

یافته‌های جدید کانه‌نگاری و شیمی بلور مگنتیت و پیریت در کانسارهای آهن باباعلی و گلالی، باختر همدان، ایران

قدرت‌اله رستمی پایدار^{۱*}، محمد لطفی^۲، مجید قادری^۳، آزاده امیری^۱ و منصور وثوقی عابدینی^۴

^۱ گروه جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی اهواز، اهواز، ایران

^۲ گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

^۳ گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۴ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۶/۲۳

چکیده

کانسارهای آهن باباعلی و گلالی در باختر همدان و در میان توالی آتشفشانی-رسوبی سری سنقر در زون زمین‌شناسی-ساختاری سندج-سیرجان قرار دارند. بررسی‌های کانه‌نگاری و تجزیه‌های SEM-EDAX بر روی کانسنگ آهن مگنتیتی این دو کانسار در راستای شناخت بهتر ترکیب کانی‌شناسی و شیمی بلور کانسنگ، نتایج جالب توجهی را نشان داده است. با بررسی میزان تمرکز برخی از عناصر کمیاب مانند وانادیم، کبالت، نیکل، مس، کروم، تیتان، طلا، عناصر گروه پلاتین و برخی ناخالصی‌های سولفور و فسفر در کانسنگ، مشخص شد تنها بخشی از پیریت اولیه دارای تمرکزهای جالب توجهی از عنصر پلاتین است. به نظر می‌رسد دیگر نسل‌های پیریت و مگنتیت از نظر عناصر کمیاب پادیده‌تهی شده‌اند. سیالات گرمایی تأخیری که باعث کانی‌سازی پیریت در باطله (گانگ) کلسیت-کوارتز شده‌اند، از نظر کانی‌سازی طلا نیز با اهمیت بوده و در واقع، کانی پیریت به عنوان حامل خوبی برای طلا عمل نموده است. شناسایی مقادیر قابل توجهی از فلورگوپیت و الگوی تمرکز عناصر کمیاب در کانسنگ آهن گلالی، نظریه اسکارن نوع منیزیم آتشفشان‌زاد را قوت داده است.

کلیدواژه‌ها: کانه‌نگاری، شیمی بلور، میکروسکوپ الکترونی روبشی، کانسنگ آهن، باباعلی، گلالی

E_mail: rostamigsi2006@gmail.com

* نویسنده مسئول: قدرت‌اله رستمی پایدار

۱- مقدمه

کانسارهای آهن باباعلی و گلالی در بخش شمال باختری همدان و در زون زمین‌شناسی-ساختاری سندج-سیرجان واقع شده‌اند (شکل ۱). کانی‌سازی آهن در این دو کانسار در میان یک توالی آتشفشانی-رسوبی به سن پرموتریاس به‌نام سری سنقر (نامگذاری غیر رسمی، Barud, 1975) انجام شده است. این توالی سنگ‌چینه‌ای خود تحت تأثیر فعالیت‌های زمین‌ساختی و نفوذ توده‌های آذرین، دچار دگرگونی و دگرشکلی شده است (مجله، ۱۳۸۶ و رستمی پایدار، ۱۳۸۸). ویژگی‌های زمین‌شناسی محدوده کانی‌سازی، ارتباط بین سنگ درونگیر و کانسنگ آهن و نیز چگونگی کانی‌سازی آهن در این دو محدوده، در پژوهش رستمی پایدار (۱۳۸۸) و گزارش شرکت مهندسین مشاور زیربایان اکتشاف (۱۳۷۹) به‌طور مفصل مورد بحث قرار گرفته است. برخی از ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی زون اسکارن باباعلی نیز بررسی شده است (Zamaniah, 2007). با توجه به این که شناخت هرچه بیشتر کانسنگ در امر فرآوری مواد معدنی و نیز در مشخص شدن روند ژنتیک و الگوی اکتشافی آن نقش بسزایی دارد، در این پژوهش، کانسنگ آهن مگنتیتی دو کانسار باباعلی و گلالی از نگاه کانه‌نگاری و شیمی بلور مورد توجه خاص قرار گرفته و سعی شده است افزون بر بررسی دقیق کانی‌شناسی فازهای اصلی کانسنگ آهن، به الگوی تمرکز عناصر کمیاب در شبکه کانی‌های کانسنگ آهن در این دو کانسار پرداخته شود. در این راستا، بر روی ۵۶ مقطع صیقلی تهیه شده از کانسنگ دو کانسار آهن، مطالعه کانه‌نگاری انجام گرفته است. ۱۰ نمونه نیز به روش XRD کانی‌شناسی شده است. بر روی ۱۷ نمونه کانسنگ آهن، ۵۷ نقطه با روش SEM-EDAX (Scanning Electron Microscope-Electron Dispersive X-ray Analysis) تجزیه شیمی‌بلور انجام شده و بر روی ۴ نمونه نیز در آزمایشگاه ALS-Chemex کانادا، به روش ICP-MS (Inductively coupled plasma-Mass Spectrometer) تجزیه ترکیب شیمی انجام شده است. در این مقاله، بارزترین ویژگی‌های کانی‌شناسی و

۲- روش مطالعه

در این پژوهش، ابتدا ۵۶ مقطع صیقلی از کانسنگ آهن کانسارهای باباعلی و گلالی تهیه شد و با استفاده از میکروسکوپ کانه‌نگاری در نور انعکاسی، ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافت ماده معدنی در ارتباط با گانگ، به‌دقت مورد مطالعه قرار گرفت. سپس بخش‌هایی از کانسنگ آهن، پس از آماده‌سازی با روش‌های SEM-EDAX و ICP-MS تجزیه شد. میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد استفاده در این پژوهش، سیستم چندکاره‌ای است که قادر به کار در حالت‌های خلاء بالا و پایین، برای تصویربرداری و تجزیه کیفی و کمی X-ray برای آزمون‌های حساس است. دستگاه SEM-EDAX مدل Leo 1455 VP بوده و مجهز به سیستم آماده‌سازی و پوشش نمونه (coating) است. بخش طیف پرتو ایکس دستگاه نامبرده دارای بزرگنمایی تا ۳۰۰۰۰۰ برابر است. این دستگاه یکی از کاربردی‌ترین ابزارهای پژوهشی در زمینه‌های علوم مواد، متالورژی، علوم زیستی، پزشکی، دندانپزشکی، علوم گیاهی و جانوری، فیزیک و فناوری نانو است (Hobart & Willard, 1998). مهم‌ترین اصول و کاربردهای روش SEM-EDAX در علوم مختلف توسط پژوهشگرانی مانند Reed (1996)، Goldstein & Newbury (2003)، Passchier & Trouw (2005) و Zheng (2006) مورد بحث قرار گرفته است. از فواید این میکروسکوپ، تهیه سریع نمونه و امکان مشاهده نمونه‌های بزرگ بدون نیاز به تهیه برش‌های نازک است. در این پژوهش، با توجه به توان مناسب این دستگاه، افزون بر تهیه تصاویر الکترون‌های بازتابی Back-Scattered Electron Image، مواردی از کانی‌ها و فازهای مجهول، تحت تجزیه عنصری خاص قرار گرفته و در مواردی، تجزیه نقشه‌ای (map image analysis) از فازهای کانیایی انجام شده است. در این نوع تجزیه،

