



## رهیافت دانش‌محور در اکتشاف ذخایر روی و سرب با سنگ میزبان کربناته مطالعه موردی: قلمرو معدنی شمال ایرانکوه، اصفهان، ایران

عباس اسمعیلی سویری<sup>۱</sup>، محمدحسن کریم‌پور<sup>۱\*</sup>، آزاده ملکزاده شفارودی<sup>۱</sup> و اسداله محبوبی<sup>۱</sup>

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(۲) گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۱۱

### چکیده

برای معرفی الگوی اکتشافی بر اساس روش دانش‌محور در مقیاس قلمرو معدنی، ژئومتری، کانی‌شناسی، جایگاه ساختمانی، سنگ میزبان، ساختار داده‌های ژئوشیمیایی و دامنه تغییرات شارژپذیری از بررسی‌های ژئوفیزیکی در پنج ذخیره شناخته‌شده روی و سرب سولفیدی در یال شمالی ایرانکوه شامل گوشفیل، زون ۱ گوشفیل، مدفون، تپه‌سرخ و زون ۵ رومرمر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. رژیم تشکیل روی و سرب در طی دو یا چند دوره مختلف نهشته‌شدن ذخایر روی و سرب به‌همراه یکدیگر و یا سرب به‌صورت جداگانه را موجب شده است که در این میان رژیم سرب از حجم و توسعه کمتری برخوردار بوده است. مقدار پیریت متأثر از دمای تشکیل، از ۲ تا ۲۰ درصد در ذخایر مختلف تغییر می‌کند که به‌همراه ژئومتری و عمق وجود ذخیره بر دامنه تغییرات داده شارژپذیری به‌طور آشکاری تأثیر می‌گذارد. گستره وسیعی از منطقه تحت تأثیر حجم زیادی از محلول هیدروترمال قرار گرفته است که در نتیجه عملکرد این محلول‌ها، دولومیتی‌شدن به‌صورت انتخابی در واحد چینه‌ای زیرین به نسبت سایر واحدهای چینه‌ای توسعه عمقی بیشتری نشان می‌دهد. با وصف این آثار کانی‌سازی سطحی در تمام افق‌های دولومیتی در سطح گسترده‌ای مشاهده می‌شوند که به دو دسته فرعی و اصلی تقسیم می‌شوند. در نتیجه تعدد زون‌های کانی‌سازی در هاله ژئوشیمیایی ثانویه، عناصر انشعاب‌یافته از کانه‌های اصلی سولفیدی و عناصر نشأت‌گرفته از سنگ میزبان، ناهنجاری‌های کاذب و واقعی گسترده و متعددی را به نمایش می‌گذارند. افزایش همگام عناصر اصلی شامل روی و سرب به‌همراه عناصر ردیاب نظیر نقره، کادمیوم، آنتیموان، آرسنیک، مس و عناصر نشأت‌گرفته از سنگ میزبان شامل منیزیم، آهن و کلسیم به‌عنوان ناهنجاری مستعد معرفی می‌شود. در مقابل در مناطق ناهنجاری بی‌اهمیت، افزایش عناصر اصلی و ردیاب با کاهش نسبی عناصر کلسیم، منیزیم و آهن روبروست.

**واژه‌های کلیدی:** روی، سرب، دولومیت، اکتشاف، دانش‌محور، ایرانکوه

### مقدمه

شناخت ذخایر معدنی در دو روش داده‌محور و دانش‌محور است (Feltrin, 2008). در روش دانش‌محور وزن‌دهی به داده‌های اکتشافی توسط متخصص مجرب با تجربه کلان در امر اکتشاف

اکتشاف ذخایر معدنی بر پایه ترکیبی از سه لایه اطلاعاتی شامل مدل‌سازی ژئودینامیک، تهیه نقشه‌های استعداد کانی‌سازی و

صورت می‌گیرد. در مقابل در روش داده‌محور عینیت بر شرایط تصمیم‌گیری حاکم بوده و برخی پژوهشگران به صراحت اعلام می‌کنند که فارغ از قضاوت متخصص بوده (Carranza and Hale, 2003) و یا آنکه فقط ارزیابی متخصص در مراحل آغازین انتخاب معیار نقش دارد (Agterberg, 1974). مثال مدل‌های اکتشافی در ایرانکوه نشان می‌دهد که با پیشرفت عملیات اکتشافی و افزایش عمق دانش محلی طی شناسایی متغیرهای مختلف در منطقه مورد بررسی، نقشه استعداد کانی‌سازی به‌طور آشکاری تغییر پیدا می‌کند. در مناطق معدنی مستعد، این امکان وجود دارد که چندین آنومالی بر اساس رخنمون‌های سطحی، داده‌های ژئوشیمیایی و اطلاعات ژئوفیزیکی معرفی شوند که تشخیص اولویت در آنها یکی از چالش‌های اصلی در انتخاب منطقه هدف است. منطقه معدنی شمال ایرانکوه الگوی کاملی از پیچیدگی‌ها در امر انتخاب منطقه هدف را به‌نمایش می‌گذارد.

تغییرات زیادی در ژئومتری، کانی‌شناسی و سنگ‌های درون‌گیر در پنج ذخیره انتخاب‌شده روی و سرب سولفیدی با سنگ میزبان کربناته در قلمرو معدنی ایرانکوه شمالی مشاهده می‌شود. این تغییرات نشأت گرفته از نحوه تکوین ذخایر روی و سرب نوع دره می‌سی‌سی‌پی<sup>۱</sup> شامل ژنتیک محلول، دمای تشکیل، معابر زمین‌ساختی، فازهای مختلف کانی‌سازی روی و سرب، سیستم هیدرولوژی منطقه، جهت حرکت محلول، واکنش با سنگ میزبان و عمق نفوذ محلول‌های دولومیت‌ساز و شوره‌های حمل‌کننده فلزات روی و سرب است (Leach et al., 2010). هر کدام از عوامل یادشده به‌صورت طبیعی بر روی دامنه تغییرات در بررسی‌های سطحی، علایم ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی تأثیر می‌گذارند که شناخت آنها به معرفی مدل-نوع اکتشافی در مقیاس محلی منتهی می‌شود. تجربیات محلی نشان می‌دهد که حتی انطباق کامل بی‌هنجاری در سه لایه اطلاعاتی زمین‌شناسی سطحی مبنی بر رخنمون کانی‌سازی، بی‌هنجاری ژئوشیمیایی و همچنین شارژپذیری الکتریکی بر وجود ذخیره باارزش اقتصادی

دلالیت ندارد. از این‌رو سؤال اصلی این پژوهش شناسایی متغیرهای دیگری است که نقشی مؤثر در انتخاب منطقه هدف داشته تا خطر انتخاب منطقه مستعد برای ورود به فاز حفاری مغزه‌گیری کاهش یابد. بررسی موارد پژوهشی انجام‌شده در ایرانکوه نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های داده‌محور ضمن استفاده از نقشه زمین‌شناسی نادرست، برای معرفی مناطق مستعد در ذخایر نوع دره می‌سی‌سی‌پی در قلمرو معدنی شمال ایرانکوه، نتایج مثبتی در بر نداشته و ناگزیر باید ضمن اتخاذ روش دانش‌محور در راستای تولید دانش محلی (Lavery et al., 1994)، نسبت به ارزیابی و گزینش مناطق امیدبخش اقدام کرد. ناحیه معدنی ایرانکوه در جنوب شهر اصفهان و در محدوده طول‌های جغرافیایی  $51^{\circ}33'$  تا  $51^{\circ}40'$  و عرض‌های جغرافیایی  $32^{\circ}28'$  تا  $32^{\circ}32'$  قرار دارد. پنج ذخیره/معدن روی و سرب با سنگ میزبان کربناته فعال شامل گوشفیل، زون ۱ گوشفیل، مدفون، تپه سرخ و زون ۵ رومرمر با  $13/4$  میلیون تن ذخیره با عیار روی  $4/3$  درصد و سرب  $1/2$  درصد (Karimpour et al., 2017) در طی بیش از نیم قرن فعالیت معدنی در پهنه باریکی به مساحت  $2$  کیلومتر مربع در یال شمالی ایرانکوه کشف و به روش‌های زیرزمینی-رو باز و یا روش‌های تلفیقی در حال استخراج هستند. این قلمرو معدنی در کمربند متالوژنی قرار می‌گیرد که توسط پژوهشگران مختلف به نام‌های مختلفی از جمله کمربند روی و سرب اصفهان-ملایر (Momenzadeh, 1976; Rastad, 1981; Rajabi et al., 2012)، کمربند مهدی‌آباد-گلپایگان (Förster, 1978) و کمربند تنیس در جنوب اروپا و شمال آفریقا از عربستان تا ایران و پاکستان (Hitzman et al., 2003) نام‌گذاری شده است. شرکت باما بیش از نیم قرن امتیاز کشف و بهره‌برداری و فراوری از کانسنگ سولفیدی و کربناته روی و سرب ایرانکوه را در اختیار داشته است. این شرکت یکی از قدیمی‌ترین مجموعه‌های معدنی کشور است و از نظر حجم کانی‌سازی و تناژ/عیار دارای رتبه نخست در کمربند متالوژنی یادشده است.

دیگری در دنیا بین پژوهشگران مختلف، اختلاف نظر وجود دارد (Sass-Gustkiewicz et al., 1982; Velasco et al., 2003). در نگرشی کلی این تفاوت دیدگاه در ارتباط با تبیین ژنز ذخایر نوع دره می‌سی‌سی‌پی بین پژوهشگران اروپایی (نظریه سین‌ژنتیک) و پژوهشگران امریکایی (نظریه اپی‌ژنتیک) به‌صورت فراگیر مشاهده می‌شود (Maynard, 1983). بدین ترتیب تاکنون دو نظریه در مورد ژنز ذخایر روی و سرب در ایرانکوه بیان شده است. نظریه سین‌ژنتیک مبنی بر تشکیل کانی‌سازی در محیط آب دریا در کرتاسه زیرین (حدود ۱۳۵ میلیون سال پیش) بر اساس مشاهده لایه‌بندی در ذخیره معدن تپه‌سرخ و اشاره به وجود توف در بخش غربی این معدن متکی است (Rastad, 1981; Boveiri-Konari et al., 2017; Boveiri-Konari and Rastad, 2018). وجود لایه‌بندی در کانی‌سازی در بخش‌هایی از ذخایر نوع دره می‌سی‌سی‌پی در مقیاس جهانی نیز گزارش شده است؛ لذا تفکیک این ذخایر از نوع سدکس<sup>۱</sup> بر اساس این ممیزه دشوار است (Lydon, 1995). از سوی دیگر، معرفی واحد سنگی توف (Boveiri-Konari et al., 2017) بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی در غرب معدن تپه‌سرخ از نمونه‌های گمانه BA-7 در موقعیت زون گسله شمال ایرانکوه محل شک و تردید جدی است. به‌نظر می‌رسد کانی‌های شناسایی شده در این تعبیر و تفسیر، ناشی از تغییرات در زون گسله باشد که با مشخصات میکروسکوپی توف همسانی نشان داده است. از سوی دیگر برخی پژوهشگران کاملاً با نظر نخست مخالف بوده و بر اساس شواهد زمین‌شناسی، آلتراسیون، شکل و بافت کانی‌سازی و مجموعه کانی‌شناسی، جایگاه زمین‌ساختی، منشأ فلزات و ایزوتوپ استرانسیوم و همچنین تعیین سن از ایزوتوپ رنیم-اسمیم استخراج شده از پیریت در معدن گوشفیل سن رخداد کانی‌سازی ۶۶/۵ میلیون سال پیش محاسبه شده و ژنز کانی‌سازی در ایرانکوه را از نوع MVT و اپی‌ژنتیک تشخیص داده‌اند (Ghazban et al., 1994; Yingchao et al., 2015; Karimpour et al., 2017; Karimpour and Sadeghi, 2018; Karimpour et al., 2019; YingChao et al., 2019).

تاکنون بررسی‌های متعددی برای شناسایی ذخایر ایرانکوه، ژنز آنها، بررسی‌های ژئوفیزیکی به‌روش الکتریکی، بررسی‌های ژئوشیمیایی، معرفی محیط زمین‌ساختی و منشأ محلول‌های هیدروترمال، ایزوتوپ سرب و سن‌سنجی در ایرانکوه انجام شده است. این پژوهش‌ها شامل زاهدی (Zahedi, 1976)، راستاد (Rastad, 1981)، کیمیاقلم و کیمیاقلم (Kimiaghaleh and Kimiaghaleh, 1981)، کیمیاقلم و نیکلاس (Kimiaghaleh and Nicholas, 1982)، کیمیاقلم و همکاران (Kimiaghaleh et al., 1987)، کیمیاقلم و کیمیاقلم (Kimiaghaleh and Kimiaghaleh, 1988)، غضبان و همکاران (Ghazban et al., 1994)، ریچرت (Reichert, 2007)، گریگوریان و آدمیان (Grigorian and Adamyan, 2008a; Grigorian and Adamyan, 2008b)، میرنژاد و همکاران (Mirnejad et al., 2011)، یینگچائو و همکاران (Yingchao et al., 2015)، حسینی دینانی و همکاران (Hosseini-Dinani et al., 2015)، ناکینی و همکاران (Nakini et al., 2016)، حسینی دینانی و آفتابی (Hosseini-Dinani and Aftabi, 2016)، بویری-کناری و همکاران (Boveiri-Konari et al., 2017)، بویری-کناری و راستاد (Boveiri-Konari and Rastad, 2018)، کریم‌پور و همکاران (Karimpour et al., 2017; Karimpour et al., 2019)، کریم‌پور و صادقی (Karimpour and Sadeghi, 2019)، ذکری و همکاران (Zekri et al., 2019a; Zekri et al., 2019b)، یینگچائو و همکاران (YingChao et al., 2019) است.

این پایان‌نامه‌ها و مقالات که شامل پژوهش‌هایی به‌صورت بخشی و کلان در ایرانکوه هستند، فقط در ارتباط با زمین‌شناسی، کانی‌سازی، ژئوشیمی و بررسی‌های ایزوتوپی متمرکز بوده است (Karimpour et al., 2017) و تاکنون هیچ‌گونه الگوی کاربردی اکتشاف در ذخایر ایرانکوه معرفی نشده است. از سوی دیگر، در ارتباط با ژنز ذخایر روی و سرب با سنگ میزبان کربناته ایرانکوه همانند نقاط مشابه زیاد

در این پژوهش با توجه به هدف محوری آن مبنی بر معرفی متغیرهای اکتشافی در ذخایر ایرانکوه شمالی، موارد مربوط به نظریات پژوهشگران مختلف در مورد نحوه ژنز این ذخایر مورد نقد و بررسی قرار نمی‌گیرد؛ اما لازم است که به صورت شفاف اعلام شود که در روش‌شناسی، در بررسی متغیرهای حاکم بر تکوین و تشکیل ذخیره، برای معرفی الگوی کاربردی اکتشاف در نوع ذخایر ایرانکوه شمالی به ناگزیر دره می‌سی‌سی‌پی از نوع اپی‌ژنتیک محسوب شده است. شواهد میدانی دیگری نیز در این مورد به شرح زیر قابل ذکر است:

۱) هیچ اثری از دولومیتی شدن و حتی آثار فرعی کانی‌سازی در یال شمالی طاق‌دیس ایرانکوه که به فاصله یک کیلومتری ذخایر شمال ایرانکوه قرار گرفته است، مشاهده نمی‌شود. با فرض اینکه کانی‌سازی ایرانکوه سین‌ژنتیک بوده باشد، آثار دولومیتی شدن و یا کانی‌سازی روی و سرب در افق‌های چینه‌ای همسان در یال شمالی طاق‌دیس ایرانکوه می‌تواند قابل انتظار باشد.

۲) کانی‌سازی به دو صورت اقتصادی و فرعی در سنگ‌های میزبان با سن مختلف از ژوراسیک بالایی تا کرتاسه بالایی در ایرانکوه مشاهده می‌شود. کانی‌سازی روی و سرب در افق‌های زیرزمینی معدن گوسفیل از کمرپایین زون گسل معکوس ایرانکوه شمالی در واحد دولومیتی آغاز و تا چند متر در کمربالای زون گسله در واحد شیل مشاهده می‌شود. همچنین آثار کانی‌سازی به صورت وسیعی در ارتفاعات در واحدهای دولومیتی در بخش‌های بالایی کرتاسه نیز مشاهده می‌شوند. با فرض کانی‌سازی سین‌ژنتیک باید بپذیریم که کانی‌سازی از ژوراسیک بالایی تا کرتاسه بالایی، به تناوب، ضمن عبور از دوره‌های طولانی عدم کانی‌سازی (دوره خشکی‌زایی مرز بین ژوراسیک و کرتاسه (کنگلومرای قاعده‌ای)) (Berberian and King, 1981)، واحدهای سنگ آهک بین لایه‌ای در بدنه ایرانکوه شمالی در منطقه صورت گرفته است! رجبی و همکاران (Rajabi et al., 2012) کانی‌سازی روی و سرب در ایرانکوه را هم‌زمان با کرتاسه پیشین با تشکیل و تکامل حوضه پشت‌کمانی مرتبط می‌دانند و هیچ اشاره‌ای به وجود کانی‌سازی

روی و سرب در گروه شمشک نمی‌کنند.

چهار هدف اصلی این پژوهش عبارتند از: ۱- بررسی ژئومتری ۵ ذخیره یال شمالی ایرانکوه از قبیل سنگ میزبان، تناژ، عیار، امتداد، طول، ضخامت، عمق، شیب و جهت شیب؛ ۲- بررسی کانی‌شناسی هر ذخیره برای شناسایی کانی‌های اصلی سولفیدی، کانی‌های فرعی و مقدار فراوانی آنها و ارائه سناریوی مفهومی کانی‌سازی؛ ۳- اندازه‌گیری و بررسی شیمی کانی‌های اسفالریت و گالن از طریق اندازه‌گیری عناصر موجود در شبکه بلوری آنها برای درک عناصر ردیاب موجود در هاله ژئوشیمیایی افق خاک منطقه و ۴- ارزیابی داده‌های شارژپذیری الکتریکی منطقه بر اساس موقعیت ذخایر شناخته شده و بررسی تغییرات IP با توجه به مقدار کانی‌های سولفیدی شارژپذیر و ژئومتری ذخایر. با توجه به هدف اصلی این پژوهش مبنی بر بررسی معیارهای اکتشافی روی و سرب در سنگ میزبان کربناته از میان پژوهش‌های معرفی شده توسط پژوهشگران مختلف، بررسی‌های مربوط به اکتشافات ژئوشیمیایی و اکتشافات ژئوفیزیکی در این مقاله با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### روش مطالعه

پایه و اساس این پژوهش بر روش بررسی معکوس استوار است. داده‌های زمین‌شناسی سطحی، مقدار شارژپذیری الکتریکی و بررسی‌های ژئوشیمیایی از افق خاک منطقه به ازای شناسایی زمین‌شناسی و متغیرهای حاکم بر ذخایر موجود در ذخایر ایرانکوه شمالی مورد بررسی قرار گرفت. سپس بر اساس تحلیل‌ها و معیارهای معرفی شده، ضمن مقایسه با ویژگی‌های توصیفی ذخایر MVT در مقیاس جهانی، چندین منطقه بی‌هنجاری دیگر در قلمرو معدنی شمال ایرانکوه مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تحقق اهداف بیان‌شده، سلسله عملیات صحرایی، حفاری اکتشافی مغزه‌گیری و زمین‌شناسی حین استخراج در طول ۱۳ سال از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۷ در منطقه انجام شده است. نقشه زمین‌شناسی منطقه دوباره مورد تعبیر و تفسیر قرار گرفت. تعداد ۵۶۰ گمانه مغزه‌گیری (شامل ۹۳۰۰۰

متر حفاری از سطح زمین) و ۱۳۳ گمانه زیرسطحی مغزه گیری (۶۷۰۰ متر) بررسی و لاگینگ شده است. تعداد ۸۰۴ نمونه از افق B خاک در منطقه‌ای به مساحت ۶۰۰ هکتار از معدن گوشفیل تا تپه سرخ در سال ۲۰۰۸ در طی سه ماه گرفته شد. این نمونه‌ها در شبکه‌ای به ابعاد اولیه ۲۰۰ متر در ۴۰ متر و سپس برای برخی مناطق به ابعاد ۱۰۰ متر در ۴۰ متر و در نهایت برای منطقه زون ۵ رومرمر در شبکه‌ای به ابعاد ۲۵ متر در ۲۵ متر جمع‌آوری شده است. این نمونه‌ها در آزمایشگاه ALS با روش کد ME-ICP آنالیز شده است. حد بالایی تشخیص برای عناصر روی و سرب در این روش ۱۰۰۰۰ گرم در تن است. سایر عناصر آنالیز شده مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از نقره، کادمیوم، آنتیموان، آرسنیک، مس، باریم، منگنز، آهن، منیزیوم و کلسیم. برای بررسی شیمی کانی‌های اسفالریت و گالن، تعداد ۷ مقطع نازک صیقلی از گمانه‌های مختلف برگزیده شده از معادن گوشفیل تپه سرخ، زون ۵ رومرمر و ذخیره مدفون تهیه شد و مورد آنالیز ریزپردازنده الکترونی در دانشگاه کلرادو امریکا قرار گرفت. دستگاه ریزپردازنده الکترونی از نوع JEOL JAX-8230 است. این دستگاه کاملاً خودکار بوده و دارای ۵ بلور است که علاوه بر قابلیت تجزیه مجموعه عناصر مختلف، از حد تشخیص بسیار خوبی (اغلب عناصر تا ۵ گرم در تن) برخوردار است. در مجموع تعداد ۳۶ نقطه در کانی گالن و ۳۵ نقطه در کانی اسفالریت مورد تجزیه قرار گرفت. برداشت‌های ژئوفیزیکی به روش الکتریکی و آرایش مستطیلی در منطقه‌ای به مساحت ۱۱ کیلومتر مربع که در برگرنده ذخایر موجود در ایرانکوه شمالی و مناطق پیرامونی آنهاست، انجام شده است. کلیه داده‌های سطحی در این بررسی به صورت یکپارچه در محیط نرم‌افزار ArcMap گردآوری و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

### زمین‌شناسی

کمر بند کوه‌زاد زاگرس به عنوان بخشی از رشته کوه‌زایی آلپ-همالیا به طول ۲۰۰۰ کیلومتر در راستای شمال غرب-

