



## زمین‌شناسی، کانی‌سازی، شیمی کانی‌ها، شیمی و منشأ محلول کانه‌دار در ناحیه معدنی سرب و روی ایرانکوه، جنوب اصفهان

محمدحسن کریم‌پور<sup>۱\*</sup>، آزاده ملکزاده شفارودی<sup>۱</sup>، عباس اسماعیلی سویری<sup>۱</sup>، سعید شعبانی<sup>۱</sup>، جولین الاز<sup>۲</sup> و چارلز استرن<sup>۲</sup>

(۱) گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(۲) دانشکده علوم زمین، دانشگاه کلرادو، بولدر، امریکا

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۱۶، پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۳

### چکیده

ناحیه معدنی ایرانکوه در جنوب اصفهان و در کمربند متالورژی ملایر- اصفهان در زون سنندج- سیرجان واقع شده است. بر اساس شواهد زمین‌شناسی، آلتراسیون، شکل و بافت کانی‌سازی و مجموعه کانیایی، کانی‌سازی سرب و روی از نوع می‌سی‌سی‌پی است. زمین‌شناسی منطقه شامل سیلتستون و شیل ژوراسیک و انواع مختلف واحدهای کربناته کرتاسه است. کانی‌سازی کنترل ساختاری دارد و در سنگ میزبان کربناته (دولستون و سنگ آهک) و کمتر سنگ‌های آواری به شکل اپی‌ژنتیک تشکیل شده است. کانه‌زایی به شکل‌های برشی، رگه‌چه‌ای، پرکننده فضای خالی، لکه‌ای، پراکنده و جان‌شینی (در سنگ میزبان کربناته) دیده می‌شود. مجموعه کانیایی شامل اسفالریت غنی از آهن، گالن، کمی پیریت همراه با باطله‌های دولومیت غنی از آهن، آنکریت، بیتومن، کلسیت  $\pm$  کوارتز  $\pm$  باریت است. همبستگی مثبتی بین نقره و آنتیموان در گالن دیده می‌شود. نسبت Sb/Bi در کانی گالن بیش از ۲۰ است که شاخصه کانسارهای دما پایین است. دمای تشکیل ایرانکوه (۱۷۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد) از کانسارهای تیبیک می‌سی‌سی‌پی امریکا (۸۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد) بالاتر است. بر اساس مقایسه ایرانکوه با ذخایر امریکا، دمای تشکیل کانسار رابطه مستقیم با مقدار آهن و رابطه‌ای معکوس با مقدار کادمیوم اسفالریت دارد. مقدار آهن در اسفالریت‌های منطقه به بیش از ۵ درصد رسیده و مقدار کادمیوم کمتر از ۲۰۰۰ گرم در تن است. همچنین دولومیت‌های هیدروترمالی در سنگ میزبان کربناته غنی از آهن هستند و در برخی نقاط آنکریت تشکیل شده است که نشان‌دهنده محلولی هیدروترمالی غنی از آهن است. در سنگ میزبان آواری، عمده آهن محلول کانه‌دار با گوگرد واکنش داده و پیریت را تشکیل داده است. در این قسمت‌ها دولومیت‌ها کم آهن هستند. سنگ‌های کربناته کرتاسه در محدوده زمانی حدود ۱۲۰ تا ۱۳۰ میلیون سال قبل تشکیل شده‌اند. در حالی که گسل‌های تراستی- معکوس که نقشی مهم در تشکیل کانی‌سازی سرب- روی داشته‌اند، مربوط به وقایع کوه‌زایی ۷۰ تا ۵۰ میلیون سال پیش هستند. محلول‌های گرمابی (در محدوده زمانی ۶۰ تا ۵۰ میلیون سال قبل) از اعماق از مسیر این گسل‌ها به مکان مناسب فعلی منتقل شده‌اند. شاخصه‌های کانی‌شناختی، دمایی و ماهیت غنی از آهن محلول کانه‌دار منطقه ایرانکوه می‌تواند به‌عنوان الگویی برای اکتشاف این نوع کانسارها در ایران و دنیا مدنظر قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** کانه‌زایی، شیمی کانی، محلول غنی از آهن، ایرانکوه، اصفهان

### مقدمه

جغرافیایی ۳۳° ۵۱' تا ۴۰° ۵۱' و عرض جغرافیایی ۲۸° ۳۲' تا ۳۲° ۳۲'

۳۲° قرار دارد. این منطقه از لحاظ تقسیمات ساختاری در زون

ناحیه معدنی ایرانکوه در جنوب شهر اصفهان و در محدوده طول

ژئوشیمی و بررسی‌های ایزوتوپی کار شده است، کانی‌سازی سرب و روی ایرانکوه از نوع دره می‌سی‌سی‌بی (MVT) معرفی شده است، به‌جز بویری کناری و همکاران (Boveiri Konari et al., 2015) و بویری کناری و راستاد (Boveiri Konari and Rastad, 2016) که بر پایه بافت و ساخت و کانی‌شناسی در معدن تپه سرخ (بخش غربی ایرانکوه)، آن را شبیه ذخایر سرب و روی نوع سدکس یا ایرلندی معرفی کرده‌اند و معتقدند که کانی‌سازی در محیط آب دریا در کرتاسه زیرین (حدود ۱۳۵ میلیون سال پیش) تشکیل شده و بخش‌هایی از آن سین‌ژنتیک است.

در این پژوهش، نقشه زمین‌شناسی جدیدی از منطقه معدنی ایرانکوه با مقیاس ۱:۵۰۰۰ و با هدف تفکیک واحدهای سنگی میزبان به‌ویژه سنگ‌های کربناته بر اساس تغییرات بافتی، کانی‌شناسی و غیره و نیز ارتباط گسل‌ها و نقش سازنده و مخرب آنها در کانی‌سازی ارائه خواهد شد. انواع بافت و هم‌یافت کانیایی به تفکیک سنگ میزبان منطقه بررسی شده است و شیمی کانی‌های اسفالریت و گالن به‌عنوان مهمترین کانه‌های سولفیدی معدن و شیمی کانی دولومیت به‌عنوان مهمترین کانه باطله ارائه می‌شود. در نهایت، اطلاعات به‌دست آمده با کمک اطلاعات ایزوتوپ پایدار و سیالات درگیر از قبل موجود تلفیق شده و بر روی شرایط محلول‌کانه‌دار در منطقه ایرانکوه بحث خواهد شد. این بررسی‌ها را می‌توان به‌عنوان الگویی برای اکتشاف این نوع ذخایر در منطقه ایرانکوه و نیز کانسارهای مشابه در ایران و دنیا پیشنهاد کرد.

### روش مطالعه

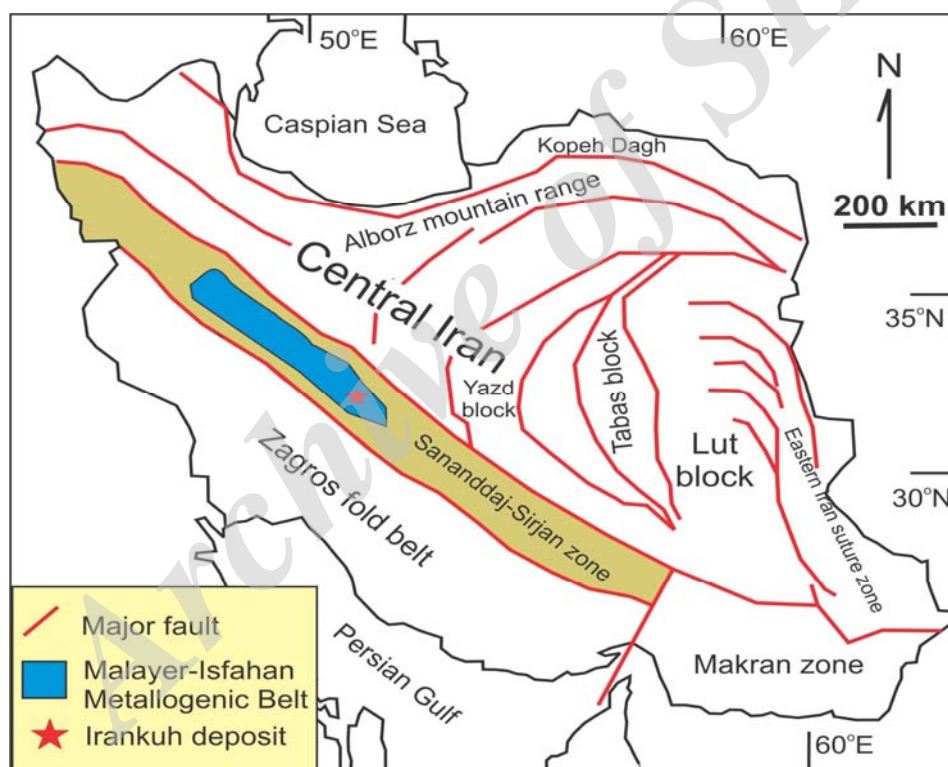
برای دستیابی به اهداف مورد نظر این پژوهش، پس از بررسی‌های صحرایی (در قالب برداشت بیش از ۴۰ پروفیل عمود بر امتداد لایه‌بندی سنگ‌های میزبان) و نمونه‌برداری از سطح، گمانه‌ها و تونل‌ها، تعداد ۲۰۰ مقطع نازک برای بررسی پتروگرافی و آلتراسیون و ۷۰ مقطع نازک صیقلی برای بررسی‌های کانه‌نگاری و تعیین روابط هم‌یافتی تهیه و مطالعه شدند. سپس بر پایه برداشت‌های صحرایی و بررسی‌های

سندج- سیرجان و در کمر بند متالوژنی ملایر- اصفهان واقع شده است (شکل ۱). کمر بند ملایر- اصفهان یکی از مهمترین ایالت‌های متالوژنی ذخایر سرب و روی ایران با سنگ میزبان کربناته به سن کرتاسه است (Rajabi et al., 2012) که بخش عمده آن استان‌های مرکزی، اصفهان و همدان را در برمی‌گیرد و از نظر سرگذشت زمین‌شناسی، وضعیت رسوب‌گذاری و ساختاری، شبیه پهنه ایران مرکزی است (Nakini et al., 2015).

این منطقه هم‌اکنون متعلق به شرکت باما است که از سال ۱۳۳۱ تاکنون بررسی‌های وسیع اکتشافی- بهره‌برداری را در منطقه انجام داده است. در منطقه ایرانکوه معادن فعالی همچون گوشفیل، تپه سرخ یک، کلاه دراوزه، ذخیره مدفون (تپه سرخ سه) و زون ۵ رومرمر، معادن متروکه مانند گودزندان، خانه گرگی و چشمه زرد و مناطق اکتشافی مانند زون‌های یک تا چهار رومرمر و زون گوشفیل یک وجود دارد. میزان ذخیره و عیار بخش‌های مهم منطقه در جدول ۱ آمده است. از آنجایی که منطقه معدنی ایرانکوه از مهمترین و بزرگترین مجموعه ذخایر سرب و روی با سنگ میزبان کربناته در ایران است؛ لذا، گزارش‌های زمین‌شناسی، اکتشافی و ژئوفیزیکی، پایان‌نامه‌ها و مقالات متعددی درباره آن نوشته شده است که از مهمترین و جدیدترین آنها می‌توان به راستاد (Rastad, 1981)، غضبان و همکاران (Ghazban et al., 1994)، قاسمی (Ghasemi, 1995)، ریچرت (Reichert, 2007)، تیموری اصل (Timoori-Asl, 2010)، تیموری اصل و همکاران (Ayati et al., 2011)، Timoori-Asl et al., 2013)، حسینی دینانی و همکاران (Hosseini-Dinani et al., 2015)، بویری کناری و همکاران (Boveiri Konari et al., 2015)، حسینی دینانی و آفتابی (Hosseini-Dinani et al., 2015) and Aftabi, 2016) و بویری کناری و راستاد (Boveiri Konari and Rastad, 2016) اشاره کرد. در این پایان‌نامه‌ها و مقاله‌ها که بعضی بر روی کل محدوده معدنی و بعضی در بخش‌های خاصی و در ارتباط با زمین‌شناسی، کانی‌سازی،

تن) برخوردار است. در مجموع تعداد ۳۶ نقطه در کانی گالن و ۳۵ نقطه در کانی اسفالریت مورد تجزیه قرار گرفت. در نهایت، برای تکمیل داده‌ها و بحث بر روی نحوه تشکیل کانی‌سازی و شرایط محلول کانه‌دار سرب و روی ایرانکوه، از اطلاعات شیمی کانی دولومیت و بررسی سیالات درگیر از بویری کناری و راستاد (Boveiri Konari and Rastad, 2016) و اطلاعات ایزوتوپ‌های پایدار از غضبان و همکاران (Ghazban et al., 1994) استفاده شده است.

آزمایشگاهی، نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. برای بررسی شیمی کانی‌های اسفالریت و گالن، ۷ مقطع نازک صیقل 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 اتوماتیک 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



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه معدنی ایرانکوه در زون سنندج-سیرجان و کمربند متالوژنی ملایر-اصفهان

Fig. 1. Location of Irankuh mining district in Sanandaj-Sirjan zone and Malayer-Isfahan Metallogenic Belt

۱:۲۵۰۰۰۰ اصفهان (Zahedi et al., 1976) شامل سنگ‌های رسوبی ژوراسیک و کرتاسه زیرین است. سنگ‌های ژوراسیک زیرین شامل شیل‌های سیاه آمونیت‌دار همراه با کمی سیلتستون، کنگلومرا، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک رادیولاریت‌دار است و تنها در یال شمالی این رشته‌کوه رخنمون دارند. عمده سنگ‌های

### زمین‌شناسی

منطقه معدنی ایرانکوه در امتداد رشته‌کوه ایرانکوه با روند غرب-شمال‌غرب و شرق-جنوب‌شرق قرار دارد. طول این رشته‌کوه ۲۰ کیلومتر و عرض آن حدود ۴ کیلومتر است. زمین‌شناسی ناحیه‌ای معدنی ایرانکوه بر اساس نقشه زمین‌شناسی

پیشین هستند. ضخامت آنها حدود ۸۲۲ متر است که به صورت عمده از آهک و دولومیت همراه با مقدار کمی شیل و مارن تشکیل شده‌اند (Zahedi et al., 1976).

رخنمون یافته در رشته کوه ایرانکوه، سنگ‌های کربناته کرتاسه است که به صورت دگرشیب روی سنگ‌های ژوراسیک زیرین قرار گرفته‌اند. این سنگ‌ها از نظر سنی متعلق به بارمین تا آلبین

جدول ۱. عیار و میزان ذخیره معادن ایرانکوه

Table 1. Grade and reserve values of Irankuh mines

Mines AND promising zones	Total reserve	Ore exploited till 20th March 2014	Remaining Ore		Grade		
			Proved	Possible	Pb	Zn	
	Ton	Ton	Ton	Ton	%	%	
Gushfil	Open Pit	2700000	2700000	0	0	1.0	6.0
	Under ground	1029574	629574	400000		0.9	5.0
Tapehsorkh 1	Open Pit	3800000	3502858	297142	0	1.5	3.5
	Under Ground	300000	0	300000	400000	1.5	3.5
Blind Deposit (Tapehsorkh 3)		420000	126000	294000	-	3.5	6.0
Kolahdarvazeh		1500000	1315500	184500	-	1.1	9.2
Zone 1 Gushfil		800000	23629	776371	1500000	1.0	3.9
Zone 1 Rowmarmar		250000	0	250000	270000	0.8	2.9
Zone 5 Rowmarmar	Zinc Vein	1500000	0	1400000		2.3	5.8
	Lead Vein	-	-	-	-	-	-
Total		13900000	8297561	3902013	2170000	-	-

ایرانکوه است که اغلب به صورت رگه و رگه‌چه داخل آن تشکیل شده است و غالباً شامل پیریت و کمتر کالکوپیریت با باطله کوارتز است. واحدهای کربناته کرتاسه بر اساس بافت، کانی‌شناسی، ضخامت، رنگ، وجود فسیل و غیره به ۱۲ نوع مختلف قایل تقسیم هستند که عبارتند از (شکل ۲): آهک دولومیتی، تناوب دولستون خاکستری و سنگ آهک دولومیتی قهوه‌ای ریز تا متوسط دانه، دولستون توده‌ای تا ضخیم لایه خاکستری تا قهوه‌ای - قرمز همراه با مواد آلی، دولستون ریز تا

بر اساس بررسی‌های صحرائی و آزمایشگاهی در محدوده گوشفیل، تپه سرخ، ذخیره مدفون و رومرمر، واحدهای آواری ژوراسیک، سنگ‌های کربناته کرتاسه و رسوبات کواترنری رخنمون دارند. واحد ژوراسیک شامل سیلستون سبز زیتونی و شیل غنی از مواد آلی است که در بخش شمالی پیت گوشفیل در شرق و پیت ذخیره مدفون در شمال غربی محدوده دیده می‌شوند و بر روی سنگ‌های کربناته کرتاسه رانده شده‌اند (شکل ۲). این واحد میزان بخشی از کانی‌سازی سرب و روی

منطقه، گسل بزرگ شمال محدوده و انشعابات آن است که روند شمال‌غربی - جنوب شرقی دارد و رخنمون آن به خوبی در پیت‌های گوشفیل و تپه سرخ ۳ دیده می‌شود. گسل‌های تراستی سازنده دیگر نیز عمدتاً هم‌روند با همین گسل شمال محدوده هستند و می‌توان اظهار داشت که امتداد شمال‌غربی - جنوب شرقی مهمترین روند تشکیل کانی‌سازی بوده است (شکل ۲). برخی گسل‌های نرمال با روند شمال‌غربی - جنوب شرقی یا شمال شرقی - جنوب غربی نیز محلی مناسب برای تشکیل کانی‌سازی بوده‌اند و سازنده محسوب می‌شوند (شکل ۲). زون گوسان، کانی‌سازی ثانویه مس، باریت و گاهی کانی‌سازی سرب و روی در راستای آنها یا در محل تقاطع آنها دیده می‌شود. گسل‌های مخرب که بعد از تشکیل کانی‌سازی به وجود آمده‌اند و باعث جابه‌جایی، تغییرات شکلی و قطع شدن زون‌های کانه‌دار شده‌اند، نیز به سه نوع تراست، نرمال و امتدادلغز تقسیم می‌شوند (شکل ۲).