به ترتیب شامل فیلیت‌های همدان (لیاس)، توالی کربناتی - آواری پرفسیل الیگومیوسن و نهشته‌های کواترنر است (اشراقی، ۱۳۸۰). مشاهدات صحرایی، بررسی‌های ژئومتری، ساخت و بافت انجام‌شده در مقیاس نمونه دستی و میکروسکوپی بر روی کانسنگ آهن باباعلی و گلالی همگی بیانگر این مطلب است که توالی همبودی (پاراژنری) و کانی‌زایی در هر دو کانسار، شامل کانی‌سازی مگنتیت و نسل اولیه پیریت و پیریت همزمان با سنگ درونگیر است. پس از آن در فازهای ثانوی، مگنتیت همراه با کانی‌های سولفیدی چون پیریت و کالکوپیریت و کانی‌های اکسیدی و کربناتی ناشی از هوازدگی آنها در فضاهای خالی سنگ میزبان و در بین باطله و مگنتیت، کانی‌سازی داشته است. بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی و بافت ماده معدنی، کانی‌های سولفوری مانند پیریت و پیریت نسبت به مگنتیت، تأخیری هستند. بافت‌های دانه‌پراکنده (disseminated tex.)، لایه‌ای، لامینه‌ای، شکافه‌پرکن (open space filling) و توده‌ای (massive tex.) در ماده معدنی قابل مشاهده است (شکل ۲). توسعه برگ‌وارگی و بافت نواری شکل مگنتیت و پیریت و دیگر کانی‌های کانسنگ آهن باباعلی حکایت از عملکرد دست کم یک فاز دگرگونی ناحیه‌ای بر روی کانسنگ آهن دارد. در شکل ۲، بخش‌هایی از کانسنگ آهن باباعلی و گلالی نشان داده شده است.

۵- بررسی کانه مگنتیت در کانسنگ آهن باباعلی و گلالی

در کانسنگ آهن باباعلی، کانه مگنتیت به صورت بلورهای نیمه شکل دار، شکل دار بی‌شکل و نیز به صورت پیوسته و موزاییکی دیده می‌شود. گاه بلورهای مگنتیت با پیریت و کالکوپیریت هم‌رشدی نشان می‌دهند. ابعاد بلورهای مگنتیت، بیشتر بین ۳۰۰-۳۰ میکرون است، اما بلورهای ریزتر و درشت‌تر از آن نیز دیده می‌شود. بلورهای مگنتیت در بخش‌هایی تحت فرایند دگرسانی سوپرژن قرار گرفته و در جهات سطوح بلورشناسی در حال دگرسانی و تبدیل به کانی هماتیت هستند (پدیده مارتیتی شدن، شکل ۴). بافت کانی‌سازی فلزی به صورت رگچه‌ای، دانه‌پراکنده، توده‌ای و پرکننده فضاهای خالی است. میان‌بار (انکلوژیون) دانه‌ریزی از پیریت در متن بلورهای مگنتیت وجود دارد.

از جمله بافت‌های جالب توجه، بافت‌های اولیه دانه‌پراکنده و لامینه‌ای مگنتیت و هماتیت در تناوب با لامینه‌های کربناتی است (شکل ۳). همچنین نوعی بافت نواری شکل (banded tex.) بویژه در بخش‌های پیریمار کانسار باباعلی دیده می‌شود. مشاهدات در مقیاس‌های رخنمون، نمونه دستی و میکروسکوپی نشان می‌دهد این نوع بافت افزون بر دگرگونی ناحیه‌ای کانسنگ، همراه با سنگ درونگیر، تشکیل و توسعه پیدا کرده است، بدین ترتیب که دگرشکلی‌های ایجاد شده در سنگ درونگیر و کانسنگ آهن، بویژه در پهنه‌های برشی شکل‌پذیر، شباهت و انطباق خوبی نشان می‌دهند (رستمی پایدار، ۱۳۸۸). در کانسار آهن گلالی نیز کانه مگنتیت به عنوان کانی فلزی چیره به صورت بلورهای با اشکال نیمه شکل دار، شکل دار و گاهی بی‌شکل دیده می‌شود. ابعاد بلورهای مگنتیت از ۲۰ تا ۸۰۰ میکرون متغیر است، ولی بلورهای بین ۳۰۰-۲۰۰ میکرون، فراوانی بیشتری نشان می‌دهند. اجتماع این بلورها، گاه تجمعات درشت با ابعاد میلی‌متر تا سانتی‌متر را ایجاد می‌نماید که با چشم غیرمسلح به راحتی قابل جدایش است. بافت کانی‌سازی فلزی مگنتیت بیشتر به صورت توده‌ای است، ولی بافت‌های لکه‌ای، افشان و شکافه‌پرکن نیز دیده می‌شوند. این کانی از حواشی و اطراف و نقاط ضعف در شبکه بلورین، به هماتیت (مارتیت) دگرسان شده است، به طوری که خطوط مارتیتی شدن در آن آشکار است (شکل ۴). هماتیت به صورت شبکه‌ای با الگوهای خاص در سطوح رخ (کلیواژ) هشت وجهی (اکتاندری) مگنتیت تشکیل شده و بی‌نظمی آن نشانه فرایند مارتیتی شدن است. کانه مگنتیت در برخی از مقاطع مطالعه شده، دچار شکستگی‌های ظریفی شده است که به نظر می‌رسد حاصل عملکرد

پراکنندگی و میزان عناصر مورد نظر، هم به صورت مجزا و تفکیک شده و هم بر روی تصویر محدوده مورد تجزیه با رنگ‌های مشخصی پیاده شده است. برخی از کاربردهای این میکروسکوپ در مطالعه نمونه‌های زمین‌شناسی و سنگ‌های دگرشکل شده در (Lloyd & Hall (1981) و (Passchier & Trouw (2005) نشان داده شده است. تجزیه‌های کمی این دستگاه در مورد برخی از کانی‌های غیرفلزی و فلزی نیز در (Champness et al. (1982) منتشر شده است. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به لحاظ کاربردی قادر است اطلاعات ریخت‌شناختی، توپوگرافی، بلورشناسی و شیمی‌بلور را در مورد نمونه‌های مورد بررسی در اختیار بگذارد. تعیین عناصر و ترکیبات موجود در نمونه و مقادیر نسبی آنها توسط این دستگاه امکان‌پذیر است که به صورت‌های مختلف چون نقشه تجزیه عنصری، نمودارهای فراوانی عناصر و مقادیر عددی یا کمی عناصر تشکیل‌دهنده نمونه مورد نظر گزارش می‌شود. لازم به یادآوری است که این تنوع در روش‌های تجزیه و نمایش نتایج آن با دستگاه SEM-EDAX می‌تواند در امر شناخت کانسنگ و ویژگی‌های مختلف شیمی‌بلور آن بسیار ارزشمند باشد و در مواردی با بررسی دقیق ارتباط بین فازهای کانیایی در گیر در کانسنگ و نیز گانگ، به بهینه‌سازی روش‌های کانه‌آرایی منجر می‌شود.

۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش به دو صورت از کانسنگ آهن آماده‌سازی شد. از تعدادی از نمونه‌ها، مقاطع صیقلی تهیه شد و ویژگی‌های کانه‌نگاری آنها به دقت مورد مطالعه قرار گرفت. در بخش‌هایی از این نمونه‌ها، کانی‌های پیریت و مگنتیت و نیز یک سری فازهای فلزی مجهول، مشخص و علامت‌گذاری شده بود تا بر روی آنها بررسی‌های دقیق‌تری انجام گیرد. بخش دوم نمونه‌های مورد مطالعه، شامل بلورهای جداسازی شده پیریت و مگنتیت از کانسنگ آهن باباعلی و گلالی است. با توجه به این که درجه خلوص فاز سولفیدی و سیلیکاتی جداسازی شده برای بررسی‌های ایزوتوپی، از اهمیت خاصی برخوردار است و نتایج تجزیه‌های ایزوتوپی به میزان دقت در آماده‌سازی نمونه‌ها وابستگی زیادی نشان می‌دهد، بنابراین در آزمایشگاه کانه‌آرایی سازمان زمین‌شناسی کشور، بر روی نمونه‌های کانسنگ انتخابی، ابتدا عملیات خردایش انجام شد و این کار تا رسیدن به درجه آزادی فاز سولفیدی ادامه پیدا کرد. سپس با استفاده از مایعات سنگین و جداکننده مغناطیسی (magnetic separator)، هر نمونه در چندین مرحله پرعیار شد. در نهایت نمونه‌های آماده‌سازی شده به منظور حصول اطمینان از میزان خلوص (purity)، با دستگاه SEM مورد کنترل و بررسی قرار گرفت و بخش‌هایی از هر نمونه تجزیه شد. لازم به یادآوری است که در مرحله آماده‌سازی، به منظور هادی کردن، نمونه‌ها ابتدا با یک لایه نازک نقره پوشش داده شد، بنابراین مقادیر نقره در نتایج تجزیه حذف شده است.

۴- کانی‌سازی آهن در کانسارهای باباعلی و گلالی

کانی‌سازی آهن در دو کانسار باباعلی و گلالی در میان سنگ‌های آتشفشانی - رسوبی سری سنقر به سن پرموتریاس رخ داده است. ترکیب سنگ‌شناسی این سری شامل سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا حدواسط دگرگون شده، بیشتر به صورت گدازه و توف رپولیتی، همراه با میان‌لایه‌های کربناتی و گاه رسوبات ماسه‌سنگ توفی دگرگون شده است. بر اساس مشاهدات صحرایی و بررسی‌های سنگ‌نگاری انجام شده، جایگیری توده‌های نفوذی و نیمه آتشفشانی با ترکیب گابرویدوریت، کوارتز مونوزودوریت، گرانویدوریت، سینیت، سینوگرانیت و گرانیت در این توالی سنگی در حین فعالیت‌های زمین‌ساختی، باعث دگرشکلی و گاه دگرگونی منطقه و کانسنگ آهن شده است. دیگر واحدهای سنگ چینه‌ای رخنمون دار در منطقه

۷- بررسی کانه پیریت در کانسنگ آهن باباعلی و گلالی

بر مبنای مطالعه بافتی در مقیاس نمونه دستی و کانه‌نگاری در کانسنگ آهن باباعلی، ۳ نسل پیریت از نظر دانه‌بندی و بافت تفکیک شد:

نسل اول پیریت به صورت دانه‌ریز و فاقد شکل هندسی مشخص در بسیاری از مقاطع صیقلی مطالعه شده دیده می‌شود و گاهی به تنهایی، درصد قابل توجهی از سطح مقطع را به خود اختصاص می‌دهد. ابعاد بلورها بین ۲۰-۵ میکرون است. بیشتر این بلورها از حاشیه و اطراف دگرسان شده و به اکسید و هیدروکسیدهای ثانویه آهن تبدیل شده‌اند. پیریت به صورت بافت باقیمانده و دانه‌ریز در داخل اکسیدهای ثانویه قرار گرفته است. نسل دوم پیریت به صورت بلورهای شکل‌دار و نیمه شکل‌دار با ابعاد ۳۰۰-۳۰ میکرون دیده می‌شود. گاه اجتماع بلورهای پیریت، لکه‌های درشتی با ابعاد میلی‌متر تا سانتی‌متر را ایجاد نموده است (شکل ۹).

نسل سوم پیریت به صورت بلورهای درشت و با شکل هندسی نامشخص در فضاهای خالی سنگ میزبان جای گرفته است. اندازه بلورها بین ۵۰۰-۱۰ میکرون متغیر بوده و سطح آنها حفره‌دار و توخالی (مجوف) است (شکل ۹). در برخی حفرات، میان‌بارهای کوچکی از کانه‌های پیرویت و کالکوپیریت حضور دارند. گاهی بلورهای کوچک پیریت تا حدود ۲۰ میکرون به صورت شکل‌دار ظاهر شده و به احتمال از نوع پیریت نوریخت (Neoformed pyrite) هستند. از جمله بافت‌های جالب توجه پیریت در کانسنگ آهن باباعلی، بافت لامینه‌ای یا نواری شکل آن در تناوب با لامینه‌های مگنتیت است. بررسی ارتباط بین کانسنگ و سنگ دربرگیرنده در مقیاس‌های مختلف رخنمون، نمونه دستی و میکروسکوپی نشان می‌دهد این نوع بافت همراه با دگرگونی ناحیه‌ای، تشکیل و گسترش پیدا کرده است.

پیریت در کانسنگ گلالی نیز به صورت بلورهای به طور کامل شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و با ابعاد ۱۰۰-۳۰ میکرون است که گاه اندازه درشت‌بلور آنها به ابعاد حدود ۶۰۰ میکرون نیز می‌رسد و گاهی نیز اجتماع بلورهای پیریت به صورت تجمعات با ابعاد میلی‌متر تا سانتی‌متر ایجاد کرده است. این کانی در بیشتر موارد به شکل رگچه‌ای و درگیر با مگنتیت است (شکل ۹). پیریت بیشتر همراه با پیرویت بوده و در حفرات و فضاهای مناسب، مگنتیت را پر کرده است. بافت‌های دانه‌پراکنده، لامینه‌ای، لایه‌ای و شکافه‌پرکن از پیریت در سنگ درونگیر و کانسنگ آهن دیده می‌شود. بافت‌های شکافه‌پرکن در بخش‌های مختلف این کانسار چیره است و با چشم غیرمسلح نیز قابل مشاهده است (شکل ۹). در شکل ۹، نوعی بافت زونه در پیریت دیده می‌شود که در آن، دست کم سه فاز کانی‌سازی را می‌توان تفکیک نمود. در بین این مراحل نیز یک زمان آرامش نسبی بدون کانی‌سازی (وقفه در کانی‌سازی) قابل دیدن است. این نوع پیریت برای بررسی‌های بعدی، در صورت امکان با SEM و میکروپروب انتخاب شده است تا تغییرات و روند این فازهای کانی‌سازی با دقت بیشتری مورد بررسی قرار گیرد. بر مبنای مشاهدات بافتی، کانی‌سازی پیریت تابع فضاهای خالی سنگ میزبان بوده و اغلب پس از کانی‌پیرویت رخ داده است.

