میلاجرد (با تغییرات از سامانی و همکاران، ۱۳۹۳).




شکل ۴: موقعیت نمونه‌های برداشت شده از منطقه اکتشافی میلاجرد

## تجزیه نمونه‌ها و تحلیل آماری

به منظور تعیین سامانه‌های دو قطبی ژئوشیمیایی و استفاده از آنها در تعیین محل کانی‌سازی برای این محدوده در شبکه عمومی ۱۰۰۰* ۱۰۰۰ متر، در مجموع تعداد ۱۷۶ نمونه سنگی برداشت شد. موقعیت برداشت این نمونه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. این نمونه‌ها توسط روش‌های تجزیه دستگاهی ICP-OES برای عناصر اصلی و فرعی و روش آذر محک (Fire Assay) برای اندازه‌گیری مقدار طلا تجزیه شدند. حد تشخیص دستگاه برای عناصر مختلف بین ۰/۱ تا ۰/۰۱ درصد می‌باشد. تجزیه‌ها در شرکت زرآزما انجام شده است. مؤلفه‌های آماری این داده‌ها و ترسیم نقشه‌های ژئوشیمیایی به ترتیب با استفاده از نرم افزارهای تخصصی SPSS و Geosoft انجام شده و نتایج آن در جدول ۱ ارایه شده است. برای تعیین قانون توزیع عناصر از دو مولفه چولگی (Skewness) و فراز منحنی (Kurtosis) استفاده می‌شود. برای توزیع نرمال مقدار چولگی برابر صفر و مقدار کورتوسیس کمتر از ۳ می‌باشد (Beus and Grigorian, 1975). عناصر Au, Ag, As, Ba, Bi, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, S ,Sb Zn, بر اساس مقادیر کورتیسس و چولگی دارای توزیع لاگ نرمال بوده و باقی عناصر نظیر Zr, Ti, V Al, Be, Ca, Ce, Co, Ga, K, La, Li, Na, P, Sn, Sr, دارای توزیع نرمال هستند. این تفاوت در نوع توزیع در ضریب تغییر (Coefficient Variation) نیز بازتاب یافته و نشان از غنی‌شدگی یا کانی‌سازی عناصر می‌دهد که اولاً دارای توزیع نرمال بوده و ثانیاً از ضریب تغییر بالایی برخوردار هستند. بدین ترتیب عناصری مانند As, Au, Cu, Fe, Mo, Pb, Zn, Sb, Ba در منطقه علاوه بر غنی‌شدگی نسبی می‌توانند کانی‌سازی بالقوه‌ای را شکل داده باشند. در آنالیز فاکتوری نتایج درخور توجهی به دست آمده است، که هم آیندی عنصری هر فاکتور در جدول ۲ ارایه شده است. مطابق این جدول، عناصر اصلی هم آیند در اول ردیف و عناصر با درجه هم آیندی پایین در دو رده به

ترتیب درون پرانتز ارائه شده است (جدول ۲). عناصر گرد آمده در فاکتور اول همگان بازتاب تغییر در لیتولوژی سنگ بستر و دگرسانی‌های روی داده بر آن است که با هم آیندی عناصر Zr، V، Ti، Na، Mg، Fe و Al تجلی می‌یابد. در این رابطه عناصر Sr، Sn، Ni، Mo، Mn، Li و Be نوعی هم آیندی درجه ۲ با یکدیگر دارند که بازتاب محیط گرانیتوئید نفوذی در سری ولکانوژنیک ائوسن است. عناصر هم آیند در فاکتور دوم اغلب از گونه عناصری با غنی‌شدگی کم تا متوسط هستند و عموماً شامل عناصر لیتوفیل می‌باشد که مرتبط با دخالت پوسته سیالی (Crust) بوده و دربردارنده عناصر Cd، Ga، Ce، K، La، Sn و Be است. عناصر رده دوم در هم آیندی شامل Zr، Y، P و Na می‌باشد که می‌تواند معلول فرآیندهای متاسوماتیک و جابجایی در قالب کمپلکس‌های P-Na همراه با Y و Zr باشد. در فاکتور دوم عناصر Sb و Ti هم آیندی رده ۳ داشته و می‌تواند با بازپویایی تکتونوماگمایی نئوژن-کواترنر و دخالت ماگمای زیر پوسته (Sub-Crust) توجیه شود. در فاکتور سوم عناصر Au، Ag، Bi، Ba، Mo، S و Zn هم گروه شده‌اند که توانسته‌اند کانی‌سازی و غنی‌شدگی در زون‌های تکتونوگرمابی را موجب شده و در روندهای خطی مشخصی منجربه کانی‌سازی شوند. در فاکتور چهارم عناصر Ni، Cr و Li اصلی‌ترین عناصر را شامل می‌شوند که منشاء و وابستگی به سری فوق بازیک را نشان می‌دهند. در فاکتور پنجم عناصر V، Ti، Mg، Cu، Sn، Pb، Li و Au با ضرایب غنی‌شدگی پایین‌تر جای دارند. این فاکتور نمی‌تواند نمایندگی عناصر کانی‌ساز اصلی باشد و بلکه محصول آغشتگی‌ها، جابجایی‌ها و تفاوت در تغییر لیتولوژی و اختلاف در درجات دگرسانی به حساب آید. در فاکتور ششم دو عنصر Sr و As اصلی‌ترین عنصر بوده و به سامانه‌های ژئوترمال نئوژن-کواترنر که مولد تراورتن‌های منطقه است، می‌تواند منسوب شود. مجموعه عناصر S، Cr، Ca، V، Ni و Be نیز نوعی بهم ریختگی و اثرگذاری ناشی از جریان سیالات در میدان ژئوترمال محسوب می‌شوند و به عنوان عناصر کانه‌ساز در این فاکتور محسوب نمی‌شوند. در فاکتور هفتم دو عنصر Ca و Sb و مجموعه عناصر Zn، Pb، La، Ce و As نیز با تعلق به پدیده تکتونوگرمابی مرتبط با سامانه ژئوترمال منطقه نطنز توجیه می‌شود که فرآیندهای آن زایش تراورتن در گستره وسیعی می‌باشد. در فاکتور هشتم دو عنصر Cu و Mn با هم آیندی رده دوم Ga، Co و Cd و رده سوم K، Fe و Ca دیده می‌شود که به عنوان فاکتور دارای توانمندی کانی‌سازی مس است. وجود عناصر Fe و K در این فاکتور می‌تواند با بروز دگرسانی‌های سریسیتی برای K و پیریت‌زایی برای Fe توجیه شود. در فاکتور نهم عنصر Pb با رده دوم Bi و رده سوم Sr، Cu، Cd و As احتمالا در ارتباط با کانی‌سازی‌های گرمابی سرب بوده که خود می‌تواند ریشه در سری تریاس-ژوراسیک سازند نای‌بند داشته باشد که بستر این محدوده را تشکیل می‌دهد. این سری به واسطه نفوذ سیالات و ماگمای پالئوژن دستخوش کنش‌های ژئوشیمیایی شده که طی آن عناصر مذکور از بستر رها و به ترازهای بالاتر انتقال یافته‌اند. براساس نمودار خوشه‌ای تهیه شده به روش پیرسون با نرم افزار SPSS خوشه‌های ذکر شده قابل تفکیک و تفسیر است (شکل ۵ و جدول ۳). مقایسه نتایج غنی‌شدگی‌های دوقطبی و آنالیز فاکتوری نشان می‌دهد که غنی‌شدگی موضعی عناصر گروه آهن (عناصر Ti، Fe و V) همگام با غنی‌شدگی مجموعه عناصر Au، Ag، Ba، S، As، Sb، Pb و Cu همراه بوده و با مدل دوقطبی همخوانی دارد.