### کانی‌سازی و آلتراسیون

کانی‌سازی در مجموعه معادن ایرانکوه به شکل اپی‌ژنتیک و با کنترل ساختاری در گسل‌های موجود در مرز شیل‌ها و سیلستون‌های ژوراسیک و سنگ‌های کربناته کرتاسه و یا در گسل‌های داخل واحد کربناته تشکیل شده است. سنگ میزبان کانی‌سازی سرب و روی اغلب دولستون (دولستون توده‌ای تا ضخیم لایه خاکستری تا قهوه‌ای - قرمز همراه با مواد آلی) و کمتر شیل و سیلستون است. در سنگ میزبان دولستون، کانه‌زایی به دو شکل کلی جانیشینی و پرکننده فضاها (فضاهای ایجاد شده توسط گسل مانند رگچه‌های زمین‌ساختی یا برش‌های گسلی و یا حفرات سنگ میزبان) تشکیل شده است؛ در حالی که در واحد شیلی - سیلستون فقط فضاها ایجاد شده به وسیله گسل توسط محلول کانه‌دار پر شده است و مقدار ذخیره در آنها بسیار کمتر از واحد دولستون است.

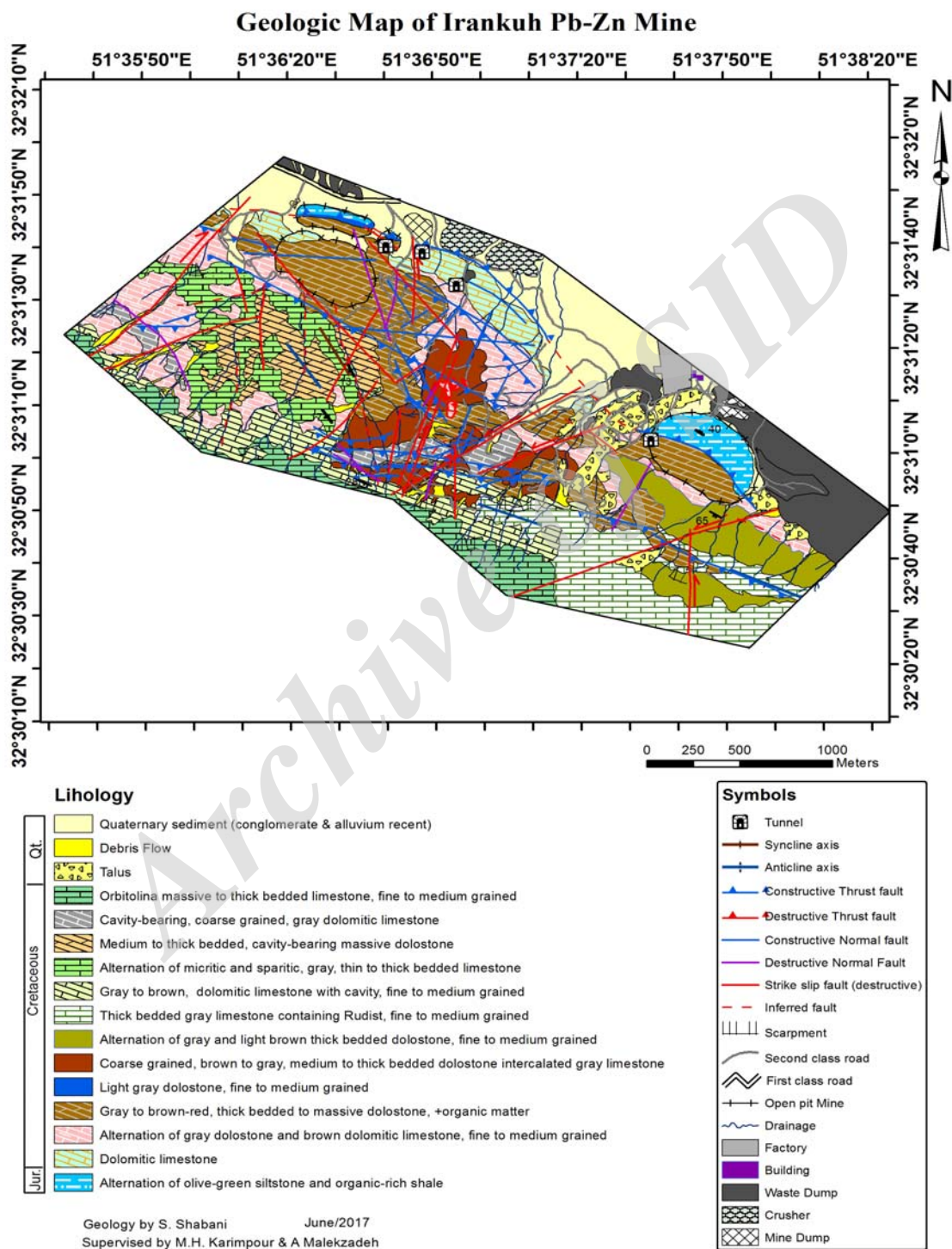
کانی‌سازی از لایه‌بندی و شیب سنگ میزبان پیروی نمی‌کند و ساختارهای زمین‌شناسی به دو شکل نقشی مهم در تشکیل آن

متوسط دانه خاکستری روشن، دولستون ضخیم تا متوسط لایه دانه درشت قهوه‌ای تا خاکستری همراه با سنگ آهک خاکستری به شکل بین لایه‌ای، تناوب دولستون‌های ریز تا متوسط دانه ضخیم لایه قهوه‌ای روشن و خاکستری، سنگ آهک ریزدانه ضخیم لایه خاکستری حاوی فسفیل رودسیت، سنگ آهک دولومیتی خاکستری تا قهوه‌ای ریز تا متوسط دانه حفره‌دار، تناوب سنگ آهک نازک تا ضخیم لایه خاکستری میکریتی تا اسپارایتی، دولستون توده‌ای حفره‌دار متوسط تا ضخیم لایه، سنگ آهک دولومیتی خاکستری درشت دانه حفره‌دار و سنگ آهک ریز تا متوسط دانه توده‌ای تا ضخیم لایه اربیتولین‌دار. از این میان واحدهای دولستون توده‌ای تا ضخیم لایه خاکستری تا قهوه‌ای - قرمز همراه با مواد آلی (که در بخش جنوبی پیت گوشفیل و ذخیره مدفون و کل پیت تپه سرخ و بخش‌هایی از مرکز محدوده (منطقه رومرمر) دیده می‌شود)، دولستون درشت‌دانه ضخیم تا متوسط لایه قهوه‌ای تا خاکستری و سنگ آهک دولومیتی خاکستری درشت‌دانه و حفره‌دار در مرکز محدوده (شکل ۲)، مهمترین واحدهای کربناته منطقه به لحاظ میزبانی کانی‌سازی است. در بخش‌هایی که بافت این واحدها درشت‌تر بوده و فضای خالی بیشتری وجود داشته است و در مجاورت گسل‌های سازنده منطقه (که محل عبور محلول کانه‌دار بوده قرار داشته است)، حجم زیادی از کانی‌سازی سرب و روی درون آنها دیده می‌شود.

واحدهای جوان کواترنری شامل رسوبات تالوس (حاصل فعالیت‌های زمین‌ساختی منطقه)، جریان‌های واریزه‌ای و کنگلومرای سخت‌نشده، تراس‌ها و آبرفت‌های جوان است که عمدتاً در حاشیه شمالی محدوده رخنمون دارند (شکل ۲).

گسل‌ها و ساختمان‌های سازنده قبل از کانی‌سازی در منطقه تشکیل شده‌اند و گذرگاهی مناسب برای انتقال و مهاجرت محلول‌های کانه‌دار از اعماق بوده‌اند. حضور آنها در سنگ میزبان مناسب موجب واکنش محلول و شکل‌گیری ذخایر سرب و روی شده است. این گسل‌ها را می‌توان به دو نوع تراست و نرمال تقسیم کرد. مهمترین گسل تراستی سازنده کانی‌سازی در

داشته‌اند: ۱- گذرگاه محلول گرمابی از اعماق به منطقه سنگ میزبان و تشکیل ذخیره معدنی. کانی‌سازی و ۲- مکان مناسب برای جای‌گیری، جانمایی با

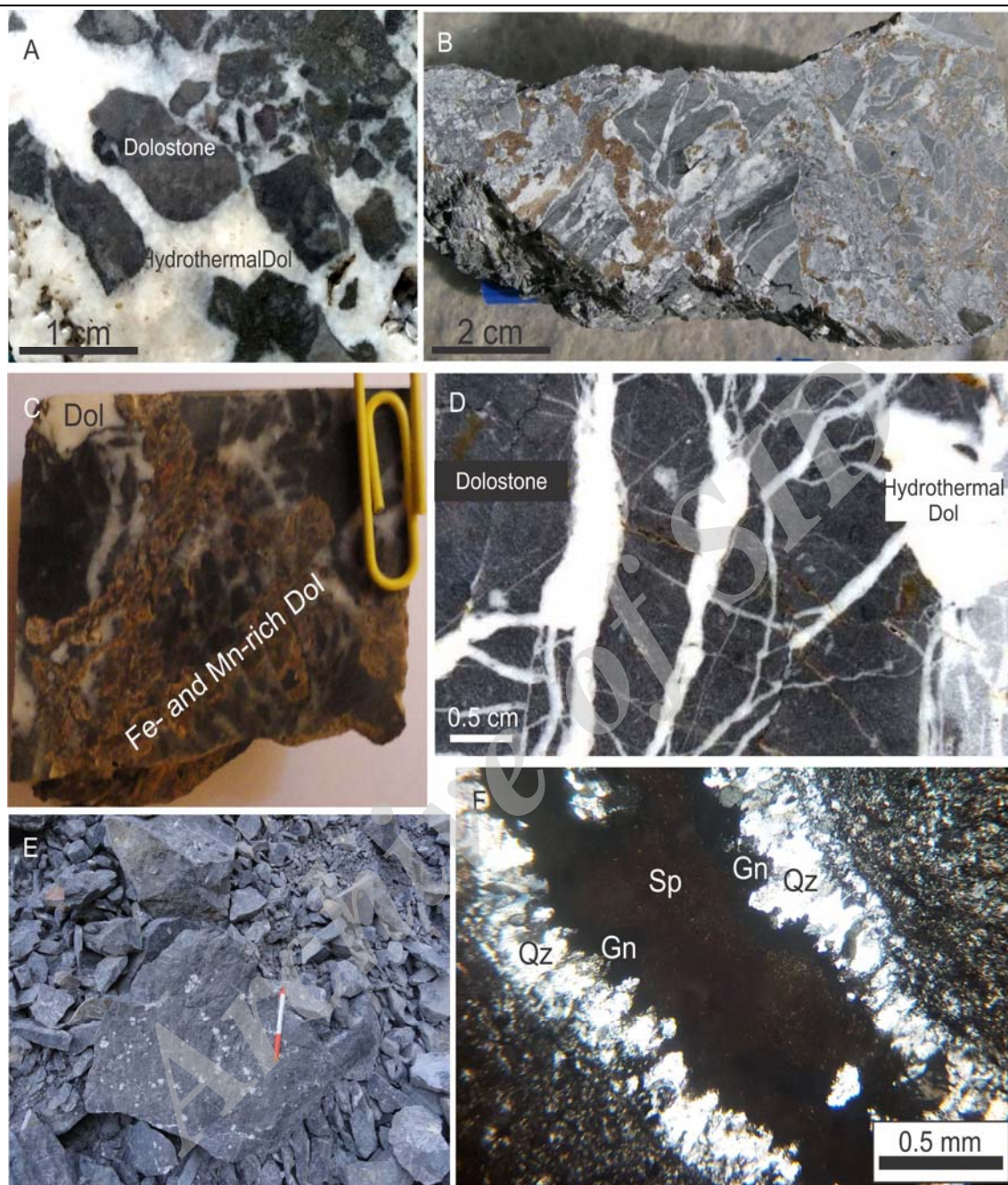


شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ناحیه معدنی ایرانکوه  
Fig. 2. Geologic map of Irankuh mining district

میزان ضخامت زون کانی‌سازی در حریم اطراف گسل‌ها در بخش‌های مختلف ایرانکوه متفاوت است و به میزان تخلخل، اندازه بلورها، ترکیب شیمیایی و ترکیب کانی‌شناختی دولستون میزبان بستگی داشته است. بر همین اساس در برخی قسمت‌ها مانند کانسار گوشفیل، ضخامت‌ها و عیارهای قابل توجهی از کانی‌سازی (ضخامت ۳۰ متر و عیار سرب و روی مجموعاً ۷ درصد) به چشم می‌خورد که در زون متالوژنی ملایر-اصفهان بی‌نظیر است. این مساله بیانگر آن است که محلول هیدروترمالی با دولستون میزبان واکنش داده و به جانشینی منجر شده است؛ در حالی که در بخش‌های دیگری همچون رومرمر و مناطقی از تپه سرخ به دلیل ریزبافت بودن دولستون میزبان، عمل جانشینی انجام نشده و ضخامت زون کانی‌سازی محدود به ضخامت زون گسلی است.