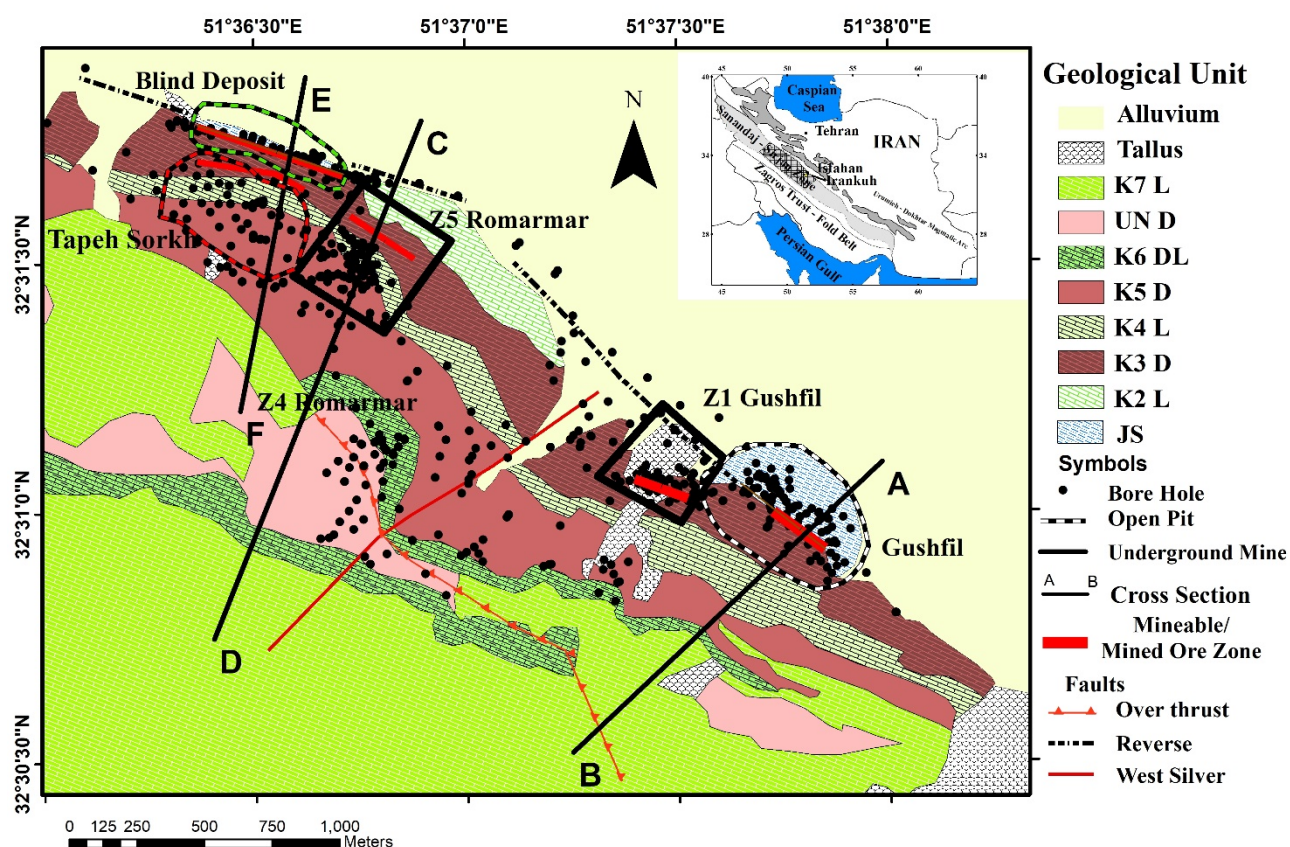
### چینه‌شناسی

جنوب شرق از گسل شرقی آناتولی در ترکیه تا خط عمان در جنوب ایران کشیده شده است (Alavi, 1994). این کمر بند محصول فرایند پیچیده‌ای از جدایش بلوک قاره‌ای ایران از گندوانا در اوایل مزوزوئیک است که با فروانش با جهت شیب شمال شرقی پوسته اقیانوسی دریای تیس جوان در زیر خرده قاره ایران ادامه پیدا کرده است. ادامه فروانش به برخورد صفحات افریقا-عربی با صفحات ایرانی منتهی شده است (Berberian, 1994; Şengör, 1990; and King, 1981). این کمر بند متشکل از سه زون موازی با همدیگر است که از شمال شرقی به جنوب غربی شامل: ۱- مجموعه ماگمایی ارومیه-دختر، ۲- زون سنندج-سیرجان و ۳- کمر بند زاگرس چین خورده است. منطقه مورد بررسی در زون سنندج-سیرجان (Stocklin, 1968) واقع شده است و واحدهای سنگی آن شامل شیل‌های ژوراسیک، گروه شمشک، و توالی ضخیمی (تقریباً ۱۰۰۰ متر) (Zahedi, 1976) از سنگ‌های کربناته، سنگ آهک و دولومیت به سن کرتاسه هستند. اوایل کرتاسه زمان افزایش هم‌گرایی حاشیه صفحات در بخش میانی تیس شرقی است. در این زمان پس‌روی گسترده‌ای در مناطق وسیعی از شمال غرب ایران، خرده قاره ایران مرکزی و زون سنندج-سیرجان رخ داده است. رسوب گذاری با ضخامت قابل توجه از سنگ‌های کربناته به سن بارمین تا آپتین در منطقه سنندج و به سمت غرب تا منطقه پشت‌بادام، گویای وجود حوضه های Pull-apart در امتداد مرزهای گسله زون سنندج-سیرجان و یزد-طبس است (Şengör, 1990). بخشی از این توالی ضخیم کربناته کرتاسه که به صورت انتخابی در افق‌های مشخصی دولومیتی شده است، میزبان ذخایر اقتصادی روی و سرب سولفیدی در ایرانکوه شمالی است. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ساده شده، موقعیت ذخایر ایرانکوه شمالی و موقعیت سه مقطع تیپ را نشان می‌دهد.

درک چینه‌شناسی و شناسایی میزبان مناسب‌تر در معرفی الگو برای اکتشاف ذخایر روی و سرب نوع دره می‌سی‌سی‌پی در مقیاس قلمرو معدنی اهمیت زیادی دارد (Sangster, 1995).

ایرانکوه ناشی از تکرار طبقات چینه‌ای به دلیل عملکرد گسل  
رورانده در ارتفاعات ایرانکوه است (Esmaeili Sevieri et al., 2018).

معرفی مقطع نوع چینه‌شناسی در یال شمالی ایرانکوه دشوار  
است. طبق پژوهش زاهدی و راستاد (Zahedi, 1976; Rastad, 1981)، ایرانکوه کامل‌ترین مقطع چینه‌شناسی کرتاسه  
را در ورقه ۲۵۰۰۰۰: ۱ اصفهان نشان می‌دهد؛ اما ضخامت بیش  
از یک کیلومتر از توالی سنگ‌های کربناته در یال شمالی



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده شده قلمرو معدنی شمال ایرانکوه (با تغییرات از کریم‌پور و همکاران (Karimpour et al., 2017; Karimpour et al., 2019) و راستاد (Rastad, 1981))

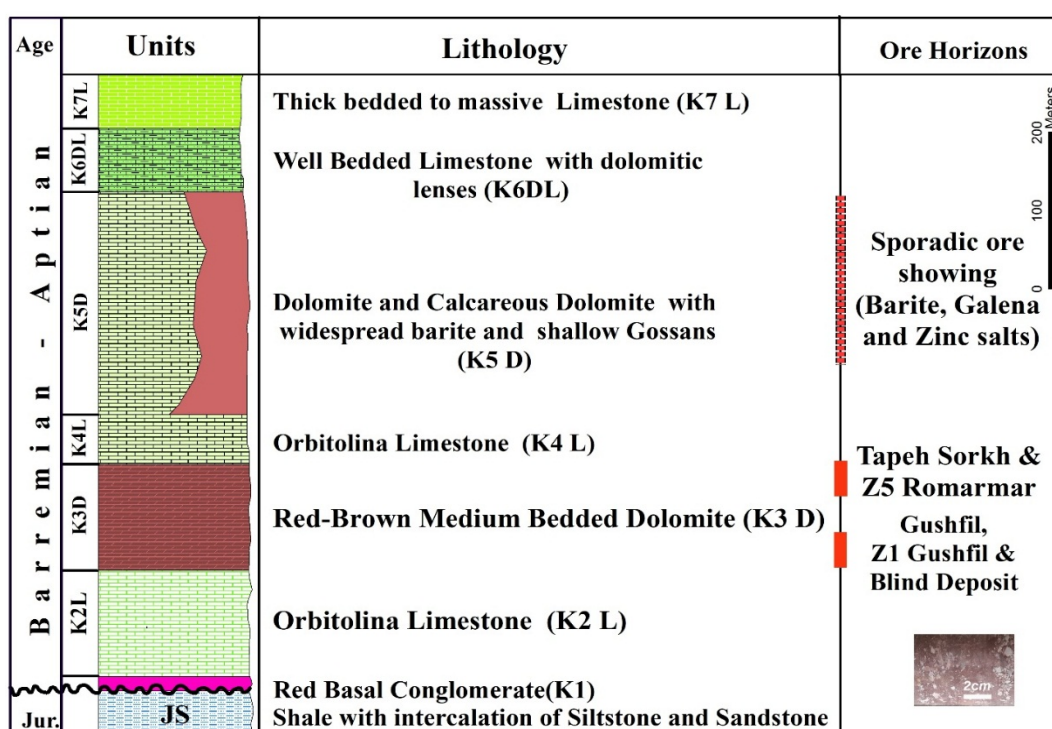
**Fig. 1.** Simplified Geological Map of North Irankuh district (After Karimpour et al., 2017; Karimpour et al., 2019 and Rastad, 1981)

این توالی در ابتدای ستون چینه‌شناسی تحت تأثیر گسل نرمال-  
معکوس شمال ایرانکوه است (Nakini et al., 2016) که  
سبب حرکت رو به بالای سنگ‌های شیلی گروه شمشک بر  
روی واحدهای کربناته کرتاسه شده است. توالی چینه‌شناسی  
شامل گروه شمشک به سن ژوراسیک شامل واحدهای سنگی  
آواری و شیل و شش واحد کربناته با نام‌های محلی K1، K2L،

این توالی در ابتدای ستون چینه‌شناسی تحت تأثیر گسل نرمال-  
معکوس شمال ایرانکوه است (Nakini et al., 2016) که  
سبب حرکت رو به بالای سنگ‌های شیلی گروه شمشک بر  
روی واحدهای کربناته کرتاسه شده است. توالی چینه‌شناسی  
شامل گروه شمشک به سن ژوراسیک شامل واحدهای سنگی  
آواری و شیل و شش واحد کربناته با نام‌های محلی K1، K2L،

سن ۱۷۵ تا ۱۶۵ میلیون سال پیش باشند ( Bayati et al., 2017). بر اساس این ستون چینه‌شناسی موقعیت ذخایر ایرانکوه شمالی در سه مقطع زمین‌شناسی در شکل ۳ نمایش داده شده است. طبق این الگو همه ذخایر اصلی ایرانکوه شمالی در واحد K3D و آثار متعدد کانی‌سازی فرعی در سایر واحدهای دولومیتی یافت می‌شوند.

کنگلومرای قاعده‌ای مشاهده می‌شود (تصویر داخل کادر در شکل ۲). برخلاف نقشه راستاد (Rastad, 1981)، در منطقه ایرانکوه هیچ رخنمونی از کنگلومرای قاعده‌ای وجود ندارد. کنگلومرای قاعده‌ای در برخی مغزه‌های حفاری مشاهده می‌شود که حاوی قطعات سیلیسی و ارتوکلاز است که احتمالاً منبع تولید‌کننده آن گرانیت‌های کلاه قاضی (Zahedi, 1976) با



شکل ۲. ستون چینه‌شناسی و موقعیت ذخایر ایرانکوه شمالی

Fig. 2. Stratigraphic Column of North Irankuh deposit

## زمین‌ساخت

رشته‌کوه ایرانکوه یال جنوبی یک طاق‌دیس بزرگ است که موازی با کمربند فولد-تراست زاگرس به سمت شمال‌غربی امتداد دارد. لایه‌بندی عمومی واحدهای کربناته به اندازه ۴۰ درجه در جهت شیب جنوب‌غربی است. واحدهای کربناته با شیب ملایمی به سمت شمال‌غرب بر روی گروه شمشک قرار گرفته است. این امر باعث شده است که در منطقه گردنه تفنگچی‌ها واحدهای شیلی یال جنوبی و شمالی ایرانکوه

به‌صورت پیوسته دیده شوند. پنج دسته ساخت زمین‌ساختی اصلی در منطقه ایرانکوه شامل گسل معکوس شمال ایرانکوه، گسل‌های تراست، گسل رگه V1 در معدن زون ۵ رومرمر، گسل رورانده و نرمال شناسایی شده است (شکل ۴). دو دسته گسل اول شامل گسل معکوس و گسل تراست در ارتباط مستقیم با کانی‌سازی روی و سرب در شمال ایرانکوه هستند. گسل رگه V1 در منطقه زون ۵ رومرمر فقط تأمین‌کننده معبر و فضای مناسب برای کانی‌سازی سرب به‌صورت گالن است.

ذخایری مثل گوشفیل، زون ۱ گوشفیل و ذخیره مدفون که همگی به سمت شمال شیب دارند، در فضاها و معابر مرتبط با گسل معکوس شمال ایرانکوه تشکیل شده‌اند. مقدار شیب در گسل‌های معکوس از ۶۰ تا ۸۰ درجه متغیر است. تشکیل دو معدن تپه‌سرخ و زون ۵ رومرمر نیز در گروه گسل‌های تراستی رخ داده است. این گسل‌ها به صورت عمومی ۴۰ درجه شیب به سمت جنوب غربی دارند. مقدار و جهت شیب گسل‌های تراستی با لایه‌بندی تشابه زیادی نشان می‌دهد. در دسته سوم گسل‌ها، گسل رورانده بزرگ ارتفاعات ایرانکوه است (Esmaeili Sevieri et al., 2018). حرکت عظیمی در ایرانکوه در واحدهای K5D و K5DL به سمت جنوب شرق صورت گرفته است. در منطقه بالادست معدن گوشفیل این حرکت به طول ۹۲۰ متر اندازه‌گیری شده است (شکل ۵-A و B). گسل‌های جوان نرمال موجب تشکیل آبراهه‌های منطقه شده است و سیمای کنونی ایرانکوه را سبب شده‌اند. این دسته گسل‌ها عمود بر سیستم کانی‌سازی هستند. این گروه گسله هیچ ارتباطی با کانی‌سازی نداشته و معمولاً موجب جابه‌جایی زون‌های کانی‌سازی کمتر از ۵ متر شده‌اند.

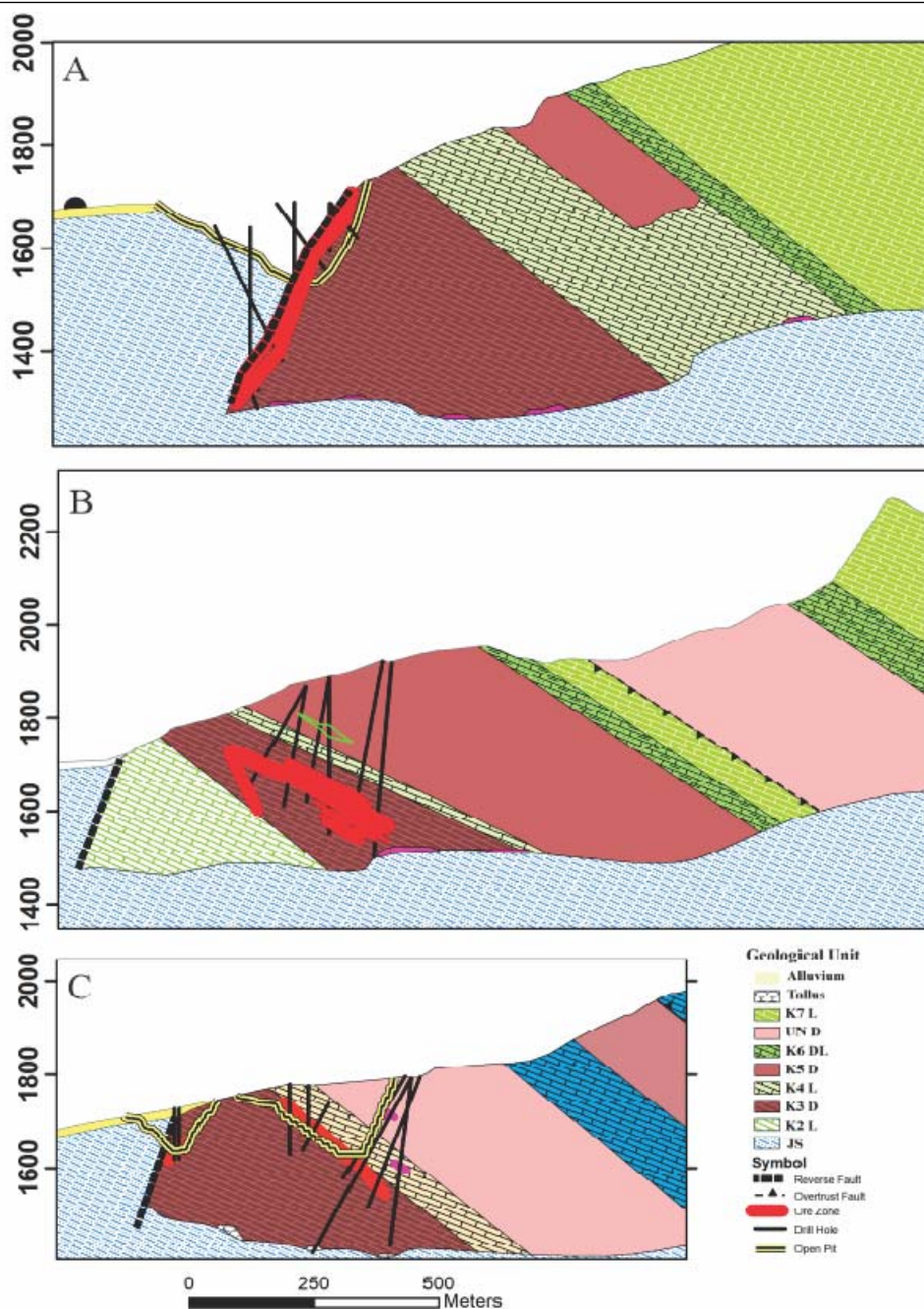
با در نظر گرفتن توالی رخدادهای زمین‌ساخت و نسل‌های مختلف کانی‌سازی در ایرانکوه چنین نتیجه گرفته می‌شود که گسل‌های نرمال عمود بر امتداد ایرانکوه جوان‌ترین رخداد زمین‌ساختی در منطقه باشند که حتی پس از رخداد رورانده بزرگ ایرانکوه تشکیل شده‌اند. با توجه به همیافتی ذخایر پنج‌گانه شمال ایرانکوه در منطقه تحت‌تأثیر گسل رورانده چنین استنباط می‌شود که بخش‌هایی از اپیزود کانی‌سازی روی و سرب در ایرانکوه که به نوبه خود در غنی‌شدن عیار این ذخایر نقشی مهم داشته است با رخداد رورانده‌گی در ارتباط باشد. همچنین محتمل است که گسل مربوط به رگه V1 در زون ۵ رومرمر با گسل رورانده شمال ایرانکوه ارتباط زمانی نزدیکی داشته باشد.

### آلتراسیون

دولومیتی‌شدن به صورت ریز تا درشت‌دانه و تشکیل دولومیت اسپاری مهم‌ترین آلتراسیون منطقه است که به صورت انتخابی در

لایه‌های مشخصی از ستون چینه‌شناسی شامل K3D، K5D و K5DL در سطح گسترده‌ای بر روی سنگ آهک اولیه (مستعد دولومیتی‌شدن) اثر گذاشته است. دولومیتی‌شدن ناحیه‌ای به صورت دولومیت ریزدانه و در داخل زون‌های کانی‌سازی اغلب به صورت متوسط تا درشت‌دانه دیده می‌شوند. دولومیت‌های دانه‌درشت با بافت شکری متشکل از بلورهای است که اندازه آنها از ۵۰ تا ۲۰۰ میکرون متغیر است (Ghazban et al., 1994). این دولومیت‌ها هیچ نظمی در ارتباط با ذخایر معدنی نشان نمی‌دهند در برخی مناطق معدنی در کمربالا و یا کمرپایین زون‌های کانی‌سازی یافت می‌شوند.

دولومیت‌های اسپاری در کمربالای غالب ذخایر یادشده به استثنای ذخیره گوشفیل که کمربالای آن مربوط به واحدهای سنگی گروه شمشک است، دیده می‌شوند. افزون‌بر این، در ذخیره مدفون نیز هیچ اثری از دولومیت اسپاری مشاهده نمی‌شود. اسپاری دولومیت در نتیجه جوان‌ترین رخداد دولومیتی‌شدن تشکیل شده است. بلورهای آنها توسعه‌یافتگی خوبی (بیشتر از چندین میلی‌متر) را به نمایش می‌گذارند (شکل ۶). آنها در برش‌های کراکل (Paradis et al., 2007) به عنوان پرکننده شکستگی‌ها و یا فضاها خالی به صورت سیمان یافت شده و در نور منشور نیکول خاموشی موجی را نشان می‌دهد که از این نظر مشخصات دولومیت زینی یا باروک را نمایش می‌دهند (Ghazban et al., 1994). دولومیت‌های اسپاری در سه حالت مختلف معرفی می‌شوند (شکل ۶). در برخی موارد در آنها هیچ اثری از کانی‌سازی مشاهده نمی‌شود (شکل ۶-A) و در دسته دوم کانی‌سازی اسفالریت (اغلب به رنگ روشن) در آنها دیده می‌شود (شکل ۶-B) و برخی دیگر حاوی بلورهای توسعه‌یافته پیریت (با قطر ۱ تا ۳ میلی‌متر) هستند (شکل ۶-C). به نظر می‌رسد که تشکیل اسپاری دولومیت نیز الگویی انتخابی داشته باشد. در برخی موارد آنها به صورت بخشی و یا کامل جایگزین فسیل‌ها و میکروفسیل‌ها (نظیر اریپتولین) شده‌اند. وجود اسپاری دولومیت نشانگر خوبی بر نزدیک‌شدن به زون‌های کانی‌سازی است.



شکل ۳. مقاطع زمین‌شناسی و موقعیت ذخایر ایرانکوه شمالی. A: مقطع AB و نمایش موقعیت ذخیره گوشفیل، B: مقطع CD و نمایش موقعیت ذخیره زون ۵ رومرم و C: مقطع EF و نمایش موقعیت ذخیره مدفون و تپه‌سرخ

**Fig. 3.** Geological cross section of North Irankuh deposits. A: Cross Section of AB, Showing Gushfil deposit stratigraphic position, B: Cross Section of CD, Showing Zone 5 Romarmar deposit, and C: Cross Section EF, Showing the stratigraphic position of Blind and Tapeh Sorkh deposits

است. ضخامت زون سلیسی از ۲ تا ۱۰ متر در ذخایر مختلف متغیر است. آلتراسیون سلیسی مربوط به کانی‌سازی ضمن کاهش توان بافر سنگ در نزدیکی ذخایر معدنی موجب کاهش

آلتراسیون سلیسی اغلب در هاله زون‌های کانی‌سازی و به صورت غشایی دربرگیرنده این زونه‌هاست (Paradis et al., 2007). شدت آلتراسیون سلیسی در کمربین زون‌های کانی‌سازی بیشتر

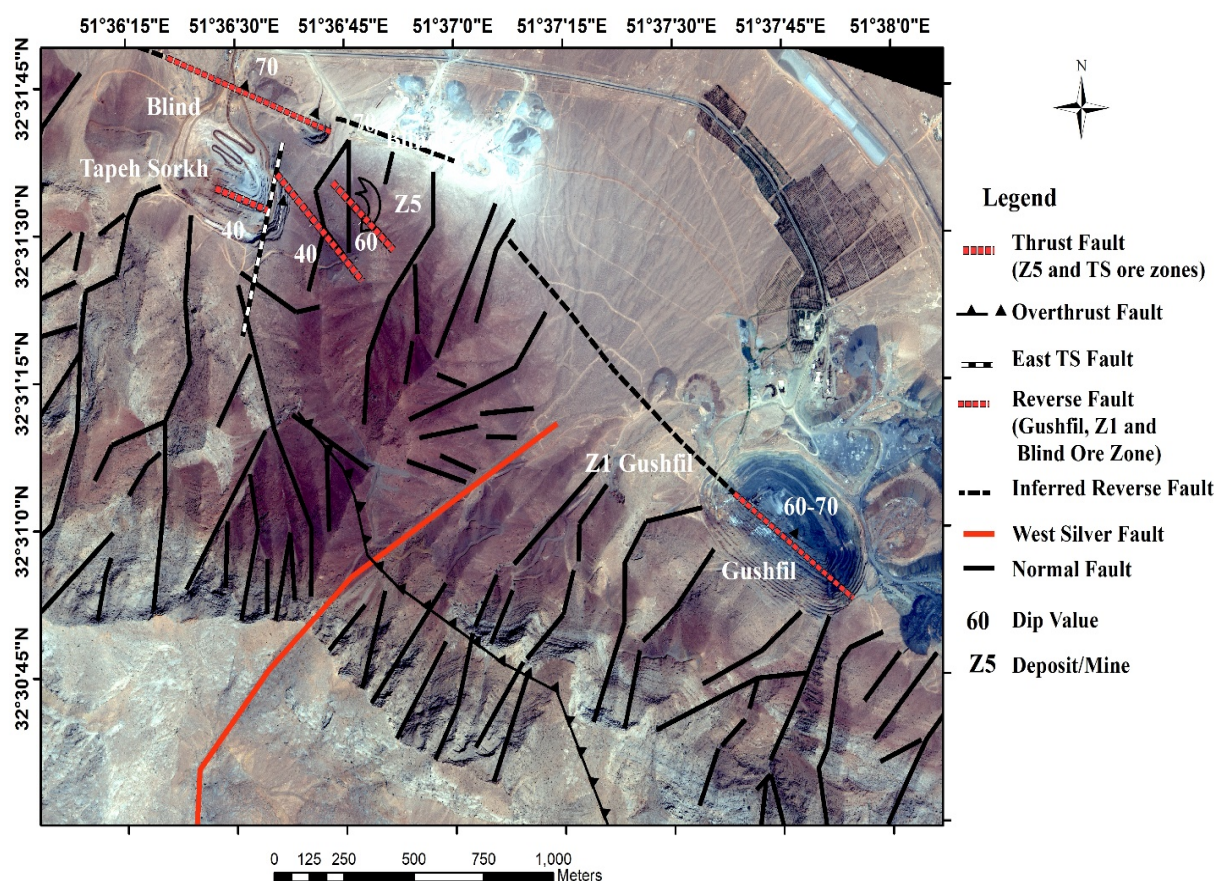
سولفیدی غالب هستند. کانی‌های اصلی اقتصادی ذخیره، اسفالریت و گالن به صورت پرکننده در فضای بین قطعات برشی، در شکستگی‌های متقاطع سنگ میزبان و به صورت دیسیمینه در فضای بین دانه‌های دولومیت‌ها در فضاهای در دسترس اولیه و ثانویه یافت می‌شوند. شکل ۷، اثرات کانی‌سازی در نمونه دستی و شکل ۸، کانی‌سازی در مقاطع میکروسکوپی نمونه‌های ذخایر گوشفیل (شکل‌های A-۷ و ۸-۸)، زون ۵ رومرمر (شکل‌های B-۷، E-۸ و F) تپه سرخ (شکل‌های C-۷ و D-۸)، ذخیره مدفون (شکل C-۸) و زون ۱ گوشفیل (شکل‌های D-۷ و B-۸) را نشان می‌دهند.

