

بررسی زمین‌شناسی، زمین‌شیمی، شیمی کانی‌ها و کانه‌زایی سرب و روی علم‌کندی، زیر پهنه فلززایی تکاب- ماهشان

حافظ مرنگی^{۱*}، محمد رضا حسین‌زاده^۱، کمال سیاه‌چشم^۱، سجاد مغفوری^۲

۱- گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲، نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷)

چکیده: کانسار سرب- روی علم‌کندی در زیرپهنه تکاب- ماهشان و پهنه سندرچ- سیرجان، در جنوب غرب استان زنجان و شمال غرب ایران قرار دارد. در این پژوهش، زمین‌شناسی، کانی‌سازی، دگرسانی، شرایط زمین‌ساختی، پیوند ماگمایی، شیمی سنگ‌ها و کانی‌های این معدن بررسی شده است. مجموعه دگرگونی نئوپروتروزوئیک- کامبرین در منطقه مورد بررسی شامل آمفیبولیت، گنیس و مرمر است. کانی‌سازی سرب و روی در سنگ میزبان مرمر به صورت جانشینی، رگچه‌ای، پراکنده، برشی و نواری رخ داده است. گالن و اسفالریت مهم‌ترین کانه‌های معدنی هستند. برای بررسی توزیع عناصر نقره، آرسنیک، کبالت، مس، آهن، نیکل، سرب، آنتیموان و گوگرد در مقاطع تهیه شده از کانی‌های گالن، اسفالریت، کالکوپریت، پیریت و تتراهدریت، از تجزیه به روش ریزپردازش الکترونی (EPMA) استفاده شد. مهم‌ترین عناصر اقتصادی در این کانی‌ها سرب، روی و نقره هستند. در میان کانی‌های سولفیدی، گالن دارای بالاترین مقدار نقره است (با میانگین ۰/۱۸۵ درصد وزنی). البته، با تفاوت بسیار نسبت به کانی‌های سولفیدی، تتراهدریت میزبان اصلی نقره (با میانگین ۱۰/۴۵ درصد وزنی) در این معدن است. دگرسانی سنگ میزبان شامل سیلیسی‌شدن و کربناتی‌شدن است. براساس بررسی‌های زمین‌شیمیایی، ماگمای اولیه آمفیبولیت، بازالت میان‌اقیانوسی (MORB) و قوسی آتشفشانی (VAB) آهکی قلیایی تا تولیتی بوده است و نشان می‌دهد که ماگما از گوشته دگر نهاده با اجزای فرورانشی در یک قوس آتشفشانی سرچشمه گرفته است.

واژه‌های کلیدی: زمین‌شیمی؛ شیمی کانی؛ علم‌کندی؛ سرب- روی؛ تکاب- ماهشان.

مقدمه

سرب حلب [۸، ۹]، سرب - روی علم‌کندی [۱۰]، سرب - روی - نقره آی‌قلعه‌سی [۱۱-۱۳]، طلا- آرسنیک عرب‌شاه [۱۴، ۱۵]، سرب - روی - طلای آریاچای [۱۶]، مس - طلای آق‌اوتاق [۱۷]، کانه‌زایی- های آهن چوند بلقیس، میانج [۱۸]، گورگور [۱۹]، علم‌کندی [۲۰] و کورکورا [۲۱]، سراب ۳ [۲۲]، کانه‌زایی منگنز حلب [۲۳] و کانسار مس (کبالت) بایچه‌باغ [۲۴] در این منطقه شناسایی شده‌اند. کانه‌زایی سرب و روی در این منطقه از نظر قرارگیری معدن روی و سرب انگوران به

کانسار علم‌کندی در زیرپهنه تکاب- ماهشان در پهنه سندرچ- سیرجان، استان زنجان، شمال غرب ایران واقع است (شکل ۱). پهنه فلززایی تکاب- ماهشان به عنوان یکی از بی‌ماندترین پهنه‌های کانه‌زایی از نظر تنوع کانه‌زایی‌ها در ایران مطرح است. همچنین از دیدگاه فلززایی، پهنه‌ی کانه‌دار دگرگونه تکاب- ماهشان از مناطق فلززایی مهم در ایران محسوب می‌شود [۲۰، ۲۱] معادن طلا- آرسنیک زرشوران [۲-۴]، طلا- آرسنیک آق‌دره [۱]، روی- سرب انگوران [۵-۷]، کانسارهای روی -

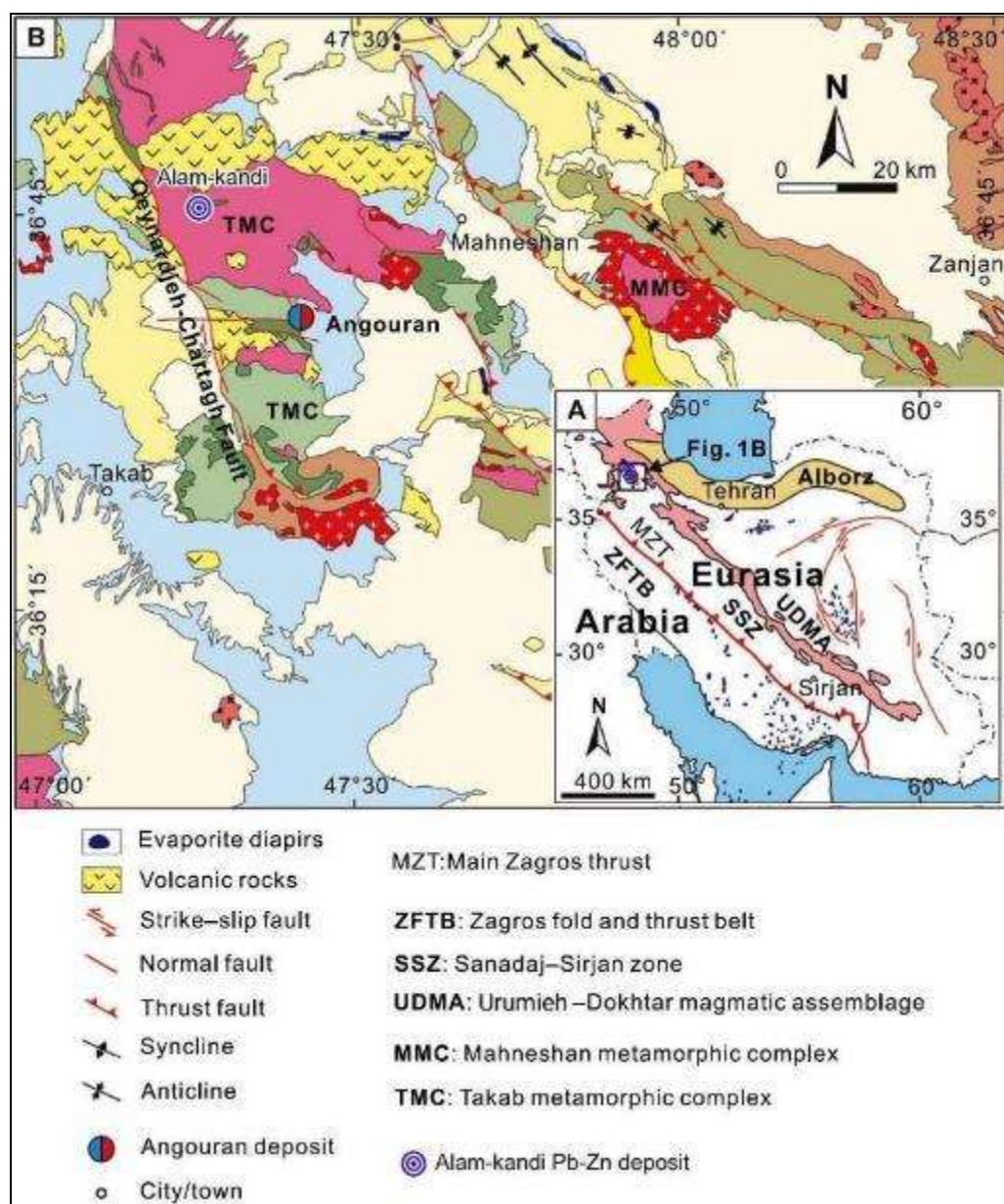
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۴۱-۳۳۳۹۲۶۹۷، پست الکترونیک: Mr.hosseinzadeh1352@gmail.com



تنها نوع کانی‌سازی در این منطقه نیست و شواهدی از انواع دیگر کانی‌سازی نیز در منطقه وجود دارد. در این پژوهش، زمین‌شناسی صحرایی، سنگ‌نگاری، کانی‌سازی و زمین‌شیمی در کانسار سرب و روی علم‌کندی بررسی شده است. بررسی دقیق این نوع کانی‌سازی می‌تواند عوامل کلیدی توزیع زمانی و مکانی را برای پی‌جویی کانی‌سازی‌های مشابه در زیرپهنه فلززایی تکاب- ماهنشان معرفی کرده و به عنوان مدلی برای پی‌جویی در ناحیه‌های مشابه به کار رود.

عنوان بزرگترین معدن روی و سرب خاورمیانه (از نظر عیار ماده معدنی) و چند کانسار سرب و روی دیگر پیرامون آن، اهمیت و ارزش بالایی دارد.