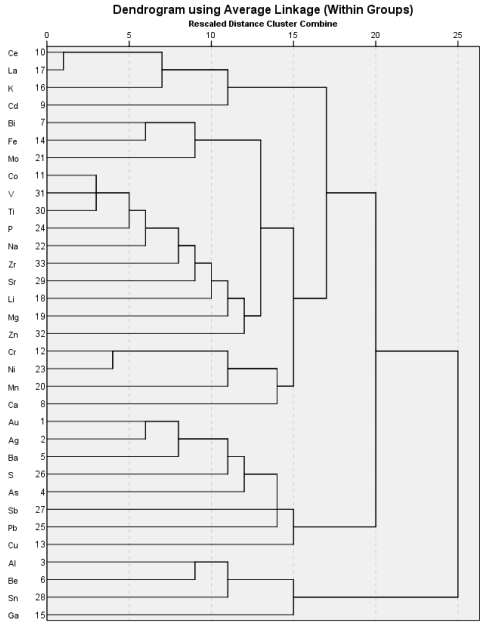
جدول ۱: پارامترهای آماری محاسبه شده بر روی نمونه‌های لیتوژئوشیمی برداشت شده (شاخص لاگ نرمال به رنگ زرد است).

| c | بیشینه | کمینه | میانگین | مد | انحراف معیار | چولگی | کشیدگی | ضریب تغییرات | C | K | KC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fe (wt%) | ۳۰/۶ | ۰/۵ | ۴/۹ | ۴/۶ | ۳/۳ | ۳/۵ | ۲۴/۵ | ۶۶/۸ | ۱/۴۹ | ۰/۴۵ | ۰/۶۸ |
| Au (ppb) | ۲۶۹ | ۳/۸ | ۱۰/۳ | ۳/۸ | ۳۱/۴ | ۶/۹ | ۵۲/۷ | ۳۰۳/۶ | ۷/۲۱ | ۰/۰۹ | ۰/۶۶ |
| Ag (ppm) | ۲۷/۵ | ۰/۷ | ۱/۲ | ۰/۸ | ۲/۳ | ۹/۴ | ۱۰۰/۲ | ۲۰۰/۸ | ۳/۶۱ | ۰/۱۱ | ۰/۴۱ |
| As (ppm) | ۱۵۲۲/۸ | ۳/۵ | ۳۴ | ۱۲/۱ | ۱۲۲/۲ | ۱۰/۷ | ۱۲۷/۶ | ۳۵۹/۷ | ۴/۴۹ | ۰/۱۵ | ۰/۶۹ |
| Ba (ppm) | .۹۳۷۵ | ۳۸/۱ | ۸۴۴/۲ | ۴۵۷/۵ | ۱۳۱۶ | ۴/۱ | ۲۰ | ۱۵۵/۹ | ۲/۷۷ | ۰/۲۴ | ۰/۶۶ |
| Bi (ppm) | ۳۴/۲ | ۰/۸ | ۴ | ۳/۵ | ۳/۱ | ۶/۸ | ۵۸/۲ | ۷۶/۳ | ۲/۴۸ | ۰/۱۰ | ۰/۲۴ |
| Cd (ppm) | ۱۷/۸ | ۰/۸ | ۱/۷ | ۰/۸ | ۱/۷ | ۵/۲ | ۴۲/۶ | ۱۰۳/۳ | ۱/۹۵ | ۰/۳۴ | ۰/۶۶ |
| Ce (ppm) | ۹۲/۸ | ۰/۸ | ۲۸/۵ | ۲۵/۹ | ۱۶/۹ | ۰/۸ | ۰/۸ | ۵۹/۵ | ۱/۵۶ | ۰/۴۳ | ۰/۶۶ |
| Co (ppm) | ۶۲/۶ | ۰/۹ | ۱۹/۲ | ۱۶ | ۱۲/۴ | ۰/۵ | -۰/۳ | ۶۴/۵ | ۱/۶۰ | ۰/۴۶ | ۰/۷۴ |
| Cr (ppm) | ۱۷۸/۶ | ۰/۶ | ۱۶/۹ | ۱۰/۶ | ۲۱/۴ | ۳/۸ | ۲۰/۸ | ۱۲۶/۷ | ۲/۲۶ | ۰/۳ | ۰/۶۸ |
| Cu (ppm) | ۴۸۹۸/۶ | ۰/۴ | ۹۲/۸ | ۲۴ | ۴۱۹/۵ | ۹/۶ | ۱۰۳/۱ | ۲۴۵۲ | ۶/۲۷ | ۰/۱۲ | ۰/۷۵ |
| Ga (ppm) | ۳۹/۸ | ۴/۶ | ۱۹/۸ | ۱۹/۷ | ۷/۷ | ۰/۱ | -۰/۷ | ۳۸/۹ | ۱/۳۳ | ۰/۴۸ | ۰/۶۴ |
| K (ppm) | ۶/۷ | ۰ | ۱/۶ | ۱/۱ | ۱/۵ | ۱/۳ | ۱/۲ | ۹۰/۶ | ۱/۹۸ | ۰/۳۶ | ۰/۷۲ |
| La (ppm) | ۴۴/۱ | ۰/۶ | ۱۵ | ۱۳/۱ | ۸/۷ | ۰/۸ | ۰/۳ | ۵۷/۸ | ۱/۵۸ | ۰/۴۴ | ۰/۶۸ |
| Li (ppm) | ۵۱/۱ | ۰/۸ | ۱۹/۷ | ۱۸/۹ | ۱۱/۸ | ۰/۷ | ۰ | ۶۰ | ۱/۳۵ | ۰/۶۲ | ۰/۸۴ |
| Mg (ppm) | ۹ | ۰/۱ | ۱/۳ | ۱/۲ | ۱/۲ | ۳/۱ | ۱۸ | ۸۸/۵ | ۱/۶۹ | ۰/۴۴ | ۰/۷۵ |
| Mn (ppm) | ۱۰۶۵۸/۶ | ۳۷/۳ | ۱۰۵۲/۶ | ۹۵۵/۱ | ۹۷۶/۳ | ۶ | ۵۴/۵ | ۹۲/۸ | ۱/۶۰ | ۰/۴ | ۰/۶۵ |
| Mo (ppm) | ۴۲/۳ | ۰/۶ | ۳/۸ | ۲/۹ | ۴/۵ | ۵/۴ | ۳۸ | ۱۱۸/۹ | ۱/۸۹ | ۰/۳۶ | ۰/۶۶ |
| Na (ppm) | ۵/۱ | ۰ | ۲/۱ | ۲/۳ | ۱/۳ | ۰ | -۰/۹ | ۶۰/۵ | ۱/۴۸ | ۰/۵۲ | ۰/۷۸ |
| Ni (ppm) | ۸۱/۵ | ۱/۴ | ۱۰/۲ | ۷/۶ | ۸/۷ | ۴/۲ | ۲۷/۴ | ۸۵/۵ | ۱/۷۲ | ۰/۳۷ | ۰/۶۳ |
| Pb (ppm) | ۴۱۳۴/۵ | ۱/۵ | ۸۹ | ۱۳/۴ | ۵۶۲/۹ | ۱۱/۵ | ۱۴۲/۵ | ۶۳۲/۵ | ۱۲/۱ | ۰/۰۷ | ۰/۸۲ |
| S (ppm) | ۲/۸ | ۰ | ۰/۱ | ۰ | ۰/۲ | ۸/۱ | ۸۰/۷ | ۲۹۸/۵ | ۵/۰۷ | ۰/۱۵ | ۰/۷۸ |
| Sb (ppm) | ۷۷۱/۱ | ۳/۵ | ۱۳/۲ | ۳/۵ | ۶۰/۶ | ۱۱/۵ | ۱۴۲ | ۴۵۹ | ۶/۵۳ | ۰/۱ | ۰/۶۷ |
| Sn (ppm) | ۲۹/۶ | ۶/۷ | ۱۳/۳ | ۱۳ | ۴/۶ | ۰/۵ | -۰/۲ | ۳۴/۸ | ۱/۲۹ | ۰/۴۹ | ۰/۶۳ |
| Sr (ppm) | ۱۴۳۶/۱ | ۴۰ | ۳۷۰/۱ | ۳۵۴/۷ | ۲۲۵/۱ | ۱/۳ | ۳/۴ | ۶۰/۸ | ۱/۴۹ | ۰/۴۷ | ۰/۶۹ |
| Ti (ppm) | ۰/۸ | ۰ | ۰/۳ | ۰/۳ | ۰/۲ | ۰ | -۱/۱ | ۵۷/۸ | ۱/۴۹ | ۰/۴۹ | ۰/۷۴ |
| V (ppm) | ۴۵۸/۳ | ۶/۶ | ۱۴۶/۲ | ۱۲۹/۲ | ۱۰۳/۴ | ۰/۵ | -۰/۷ | ۷۰/۷ | ۱/۶۵ | ۰/۴۷ | ۰/۷۸ |
| Zn (ppm) | ۴۵۳/۹ | ۳/۱ | ۷۴/۸ | ۶۵/۸ | ۶۳/۹ | ۳/۶ | ۱۸/۸ | ۸۵/۵ | ۱/۴۸ | ۰/۵۳ | ۰/۷۸ |