گسترش محلول‌های کانه‌ساز و در نتیجه کاهش عیار زون کانی‌سازی می‌شود (Leach et al., 1995).

مواد آلی، پیرویتومین (Anderson and Macqueen, 1982; Paradis et al., 2007) در مقادیر مختلف در ذخایر ایرانکوه شمالی در زون کانی‌سازی به همراه کانی‌های سولفیدی اصلی، اسفالریت و گالن، مشاهده می‌شود (شکل ۷-A). مقدار مواد آلی در ذخایر مختلف متفاوت است. بیشترین مقدار مواد آلی در ذخیره مدفون مشاهده می‌شود.

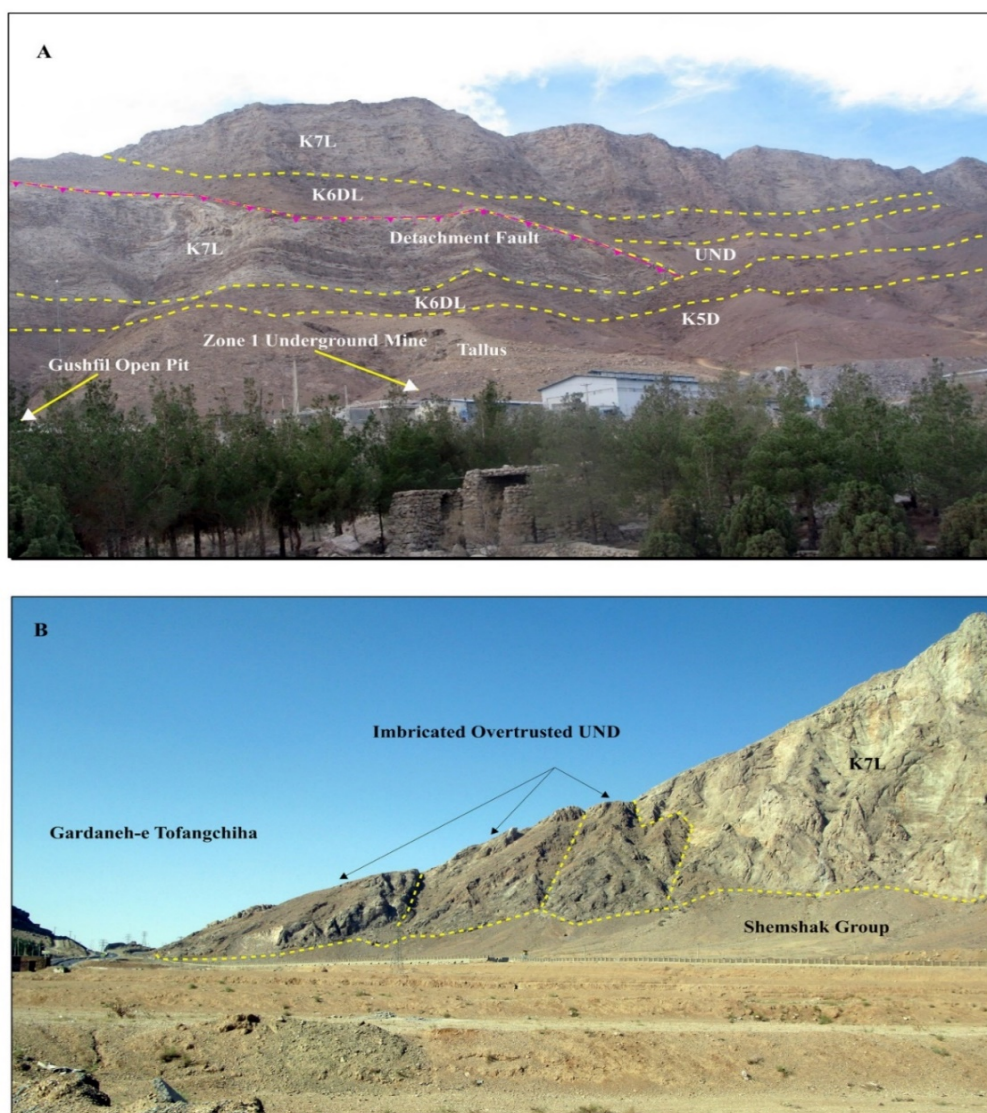
### کانی‌سازی

کانی‌سازی شامل اسفالریت، گالن و پیریت به عنوان کانی‌های



شکل ۴. نمایش خطواره‌ها و ساخت‌های زمین‌ساختی مرتبط با کانی‌سازی و جوان‌تر از آن در قلمرو ایرانکوه شمالی

Fig. 4. Lineaments and tectonic features related to mineralization and younger systems in North Irankuh



شکل ۵. نمایش رورانگی در ایرانکوه. A: رورانگی در بالای معدن گوشفیل و B: رورانگی و ساخت دوپلکس در منطقه گردنه

**Fig. 5.** Overtrusting in North Iranku. A: Overtrusting just above Gushfil deposit. B: Overtrusting and Duplex structure in Gardaneh area

اسفالریت و گالن به‌ندرت به‌صورت بین‌رشدی با همدیگر یافت می‌شوند. شواهد جایگزینی اسفالریت و دولومیت با همدیگر گزارش شده است در مقاطع صیقلی نازک نوع بلور دانه درشت اسفالریت زون‌بندی رنگی را به‌نمایش می‌گذارد که این موضوع گویای نوسان شدید در ترکیب محلول هیدروترمال حداقل در مقدار آهن در طی تشکیل بلورهای اسفالریت است (Ghazban et al., 1994).

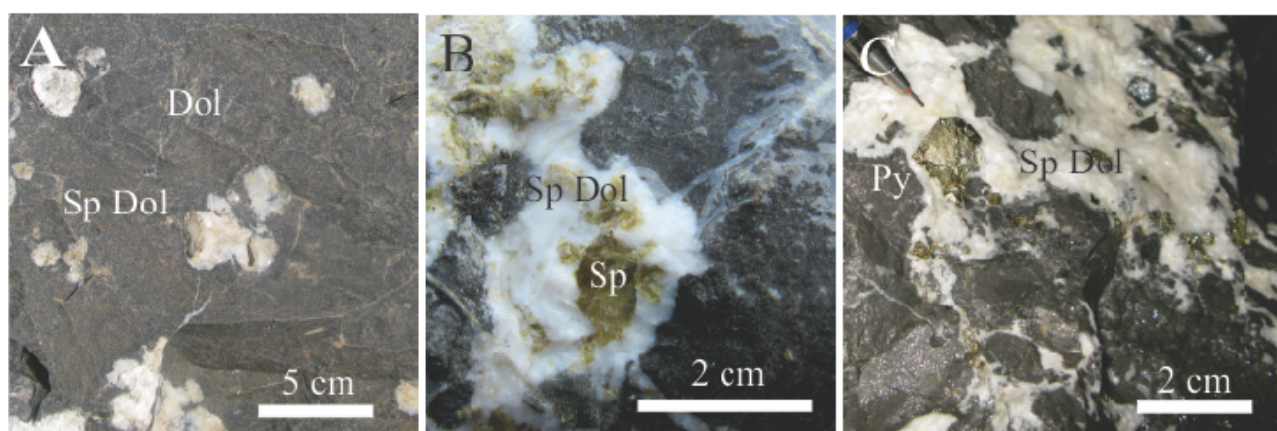
چنین استنباط می‌شود که هر پالس تشکیل اسفالریت با اسفالریت

کانی‌سازی سولفیدی اصلی شامل اسفالریت، گالن، پیریت و مارکاسیت است. کانه‌های باطله شامل باریت، دولومیت و کوارتز هستند. اسفالریت به‌عنوان فراوان‌ترین کانی سولفیدی اقتصادی به‌صورت بلورهای گرد شده و یا آگرگات از بلورهای با اندازه ۰/۵ تا ۱/۵ میلی‌متر مشاهده می‌شود. اسفالریت به‌صورت دیسیمینه با زونینگ مشخص شامل باندهای تیره و روشن به آسانی قابل تشخیص است. گالن در فضاهایی که از شکستگی بلورهای نسل اول اسفالریت به‌وجود آمده‌اند، مشاهده می‌شود.

تیره‌رنگ آغاز شده است و با پیشرفت رشد بلور با کاهش مقدار آهن در محلول تغذیه‌کننده، اسفالریت به‌رنگ روشن (شکل ۸-۸-E) تشکیل شده باشد. اسفالریت‌های جوان‌تر ناخالصی‌های آهن و مس کمتری دارند. گالن به‌صورت بلورهای ساب‌هدرال با اندازه ۴ میلی‌متر دیده می‌شود.

گالن همچنین به‌صورت تأخیری در درزه و شکستگی‌های متقاطع (شکل ۷-B) و همچنین بلورهای شکسته‌شده اسفالریت

و به‌صورت محصورکننده در پیرامون بلورهای اسفالریت (شکل ۸-A و F) نیز دیده می‌شود. همچنین ورود گالن به داخل شکستگی‌های کانی‌سازی پیریت مشاهده شده است (شکل ۸-F). مقدار پیریت در ذخیره زون ۱ گوشفیل به نسبت سایر ذخایر ایرانکوه شمالی افزایش شدیدی را نشان می‌دهد (شکل ۷-D و ۸-B). مقدار پیریت در این ذخیره ۲۰ درصد اندازه‌گیری شده است.



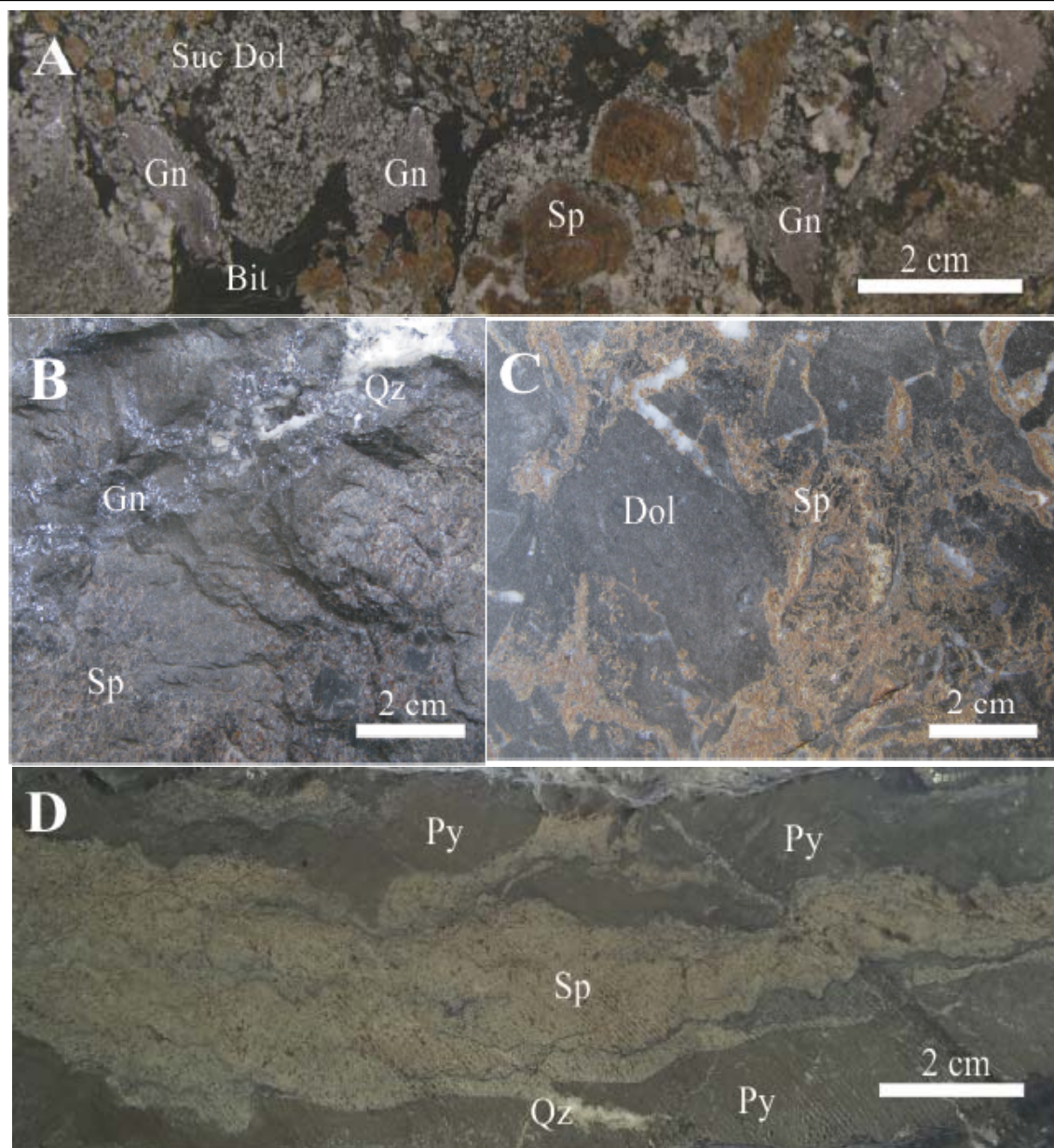
شکل ۶. انواع اسپاری دولومیت در ایرانکوه شمالی. A: اسپاری دولومیت بدون کانی‌سازی، B: اسپاری دولومیت با میزبانی اسفالریت رنگ روشن و C: اسپاری دولومیت با میزبان پیریت. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس‌شده است (Sp Dol: اسپاری دولومیت، Sp: اسفالریت، Py: پیریت، Dol: دولومیت).

**Fig. 6.** Different variety of Sparry dolomite in Irankuh. A: Barren sparry dolomite, B: Light sphalerite within sparry dolomite, and C: Pyrite within sparry dolomite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Sp Dol: Sparry dolomite, Sp: Sphalerite, Py: Pyrite, Dol: Dolomite)

### زون‌بندی جانبی-قائم و همیافت

در تعداد زیادی از زون‌های معدنی در افق‌های در حال استخراج به ازای حرکت در افق ارتفاعی مشخص کانی گالن در حاشیه زون‌های کانی‌سازی با عیار بیشتر به‌صورت غشایی زون‌های غنی از اسفالریت را در برمی‌گیرد. در زون‌بندی قائم نیز در بخش‌های بالایی هر زون کانی‌سازی، غلبه گالن به نسبت اسفالریت مشهود است که در افق‌های مشخصی این دو کانی با مقدار عیاری برابر دیده می‌شوند و با افزایش عمق، غلبه کانی اسفالریت رخ می‌دهد. علاوه بر این، در هر پنج ذخیره یال شمالی ایرانکوه در کنار همیافتی اسفالریت و گالن با همدیگر، کانه غالب اقتصادی، اسفالریت است. اما بر این قاعده استثنا وجود دارد. این ویژگی

منحصربه‌فرد مبنی بر غلبه و انحصار کانی‌سازی گالن فقط در رگه شماره ۱ معدن زون ۵ رومرمر مشاهده می‌شود. در این معدن رگه شماره ۱ با شیب ۶۰ درجه به سمت جنوب‌غربی حتی الگوی زمین‌ساختی متفاوتی را به نسبت سایر رگه‌های این معدن (همه رگه‌های دیگر این معدن در فضای زون گسله تراستی با شیب ۴۰ درجه مشاهده می‌شوند) نشان می‌دهد. این مشاهدات این فرض را تقویت می‌کند که کانی‌سازی روی و سرب در ایرانکوه در طی چندین پالس و اپیزود مختلف رخ داده باشد. چنین استنباط می‌شود که معبر تشکیل رگه V1 در زون ۵ رومرمر در زمان تشکیل فازهای اولیه نهشت اسفالریت وجود نداشته است.



شکل ۷. کانی‌سازی در نمونه‌های دستی ذخایر مختلف ایرانکوه شمالی، A: ذخیره گوشفیل، B: ذخیره زون ۵ رومرمر، C: ذخیره تپه‌سرخ و D: ذخیره زون ۱ گوشفیل. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Sp: اسفالریت، Gn: گالن، Py: پیریت، Qz: کوارتز، Dol: دولومیت، Suc Dol: دولومیت شکر، Bit: بیتومین).

**Fig. 7.** Mineralisation in hand specimen, A: Gushfil deposit, B: Zone 5 Romarmar, C: Tapeh Sorkh deposit, and D: Zone 1 Gushfil. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Sp: Sphalerite, Gn: Galena, Py: Pyrite, Qz: Quartz, Dol: Dolomite, Suc Dol: Succrose dolomite, Bit: Bitumen).

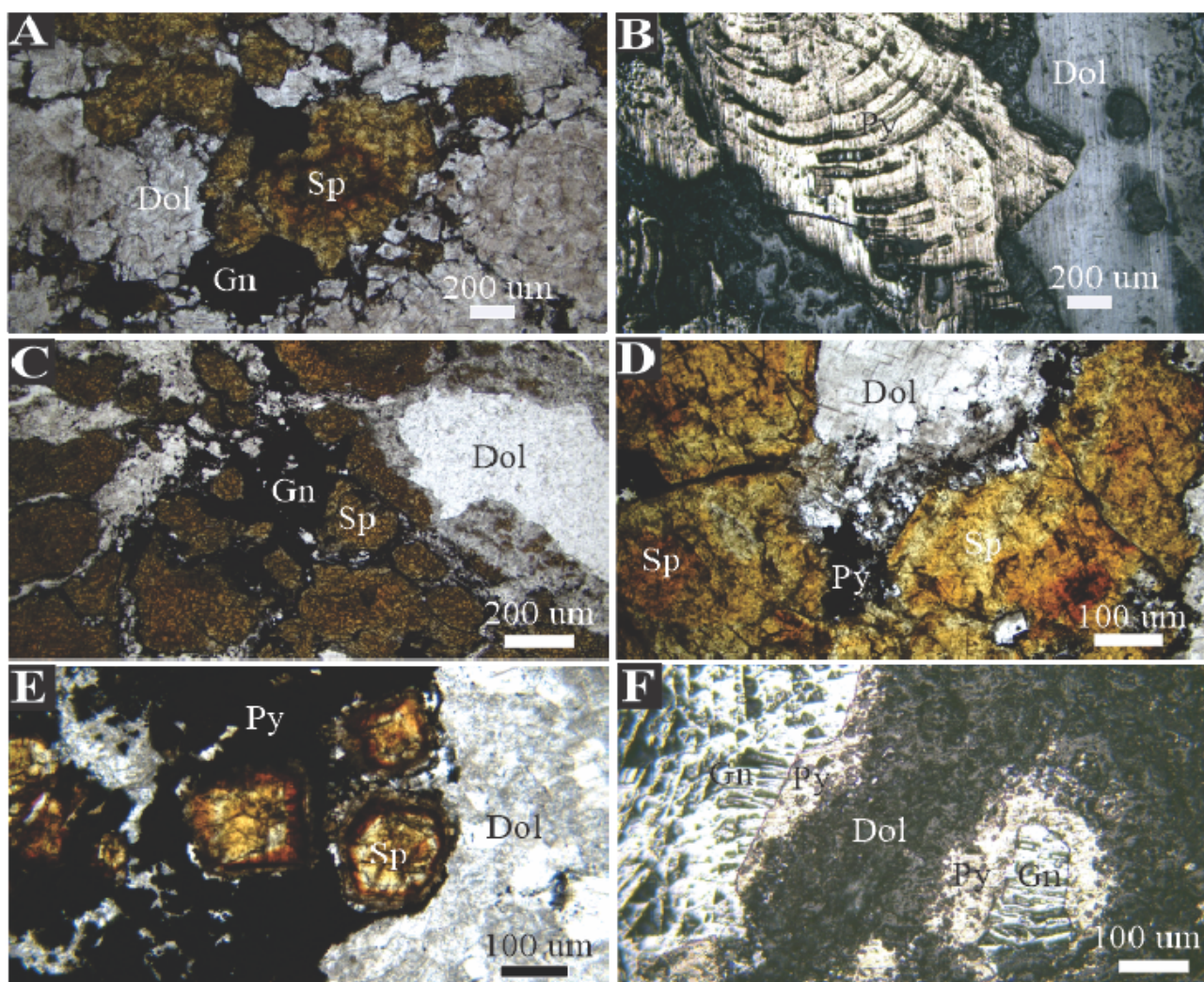
### تخلخل اولیه و ثانویه

از نظر تئوری می‌توان چنین استنباط کرد که هر نسل کانی‌سازی (مثلاً اسفالریت نسل اول در ایرانکوه)، کلیه فضاهای تخلخلی

شکل ۹، همیافت کانی‌های مختلف در ایرانکوه شمالی را بر اساس بررسی مقاطع میکروسکوپی و بررسی‌های میدانی انجام شده از معادن روباز و زیرزمینی مختلف نشان می‌دهد.