کانسار سرب- روی علم‌کندی از مهم‌ترین کانسارهای سرب- روی در زیرپهنه تکاب- ماهنشان است. فعالیت‌های اکتشافی طی سال‌های گذشته در این رخداد معدنی [۱۰] منجر به شناسایی کانی‌سازی از نوع کانسار نوع دره می‌سی سی پی (MVT) شده است. البته به نظر می‌رسد که MVT



شکل ۱ الف) نقشه‌ی زمین‌شناسی- ساختاری ایران که تقسیم‌بندی‌های اصلی زمین‌ساختی و توزیع کانسارهای سرب- روی انگوران و علم‌کندی را نشان می‌دهد (برگرفته از مراجع [۲۵-۲۷]). ب) نقشه‌ی زمین‌شناسی کلی منطقه تکاب- انگوران و موقعیت کانسار علم‌کندی در آن (برگرفته از مراجع [۲۸، ۵] با تغییرات).

روش کار

پس از زمین‌شناسی صحرایی و نمونه‌برداری، ۳۰ نمونه مناسب برای تهیه مقاطع نازک، ۱۲۰ نمونه برای تهیه مقاطع نازک-صیقلی و ۱۰ نمونه برای تهیه مقاطع دوبر-صیقل انتخاب شدند. مقاطع میکروسکوپی در شرکت زرجویان فلات قاره در پارک علم و فناوری دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان تهیه شده و ویژگی‌های میکروسکوپی آن‌ها با میکروسکوپ‌های شکستی و بازتابی بررسی شدند. همه ویژگی‌های سنگ‌شناسی، سنگ‌نگاری، دگرسانی و کانی‌سازی (کانی‌های معدنی و باطله) نمونه‌ها تعیین و نام‌گذاری شدند.

در مجموع ۱۴ نمونه از سنگ‌های آمفیبولیت معدن سرب و روی علم‌کندی برای تحلیل اکسیدهای عناصر اصلی با طیف-سنج فلئورسانس پرتوی ایکس (XRF) و برخی عناصر کمیاب با طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) در

آزمایشگاه زراژما تجزیه شدند (شکل ۲).

برای بررسی توزیع عناصر کمیاب در کانی‌های سولفیدی و سولفوسالت تتراهدریت، ۴ نمونه با میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج پراکندگی انرژی پرتوی ایکس (SEM-EDX) در دانشگاه لرستان تجزیه شدند.

برای بررسی توزیع عناصر کمیاب در کانی‌های سولفیدی و سولفوسالت تتراهدریت، ۱۴ نقطه از گالن، ۷ نقطه از اسفالریت، ۴ نقطه از کالکوپیریت، ۱ نقطه از پیریت و در پایان ۴ نقطه از تتراهدریت با ریزپردازشگر الکترونی کامکا مدل SX Five در گروه پژوهش سنگ‌کره، دانشگاه وین تجزیه شدند. شرایط طیف‌سنج به صورت Sp5 LLIF, Sp3 LLIF, Sp3 LLIF, Sp5 LLIF, Sp3 LLIF, Sp1 LTAP, Sp1 LTAP, Sp2 PET, Sp2 PET, Sp2 PET, Sp5 LLIF, Sp2 PET, Sp4 TAP بود. شرایط ستون به صورت Cond 1: 20keV 25nA تنظیم شد.

System	Sequence	Lithology	Mineralization
Quaternary		Travertine and unconsolidated conglomerate	
Miocene		Basalt sill/dyke	
		Upper Red Formation (shallow water clastic sediments/tuff or evaporite)	Cu-Ag-As, Au-As
		Qom Formation limestone and marl	Soulakan-II Agderrah
		Lower Red Formation (shallow water clastic sediments/tuff or evaporite)	
Cambrian-Ordovician		Sandstone, shale, dolomite	
		Angouran Marble	Zn-Pb-Ag, Au-As-Sb Angouran Soulakan-I Zarshouran
Neoproterozoic/Cambrian		Quartz-muscovite schist, quartzite schist Marble intercalations Amphibolite, serpentinite, pillow basalt	
Pt ₁ -Pt ₂		Metamorphic core complex: Garnet schist, marble, muscovite gneiss amphibole gneiss, ultramafic intrusion, serpentine schist	Pb-Zn-Cu Ghuzlu Alam-kandi

شکل ۲ ستون چینه‌شناسی منطقه تکاب که سنگ‌های میزبان ذخایر معدنی اقتصادی را نشان می‌دهد (برگرفته از مراجع [۲۵] با تغییرات).

زمین‌شناسی ناحیه‌ای

کانسار سرب و روی علم‌کندی در منطقه تکاب، شمال غرب ایران قرار دارد. مجموعه دگرگونی تکاب در پهنه سنندج-سیرجان واقع است [۲۹]. فرورائش نفوتتیس در دوره ژوراسیک-ترشیاری موجب شکل‌گیری فعالیت ماگمایی قوسی در پهنه سنندج-سیرجان شده است [۳۰، ۳۱] و انتظار می‌رود که کانی‌سازی در ارتباط با فعالیت ماگمایی در این دوره فعال بوده باشد. تکاب به دلیل داشتن کانسارهای فراگرمایی و همچنین انواع مختلفی از کانسارهای فلزهای پایه شناخته شده است. گزارش‌های متعددی از این منطقه منتشر شده است [۲۰، ۲۸، ۳۲، ۳۳]. واحدهای سنگی در نقشه تکاب شامل سنگ‌های دگرگونی، رسوبی، آتشفشانی و نفوذی هستند که در گستره سنی پرکامبرین تا عهد حاضر قرار دارند [۳۴]. واحدهای دگرگونی تکاب شامل آمفیبولیت، گرانولیت، مرمرها، سنگ‌های آهکی سیلیکاتی، گنیس‌ها و شیست‌ها هستند. به نظر می‌رسد که دگرریختی ساختاری از پرکامبرین تا میوسن

پایانی به طور پیوسته ادامه داشته است [۳۴، ۳۵].

زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه

معدن علم‌کندی در مجموعه دگرگونی تکاب و زیرمجموعه آمفیبولیت‌های علم‌کندی قرار دارد. زمین‌شناسی علم‌کندی تقریباً به طور کامل از آمفیبولیت‌ها، گنیس‌ها و مرمرهای نوپروتروزوئیک-کامبرین تشکیل شده که راستای آنها به سمت شرق است. آمفیبولیت گسترده‌ترین واحد سنگی در منطقه مورد بررسی است؛ واحدهای گنیس، میکاشیست و مرمر به صورت میان لایه‌هایی درون آمفیبولیت تشکیل شده‌اند (شکل ۳). کانی‌سازی بیشتر در لایه‌های مرمری دگرگون‌شده در توالی آتشفشانی-رسوبی پرکامبرین-کامبرین رخ داده است. پهنه‌های گسلی و شکستگی‌ها، کنترل اصلی کانی‌سازی را در این منطقه بر عهده دارند. مجموعه دگرگونی تکاب شامل انواع مختلفی از سنگ‌ها چون آمفیبولیت، میکا شیست، گنیس و مرمر است (شکل ۳) که در ادامه توضیح داده شده‌اند.

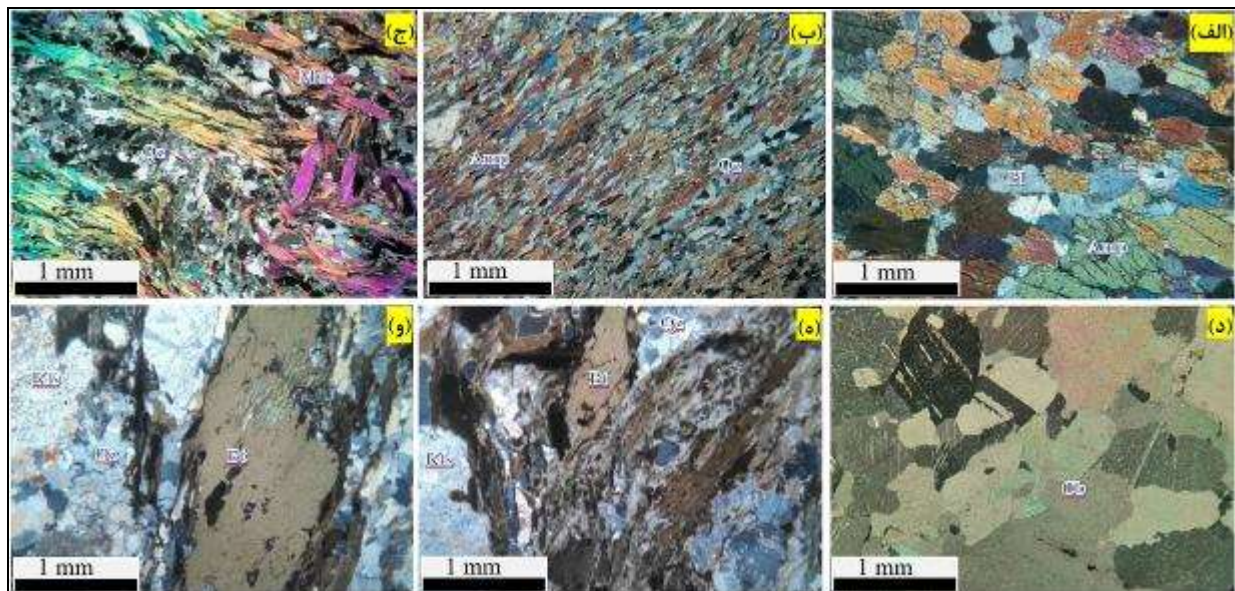


شکل ۳ الف: عکس صحرایی از معدن علم‌کندی (دید به سمت شمال غربی)؛ (ب) موقعیت سنگ مرمر میزبان کانی‌زایی که در سنگ‌های دگرگون‌شده جای دارد (دید به سمت غرب)؛ (پ) عکس برون‌زدگی از آمفیبولیت شیست‌های چین‌خورده در معدن علم‌کندی (ت) نمایی از میان لایه مرمر که بین سنگ‌های آمفیبولیت قرار دارد (دید به سمت شمال غربی).