توضیحات: C) میانگین مقادیر بالاتر از میانگین کل، K) نسبت تعداد نمونه‌ها بالاتر از میانگین به کل نمونه‌ها، KC) ضریب تولید (C*K).

جدول ۲: هم آیندهای تجزیه و تحلیل فاکتوری بر روی نمونه‌های لیتوژئوشیمی منطقه اکتشافی میلاجرد

| فاکتور | گروه‌های عنصری |
|---|---|
| F۱ | Al, Co, Fe, Mg, Na, P, Ti, V, Y, Zr (Be, Li, Mo, Ni, Sn, Sr) (Cr, Mn) |
| F۲ | Be, Cd, Ce, Ga, K, La, Sn (Na, Al, Ba, P, Y, Zr) (Sb, Ti) |
| F۳ | Au, Ag, Bi, Ba, Mo, S, Zn (Fe, K) |
| F۴ | Cr, Li, Ni (Au, Sb) (Ga, La, Ag, P, Zn) |
| F۵ | Cu, Mg, Ti, V (Au, Li, Pb, Na, Sn) |
| F۶ | As, Sr (Ca, Ag, Cr, S) (Be, Ni, V) |
| F۷ | Ca, Sb (As, Ce, La, Pb, Zn, Mn) (Y, Zr) |
| F۸ | Cu, Mn (Cd, Co, Ga) (Ca, Fe, K) |
| F۹ | Pb (Bi) (As, Cd, Cu, Cr, Sr) |




شکل ۵: نمودار خوشه‌ای از ارتباط و وضعیت عناصر مورد تجزیه در منطقه اکتشافی میلاجرد

جدول ۳: هم آیندی عناصر براساس نمودار عناصر مورد تجزیه منطقه اکتشافی میلاجرد

| خوشه | عناصر هم آیند | تفسیر علت هم آیندی |
|---|---|---|
| I | Ce, La, K, Cd | معرف توده‌های گرانیتوئید پتاسیک |
| II | Bi, Fe, Mo | کانی‌سازی احتمالاً پورفیری با غنی‌شدگی آهن و بیسموت |
| III | Co, V, Ti, P, Na, Zr, Sr, Li, Mg, Zn | بازتاب لیتولوژی و دگرسانی پروپیلیتیک |
| IV | Cr, Ni, Mn, Ca | آغشتگی حاصل از ژئوترمال تراورتن ساز |
| V | Au, Ag, Ba, S, As, Sb, Pb, Cu | کانی‌سازی سولفوره پلی‌متال مس، سرب با عناصر ردیاب و همراه |
| VI | Al, Be, Sn, Ga | تغییرات لیتولوژی و ماگماتیسم فلسیک |

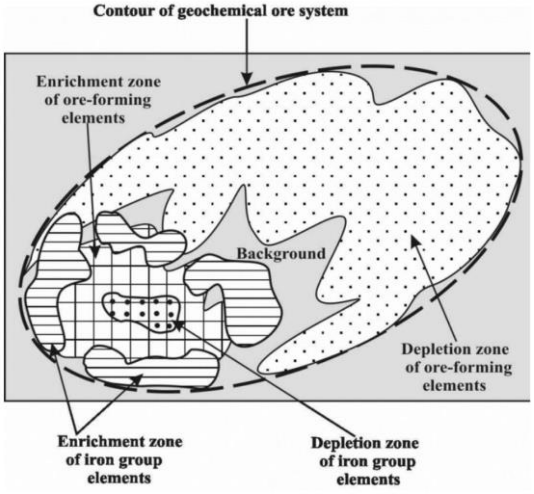
**سامانه ژئوشیمیایی دوقطبی (پلاریزه) و پتانسیل کانه‌زایی**

در اکتشاف ژئوشیمیایی ۵ معیار اصلی مطرح است که عبارتند از ۱) بزرگی مقادیر و مقدار زمینه، ۲) اندازه و شکل ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی، ۳) جایگاه زمین‌شناسی، ۴) گستره مکانی که محیط محل می‌تواند در فلز محتوا و شکل ناهنجاری دخالت کرده باشد و ۵) منطقه‌بندی عناصر در ناهنجاری. همواره عدم اطمینان‌هایی در شناخت محدوده‌های مستعد براساس ویژگی‌های ژئوشیمیایی و معیارهای مذکور وجود دارد. به عنوان نمونه در بعضی مکان‌ها ناهنجاری کوچک و ضعیف می‌تواند به مراتب مناسب‌تر از ناهنجاری‌های بزرگتر باشد زیرا ناهنجاری‌های بزرگ می‌تواند بازتاب زون‌های با ویژگی انتشاری (disseminated) از کانی‌سازی‌هایی باشد که غنای پایین دارند. مثال‌های مشخصی از ناهنجاری‌های کاذب با شدت بالا وجود دارد که در آنها کانی‌سازی رخ نداده است (Levinson, 1974; Robertson and Taylor, 1987). یکی از مؤلفه‌هایی که تاکنون در اکتشاف ژئوشیمیایی نادیده گرفته شده وجود زون تهی‌شدگی (depletion) در ناحیه معدنی است که به عنوان جفت یا دوقلو با زون‌های غنی‌شده (enrichment) ظاهر می‌شود (Goldberg and et al, 2007; Kejian and et al,

1992). چنین الگوی جفتی می‌تواند سیستم‌های ژئوشیمیایی مشخصی را بسازد (Goldberg and et al, 1997; Goldberg and et al, 2003). در داده‌های ژئوشیمیایی زون‌های تخلیه و غنی‌شده آشکار می‌گردد (Goldberg and et al, 2007). این دو زون از دیدگاه مکانی در پیوند با یکدیگرند و به صورت سامانه ژئوشیمیایی واحد می‌توانند دیده شوند (سامانی و همکاران، ۱۳۹۴). منطقه‌بندی قطبی به صورت دو منطقه جدا درون یک سامانه براساس میزان یک عنصر یا گروهی از عناصر معین می‌شود.