۸- شیمی‌بلور پیریت در کانسنگ آهن باباعلی و گلالی

کانه پیریت در نمونه‌های جداسازی شده از دو کانسار آهن باباعلی و گلالی در تجزیه‌های انجام‌شده با روش SEM-EDAX از نظر عناصر کمیاب مانند Ni, Cu, Co, V, Ti, Cr, PGE, Au مورد بررسی قرار گرفت. نکته جالب توجه در تعدادی از این نمونه‌ها، حضور عنصر پلاتین (Pt) در شبکه پیریت است. تجزیه دقیق‌تر پیریت حاکی از تمرکز عنصر پلاتین از ۵/۴۵ تا ۱۰/۴۲ درصد وزنی به صورت پراکنده در شبکه این کانی است (شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲). شواهد نشان می‌دهد که فاز سولفیدی پیریت اولیه، در حمل و تمرکز عنصر پلاتین نقش مهمی داشته است. این موضوع

فرایندهای زمین‌ساختی است و در برخی بخش‌ها، جابه‌جایی قطعات بلور مگنتیت نیز صورت گرفته است. در داخل حفرات ایجاد شده، دگرسانی بسیار ضعیفی روی این کانی صورت گرفته و به اکسیدهای آبدار ثانویه تبدیل شده است. فراوانی این کانی در مقاطع مطالعه شده مربوط به کانسنگ گلالی به ۸۰-۵۰ درصد نیز می‌رسد. کانه مگنتیت اولیه بوده و کانه‌های هماتیت، لیمونیت و گوتیت، سوپرژن و ناشی از دگرسانی است.

۹- شیمی‌بلور مگنتیت در کانسنگ آهن باباعلی و گلالی

به منظور بررسی شیمی‌بلور به روش SEM-EDAX، کانه مگنتیت در نمونه‌های جداسازی شده از دو کانسار آهن باباعلی و گلالی از نظر عناصر کمیاب مانند Ni, Cu, Co, V, Ti, Cr, PGE, Au و ناخالصی‌های مزاحم P و S مورد بررسی قرار گرفت (شکل‌های ۷ و ۸). برای مطالعه دقیق‌تر شیمی‌بلور کانسنگ مگنتیت باباعلی و گلالی، ۴ نمونه پرعیار شده از کانه مگنتیت با روش ICP-MS نیز تجزیه شده که نتایج آن در جدول ۱ آمده است (شکل‌های ۵ و ۶). در مورد چگونگی و توزیع عناصر کمیاب و خاکی کمیاب در کانسنگ آهن، پژوهش‌های قابل توجهی در ایران و جهان انجام شده است، ولی بررسی‌ها در مورد توزیع این عناصر در فاز مگنتیت کانسنگ آهن، انگشت‌شمار بوده و بیشتر آنها نیز بر روی انواع کانی‌سازی ماگمایی مگنتیت-آپاتیت انجام شده است. نتایج این بررسی‌ها، الگوهای مشخصی را در ارتباط با انواع مدل‌های ژنز و شکل‌گیری مواد معدنی ارائه داده است. بر این اساس، دو دسته کانسنگ آهن نوع کایرونا (با وابستگی به آتشفشانی‌ها) و کانسنگ آهن در ارتباط با فرایندهای دوتریک و توده‌های نفوذی رده‌بندی شده است (Frietsch & Perdahl, 1995). به طور کلی، الگوی خاک‌های کمیاب (REE) آپاتیت در این کانسارهای آهن، نشان از تمایل آنها به ماگماهای قلیایی و نیمه قلیایی و محیط‌های کافتی دارد. ذوب بخشی سنگ‌های ژرف پوسته‌ای به عنوان منشأ احتمالی این کانی‌سازی آهن در مقیاس بزرگ تلقی شده و ماگمازایی در کافت‌های درون‌قاره‌ای همراه با زیرراندگی پوسته‌های قدیمی، باعث توسعه کانی‌سازی آهن شده است. در کانسنگ آپاتیته کایرونا، مقدار ΣREE بین ۲۰۰۰ تا ۷۰۰۰ ppm، نسبت تفریق LREE/HREE ضعیف تا متوسط و بی‌هنجاری منفی Eu گزارش شده است. نکته دیگر این که در هر دو نوع کانسنگ غنی و فقیر از فسفر کایرونا، الگوی REE مشابه است که این نشان از هم‌منشأ بودن آنها دارد (Frietsch & Perdahl, 1995). کانی‌سازی آهن حوضه بافق در ایران مرکزی نیز به عنوان نوع کایرونا رده‌بندی شده است (Torab & Lehmann, 2007). در مورد مگنتیت‌های کانسنگ آهن باباعلی و گلالی، همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص شده است، الگوی خاک‌های کمیاب سبک (LREE) نسبت به خاک‌های کمیاب سنگین (HREE) در کانسنگ آهن مگنتیتی غنی شدگی نشان می‌دهند. این ویژگی در سنگ‌های در برگیرنده ماده معدنی نیز صادق است و به احتمال، می‌تواند ناشی از ذوب بخشی کم مواد گوشته‌ای، ذوب محدود گوشته غنی شده و یا محصول فرایند نهایی تبلور بخشی در ماگماتیسیم منطقه باشد.

بررسی ترکیب کانی‌شناسی و شیمی‌بلور کانسنگ آهن مگنتیتی گلالی توسط روش SEM-EDAX منجر به شناسایی کانی فلوگوپیت در زون اسکارن گلالی شده است. با توجه به ویژگی‌های زمین‌ساختی، جایگاه زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و نوع ماده معدنی، پارازن اسکارن و سنگ درونگیر ماده معدنی، رده‌بندی جامعی از انواع کانسارهای اسکارن ارائه شده است (Meinert, 1993). شواهد کانی‌شناسی و حضور فراوان کانی فلوگوپیت، همراه با مگنتیت گلالی باعث تقویت نظریه اسکارن منیزیمی با منشأ اولیه آتشفشانی- رسوبی در مورد این کانسار شده است.

این نمونه‌ها اتخاذ شد.

- بررسی ترکیب کانی‌شناسی و شیمی‌بلور تعدادی از فازهای مجهول در کانسنگ آهن گلالی نیز به شناسایی کانی فلورگوپیت در زون اسکارن منجر شده است که باعث تقویت نظریه اسکارن مگنتیتی با منشأ اولیه آتشفشانی - رسوبی در مورد این کانسار شده است.

- به‌طور کلی الگوی خاک‌های کمیاب سبک (LREE) نسبت به خاک‌های کمیاب سنگین (HREE)، هم در کانسنگ آهن مگنتیتی و هم در سنگ‌های دربرگیرنده ماده معدنی، غنی‌شدگی نشان می‌دهند که می‌تواند محصول ذوب بخشی کم مواد گوشته‌ای، ذوب محدود گوشته غنی‌شده و یا محصول فرایند نهایی تبلور بخشی در ماگماتیسیم منطقه باشد.

- بررسی‌های ژئومتری و ساخت و بافت انجام شده در مقیاس نمونه دستی و میکروسکوپی بر روی کانسنگ آهن باباعلی و گلالی، بیانگر این مطلب است که توالی پاراژنزی و کانی‌زایی در کانسار، شامل کانی‌سازی مگنتیت و نسل اولیه پیرویت و پیریت، به‌صورت همزمان با سنگ درونگیر و با سری آتشفشانی - رسوبی است. پس از آن در فازهای ثانوی، کانه‌های سولفیدی چون پیریت و کالکوپیریت و کانی‌های اکسیدی و کربناتی ناشی از هوازدگی آنها در فضاهای خالی سنگ میزبان، باطله و مگنتیت کانی‌سازی داشته است. کانه‌های سولفوری مانند پیریت و پیرویت نسبت به مگنتیت، تأخیری هستند.