ماگمایی سنگ مادر و محیط زمین‌ساختی تشکیل سنگ آذرین اولیه پی برد.

میکا شیست و گنیس: میکا شیست و گنیس نتیجه تبلور نوارهای روشن و تیره هستند که نشان‌دهنده نواربندی گنیسی است. بافت بخش‌های روشن دانه‌شکفتی و بافت سنگ در بخش‌های تیره ورقه‌شکفتی است. کانی‌های اصلی در نوارهای روشن این واحد شامل کوارتز و فلدسپار قلیایی با بافت موزائیکی هستند و نوارهای تیره از موسکوویت و گاهی بیوتیت تشکیل شده‌اند. سایر کانی‌های موجود در این واحد شامل سریسیت، کلسیت و کانی‌های کدر هستند. کانی‌های کدر همراه با موسکوویت تشکیل شده‌اند. این واحد سنگی در اثر فشارهای زمین‌ساختی به صورت میکروسکوپی و ماکروسکوپی چین‌خورده است (شکل ۴ پ). گاهی کانی‌های تشکیل‌دهنده گنیس طی جدایش مکانیکی میلونیتی شده‌اند (شکل‌های ث و ج). در گنیس میلونیتی، فلدسپارها اغلب به صورت بلورهای درشت وجود دارند که به دلیل بازتبلور در راستای عمود بر بالاترین تنش، به شکل عدسی تغییر یافته و بافت چشمی ایجاد کرده‌اند.

آمفیبولیت: آمفیبولیت عمده‌ترین سنگ دگرگونی در منطقه مورد بررسی است. بر اساس نوع کانی‌ها، آمفیبولیت را می‌توان به چندین نوع تقسیم کرد. حاجی علی اوغلی و همکاران [۳۳] آمفیبولیت‌های علم‌کندی را به چهار نوع تقسیم کرده‌اند: (۱) آمفیبولیت عادی، (۲) اپیدوت آمفیبولیت، (۳) اپیدوت-بیوتیت آمفیبولیت و (۴) گارنت آمفیبولیت. البته، در اینجا فقط یک نمای کلی از واحد آمفیبولیت ارائه شده است. آمفیبولیت‌ها در رخنمون صحرایی، نمونه دستی و در مقیاس میکروسکوپی برگرارگی نشان می‌دهند و بافت‌های دانه‌شکفتی و نخ‌شکفتی دارند. کانی‌های اصلی شامل آمفیبول، کوارتز، فلدسپار قلیایی و پلاژیوکلاز هستند (شکل ۴ الف). کانی‌های کدر به صورت نیمه‌خودشکل و بی‌شکل تشکیل شده‌اند. کانی‌های دگرسانی شامل اپیدوت، اکتینولیت، ترمولیت، کربنات، کلریت و کوارتز هستند. آمفیبولیت گاهی دارای بافت شیستی است و در اثر فرآیندهای زمین‌ساختی دچار چین‌خوردگی شده است (شکل ۴ ب). رگچه‌های کوارتز و کوارتز-باریت که دربردارنده کانی‌سازی سرب-روی، این واحد آمفیبولیت را قطع کرده‌اند. با بررسی شیمی آمفیبولیت، می‌توان به ماهیت و پیوند فعالیت



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی واحدهای سنگی دگرگونی از معدن سرب-روی علم‌کندی (نور قطبیده): الف) بلورهای پلاژیوکلاز (Pl) و کوارتز (Qz) همراه با آمفیبول سوزنی (Amp) در آمفیبولیت دانه‌شکفتی، ب) بافت نخ‌شکفتی در آمفیبولیت، پ) تشکیل کانی‌های کدر در راستای شیستوارگی همراه با موسکوویت (Mus) با بافت ورقه‌شکفتی و کوارتز در میکاشیست، ت) تشکیل کانی‌های کربناتی (Cb) با بافت دانه‌شکفتی در میان‌لایه مرمری، ث، ج) نوار تیره بیوتیت (Bt) و نوار روشن کوارتز-فلدسپار با دگرسانی فلدسپارهای پتاسیم (Kfs) به کربنات و سریسیت و ایجاد بافت غربالی در گنیس میلونیتی. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و ایوانس [۳۶] هستند.

مرمر: مرمر به صورت نوارهایی با ضخامت تا چند ده متر دیده می‌شود. این واحد سنگی از نظر کانی‌سازی در منطقه علم‌کندی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا کنترل‌کننده اصلی و میزبان کانی‌سازی سرب و روی است و پهنه‌های کانه‌دار مرمرها، در اثر سیال‌های گرمایی و جوی به اکسید و هیدراکسیدهای آهن آغشته شده‌اند. بافت غالب این واحد سنگی دانه شکفتی است. بلورهای خودشکل تا بی‌شکل دولومیت و کلسیت بخش عمده‌ای از این واحد سنگی را اشغال کرده‌اند. بلورهای کلسیت و دولومیت به دلیل بازتبلور طی فرآیند دگرگونی تشکیل شده‌اند. دولومیت به صورت بلورهایی با دوقلویی چندریخت و مشبک دیده می‌شود (شکل ۴ ت). کانی‌های تشکیل‌دهنده این واحد گاهی بیشتر در راستای عمود بر فشار بیشینه رشد کرده‌اند، به طوری که آثار کشیدگی و شیستوارگی در سنگ دیده می‌شود. در برخی بخش‌ها، به دلیل اثر فرآیندهای گرمایی، کوارتز به عنوان کانی ثانویه بیشترین فراوانی را دارد و گاهی به صورت رگچه‌هایی همراه با تیغه‌های باریت تشکیل شده است. این واحد در بخش‌هایی که در معرض فرآیندهای گرمایی قرار گرفته، به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز آغشته شده است. همچنین، کربناتی‌های غنی از آهن، از جمله سیدریت، تشکیل شده‌اند.

سنگ‌شناسی پهنه کانه‌دار

زیر پهنه تکاب- ماهنشان بیشتر از سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای پرکامبرین و پالئوزوئیک (شامل انواع مختلف شیست‌ها، آمفیبولیت، گنیس و مرمر) تشکیل شده است که به‌طور محلی گرانودیوریت‌های مزوزوئیک (تریاس میانی-پایانی) در این واحدها نفوذ کرده‌اند [۳۷، ۳۸]. این رویداد بیشتر باعث ایجاد هاله دگرگونی مجاورتی، به‌ویژه در واحدهای مرمری شده که به‌طور محلی با کانی‌سازی آهن (برای مثال، علم‌کندی و قینرجه) و سرب- روی (برای مثال، قره‌داش) همراه است. بر اساس بررسی‌های صحرایی، توده نفوذی گرانودیوریتی در منطقه رخنمون دارد. رخنمون اصلی گرانودیوریت را می‌توان در شرق روستای علم‌کندی دیده و کانی‌سازی اسکارن آهن در کنار آن شکل گرفته است. توده‌ی دیگری در بخش جنوب غربی گستره سرب و روی علم‌کندی و با فاصله‌ی هوایی حدود ۵