**منطقه‌بندی قطبی (Polar Zoning)**

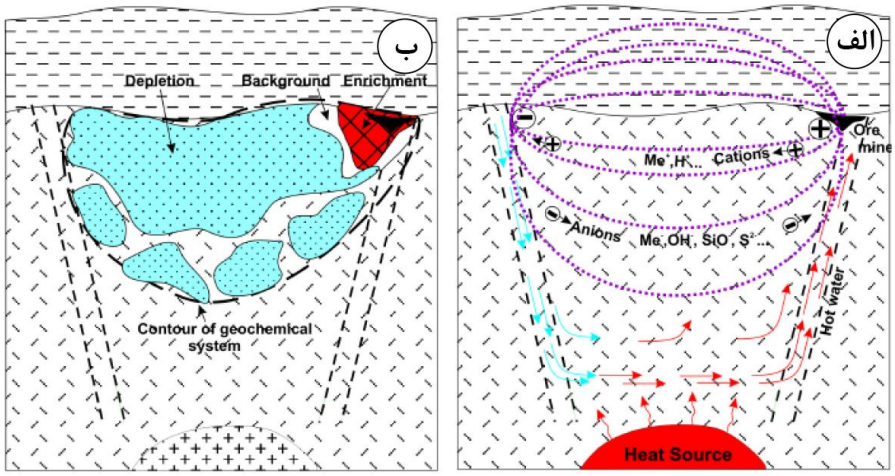
طبق شواهد ژئوشیمی و تجزیه‌های عنصری انجام شده، در منطقه مورد مطالعه یک زون غنی‌شده و یک زون تخلیه از عناصر کانسارساز وجود دارد که در زون تخلیه، مقدار افت بیش از ۴۰ درصد بوده و زون غنی‌شده یا کانون تجمع معمولاً در بخش بیرونی سیستم جای می‌گیرد. اندازه زون غنی‌شده به گونه‌ای قانونمند برابر درصدی از زون تخلیه آن عناصر در جوار یکدیگر است. زون بیرونی کانون غنی‌شدگی به صورت یک قانون همواره با تمرکز عناصر گروه آهن (از قبیل Fe، Sc، Ti، Cr و یا Cu) همراه است اما درون کانون معمولاً عناصر گروه آهن کاستی نشان می‌دهند (شکل ۶). اگر کانی‌سازی با یک عنصر از گروه آهن باشد در آن صورت زون بیرونی با دیگر عناصر گروه آهن غنی‌شدگی نشان می‌دهد. این گونه از الگوهای ژئوشیمیایی به عنوان سامانه‌های ژئوشیمیایی قطبی (Polar Geochemical Systems) معرفی می‌شوند. ابعاد سامانه ژئوشیمیایی قطبی با یک کانسار می‌تواند بین چند تا چندصد کیلومترمربع باشد. سامانه‌های ژئوشیمیایی قطبی کانسارهای بزرگ (Giant) می‌تواند چندصد تا چند هزار کیلومترمربع وسعت داشته باشد. رابطه مناسبی بین ابعاد زون تخلیه عناصر کانه‌ساز و محتوای فلز در زون غنی‌شده وجود دارد. برای شناخت چنین پدیده‌ای حد اندازه‌گیری عناصر می‌باید کمتر از میانگین مقدار آن عنصر در منطقه تحت بررسی باشد. تفسیر و تحلیل آماری برای تعیین غنی‌شدگی و تهی‌شدگی می‌باید صورت گیرد. سامانه‌های ژئوشیمیایی دارای زون‌های تخلیه و تمرکز عموماً سیمای دوقطبی دارند که حاصل فرآیند میدان الکتریکی طبیعی یا مدل الکتروژئوشیمیایی (Electro-geochemical) هستند (Goldberg and et al, 1997).




شکل ۶: سامانه ژئوشیمیایی دو قطبی با زون‌های تخلیه‌شده، غنی‌شده و زمینه

**مبانی قطبی بودن سامانه‌های ژئوشیمیایی**

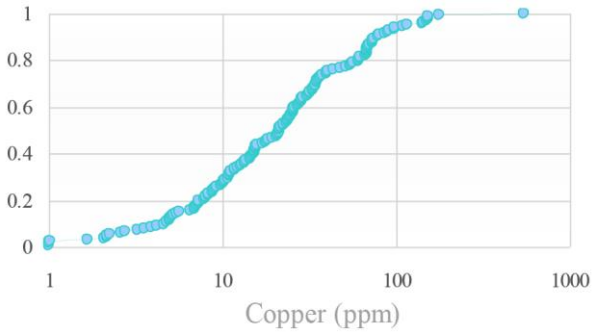
تمام واکنش‌های شیمیایی، اساساً ماهیت الکتریکی داشته زیرا الکترون‌ها در تمام انواع پیوندهای شیمیایی (به راه‌های گوناگون) دخالت دارند. اما الکتروشیمی بیش از هر چیز، بررسی پدیده‌های اکسیداسیون-احیا می‌باشد که در آن روابط بین تغییر شیمیایی و انرژی الکتریکی، هم از جنبه نظری و هم از لحاظ عملیاتی حائز اهمیت است (Viladimir, 1993). مطالعه فرآیندهایی الکتروشیمیایی منجر به فهم پدیده‌های اکسیداسیون- احیا می‌شود. رسانایی فلزی درجریان الکتریکی، در واقع جاری شدن بار الکتریکی است. در فلزات، این بار به وسیله الکترون‌ها حمل می‌شود و این نوع رسانایی الکتریکی، رسانایی فلزی نامیده می‌شود. تشبیه جریان الکتریسیته به جریان یک مایع، از قدیم متداول بوده است. در زمان‌های گذشته، الکتریسیته به‌صورت جریانی از سیال الکتریکی توصیف می‌شد. مدارهای الکتریکی با حرکت الکترون‌ها توجیه می‌شود. اما باید به خاطر داشت که جریان الکتریکی بنا به قرارداد به طور اختیاری مثبت و به صورتی که در جهت مخالف جاری می‌شود، توصیف می‌شود. رسانایی الکترولیتی، هنگامی برقرار است که یون‌های الکترولیت بتوانند آزادانه حرکت کنند، چون در این مورد یون‌ها هستند که بار الکتریکی را حمل می‌کنند. به همین دلیل است که رسانایی الکترولیتی، اساساً توسط نمک‌های مذاب و محلول‌های آبی الکترولیت‌ها صورت می‌گیرد. علاوه بر این، برای تداوم جریان در یک رسانای الکترولیتی لازم است که حرکت یون‌ها با تغییر شیمیایی همراه باشد. منبع جریان در یک سلول الکترولیتی، الکترون‌ها را به الکترود سمت چپ (شکل ۷ الف) می‌راند. بنابراین می‌توان گفت که این الکترود، بار منفی پیدا می‌کنند. این الکترون‌ها از الکترود مثبت سمت راست کشیده می‌شوند. در میدان الکتریکی که این‌گونه به وجود می‌آید، یون‌های مثبت یا کاتیون‌ها به طرف قطب منفی یا کاتد و یون‌های منفی یا آنیون‌ها به طرف قطب مثبت یا آند جذب می‌شوند (شکل ۷ ب). در رسانش الکترولیتی، بار الکتریکی به وسیله کاتیون‌ها به طرف کاتد و به وسیله آنیون‌ها که در جهت عکس به طرف آند حرکت می‌کنند، حمل می‌شود. برای این که یک مدار کامل حاصل شود، حرکت یون‌ها باید با واکنش‌های الکترودی همراه باشد. در کاتد، اجزای شیمیایی معینی (که لازم نیست حتما حامل بار باشند) باید الکترون‌ها را بپذیرند و احیا شوند و در آند، الکترون‌ها باید از اجزای شیمیایی معینی جدا شده، و اجزا اکسیده شونده با خروج الکترون‌ها از منبع جریان خارج شده و به طرف کاتد رانده می‌شوند. عوامل موثر بر جریان الکترولیتی به تحرک یون‌ها مربوط می‌شود و هر چه این یون‌ها را از حرکت باز دارد، موجب ایجاد مقاومت در برابر جریان می‌شود. عواملی که بر رسانش الکترولیتی محلول‌های الکترولیت اثر دارند، عبارتند از جاذبه بین یونی، سیال میزبان یون‌ها و گرانروی سیال. انرژی جنبشی متوسط یون‌های ماده حل شده با افزایش دما زیاد می‌شود و بنابراین مقاومت رساناهای الکترولیتی، به طور کلی با افزایش دما کاهش می‌یابد، یعنی دارای رسانایی زیاد می‌شوند. به‌علاوه، اثر هر یک از سه عامل مذکور با زیاد شدن دما کم می‌شود. در الکترولیز محلول‌های آبی، آب به جای یون‌های حاصل از ماده حل شده در واکنش‌های الکترودی دخالت می‌کند. از این رو، یون‌های حامل جریان لزوماً بار خود را در الکترودها خالی نمی‌کنند. نمودار کلی از شکل‌گیری سامانه پلاریزه و مهاجرت عناصر و تمرکز فلزات نمایش داده شده است (شکل ۷).