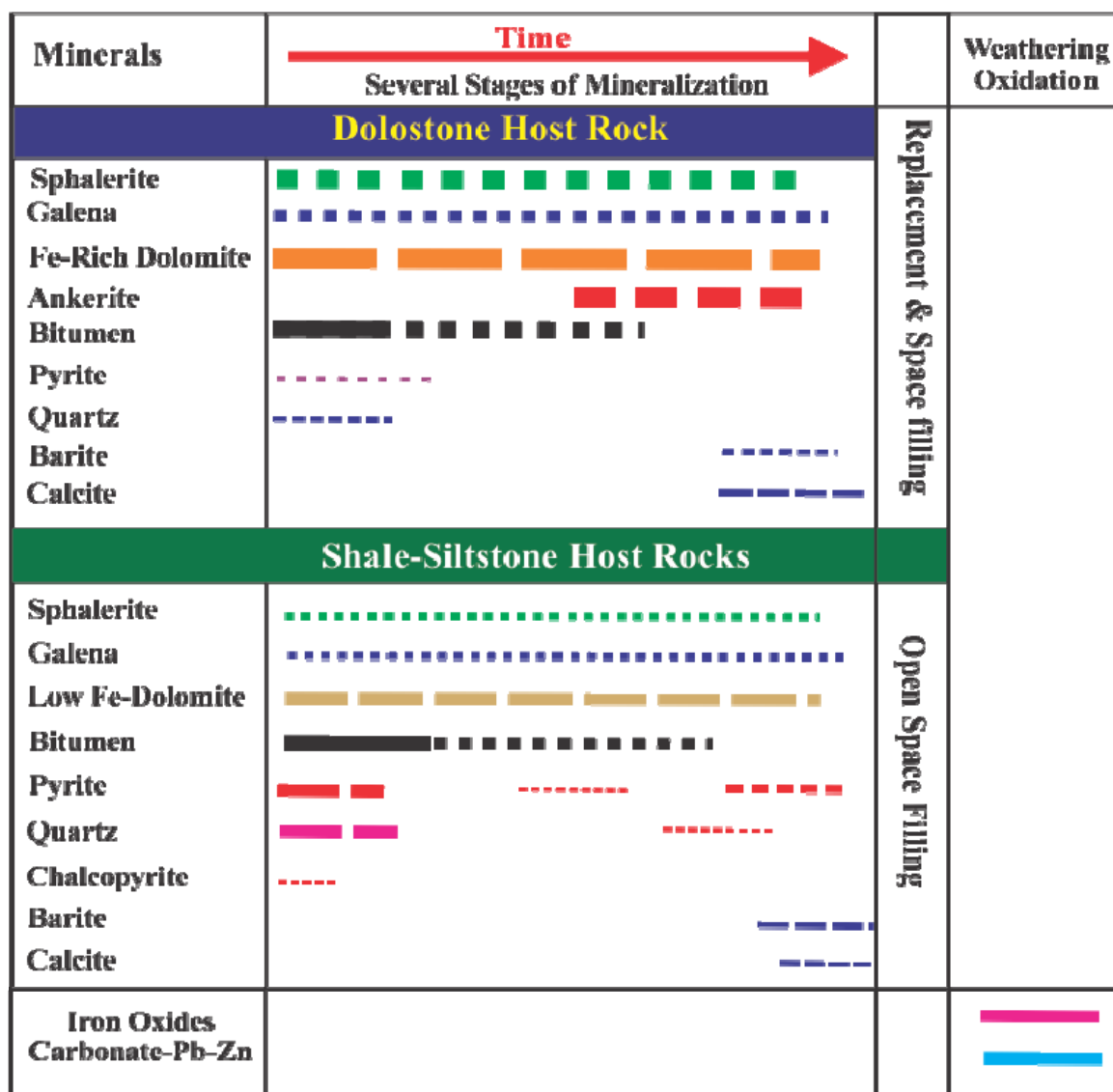
کانی‌سازی تأخیری گالن در رگچه‌هایی که نسل‌های نخست کانی‌سازی را قطع می‌کند، تشکیل شده‌است. در مقیاس بزرگ‌تر حتی رژیم سرب جداگانه در رگه V1 معدن زون ۵ رومرمر مشاهده می‌شود. بدین ترتیب تداخل ثانویه در نتیجه تشکیل برش انحلالی و یا معابر جدید در غنی‌شدن ذخایر MVT یال شمال ایرانکوه اهمیت ویژه‌ای دارد.

اولیه را در سنگ میزبان دولومیتی طی تشکیل کانی‌سازی پُر کند. بدین ترتیب، کلیه فضاها موجود مسدود شده است و هیچ فضایی برای ورود محلول‌های نسل‌های دیگر وجود نخواهد داشت. بررسی الگوی کانی‌سازی بر اساس کلیه ذخایر موجود در ایرانکوه شمالی و از جمله بررسی‌های میکروسکوپی و نمونه‌های دستی (شکل ۸-B) نشان می‌دهد که به وضوح



شکل ۸. تصاویر از مقاطع میکروسکوپی نمونه‌های ذخایر پنج‌گانه شمال ایرانکوه، A: ماده معدنی گوشفیل، نور عبوری، B: ماده معدنی زون ۱ گوشفیل، نور انعکاسی، C: ذخیره مدفون، نور عبوری، D: ذخیره تپه‌سرخ، نور عبوری، E: ذخیره زون ۵ رومرمر، نور عبوری و F: ذخیره زون ۵ رومرمر، نور انعکاسی. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Sp: اسفالریت، Gn: گالن، Py: پیریت، Dol: دولومیت).

**Fig. 8.** Photomicrograph of ore zones of Northern Irankuh deposits, A: Gushfil ore zone, transmitted light, B: Z1 Gushfil ore zone, reflected light, C: Blind deposit ore zone, transmitted light, D: Tapeh Sorkh ore zone, transmitted light, E: Ore zone of Zone 5 Romarmar, transmitted light, and F: Ore zone of zone 5 Romarmar, reflected light. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Sp: sphalerite, Gn: Galena, Py: Pyrite, Dol: Dolomite, Sp Dol: Sparry dolomite).



شکل ۹. همیافت در ذخایر ایرانکوه شمالی، اقتباس از کریم‌پور و همکاران (Karimpour et al., 2017)

Fig. 9. Paragenetic sequence of Irankuh mineralization (adopted from Karimpour et al., 2017)

می‌شود. این فضاها توسط گروه‌های گسله از قبیل گسل شمالی ایرانکوه و شاخه‌های منشعب از آن (ذخایری از قبیل گوشفیل، زون ۱ گوشفیل و مدفون)، یا توسط گسل‌های تراستی (ذخایر تپه‌سرخ و زون ۵ رومرمر) و یا ساخت‌های متقاطع متأثر از برش‌های انحلالی-ریزشی (کانی‌سازی تأخیری سرب و روی در تمام ذخایر) یافت می‌شوند که همگی آنها به موازات کشیدگی زون فولد-تراست زاگرس (Alavi, 1994). در این میان طول،

### ویژگی‌های اقتصادی، ژئومتری و زمین‌شناسی ذخایر ایرانکوه شمالی

عیار و تناژ پنج ذخیره/معدن یال شمالی ایرانکوه در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. کل ذخیره زمین‌شناسی این معادن ۱۳/۴ میلیون تن با عیار مجموع روی و سرب ۵/۵۳ درصد است (Karimpour et al., 2017). ژئومتری ذخایر روی و سرب ایرانکوه شمالی توسط فضاها و تخلخل مؤثر اولیه و ثانویه کنترل

شواهد و آثار گوسن، انتشار نمک‌های روی و رخنمون‌های باریت به همراه گالن و یا بدون آن به صورت فراگیر در تمام واحدهای دولومیتی منطقه شامل K3D, K5D و UND مشاهده می‌شوند که تصمیم‌گیری در مورد انتخاب مناطق مستعد در ایرانکوه شمالی را دشوار می‌سازد.

### بررسی‌های ژئوشیمیایی

در این بررسی فقط جنبه عملی بررسی‌های ژئوشیمیایی در ایرانکوه شامل بررسی شیمی کانی‌های اسفالریت و گالن و سپس دسته‌بندی عناصر موجود در هاله ژئوشیمیایی در ارتباط با منبع و یا منابع تولیدکننده این عناصر و بررسی دامنه تغییرات عناصر و در نهایت ارزش‌گذاری لایه اطلاعات ژئوشیمیایی در معرفی مناطق ناهنجاری که با حفاری مغزه‌گیری مورد آزمون قرار گرفته است، انجام خواهد شد.

### ژئوشیمی کانی اسفالریت

شکل ۱۲-A، دامنه تغییرات و مقدار میانه Cd, Cu, Ag, Mn و Fe را در کانی‌های اسفالریت مختلف ذخایر شمال ایرانکوه نشان می‌دهد. مقادیر میانه این عناصر به ترتیب ۴۱، ۷۲، ۱۲۶، ۱۴۳۰ و ۲۹۳۸۰ گرم در تن (ppm) محاسبه شده است. بیشترین مقدار آهن در اسفالریت‌های تیره‌رنگ ۵۸۰۷۰ گرم در تن اندازه‌گیری شده است. مقدار آهن در اسفالریت‌های روشن، کاهش شدید نشان می‌دهد (۳۷۰۰ گرم در تن).

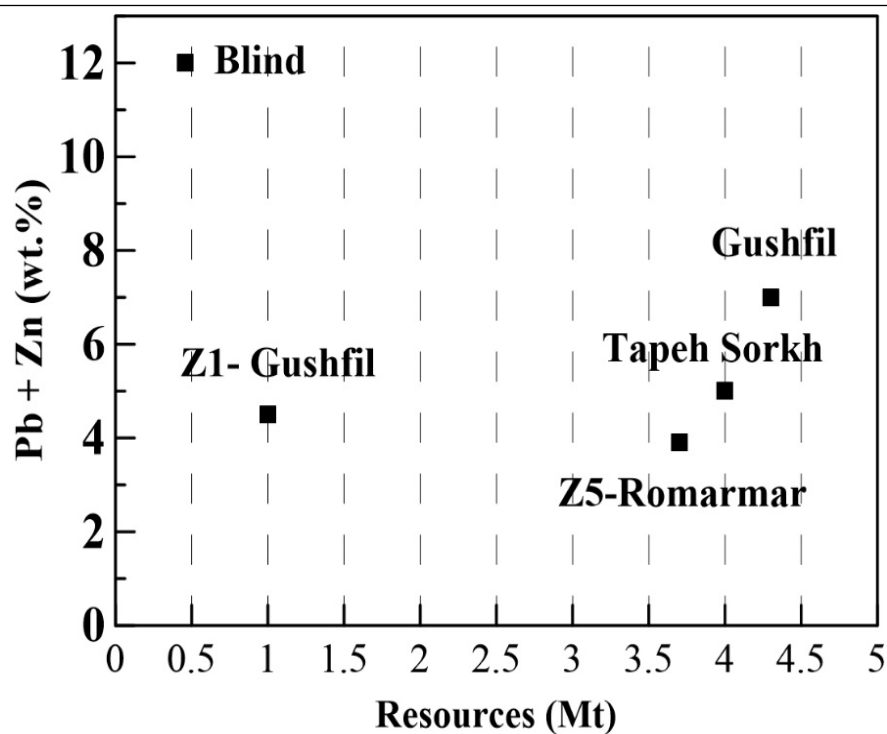
### ژئوشیمی کانی گالن

شکل ۱۲-B، دامنه تغییرات و مقدار میانه محتوای آهن، نقره و آنتیموان را در کانی‌های گالن ایرانکوه نمایش می‌دهد. کانی گالن در ایرانکوه مقادیر بالایی از نقره و آنتیموان را در شبکه خود جای داده است. این مقادیر به ترتیب از ۱۰۵ تا ۱۲۰۰ گرم در تن برای نقره و ۱۴۴ تا ۱۲۱۶ گرم در تن برای آنتیموان گزارش شده است.

توسعه عمقی و جهت شیب این ذخایر از جمله مشخصاتی است که در انتخاب سمت و سوی حفاری اکتشافی مغزه‌گیری اهمیت زیادی دارد. جدول ۱ و شکل ۱۱-A و B مشخصات ژئومتری ذخایر ایرانکوه شمالی را نشان می‌دهند. ذخایر ایرانکوه شمالی از نظر توسعه قائم نیز تفاوت نشان می‌دهند. نسبت طول به توسعه عمقی این ذخایر از ۰/۴۳ (ذخیره گوشفیل غربی) تا ۱۵ (ذخیره مدفون) متغیر است. بدین ترتیب ذخیره گوشفیل شرقی بیشترین کشیدگی عمقی را در میان ذخایر یال شمالی ایرانکوه نشان می‌دهد. بر اساس جهت شیب، ذخایر به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: ذخایر نوع گوشفیل، شامل گوشفیل شرقی، گوشفیل غربی، زون ۱ گوشفیل و ذخیره مدفون همگی به سمت شمال شیب دارند و مقدار شیب آنها از ۶۰ تا ۸۰ درجه متغیر است. در این دسته‌بندی ذخایر تپه‌سرخ و زون ۵ رومرمر در دسته‌ای جداگانه قرار می‌گیرند که جهت کلی شیب در آنها به سمت جنوب و مقدار شیب از ۳۰ تا ۴۰ درجه تغییر می‌کند. مقدار میانه در شکل ۱۰ برای ذخایر مختلف از افق ۱۵۰۰ تا افق ۱۶۳۵ متر (بالای سطح دریا‌های آزاد) متغیر است. بخش بالایی ذخیره مدفون با ارتفاع ۱۶۵۵ مشخص می‌شود. در این افق ارتفاعی در همه ذخایر شمال ایرانکوه مقدار ماده معدنی سولفور روی و سرب غلبه داشته و فرایند سوپرژن و اکسیداسیون ذخایر سولفور تأثیر کمی دارد. شناسایی این افق ارتفاعی در مراحل اکتشاف ذخایر سولفور روی و سرب با سنگ میزبان کربناته اهمیت زیادی دارد.

### مشاهدات سطحی

با توجه به اینکه معادن گوشفیل و تپه‌سرخ از دهه ۱۳۷۰ موضوع استخراج روباز بوده‌اند، در حال حاضر هیچ مدرکی از رخنمون‌های سطحی در این معادن وجود ندارد. بخش اعظم معدن زون ۱ گوشفیل و تمام قسمت‌های ذخیره مدفون زیر واحد تالوس قرار دارند و لذا پوشیده هستند. شواهد سطحی در محیط سنگی شامل معدن زون ۵ رومرمر و سایر مناطق موجود در محدوده مورد بررسی در نقشه زمین‌شناسی است (شکل ۱).



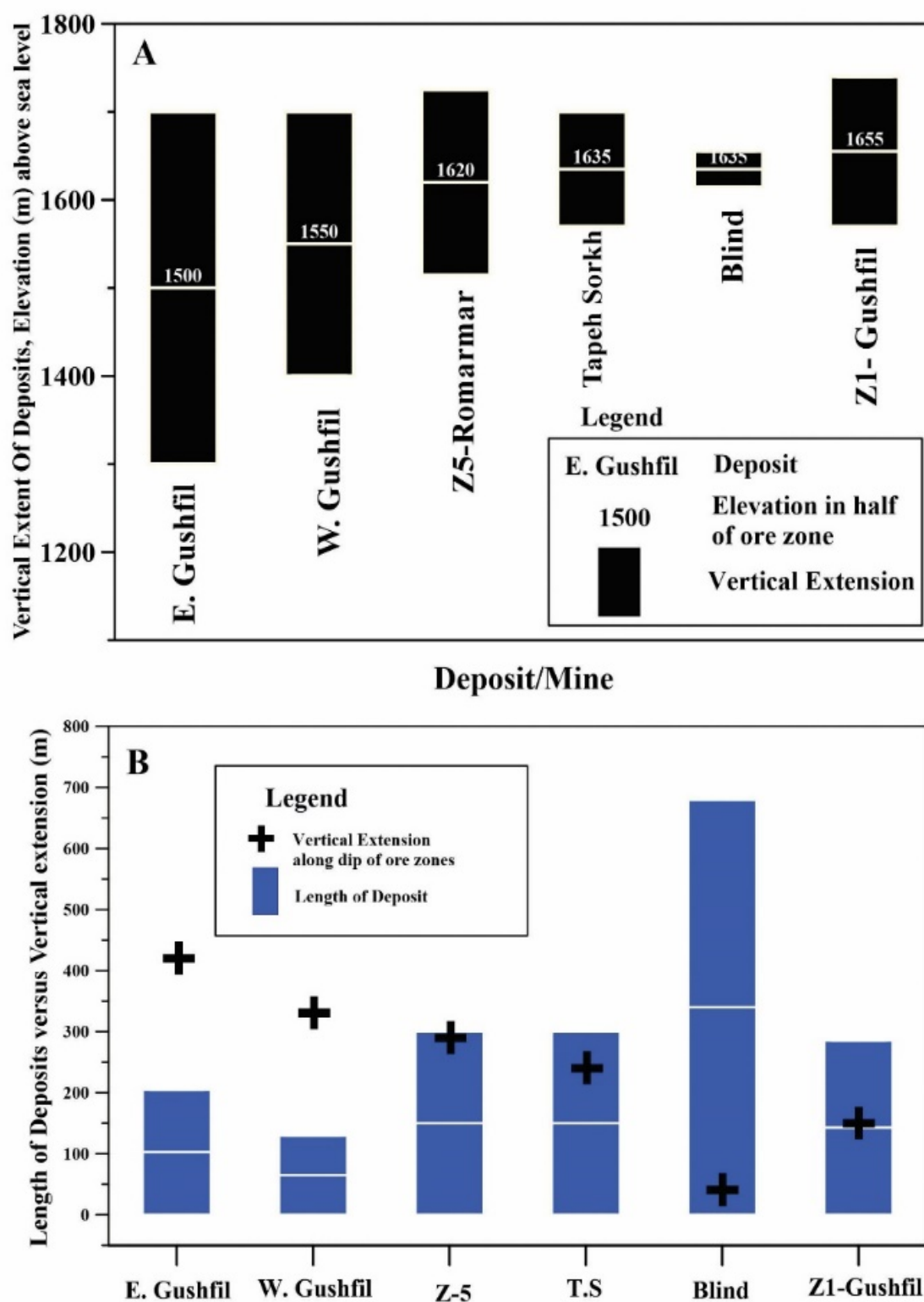
شکل ۱۰. عیار تناژ پنج ذخیره معدنی در ایرانکوه شمالی

Fig. 10. Grade/Tonnage in 5 Deposit in North Irankuh deposits/mines

جدول ۱. مشخصات ژئومتری ذخایر روی سرب قلمرو معدنی ایرانکوه شمالی

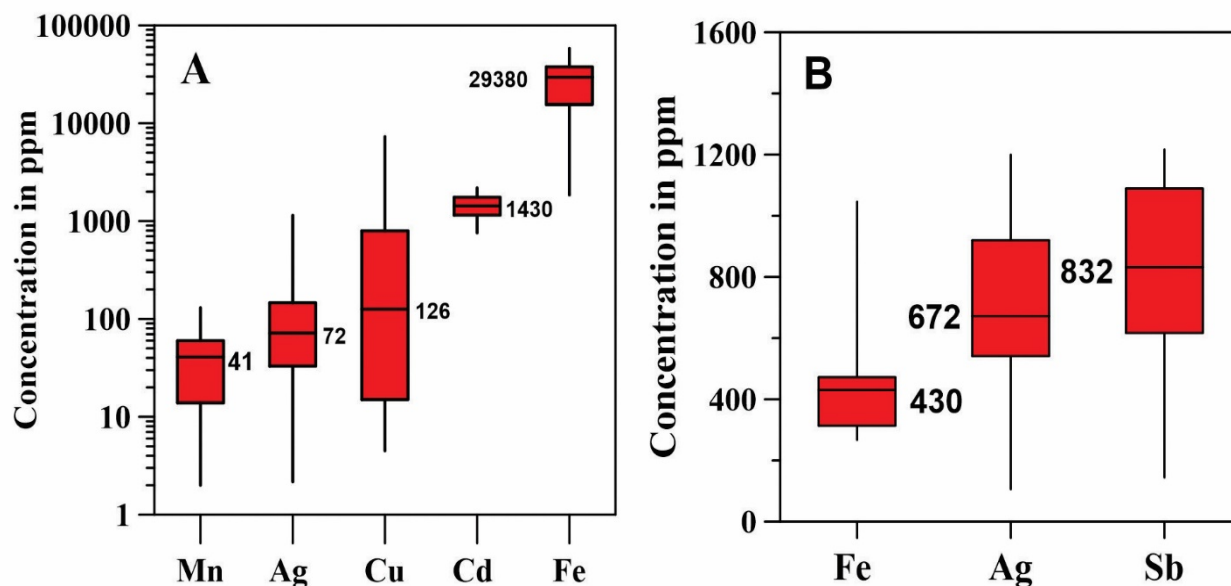
Table 1. Geometric specifications of Zinc and Lead deposits of North Irankuh district

| Deposit      | No of Zone       | Length (m) | Thickness (m) | Width (m) | Top Elevation | Bottom Elevation | L/W  |
|--------------|------------------|------------|---------------|-----------|---------------|------------------|------|
| East Gushfil | Single main body | 200        | 1-30          | 400       | 1700          | 1300             | 0.5  |
| West Gushfil | Single main body | 130        | 1-18          | 300       | 1700          | 1400             | 0.43 |
| Z1 Gushfil   | 3 Parallel Zone  | 200        | 1-6           | 170       | 1740          | 1570             | 1.2  |
| Blind        | Single main body | 600        | 1-18          | 40        | 1655          | 1615             | 15   |
| Tapeh Sorkh  | 2 Parallel Vein  | 200        | 1-10          | 130       | 1700          | 1570             | 1.6  |
| Zone 5       | 8 Parallel vein  | 280        | 1-10          | 175       | 1725          | 1550             | 1.6  |



شکل ۱۱. نمایش نسبت طول/عمق/پهنای ذخایر ایرانکوه شمالی، A: گسترش ذخایر در ارتفاع (بالتر از سطح دریا) و B: طول ذخایر در مقایسه با عمق ذخایر در امتداد مقدار شیب

**Fig. 11.** Length/Vertical extension/width of North Irankuh deposits, A: Elevation constrains and median height, and B: Length of deposits versus width



شکل ۱۲. دامنه تغییرات عناصر داخل شبکه کانی‌های اسفالریت و گالن ایرانکوه شمالی، A: دامنه تغییرات منگنز، نقره، مس، کادمیوم و آهن در کانی اسفالریت و B: دامنه تغییرات آهن، نقره و آنتیموان در کانی گالن (مقادیر عددی، میانه را نشان می‌دهد)

**Fig. 12.** Variation of elements in sphalerite and galena minerals of North Irankuh, A: Variation of Mn, Ag, Cu, Cd and Fe in sphalerite, and B: Variation of Fe, Ag and Sb in galena minerals (The numbers show median value)