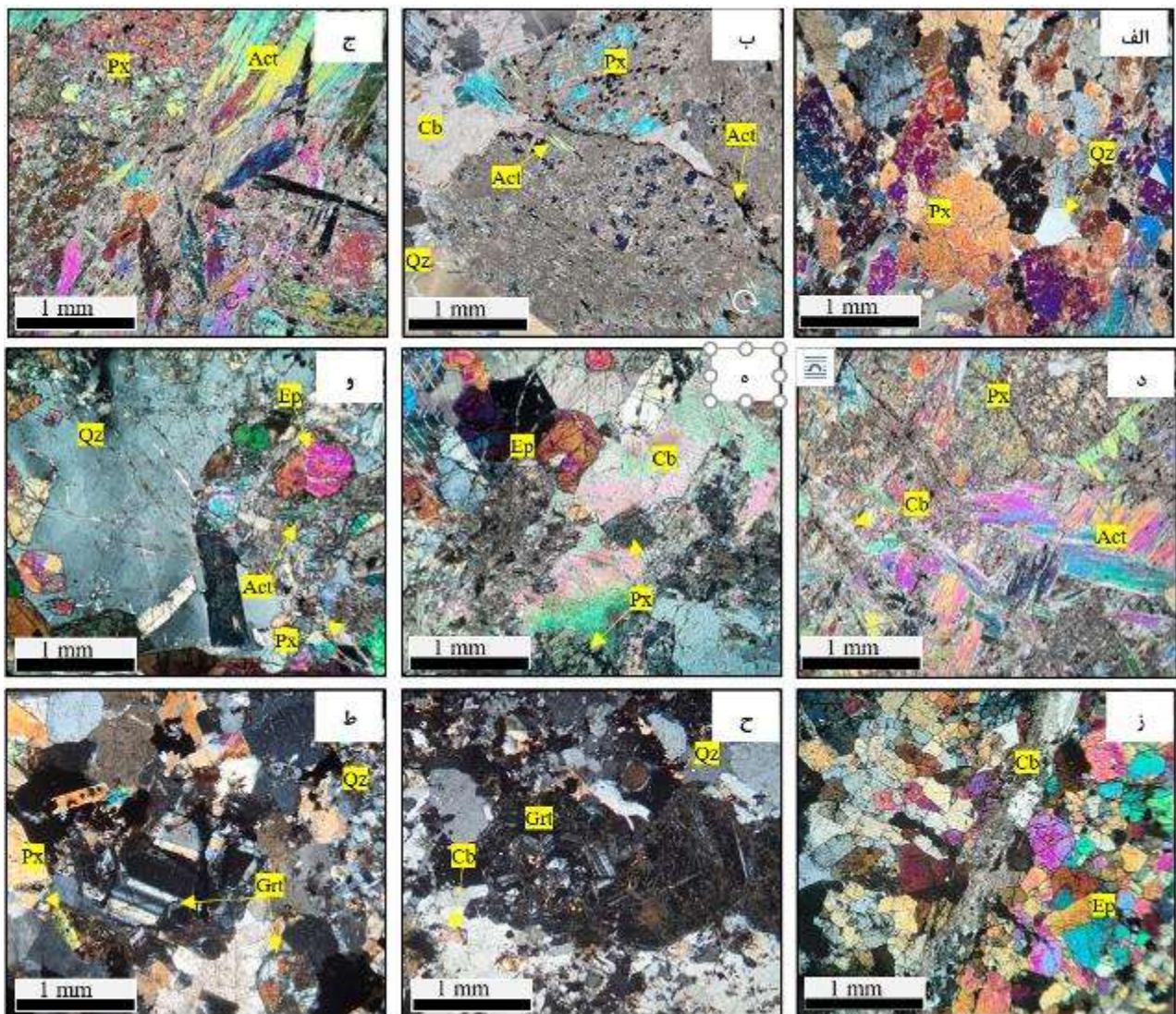
کیلومتر در معدن آهن اسکارنی قینرجه (دامنه کوه بلقیس) رخنمون دارد. در گستره معدن سرب و روی علم‌کندی، زائده گرانودیوریتی به درون آمفیبولیت نفوذ کرده است (شکل ۵ الف). کانی‌های اصلی در زائده گرانودیوریتی شامل پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، آمفیبول و کوارتز هستند و این کانی‌ها بافت دانه‌ای ایجاد کرده‌اند (شکل ۵ ب). آمفیبولیت بافت دانه شکفتی و نخ‌شکفتی نشان می‌دهد (شکل‌های ۵ پ، ت). کانی‌های معدنی اصلی شامل مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت هستند که با بافت پراکنده در زائده گرانودیوریتی تشکیل شده‌اند (شکل ۵ ث، ج و چ).

بر اساس بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی، شواهد دگرگونی مجاورتی در سنگ‌های میزبان دگرگونی کانی‌سازی شده دیده می‌شود. این شواهد بیشتر در پهنه‌های گسلی و در لبه‌ی رگه‌های سیلیسی کانه‌دار با دمای بالا ظاهر شده‌اند. در اثر نفوذ سیال‌های برآمده از توده نفوذی در پهنه‌های گسلی، آمفیبولیت‌ها و مرمرها دگرنهاده شده‌اند و کانی‌های پیروکسن، اکتینولیت، اپیدوت و مقدار محدودی گارنت با بافت دانه شکفتی تشکیل شده‌اند. کوارتز و کربناتیا در فضای بین بلورهای اپیدوت و پیروکسن و همچنین در شکستگی‌های بلورهای پیروکسن قرار دارند (شکل ۶ الف). در شکستگی‌های پیروکسن و اپیدوت، کانی‌های کربناتی و کلریت تشکیل شده‌اند. در این واحدها، شکستگی‌هایی وجود دارند که با کانی‌های کربناتی پر شده و کانی‌های کدر با بلورهای ریز و بی‌شکل به صورت پراکنده در زمینه سنگ متبلور شده‌اند (شکل ۶ ب). پیروکسن‌ها اغلب به ترمولیت و اکتینولیت تبدیل شده (شکل-های ۶ پ و ت) و در زمینه و فضای بین بلورهای پیروکسن، اپیدوت و گارنت، کانی‌های کربناتی تشکیل شده‌اند (شکل ۶ ث). در بخش‌هایی نیز، در زمینه و فضای بین بلورهای اپیدوت و پیروکسن، کانی کوارتز متبلور شده (شکل ۶ ج) و همچنین رگچه‌های کربناتی به همراه کوارتز زمینه شامل اپیدوت را قطع کرده‌اند. در برخی از رگه‌های سیلیسی، کوارتز به همراه گارنت ناهمسانگرد با مقدار کمی پیروکسن و کربنات دیده می‌شود و دارای بافت دانه شکفتی است. در شکستگی‌های گارنت، کربناتیا و کلریت تشکیل شده‌اند. در این بخش از کانسنگ،

شکستگی‌هایی وجود دارند که درون آنها کانی‌های کربناتی متبلور شده‌اند. کانی‌های کدر ریز و نیمه‌خودشکل به صورت پراکنده در سنگ دیده می‌شوند (شکل‌های ۶ ح، خ). کانی-سازی اصلی در این پهنه شامل گالن و همی‌مورفیت هستند



شکل ۵ تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از زائده گرانودیوریتی، الف) موقعیت زائده گرانودیوریتی که به درون سنگ‌های دگرگونی نفوذ کرده است (دید به سمت غرب، ب) پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، آمفیبول، کوارتز و کانی‌های کدر با بافت دانه‌ای در زائده گرانودیوریتی (نور قطبیده)؛ پ) بافت نخ شکفتی در آمفیبولیت، ت) بافت دانه شکفتی در آمفیبولیت، ث) پیریت دانه پراکنده با میانبارهای کالکوپیریت در زائده گرانودیوریتی، ج) مگنتیت و پیریت دانه پراکنده، چ) مگنتیت دانه پراکنده.



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های اسکارنی معدن سرب- روی علم‌کندی (نور قطبیده). الف) بلورهای خودشکل پیروکسن (Px) همراه با کوارتز (Qz) و کربنات گرمابی در پیروکسن هورنفلس، ب) بلورهای پیروکسن با بافت دانه شکستی و کانی‌های کدر پراکنده در پیروکسن هورنفلس، پ) بلورهای خودشکل پیروکسن درون کربنات پیروکسن- اکتینولیت هورنفلس؛ ت) دگرسانی بلورهای پیروکسن به بلورهای سوزنی ترمولیت و اکتینولیت (Act) و کربناتیا (Cb) در پیروکسن- اکتینولیت هورنفلس، ث) تشکیل اپیدوت (Ep) به همراه پیروکسن در زمینه کربناتی بلورین در اپیدوت- پیروکسن هورنفلس؛ ج) تشکیل اپیدوت به همراه کوارتز در اپیدوت هورنفلس؛ چ) تشکیل کوارتز به همراه کربنات با بافت رگچه‌ای در زمینه شامل اپیدوت با بافت دانه شکستی؛ ح، خ) تشکیل بلورهای شکل‌دار گارنت (Grt) به همراه کوارتز، کربنات و پیروکسن؛ (نور عبوری XPL).