کانی‌شناسی ایرانکوه ساده بوده و شامل اسفالریت، گالن، پیریت و اندکی کالکوپیریت است که با کانی‌های باطله دولومیت، آنکریت، کوارتز، بیتومن و کمتر کلسیت و باریت همراهی می‌شود. کانی‌های ثانویه شامل کانی‌های ثانویه سرب و روی و اکسیدهای آهن و منگنز است. این کانی‌ها در قالب بافت‌های متنوعی دیده می‌شوند که مهمترین آنها برشی، جانشینی، رگه‌چه‌ای، لکه‌ای، پرکننده فضای خالی و پراکنده است (شکل ۳-۳ A, B, C, D, E و F). بافت برشی یکی از مهمترین بافت کانی‌سازی در ناحیه معدنی ایرانکوه است. در این بخش‌ها سنگ میزبان توسط فعالیت گسلی برشی شده و سپس اغلب توسط دولومیت  $\pm$  سولفید حاصل از محلول کانه‌دار فضای بین قطعات پر شده است (شکل ۳-۳ A). گاهی چندین مرحله فعالیت گسلی و محلول‌گرمایی را در یک نمونه می‌توان دید. به صورتی که در شکل ۳-۳ B، ابتدا سنگ میزبان دولستون در زون گسلی برشی شده است. سپس محلول هیدروترمالی به تشکیل دولومیت سفیدرنگ در فضای بین قطعات منجر شده و با فعالیت مجدد گسل، قطعات و سیمان قبلی دوباره برشی شده و در مرحله دوم محلول کانه‌دار باعث تشکیل دولومیت، اسفالریت و دیگر کانی‌ها در سیمان آنها شده است. در شکل ۳-۳ C نیز حداقل سه

مرحله فعالیت گسلی و دو مرحله فعالیت محلول هیدروترمالی دیده می‌شود. در مرحله اول دولستون میزبان برشی شده و سپس توسط محلول هیدروترمالی، فضای بین قطعات با دولومیت‌های سفیدرنگ سیمانی شده است. در مرحله دوم فعالیت گسلی، قطعات سنگ میزبان و سیمان دولومیت سفید رنگ مجدد برشی شده و محلول کانه‌دار باعث تشکیل دولومیت‌های هیدروترمالی قهوه‌ای- نارنجی شده است. در این مرحله جانشینی نیز رخ داده است. سپس فعالیت مجدد گسل برای سومین بار به برشی شدن همه موارد قبلی منجر شده است. رگه‌چه‌های زمین‌ساختی نیز در اطراف حریم زون‌های گسلی به‌وفور دیده می‌شوند. ضخامت رگه‌چه‌ها از چند میلی‌متر تا حداکثر یک سانتی‌متر متغیر است (شکل ۳-۳ D) و به انواع مختلف دولومیت، دولومیت-بیتومن-اسفالریت-گالن، بیتومن-دولومیت-اسفالریت  $\pm$  گالن، دولومیت-بیتومن  $\pm$  اسفالریت، دولومیت-بیتومن  $\pm$  گالن، دولومیت  $\pm$  بیتومن، کوارتز-دولومیت-اسفالریت-گالن  $\pm$  پیریت، کوارتز-اسفالریت-گالن  $\pm$  پیریت  $\pm$  بیتومن، کوارتز-دولومیت  $\pm$  بیتومن، کوارتز-اسفالریت-گالن  $\pm$  پیریت، کوارتز-دولومیت  $\pm$  بیتومن، کوارتز-اسفالریت-گالن-دولومیت، گالن  $\pm$  دولومیت، کوارتز-دولومیت-گالن-اسفالریت-بیتومن، پیریت، کوارتز-باریت-گالن، کلسیت، کلسیت-دولومیت، باریت تقسیم می‌شوند. دولومیت‌های هیدروترمالی سفیدرنگ لکه‌ای در اطراف زون‌های کانی‌سازی دیده می‌شوند و با نزدیک شدن به زون کانی‌سازی بر مقدار آنها افزوده می‌شود (شکل ۳-۳ E). به صورتی که از وجود این بافت به‌عنوان راهنمای اکتشافی برای گالن و اسفالریت می‌توان استفاده کرد. اندازه لکه‌ها از چند میلی‌متر تا ۵ سانتی‌متر متغیر است و مقدار آنها از ۵ درصد تا ۲۵ درصد حجم سنگ در نزدیکی زون‌های کانی‌سازی افزایش می‌یابد. این دولومیت‌ها در حقیقت حفرات کارستی یا انحلالی سنگ میزبان را پر کرده‌اند. بافت پرکننده فضای خالی در رگه‌چه‌ها دیده می‌شود و با تقارن کانی‌ها در طرفین رگه‌چه مشخص می‌شود. این بافت از مهمترین بافت‌های ذخایر اپی‌ژنتیک است و نداشتن جانشینی بین محلول کانه‌دار و سنگ میزبان را نیز بازگو می‌کند (شکل ۳-۳ F).



شکل ۳. تصاویری از انواع بافت در ایرانکوه. A: بافت برشی. قطعاتی از دولستون میزبان که توسط دولومیت هیدروترمالی سیمانی شده است، B: دو مرحله برشی شدن و فعالیت محلول هیدروترمالی (برای توضیح متن را ببینید)، C: سه مرحله فعالیت گسلی و دو مرحله فعالیت محلول هیدروترمالی در یک نمونه (برای توضیح متن را ببینید)، D: بافت رگه‌چهای، E: لکه‌های دولومیت در اطراف زون‌های کانی‌سازی و F: بافت پرکننده فضای خالی در مقطع میکروسکوپی در نور PPL. به ترتیب کوارتز، گالن و بعد اسفالریت تشکیل شده است (Dol = دولومیت، Qz = کوارتز، Sp = اسفالریت، Gn = گالن، Sp = اسفالریت (Whitney and Evans, 2010))

**Fig. 3.** Images of types of texture from the Irankuh. A: Brecciated texture. Fragments of hosted dolomite are cemented by hydrothermal dolomite, B: Two stages of brecciation and hydrothermal solution activity (see text for explanation), C: Three stages of fault activity and two stages of hydrothermal solution activity (see text for explanation), D: Veinlet texture, E: Spotted dolomite around mineralization zones, and F: Open space filling texture in thin section at PPL. Quartz, galena, and sphalerite are occurred, respectively (Dol = dolomite, Qz = quartz, Gn = galena, Sp = sphalerite (Whitney and Evans, 2010))

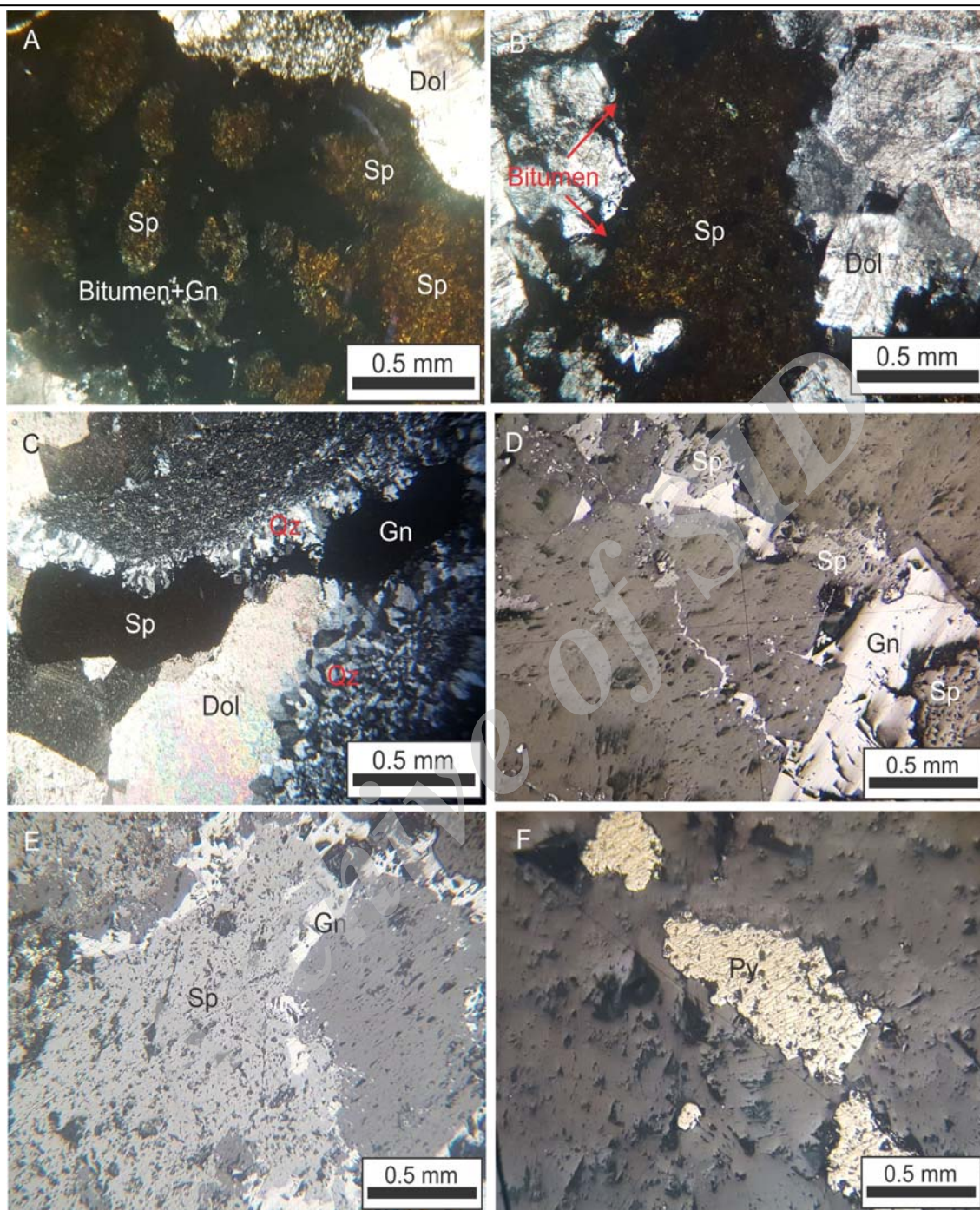


کانی سولفید آهن در ایرانکوه است که در قالب بافت‌های پراکنده، رگه‌چه‌ای، پرکننده فضای خالی، فرامبوئیدال و گاهی توده‌ای عمدتاً در سنگ میزبان آواری و کمتر سنگ میزبان کربناته دیده می‌شود. رگه‌چه‌های حاوی پیریت به انواع کوارتز-دولومیت-اسفالریت-گالن  $\pm$  پیریت، کوارتز-اسفالریت-گالن  $\pm$  پیریت  $\pm$  بیتومن، کوارتز-پیریت و پیریت تقسیم می‌شوند (شکل ۴-F). مقدار این کانی در مجموع کمتر از اسفالریت و گالن است. در اغلب موارد به‌نظر می‌رسد این کانی قبل از تشکیل فاز کانی‌سازی سرب و روی یا هم‌زمان به‌وجود آمده است. عمده پیریت در سنگ میزبان آواری و همراه با باطله کوارتز دیده می‌شود.

دولومیتی شدن مهمترین آلتراسیون همراه با کانی‌سازی سرب و روی در منطقه ایرانکوه است که در هر دو سنگ میزبان کربناته و آواری دیده می‌شود. بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که بیش از ۱۰ نوع دولومیت هیدروترمالی را می‌توان تفکیک کرد. دولومیت‌های هیدروترمالی به شکل‌های پرکننده حفرات کارستی و انحلالی، رگه‌چه‌ای، جانشین شده در فسیل و سیمان برش‌های گسلی دیده می‌شوند و گاهی همراه با کانی‌سازی هستند. مقدار آنها با نزدیک شدن به زون‌های کانی‌سازی افزایش می‌یابد و از وجود آنها به‌عنوان راهنمای اکتشافی برای گالن و اسفالریت می‌توان استفاده کرد. دولومیت‌های هیدروترمالی پرکننده حفرات معمولاً با رنگ روشن، شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و در اندازه‌های ۰/۶ تا ۰/۷ میلی‌متر و خاموشی موجی شناخته می‌شوند (شکل ۵-A).

این نوع دولومیت‌ها گاهی همراه با کانی‌های کدر هستند. البته دولومیت‌های زین‌اسبی با بلورهای متوسط تا درشت در اندازه‌های ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر، خمیدگی در سطوح بلوری و رخ‌ها و خاموشی موجی نیز عمدتاً به شکل پرکننده حفرات و کمتر رگه‌چه‌ای دیده می‌شوند (شکل ۵-B). دولومیت‌های زین‌اسبی یک کانی باطله معمول بعد از دیاژنز و هیدروترمالی در کانسارهای سرب و روی نوع MVT هستند (Searl, 1989; Ghazban et al., 1994).

اسفالریت یکی از کانی‌های مهم سولفیدی مجموعه معادن ایرانکوه است که در قالب سیمان برش‌های گسلی، رگه‌چه‌ای، پراکنده و پرکننده فضای خالی در سنگ میزبان کربناته و آواری دیده می‌شود. مقدار این کانی از کمتر از یک درصد تا گاهی ۲۰ درصد حجم سنگ میزبان را در برمی‌گیرد. رگه‌چه‌هایی که حاوی اسفالریت هستند، به انواع دولومیت-بیتومن-اسفالریت-گالن، بیتومن-دولومیت-اسفالریت  $\pm$  گالن، دولومیت-بیتومن  $\pm$  اسفالریت، کوارتز-دولومیت-اسفالریت-گالن  $\pm$  پیریت، کوارتز-اسفالریت-گالن  $\pm$  پیریت  $\pm$  بیتومن، اسفالریت-گالن-دولومیت و کوارتز-دولومیت-گالن-اسفالریت-بیتومن تقسیم می‌شوند (شکل ۴-A, B, C, D و E). قرار گرفتن گالن در حاشیه اسفالریت و دربرگرفته شدن اسفالریت توسط گالن در برخی نمونه‌ها نشان می‌دهد که گالن بعد از اسفالریت تشکیل شده است (شکل ۴-D و E). گرچه در برخی رگه‌چه‌ها تشکیل گالن بر اسفالریت اولویت دارد (شکل ۳-F) و یا در بعضی نمونه‌ها هم‌رشدی نیز دیده می‌شود. همچنین در برخی نمونه‌ها در سنگ میزبان آواری، کالکوپیریت با بافت اکسلوشن داخل اسفالریت دیده می‌شود که نشان از هم‌زمانی و هم‌رشدی این دو کانی دارد. گالن دومین کانی مهم سولفیدی در ایرانکوه است که در قالب سیمان برش‌های گسلی، رگه‌چه‌ای، پراکنده و پرکننده فضای خالی در سنگ میزبان کربناته و آواری دیده می‌شود. رگه‌چه‌هایی که حاوی گالن هستند به انواع مختلف دولومیت-بیتومن-اسفالریت-گالن، بیتومن-دولومیت-اسفالریت  $\pm$  گالن، کوارتز-دولومیت-اسفالریت-گالن  $\pm$  پیریت، کوارتز-اسفالریت-گالن  $\pm$  پیریت  $\pm$  بیتومن، اسفالریت-گالن-دولومیت، کوارتز-دولومیت-اسفالریت-گالن-اسفالریت-بیتومن و کوارتز-باریت-گالن تقسیم می‌شوند (شکل ۴-A, B, C, D, E). خم‌شدگی رخ‌های گالن نشان‌دهنده عملکرد فعالیت‌های زمین‌ساختی جوانتر پس از تشکیل کانه‌زایی در منطقه است. همچنین در نمونه‌های بررسی‌شده ادخال درون این کانی دیده نشد. پیریت فراوانترین



شکل ۴. تصاویری از کانی‌سازی در ایرانکوه. A: رگه‌چه دولومیت-بیتومن-اسفالریت-گالن در نور عبوری XPL، B: رگه‌چه بیتومن-دولومیت-اسفالریت-گالن در نور عبوری XPL، C: رگه‌چه کوارتز-دولومیت-اسفالریت-گالن در حاشیه اسفالریت در نور انعکاسی XPL، D: گالن در حاشیه اسفالریت در نور انعکاسی PPL، E: اسفالریت توسط گالن در نور انعکاسی PPL دربرگرفته شده است و F: رگه‌چه پیریت در نور انعکاسی PPL (Dol = دولومیت، Sp = اسفالریت، Qz = کوارتز، Gn = گالن، Py = پیریت (Whitney and Evans, 2010))

**Fig. 4.** Images of Irankuh mineralization. A: Dolomite-bitumen-sphalerite-galena veinlet in transmitted light XPL, B: Bitumen-dolomite-sphalerite veinlet in transmitted light XPL, C: Quartz-dolomite-sphalerite-galena veinlet in transmitted light XPL, D: Galena in boarder of sphalerite in reflected light PPL, E: Sphalerite is surrounded by galena in reflected light PPL, and F: Pyrite veinlet in reflected light PPL (Dol = dolomite, Sp = sphalerite, Qz = quartz, Gn = galena, Py = pyrite (Whitney and Evans, 2010))

(شکل ۵- G و H). منشأ  $\text{SiO}_2$  لازم برای این آلتراسیون می‌تواند جاننشینی کانی‌های رسی (مانند مونت‌موریونیت یا ایلیت) به وسیله دهیدراسیون واحد شیلی حوضه باشد (Leach et al., 2010). رگه‌چه‌های بیتومن‌دار که در هر دو سنگ میزبان دیده می‌شوند، به نظر می‌رسد به‌عنوان عاملی احیاکننده نقشی مهم در ته‌نشست بخشی از سولفیدها از محلول کانه‌دار داشته‌اند. این رگه‌چه‌ها گاهی همراه با کانی‌سازی سولفیدی و گاهی به شکل تنها دیده می‌شوند (شکل ۴- A و B). باریت نیز دیگر کانی باطله است که در پیت‌های معدنی مختلف ایرانکوه، گمانه‌ها و تونل‌ها به‌ندرت همراه با کانی‌سازی دیده می‌شود و به نظر می‌رسد بیشتر در مراحل آخر فاز کانی‌سازی تشکیل شده باشد. رگه‌چه‌های کلسیت تأخیری که نتیجه خروج کلسیم از سنگ میزبان و جایگزینی محلول کانه‌دار هستند، در نهایت نیز تشکیل شده‌اند (شکل ۵- I). قطعاً این رگه‌چه‌ها در سنگ میزبان کربناته فراوانترند. توالی هم‌یافت کانی‌های فلزی و غیرفلزی منطقه ایرانکوه در شکل ۶ آمده است.