بررسی و ارزیابی احتمال کانی‌سازی با ارزش اقتصادی پلاتین در فازهای مگنتیت و پیریت هر دو کانسار بویژه در نسل‌های اولیه پیشنهاد می‌شود. محدوده کانسار آهن گلالی و بویژه فازهای باطله کوارتز و کلسیت همراه با کانسنگ آهن که دارای کانی‌سازی پیریت است، از نظر احتمال کانی‌سازی با ارزش اقتصادی طلا به‌طور جامع‌تر مطالعه شود. همچنین ویژگی ایزوتوپی این نسل از پیریت و تفاوت آن با دیگر نسل‌ها مورد پژوهش و مقایسه قرار گیرد.

سپاسگزاری

در این پژوهش همکاری صمیمانه خانم‌ها صحت و زوزی از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور شایسته تقدیر است. همچنین از مسئولان محترم سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور که تسهیلات لازم برای این پژوهش را مهیا نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه و کانسارهای آهن باباعلی و گلالی

در نمونه‌های متعددی مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شده است، لذا به جرأت می‌توان بیان داشت که نسل اولیه پیریت در کانسارهای آهن باباعلی و گلالی، دارای عنصر پلاتین است، لذا این موضوع می‌تواند شاهدی بر منشأ احتمالی ماگمایی و نسل اولیه این نوع پیریت باشد. دیگر نسل‌های پیریت ناشی از دگرگونی، دگرسانی و فعالیت‌های گرمایی تأخیری در این کانسارها به شمار می‌رود که از نظر عناصر کمیاب مورد نظر تهی شده است. نکته دیگر این که پیریت گرمایی تأخیری، حامل عنصر طلا (Au) است که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

بخشی از باطله (گانگ) کانسار آهن گلالی به صورت رگه و رگچه‌های کلسیت - کوارتز - پیریت است که با ستبراهای مختلف در مغزه‌های حفاری شده دیده می‌شود. به منظور بررسی دقیق‌تر فازهای کانیایی، این نوع رگه‌ها و بویژه نسل‌های مختلف پیریت در کانسار، مطالعه شیمی‌بلور پیریت و تجزیه عنصری این کانی با دستگاه SEM بر روی یک نمونه از این نوع رگه‌ها انتخاب شد. کانی پیریت این نمونه به‌صورت بلورهای درشت و خودشکل در باطله کربنات - کوارتز با فراوانی بیشتر فاز کربناتی است که پیش‌تر مقاطع صیقلی آن تهیه و مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج بسیار جالبی را نیز در بر داشته است. ۶ بار تجزیه بر روی بخش‌های مختلف این نمونه انجام شد. در شکل ۱۳ تجزیه نقشه‌ای (Map analysis) انجام شده، به تفکیک، فراوانی عناصر موجود در کانی سولفیدی پیریت و باطله کربناتی - سیلیسی را نشان داده است. همان‌طوری که دیده می‌شود عنصر طلا با فراوانی متوسط ۲/۰۸ درصد وزنی در فاز سولفیدی پیریت تمرکز یافته است. این یافته در تجزیه کامل انجام شده بر روی این نمونه در شکل ۱۴ نیز به خوبی مشخص و تأیید شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کانه سولفیدی پیریت، به عنوان حامل خوبی برای عنصر طلا در سیال‌های گرمایی تأخیری کانساز در کانسار آهن گلالی عملکرد داشته است. بنابراین بررسی‌های بیشتر این نوع رگه‌های کوارتز - کربناتی در کانسار آهن گلالی پیشنهاد می‌شود. مشابه این نوع از کانی‌سازی طلا همراه با پیریت در دنیا به طور کامل شناخته شده است (Pirajno, 1992). در این مطالعه، افزون بر طلا همراهی عنصر آنتیموان (Sb) نیز در تعدادی از تجزیه‌ها دیده شد.

۹- نتیجه‌گیری

بر اساس مشاهدات صحرائی، بررسی‌های کانه‌نگاری و تجزیه‌های انجام شده در این پژوهش که برای نخستین بار با روش SEM-EDAX بر روی کانسنگ آهن کانسارهای باباعلی و گلالی انجام شده است، می‌توان نتایج زیر را به اختصار مطرح نمود:

- بررسی حضور برخی از عناصر کمیاب مانند Ni, Cu, Co, V, Ti, Cr, PGE, Au در ترکیب کانی‌های مگنتیت و پیریت در کانسنگ آهن باباعلی و گلالی نشان می‌دهد تنها پیریت هیپوژن و نسل اولیه، دارای تمرکز جالب توجهی از عنصر پلاتین (Pt) است. دیگر نسل‌های پیریت و مگنتیت از نظر این عناصر، تهی شده‌اند.

- شناسایی طلا (Au) در ترکیب و شبکه کانی پیریت از جمله نتایج جالب توجه دیگر در این مطالعه است. شواهد به‌دست آمده از این مطالعه، نشان‌دهنده این مطلب است که سیالات گرمایی تأخیری که دارای کانی‌سازی پیریت است، از نظر طلا نیز قابل توجه بوده و کانی پیریت، به عنوان حامل خوبی برای عنصر طلا عمل کرده و حضور طلا به‌صورت آزاد در باطله کوارتز - کربناتی را امکان‌پذیر نموده است.

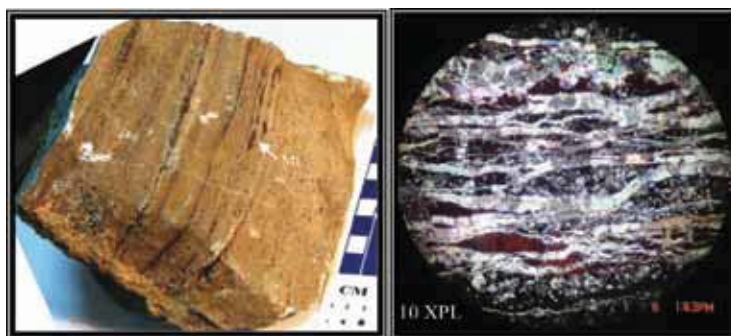
- نتایج این مطالعه، نشان از درجه خلوص بالای بیشتر نمونه‌های آماده‌سازی شده به منظور بررسی‌های ایزوتوپی دارد. تعداد محدودی از نمونه‌ها نیز دارای ناخالصی‌های کوارتز و کلسیت هستند که تمهیدات لازم در مورد بالا بردن عیار

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمی عناصر اصلی، کمیاب و خاکی کمیاب در مگنتیت پرعیار شده باباعلی (Ha) و گلالی (Ga)