کانی‌سازی

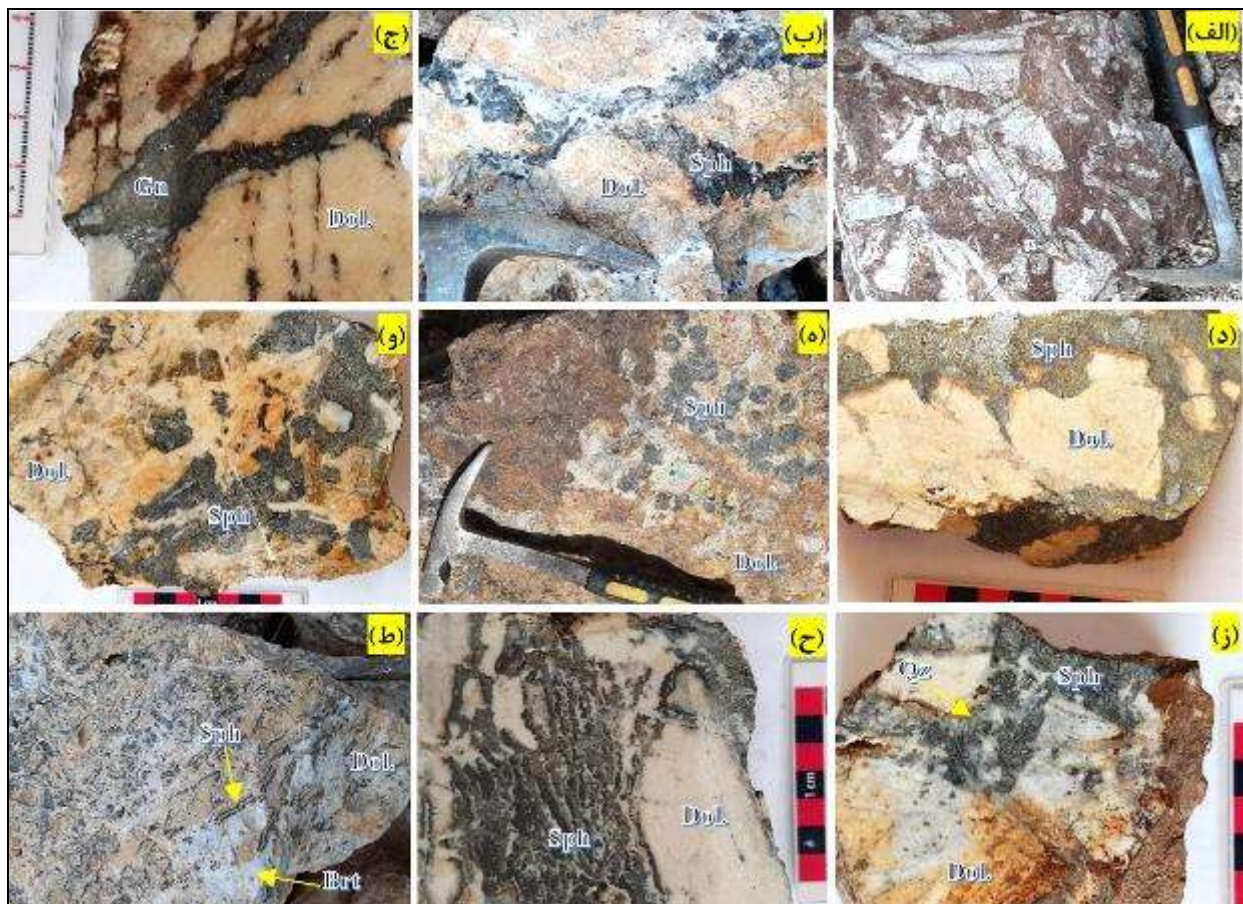
و کمی کالکوپیریت به همراه تتراهدریت هستند. به‌جز کانی‌سازی پینه‌گران، نفوذ توده‌های نفوذی در برخی مناطق از جمله علم‌کندی اغلب منجر به دگرگونی مجاورتی در بخش‌های مرمری توالی دگرگونی ناحیه‌ای شده و منطبق با کانی‌سازی سرب- روی است. میزبان اصلی کانی‌سازی واحد مرمر است. بر اساس شواهد صحرایی و نمونه‌های دستی، کانی‌سازی به صورت رگچه‌ای، دانه‌پراکنده، برشی و نواری رخ داده است (شکل ۷).

بر اساس بررسی‌های قزوینی‌زاده در معدن علم‌کندی [۱۰]، کانی‌سازی از نوع MVT و شامل اسفالریت، گالن، پیریت و کمی کالکوپیریت با دگرسانی شاخص دولومیتی‌شدن، سیلیسی‌شدن و پیریتی‌شدن گزارش شده و کانه‌زایی محدود به سنگ کربناتی معرفی شده است. براساس بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی، کانی‌ها شامل اسفالریت، گالن، پیریت

همی‌مورفیت جایگزین می‌شود. این کانه در برخی بخش‌ها دربردارنده میانبارهای گالن است. در شکستگی‌های اسفالریت، پیریت و گالن تشکیل شده‌اند. در بعضی نمونه‌ها، اسفالریت و گالن دارای مرز تعادلی با اسفالریت هستند و همزمان تشکیل شده‌اند. در بخش‌هایی از کانسنگ، اسفالریت دارای منطقه‌بندی است. فراوانی گالن از اسفالریت کمتر است. گالن در لبه کالکوپیریت تشکیل شده است. میانبارهای کالکوپیریت و پیریت در درون گالن تشکیل شده‌اند. این کانی با پیریت، اسفالریت و کالکوپیریت هم‌رشدی دارد. گالن از لبه و رخ‌ها در حال جانشینی با کانی‌های ثانویه از جمله سروریت است.

کانی‌سازی برشی را می‌توان به انواع مختلفی از جمله تشکیل گالن، اسفالریت، کالکوپیریت با بافت رگچه‌ای و تشکیل اسفالریت دانه‌پراکنده به همراه پیریت و گالن در رگچه‌های کوارتز در فضای بین قطعه‌های برشی‌شده مرم‌ر دولومیتی رده-بندی کرد (شکل ۷).

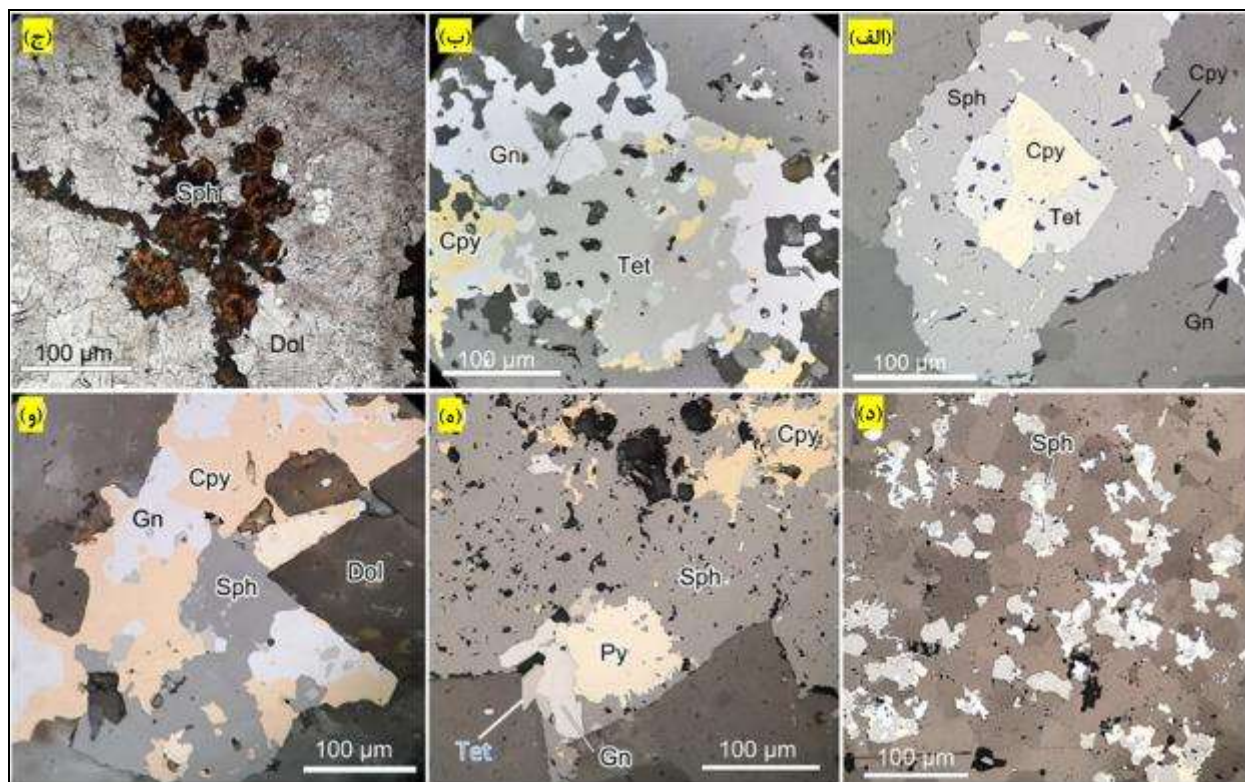
کانی‌های ثانویه شامل سریسیت، اسمیت‌زونیت، کوولیت، کالکوسیت، گوتیت، آزوریت و مالاکیت هستند. کانی‌های باطله اصلی شامل کلسیت، دولومیت، کوارتز، اپیدوت، پیروکسن، ترمولیت، اکتینولیت، گارنت، کلریت، رس و فلدسپار هستند. اسفالریت فراوان‌ترین کانه در علم‌کندی است. اسفالریت اغلب از لبه‌ها و شکستگی‌ها با کانی‌های ثانویه از جمله اسمیت‌زونیت و