### شیمی کانی‌ها

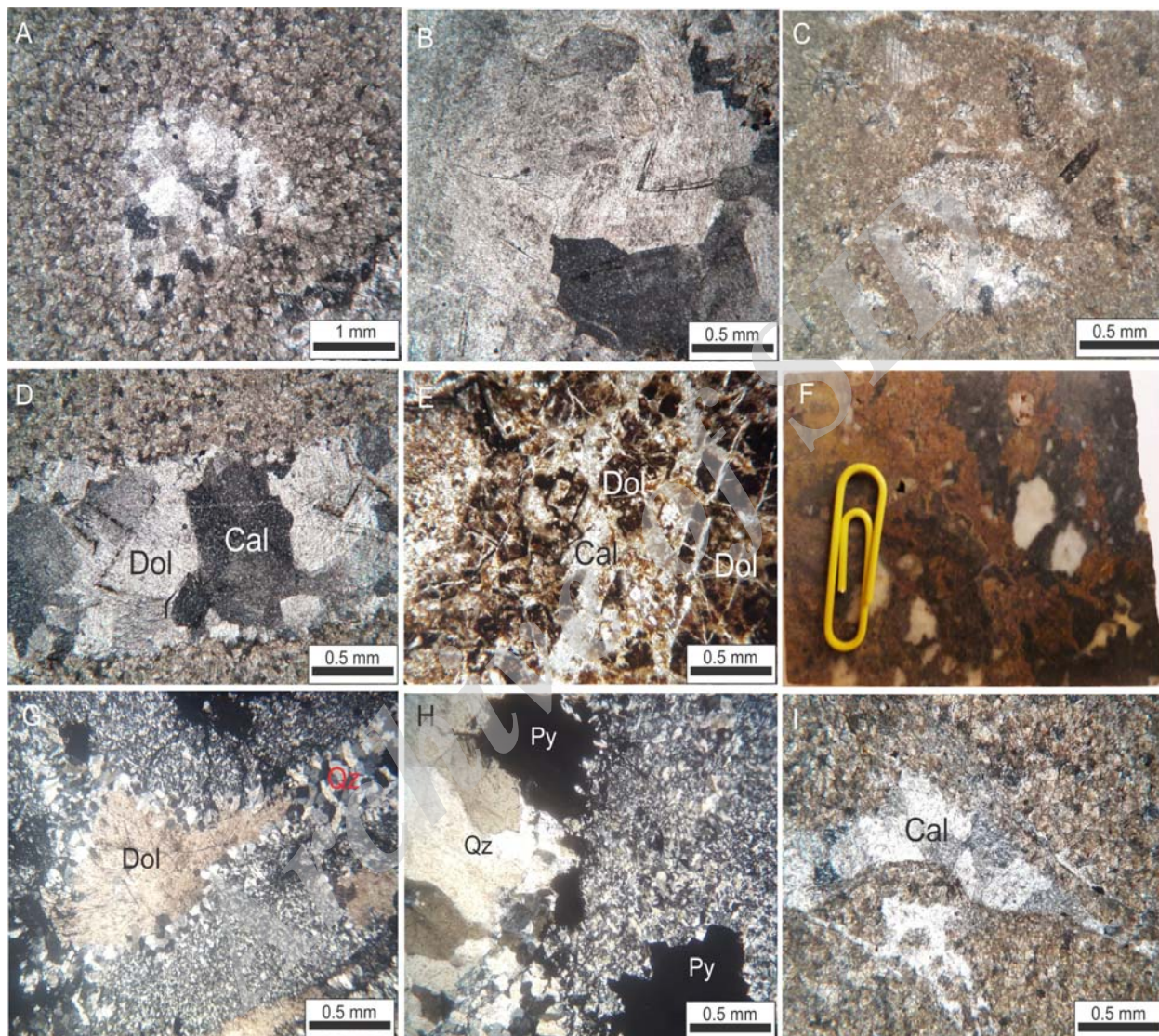
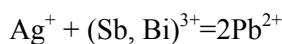
**گالن:** در زمان ته‌نشست ماده معدنی، عناصر کمیاب موجود در سیال کانه‌دار به‌صورت محلول جامد و یا به‌صورت اذخال کانی‌های مستقل به درون کانی میزبان وارد می‌شوند (Loftus, Hills and Solomon, 1967). کانی گالن معمولاً دارای مقادیری عناصر فرعی و کمیاب درون خود بوده است که عنصر نقره به‌همراه آنتیموان و بیسموت از جمله مهمترین این عناصر به‌شمار می‌روند. در مورد جاننشینی عناصر در شبکه گالن بررسی‌های زیادی از گذشته تاکنون شده است (Marshall and Joensuu, 1961; Malakhov, 1968; Blackburn and Schwendeman, 1977; Luke et al., 2015; George et al., 2015). نتایج تجزیه ۳۶ نقطه در نمونه گالن معادن زون ۵ رومرمر، تپه سرخ و گوشفیل در جدول ۲ آمده است. عنصر نقره مهمترین عنصر کمیاب درون گالن بوده بدین علت که بالاترین مقدار فراوانی را بین دیگر عناصر دارد و به لحاظ اقتصادی نیز محصول جانبی ارزشمندی به‌شمار می‌رود. جاننشینی نقره به

دولومیت‌های جانشین‌شده در قالب فسیل‌های سنگ میزبان نیز از شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار متغیرند و اندازه آنها گاهی به ۰/۴ میلی‌متر می‌رسد. گاهی جاننشینی از آهن در هسته و حاشیه دولومیت‌ها دیده می‌شود (شکل ۵- C). رگه‌چه‌های دولومیت یا دولومیت-کلسیت با ضخامت چند دهم تا حداکثر ۳ میلی‌متر از دیگر انواع دولومیت‌های هیدروترمالی هستند که گاهی همراه با کانی‌سازی هستند. در برخی رگه‌چه‌ها دولومیت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار که در سطوح بین بلوری خود دارای آهن است تا اندازه ۱/۵ میلی‌متر همراه با کلسیت دیده می‌شود (شکل ۵- D). در دولومیت‌های برشی گاهی چندین نسل برشی شدن قابل تفکیک است و در نهایت، فضای بین دولومیت‌ها توسط کلسیت پر شده است (شکل ۵- E). از آنجایی که محلول کانه‌دار منطقه غنی از آهن و منگنز بوده است، عمده دولومیت‌های هیدروترمالی غنی از آهن و منگنز هستند که با رنگ قهوه‌ای شناخته می‌شوند. این آهن و منگنز گاهی در سطوح بین بلوری و رخ‌های دولومیت دیده می‌شود و گاهی کل بلور را دربرگرفته است و در مواردی افزایش آهن باعث تشکیل آنکریت شده است (در بررسی‌های ژئوشیمی و کانی‌شناختی خارج از بحث این مقاله اثبات شده است). مقدار آهن و منگنز در دولومیت‌های هیدروترمالی نسل‌های آخر افزایش یافته است (شکل ۵- F). لازم به یادآوری است که دولومیت‌های غنی از آهن در سنگ میزبان کربناته دیده می‌شوند، این در حالی است که در سنگ میزبان آواری، آهن محلول کانه‌دار کمتر وارد ساختار دولومیت شده و به جای آن تشکیل پیریت و کمتر کالکوپیریت را داده است.

سیلیسی شدن دیگر آلتراسیون در منطقه ایرانکوه است که اغلب در زون‌های میزبان شده در واحدهای آواری مانند شیل همراه با کانی‌سازی سولفیدی (اغلب پیریت) دیده می‌شود. این نوع آلتراسیون به شکل پرکننده فضای خالی و رگه‌چه‌ای دیده می‌شود و قرار گرفتن عمده آن در حاشیه فضاهای خالی و حاشیه رگه‌چه‌ها نشان‌دهنده تقدم تشکیل آن بر دیگر کانی‌هاست. اندازه دانه‌های کوارتز از نهران بلور تا درشت دانه متغیر است

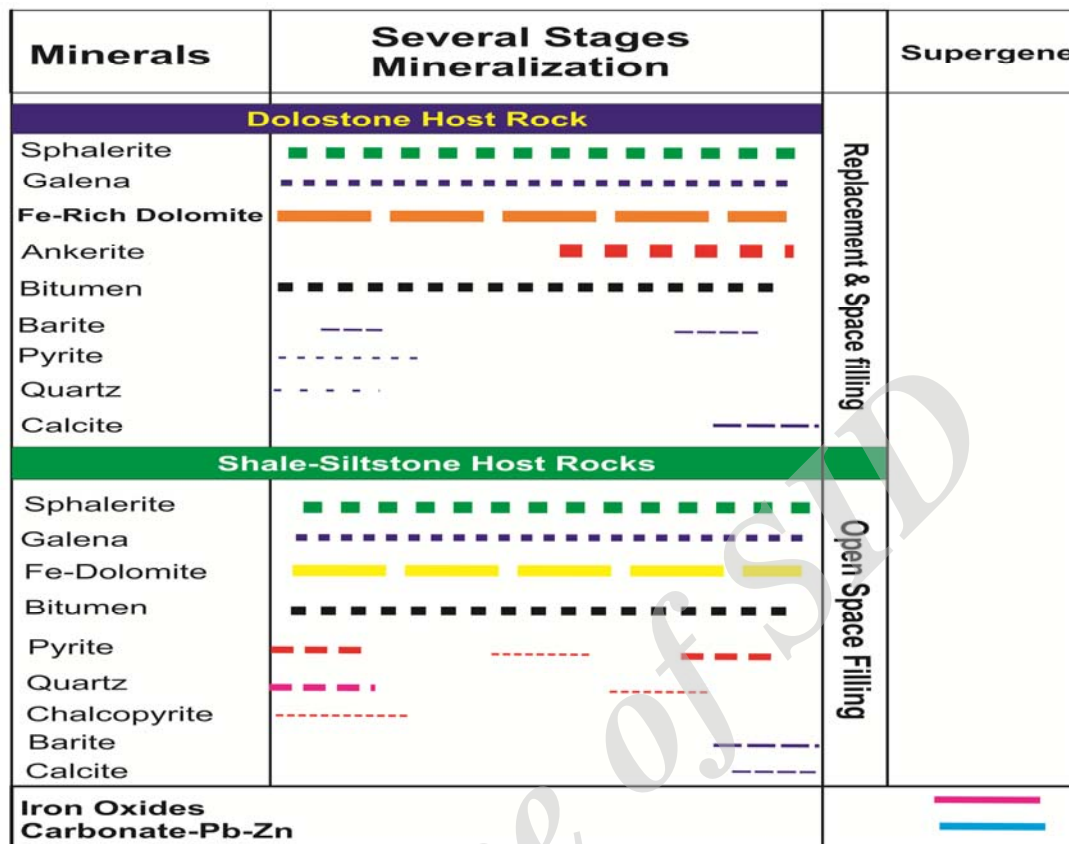
آنتیموان و بیسموت بستگی دارد. این جانشینی به شکل رابطه زیر قابل انجام است:

جای سرب با توجه به شعاع یونی امکان‌پذیر است؛ اما مقدار جانشینی متفاوت بوده است و به حضور عناصر واسطه‌ای مانند



شکل ۵. تصاویری از آلتراسیون در ایرانکوه. A: دولومیت پرکننده حفرات در سنگ میزبان دلاستون در نور XPL، B: دولومیت زین اسبی در نور XPL، C: جانشینی دولومیت هیدروترمالی درون فسیل در نور XPL، D: رگچه دولومیت-کلسیت در نور XPL، E: دولومیت قهوه‌ای رنگ غنی از آهن برشی‌شده و فضای بین آنها با کلسیت پر شده است در نور XPL، F: دولومیت غنی از آهن و منگنز با رنگ قهوه‌ای-نارنجی که بعد از دولومیت سفیدرنگ تشکیل شده است، G: دولومیت و کوارتز در رگچه کوارتز-دولومیت در شیل در نور XPL، H: رگچه کوارتز-پیریت در شیل در نور XPL و I: رگچه کلسیت تأخیری (Dol = دولومیت، Cal = کلسیت، Qz = کوارتز، Py = پیریت (Whitney and Evans, 2010))

**Fig. 5.** Images of Irankuh alteration. A: Dolomite as cavity filling in dolostone host rock at XPL, B: Saddle dolomite at XPL, C: Replacement of fossil by hydrothermal dolomite at XPL, D: Dolomite-calcite veinlet at XPL, E: Fe-rich brown dolomite is brecciated and spaces are filled by calcite at XPL, F: Fe- and Mn-rich dolomite in brown-orange color is formed after white dolomite, G: Dolomite and quartz in quartz-dolomite veinlet in shale at XPL, H: Quartz-pyrite veinlet at XPL, and I: Late calcite veinlet (Dol = dolomite, Cal = calcite, Qz = quartz, Py = pyrite (Whitney and Evans, 2010))



شکل ۶. توالی هم‌یافت کانی‌های فلزی و غیرفلزی ناحیه معدنی ایرانکوه

**Fig. 6.** Paragenesis sequence of metal and non-metal minerals from the Irankuh mining district

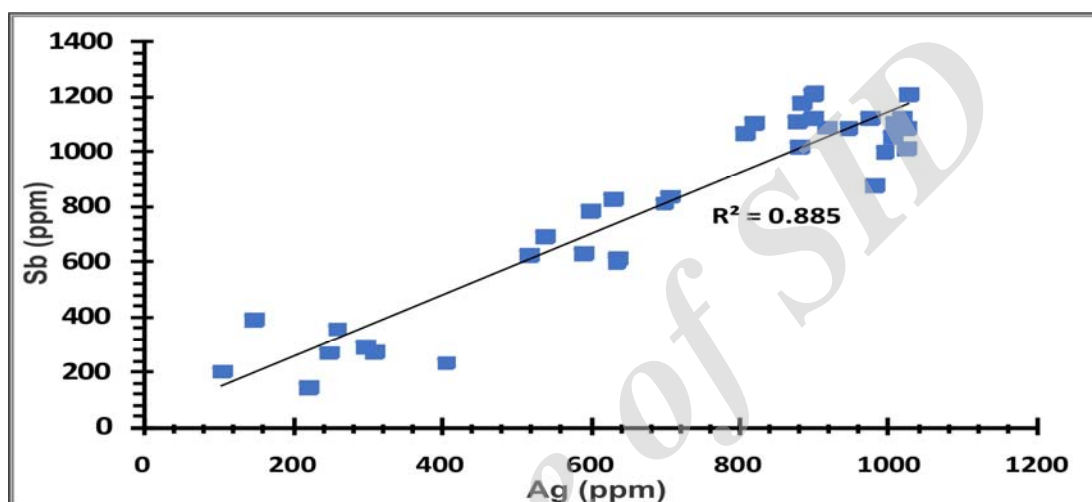
متغیر است (جدول ۲). با توجه به مقدار بسیار کم کانی‌های مس‌دار در ایرانکوه، حضور ادخال کانی‌های مس‌دار در گالن مردود است و احتمالاً مس جانشین سرب شده است. میزان منگنز، بیسموت و روی در گالن‌ها کمتر از حد تشخیص دستگاه بوده است (جدول ۲).