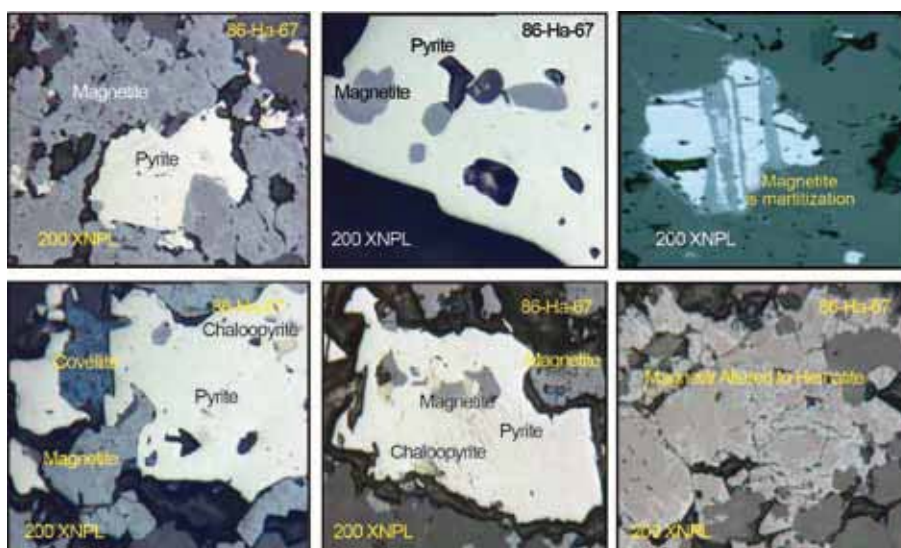
Sample.No	Location	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO%	MgO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	TiO ₂ %	MnO%	P ₂ O ₅ %	BaO%	L.O.I	total
LOR		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
86-Ha-P1	Baba-Ali	7.66	0.95	85.1	4.28	0.93	0.08	0.05	0.08	0.04	0.1	0.07	0.3	99.6
86-Ha-P3	Baba-Ali	4.06	0.93	89.3	4.63	0.99	0.08	0.06	0.06	0.04	0.13	0.01	-0.89	99.4
86-Ga-P8	Galali	2.8	1.7	92.4	0.52	2.11	0.02	0.29	0.08	0.06	0.06	0.01	-0.47	99.6
86-Ga-P9	Galali	11.8	2.37	77.9	4.42	3.87	0.03	0.43	0.19	0.11	0.04	0.01	-1.67	99.5
ppm		Ag	Ba	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf
LOR		1	0.5	0.5	0.5	10	0.01	5	0.05	0.03	0.03	0.1	0.05	0.2
86-Ha-P1	Baba-Ali	1	324	9.7	26.3	10	0.22	288	0.4	0.28	0.19	3.3	0.53	0.6
86-Ha-P3	Baba-Ali	1	8	12	1.5	10	0.18	258	0.28	0.19	0.11	3.3	0.45	0.2
86-Ga-P8	Galali	1	34.6	0.8	13.6	10	0.83	106	0.09	0.07	0.03	4.2	0.12	0.2
86-Ga-P9	Galali	1	39.2	6.2	14.3	10	1.25	18	0.51	0.32	0.06	4.3	0.57	1
ppm		Ho	La	Lu	Mo	Nb	Nd	Ni	Pb	Pr	Rb	Sm	Sn	Sr
LOR		0.01	0.5	0.01	2	0.2	0.1	5	5	0.03	0.2	0.03	1	0.1
86-Ha-P1	Baba-Ali	0.07	7.6	0.05	2	0.2	2.8	5	27	0.88	0.9	0.53	2	40.1
86-Ha-P3	Baba-Ali	0.05	7.7	0.03	2	0.2	3.3	5	5	1.1	0.9	0.42	1	15.4
86-Ga-P8	Galali	0.02	2.4	0.01	2	0.2	0.3	5	5	0.08	33	0.03	1	4.7
86-Ga-P9	Galali	0.11	4.3	0.05	2	0.7	2.4	5	5	0.67	39.5	0.47	1	43
ppm		Ta	Tb	Th	Tl	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zn	Zr	
LOR		0.1	0.01	0.05	0.5	0.01	0.05	5	1	0.5	0.03	5	2	
86-Ha-P1	Baba-Ali	0.1	0.07	1.45	0.5	0.04	0.47	8	1	2	0.21	48	27	
86-Ha-P3	Baba-Ali	0.1	0.07	0.83	0.5	0.02	0.3	6	1	1.7	0.18	33	10	
86-Ga-P8	Galali	0.1	0.02	0.55	0.5	0.01	0.35	8	3	0.5	0.07	110	12	
86-Ga-P9	Galali	0.1	0.12	1.15	0.5	0.05	0.59	16	3	3	0.29	85	38	



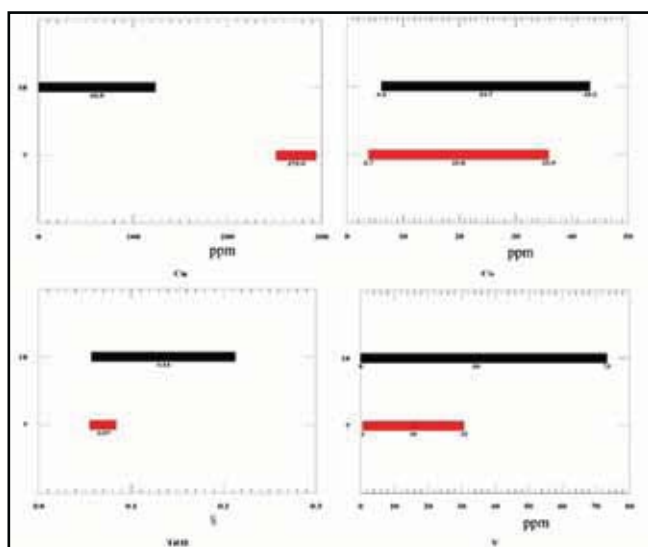
شکل ۲- اشکال مختلف کانی سازی آهن در کانسارهای باباعلی و گلالی: کانه چیره در این دو کانسار، مگنتیت است، ولی کانه‌های پیریت، پیروتیت، هماتیت، و کانی‌های مس از قبیل کالکوپیریت، مالاکیت و آزوریت نیز به همراه آن حضور دارند. بافت نواری پیریت و مگنتیت در راستای برگ‌وارگی (فولیاسیون) ترجیحی کانسنگ (خط چین) دیده می‌شود.



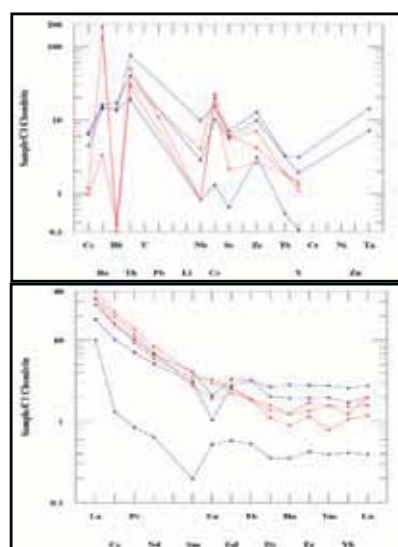
شکل ۳- نمونه دستی و نمای میکروسکوپی از تناوب لامینه‌های کربناتی دگرگون‌شده و کانی‌سازی مگنتیت و هماتیت