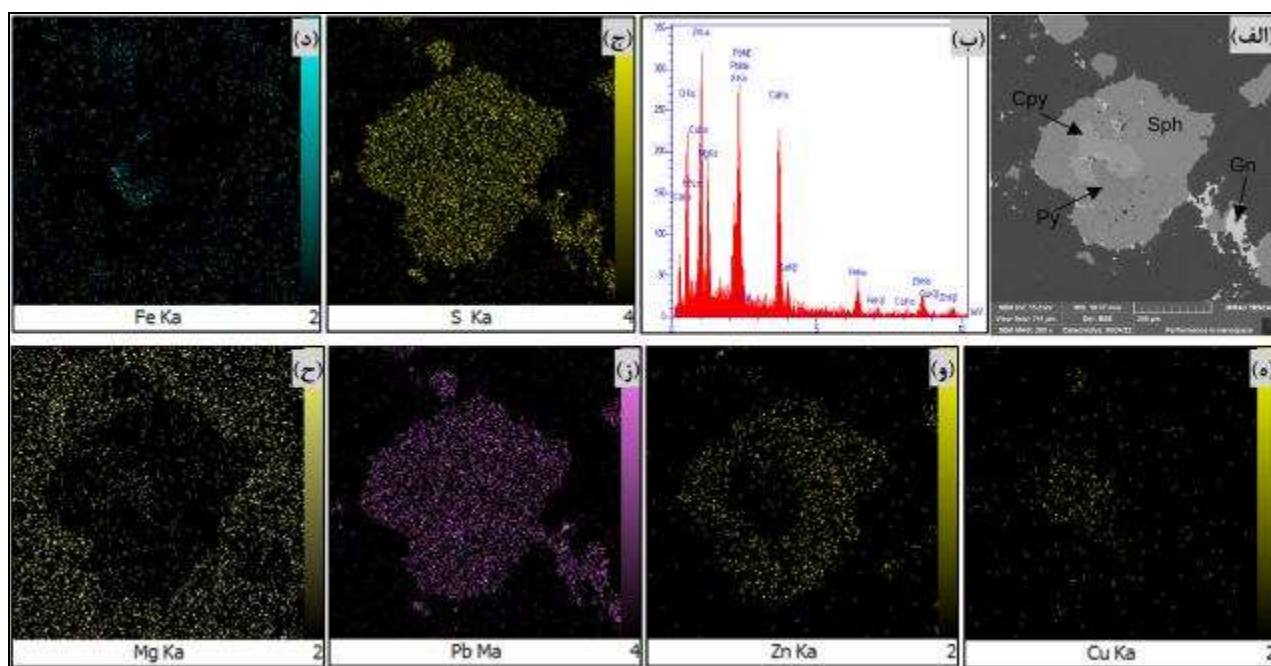
شکل ۷ عکس‌های نمونه دستی از کانی‌سازی اسفالریت (Sph) و گالن (Gn) در سنگ میزبان دولومیت (Dol) مرم‌ری معدن سرب و روی علم‌کندی. الف- بافت برشی در دولومیت مرم‌ری با سیمان کربنات آغشته به هیدرواکسید آهن و سیدریتی، ب) تشکیل اسفالریت در شکستگی‌ها و فضای بین قطعه‌های برشی کربناتی، پ) تشکیل گالن در شکستگی‌ها و فضای بین قطعه‌های برشی کربناتی، ت) تشکیل اسفالریت به صورت سیمان بین قطعه‌های برشی، ث- تشکیل اسفالریت با بافت دانه پراکنده در زمینه کربناتی، ج- تشکیل اسفالریت به همراه رگه‌های سیلیسی در زمینه کربناتی، ح- تشکیل اسفالریت با بافت نواری و گل کلمی در زمینه کربناتی.

کالکوپیریت کمتر از ۲۰ میکرومتر است. کالکوپیریت همچنین به صورت دانه پراکنده همراه با گالن و اسفالریت تشکیل شده است و فراوانی کمتری از آنها دارد. تتراهدریت تنها کانی سولفوسالتی گزارش‌شده در این کانسار است. تتراهدریت، کالکوپیریت و گالن به صورت میانبار در اسفالریت تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۸، ۹، ۱۰). در معدن علم‌کندی، شکستگی‌های ناشی از گسل‌ها به عنوان مسیر عبور و مجرای سیال‌های گرمایی دربردارنده کانی‌ها عمل کرده‌اند. بر اساس شواهد موجود، می‌توان گفت که فعالیت زمین‌ساختی پس از کانی‌سازی ادامه داشته است. زمین ساخت بر برخی از کانی‌ها، از جمله گالن و پیریت، اثر گذاشته و موجب شکسته شدن و برشی شدن آن‌ها شده است. همچنین باعث دگرشکلی گالن‌ها شده است.

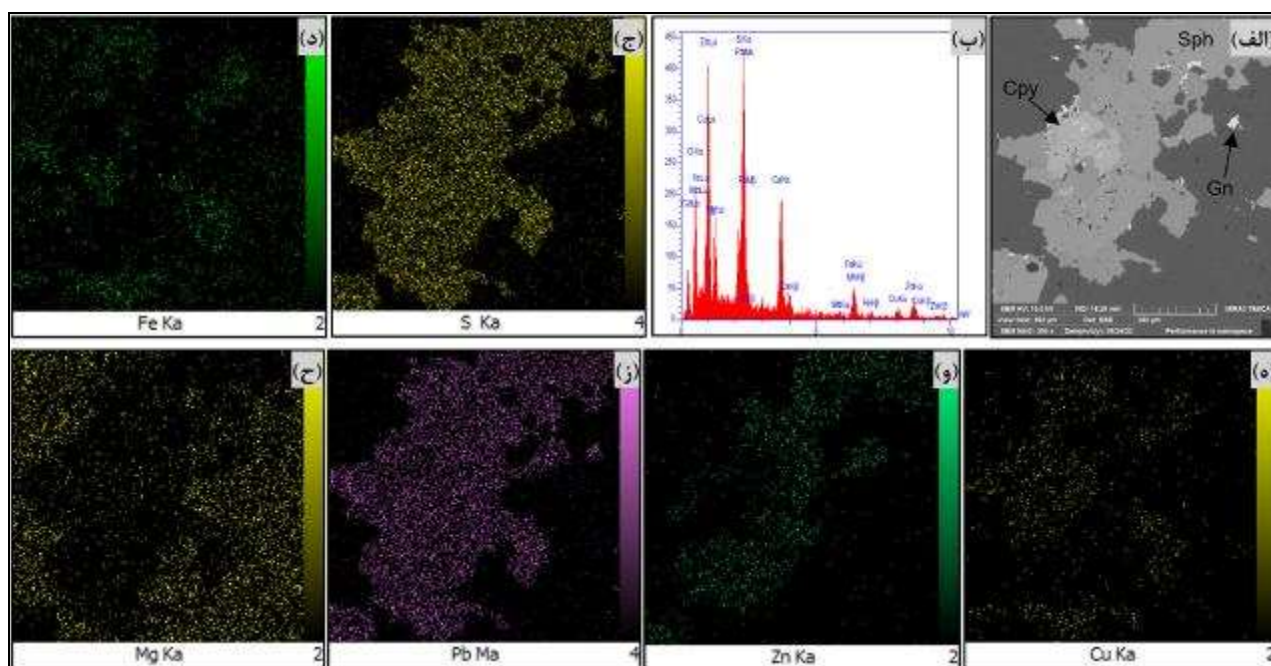
پیریت فراوانی کمتری نسبت به اسفالریت و گالن دارد. گاهی پیریت همزمان با اسفالریت و گالن تشکیل شده است. دست کم سه نسل پیریت قابل تشخیص است. نسل اول پیریت‌ها پیش از کانه‌زایی سرب و روی و به صورت دانه پراکنده در سنگ مرمر تشکیل شده است. نسل دوم به صورت دانه پراکنده و همزمان با اسفالریت و گالن تشکیل شده است. نسل سوم به صورت رگچه‌ای در شکستگی‌های اسفالریت شکل گرفته است. پیریت اغلب از لبه و شکستگی‌ها با گوتیت جانشین شده است. کالکوپیریت به صورت رگچه‌ای تشکیل شده و فضای خالی بین بلورهای خودشکل کوارتز را پر کرده است. پیریت از لبه و شکستگی‌ها، به کانی‌های ثانویه چون کالکوسیت، گوتیت، آزوریت و ملاکیت دگرسان شده است. این کانی به صورت میانبار در درون گالن نیز تشکیل شده است. اندازه میانبارهای



شکل ۸ تصاویر میکروسکوپی با نور بازتابی از کانی‌های سولفیدی در معدن علم‌کندی: الف) میانبارهای کالکوپیریت (Cpy) و تتراهدریت (Tet) با بافت ساعت شنی در اسفالریت (Sph)؛ ب) هم‌رشدی کالکوپیریت (Cpy)، گالن (Gn) و تتراهدریت (Tet) درون اسفالریت، پ) اسفالریت (Sph) در زمینه دولومیت (Dol) مرمری (در نور عبوری)، ت) کانه‌های افشان شامل اسفالریت (Sph)، کالکوپیریت (Cpy) و گالن (Gn) در سنگ میزبان دولومیت مرمری؛ ث) اسفالریت (Sph) که کانه‌های تتراهدریت، پیریت، گالن و کالکوپیریت را دربرگرفته است، ج) کالکوپیریت (Cpy)، پیریت، گالن (Gn) و اسفالریت (Sph) در سنگ میزبان کربناتی معدن علم‌کندی.



شکل ۹ الف- تصویر SEM/BSE که کانی‌های گالن (Gn)، اسفالریت (Sph)، پیریت (Py) و کالکوپیریت (Cpy) را نشان می‌دهد؛ ب- طیف EDX که ترکیب کانی‌ها را ارائه می‌دهد؛ پ تا ح: نقشه‌برداری عنصری با میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM/BSE) که توزیع عناصر (پ) گوگرد، (ت) آهن، (ث) مس، (ج) روی، (چ) سرب و (ح) منیزیم را در کانی‌های گالن، اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت نشان می‌دهد.