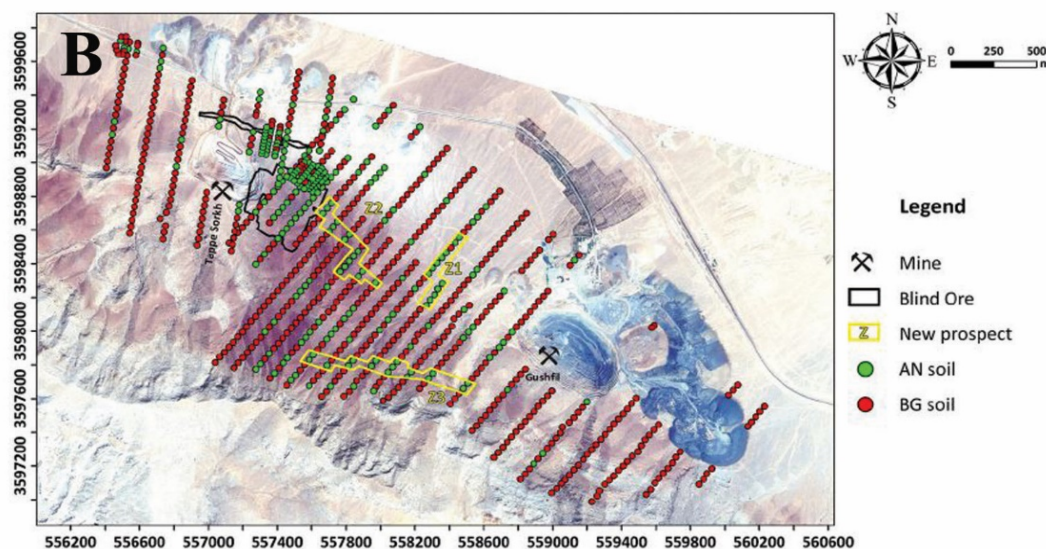
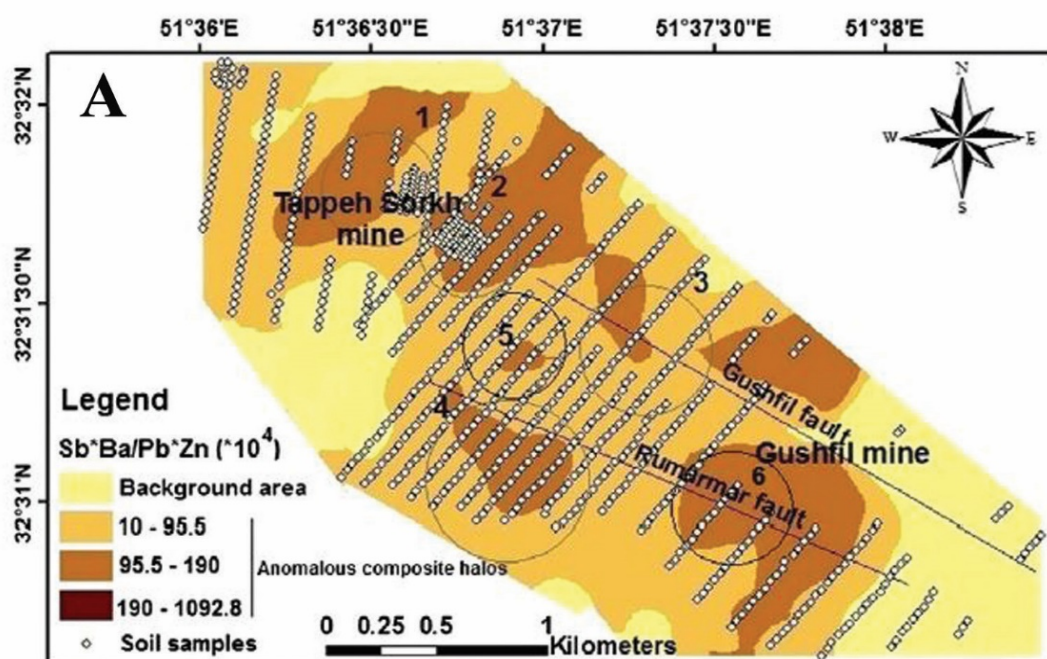
قرار گرفته و بر اساس روش یادگیری ماشین مقادیر زمینه با رنگ قرمز و مقادیر آنومالی با رنگ سبز معرفی شده است (شکل ۱۳- B). در این روش نقاط بیشتری در بیرون مناطق معرفی شده نیز به عنوان مناطق ناهنجار معرفی شده است که توسط این پژوهشگران به عنوان زون امیدبخش معرفی نشده است. مقایسه این دو روش نشان می‌دهد که در روش یادگیری ماشینی، مناطق ناهنجار در مقایسه با روش استفاده از روش ترکیبی حسینی دینانی و همکاران (Hosseini-Dinani et al., 2015) به صورتی آشکار، کاهش پیدا کرده است؛ اما با این وجود همچنان تعدد مناطق معرفی شده ناهنجار، تصمیم‌گیری در مورد انتخاب منطقه مستعد را دچار چالش می‌کند. بخش اعظم مناطق ناهنجاری در ارتفاعات ایرانکوه با استفاده از حفاری مغزه‌گیری مورد آزمون قرار گرفته است و نتایج منفی ارزیابی می‌شود. در این پژوهش هیچ‌گونه بررسی بیشتری مبنی بر جانمایی و تعبیر و تفسیر مجدد داده‌های اکتشافات ژئوشیمیایی ایرانکوه شمالی

### اکتشافات ژئوشیمیایی

بررسی‌های متعددی توسط پژوهشگران مختلف بر اساس تجزیه و تحلیل ۸۰۴ نمونه از افق B خاک ایرانکوه شمالی انجام شده است. جزئیات مربوط به محاسبه دقت آزمایشگاهی، دامنه تغییرات عناصر توسط حسینی دینانی و همکاران (Hosseini-Dinani et al., 2015) مورد بررسی قرار گرفته است و لذا به آنها اشاره نمی‌شود. این لایه اطلاعاتی به روش آماری (Grigorian and Adamyan, 2008a; Grigorian and Adamyan, 2008b)، روش استفاده از هاله ترکیبی عناصر (Hosseini-Dinani et al., 2015) و روش یاددهی ماشینی<sup>۱</sup> نظارت شده و نظارت نشده (Zekri et al., 2019a; Zekri et al., 2019b) تحلیل شده و در نهایت به معرفی چندین منطقه ناهنجاری منتهی شده است (شکل ۱۳- A و B). در روش یاددهی ماشین، جمعیت ژئوشیمیایی منطقه زون ۵ رومرمر به عنوان جمعیت معرف یک ذخیره شناخته شده، مورد استفاده

ژئوشیمیایی و در نهایت مقایسه پنج جمعیت ژئوشیمیایی در قلمرو ایرانکوه شمالی استفاده شده است.

انجام نشده است و از روش پیشنهاد شده توسط گرونسکی (Grunsky, 2010) مبنی بر شناسایی داده‌ها در مفهوم وسیع‌تری از درک منبع تولید عناصر، مهاجرت عناصر در هاله

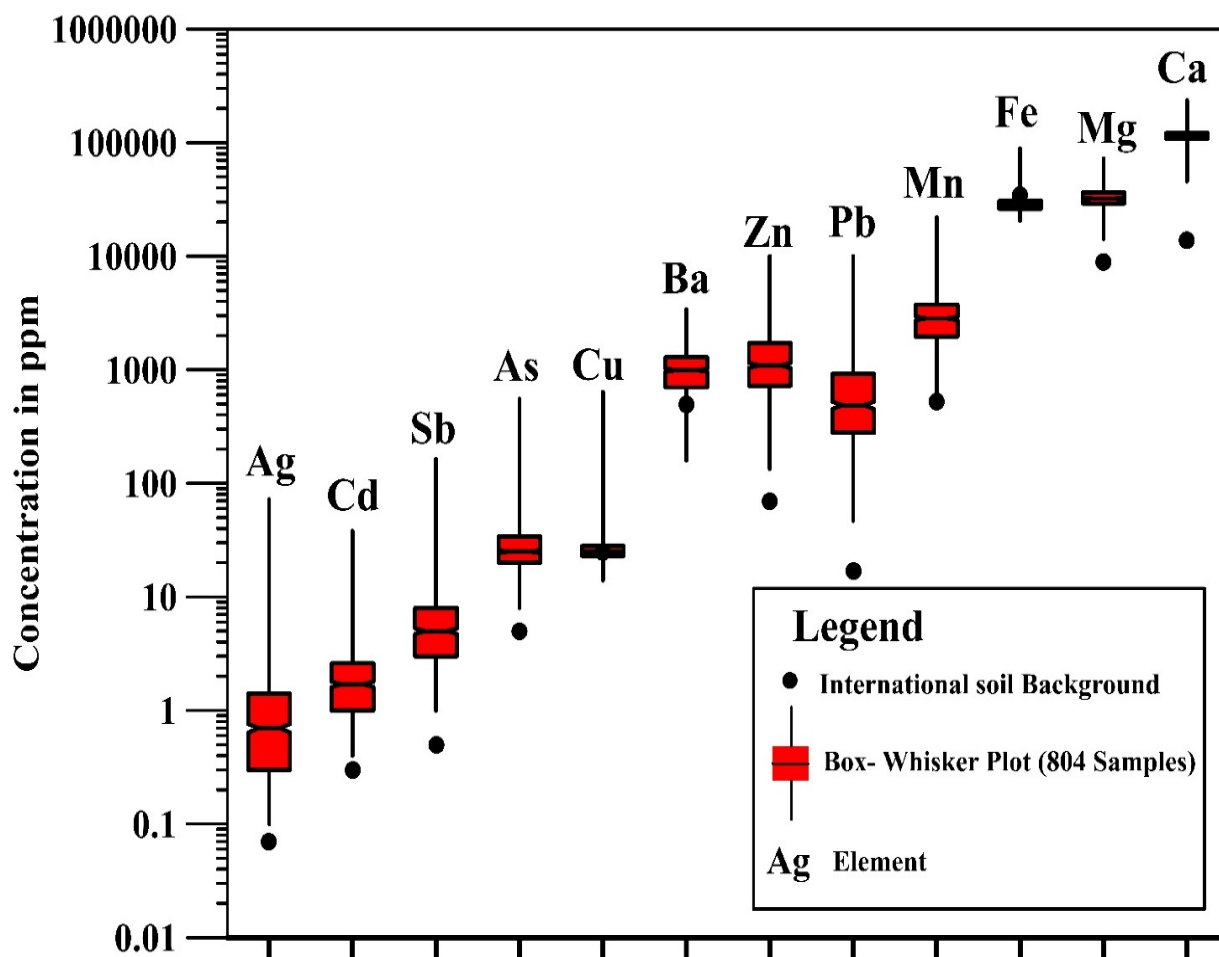


شکل ۱۳. نقشه بی‌هنجاری ژئوشیمیایی در قلمرو ایرانکوه شمالی، A: با استفاده از روش هاله‌های ترکیبی عناصر، اکتباس از حسینی‌دینانی و همکاران (Hosseini-Dinani et al., 2015) و B: با استفاده از روش یاددهی ماشین- نظارت‌شده برای دو مؤلفه اصلی، اکتباس از ذکری و همکاران (Zekri et al., 2019a)

**Fig. 13.** Geochemical anomalous map of North Irankuh district, A: Using composite element halo method (Hosseini et al., 2015), and B: Using feature extracted–selected SVM–RBF method for two principal components (Zekri et al., 2019a)

ژئوشیمیایی عمود بر منطقه ناهنجاری زون ۳ معرفی شده توسط ذکری و همکاران (Zekri et al., 2019a; Zekri et al., 2019b) و ذخیره شناخته شده زون ۵ رومرمر تهیه شده است (شکل ۱۸). در شکل‌های نمایش داده شده از دو پروفیل ژئوشیمیایی، مقدار صفر در محور X نشان‌دهنده موقعیت رخنمون سطحی ذخیره زون ۵ رومرمر و مقادیر مثبت و منفی بر روی این محور به ترتیب جهت جنوب غربی و شمال شرقی را نشان می‌دهد.

در این پژوهش سعی شده است که دلیل ناکارآمدی روش‌های اکتشاف ژئوشیمیایی در معرفی منطقه مستعد شناسایی و معرفی شود. در نخستین بار دامنه تغییرات عناصر در مجموع ۸۰۴ نمونه خاک منطقه با مقدار زمینه خاک بین‌المللی مقایسه شده است (شکل ۱۴). سپس دامنه تغییرات عناصر از قبیل نقره، کادمیوم، آرسنیک، مس، باریم، روی، سرب، منگنز، آهن، منیزیوم و کلسیم در پنج جمعیت ژئوشیمیایی منطقه (شکل ۱۵) شامل ذخایر شناخته شده و مناطق آنومالی به تفکیک مورد بررسی قرار گرفته است (شکل‌های ۱۶ و ۱۷). همچنین دو پروفیل

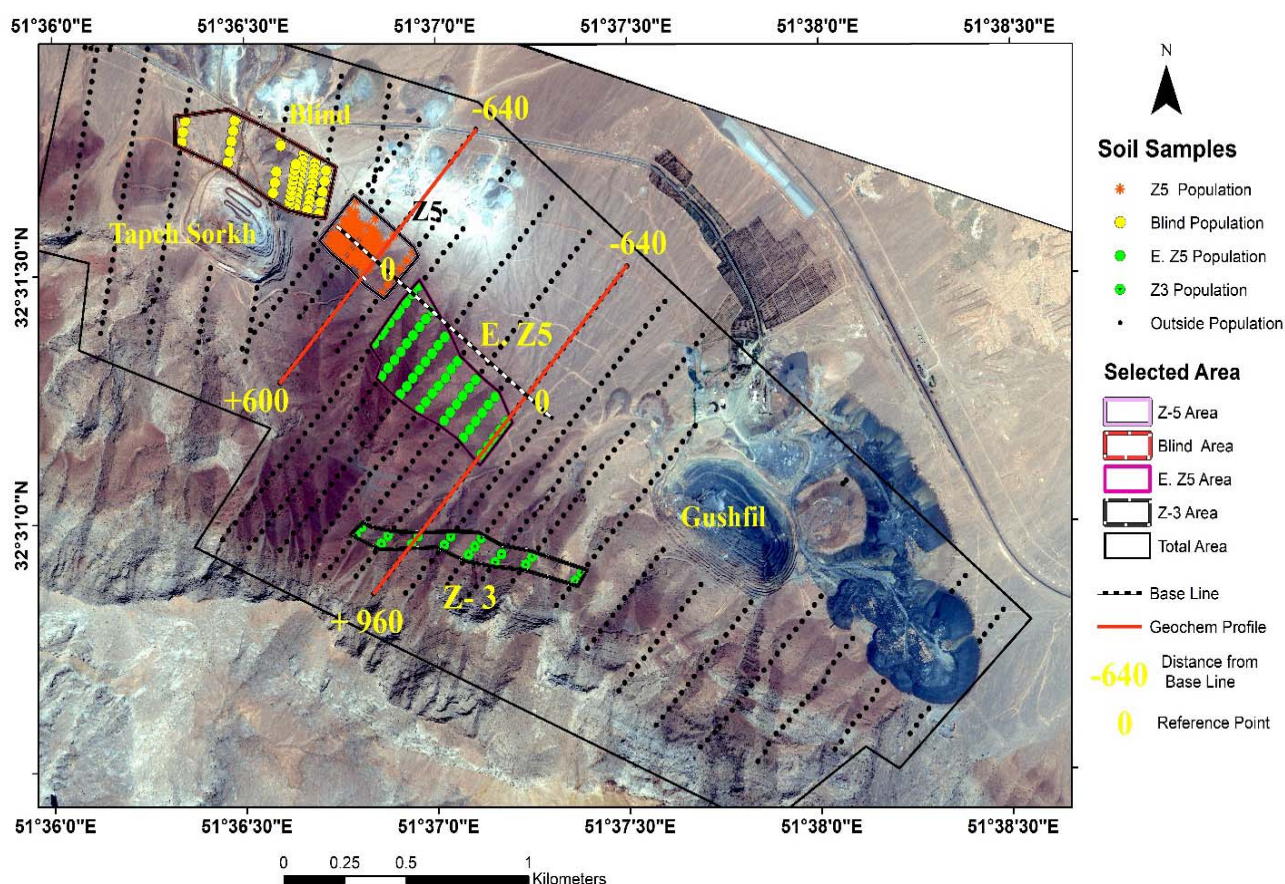


شکل ۱۴. نمایش دامنه تغییرات عناصر در افق خاک ایرانکوه شمالی و مقایسه دامنه آنها با مقدار زمینه خاک بین‌المللی (Reimann and De Caritat, 2012)

**Fig. 14.** Variation of geochemical elements in soil of North Irankuh compared by International background (Reimann and De Caritat, 2012)

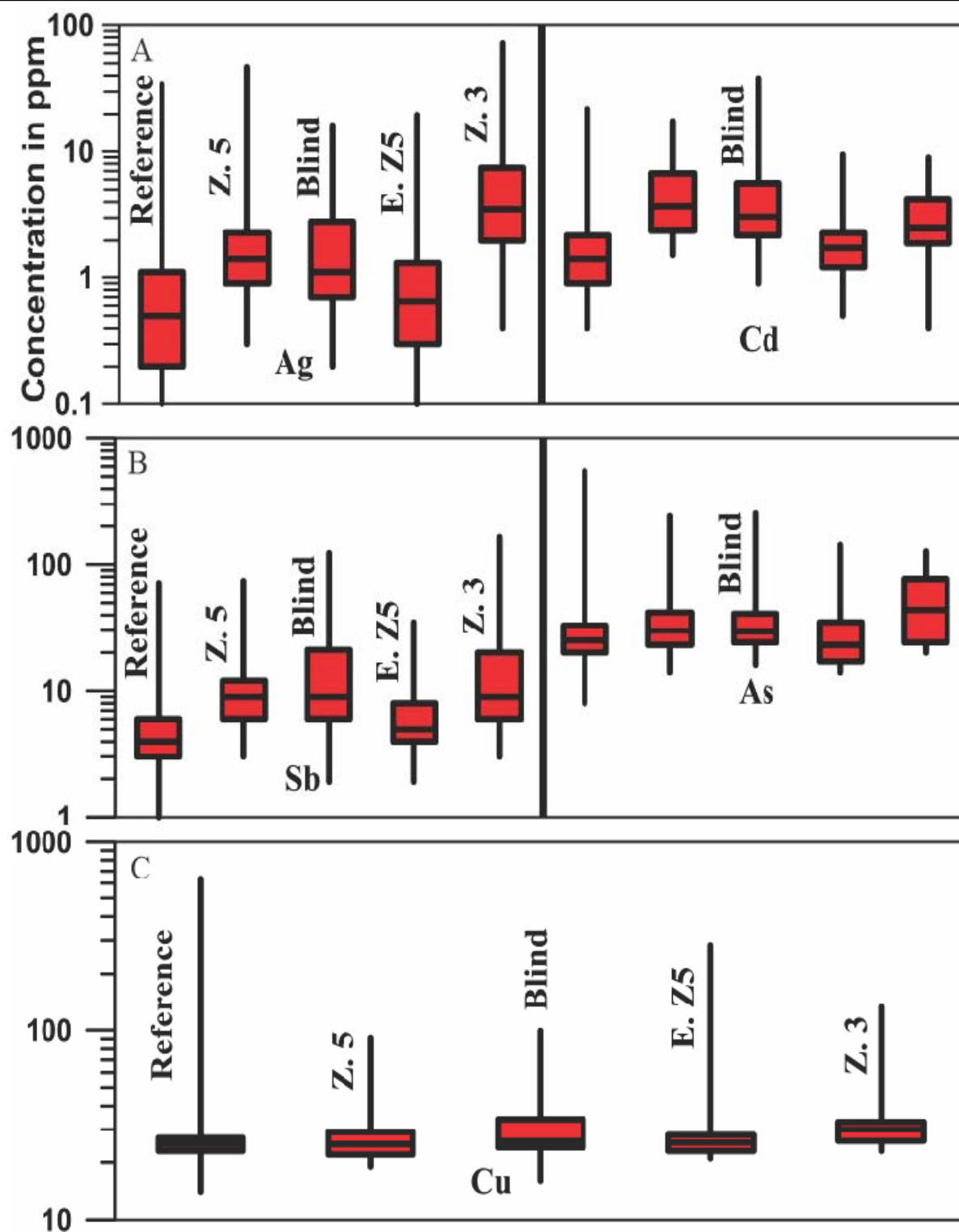
جهش در منطقه ناهنجاری زون ۳۳ (Zekri et al., 2019a; Zekri et al., 2019b) اتفاق افتاده است. در این پروفیل ژئوشیمیایی مقدار کلسیم، منیزیم، افت شدید و مقدار آهن افت نسبی را نشان می‌دهد (شکل ۱۸-B). در مقایسه با این پروفیل، مقطع ژئوشیمیایی منطقه زون ۵ رومرمر (شکل ۱۸-C) پنج بیشینه افزایش سرب را نمایش می‌دهد. در این منطقه افزایش مقادیر سرب و روی در هر نمونه از مقطع با افزایش کلسیم، آهن و منیزیم همخوانی نشان می‌دهد (شکل ۱۸-D). بیشینه مقدار سرب در فاصله ۳۰۰ متر از نقطه صفر اشاره به زون‌های کانی‌سازی فرعی دارد که به موازات رگه‌های اصلی کانی‌سازی قابل معدن‌کاری زون ۵ رومرمر یافت شده است.

از مقایسه دامنه تغییرات عناصر چنین بر می‌آید که مقدار میانه همه عناصر معرفی شده شامل عناصر اصلی مثل روی و سرب و عناصر ردیاب ناشی از تجزیه کانی‌های اسفالریت و گالن نظیر کادمیوم، نقره، آنتیموان و ... در جمعیت زون ۳ به نسبت جمعیت زون ۵ و مدفون افزایش نسبی نشان می‌دهد (شکل ۱۶-A، B و C، شکل ۱۷-A، B و C)، لذا هیچ‌گونه تعجبی وجود ندارد که این منطقه در گذشته توسط پژوهشگران به عنوان منطقه امیدبخش معرفی شده باشد. اما به نظر می‌رسد مقایسه مقدار منیزیم در این جمعیت‌های پنج‌گانه حتی به نسبت جمعیت منبع کاهش معناداری در منطقه زون ۳ نمایش می‌دهد (شکل ۱۷-C). دامنه تغییرات عنصر سرب در پروفیل ژئوشیمیایی منطقه زون ۳ (شکل ۱۸-A) با هفت نوبت جهش در نهایت بزرگ‌ترین



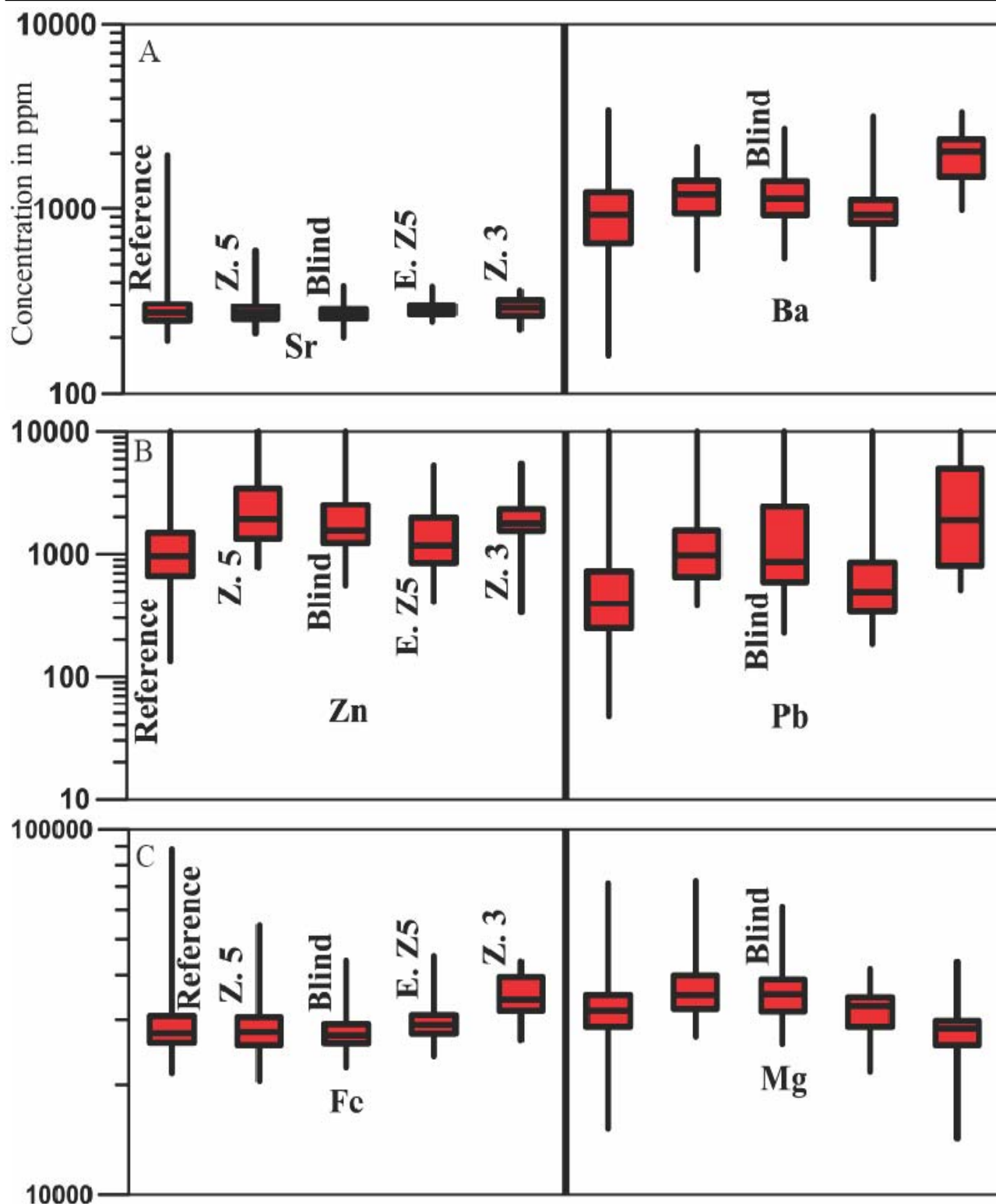
شکل ۱۵. پهنه‌بندی پنج جمعیت ژئوشیمیایی در ایرانکوه شمالی و موقعیت پروفیل‌های ژئوشیمیایی

Fig. 15. Zoning of 5 geochemical population and location of geochemical profiles in North Irankuh