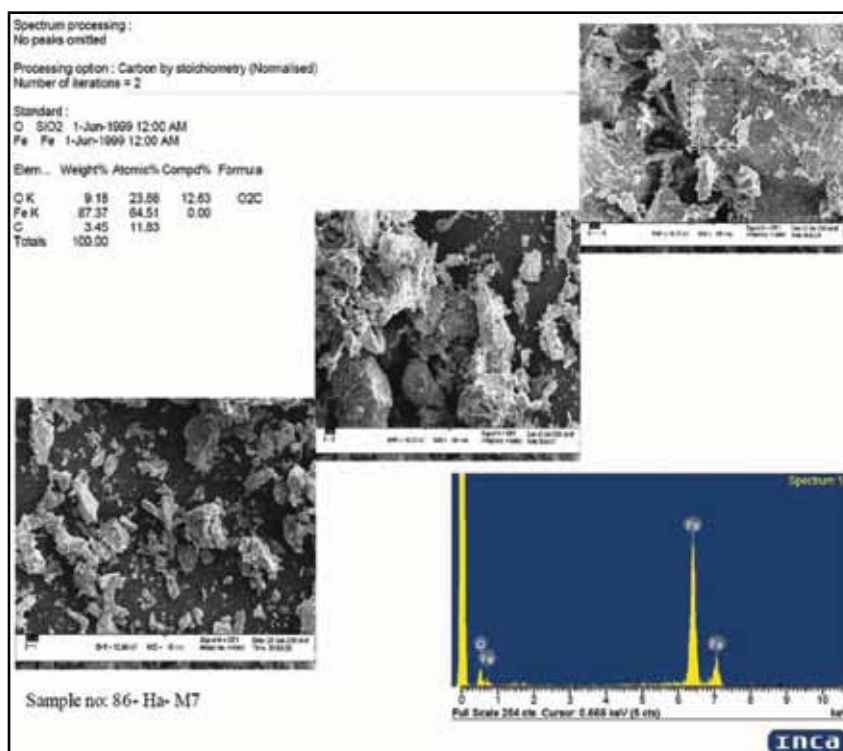
شکل ۴- نماهای مختلفی از ارتباط کانی‌سازی مگنتیت و پیریت: مگنتیت فاز اولیه کانی‌سازی است.



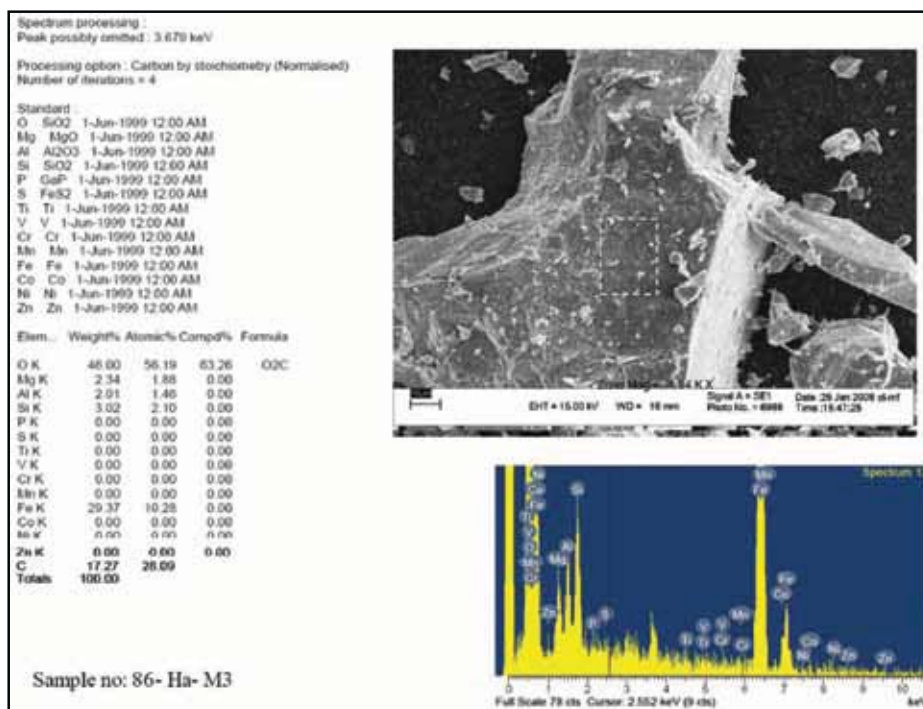
شکل ۶- میزان تمرکز عناصر Cu, Co, V, Ti در کانسنگ آهن باباعلی (سرخ رنگ) و گلالی (آبی تیره).



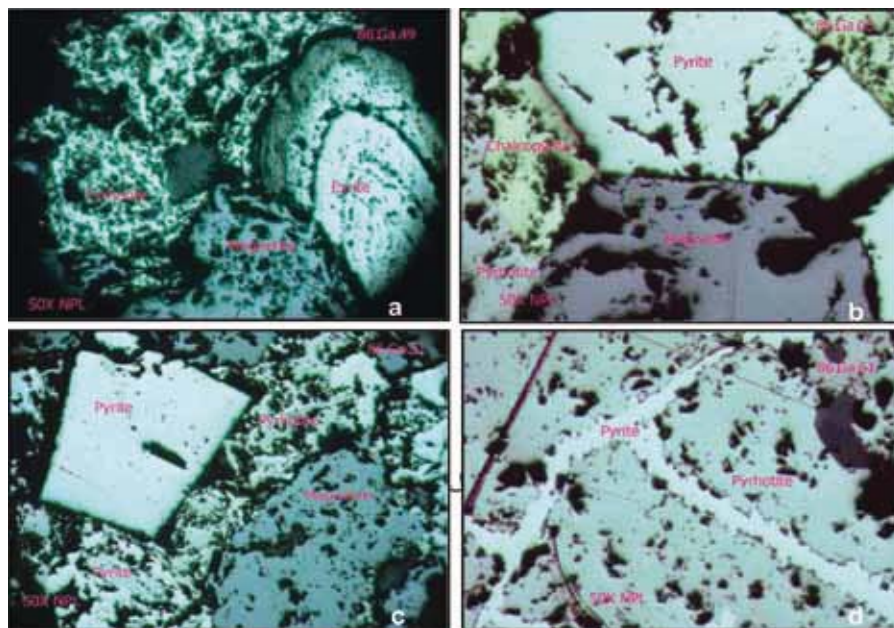
شکل ۵- نمودار الگوی پراکندگی بهنجار شده عناصر خاکی کمیاب و نمودار عنکبوتی بهنجار شده با کندریت در کانسنگ آهن باباعلی (سرخ رنگ) و گلالی (آبی تیره) را نشان می‌دهد. الگوی خاک‌های کمیاب سبک (LREE) نسبت به خاک‌های کمیاب سنگین (HREE) در کانسنگ آهن مگنتیتی، غنی‌شدگی نشان می‌دهند.



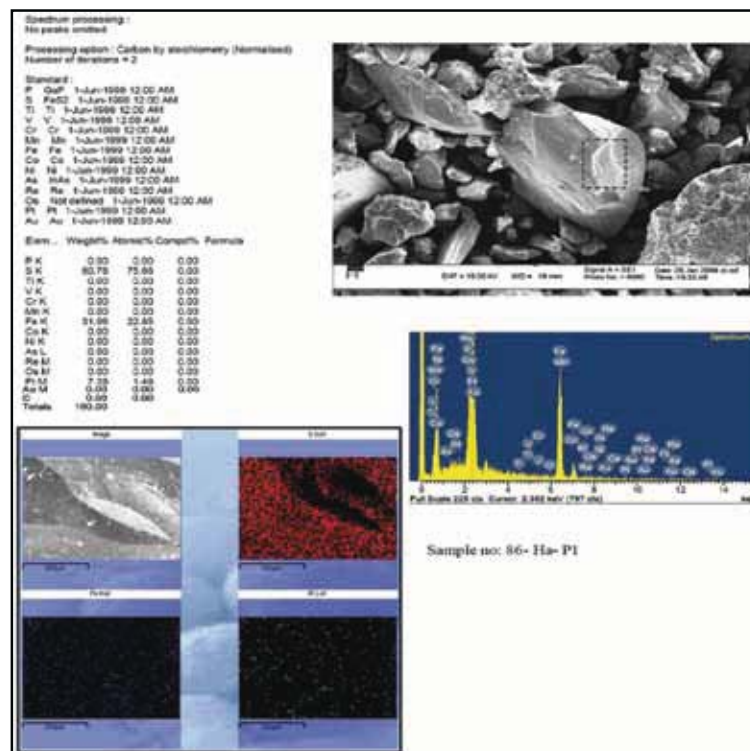
شکل ۷- بلورهای مگنتیت که از کانسنگ آهن باباعلی جداسازی شده است. ۶ تجزیه از بخش های مختلف این نمونه انجام شد. همان طوری که دیده می شود، بیش از ۹۶ درصد وزنی نمونه مورد نظر از دو عنصر O و Fe تشکیل شده است که نشان از درجه بالای خلوص کانه مگنتیت دارد.