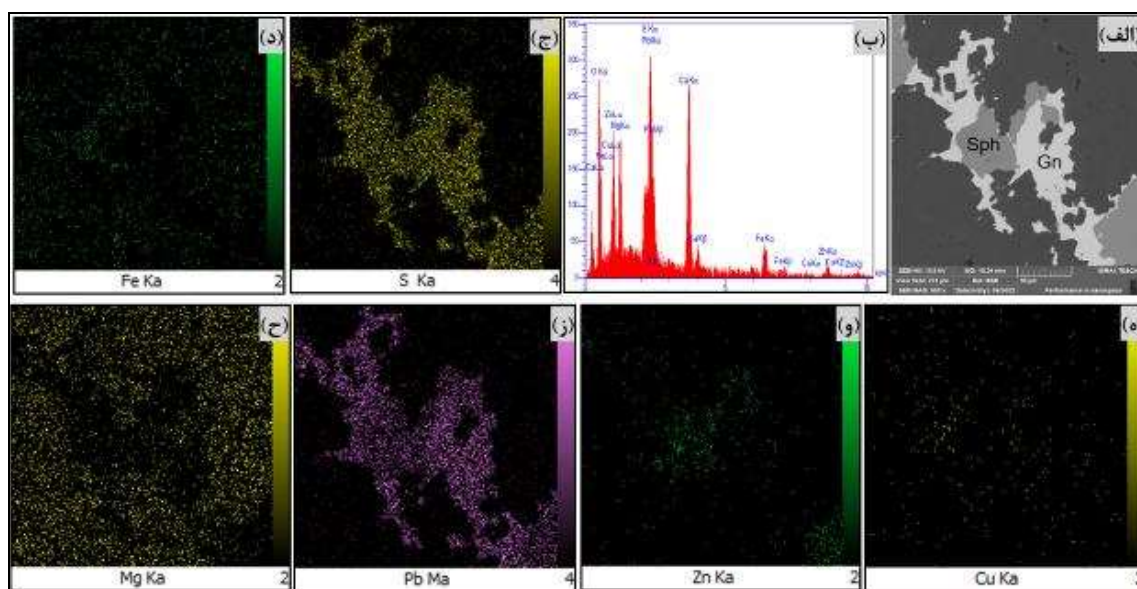


شکل ۱۰ الف- تصویر SEM/BSE که بافت خودشکل گالن (Gn)، اسفالریت (Sph) و کالکوپیریت (Cpy) را نشان می‌دهد؛ ب- طیف EDX که ترکیب کانی‌ها را ارائه می‌دهد؛ پ تا ح: نقشه‌برداری عنصری TEM/BSE که توزیع عناصر (پ) گوگرد، (ت) آهن، (ث) مس، (ج) روی، (چ) سرب و (ح) منیزیم را در کانی‌های گالن، اسفالریت و کالکوپیریت نشان می‌دهد.

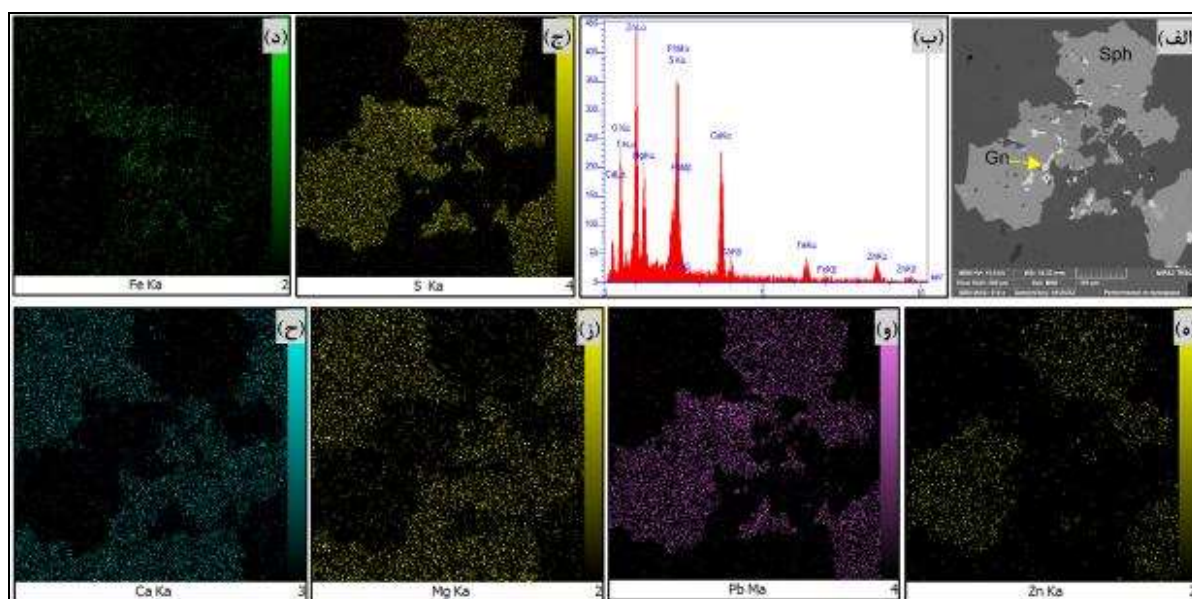
زمین‌شیمی و شیمی کانی‌ها

نتایج بررسی‌های میکروسکوپی با الکترون‌های پس پراکنده، (SEM/BSE) و ریزپردازش الکترونی نشان داد که کانی‌های تتراهدریت در لبه کانی‌های کالکوپیریت و گالن تشکیل شده‌اند و مجموعه کانی‌های کالکوپیریت، گالن و تتراهدریت به صورت

میانبار در اسفالریت حضور دارند (شکل ۸). از این رو، تتراهدریت با کانی‌های سولفیدی هم‌رشدی دارد. بررسی‌های نقشه‌برداری عنصری SEM/BSE توزیع عناصر Cu, Fe, S, Pb, Zn, و Mg را در کانی‌های اسفالریت، گالن، پیریت و کالکوپیریت نشان می‌دهد (شکل‌های ۹ تا ۱۲).



شکل ۱۱ الف- تصویر SEM/BSE که کانی‌های گالن (Gn)، اسفالریت (Sph) و کالکوپیریت (Cpy) را نشان می‌دهد؛ ب- طیف EDX ترکیب کانی‌ها را ارائه می‌دهد؛ پ تا ج: نقشه‌برداری عنصری TEM/BSE که توزیع عناصر (پ) گوگرد، (ت) آهن، (ث) مس، (ج) روی، (چ) سرب و (ح) منیزیم را در کانی‌های گالن، اسفالریت و کالکوپیریت نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ الف- تصویر SEM/BSE که بافت نیمه‌شکل گالن (Gn) و اسفالریت (Sph) را نشان می‌دهد؛ ب- طیف EDX که ترکیب کانی‌ها را ارائه می‌دهد؛ پ تا ج: نقشه‌برداری عنصری TEM/BSE که توزیع عناصر (پ) گوگرد، (ت) آهن، (ث) روی، (ج) سرب، (چ) منیزیم و (ح) کلسیم را در کانی‌های گالن و اسفالریت نشان می‌دهد.

زیاد در مقادیر عناصر به ویژه Fe در اسفالریت می‌تواند حضور نسل‌های مختلف اسفالریت از جمله اسفالریت دما پایین به همراه اسفالریت دما بالا باشد که با بررسی های سیال های درگیر تأیید می‌شود. مقدار کالکوپیریت میزبان Pb و Zn به ترتیب تا ۰/۰۶ و ۰/۰۵ درصد وزنی است. نقره در کالکوپیریت فراوانی ناچیزی دارد. پیریت و تتراهدریت نسبت به سایر کانی‌ها از Co غنی‌تر هستند، اما مقدار کبالت در این دو کانی نیز بسیار کم است. غلظت نیکل در پیریت ۰/۰۶ درصد وزنی است. نتایج تجزیه تتراهدریت نشان می‌دهد که این کانی غنی از نقره و روی است. غلظت نقره در تتراهدریت بین ۹/۹ تا ۱۰/۸ درصد وزنی متغیر است. میانگین مقدار آنتیموان حدود ۲۸/۳ درصد وزنی است. بیشترین مقدار As حدود ۰/۲ درصد وزنی است.