شکل ۷: تصویر شماتیک از سازوکار سامانه‌های دوقطبی و مهاجرت یونها در آن (Goldberg and et al, 2007)

**تهیه نقشه‌های موضوعی و تفسیر**

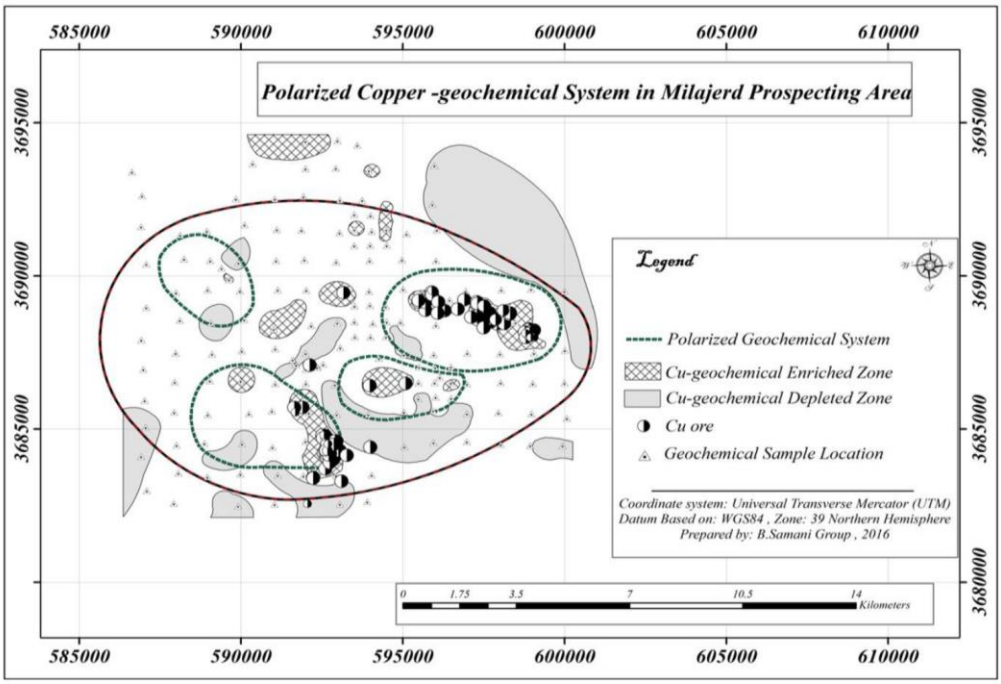
با استفاده از نمودار شکل ۸ حدود غنی‌شدگی، تهی‌شدگی و مرز زمینه معین شده است. بر این اساس، مقدار مس زمینه ppm 21-110 بوده و بیش از 110ppm به عنوان غنی‌شدگی و کمتر از 21ppm به عنوان تهی‌شدگی منظور می‌شود. میانگین زمینه برابر ppm 40 تعیین شده که در انطباق با میانگین مس در سنگ‌های آتشفشانی متوسط و توده‌های گرانیتوئید رقم قابل قبولی است. مقدار مس زمینه بر مبنای محتوای مس در سنگ‌های منطقه میلاجرد انتخاب شده که به طور تجربی توسط Samani and et al, (2016)، به دست آمده است.




شکل ۸: نمودار تجمعی فراوانی مس بر روی برگه احتمال

طبق مطالعات Govert (1983) و Beus (1975) and Grigorianمیانگین مقدار مس در سنگ‌های آندزیت ppm ۳۵، گرانیت ppm ۲۰ و گرانودیوریت ppm ۲۶ بوده که قابل مقایسه با میانگین زمینه در محدوده مورد مطالعه است.

براساس ارقام فوق زون‌های تهی‌شده و غنی‌شده معین و سامانه‌های دو قطبی ژئوشیمیایی ترسیم شده است (شکل ۹). برای سامانه‌های ترسیم شده تناژ مس تهی‌شده و مقدار مس غنی‌شده محاسبه شده است (جدول ۴).




شکل ۹: نقشه سامانه‌های دوقطبی مس در منطقه اکتشافی میلاجرد (موقعیت نمونه‌ها منطبق با شکل ۴).

جدول ۴: میزان مس تهی‌شده و انباشته شده

| مساحت تهی‌شدگی (متر مربع) | عمق تهی‌شدگی (متر) | عیار تهی‌شدگی (ppm) | تناژ تهی‌شده (تن) |
|---|---|---|---|
| ۵۲/۵۲۷/۷۴۰ | ۵۰۰ | ۳۰ | ۱/۹۶۹/۸۰۰ |
| مساحت زون غنی‌شده | عمق غنی‌شدگی | عیار غنی‌شده | تناژ غنی‌شده |
| ۹/۱۷۱/۴۳۷ | ۵۰۰ | ۱۸۰ | ۲/۰۶۳/۵۰۰ |