**اسفالریت:** ترکیب شیمیایی عناصر فرعی داخل اسفالریت توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است (Cook et al., 2009; Ye et al., 2012; Frenzel et al., 2016). نتایج تجزیه ۳۵ نقطه در نمونه اسفالریت معادن زون ۵ رومرمر، ذخیره مدفون، تپه سرخ و گوشفیل در جدول ۳ آمده است. میزان فراوانی آهن در اسفالریت‌ها بین ۰/۲ تا ۵/۲ درصد متغیر است که بیشترین مقادیر در ذخیره مدفون و گوشفیل دیده می‌شود (جدول ۳). عنصر کادمیوم نیز محصول جانبی کانسارهای

میزان فراوانی نقره در گالن بین ۱۰۶ تا ۱۰۳۰ گرم در تن و مقدار آنتیموان بین ۱۴۵ تا ۱۲۱۷ گرم در تن متغیر است (جدول ۲). همبستگی مثبت بسیار خوبی ( $R^2=0.88$ ) بین نقره و آنتیموان در گالن‌های معادن سرب-روی ایرانکوه دیده می‌شود (شکل ۷). این همبستگی مثبت می‌تواند نشان‌دهنده حضور ادخال‌های تتراندريت-تانتیت در داخل گالن باشد که البته در بررسی‌های کانی‌شناسی دیده نشده است. همچنین میزان آهن در شبکه گالن بین ۲۶۷ تا ۱۰۴۷ گرم در تن و مقدار کادمیوم اغلب کمتر از ۱۰۰ گرم در تن است. کادمیوم تمایل زیادی به تمرکز در اسفالریت دارد. تنها نمونه‌های گالن گوشفیل دارای مقدار کادمیوم بالا تا ۲۴۹ گرم در تن هستند (جدول ۲). میزان مس در اغلب گالن‌ها کمتر از حد تجزیه (کمتر از ۶ گرم در تن) بوده و فقط در چند نمونه میزان مس در محدوده ۸ تا ۱۶۷ گرم در تن

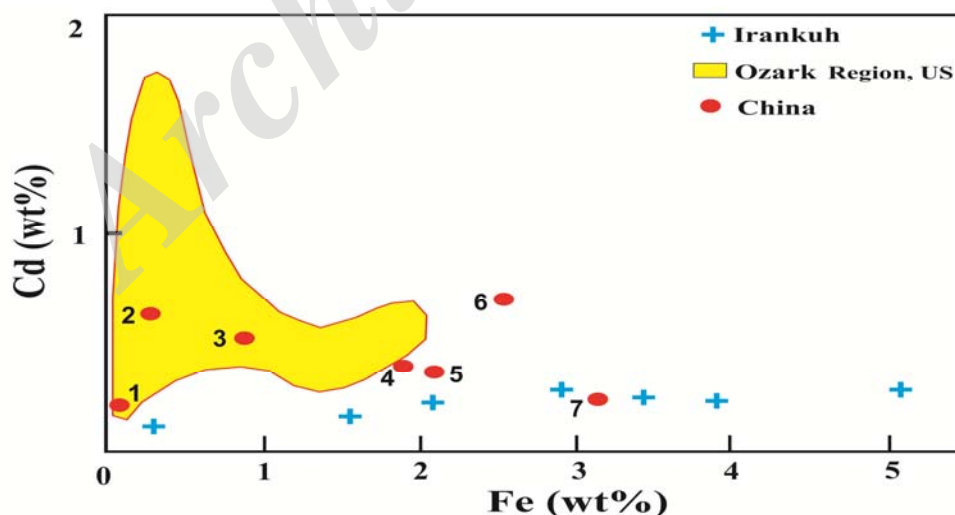
امریکا، میزان آهن اسفالریت‌ها کمتر از ۲ درصد است. میزان آهن اسفالریت در دو کانسار چین نیز کمتر از ۱ درصد، دو کانسار در محدوده ۲ درصد، یک کانسار ۲/۵ و یک مورد ۳ درصد است (شکل ۸). بنابراین اسفالریت‌های ایرانکوه در مقایسه با آنها حاوی بیشترین میزان آهن و کمتر میزان کادمیوم است (شکل ۸).

سرب- روی نوع دره می‌سی‌سی‌پی است که جانشین روی در شبکه اسفالریت می‌شود. میزان کادمیوم در اسفالریت معادن ایرانکوه بین ۱۰۱۰ تا ۲۱۸۳ گرم بر تن متغیر است (جدول ۳). در شکل ۸، میزان آهن و کادمیوم اسفالریت‌های کانسارهای سرب- روی دره می‌سی‌سی‌پی آمریکا، چین و معادن ایرانکوه مقایسه شده است. در تمامی کانسارهای نوع می‌سی‌سی‌پی



شکل ۷. همبستگی مثبت بین نقره و آنتیموان در گالن‌های ایرانکوه

Fig. 7. Positive correlation between Ag and Sb within galena of Irankuh



شکل ۸. مقایسه مقدار آهن و کادمیوم اسفالریت‌های ایرانکوه با کانسارهای نوع می‌سی‌سی‌پی آمریکا و چین (ذخایر آمریکا از ویتز و همکاران (Viets et al., 1992)، ذخایر چین به ترتیب ۱: Shashulin، ۲: Yutang، ۳: Chahe، ۴: Tianbaoshan، ۵: Qixiashan، ۶: Daliangzi، ۷: Fankou از زنگ (Zhang, 1987))

Fig. 8. Comparison of Fe and Cd values within sphalerite from Irankuh and USA and China Mississippi type deposits (USA deposits from Viets et al. (1992), China deposits are 1: Shashulin, 2: Yutang, 3: Chahe, 4: Tianbaoshan, 5: Qixiashan, 6: Daliangzi, 7: Fankou from Zhang (1987))

جدول ۲. نتایج تجزیه ریزپردازنده الکترونی در کانی گالن ناحیه معدنی ایرانکوه

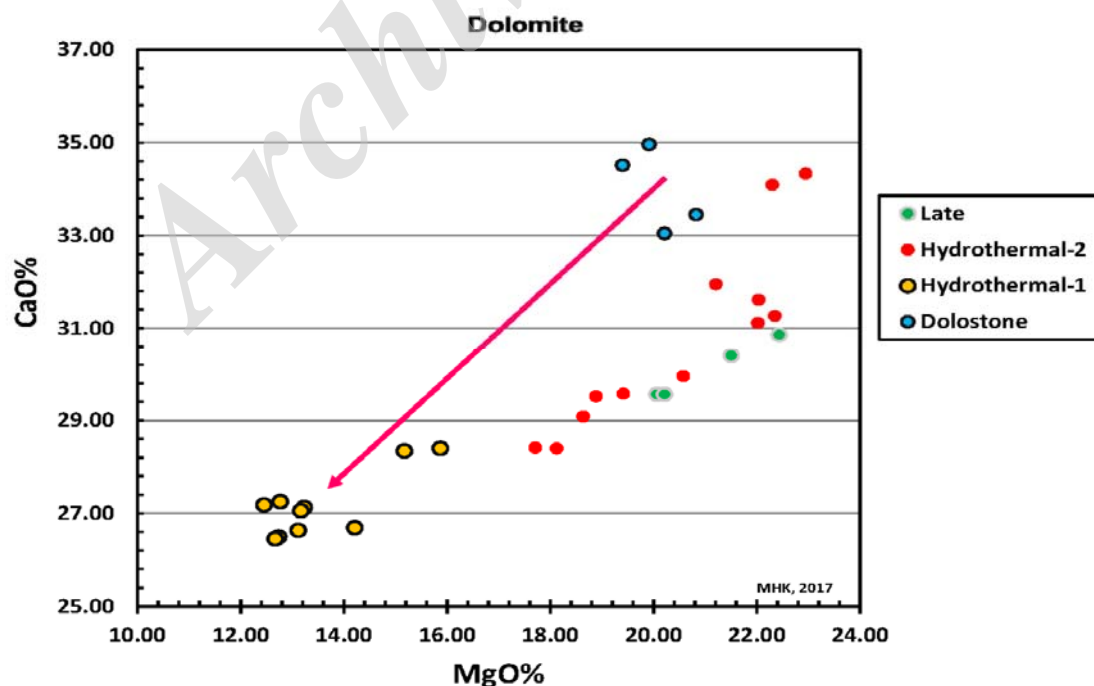
Table 2. EPMA analysis results in galena mineral from the Irankuh mining district

SAMPLE	Pb (%)	S (%)	Ag (ppm)	Sb (ppm)	Fe (ppm)	Cd (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Bi (ppm)
Z5	86.1	13.4	709	838	338	78	nd	nd	nd	nd
Z5	86.1	13.5	602	785	329	45	nd	nd	nd	nd
Z5	86.2	13.4	701	814	341	77	nd	nd	nd	nd
Z5	86.6	13.4	106	204	454	49	nd	nd	nd	nd
Z5	86.7	13.4	223	145	1047	86	nd	nd	nd	nd
Z5	87.4	13.6	408	235	300	36	nd	nd	nd	nd
Z5	86.9	13.6	300	293	331	78	nd	nd	nd	nd
Z5	86.6	13.4	261	358	311	38	nd	nd	nd	nd
Z5	86.9	13.5	149	392	286	50	nd	nd	nd	nd
Z5	87.4	13.6	311	274	270	49	nd	nd	nd	nd
Z5	86.9	13.5	251	272	429	35	nd	nd	nd	nd
Z5	86.8	14.5	1010	1106	432	34	nd	nd	nd	nd
Z5	85.9	14.5	949	1085	538	156	24	nd	nd	nd
Z5	86.4	14.5	901	1122	442	234	28	nd	nd	nd
Z5	86.3	14.5	821	1107	476	64	nd	nd	nd	nd
Z5	86.4	14.5	809	1068	432	189	19	nd	nd	nd
Z5	85.8	14.5	1020	1125	447	25	nd	nd	nd	nd
TS	86.9	14.5	1028	1087	471	27	27	nd	nd	nd
TS	86.1	14.5	883	1019	490	85	45	nd	nd	nd
TS	86.8	14.5	1030	1210	464	106	44	nd	nd	nd
TS	86.8	14.5	1008	1056	473	36	32	nd	nd	nd
TS	86.1	14.5	978	1124	481	36	32	nd	nd	nd
TS	87.7	13.7	637	603	277	nd	nd	nd	nd	nd
TS	87.5	13.6	519	627	292	nd	nd	nd	nd	nd
TS	87.9	13.7	639	613	267	nd	nd	nd	nd	nd
TS	87.7	13.6	592	633	287	nd	nd	nd	nd	nd
Gushfil	86.7	14.5	886	1179	554	249	167	nd	nd	nd
Gushfil	86.2	14.5	880	1110	482	138	16	nd	nd	nd
Gushfil	86.1	14.4	983	878	543	102	9	nd	nd	nd
Gushfil	87.8	13.7	633	828	283	63	nd	nd	nd	nd
Gushfil	87.8	13.6	541	693	361	28	nd	nd	nd	nd
Gushfil	85.8	14.4	903	1217	408	118	43	nd	nd	nd
Gushfil	85.8	14.5	920	1090	519	191	8	nd	nd	nd
Gushfil	85.6	14.5	1027	1015	457	145	8	nd	nd	nd
Gushfil	85.8	14.4	997	1002	513	134	8	nd	nd	nd
Gushfil	86.9	14.4	901	1211	452	116	41	nd	nd	nd
<b>D.L</b>	<b>49ppm</b>	<b>8ppm</b>	<b>170ppm</b>	<b>150ppm</b>	<b>6ppm</b>	<b>176ppm</b>	<b>6ppm</b>	<b>7ppm</b>	<b>8ppm</b>	<b>50ppm</b>

کانسار تپه سرخ توسط بویری کناری و راستاد (Boveiri and Konari and Rastad, 2016) مورد بررسی قرار گرفته است که در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بر اساس  $CaO$ ،  $MgO$ ،  $Mn$  و  $Fe$  می‌توان این دولومیت‌ها را از هم تفکیک کرد (شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱). به‌طور کلی، اغلب مقدار  $CaO$  و  $MgO$  در دولومیت سنگ میزبان نسبت به دولومیت‌های هیدروترمالی بیشتر است و دولومیت‌های هیدروترمالی شماره دو دارای کمترین مقدار اکسید کلسیم و منیزیم هستند (شکل ۹). در حالی که، برعکس میزان آهن و منگنز دولومیت‌های هیدروترمالی در مقایسه با دولومیت‌های سنگ میزبان افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد و دولومیت‌های شماره دو دارای بالاترین مقدار آهن و منگنز هستند (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). این امر نشان‌دهنده بالا بودن مقدار آهن و منگنز محلول کانه‌دار است که در بررسی‌های کانی‌شناسی نیز با حضور اکسید آهن در سطوح رشد و رخ‌های دولومیت و رنگ قهوه‌ای آن مشخص است.

میانگین میزان منگنز اسفالریت‌های ایرانکوه حدود ۳۵ گرم بر تن است (جدول ۳). آنتیموان و سرب در اغلب موارد کمتر از حد تشخیص دستگاه بوده است و فقط چند نقطه دارای مقدار آنتیموان بین ۱۱ تا ۶۹۱ گرم بر تن است که بیشترین مقادیر مربوط به زون ۵ رومرمر است (جدول ۳). همچنین در چند نمونه از محدوده زون (۵) رومرمر میزان سرب داخل اسفالریت غیر عادی بوده و بین ۱۰۴۹ تا ۲۷۱۹ گرم بر تن متغیر است که احتمال دارد که مربوط به ادخال گالن باشد (جدول ۳). در نمونه‌هایی که میزان سرب بالاست، مقدار نقره و آنتیموان نیز افزایش نشان می‌دهد که تأییدکننده حضور ادخال گالن در محل تجزیه است (جدول ۳). مقدار مس در ساختار اسفالریت نیز بین ۵ تا ۷۲۸۲ گرم در تن متغیر است که البته در بیشتر نمونه‌ها کمتر از ۲۰۰ گرم در تن است. فقط در چند نمونه در زون ۵ رومرمر گوشفیل و ذخیره مدفون مقدار مس قابل توجهی درون اسفالریت آشکار شده است (جدول ۳).

**دولومیت:** ترکیب شیمیایی دولومیت موجود در دولستون سنگ میزبان، دو نوع دولومیت هیدروترمالی و دولومیت تأخیری از



شکل ۹. تغییرات ترکیب شیمیایی چهار نوع دولومیت تپه سرخ در نمودار  $MgO$  در مقابل  $CaO$

Fig. 9. Chemical composition variations of Tapehsorkh four types of dolomite in  $MgO$  vs.  $CaO$  diagram



جدول ۳. نتایج تجزیه ریزپردازنده الکترونی در کانی اسفالریت ناحیه معدنی ایرانکوه

Table 3. EPMA analysis results in sphalerite mineral from the Irankuh mining district

	Zn (%)	S (%)	Fe (%)	Cd (ppm)	Ag (ppm)	Mn (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Sb (ppm)	Zn/Cd	Zn/Fe	Zn/Mn
Z5	62.48	33.14	0.29	1010	282	25	11	1402	349	619	212	25325
Z5	64.19	33.49	0.20	1162	425	14	nd	1049	509	552	326	46181
Z5	63.68	33.43	0.19	1127	357	3	nd	2719	433	565	344	212251
Z5	63.02	32.52	1.96	1775	34	6	194	nd	nd	355	32	106453
Z5	61.43	32.78	3.44	1540	35	43	163	nd	nd	399	18	14265
Z5	62.11	33.06	2.70	1589	273	40	841	nd	691	391	23	15369
Z5	60.01	33.22	5.05	1489	35	28	86	nd	21	403	12	21197
Z5	61.58	33.23	2.75	1941	92	13	7282	nd	11	317	22	46829
Z5	63.10	32.83	1.34	1751	63	7	4901	nd	nd	360	47	94597
TS	64.45	33.56	0.89	1432	57	76	95	nd	nd	450	72	8457
TS	63.42	33.57	3.35	2011	198	41	120	nd	112	315	19	15468
TS	64.44	33.53	0.49	1526	47	63	97	nd	nd	422	131	10302
TS	64.29	33.27	0.38	1807	89	202	75	nd	94	356	168	3178
TS	63.43	33.59	2.67	1971	102	98	115	nd	103	322	24	6443
Gushfil	63.05	33.45	1.55	1839	121	98	2034	nd	130	343	41	6408
Gushfil	62.41	33.54	3.79	2183	227	30	5930	nd	335	286	16	20592
Gushfil	63.15	33.65	1.95	1739	98	69	1760	nd	121	363	32	9152
Gushfil	64.74	33.43	1.09	1426	99	87	89	nd	65	454	59	7441
Gushfil	64.39	33.37	0.98	1670	81	112	131	nd	91	386	66	5749
Gushfil	62.20	32.99	3.10	1800	65	81	121	nd	nd	346	20	7662
Gushfil	62.40	33.29	3.64	1355	63	9	88	nd	nd	460	17	73148
Gushfil	62.01	32.98	3.71	2056	59	83	144	nd	nd	302	17	7455
Gushfil	60.99	33.22	4.44	1763	2	45	5	nd	nd	346	14	13586
Gushfil	61.01	33.15	3.94	1645	2	41	5	nd	nd	371	15	14880
Gushfil	61.26	33.27	4.51	1800	78	60	nd	nd	nd	340	14	10200
Gushfil	60.40	33.19	5.15	1936	6	32	123	nd	nd	312	12	18911
Gushfil	63.21	33.35	2.85	1148	nd	57	nd	nd	nd	551	22	11082
Gushfil	61.10	33.20	3.91	1750	6	41	143	nd	nd	349	16	14866
Gushfil	61.83	33.40	4.06	1329	17	8	559	nd	nd	465	15	73343
Blind	62.48	33.20	2.93	1685	78	40	2384	nd	nd	371	21	15695
Blind	62.23	33.31	3.55	1422	31	51	512	nd	nd	438	18	12202
Blind	62.60	33.46	3.14	1279	59	7	795	nd	nd	490	20	93852
Blind	62.17	33.21	3.78	1484	33	59	528	nd	nd	419	16	10609
Blind	62.31	33.54	3.50	1363	9	2	1120	nd	nd	457	18	311539
Blind	62.33	33.40	2.99	1430	72	41	1850	nd	nd	436	21	15202
D.L	6ppm	7ppm	4ppm	10ppm	10ppm	5ppm	5ppm	4ppm	10ppm			