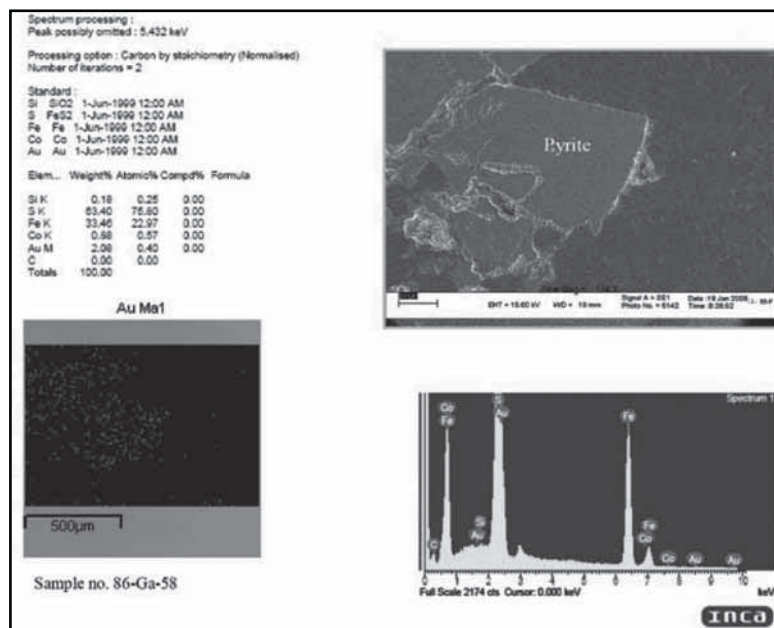
شکل ۸- بلورهای با درجه خلوص (purity) بالای مگنتیت از کانسنگ آهن باباعلی جداسازی شده است. بخش چیره نمونه مورد نظر از دو عنصر O و Fe تشکیل شده است. مقداری کلسیت نیز در زمینه وجود دارد. این نمونه از نظر عناصر S, P, Ti, Cr, V, Ni نیز مورد بررسی قرار گرفته است و همان گونه که دیده می شود این عناصر در فاز مگنتیت تهی شده اند.



شکل ۹- نماهای مختلفی از نحوه کانی‌سازی پیریت همراه با مگنتیت. (a) کانه پیریت با چندین نسل کانی‌سازی در کنار مگنتیت و پیرویت تشکیل شده است. وجود بافت زونه در پیریت، وقفه‌های مابین تبلور چندفازی پیریت را نشان می‌دهد. بدیهی است اولین فاز در مرکز و به سمت حاشیه، فازهای کانیایی جدید را شاهد هستیم. (b و c) پیریت خود شکل (اتومورف) در کنار مگنتیت و پیرویت، ابتدا فاز مگنتیت سپس پیریت و در نهایت، پیرویت فضاهای بین کانی را پر نموده است. (d) رشد پیریت در شکستگی‌ها و فضاهای خالی ایجاد شده در کانه پیرویت را نشان داده است.



شکل ۱۰- فاز پیریت جداسازی شده کانسنگ آهن باباعلی که از درجه خلوص بالایی برخوردار است. همان‌طوری که دیده می‌شود بیش از ۹۲ درصد وزنی نمونه مورد نظر از دو عنصر S و Fe تشکیل شده است. تمرکز عنصر پلاتین با ۷/۲۸ درصد وزنی به صورت پراکنده در شبکه پیریت نشان داده شده است که هم در تجزیه‌های کمی و هم در تجزیه نقشه‌های مشخص شده است.



شکل ۱۴- تصاویر تجزیه کامل انجام شده توسط دستگاه SEM-EDAX. همان‌طوری که دیده می‌شود وجود پیک مشخص عنصر طلا (Au: 2.08 weight %) در فاز سولفیدی پیریت مشخص شده است.

کتابنگاری

اشراقی، ص.، ۱۳۸۰- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تویسرکان، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
 رستمی پایدار، ق.، ۱۳۸۸- زمین‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه کانی‌سازی آهن در کانسارهای باباعلی و گلالی با نگرشی بر مطالعات ایزوتوپی، رساله دوره دکتری گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.
 شرکت مهندسین مشاور زریبان اکتشاف، ۱۳۷۹- طرح اجمالی اکتشاف سنگ آهن شمال غرب ایران. گزارش داخلی شرکت فولاد صباور.
 محجل، م. و ایزدی کیان، ل.، ۱۳۸۶- چین خوردگی‌های چندمرحله‌ای و سازوکار تشکیل آنها در تکتونیت‌های موجود در ساختار گنبدی منطقه آلمابولاق، باختر همدان، فصلنامه علوم زمین، شماره ۶۶، صفحه ۱۱۶ تا ۱۳۳.

References

- Barud, J., 1975- Geological map of the Kermanshah Quadrangle, 1:250000, Published by Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
 Champness, P. E., Cliff, G. and Lorimer, G. W., 1982- Quantitative analytical electron microscopy of metals and minerals. *J. Microsc.*, 108, 231-49.
 Frietsch, R. and Perdahl, J. A., 1995- Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types, *Ore Geology Reviews*, v. 9, p. 489-510.
 Goldstein, J. and Newbury, D. E., 2003- Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, Third Edition, Plenum Press, 358p.
 Hall, M.G., Lloyd, G.E., 1981- The SEM examination of geological samples with a semiconductor back-scattered electron detector, *Am. Mineral*, v. 66, p. 362-368.
 Hobart, H. and Willard, H., 1998- Instrumental methods of analysis. Wadsworth Inc., Seventh edition.
 Lloyd, G. E. and Hall, M. G., 1981- Application of scanning electron microscopy to the study of deformed rocks. *Tectonophysics*, v. 78, p. 687-698.
 Meinert, L. D., 1993- Skarns and skarn deposits, in *Ore deposit models*, Volume II: Geoscience Canada, reprint series 6, p. 117-134.
 Passchier, C. W. and Trouw, R.A.J., 2005- Microtectonics, special techniques, Scanning Electron Microscope, Springer, 288p.
 Pirajno, F., 1992- Hydrothermal mineral deposits, Springer-Verlag, 709p.
 Reed, S. J. B., 1996- Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology, Cambridge Univ Press., 201p.
 Torab, F. M. and Lehmann, B., 2007- Magnetite-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: apatite geochemistry and monazite geochronology, *Mineralogical Magazine*, v. 71, no. 3, p. 347-363.
 Zamanian, H., Yousefi, B. and Alavi, S. A., 2007- Mineralogical and geochemical skarn zoning across the Baba-Ali deposit, western Iran, *Geoscience Scientific Quarterly Journal*, vol. 16, No. 62, p. 194-203.
 Zheng, J. G., 2006- Electron microscopy: TEM and SEM, in *Materials Science & Engineering Congress, EPIC/NUANCE Center, USA*.