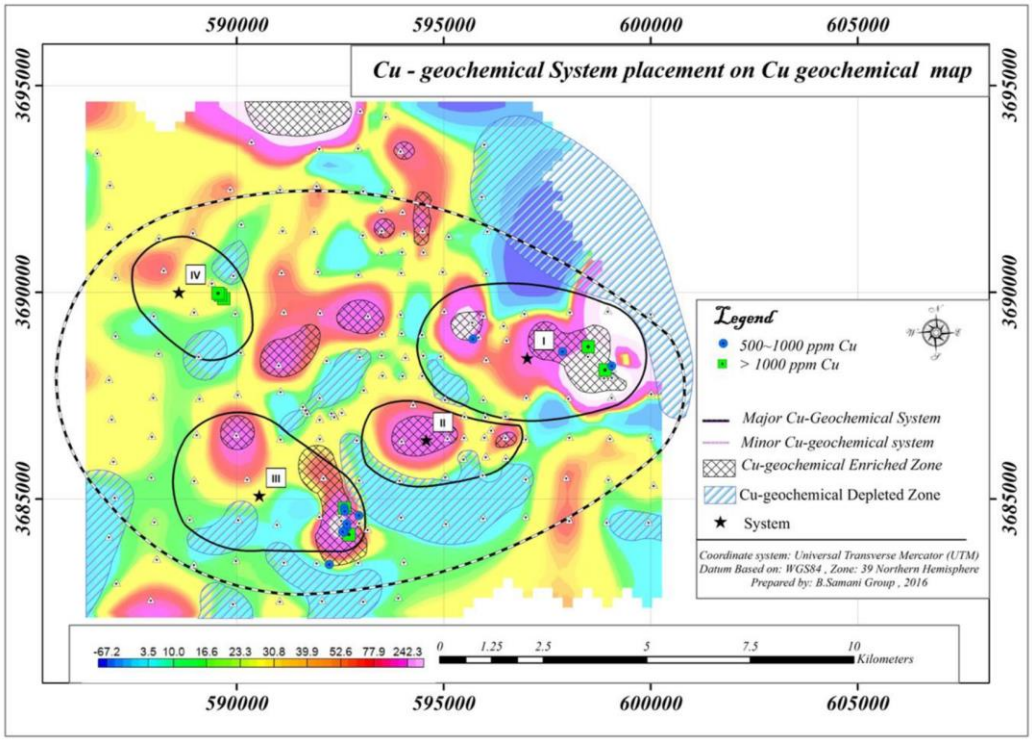
این ارقام موید قرابت و همانندی بین تهی‌شدگی و غنی‌شدگی است. کنترل میدانی زون‌های غنی‌شده و تهی‌شده شواهد مسلمی را از وجود کانی‌سازی در زون‌های غنی‌شده و عدم کانی‌سازی علیرغم وجود دگرسانی در زون‌های تهی‌شده نشان داده است. نمونه برداشت شده از زون‌های کانی‌سازی عیار در خور توجهی را نشان می‌دهد. نمونه‌های کنترلی بر حسب عیار مس رده‌بندی شده و مکان و کمیت آنها در شکل مذکور نشان داده شده است. شواهد مذکور قابلیت کاربردی سامانه‌های ژئوشیمیایی دو قطبی را حتی در شبکه باز نمونه‌برداری برای ارزیابی محدوده‌ها در مرحله پی‌جویی تایید نماید. با انطباق مکان سامانه‌های دو قطبی مس روی نقشه ژئوشیمی آن (شکل ۱۰) ملاحظه می‌شود که از ۱۶ بی‌هنجاری مس آشکار شده در محدوده، ۸ مورد به صورت مشخص در سامانه‌های دو قطبی بوده و بقیه به‌واسطه محدود بودن شبکه هنوز نتوانسته در قالب سامانه نمایان شوند. مقایسه چهار سامانه مذکور نشان می‌دهد که دو سامانه خاوری دارای قطب غنی‌شدگی در شرق و سامانه باختری دارای قطب غنی‌شده در باختر بوده، اما سامانه جنوبی ترکیب از دو قطب شرقی و غربی است. از انطباق اینها با کانی‌سازی‌های دیگر چنین می‌توان تصور نمود که در محدوده بیش از یک فاز کانی‌سازی رخداده و هم پوشانی بین فازها موجب تداخل قطب‌ها شده است. با انطباق سامانه دو قطبی مس روی زون‌های

غنی‌شده و تهی‌شده آن روی نقشه ژئوشیمی طلا هم پوشانی بخشی دیده می‌شود. مطابق این نقشه (شکل ۱۱) تعدادی از غنی‌شدگی‌ها با بی‌هنجاری طلا هم پوشانی داشته و در مواردی نیز عدم انطباق دیده می‌شود. این وضعیت نیز می‌تواند معلول گام‌های متفاوت کانه‌زایی در محدوده باشد. در انطباق سامانه‌های دو قطبی روی-مولیبدن (شکل ۱۲) ملاحظه می‌شود که سامانه‌های دارای قطب غنی‌شده در شرق سامانه با بی‌هنجاری‌های مولیبدن منطبق بوده و می‌تواند نوید بخش هم آیندی کانی‌سازی مس و مولیبدن به شکل کانی‌سازی‌های نوع پورفیری باشد. این هم آیندی با نقشه طلا نیز قابل توجیه است. براساس شواهد مذکور کانی‌سازی‌های احتمالی در محدوده را می‌توان در سه رده به شرح زیر معرفی کرد:

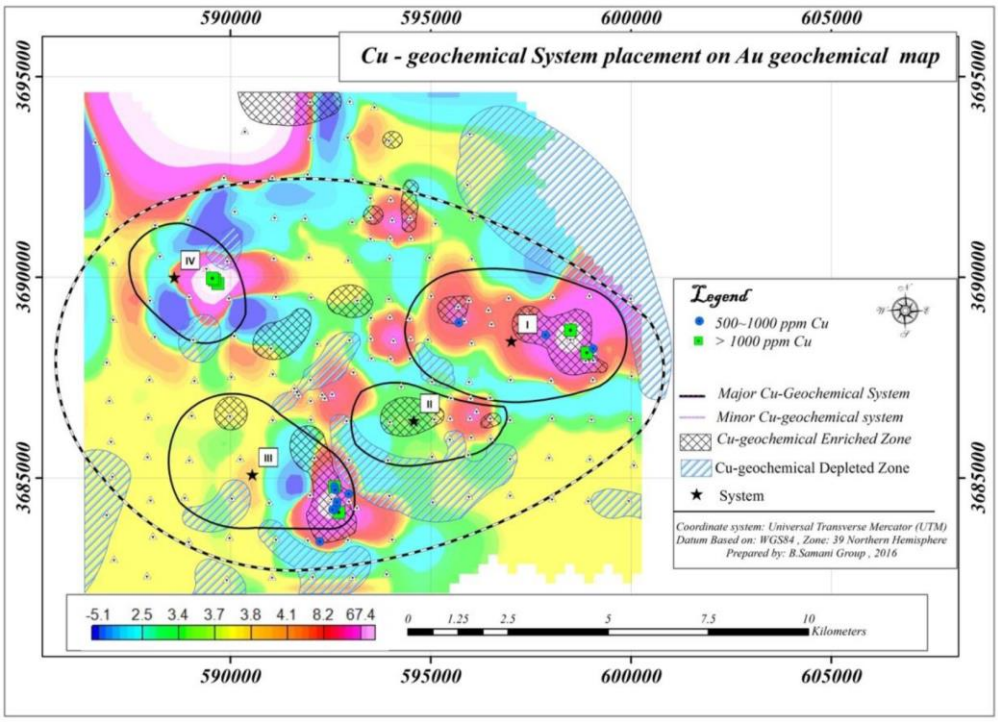
۱)کانی‌سازی با قابلیت سامانه‌های پورفیری و هم آیندی Cu-Mo-(Au)