جدول ۴. ترکیب شیمیایی انواع مختلف دولومیت از محدوده کانسار تپه سرخ، ایرانکوه (Boveiri Konari and Rastad, 2016) (اکسیدها برحسب درصد و عناصر برحسب گرم در تن است)

**Table 4.** Chemical composition from different types of dolomite of Tapehsorkh deposit, Irankuh (Boveiri Konary and Rastad (2016)) (Oxides in % and elements in ppm unit)

Type of Dolomite	CaO	MgO	FeO	MnO	Sr	Ba	Si	Al	Na	Ti	P
Dolostone	33.45	20.82	0.19	0.14	0	100	600	300	500	100	0
Dolostone	33.04	20.21	0.23	0.14	0	300	0	1000	0	100	100
Dolostone	31.16	13.15	0.63	0.18	300	0	9600	18900	1500	0	100
Dolostone	34.96	19.91	0.09	0.01	0	300	2400	700	900	0	200
Dolostone	34.51	19.40	0.15	0.03	600	0	6200	1100	700	200	300
Hydrothermal D1	26.50	12.73	9.74	4.61	0	0	0	1600	200	0	0
Hydrothermal D1	27.13	13.23	9.63	4.09	0	0	2900	1300	400	100	0
Hydrothermal D1	26.64	13.11	10.07	4.74	0	0	500	300	0	0	100
Hydrothermal D1	26.69	14.21	9.31	4.71	0	200	3100	400	0	0	100
Hydrothermal D1	26.46	12.67	9.78	5.65	0	0	300	400	300	0	0
Hydrothermal D1	27.06	13.16	10.31	4.21	200	0	0	100	0	100	100
Hydrothermal D1	27.18	12.45	10.62	2.88	0	0	0	0	400	100	200
Hydrothermal D1	27.25	12.77	9.89	2.70	0	100	0	0	300	0	100
Hydrothermal D1	28.40	15.87	7.77	3.25	0	0	1700	400	400	0	200
Hydrothermal D1	28.34	15.17	8.34	2.89	100	300	0	300	0	200	0
Hydrothermal D2	29.09	18.64	6.20	2.08	0	0	2300	400	0	0	0
Hydrothermal D2	29.52	18.88	5.05	1.92	0	200	200	0	0	0	0
Hydrothermal D2	29.95	20.58	4.11	0.99	0	0	5000	1300	0	0	100
Hydrothermal D2	29.57	19.42	6.34	1.63	500	0	0	100	300	100	0
Hydrothermal D2	34.09	22.30	4.66	1.87	300	0	4000	100	700	0	100
Hydrothermal D2	34.33	22.95	6.41	2.30	200	0	0	200	0	0	0
Hydrothermal D2	31.95	21.21	5.29	0.67	300	100	0	300	400	100	200
Hydrothermal D2	28.40	18.12	5.08	1.43	500	0	0	1500	700	0	200
Hydrothermal D2	28.41	17.71	4.88	1.28	400	0	4000	1900	500	400	0
Hydrothermal D2	31.27	22.35	4.44	0.62	0	100	2200	200	0	0	0
Hydrothermal D2	31.11	22.02	3.18	0.45	0	0	200	200	0	100	0
Late dolomite	29.56	20.06	3.93	1.32	200	0	1700	100	100	0	0
Late dolomite	29.56	20.21	3.07	1.87	500	0	0	0	0	0	0
Late dolomite	30.86	22.43	2.51	1.11	0	0	600	0	500	0	0
Late dolomite	30.40	21.50	2.08	1.29	0	0	2000	200	100	100	200

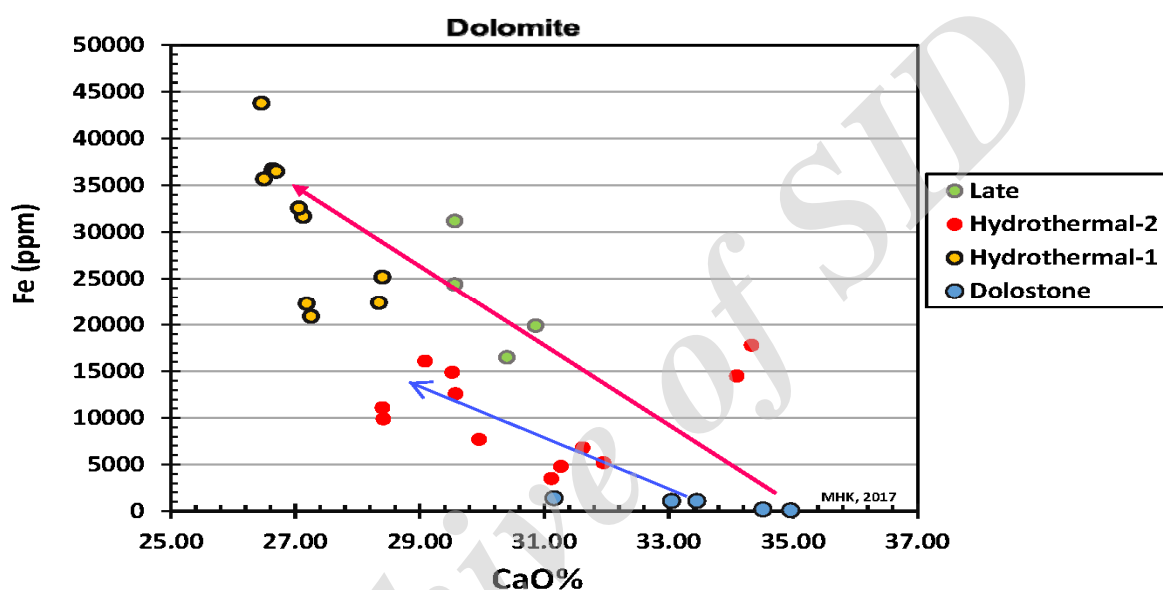
#### ایزوتوپ کربن، اکسیژن و استرانسیوم

غضبان و همکاران (Ghazban et al., 1994) بررسی‌های ایزوتوپی بسیار خوبی بر روی انواع دولومیت موجود در معدن ایرانکوه انجام داده‌اند (جدول ۵). این دولومیت‌ها شامل

دولومیت موجود در سنگ آهک، دولومیت در دولستون، دولومیت در دولستون آتره شده، دولومیت‌های زین اسبی و دولومیت‌هایی با بافت Sucrosic است. از این میان سه نوع دولومیت اول مربوط به دولومیت‌های سنگ میزبان است که قبل

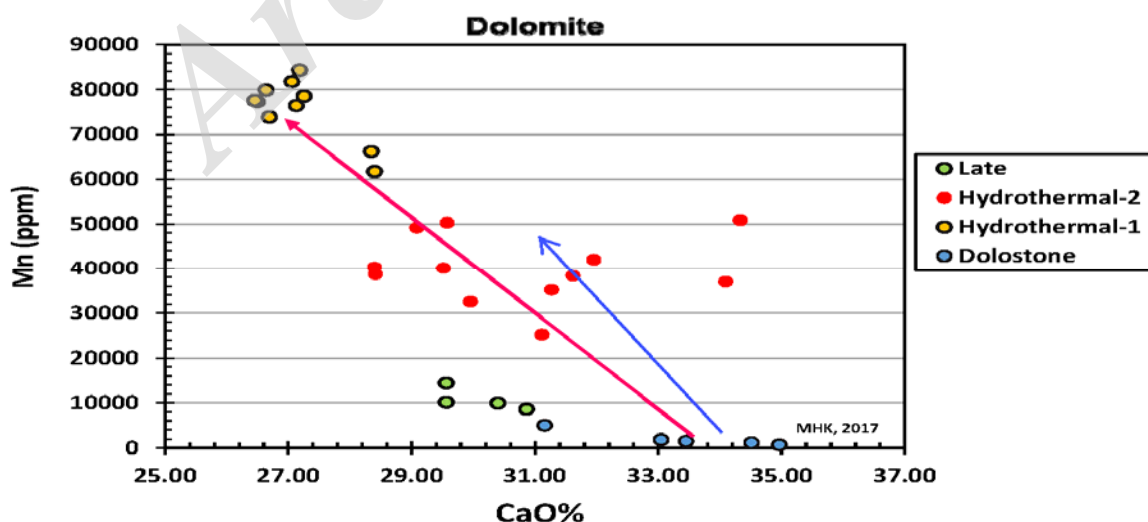
بین ۱۶/۲ تا ۱۸/۸ در هزار است (جدول ۵). مقدار ایزوتوپ کربن در دولومیت اولیه سنگ آهک بین ۲/۴ تا ۵/۸ در هزار، دولستون بین ۱/۸ تا ۳/۳ در هزار، دولستون آلتره شده بین ۰/۸ تا ۳/۷ در هزار و دولومیت‌های هیدروترمالی محلول کانه‌دار بین ۰/۶ تا ۳/۶ در هزار متغیر است (جدول ۵).

از تشکیل کانی‌سازی به وجود آمده‌اند و دو نوع آخر از دولومیت‌های هیدروترمالی مربوط به آلتراسیون و محلول کانه‌دار هستند. میزان ایزوتوپ اکسیژن در دولومیت‌های اولیه سنگ آهک و دولستون بین ۲۰/۵ تا ۲۸ در هزار تغییر می‌کند؛ در حالی که مقدار این ایزوتوپ به کمتر از ۱۸/۴ در هزار در دولستون آلتره شده کاهش یافته و در دولومیت‌های هیدروترمالی



شکل ۱۰. تغییرات ترکیب شیمیایی چهار نوع دولومیت تپه سرخ در نمودار Fe در مقابل CaO

Fig. 10. Chemical composition variations of Taphehsorkh four types of dolomite in Fe vs. CaO diagram



شکل ۱۱. تغییرات ترکیب شیمیایی چهار نوع دولومیت تپه سرخ در نمودار Mn در مقابل CaO

Fig. 11. Chemical composition variations of Taphehsorkh four types of dolomite in Mn vs. CaO diagram

جدول ۵. نتایج ایزوتوپ‌های کربن و اکسیژن در دولومیت‌های مختلف ایرانکوه (برگرفته از غضبان و همکاران (Ghazban et al., 1994))

**Table 5.** C and O isotopes results from Irankuh different types of dolomite (according to Ghazaban et al. (1994))

Sample	Type of Dolomite	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} (\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} (\text{‰})$
IR-35	Limestone	2.7	24.1
IR-36	Limestone	3	28
IR-37	Limestone	2.4	22.5
GIR-30	Limestone	3.7	23
GIR-43	Limestone	5.8	22.1
GIR-46	Limestone	4.6	22.2
GIR-49	Limestone	4	21.1
GIR-50	Limestone	4.3	21.8
GIR-52	Limestone	3.7	20.5
NO-1	Host dolostone	3.3	26.1
IK-7-4	Host dolostone	2.5	20.7
IK7-5	Host dolostone	2.2	21.8
IK-3	Host dolostone	3	21.8
BM-5-4-2	Host dolostone	3.1	23.7
IK-7	Host dolostone	2.2	21.4
IK-14	Host dolostone	1.8	20.6
BM-21-1	Altered dolostone	1	18.1
IK-13-1	Altered dolostone	3.2	17
IK-13-2	Altered dolostone	3.1	17.6
IK-1	Altered dolostone	0.8	17.8
GS-2-3	Altered dolostone	2.6	18.4
GS-2-4	Altered dolostone	2.4	17.4
BM-7-7-1	Altered dolostone	3.7	18.2
IK-7-1	Sucrosic dolomite	2.7	17.6
IK-7-2	Sucrosic dolomite	3	17.4
IK-7-3	Sucrosic dolomite	2.6	18.6
IKI-A	Sucrosic dolomite	1.9	18
IKI-B	Sucrosic dolomite	0.9	17.9
IKI-C	Sucrosic dolomite	0.6	18.3
IKI-D	Sucrosic dolomite	1	18.1
IKI-E	Sucrosic dolomite	0.6	18.3
IK-I0-1	Sucrosic dolomite	1.7	18.6
IK-I0-2	Sucrosic dolomite	2.1	18.7
BM-21-2	Sucrosic dolomite	2.5	18.7
BM-I0-1-1	Sucrosic dolomite	0.9	16.5
BM-11-8-2	Sucrosic dolomite	1.8	16.8
BM-I0-1-2	Sucrosic dolomite	1.2	17.2
IKI-F	Sucrosic dolomite	2.1	18.2
IK13-1	Sucrosic dolomite	3.1	17.3
IK13-2	Sucrosic dolomite	3.2	17.4
IK13-3	Sucrosic dolomite	3.4	17.8
NO-2-1	Saddle dolomite	3.1	16.4
NO-2-2	Saddle dolomite	1.8	18.8
IK13-4	Saddle dolomite	3	16.8
IK13-5	Saddle dolomite	2.9	16.8
IK-13	Saddle dolomite	3.3	16.7
IK-I0-3	Saddle dolomite	2.3	17.1
IK-I0-4	Saddle dolomite	2.5	16.7
IK-I0-6	Saddle dolomite	1.8	18.8
IK-I0	Saddle dolomite	2.9	19.1
IK-I0-2-1	Saddle dolomite	2.5	17.9
IK-8	Saddle dolomite	2.4	18.4
IK-14	Saddle dolomite	3.3	18.1
WSD	Saddle dolomite	2.5	18.6

ادامه جدول ۵. نتایج ایزوتوپ‌های کربن و اکسیژن در دولومیت‌های مختلف ایرانکوه (برگرفته از غضبان و همکاران (Ghazban et al., 1994))

**Table 5 (Continued).** C and O isotopes results from Irankuh different types of dolomite (according to Ghazaban et al. (1994))

Sample	Type of Dolomite	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (‰)
IK-1	Saddle dolomite	2.4	18.7
BAL-2	Saddle dolomite	0.7	17.4
BAL-2-1	Saddle dolomite	0.9	16.1
BM-5-4	Saddle dolomite	3.4	17.6
BM-7-7-1B	Saddle dolomite	3.3	17.9
BM-7-7-2	Saddle dolomite	3.4	17.9
BM-9-6-1	Saddle dolomite	0.9	16.2
BM-9-6-2	Saddle dolomite	0.8	16.2
BM-10-1	Saddle dolomite	3.4	18.1
BM-10-1	Saddle dolomite	3.4	17.4
BM-11-1	Saddle dolomite	2.7	17.4
BM-11-2	Saddle dolomite	3	16.6
BM-II-3	Saddle dolomite	2.8	17.1
BM-11-7-1	Saddle dolomite	3.1	18
BM-11-8-1	Saddle dolomite	0.9	16.2
BM-11-8-2-1	Saddle dolomite	1.1	16.7
BM-11-8-2-2	Saddle dolomite	1.1	16.8
BM-12-2	Saddle dolomite	3.3	17.8
BM-12-1	Saddle dolomite	3.6	18.2
BM-55-2	Saddle dolomite	0.7	18.1
L3-1	Saddle dolomite	3.4	17.8
L-5	Saddle dolomite	3	18.1
GS-2-1	Saddle dolomite	3.1	17.4
GS-2-2	Saddle dolomite	3.3	17.3

## بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی‌های هم‌یافتی و شیمی‌کانی‌های مهم یک ذخیره می‌توان اطلاعات بسیار خوبی درباره دما، شوری و شیمی محلول کانه‌دار به دست آورد که تلفیق آن با دیگر اطلاعاتی مانند زمین‌شناسی، سیالات درگیر، بررسی‌های ایزوتوپی و غیره به ارائه الگوی اکتشافی جدید منجر خواهد شد.

در همین راستا، شیمی‌کانی‌گالان بیانگر دمای نسبی تشکیل کانسار است که می‌تواند با نتایج بررسی سیالات درگیر تأیید شود. به اعتقاد مالاکوف (Malakhov, 1968) مقدار بیسموت در گالان موجود در کانسارهای اسکارنی و نوع آتشفشانی بالا بوده است و به عقیده مارشال و جنسو (Marshall and Joensuu, 1961) آنتیموان به مقدار بالا در گالان‌های کانسارهای دما پایین تمرکز می‌یابد. نسبت معرف Sb/Bi در

گالان نشان‌دهنده شرایط تشکیل کانی‌سازی بوده؛ به طوری که نسبت کمتر از ۰/۶ بیانگر شرایط دما و فشار بالا و نسبت بیش از ۶ تا ۱۳ نشان‌دهنده شرایط دما و فشار پایین است (Malakhov, 1968). با توجه به این که مقدار بیسموت گالان‌های ایرانکوه کمتر از ۵۰ گرم در تن بوده است، مقدار نسبت Sb/Bi تا بیش از ۲۰ می‌رسد. این مسئله نشان می‌دهد که دمای تشکیل کانی‌سازی پایین بوده است. دماسنجی با بررسی سیالات درگیر توسط بویری کناری و راستاد (Boveiri Konari and Rastad, 2016) بر روی دولومیت و کوارتزهای معدن تپه سرخ انجام شده است که دمای تشکیل کانسار را بین ۱۷۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد و مؤید بر این موضوع است. همچنین مقایسه گالان‌های معدن قلعه زری که در دمای بین ۳۶۰ تا ۳۹۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده‌اند با گالان‌های ایرانکوه

به‌وجود آمده‌اند و مقدار گالیم آنها کمتر از ۵۰ گرم در تن، ژرمانیوم بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ گرم در تن و منگنز بین ۷ تا ۱۳ گرم در تن است (جدول ۶). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که محلول‌های گرمابی که شوری بالا داشته‌اند (بیش از ۲۰ درصد NaCl)، حاوی میزان گالیم بیشتر و مقدار ژرمانیم، آهن و منگنز کمتر هستند.