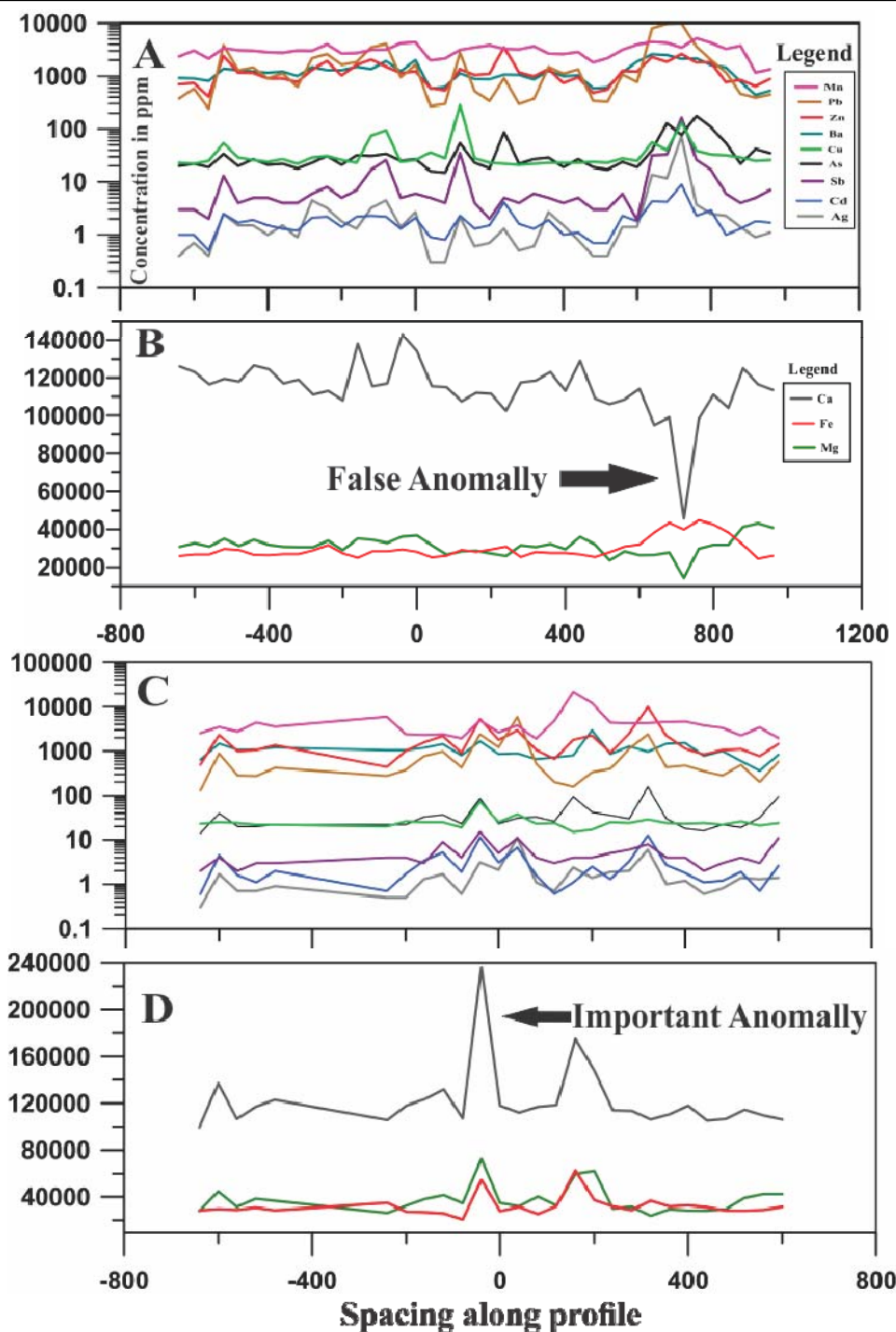
شکل ۱۶. دامنه تغییرات عناصر ردیاب در ۵ جمعیت ژئوشیمیایی منتخب در ایرانکوه شمالی، A: تغییرات نقره و کادمیوم، B: آنتیموان و آرسنیک و C: تغییرات مس

**Fig. 16.** Variation of geochemical trace elements in 5 populations of Irankuh districts, A: variation of Ag and Cd, B: Variations of Sb and As, and C: Variations of Cu



شکل ۱۷. دامنه تغییرات عناصر فرعی، اصلی و سنگ میزبان در ۵ جمعیت ژئوشیمیایی منتخب در ایرانکوه شمالی، A: تغییرات استرانسیوم و باریم، B: تغییرات روی و سرب و C: تغییرات آهن و منیزیوم

**Fig. 17.** Variation of minor, principal and host rock geochemical elements in 5 populations of Irankuh districts, A: Variations of Sr and Ba, B: Variations of Zn and Pb, and C: Variations of Fe and Mg.



شکل ۱۸. دامنه تغییرات عناصر اصلی، ردیاب و سنگ میزبان در دو پروفیل ژئوشیمیایی زون ۳ و زون ۵ رومرمر در ایرانکوه شمالی، A: دامنه تغییرات عناصر ردیاب و اصلی در منطقه زون ۳ رومرمر، B: دامنه تغییرات عناصر منیزیوم، آهن و کلسیم در منطقه زون ۳ رومرمر، C: دامنه تغییرات عناصر ردیاب و اصلی در پروفیل ژئوشیمیایی زون ۵ رومرمر و D: دامنه تغییرات عناصر منیزیوم، آهن و کلسیم در زون ۵ رومرمر

**Fig. 18.** Variation in basic and trace elements in two selected profile passing through area Zone 3 and Zone 5 Romarmar in North Iranku, A: Variations in trace and basic elements geochemical profile of Zone 3, B: Variations in Mg, Fe and Ca in the Zone 3, C: Variations in trace and basic elements geochemical profile of the Zone 5, and D: Variations in Mg, Fe and Ca in the Zone 5

## اکتشافات ژئوفیزیکی

داده‌های شارژپذیری در قلمرو معدنی ایرانکوه شمالی همانند داده‌های اکتشافات ژئوشیمیایی، ناهنجاری‌های متعددی را نشان می‌دهند (شکل ۱۹). مقدار زمینه در ناهنجاری‌های شارژپذیری از ۲/۵ تا ۱۷/۵ میلی‌ولت بر ولت متغیر است (شکل ۱۹-A). مقدار IP بر روی ذخایر شناخته‌شده از قبیل گوشفیل، زون ۱ گوشفیل، مدفون، تپه‌سرخ و زون ۵ رومرمر از مقدار ۲۷/۵ میلی‌ولت شروع می‌شود. بیشترین مقدار شارژپذیری که بر روی این ذخایر ثبت شده است، به ترتیب ۵۲/۵، ۴۷/۵، ۲۷/۵، ۳۷/۵ و ۳۲/۵ میلی‌ولت بر ولت است. در پیرامون معادن و ذخایر شناخته‌شده، مقادیر بالایی از شارژپذیری در شمال نقشه بر روی واحد شیلی گروه شمشک مشاهده می‌شود. افزون‌بر این در جنوب نقشه چهار ناهنجاری با نام‌های RM-Z1، RM-Z2، RM-Z3 و RM-Z4 مشاهده می‌شود (شکل ۱۹-B). ناهنجاری‌های مشخص شده بر اساس شارژپذیری واحدهای زمین‌شناسی به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند:

الف) ناهنجاری‌های دسته نخست در واحد شیلی گروه شمشک قرار می‌گیرند؛

ب) دسته دوم آنومالی‌های IP در واحد K3D قرار می‌گیرند و ج) دسته سوم در واحد K5D قرار می‌گیرند.

بی‌هنجاری‌هایی که در واحد شیلی قرار می‌گیرند منشعب از رسائایی کانی‌های سولفیدی نظیر پیریت هستند. ناهنجاری‌های دسته دوم با موقعیت ذخایر شناخته‌شده مثل گوشفیل، زون ۱ گوشفیل، ذخیره مدفون، تپه‌سرخ و زون ۵ رومرمر انطباق نسبتاً خوبی را به‌نمایش می‌گذارند. مقدار IP بر روی ذخیره تپه‌سرخ در مقایسه با زون ۵ رومرمر شدت و توسعه بیشتری را به‌نمایش می‌گذارد. با توجه به اینکه این دو ذخیره از نظر موقعیت قرارگیری در سنگ میزبان و کانی‌شناسی تشابه زیادی دارند، تأثیر موقعیت سقف ذخیره نسبت به توپوگرافی مبنی بر پیدایش ذخیره زون ۵ رومرمر در عمق بیشتر به نسبت تپه‌سرخ قابل ذکر است. تأثیر موقعیت قرارگیری ذخیره به نسبت توپوگرافی در بخش غربی ذخیره مدفون نیز به خوبی آشکار است. این ذخیره

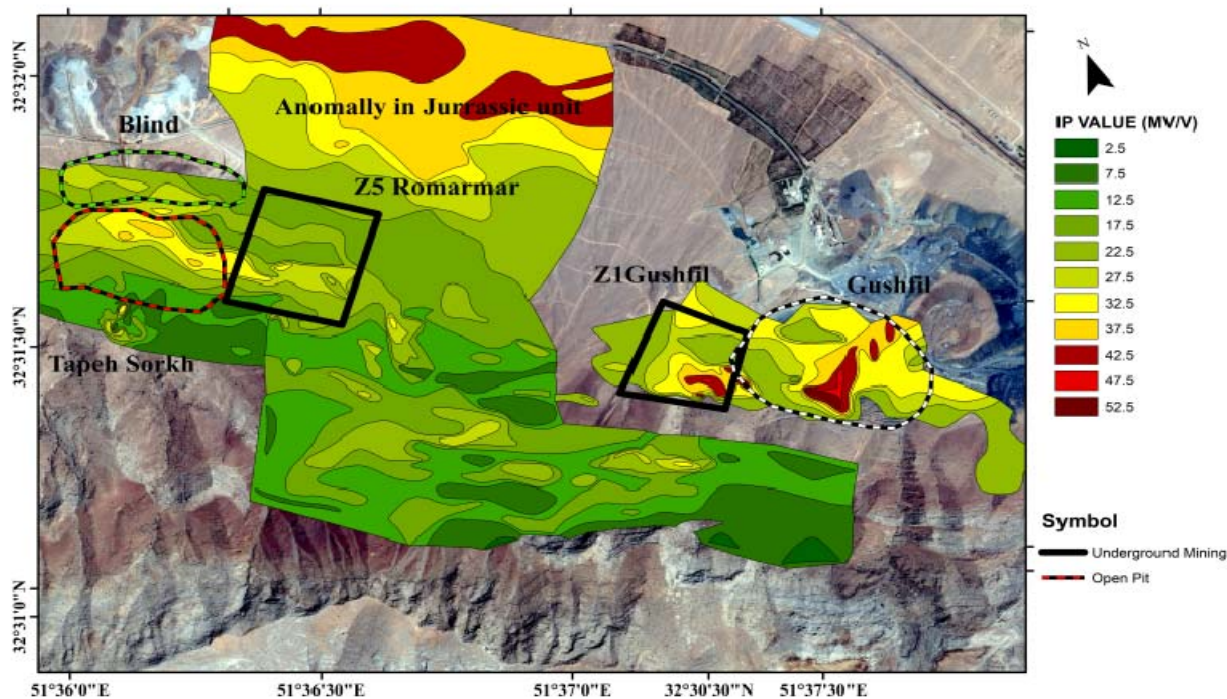
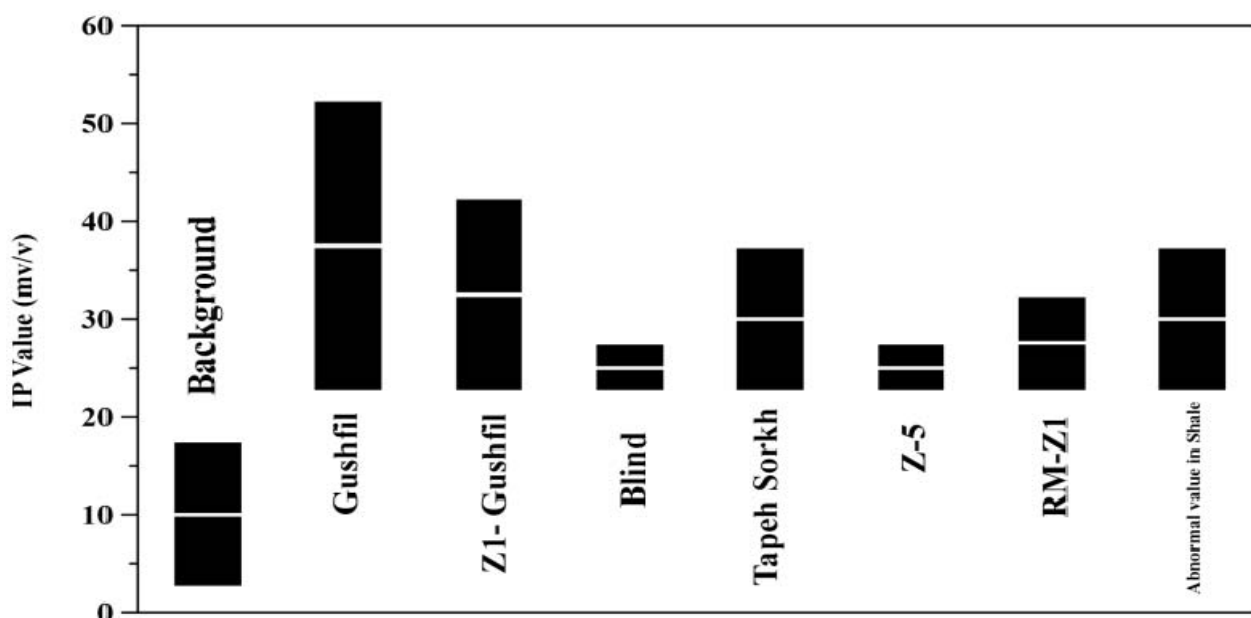
در بخش غربی به نسبت بخش شرقی بالاآمدگی نشان می‌دهد. تأثیر عمق ذخیره در مدل مفهومی در شکل ۲۰ نشان‌داده شده است. همچنین، ذخیره زون ۱ گوشفیل با بیش از ۲۰ درصد پیریت در دسته دوم مناطق ناهنجار قرار می‌گیرد. بدین ترتیب، بی‌هنجاری در داده‌های شارژپذیری در برداشت‌های سطحی تحت تأثیر کانی‌شناسی ذخیره (شامل مقدار کانی‌های سولفیدی نظیر گالن و پیریت) و عمق ذخیره نسبت به سطح زمین است. دسته سوم آنومالی‌ها در واحد K5D قرار می‌گیرند و با استفاده از حفاری مغزه‌گیری مورد کاوش قرار گرفته‌اند. این دسته از آنومالی‌ها به کلی بدون ذخیره اقتصادی قابل توجه هستند. از جمله ناهنجاری‌های مشخص شده در داخل دایره قرمز به توجه بیشتری نیاز دارد. این منطقه با منطقه زون ۳ بی‌هنجاری ژئوشیمیایی (Zekri et al., 2019a; Zekri et al., 2019b) یکسان است. به عبارت دیگر، در هر دو روش اکتشاف ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی این منطقه مستعد معرفی شده است.

## بحث

تغییرات زیادی در ژئومتری، کانی‌شناسی و سنگ‌های درون‌گیر در پنج ذخیره منتخب روی و سرب سولفیدی با سنگ میزبان کربناته در قلمرو معدنی ایرانکوه شمالی مشاهده می‌شود. این تغییرات از نحوه تکوین ذخایر MVT شامل ژنتیک محلول، دمای تشکیل، معابر زمین‌ساختی، فازهای مختلف کانی‌سازی روی و سرب، سیستم هیدرولوژی منطقه، جهت حرکت محلول، واکنش با سنگ میزبان، عمق نفوذ محلول‌های دولومیت‌ساز و شوره‌های حمل‌کننده فلزات روی و سرب نشأت گرفته است. هرکدام از عوامل یادشده به‌صورت طبیعی بر روی دامنه تغییرات در بررسی‌های سطحی، سیگنال‌های ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی تأثیر می‌گذارند. فراوانی دولومیت در داخل گستره‌های معدنی و پیرامون آنها، نشانه‌ای مثبت بر توانایی کانی‌سازی قلمروهای معدنی تلقی شده و تمرکز عملیات اکتشافی در ماورای گسترش جانبی لایه‌های حاوی ماده معدنی به‌عنوان کلید اصلی معرفی شده است (Sangster, 1995). اما اطلاعات اکتشافی

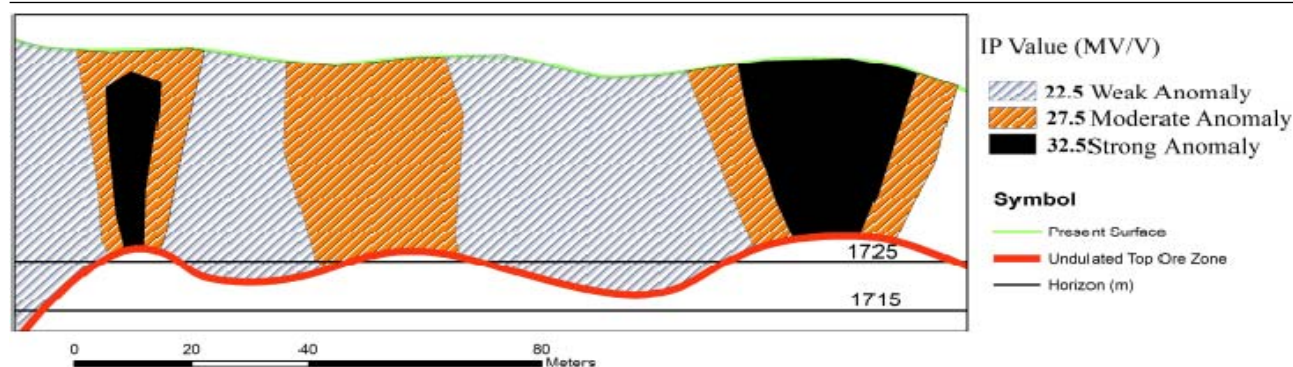
سنگی K3D تحت‌عنوان دولومیت زیرین، میزبان همه پنج ذخیره شناخته‌شده در ایرانکوه شمالی است.

نشان می‌دهد که قلمرو معدنی ایرانکوه شمالی همه واحدهای دولومیتی ارزش یکسانی برای میزبانی ذخایر باارزش روی و سرب ندارند. واحد



شکل ۱۹. نقشه تغییرات شارژپذیری و مقادیر IP در ایرانکوه شمالی، A: مقدار تغییرات شارژپذیری زمینه و دامنه تغییرات برای ذخایر شناخته‌شده و دیگر نواحی ناهنجار و B: نقشه تغییرات شارژپذیری در قلمرو ایرانکوه شمالی

**Fig. 19.** Chargeability and IP value map of North Irankuh, A: Background and variation of IP in known deposits and other anomalous areas, and B: Chargeability map of North Irankuh district



شکل ۲۰. الگوی مفهومی از موقعیت ذخیره به نسبت توپوگرافی و تأثیر آن در مقدار شارژپذیری در ایرانکوه شمالی

Fig. 20. The conceptual model for effect of the distance of deposit to surface on the measured IP value in North Irankuh

سرب (شکل ۱۰) است.

افزایش پیریت در ذخایر MVT به بالا بودن دمای تشکیل نسبت داده شده است (Marie et al., 2001; Marie and Kesler, 2000; Sumner, 1976; Bishop and Emerson, 2007; Paradis et al., 1999).

برش‌های انحلالی و تشکیل کانی‌سازی در درزه و شکستگی‌های متقاطع به‌عنوان ویژگی غالب ذخایر MVT دنیا گزارش شده است (Ohle, 1959; Ohle, 1985; Tompkins et al., 1994; Sangster, 1995; Bouabdellah et al., 2010; Leach et al., 1996). بررسی‌های پژوهشگران مختلف نشان می‌دهد که در طی تشکیل ذخایر MVT با توجه به کاهش pH ضمن افزایش اسیدیته محیط، انحلال سنگ میزبان صورت گرفته است و در نتیجه برش‌های انحلالی تشکیل می‌شوند (Bouabdellah et al., 1996; Corbella et al., 2004; Leach et al., 2010). بنا به نظر آندرسون نهشت کانی‌های سولفیدی موجب آزادشدن یون هیدروژن و اسیدی‌شدن محیط می‌شود (Anderson, 1983). این فرایند در معادله زیر نشان داده شده است:



در مدل دیگری پژوهشگران چنین مطرح می‌کنند که اختلاط شورابه اسیدی با آب زیرزمینی در موقعیت مکانی که هر دو از

این موضوع در مناطق دیگری از دنیا مثل ذخایر ایرلندی مبنی بر وجود بخش اعظم کانی‌سازی قابل معدن‌کاری در واحد زیرین نیز گزارش شده است (Hitzman and Beaty, 1996). چنین استنباط می‌شود که جهت حرکت محلول‌های دولومیت‌ساز در منطقه ایرانکوه شمالی از شمال غرب به جنوب شرقی است و عمق نفوذ محلول به سمت جنوب شرقی به‌صورت فزاینده‌ای کاهش پیدا می‌کند. از سوی دیگر ویژگی‌های دگرسانی در این ذخایر نشانگر خوبی بر نزدیک شدن به ذخایر هستند. از جمله دولومیت اسپاری، دولومیت زینی شکل<sup>۱</sup>، (Radke and Mathis, 1980; Leach et al., 1991; Machel and Lonnee, 2002) در ارتباط با زون‌های کانی‌سازی در سنگ میزبان در ذخایری مثل گوشفیل، زون ۱ گوشفیل، تپه سرخ و زون ۵ رومرمر در کمرباطین دیده می‌شود. درحالی که این نوع دولومیت در ذخیره مدفون دیده نمی‌شود. نبود اسپاری دولومیت در ذخایر MVT ریور نیز گزارش شده است (Ravenhurst et al., 1989; Paradis et al., 2007). این ذخیره در دو بخش کمربالا و کمرباطین توسط خطوط گسله منشعب از گسل معکوس ایرانکوه شمالی محدود شده است. معبر عبور محلول در ذخیره مدفون به این زون گسله محدود است و هیچ‌گونه انتشار محلول دولومیت‌ساز و محلول کانه‌ساز به اطراف صورت نگرفته است. بدین ترتیب، در ذخیره مدفون فضای محدود گسترش شورابه‌ها احتمالاً یکی از دلایل افزایش دو برابری عیار روی و

کلسیت اشباع شده‌اند، انحلال و تشکیل کلسیت در زون‌های جداگانه اما نزدیک به هم را سبب می‌شود (Corbella et al., 2004). مهم‌ترین فرایند تولید اسید در نتیجه مخلوط شدن محلول احیایی حاوی سولفور با محلول حاوی فلز صورت می‌گیرد. همچنین این فرایند با شدت کمتری در نتیجه احیای سولفات در زون کانی‌سازی نیز رخ می‌دهد (Leach et al., 2010).

ژئومتری ذخایر روی و سرب با سنگ میزبان کربناته با فضاها و تخلخل مؤثر اولیه و ثانویه کنترل می‌شود (Sangster, 1995). طول این ذخایر در گستره‌های معدنی از چند صد متر بیشتر است؛ اما کشیدگی قائم تأمل بیشتری نیاز دارد. از نظر تئوری کشیدگی قائم این ذخایر تا جایی که سنگ میزبان مناسب وجود دارد، می‌تواند قابل انتظار باشد (Ohle, 1959). بخش قابل معدن کاری این ذخایر از چندین ده متر تجاوز نمی‌کند؛ ولی آثار کانی‌سازی تا اعماق بیشتر برای هر زون قابل تعقیب است (Leach et al., 2010).