۲)کانی‌سازی‌های نوع هورنفلس-رگه‌ای مس در حاشیه توده‌ها و خارج از سامانه‌های پورفیری با غنی‌شدگی مس و طلا

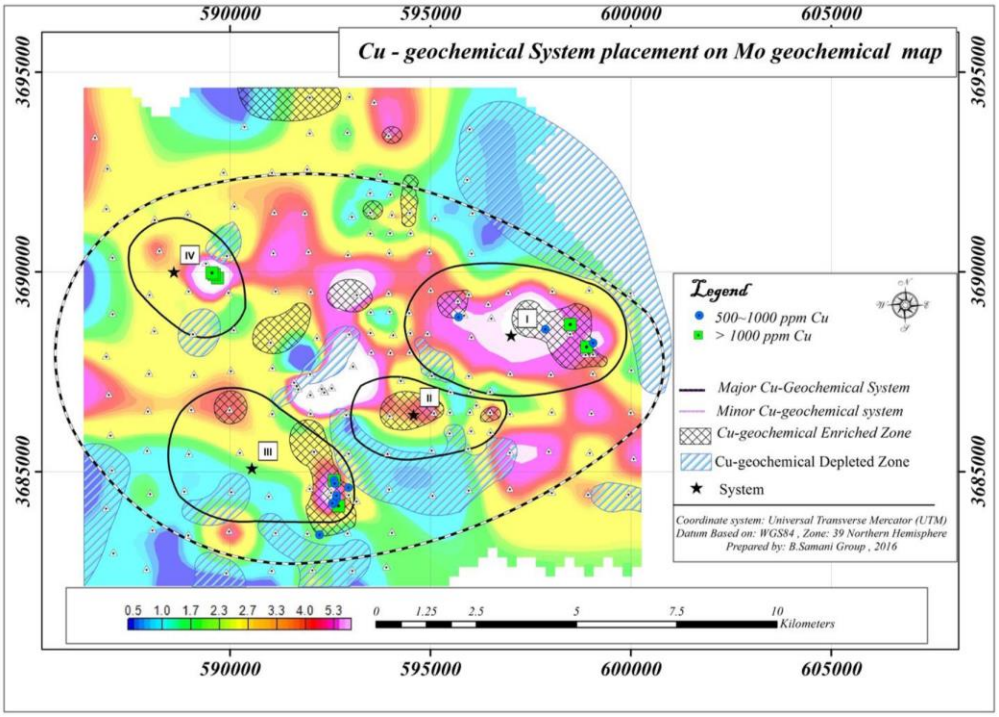
۳)کانی‌سازی‌های جوان تر از دو تیپ مذکور به صورت رگه‌ای چندفلزی که عموماً قطب غنی‌شده متفاوتی را نشان می‌دهند.




شکل ۱۰: نقشه انطباق سامانه‌های دو قطبی مس بر روی نقشه لیتوژئوشیمی مس در منطقه اکتشافی میلاجرد (موقعیت نمونه‌ها منطبق با شکل ۴).




شکل ۱۱: نقشه انطباق سامانه‌های دو قطبی مس بر روی نقشه لیتوژئوشیمی طلا در منطقه اکتشافی میلاجرد (موقعیت نمونه‌ها منطبق با شکل ۴).




شکل ۱۲: نقشه انطباق سامانه‌های دو قطبی مس بر روی نقشه لیتوژئوشیمی مولیبدن در منطقه اکتشافی میلاجرد (موقعیت نمونه‌ها منطبق با شکل ۴).

## نتیجه‌گیری

بررسی محدوده اکتشافی میلاجرد از دیدگاه زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و ژئوشیمیایی بیانگر جایگاه زمین‌ساختی معینی است. مکان ساختاری محدوده در باختر گسل زفره و در جنوب کوهسار کرکس است. در مقایسه با بالا آمدگی کمپلکس کرکس و فراز سامانه ولکانوپلوتونیک خاور گسل زفره، این محدوده در زون فرو افتاده‌ای بوده که اطراف آنرا گسل‌های منطقه‌ای محدود می‌سازند. این ویژگی موید وجود یک سامانه Vibrated Volcanic Basin در این مکان است که می‌توانسته فازهای پویایی مختلفی را از آغاز ائوسن تاکنون متحمل شده باشد. این دوره پویایی تکتونوماگمایی موجب شکل‌دهی سری‌های آتشفشانی، رسوبی و نفوذی در گام‌های مختلف بوده است. سامانه ولکانوپلوتونی پالئوژن با ویژگی‌های کمان حاشیه قاره‌ای در این محدوده به عنوان بخشی از کمربند طولانی ملا احمد-کرکس متحمل رخدادهای تکتونوگرمابی شده که خود باعث به وجود آمدن دگرسانی‌های متنوع از نوع پروپیلیتیک، فیلیک، سیلیسی‌شدن، پیریت‌زایی و تشکیل انباشته‌های عظیم تراورتن شده است. این تنوع در دگرسانی‌ها می‌تواند همبری در جوار توده‌های گرانیتوئید، دگرسانی هیدرولیتیک در سقف توده‌ها و معابر عبور سیالات اسیدی و دگرسانی‌های ناشی از توسعه سامانه ژئوترمال تراورتن‌ساز در زمان نئوژن-کواترنر توجیه شود. براساس تفسیر اطلاعات ژئوشیمیایی و شاخص آماری سه رده از کانی‌سازی‌ها شامل:

۱)وابسته به نفوذی‌های گرانیتوئید (Bi, Fe, Mo, Cu)، ۲)کانی‌سازی رگه‌ای-اپی‌ترمال منتسب با ماگماتیسم فلسیک (Pb, Zn, Au, Ag, Ba, S)، ۳)کانی‌سازی‌های مربوط به مناطق ژئوترمال (تراورتن Sr و As)، وجود دارد. ارزیابی استعداد منطقه‌ای برای کانی‌سازی‌های فلزی به روش ژئوشیمیایی دو قطبی، همانند مدلی که در شکل ۷ ارایه شده مدل قابل استنادی از غنی‌شدگی‌ها و تهی‌شدگی‌های مولیبدن، مس و طلا را نشان می‌دهد که با الگوهای جهانی (Goldbag and et al, 2010)، مطابقت دارد. طبق شواهد در ارزیابی منطقه‌ای این بخش از پهنه نایین-نطنز استعداد بالقوه‌ای را در مدل‌سازی فلززایی نشان داده و به عنوان محدوده مستعد برای کانی‌سازی برای عملیات شناسایی و پی‌جویی معرفی شده است. با توجه به قابلیت ارزیابی منطقه‌ای کانی‌سازی‌ها به روش تعیین سامانه‌های ژئوشیمیایی دو قطبی و با استفاده از تغییرات و جابجایی مس در محدوده با در نظر گرفتن حدود ۵۰۰ متر عمق، میزان مس تخلیه شده در حدود ۱۹۶۹۸۰۰ تن بوده که می‌تواند در کانون‌های غنی‌شدگی تمرکز یافته باشد. ارزیابی مقدار مس در زون‌های غنی‌شده تا عمق ۵۰۰ متر وجود حدود ۲ میلیون تن مس را نشان می‌دهد. این رقم می‌تواند به عنوان پتانسیل قابل اکتشاف یا به عبارت دیگر رده ۳۳۳ (JORC, 2012) و به عنوان Speculative Resource به حساب آید. با در نظر گرفتن مشخصات زمین‌شناسی، وجود سامانه‌های دو قطبی و توان شکل‌دهی حدود ۲ میلیون تن مس فلزی به عنوان منابع احتمالی در این محدوده، اجرای عملیات اکتشافی قابل توجیه بوده و انجام فازهای عملیات بعدی می‌تواند منجر به کشف کانسار شود.