در نهایت، می‌توان گفت که اسفالریت‌های ناحیه معدنی ایرانکوه در مقایسه با اسفالریت کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی آمریکا غنی از آهن و فقر از کادمیوم بوده و از محلول کانه‌داری با دمای بالاتر و احتمالاً شوری پایین‌تر نسبت به کانسارهای تیبیک می‌سی‌سی‌پی تشکیل شده‌اند. همچنین بررسی‌های کانی‌شناختی دولومیت‌های هیدروترمالی که مهم‌ترین کانی باطله در ناحیه معدنی ایرانکوه هستند، نشان داد که مقدار زیادی اکسید آهن در سطوح بین بلوری و رخ‌های آنها جای گرفته است و مقدار آهن به سمت دولومیت‌های نسل‌های آخرتر افزایش می‌یابد. از طرفی شیمی دولومیت‌های هیدروترمالی اثبات کرد که محلول هیدروترمالی سازنده آنها غنی از آهن و منگنز است و از آن‌جایی که دولومیت‌های سنگ میزان مقدار آهن و منگنز کمی دارند، بنابراین، محلول کانه‌دار واکنش زیادی با سنگ میزان انجام نداده است. وجود اسفالریت‌ها و دولومیت‌های غنی از آهن و آنکریت از شاخصه‌های مهم مجموعه معادن ایرانکوه به‌شمار می‌رود که البته دولومیت‌های غنی از آهن و آنکریت فقط در سنگ میزان دولستون دیده می‌شوند.

تغییرات ایزوتوپ اکسیژن در دولومیت‌های اولیه سنگ میزان و کاهش آن به سمت دولومیت در سنگ میزان آلتیره شده و دولومیت‌های هیدروترمالی (شکل ۱۴)، علاوه بر این که نشان می‌دهد که منشأ محلول کانه‌ساز هیچ‌گونه ارتباطی با سنگ آهک و دولستون میزان ندارد، بیانگر آن است که میزان ایزوتوپ  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} (\%)$  دلستون‌های آلتیره شده تحت تأثیر محلول گرمابی کاهش یافته و در محدوده ایزوتوپ دولومیت‌های هیدروترمالی واقع شده است (شکل ۱۴). کاهش میزان ایزوتوپ  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} (\%)$  افزایش ایزوتوپ سبک

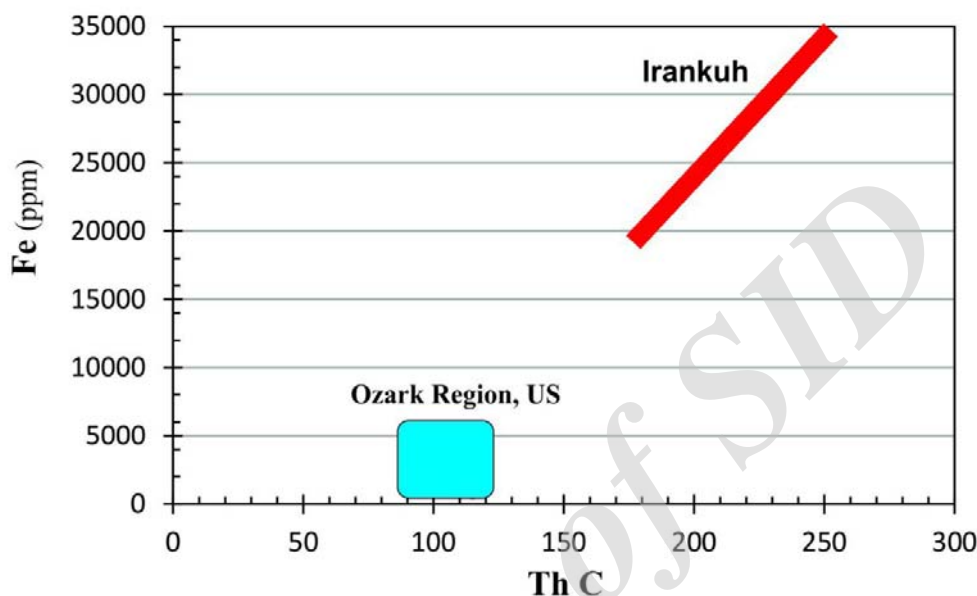
بیانگر آن است که نسبت Sb/Bi می‌تواند معرف خوبی برای دمای تشکیل کانسار باشد. چرا که مقدار بیسموت در گالن‌های معدن قلعه زری بین ۲۰۰۰۰ تا ۷۰۰۰۰ گرم در تن و مقدار آنتیموان کمتر از ۵۰ گرم در تن است. بنابراین، نسبت Sb/Bi کمتر از ۰/۱ است (Karimpour et al., 2006).

علاوه بر آن، بررسی‌ها نشان می‌دهد که اگرچه دمای تشکیل کانی‌سازی سرب و روی ایرانکوه بر پایه بررسی سیالات درگیر و نسبت Sb/Bi در گالن پایین است؛ اما در مقایسه با کانسارهای سرب و روی نوع دره می‌سی‌سی‌پی آمریکا دمای بالاتری دارد. به نحوی که، محدوده دمای تشکیل کانسارهای می‌سی‌سی‌پی آمریکا بین ۸۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۱۲). به‌نظر می‌رسد همبستگی مثبتی بین مقدار دمای محلول کانه‌دار و میزان آهن وجود دارد. میزان آهن اسفالریت‌های کانسارهای سرب-روی نوع دره می‌سی‌سی‌پی آمریکا کمتر از ۵۰۰۰ گرم در تن است؛ در صورتی که، در معادن سرب-روی ایرانکوه بین ۲۰۰۰ تا ۵۲۰۰۰ گرم در تن (اغلب بین ۲۰۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰ گرم در تن) متغیر است (شکل ۱۲). در حالی که، دمای تشکیل ذخایر سرب-روی ایرانکوه ۱۰۰ تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر از ذخایر سرب-روی دره می‌سی‌سی‌پی آمریکا است (شکل ۱۲). همچنین رابطه معکوسی بین دمای محلول کانه‌دار و مقدار کادمیوم اسفالریت دیده می‌شود. به طوری که میزان کادمیوم اسفالریت‌های کانسارهای سرب-روی نوع دره می‌سی‌سی‌پی آمریکا بین ۳ تا ۶ برابر بیشتر از اسفالریت‌های معادن سرب-روی ایرانکوه است (شکل ۱۳).

علاوه بر آن نیوتن (Newton, 2013) در بررسی روی کانسارهای سرب و روی نوع می‌سی‌سی‌پی شرق آمریکا نتیجه گرفت که اسفالریت‌هایی که میزان آهن آنها کم (حدود ۰/۷ درصد) است از محلولی با مقدار شوری بین ۲۰ تا ۲۵ درصد تشکیل شده‌اند و مقدار گالیم آنها بین ۲۰۰ تا ۴۲۰ گرم در تن، ژرمانیوم کمتر از ۱۰ گرم در تن و منگنز بین ۱ تا ۳ گرم در تن است. برعکس اسفالریت‌هایی که میزان آهن آنها بالا (حدود ۲/۳ درصد) بوده از محلولی با مقدار شوری بین ۱۰ تا ۱۵ درصد

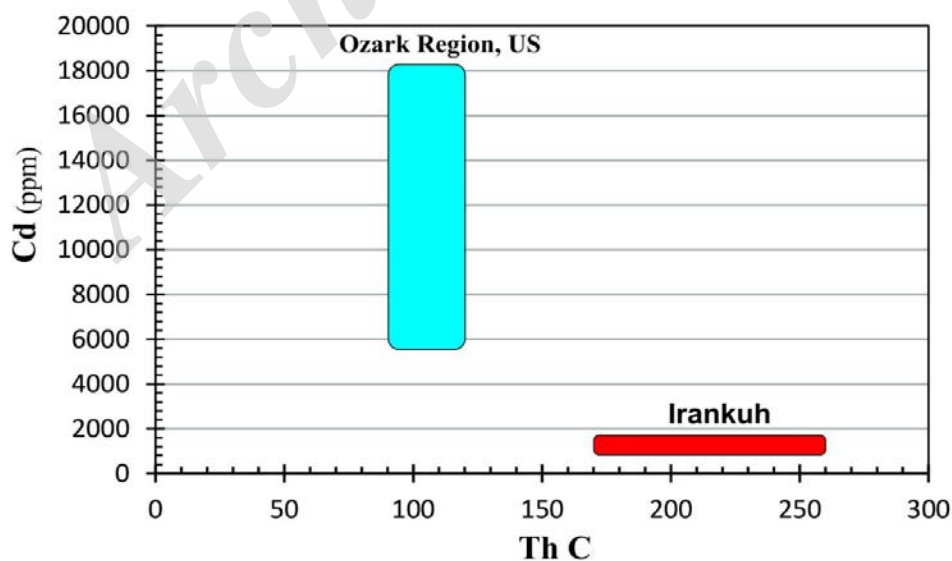
آلتره شده تغییر کرده و در محدوده دولومیت‌های هیدروترمالی واقع شده‌اند که بیانگر تأثیر محلول کانه‌دار بر سنگ میزبان است (شکل ۱۴).

اکسیژن) در دولومیت‌های هیدروترمالی تأیید کننده آن است که منشأ محلول گرمابی از پوسته قاره‌ای بوده است. همچنین میزان ایزوتوپ‌های  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} (\%)$  دولومیت در دولستون‌های



شکل ۱۲. مقایسه مقدار دما و آهن محلول کانه‌دار در ذخایر نوع می‌سی‌سی‌پی آمریکا و ناحیه معدنی ایرانکوه (اطلاعات کانسارهای آمریکا از ویتز و همکاران (Viets et al., 1992))

**Fig. 12.** Comparison of ore-fluid temperature and Fe values from Mississippi type deposits of US and Irankuh mining district (data for US deposits from Viets et al. (1992))



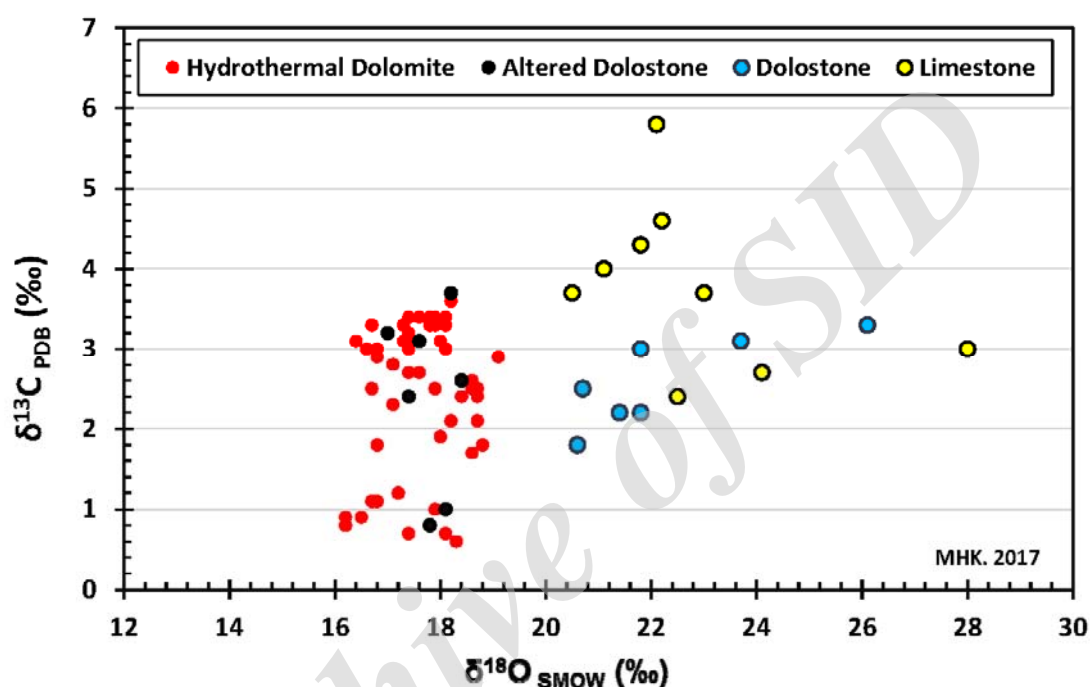
شکل ۱۳. مقایسه مقدار دما و کادمیوم محلول کانه‌دار در ذخایر نوع می‌سی‌سی‌پی آمریکا و ناحیه معدنی ایرانکوه (اطلاعات کانسارهای آمریکا از ویتز و همکاران (Viets et al., 1992))

**Fig. 13.** Comparison of ore-fluid temperature and Cd values from Mississippi type deposits of US and Irankuh mining district (data for US deposits from Viets et al. (1992))

جدول ۶. مقایسه شرایط محلول کانه‌دار برای تشکیل اسفالریت فقیر از آهن و غنی از آهن در ذخایر شرق آمریکا (Newton, 2013)

**Table 6.** Comparison of ore-fluid conditions for generation of Fe-poor and Fe-rich sphalerite from eastern US deposits (Newton, 2013)

Sphalerite	Salinity (NaCl wt%)	Fe (%)	Ga (ppm)	Ge (ppm)	Mn (ppm)	Pb (ppm)
Fe-poor	20-25%	0.7%	300-420	<10	1-3	8-14
Fe-rich	10-15%	2.3%	<50	150-200	7-13	5-14



شکل ۱۴. نمودار تغییرات ایزوتوپ اکسیژن در مقابل ایزوتوپ کربن در انواع دولومیت در کانسار ایرانکوه

**Fig. 14.** Oxygen isotope variations vs. carbon isotope diagram from Irankuh different types of dolomite rocks with continental crust and mantle values

کمی پیریت، دولومیت آهن و منگنزدار، آنکریت، کلسیت، بیومن ± باریت و کوارتز است.