بررسی نتایج حفاری مغزه‌گیری بر روی ناهنجاری‌های معرفی شده از تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی، نتایج مثبتی را در برنداشته است. بازبینی مجدد پژوهش‌های انجام شده، نشان داد که تعبیر و تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی منطقه مبتنی بر لایه‌ای اطلاعاتی بوده است و از جمله نقشه زمین‌شناسی استفاده شده از درستی بالایی برخوردار نبوده است. همچنین ساختار داده‌های ژئوشیمیایی و منبع تولیدکننده عناصر ژئوشیمیایی بر اساس نوع سنگ میزبان مولد هاله ژئوشیمیایی ثانویه به درستی مورد بررسی قرار نگرفته است. مطالعات ژئوشیمیایی در بررسی‌های اکتشافی و ژئوشیمی زیست‌محیطی (Reimann et al., 2005) کاربرد بی‌شماری داشته و روش‌های تجزیه و تحلیل اطلاعات روز به روز، رو به رشد و بهینه شدن هستند (Cohen et al., 2010). به نظر می‌رسد که حتی برخی مفاهیم اولیه نظیر بررسی مقدار زمینه (Reimann and Garrett, 2005) در گستره استفاده و ارزیابی توان داده‌های ژئوشیمیایی در اکتشاف ذخایر MVT به خوبی مشخص نیست (Leach et al., 2010). از یک سو

اکتشافات ژئوشیمیایی فقط برای مشخص کردن امتداد و روند زون یا زون‌های کانی‌سازی، مورد استفاده قرار گرفته است (Hosseini-Dinani et al., 2015). از سوی دیگر، برخی پژوهشگران معتقدند که با استفاده از روش‌های تحلیل داده‌محور و یادگیری ماشین می‌توان جمعیت‌های هدف مستعد را در کشف ذخیره مشخص کرد (Zekri et al., 2019a; Zekri et al., 2019b).

استفاده از اکتشافات ژئوشیمیایی برای مشخص کردن نقاط حفاری که به کشف ذخیره منجر شده باشد، کم و فقط در کشف ذخایر ایرلند گزارش شده است (Hitzman, 1992; Leach et al., 2010). عناصر فرعی و عناصر دیگری که با ذخایر MVT همراه هستند، شامل آنتیموان، آرسنیک، باریم، بیسموت، کادمیوم، کبالت، مس، گالیم، ژرمانیوم، طلا، ایندیم، آهن، منگنز، جیوه، مولیبدن، نیکل، نقره، تالیم و قلع هستند (Cox and Singer, 1986; Lavery et al., 1994; Foley et al., 2002). هرچند کانی‌سازی اولیه سولفیدی در ذخایر MVT ساده است (Ohle, 1980)، تفاوت کانی‌شناسی در بین ذخایر در قلمروهای مختلف مشاهده می‌شود که به بروز تفاوت در کانی‌های کمیاب و فرعی بین ذخایر مناطق مختلف منجر می‌شود (Lavery et al., 1994). این امر موجب می‌شود که معرفی نشانگرهای ژئوشیمیایی در مقیاس بین‌المللی برای ذخایر MVT دشوار باشد (Leach et al., 2010). هاله انتشار عناصر در اطراف ذخایر MVT معمولاً کوچک و در ذخایر مختلف از ۵۰ تا ۷۵ متر و در برخی مناطق مثل بخش مرکزی ایالت تنسی در ایالت متحده کمتر از ۱۲۵ سانتی متر گزارش شده است (Lavery et al., 1994). برخلاف هاله اولیه عناصر اصلی و فرعی که در سنگ میزبان گسترش کمی دارد، ساختار داده‌های ژئوشیمیایی در هاله ثانویه در قلمرو ایرانکوه شمالی بر گسترش وسیع دلالت دارد که از چندین منبع کانی‌سازی مختلف آزاد شده و در شیب کوهستان پراکنده هستند. هاله ثانویه روی به دلیل جدایش آن از منشأ اولیه و مهاجرت گسترش وسیعی نشان می‌دهد. تخریب کانی‌های سولفیدی به دلیل اکسیداسیون

موجب کاهش pH در محیط و تشکیل محلول‌های سولفات می‌شود که توانایی حمل فلزات را دارد (Levinson, 1974; Hitzman et al., 2003). دو کانی اسفالریت و گالن در برابر اکسیداسیون مقاوم هستند؛ به صورتی که گالن مقاومت بیشتری در برابر اکسیداسیون نشان می‌دهد (Bladh, 1982; Boyle, 1994) که بدین ترتیب مقدار کمی محلول سولفات در محیط تشکیل خواهد شد (Williams, 1990). اسفالریت‌های غنی از آهن تفاوت آشکاری نشان داده و در طی اکسیداسیون، آهن با سه ظرفیت مثبت تولید می‌شود و این توان وجود خواهد داشت در طی فرولیز، به مقدار کافی اسید تولید شود. بدین ترتیب اکسیداسیون ذخایر حاوی اسفالریت فقیر از آهن و گالن با مهاجرت گسترده این عناصر در منطقه همراه نیست. برخلاف عناصر اصلی سولفیدی در ذخایر MVT در ایرانکوه مقادیر قابل توجهی از پیریت و به مقدار کمتر مارکاسیت در این ذخایر گزارش شده است (Rastad, 1981; Ghazban et al., 1994). در نتیجه اکسیداسیون این دو کانی، مقدار زیادی از محلول‌های اسیدی تولید می‌شود که سبب مهاجرت گسترده عنصر روی (Hitzman et al., 2003) می‌شود. از سوی دیگر، برخی پژوهشگران بخش اعظم اکسیداسیون ذخایر غنی از اسفالریت را به فرایند عملکرد باکتریایی نسبت داده‌اند (Nordstrom and Southam, 1997).

در حالت عادی انتظار می‌رود که اسیدهای تولیدشده به واسطه اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی، عنصر روی را به کلی از منطقه خارج کند (Sangameshwar and Barnes, 1983)؛ اما به دلیل تأثیر پدیده بافرینگ سنگ میزبان، کربناته اسید سولفوریک تولیدشده از اکسیداسیون پیریت و مارکاسیت خنثی می‌شود که در نتیجه فرایند بافرینگ، محیط آبی با pH خنثی تشکیل خواهد شد. با این شرایط در نتیجه اکسیداسیون ذخایر اسفالریت طی تماس با آب‌های جوی، کانی‌هایی نظیر اسمیت‌زونیت، همی‌مورفیت و هیدروزینسیت تشکیل می‌شوند. در محیط سوپرژن با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ اتمسفر، مقدار pH  $\text{CO}_2$  و  $\text{SiO}_2$  موجود در آب زیرزمینی از

عمده عامل‌های کنترل‌کننده همیافت کانی‌های روی و توزیع آنها هستند (Takahashi, 1960). به‌ویژه تبدیل اسمیت‌زونیت به هیدروزینسیت توسط pH و فشاربخشی دی‌اکسید کربن کنترل می‌شود. در مناطق با آب و هوای خشک مقدار هیدروزینسیت به نسبت اسمیت‌زونیت در سطح زمین بیشتر است. از میان کانی‌های غیر سولفیدی روی، همی‌مورفیت به نسبت اسمیت‌زونیت و هیدروزینسیت در pH پایین‌تری تشکیل می‌شود و با توجه به خصلت بافر سنگ‌های کربناته میزبان تشکیل این کانی در شرایط عادی و هوازگی با pH تقریباً خنثی انتظار نمی‌رود. به عبارت دیگر، همی‌مورفیت در حالتی تشکیل می‌شود که اسید کافی به دلیل هوازگی سولفیدها در محیط تشکیل شود و شرایط اسیدی در طول تشکیل کانی در محیط حفظ شود (Hitzman et al., 2003). با کاهش pH و اسیدشویی رو به افزایش اسفالریت، اسمیت‌زونیت اولیه به همی‌مورفیت و هیدروزینسیت تبدیل می‌شود که جزو کانی‌های پایدار محسوب می‌شود. روی و مس تمایل دارند که به بخش‌های پایینی تنه سولفیدی مهاجرت کنند. سرب به نسبت تحرک کمتری دارد و با غشای سروزیت و آنگلزیت حفاظت می‌شود (Sangameshwar and Barnes, 1983). با پیشرفت اسیدشویی تبدیل همی‌مورفیت به هیدروزینسیت رخ می‌دهد و مهاجرت گسترده روی از منشأ اولیه سولفیدی صورت می‌گیرد. بر اساس تلفیق داده‌های تجزیه شیمیایی کانی‌های گالن و اسفالریت عناصر موجود و هوازگی و تجزیه این عناصر بر اساس موارد بیان‌شده این عناصر در افق خاک ایرانکوه شمالی به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱) عناصر اصلی شامل روی و سرب که جزو فلزات اصلی اقتصادی در منطقه هستند. بر طبق شکل ۱۴ مشخص می‌شود که عامل غنی‌شدگی در ایرانکوه برای این عناصر تقریباً ۳۰ برابر از مقدار زمینه این عناصر در خاک بین‌المللی است (Reimann and De Caritat, 2012). کل منطقه تحت تأثیر آلودگی زمین‌زاد قرار گرفته است.

(and Emerson, 1999). مقادیر شارژپذیری در داده‌های قلمرو معدنی ایرانکوه شمالی تحت تأثیر مقدار کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت و گالن هستند. همچنین ژئومتری این ذخایر از جمله فاصله ذخیره تا سطح توپوگرافی و پیوستگی یا عدم پیوستگی ذخایر در بخش بالایی در مقدار داده شارژپذیری اندازه‌گیری شده از سطح زمین، تأثیر آشکاری دارد. شکل ۲۰ مدل مفهومی از نقش شکل ذخیره و فاصله آن نسبت به سطح توپوگرافی در مقدار شارژپذیری را نشان می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

بر اساس رویکرد ره‌یافت دانش محور در این پژوهش مبتنی بر بررسی زمین‌شناسی ذخایر شناخته‌شده در قلمرو ایرانکوه شمالی، مشخص می‌شود که تغییرات زیادی در ژئومتری، کانی‌شناسی و سنگ‌های درون‌گیر در پنج ذخیره منتخب روی و سرب سولفیدی با سنگ میزبان کربناته در قلمرو معدنی ایرانکوه شمالی مشاهده می‌شود. این تغییرات از نحوه تکوین ذخایر MVT، شامل ژنتیک محلول، دمای تشکیل، معابر زمین‌ساختی، فازهای مختلف کانی‌سازی روی و سرب، سیستم هیدرولوژی منطقه، جهت حرکت محلول، واکنش با سنگ میزبان و عمق نفوذ محلول‌های دولومیت‌ساز و شوره‌های حمل‌کننده فلزات روی و سرب نشأت می‌گیرد. حجم زیادی از محلول که در مراحل مختلف تکوین قلمرو معدنی شمال ایرانکوه نقش داشته‌اند، به‌صورت فراگیر و انتخابی واحدهای کربناته متعددی از منطقه را تحت تأثیر قرار داده است. این محلول‌ها در نوبت نخست به‌صورت انتخابی مسئول دولومیتی‌شدن چندین واحد چینه‌ای هستند و در نوبت دوم که خود متشکل از دو فاز اصلی کانی‌سازی روی و سرب هستند، موجب شده است که کانی‌سازی در سطح وسیعی از منطقه مشاهده شود. بر اساس استفاده از روش‌های داده‌محور در تحلیل لایه‌های اکتشافی شامل مشاهدات مستقیم سطحی، مقدار شارژپذیری ژئوالکتریک و هاله ژئوشیمیایی ثانویه تفکیک زون‌های کانی‌سازی مهم از کاذب و یا بی‌اهمیت عملی نیست. بر اساس روش دانش محور

(۲) دسته عناصر ردیاب شامل عناصری هستند که در طی هوازدهی فیزیکی و شیمیایی از شبکه کانی‌های اسفالریت، گالن و پیریت آزاد شده‌اند و با توجه به درجه تحرکشان در شیب کوهستان در فواصل مختلفی از منشأ کانی‌سازی اصلی تمرکز یافته‌اند. در این دسته عناصری از قبیل کادمیوم و مس از تجزیه شبکه اسفالریت در محیط انتشار یافته‌اند (شکل ۱۲-A) و عناصری مثل نقره، آنتیموان از داخل شبکه گالن آزاد شده‌اند (شکل ۱۲-B). چنین به‌نظر می‌رسد که آرسنیک موجود در نمونه‌های خاک می‌تواند در نتیجه تجزیه کانی پیریت در محیط منتشر شده باشد.

(۳) در دسته سوم عناصر مستقری مثل باریت و منگنز قرار می‌گیرند. هیچ رابطه خطی مستقیمی بین زون‌های کانی‌سازی معدنی و یا بزرگی آنها در مقایسه با مقادیر یافت‌شده در افق خاک مشاهده نمی‌شود.

(۴) در دسته چهارم عناصری مثل آهن، منیزیوم و کلسیم قرار می‌گیرند که در نتیجه هوازدهی سنگ میزبان در محیط منتشر شده است. منیزیوم که اذخال آن در شبکه سنگ آهک به تشکیل دولومیت منجر می‌شود، نقشی مهم در تفکیک جمعیت‌های مستعد کانی‌سازی از سایر جمعیت‌های سترون در مقیاس محلی نشان می‌دهد. بررسی‌ها و مقایسه مقدار تغییرات در گروه‌های جمعیت ژئوشیمیایی الگو نشان می‌دهد که تغییرات مقدار منیزیوم در نمونه‌های خاک بیش از سایر عناصر یادشده در دسته‌بندی بالا نقش کلیدی دارد.

روش‌های اندازه‌گیری الکتریکی شامل سنجش مقاومت و مقدار شارژپذیری برای مشخص کردن زون‌های کانی‌سازی در ذخایر نوع MVT مورد بررسی قرار گرفته است (Sumner, 1976; Bishop and Emerson, 1999). شناسایی کانی اسفالریت به سادگی توسط روش‌های الکتریکی امکان‌پذیر نیست؛ اما در مجموعه کانیایی زون‌های کانی‌سازی نوع MVT سایر کانی‌های سولفیدی نظیر پیریت و گالن که همراه با اسفالریت یافت می‌شوند، ناهنجاری مناسبی برای شناسایی زون‌های کانی‌سازی حاوی اسفالریت در اختیار می‌گذارند (Bishop

مشخص می‌شود که حتی جهت حرکت محلول و عمق نفوذ آن در تشخیص سنگ میزبان مناسب برای تعیین موقعیت ذخیره اقتصادی مناسب، نقش حیاتی دارد. بر اساس بررسی‌های ژئوفیزیکی مقدار شارژپذیری برابر یا بیشتر از ۲۷/۵ میلی‌ولت در سنگ میزبان دولومیتی مستعد مقدار آستانه امیدبخش معرفی می‌شود. بررسی داده‌های اکتشافات ژئوشیمیایی از افق خاک نیز نشان می‌دهد که این روش به‌خوبی در تشخیص زون‌های کانی‌سازی کارساز بوده؛ ولی به‌علت تعدد زون‌های کانی‌سازی اصلی و فرعی در منطقه، تلاش برای تعیین مقدار زمینه برای عناصر اصلی نظیر روی و سرب غیرمنطقی است. بدین دلیل که دامنه تغییرات در عناصر از مقدار حداکثر تا مقدار حداقل بیشتر گویای فاصله از زون‌های کانی‌سازی بوده که با افزایش فاصله از منبع تولیدکننده، رقیق‌شدگی در تمرکز عناصر رخ داده است. به‌عبارت دیگر، دامنه تغییرات عناصر اصلی و ردیاب در نمونه‌های افق خاک به نحوی است که در این داده‌ها هیچ مقدار زمینه‌ای بر نبود کانی‌سازی در منطقه یافت نمی‌شود. در ساختار مقادیر خارج از رده که در روش‌های اکتشافی مرسوم حذف و یا تعدیل می‌شوند، عملاً نشان‌دهنده منبع اصلی و یا فرعی زون کانی‌سازی است.

شکل نقشه یکپارچه متشکل از داده‌های اکتشافات ژئوشیمیایی، ضریب ترکیبی Pb/Pb+Zn، لایه اطلاعاتی شارژپذیری و در نهایت مناطق مستعد و نامستعد مشخص شده بر اساس تحلیل دانش‌محور را به‌عنوان نتیجه این پژوهش نشان می‌دهد. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش، نتایج به شرح زیر معرفی می‌شوند:

(۱) همه پنج ذخیره یال شمالی ایرانکوه در منطقه گسل رورانده وجود دارند. این احتمال وجود دارد که روراندگی در بخش‌هایی از ایزود کانی‌سازی نقشی مهم داشته‌باشد و افزایش عیار را به ازای فازهای چندگانه کانی‌سازی روی و سرب، موجب شده باشد.

(۲) شکلی از آلتراسیون دولومیتی با عنوان اسپاری دولومیت در هاله زون‌های کانی‌سازی ذخایر گوشفیل، زون ۱ گوشفیل،

تپه‌سرخ و زون ۵ رومرمر مشاهده می‌شود. از این هاله می‌توان در فازهای اکتشافی حفاری مغزه‌گیری، برای بررسی اهمیت و توانایی کانی‌سازی استفاده کرد.

(۳) هر چند دولومیت به‌عنوان سنگ میزبان ذخایر MVT معرفی شده است؛ ولی تفکیک دولومیت‌ها بر اساس درجه و شدت دولومیتی‌شدن و همچنین عمق دولومیتی‌شدن، در انتخاب منطقه مستعد اهمیت منحصربه‌فردی دارد. در مثال ایرانکوه شمالی دولومیت‌های زیرین در ستون چینه‌شناسی ارزش حیاتی برای میزبانی ذخیره اقتصادی نشان می‌دهند.

(۴) ناهنجاری در داده‌های ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی باید بر اساس واحد سنگی مستعد مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. در مثال ایرانکوه در یک مورد انطباق کامل بی‌هنجاری ژئوشیمیایی-ژئوفیزیکی با رخنمون‌های سطحی کانی‌سازی طی حفاری مغزه‌گیری مورد آزمون قرار گرفته است که نتایج به کلی منفی ارزیابی شده است.

(۵) تغییرات نسبی مقدار Mg مبنی بر کاهش شدید آن در هاله ژئوشیمیایی ثانویه مناطق بی‌هنجاری که مستعد نیست، به‌عنوان کلید محلی معرفی می‌شود.

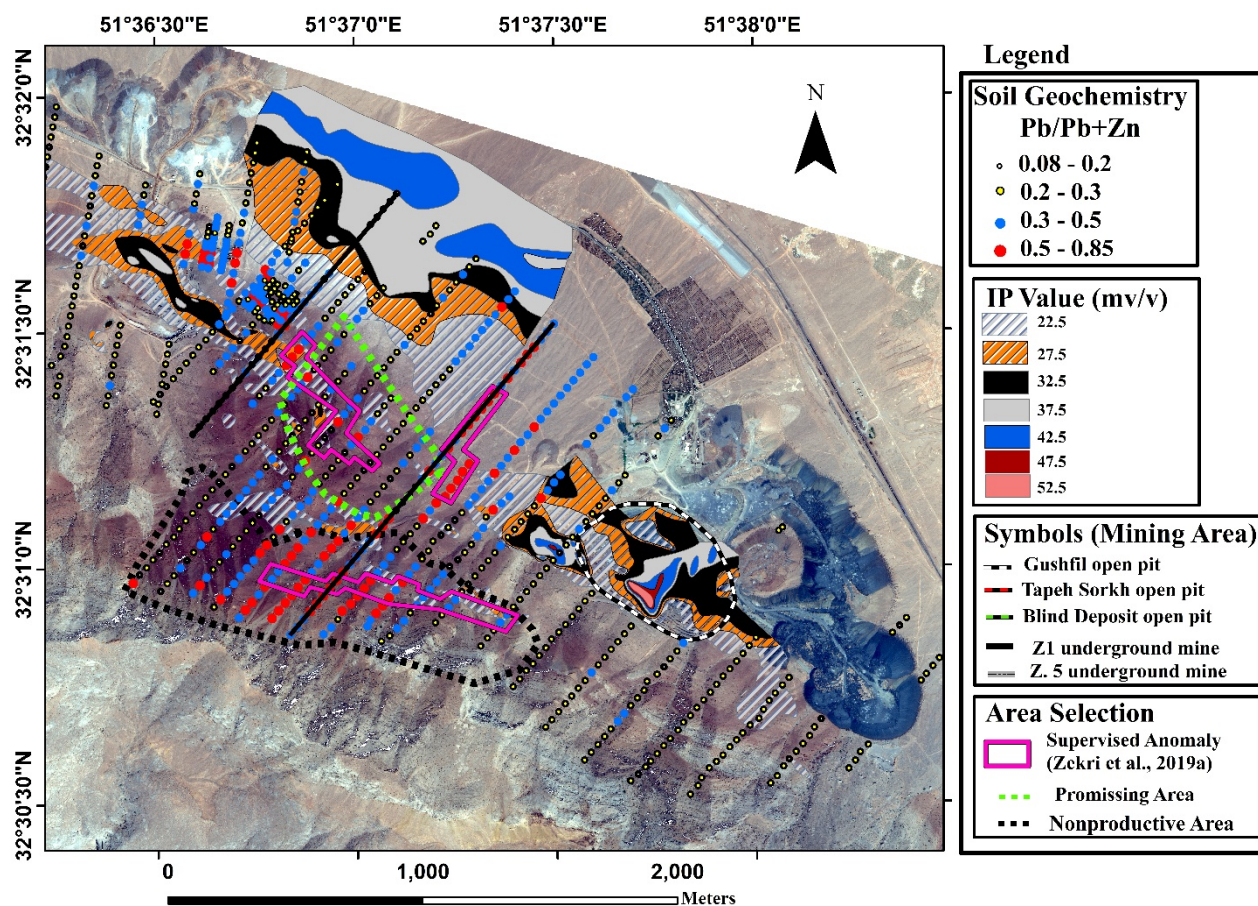
(۶) الگوی تغییرات عناصر در نمونه‌های خاک در موقعیت زون‌های کانی‌سازی معدن زون ۵ رومرمر با افزایش نسبی عناصر اصلی (روی و سرب)، عناصر ردیاب (نقره، کادمیوم، آنتیموان، آرسنیک و مس) و عناصر مرتبط با سنگ میزبان (منیزیوم، آهن و کلسیم) همراه است.

در حالی که در منطقه زون ۳ افزایش عناصر اصلی و ردیاب با سقوط ناگهانی مقادیر کلسیم و منیزیوم و آهن همراه است، این الگو برای شناسایی ناهنجاری‌های کاذب از ناهنجاری‌های واقعی در هاله ژئوشیمیایی قابل استفاده است.

(۷) ذخایر نوع دره می‌سی‌سی‌پی در مقیاس کمربند متالورژی و حتی در مقیاس قلمرو معدنی نیز طول قابل‌توجهی را نشان می‌دهند؛ اما گسترش عمقی آنها تابعی از وجود سنگ میزبان آهکی و یا دولومیتی نیست. هرچند آثار کانی‌سازی فرعی از جمله حضور پیریت تا اعماق زیادی قابل ردیابی است؛ اما ذخایر

این نسبت به صورت استثنایی برای ذخیره مدفون ۱۳/۳ اندازه‌گیری شده است.

اقتصادی تا عمق مشخصی حضور دارند (Leach et al., 2010). در قلمرو معدنی ایرانکوه شمالی، نسبت طول به پهنا (کشیدگی عمقی) در ذخایر ایرانکوه از ۰/۴ تا ۱/۷ متغیر است.



شکل ۲۱. نقشه یکپارچه اطلاعات ژئوشیمی، ژئوفیزیک و معرفی مناطق مستعد و نامستعد برای اکتشاف روی و سرب در قلمرو ایرانکوه شمالی

**Fig. 21.** Integrated map of geochemical, geophysical, productive and nonproductive areas to the exploration of zinc and lead in North Irankuh district

هوشمند لایه‌های اطلاعاتی مختلف از جمله نقشه زمین‌شناسی پایه مناسب و حذف سیگنال‌های مربوط به کانی‌سازی فرعی شانس اکتشاف را به صورت تصاعدی افزایش داد.