**منابع**

-افشونی، ز.، اسماعیلی، د. و اسدی هارونی، ه.، ۱۳۹۲. مطالعه ایزوتوپ‌های پایدار (O، H و S) در زون‌های دگرسانی فیلیک و پتاسیک-فیلیک کانسار مس-مولیبدن پورفیری کهنگ (شمال شرق اصفهان)، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۷، ص ۶۴-۷۳.

-رادفر، ج.، ۱۳۷۸. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان، سازمان زمین‌شناسی کشور.

-سامانی، ب.، ۱۳۷۰. تکوین ژئوشیمیایی کانسارها و نقش دگرنهادی قلیایی در توزیع زمانی و مکانی آنها، سازمان انرژی اتمی ایران، گزارش شماره ۳۰۷، واحد اکتشاف، ۳۸ ص.

-سامانی، ب.، ۱۳۷۰. فلززایی پرکامبرین در ایران مرکزی به عنوان فرآیندی از فلززایی منسوب به جبه، دومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.

-سامانی، ب.، ۱۳۷۹. گزارش طرح بررسی پتانسیل منیزیت کشور (جنوب خراسان)، شرکت تهیه و تولید مواد نسوز کشور، ۶۲ ص.

-سامانی، ب.، ۱۳۹۲. فلززایی پرکامبرین در ایران و مقایسه آن با رخدادهای پان آفریقا در گندوانا، سمینار تخصصی پرکامبرین، دانشگاه فردوسی مشهد، ۳۶ ص.

-سامانی، ب.، نوروزیان، م.، صیدی، م.، نزاکتی، س.، کرمی، ج. و صانعی، ص.، ۱۳۹۳. گزارش پایانی طرح ارزیابی استعداد منابع معدنی پهنه نطنز-نایین (استان اصفهان): بر پایه مدل فلززایی و شناسایی جامع، شرکت سرمایه‌گذاری توسعه صنایع و معادن کوثر، ۴۵۶ ص.

-سامانی، ب.، نوروزیان، م.، صیدی، م.، نزاکتی، س.، مومنی، ا. و حیات الغیبی، م.، ۱۳۹۴. گزارش پایانی طرح پتانسیل‌یابی منابع معدنی پهنه خلخال (استان اصفهان): بر پایه مدل فلززایی و شناسایی جامع و ارزیابی سامانه‌های ژئوشیمی دوقطبی، شرکت سرمایه‌گذاری توسعه صنایع و معادن کوثر، ۲۲۵ ص.

-سامانی، ب.، ۱۳۹۵. بررسی محیط زمین‌شناسی و مدل کانی‌سازی در محدوده رنگان (شمال‌باختری زفره)، ۲۶ ص.

-مهرابی، ب.، طالع فاضل، ا. و طباخ شعبانی، ا.ع.، ۱۳۹۳. بررسی ژئوشیمی سنگ کل به منظور مطالعه و تفکیک دگرسانی‌های گرمابی منطقه پی‌جویی آهن-مس (±طلا) کوه‌دم، ایران مرکزی، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۱، ص ۵۸-۷۴.

-نجفیان، ط.، فتحیان‌پور، ن.، رنجبر، ح. و بخش‌پور، ر.، ۱۳۹۱. شناسایی پدیده‌های طیفی ناشناخته از داده‌های تلفیقی تصاویر ماهواره‌ای ALI+ASTER و ابر طیفی Hyperion بر مبنای روش ضریب همبستگی، مطالعه موردی (محدوده معدنی مس‌سرچشمه)، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۵، ص ۵۹-۶۷.

-Berberian, F., Muir, I.D., Pankhurst, R. and Berberian, M., 1982. Late Cretaceous and Early Miocene Andean type plutonic activity in northern Makran and Central Iran, Journal of Geological Society of London, v.139, p. 605-614.

-Berberian. M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran, Canada Journal of Earth and Sciences, v. 18, p. 210-265.

-Beus, A.A. and Grigorian, S.V., 1975. Geochemical exploration methods for mineral deposits, Applied Publishing Ltd. USA., 287 p.

-Geological Survey of Iran, 1972. Geology and petrography of the area North of Nain, Central Iran, Rep, 58 p.

-Geological Survey of Iran, 1976. Explanatory text of the Esfahan quadrangle map, 1:250,000.
-Goldberg, I.S., Abramson, G.J., Haslam, C.O. and Los, V.L., 1997. Geoelectrochemical exploration: principles, practice and performance: The Aus IMM Annual Conference, Ballarat, p.193-199.
-Goldberg, I.S., Abramson, G.J., Haslam, C.O. and Los, V.L., 2003. Depletion and enrichment of primary haloes: their importance in the genesis of and exploration for mineral deposits: Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, v. 3, p. 281-293.
-Goldberg, I.S., Abramson, G.Y. and Los, V.L., 2007. Exploration criteria for appraising geochemical anomalies through mapping geochemical systems in "Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration" edited by B. Milkereit, p. 963-968.
-Govett, G.J.S., 1983. Rock geochemistry in mineral exploration, Handbook of exploration geochemistry, 3. Elsevier, Amsterdam.
-Hunt, C.W., Collins, L. and Skobelin, G., 1992. Expanding geospheres, energy and mass transfers from earth's interior, Polar publishing, Canada, ISBN: O-9694506-1-3, 421 p.
-Hushmandzadeh, A., 1993. Geochemistry and Petrogesis of the Urmia-Dokhtar volcanics around Nain and Rafsanjan areas: A Preliminary Study, Treatise on the Geology of Iran, 50 p.
-Joint of Ore Reserve Commission (JORC), 2012. The JORC Code, 44 p.
-Kejian, J., Xuehan, W. and Guobing, Z., 1992. Ore source, water source and heat source for hydrothermal deposits and regularity of their distribution: Geological Publishing House, Beijing, China, 487 p.
-Levinson, A.A., 1974. Introduction to exploration geochemistry, Applied Publishing Ltd, Calgary, Alberta, Canada, 611 p.
-Reyre, D. and Mohafeze, S., 1972. A first contribution of the NIOC-ERAP agreements to the knowledge of Iranian geology, Edition Technique, Paris, 58 p.
-Robertson, L.D.M. and Taylor, G.F., 1987. Depletion Haloes in rocks surrounding the Cobar ore bodies, NSW, Australia: implication for exploration and ore genesis: Journal of Geochemical Exploration, v. 27, p. 77-101.
-Samani, B.A., Moemeni, A.R., Hayatalgheybi, M., Nezakati, S., Nowroozian, M. and Seidi, S.M., 2016. Geological evolution and metallogenic zonality of Anarak Esfahan region (on press).
-Sengör, A.M.C., 1990. A new model for the late Paleozoic-Mesozoic tectonic evolution of Iran and implications for Oman, in The Geology and Tectonics of the Oman Region, edited by A. H. F. Robertson, M. P. Searle, and A. C. Reis, Geological Society of London, Special Publication, v. 49, p. 797-831.
-Technoexport, 1984. Outline of metallogeny of Anarak area (Central Iran), GSI, Tehran, Iran, 135 p.
-Viladimir, L.N., 1993. Hydridic earth, the new geology of our primordially hydrogen-rich plant, Editor on translation C. Warren Hunt, ISBN 9694506 -2-1, -Polar publishing, Canada, 247 p.