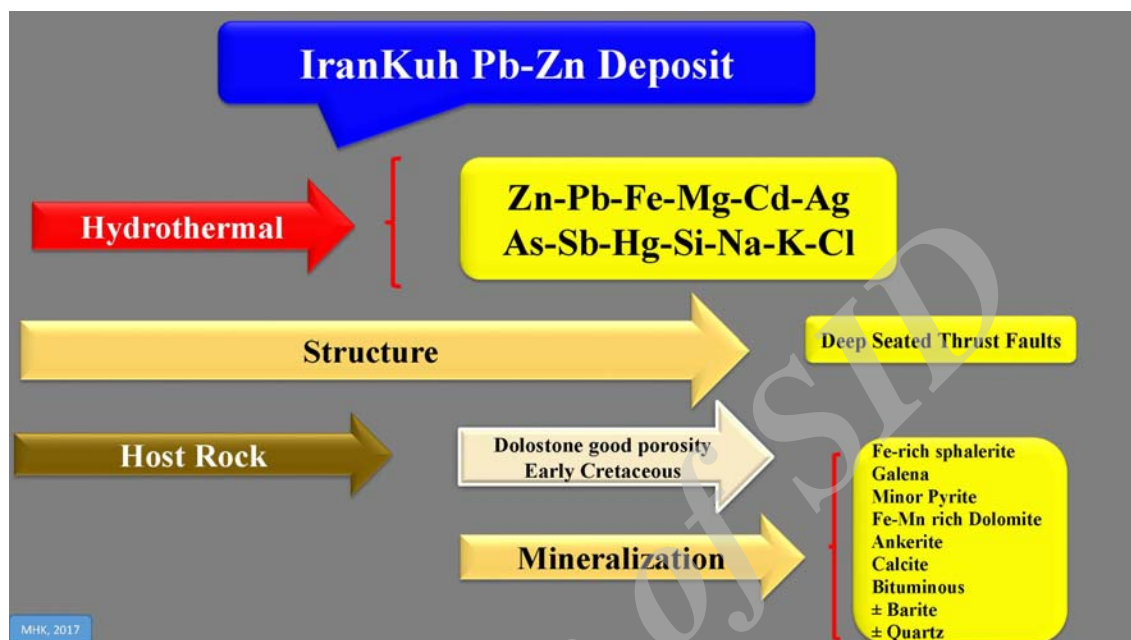
این جمع‌بندی با نظریه بویری کناری و همکاران (Boveiri, Konari et al., 2015) و بویری کناری و راستاد (Boveiri, Konari and Rastad, 2016) که معتقدند معدن تپه سرخ در غرب ایرانکوه، شبیه ذخایر سرب و روی نوع سدکس یا ایرلندی است و کانی‌سازی در محیط آب دریا در کرتاسه زیرین (حدود ۱۳۵ میلیون سال پیش) تشکیل شده و بخش‌هایی از آن سین‌ژنتیک است، کاملاً مغایرت دارد. شواهد زمین‌شناسی و

در نهایت، ویژگی‌های ناحیه معدنی ایرانکوه را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد (شکل ۱۵):

- ۱- محلول هیدروترمالی غنی از روی، سرب، آهن، منیزیم، کادمیوم، نقره، آرسنیک، آنتیموان، جیوه، سیلیس، سدیم، پتاسیم و کلر بوده است.
- ۲- کانی‌سازی با گسل‌های تراستی عمیق در ارتباط است.
- ۳- سنگ میزبان اغلب واحدهای کربناته (دولستون و سنگ آهک) با تخلخل بالا و کمتر واحدهای آواری هستند.
- ۴- مجموعه کانیایی اصلی شامل اسفالریت غنی از آهن، گالن،



کانی‌شناسی نشان می‌دهد که کانی‌سازی ایرانکوه کاملاً کنترل ساختاری داشته، اپی‌ژنتیک بوده و در محیط آب دریا تشکیل

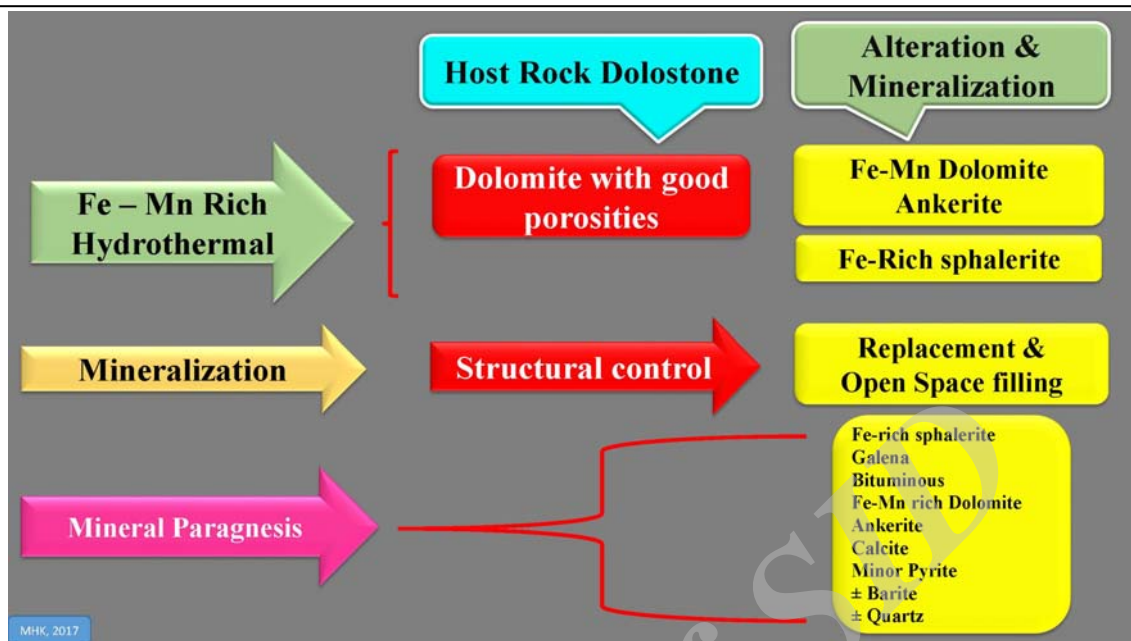


شکل ۱۵. خلاصه‌شده ویژگی‌های مختلف کانسار ایرانکوه

Fig. 15. Simplified various characteristics of Irankuh deposit

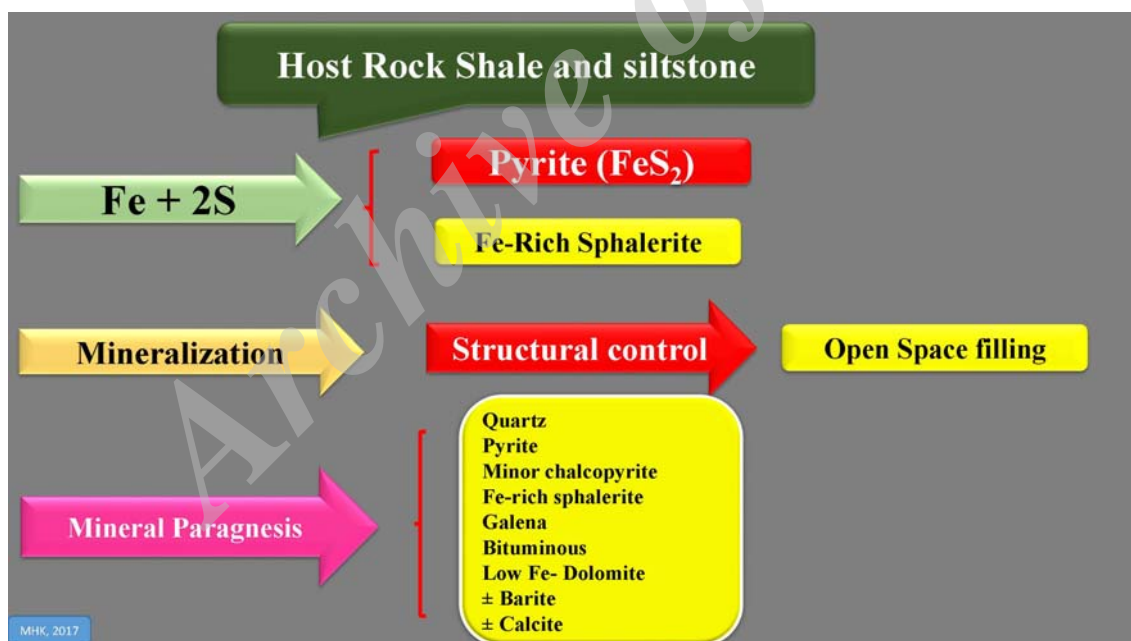
دولومیت‌های هیدروترمالی شده است (شکل ۱۶). در حالی که در ذخیره تشکیل شده در واحدهای آواری، بخش عمده آهن موجود در محلول هیدروترمالی با گوگرد واکنش داده، اغلب تشکیل پیریت را داده و بخشی نیز وارد ساختار اسفالریت شده است. لذا دولومیت‌های هیدروترمالی تشکیل شده در این بخش از نوع کم آهن هستند. همچنین به دلیل آزاد شدن سیلیس از سنگ میزبان، مقدار کوارتز بیشتر از زون‌های کانی‌سازی در واحد کربناته است. کانی‌سازی تشکیل شده در واحدهای آواری فقط به شکل پرکننده درز و شکستگی‌ها، حفرات و فضاها، خالی در حریم زون گسلی دیده می‌شود و مجموعه کانیایی آن شامل کوارتز، پیریت، کمی کالکوپیریت، دولومیت با آهن کم، اسفالریت آهن‌دار، گالن، بیومن ± باریت و کلسیت است (شکل ۱۷).

همچنین بخش اصلی ذخیره در واحدهای کربناته به‌ویژه دولستون‌های دانه درشت یا واجد فضای خالی تشکیل شده است. از ویژگی‌های کانی‌سازی در سنگ میزبان کربناته آن است که محلول هیدروترمالی غنی از آهن و منگنز، به تشکیل دولومیت‌های غنی از آهن و منگنز و اسفالریت‌هایی غنی از آهن منجر شده است. در مواردی که مقدار آهن محلول خیلی بالا بوده (بیش از ۸ درصد) کانی آنکریت نیز تشکیل شده است. کنترل کانی‌سازی به‌طور کلی ساختاری است و عمده کانه‌ها به شکل پرکننده فضای خالی و حفرات و در برخی موارد (در صورت مساعد بودن شرایط سنگ میزبان) جانشینی تشکیل شده‌اند. مجموعه کانیایی در این واحدها شامل اسفالریت غنی از آهن، گالن، کمی پیریت، دولومیت غنی از آهن و منگنز، آنکریت، کلسیت، بیومن ± باریت و کوارتز است. تشکیل کم پیریت به دلیل آن است که بخش عمده آهن محلول وارد شبکه



شکل ۱۶. ویژگی‌های کانی‌سازی در سنگ میزبان دولستون در ایرانکوه

Fig. 16. Mineralization characteristics within host rock dolostone from Irankuh deposit



شکل ۱۷. ویژگی‌های کانی‌سازی در سنگ میزبان شیل و سیلت‌استون در ایرانکوه

Fig. 17. Mineralization characteristics within host rock shale and siltstone from Irankuh deposit

گسل‌های تراسی-معکوس نقشی مهم در تشکیل کانسار سرب-روی داشته‌اند. محلول‌های گرمایی (در محدوده زمانی ۶۰ تا ۵۰ میلیون سال قبل) از اعماق از مسیر این گسل‌ها به مکان مناسب فعلی منتقل شده‌اند. از آنجایی که شیل و ماسه‌سنگ‌ها

سنگ‌های کربناته کرتاسه در محدوده زمانی حدود ۱۲۰ تا ۱۳۰ میلیون سال قبل تشکیل شده‌اند. کوه‌زایی که در محدوده زمانی ۷۰ تا ۵۰ میلیون سال رخ داده است، موجب تغییرات ساختاری از جمله گسل‌های تراسی-معکوس شده است. در منطقه ایرانکوه

کانه‌دار به تشکیل هم‌یافت کانیایی خاصی انجامیده است که آن را با ذخایر تیپیک می‌سی‌سی‌پی در امریکا متفاوت می‌کند. بنابراین، ویژگی‌های منطقه ایرانکوه می‌تواند به‌عنوان الگویی برای اکتشاف این نوع کانسارها در ایران و دنیا مدنظر قرار گیرد.

### قدردانی

از جناب آقای مهندس حسن اسلامی قانع مدیر عامل محترم و جناب آقای دکتر محمد محمدخانی مدیر محترم معدن و زمین‌شناسی شرکت باما و دیگر کارکنان محترم آن شرکت برای همکاری‌های لازم سپاس‌گزاریم.

سنگ میزبان مناسب نبوده‌اند، در این واحدهای سنگی کانی‌سازی فقط در ساختارهای نزدیک زون‌های گسلی به حالت رگه‌چه‌ای تشکیل شده‌اند. محلول‌های گرمابی در دولستون‌هایی که دارای تخلخل مناسب بوده‌اند، موجب تشکیل ذخایر سرب-روی با عیار و میزان ذخیره خوبی شده است. کانی‌سازی در دولستون‌ها به حالت جانشینی و پرکننده فضا‌های برشی و ساختار انجام شده است.

همه شواهد زمین‌شناسی، آلتراسیون، کانی‌سازی و ایزوتوپی در ناحیه معدنی ایرانکوه نشان می‌دهد که کانسارهای سرب و روی ایرانکوه از نوع می‌سی‌سی‌پی و کاملاً اپی‌ژنتیک هستند؛ اما دمای بالاتر، شوری احتمالاً پایین‌تر و غنی از آهن بودن محلول

### References

- Ayati, F., Dehghani, H., Mokhtari, A.R. and Mojtahedzadeh, H., 2013. Geochemistry and mineralogy studies of Gushfil Pb-Zn deposit, Irankuh, Isfahan. *Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 6: 83-91 (in Persian).
- Blackburn, W.H. and Schwendeman, J.F., 1977. Trace elements substitution in galena. *The Canadian Mineralogist*, 15: 365-373.
- Boveiri Konari, M. and Rastad, E., 2016. Nature and origin of dolomitization associated with sulphide mineralization: new insights from the Tappehsorkh Zn-Pb (-Ag-Ba) deposit, Irankuh Mining District, Iran. *Geological Journal*, DOI: 10.1002/gj.2875
- Boveiri Konari, M., Rastad, E., Mohajjel, M., Nakini, A. and Haghdoost, M., 2015. Structure and texture, mineralogy and formation of carbonate-clastic hosted Tappehsorkh Zn-Pb (Ag) deposit, south of Isfahan. *Geosciences Quarterly*, 25(97): 221-236. (in Persian with English abstract)
- Cook, N.J., Ciobanu, C.L., Pring, A., Skinner, W., Shimizu, M., Danyushevsky, L., Saini-Eidukat, B. and Melcher, F., 2009. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73: 4761-4791.
- Frenzel, M., Hirsch, T. and Gutzmer, J., 2016. Gallium, germanium, indium, and other trace and minor elements in sphalerite as a function of deposit type –A meta-analysis. *Ore Geology Reviews*, 76: 52-78.
- George, L., Cook, N.J. and Ciobanu, C.L., 2015. Trace and minor elements in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study. *American Mineralogist*, 100(2): 548-569.
- Ghasemi, A., 1995. Facies analysis and geochemistry of Kolah-Darvazaeh, Goud-Zendan, and Khaneh-Gorgi Pb-Zn deposits from south of Irankuh. M.Sc. thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 158 pp. (in Persian)
- 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: 1262-1278.
- Hosseini-Dinani, H. and Aftabi, A., 2016. Vertical litho-geochemical 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*, 72: 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: 114-130.
- Karimpour, M.H., Large, R.R., Razmara, M. and Patrick, R.A.D., 2006. Bi-sulfosalt mineral series and their paragenetic associations in specularite-rich Cu-Ag-Au deposit, Qaleh-Zari mine, Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 13(2): 417-432. (in Persian with English abstract)
- Leach, D., Taylor, R.D., Fey, D.L., Diehl, S.F. and Saltus, R.W., 2010. A Deposit Model for Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Ores, Chapter A of Mineral Deposit Models for Resource Assessment. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, Scientific Investigations, Report 2010-5070-A, 64 pp.
- Loftus-Hills, G. and Solomon, M., 1967. Cobalt, nickel and selenium in sulphides as indicators of genesis. *Mineralium Deposita*, 2: 228-242.
- Luke, G., Nigel, J., Cook, C., Ciobanu, L. and Benjamin, P.W., 2015. Trace and minor elements in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study. *American Mineralogist*, 100: 548-569.
- Malakhov, A.A., 1968. Bismuth and antimony in galena, indicators of conditions of ore deposition. *Geokhimiya*, 11: 1283-1296.
- Marshall, R.R. and Joensuu, O., 1961. Crystal habit and trace element content of some galena. *Economic Geology*, 56: 758-771.
- Nakini, A., Mohajjel, M., Rastad, A. and Bovieri Konari, M., 2015. Folding and faulting in Irankuh deposit, south of Isfahan. *New Findings in Geology*, 1(2): 235-254. (in Persian)
- Newton, T., 2013. Geochemistry of the Timberville Zn-Pb District, Rockingham County, VA. Ph.D. thesis, University of Maryland, Maryland, USA, 137 pp.
- 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: 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, Isfahan, west central Iran. Ph.D. thesis, Heidelberg University, Heidelberg, Germany, 334 pp.
- Reichert, J., 2007. A metallogenic 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.
- Searl, A., 1989. Saddle dolomite: a new of its nature and origin. *Mineralogy Magazine*, 53: 547-555.
- Timoori-Asl, F., 2010. Sedimentology and petrology of Jurassic deposits and Basinal brines studies in formation of Irankuh deposit. M.Sc. thesis, Isfahan University, Isfahan, Iran, 120 pp. (in Persian)
- Timoori-Asl, F., Pakzad, H.R. and Bagheri, H., 2011. Source of metals and ore-bearing fluids in Irankuh Pb-Zn deposit. *Sedimentology and Stratigraphy Research*, 27(44): 83-102. (in Persian)
- Viets, J.G., Hopkins, R.T. and Miller, B.M., 1992. Variation in minor and trace metals in sphalerite from Mississippi Valley-type deposits of the Ozark Region: genetic implications. *Economic Geology*, 87:1897-1905.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95: 185-187.
- Ye, L., Cook, N.J., Liu, T., Ciobanu, C.L., Gao, W. and Yang, Y., 2012. The Niujiaotang Cd-rich zinc deposit, Duyun, Guizhou province, southwest China: ore genesis and mechanisms of cadmium concentration. *Mineralium Deposita*, 47:683-700.
- Zahedi, M., 1976. Geological map of Esfahan, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- Zhang, Q., 1987. Trace elements in galena and sphalerite and their geochemical significance in distinguishing in genetic types of Pb-Zn ore deposits. *Chinese Journal of Geochemistry*, 6(2):177-190.