### قدردانی

از معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد که این پژوهش را

بر اساس شواهد بحث‌شده در این پژوهش چنین نتیجه‌گیری می‌شود که در اکتشاف ذخایر روی و سرب با سنگ میزبان کربناته در مقیاس قلمرو معدنی، هنوز استفاده از روش‌های داده‌محور پاسخ‌گو نیست. هرچند موضوع شانس، در اکتشاف این‌گونه ذخایر بر کل عملیات اکتشافی چیرگی دارد (Callahan, 1977; Sangster, 1995)؛ اما می‌توان با بررسی

هیئت‌مدیره شرکت باما و همچنین از مدیران ارشد شرکت باما جناب آقای مهندس فریبرز روشن مدیر مهندسی و تولید و جناب آقای دکتر محمد محمدخانی مدیر معدن و زمین‌شناسی برای پشتیبانی معنوی و مالی صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

(پروژه به شماره ۳/۴۰۲۲۱ مصوب ۱۳۹۴/۱۲/۲۲) پشتیبانی کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین نویسندگان از جناب آقای مهندس حسن اسلامی قانع مدیر عامل و عضو هیئت‌مدیره، از جناب آقای مهندس اعلاء نقشینه، جناب آقای بهنام حسین‌زاده و جناب آقای علی احمدی اعضای عالی‌رتبه

## References

- Agterberg, F.P., 1974. *Geomathematics*. Elsevier, Amsterdam, 596 pp.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics*, 229(3-4): 211-238.
- Anderson, G. and Macqueen, R., 1982. Ore deposit models-6, Mississippi Valley-type lead-zinc deposits. *Geoscience Canada*, 9(2):107-117.
- Anderson, G.M., 1983. Some geochemical aspects of sulfide precipitation in carbonate rocks. *International Conference on Mississippi Valley Type Lead-Zinc Deposits*. University of Missouri, Missouri, United States of America.
- Bayati, M., Esmaily, D., Maghdour-Mashhour, R., Li, X.H. and Stern, R.J., 2017. Geochemistry and petrogenesis of Kolah-Ghazi granitoids of Iran: Insights into the Jurassic Sanandaj-Sirjan magmatic arc. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 77(2): 281-302.
- Berberian, M. and King, G., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2): 210-265.
- Bishop, J. and Emerson, D., 1999. Geophysical properties of zinc-bearing deposits. *Australian Journal of Earth Sciences*, 46(3): 311-328.
- Bladh, K.W., 1982. The formation of goethite, jarosite, and alunite during the weathering of sulfide-bearing felsic rocks. *Economic Geology*, 77(1): 176-184.
- Bouabdellah, M., Brown, A.C. and Sangster, D., 1996. Mechanisms of formation of internal sediments at the Beddiane lead-zinc deposit, Touissit mining district, northeastern Morocco. In: D. Sangster (Editor), *Carbonate-hosted lead-zinc deposits*. The Society of Economic Geologists, United States of America, pp. 356-363.
- Boveiri-Konari, M. and Rastad, E., 2018. Nature and origin of dolomitization associated with sulphide mineralization: new insights from the Tappeh Sorkh Zn-Pb (-Ag-Ba) deposit, Irankuh Mining District, Iran. *Geological Journal*, 53(1): 1-21.
- Boveiri-Konari, M., Rastad, E. and Peter, J.M., 2017. A sub-seafloor hydrothermal syn-sedimentary to early diagenetic origin for the Gushfil Zn-Pb-(Ag-Ba) deposit, south Esfahan, Iran. *Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 194(1): 61-90.
- Boyle, D.R., 1994. Oxidation of massive sulfide deposits in the Bathurst mining camp, New Brunswick: Natural analogues for acid drainage in temperate climates. In: C.N. Alpers and D.W. Blowes (Editors), *Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation*. American Chemical Society Symposium Series, United States of America, pp. 535-550.
- Callahan, W., 1977. The history of the discovery of the zinc deposit at Elmwood, Tennessee, concept and consequence. *Economic Geology*, 72(7): 1382-1392.
- Carranza, E.J.M. and Hale, M., 2003. Evidential belief functions for data-driven geologically constrained mapping of gold potential, Baguio district, Philippines. *Ore Geology Reviews*, 22(1-2): 117-132.
- Cohen, D., Kelley, D., Anand, R. and Coker, W., 2010. Major advances in exploration geochemistry, 1998-2007. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10(1): 3-16.
- Corbella, M., Ayora, C. and Cardellach, E., 2004. Hydrothermal mixing, carbonate dissolution and sulfide precipitation in Mississippi Valley-type deposits. *Mineralium Deposita*, 39(3): 344-357.

- Cox, D.P. and Singer, D.A., 1986. Mineral deposit models. United States Geological Survey Bulletin, United States of America, 379 pp.
- Esmaeili-Sevieri, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh-Shafaroudi, A. and Mahboubi, A., 2018. Consideration on Exploration of Carbonate Hosted Zinc and Lead Deposits in Irankuh, Introducing Zone 5 Romarmar Mine. 10th Symposium of Iranian Society of Economic Geology, Isfahan University, Isfahan, Iran. (in Persian with English abstract)
- Feltrin, L., 2008. Predictive modelling of prospectivity for Pb-Zn deposits in the Lawn Hill Region, Queensland, Australia. *Ore Geology Reviews*, 34(3): 399–427.
- Foley, N.K., Plumlee, G. and Smith, K., 2002. Environmental geochemistry of platform carbonate-hosted sulfide deposits. In: R.R. Seal and N.K. Foley (Editors), *Progress on Geoenvironmental Models for Selected Mineral Deposit Types*. United States Geological Survey, United States of America, pp. 87–100.
- Förster, H., 1978. Mesozoic-cenozoic metallogenesis in Iran. *Journal of the Geological Society*, 135(4): 443–455.
- Ghazban, F., McNutt, R.H. and Schwarcz, H.P., 1994. Genesis of sediment-hosted Zn-Pb-Ba deposits in the Irankuh district, Esfahan area, west-central Iran. *Economic Geology*, 89(6): 1262–1278.
- Grigorian, S.V. and Adamyan, A., 2008a. Geochemical Assessment of Geochemical Anomalies' Ore Potential of Gushfil Area. Bama Mining Company, Isfahan, Report 1, 35 pp.
- Grigorian, S.V. and Adamyan, A., 2008b. Geochemical assessment of Ore Potential of Tapeh Sorkh Area (Final report). Bama Mining Company, Isfahan, Report 2, 24 pp.
- Grunsky, E.C., 2010. The interpretation of geochemical survey data. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10(1): 27–74.
- Hitzman, M. and Beaty, D., 1996. The Irish Zn-Pb-(Ba) orefield. In: D.F. Sangster (Editor), *Carbonate-hosted lead-zinc deposits*. Society of Economic Geologists, United States of America, pp. 112–143.
- Hitzman, M.W., 1992. Discovery of the Lisheen Zn-Pb-Ag deposit, Ireland. *Economic Geology*, 9(1): 12–15.
- Hitzman, M.W., Reynolds, N.A., Sangster, D., Allen, C.R. and Carman, C.E., 2003. Classification, genesis, and exploration guides for nonsulfide zinc deposits. *Economic Geology*, 98(4): 685–714.
- Hosseini-Dinani, H. and Aftabi, A., 2016. Vertical lithogeochemical halos and zoning vectors at Goushfil Zn-Pb deposit, Irankuh district, southwestern Isfahan, Iran: Implications for concealed ore exploration and genetic models. *Ore Geology Reviews*, 150(6): 1004–1021.
- Hosseini-Dinani, H., Aftabi, A., Esmaeili, A. and Rabbani, M., 2015. Composite soil-geochemical halos delineating carbonate-hosted zinc-lead-barium mineralization in the Irankuh district, Isfahan, west-central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 156(1): 114–130.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Alaminia, Z., Esmaeili Sevieri, A. and Stern, C.R., 2019. New hypothesis on time and thermal gradient of subducted slab with emphasis on dolomitic and shale host rocks in formation of Pb-Zn deposits of Irankuh-Ahangaran belt. *Journal of Economic Geology*, 10(2): 677–706. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Esmaeili Sevieri, A., Allaz, J.M. and Stern, C.R., 2017. Geology, mineralization, mineral chemistry, and ore-fluid conditions of Irankuh Pb-Zn mining district, south of Isfahan. *Journal of Economic Geology*, 9(2): 267–294. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H. and Sadeghi, M., 2018. Dehydration of hot oceanic slab at depth 30–50 km: KEY to formation of Irankuh-Emarat PbZn MVT belt, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 194(1): 88–103.
- Kimiaghalam, J., Joabadi, A. and Shahin, E., 1987. Report on complementray geophysical study, IP/RS, on northern flank of Irankuh Mountain, Romarmar, Tapeh Sorkh and Gardaneh. Bama Mining Company, Isfahan, Report 1, 22 pp.
- Kimiaghalam, J. and Kimiaghalam, J., 1981. Report on Geophysical Exploration, IP/RS in Irankuh Mine. Bama Mining Company,

- Isfahan, Report 2, 40 pp.
- Kimiaghalam, J. and Kimiaghalam, J., 1988. Report on Geophysical Exploration Study, IP/RS, Kolah Darvazeh- Tapeh Sorkh. Bama Mining Company, Isfahan, Report 3, 9 pp.
- Kimiaghalam, J. and Nicholas, H., 1982. Report on Geophysical exploration study, IP/RS, in Southern flank of Irankuh Mountain. Bama Mining Company, Isfahan, Report 4, 8 pp.
- Lavery, N., Leach, D. and Saunders, J., 1994. Lithogeochemical investigations applied to exploration for sediment-hosted lead-zinc deposits. In: L. Fontboté and M. Boni (Editors), *Sediment-hosted Zn-Pb Ores*. Springer, New York, pp. 393–428.
- Leach, D.L., Plumlee, G.S., Hofstra, A.H., Landis, G.P., Rowan, E.L. and Viets, J.G., 1991. Origin of late dolomite cement by CO<sub>2</sub>-saturated deep basin brines: Evidence from the Ozark region, central United States. *Geology*, 19(4): 348–351.
- Leach, D.L., Taylor, R.D., Fey, D.L., Diehl, S.F. and Saltus, R.W., 2010. A deposit model for Mississippi Valley-type lead-zinc ores. United States Geological Survey, Virginia, Report 2, 64 pp.
- Leach, D.L., Viets, J.G., Foley-Ayuso, N. and Klein, D.P., 1995. Mississippi Valley-type Pb-Zn deposits. United States Geological Survey, Virginia, Report 2, 10 pp.
- Levinson, A.A., 1974. Introduction to exploration geochemistry. Applied Publishing Ltd. Wilmette, Illinois, United States of America, 614 pp.
- Lydon, J.W., 1995. Sedimentary exhalative sulphides (SEDEX). In: O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair and R.I. Thorpe (Editors), *Geology of Canadian mineral deposit types*. Geological Survey of Canada, Canada, pp. 130–152.
- Machel, H.G. and Lonnee, J., 2002. Hydrothermal dolomite—A product of poor definition and imagination. *Sedimentary Geology*, 152(3–4): 163–171.
- Marie, J.S. and Kesler, S.E., 2000. Iron-rich and iron-poor Mississippi Valley-type mineralization, Metaline district, Washington. *Economic Geology*, 95(5): 1091–1106.
- Marie, J.S., Kesler, S.E. and Allen, C.R., 2001. Origin of iron-rich Mississippi Valley-type deposits. *Geology*, 29(1): 59–62.
- Maynard, J.B., 1983. *Geochemistry of sedimentary ore deposits*. Springer, New York, 306 pp.
- Mirnejad, H., Simonetti, A. and Molasalehi, F., 2011. Pb isotopic compositions of some Zn–Pb deposits and occurrences from Urumieh–Dokhtar and Sanandaj–Sirjan zones in Iran. *Ore Geology Reviews*, 39(4): 181–187.
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj–Sirjan zone, western Iran. *Journal of Structural Geology*, 22(8): 1125–1139.
- Momenzadeh, M., 1976. Stratabound lead-zinc ores in the lower Cretaceous and Jurassic sediments in the Malāyer-Esfahan district (west central Iran): lithology, metal content, zonation and genesis. Ph.D. Thesis, Heidelberg University, Heidelberg, Germany, 300 pp.
- Nakini, A., Mohajjel, M., Rastad, E. and Boveiri, M., 2016. Folding and Faulting in Irankuh Mine Area, Isfahan. *Kharazmi Journal of Earth Sciences*, 1(2): 235–254.
- Nordstrom, D.K. and Southam, G., 1997. Geomicrobiology of sulfide mineral oxidation. *Reviews in Mineralogy*, 35(2): 361–390.
- Ohle, E.L., 1959. Some considerations in determining the origin of ore deposits of the Mississippi Valley type. *Economic Geology*, 54(5): 769–789.
- Ohle, E.L., 1980. Some considerations in determining the origin of ore deposits of the mississippi valley type; Part II. *Economic Geology*, 75(2): 161–172.
- Ohle, E.L., 1985. Breccias in Mississippi Valley-type deposits. *Economic Geology*, 80(6): 1736–1752.
- Paradis, S., Hannigan, P. and Dewing, K., 2007. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits. In: W.D. Goodfellow (Editor), *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Geological Association of Canada, Calgary, pp 185–203.
- Radke, B.M. and Mathis, R.L., 1980. On the formation and occurrence of saddle dolomite. *Journal of Sedimentary Research*, 50(4): 1149–1168.
- Rajabi, A., Rastad, E. and Canet, C., 2012. Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted

- Zn-Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. *International Geology Review*, 54(14): 1649–1672.
- Rastad, E., 1981. Geological, Mineralogical, and Ore Facies Investigations on the Lower Cretaceous Stratabound Zn-Pb (Ba-Cu-) Deposits of the Irankuh Mountain Range, Esfahan, West Central Iran. Ph.D. Thesis, Heidelberg University, Heidelberg, Germany, 334 pp.
- Ravenhurst, C.E., Reynolds, P.H., Zentilli, M., Krueger, H.W. and Blenkinsop, J., 1989. Formation of Carboniferous Pb-Zn and barite mineralization from basin-derived fluids, Nova Scotia, Canada. *Economic Geology*, 84(6): 1471–1488.
- Reichert, J., 2007. A metallogenetic model for carbonate-hosted non-sulphide zinc deposits based on observations of Mehdi Abad and Irankuh, Central and Southwestern Iran. Ph.D. Thesis, Martin Luther University Halle Wittenberg, Halle, Germany, 152 pp.
- Reimann, C. and De Caritat, P., 2012. Chemical elements in the environment: factsheets for the geochemist and environmental scientist. Springer-Verlag, Berlin, 403 pp.
- Reimann, C., Filzmoser, P. and Garrett, R.G., 2005. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*, 346(1–3): 1–16.
- Reimann, C. and Garrett, R.G., 2005. Geochemical background—concept and reality. *Science of the Total Environment*, 350(1–3): 12–27.
- Sangameswar, S. and Barnes, H., 1983. Supergene processes in zinc-lead-silver sulfide ores in carbonates. *Economic Geology*, 78(7): 1379–1397.
- Sangster, D., 1995. Mississippi Valley-Type Lead-Zinc. In: O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair and R.I. Thorpe (Editors), *Geology of Canadian Mineral Deposit Types*. Geological Survey of Canada, Canada, pp. 253–261.
- Sass-Gustkiewicz, M., Dzulynski, S. and Ridge, J.D., 1982. The emplacement of zinc-lead sulfide ores in the Upper Silesian District; a contribution to the understanding of mississippi valley-type deposits. *Economic Geology*, 77(2): 392–412.
- Şengör A., 1990. A new model for the late Palaeozoic-Mesozoic tectonic evolution of Iran and implications for Oman. In: A.H.F. Robertson, M.P. Searle and A.C. Ries (Editors), *The Geology and Tectonics of Oman Region*. The Geological Society, London, pp. 797–831.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG Bulletin*, 52(7): 1229–1258.
- Sumner, J.S., 1976. Principles of induced polarization for geophysical exploration. Elsevier, New York, 165 pp.
- Takahashi, T., 1960. Supergene alteration of zinc and lead deposits in limestone. *Economic Geology*, 55(6): 1083–1115.
- Tompkins, L.A., Pedone, V.A., Roche, M.T. and Groves, D.I., 1994. The Cadjebut Deposit as an example of mississippi valley-type mineralization on the Lennard Shelf, Western Australia; single episode or multiple events? *Economic Geology*, 89(3): 450–466.
- Velasco, F.H., Herrero, J.M., Yusta, I.a., Alonso, J.A., Seebold, I. and Leach, D., 2003. Geology and geochemistry of the Reocín zinc-lead deposit, Basque-Cantabrian basin, Northern Spain. *Economic Geology*, 98(7): 1371–1396.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Williams, P.A., 1990. Oxide zone geochemistry. Ellis Horwood Limited, England, 286 pp.
- YingChao, L., Song, Y., Fard, M., Zhou, L., Hou, Z. and Kendrick, M.A., 2019. Pyrite Re-Os age constraints on the Irankuh Zn-Pb deposit, Iran, and regional implications. *Ore Geology Reviews*, 104(1): 148–159.
- Yingchao, L. Yucai, S., Zengqian, H., Zhusen, Y., Hongui, Z. and Wang, M., 2015. The Malayer-Esfahan Carbonate-Hosted Pb-Zn Metallogenic Belt in the Zagros Collisional Orogen of Iran: Characteristics and Genetic Types. *Acta Geologica Sinica*, 89(9): 1595–1606.
- Zahedi, M., 1976. Explanatory Text of the Esfahan Quadrangle Map: 1: 250,000;

- Geological Quadrangle F8. Geological Survey of Iran.
- Zekri, H., Cohen, D.R., Mokhtari, A.R. and Esmaili, A., 2019a. Geochemical Prospectivity Mapping Through a Feature Extraction–Selection Classification Scheme. *Natural Resources Research*, 28(3) 849–865.
- Zekri, H., Mokhtari, A.R. and Cohen, D.R., 2019b. Geochemical pattern recognition through matrix decomposition. *Ore Geology Reviews*, 104(3): 670–685.



## Knowledge-driven Approach to Exploration of Carbonate Hosted Zinc and Lead Deposits, Case study: North Irankuh district, Isfahan - Iran

Abbas Esmaili Sevieri<sup>1</sup>, Mohammad Hassan Karimpour<sup>1&2\*</sup>, Azadeh Malekzadeh Shafaroudi<sup>1&2</sup> and Asadollah Mahboubi<sup>1</sup>

1) Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2) Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Submitted: Feb. 09, 2019

Accepted: June 01, 2019

**Keywords:** Zinc, Lead, Dolomite, Exploration, Knowledge-driven, Irankuh

### Introduction

This research study is based on knowledge-driven approach to synthesize the different parameters which rule on the formation of carbonate hosted zinc and lead deposits. The analysis of available data sets of the north Irankuh district demonstrates the complexity of decision making due to the different anomalous prospects introduced by geophysical, geochemical and surface evidences. Five known deposit/active mines, namely Gushfil, Zone 1 Gushfil, Blind, Tapeh Sorkh and Zone 5 Romarmar with total geological resources quoted as 13.4 million tons at 5.53% combined lead and zinc (Fig. 10) were selected to be examined in order to asset a knowledge-driven approach to the exploration of carbonate hosted zinc and lead deposits. The diversity of geometry, mineralogy and host rock of the deposits is tightly confined by the parameters surrounding the genesis of MVT deposits such as genetics of solutions, temperature of deposit formation, tectonic channel ways, different episodes of deposition of sphalerite and galena, hydrologic system of area, solution direction, wall rock reactions (Leach et al., 2010), depth of solution penetration, solution response to the Magnesian regime and metal bearing.

### Materials, Methods, and Procedures

The present study consists of detailed underground and surface mapping, reinterpretation of district geology, detailed

logging of about 100000 meters' diamond drilling, ore geology, tectonic settings, deposits geometry, geochemical and geophysical survey within 7 square kilometers of north Irankuh district between the Gushfil and Tapeh Sorkh deposits.

### Discussion and Results

Five known deposits in the north Irankuh district occur in the area of an intense detachment faulting (Fig. 1 and Fig. 5). The Gushfil, Zone 1 Gushfil and Blind deposits occur in north Irankuh reverse fault and Tapeh Sorkh and Zone 5 Romarmar in the trust fault. The deposits are confined to a certain stratigraphic unit locally called K3D (Figs. 2 and 3). Widespread regional selective dolomitization shows an extensive lateral movement from NW to SE and the depth of dolomitization in certain units drastically decreases. Two main regimes of solutions initially started with sphalerite and they were subsequently followed by galena the later of which is found in the secondary porosity. Mineralogy of the deposits is simple but the pyrite amount of the deposits varies from 2% to 20% which reflects the higher temperature of the solutions responsible for sulphide precipitation (Marie et al., 2001), geometry of the deposits and their distance to the current topography effect on chargeability values (Fig. 20).

Sparry dolomite is found in three types as barren,

\*Corresponding authors Email: karimpur@um.ac.ir

with pyrite and light color sphalerite that occur in country rocks of all deposits except for the blind deposits. They can be used as a guide, addressing potential deposits.

EPMA analysis revealed a considerable amount of Cadmium, Silver, Antimony, Arsenic and Copper within Sphalerite and Galena minerals (Fig. 12). Because of the semiarid climate in the area the decomposition of sphalerite, galena (Hitzman et al., 2003) and carbonate host rock has caused widespread distribution of Zn, Pb, Ag, Cd, Sb, As, Cu, Mn, Mg, Fe and Ca in the secondary halo of the area. The soil samples have been studied based on the static and machine learning methods (Figs. 13–A and B) by different researchers (Zekri et al., 2019). The anomalous areas based on geochemical studies have been tested by core drilling and the results are considered to be negative even in the area called Zone 3 which coincides with both geochemical and geophysical anomalies. In a different approach to understand the structure of geochemical elements the distribution of Zn, Pb, Ag, Cd, Sb, As, Cu, Mn, Ba together with elements such as Mg, Fe and Ca has been compared (Figs. 14, 15 and 16).

The soils are heavily polluted due to widespread mineralization and no background value (Reimann and De Caritat, 2012) can be recognized.

The comparative analysis of element concentrations in 5 selected populations in the studied area (Fig. 15) did not show any signs that could help recognize important anomalies from the false anomaly. However, it seems that the sudden decrease of Mg content (Fig. 17–C) in the area of Zone 3 (Zekri et al., 2019) is meaningful. Two geochemical profiles of soil samples crossing along this population and the next one crossing an active mine (Zone 5 Romarmar) (Fig. 18) provide us with a better understanding of the important anomalies versus the false anomaly since in the false anomaly the increase of Zn, Pb, Ag, Cd, Sb,

As, Cu coincides with a sudden drop of concentration of Mg, Fe and Ca (Figs. 18–A and B).

Recognition of ore containing strata (Sangster, 1995) is very important (Figs. 2 and 3) in locating successful drill holes in the exploration of carbonate hosted zinc and lead deposits. Eventually the use of data driven methods even opting advanced machine learning methods is not properly sufficient to recognize productive areas and we recommended the knowledge -driven approach.

## References

- Hitzman, M.W., Reynolds, N.A., Sangster, D., Allen, C.R. and Carman, C.E., 2003. Classification, genesis, and exploration guides for nonsulfide zinc deposits. *Economic Geology*, 98(4): 685–714.
- Leach, D.L., Taylor, R.D., Fey, D.L., Diehl, S.F. and Saltus, R.W., 2010. A deposit model for Mississippi Valley-type lead-zinc ores. United States Geological Survey, Virginia, Report 2, 64 pp.
- Marie, J.S., Kesler, S.E. and Allen, C.R., 2001. Origin of iron-rich Mississippi Valley-type deposits. *Geology*, 29(1): 59–62.
- Reimann, C. and De Caritat, P., 2012. Chemical elements in the environment: factsheets for the geochemist and environmental scientist. Springer-Verlag, Berlin, 403 pp.
- Sangster, D., 1995. Mississippi Valley-Type Lead-Zinc. In: O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair and R.I. Thorpe (Editors), *Geology of Canadian Mineral Deposit Types*. Geological Survey of Canada, Canada, pp. 253–261.
- Zekri, H., Cohen, D.R., Mokhtari, A.R. and Esmaeili, A., 2019. Geochemical Prospectivity Mapping Through a Feature Extraction–Selection Classification Scheme. *Natural Resources Research*, 28(3) 849–865.