داده‌های تجزیه به روش ریزپردازش الکترونی برای عناصر کمیاب در سولفیدهای فلزهای پایه (گالن، اسفالریت، کالکوپیریت و پیریت) و تتراهدریت به صورت کمینه، بیشینه و میانگین در جدول ۱ ارائه شده است. غلظت نقره در گالن به ۰/۲۹ درصد وزنی می‌رسد که بالاترین مقدار در مقایسه با سایر عناصر اندازه‌گیری شده است. مقدار مس در بیشتر نقاط تجزیه درون گالن، زیر حد تشخیص ۰/۰۴ درصد وزنی است. به جز در سه نقطه، قلع در ساختار گالن قابل تشخیص نیست و در این سه نقطه نیز بسیار کم است. سایر عناصر چون Fe، As، Sb، Zn، Ni و Co نیز در گالن اهمیت زیادی ندارند. غلظت نقره در اسفالریت بسیار متغیر و کم است. آهن در اسفالریت تا حدود ۰/۷ درصد وزنی حضور دارد. مقدار آنتیموان در اسفالریت از زیر حد تشخیص تا ۱/۲ درصد وزنی متغیر است. بیشترین مقدار مس در اسفالریت ۱/۱ درصد وزنی است. دلیل تفاوت‌های

جدول ۱ غلظت عناصر کمیاب در کانی‌های سولفیدی (گالن، اسفالریت و کالکوپیریت) و سولفوسالت (تتراهدریت) که به روش EPMA (برحسب درصد وزنی) در معدن علم‌کندی تعیین شده است. (ND: اندازه‌گیری نشده).

a. Galena										
	Ag %	As %	Co %	Cu %	Fe %	Ni %	Pb %	S %	Sb %	Zn %
Min	۰/۰۶۳	ND	ND	ND	ND	ND	۸۵/۲۰۸	۱۳/۲۹۸	ND	ND
Max	۰/۲۹۶	۰/۰۰۸	۰/۰۱۴	۰/۰۴۱	۰/۱۴۸	۰/۰۱۱	۸۶/۳۴۱۱	۱۳/۶۶۸	۰/۱۰۶	۰/۰۳۲
Ave	۰/۱۸۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۶	۰/۰۱۴	۰/۰۳۱	۰/۰۰۵	۸۵/۷۸۷	۱۳/۴۹۵	۰/۰۴۲	۰/۰۱۹
b. Sphalerite										
Min	ND	ND	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶	۰/۰۷۵	ND	ND	۳۲/۴۵۴	ND	۶۳/۷۲۹۳
Max	۰/۴۰۱	۰/۰۷۹	۰/۰۱۷	۱/۱۲۹	۰/۶۸۵	۰/۰۱۱	۰/۲۱۹	۳۳/۰۰۷	۱/۱۸۳	۶۶/۲۷۳
Ave	۰/۱۴۴	۰/۰۲۶	۰/۰۰۸	۰/۳۰۳	۰/۳۴۹	۰/۰۰۵	۰/۱۰۴	۳۲/۷۶۶	۰/۴۰۳	۶۵/۵۷۶
c. Chalcopyrite										
Min	ND	ND	ND	۳۴/۱۹۵	۳۰/۰۹۳	ND	ND	۳۴/۶۳۱	ND	۰/۰۱۸
Max	۰/۰۲۷	۰/۰۱۷	۰/۰۰۴	۳۴/۵۲۶	۳۰/۶۴۷	۰/۰۰۴	۰/۰۶۱	۳۵/۱۲۷	۰/۰۰۱	۰/۰۵۱
Ave	۰/۰۱۸	۰/۰۱۶	۰/۰۰۲	۳۴/۳۲۷	۳۰/۲۸۱	۰/۰۰۳	۰/۰۳۵	۳۴/۸۳۷	۰/۰۰۰	۰/۰۳۶
d. Pyrite										
	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۸۴	۰/۰۲۶۲	۰/۰۲۳۶	۴۷/۲۱۹	۰/۰۶۴	ND	۵۳/۶۹۱۸	۰/۰۰۰۷	۰/۰۳۶۳
e. Tetrahedrite										
Min	۹/۹۱۳	۰/۱۴۶	۰/۰۱۱	۲۹/۲۷۵	۰/۷۶۹	ND	ND	۲۳/۴۹۱	۲۸/۰۳۸	۶/۰۵۵
Max	۱۰/۷۷۰	۰/۱۹۲	۰/۰۳۳	۲۹/۴۳۹	۰/۹۵۱	۰/۰۰۱	۰/۱۴۷	۲۳/۶۵۱	۲۸/۲۹۱	۶/۲۵۷
Ave	۱۰/۴۴۶	۰/۱۶۵	۰/۰۲۳	۲۹/۳۴۷	۰/۸۸۷	۰	۰/۰۴۹	۲۳/۲۸۹	۲۸/۱۴۳	۶/۱۷۲

دگرسانی

دگرسانی سنگ میزبان معدن علم‌کندی بیشتر شامل کربنات-زدایی، اسکارنی (چون پیروکسن، اپیدوت، گارنت، ترمولیت و اکتینولیت)، دگرسانی پیریتی، سیلیسی، کربناتی و اکسید آهنی است. کربنات‌زدایی به دلیل انحلال کلسیت در مرمها توسط سیال‌های گرمابی رخ داده که نقش مهمی در ایجاد فضاهای خالی و افزایش نفوذپذیری داشته است [۳۹]. پس از این دگرسانی، اسکارن تشکیل شده است. بر اساس بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی، سیلیسی‌شدن و کانی‌های اسکارنی در این معدن رخ داده اند. اسکارن‌های بی‌آب بیشتر شامل پیروکسن و کمی گارنت هستند. اسکارن‌های آب‌دار به‌طور کلی از اپیدوت، ترمولیت، اکتینولیت و کلریت تشکیل شده‌اند که از دگرسانی گارنت و پیروکسن به وجود آمده‌اند. دگرسانی کربناتی نتیجه دگرسانی گارنت و پیروکسن به کلسیت و همچنین ته‌نشست کربناتیای انحلال یافته در سیال‌های گرمابی است. کانی‌های کلسیت در فضای بین اپیدوت و همچنین به صورت رگچه دیده می‌شوند. دگرسانی سیلیسی به صورت رگچه‌های سیلیسی-سولفیدی حضور دارد. رگه و رگچه‌های کربناتی و سیلیسی سنگ میزبان مرمی و اسکارن را قطع کرده‌اند و نسبت به آن‌ها جوان‌تر هستند. دگرسانی دما پایین شامل مجموعه کانی‌های کلسیت-سیلیس-کلریت-کانی‌های رسی است. اکسید و هیدراکسیدهای آهن از هوازدگی کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت و کالکوپیریت و به صورت گسترده در سنگ‌های کربناتی ایجاد شده اند. جدا شدن فاز سیال از توده نفوذی و مهاجرت این سیال به سمت سنگ‌های میزبان، باعث تحرک و جابجایی عناصر بین دو شیب شیمیایی و دمایی مختلف و در پایان رخداد واکنش‌های مناسب می‌شود. در این مرحله، واکنش‌های کربنات‌زدایی رخ داده و حجم فضاهای خالی سنگ میزبان افزایش می‌یابد. این واکنش‌ها همراه با شکستگی‌های زمین‌ساختی، مسیرهای عبوری برای سیال‌ها فراهم می‌کنند تا به درون سنگ میزبان نفوذ کنند. سیال‌های ماگمایی با دمای حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد باعث تشکیل اسکارن بی‌آب می‌شوند [۴۰]. در معدن علم‌کندی، کربنات‌زدایی واحد مرم و تحرک عناصر و ورود Fe ، SiO_2 و Mg به درون فضاهای خالی آن، منجر به کانی‌های آهکی-سیلیکاتی بی‌آب گارنت و پیروکسن در مرم و تشکیل اسکارنوتید شده است. با ورود سیال‌های گرمابی دما پایین‌تر و

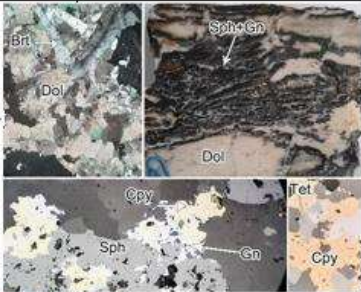
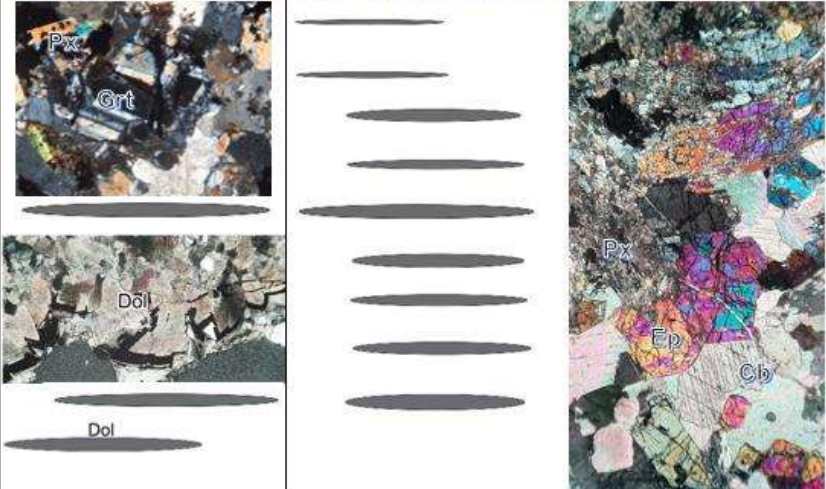
جذب آب و کربن و نیز ایجاد سولفیدها در ریزشکستگی‌های کانی‌های آهکی سیلیکاتی بی‌آب تشکیل شده در اسکارنوتید، بخشی از آنها توسط کانی‌های آهکی سیلیکاتی آب‌دار (اپیدوت و اکتینولیت)، سولفیدها (چون پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت) و کلسیت جانشین می‌شوند. پیروکسن نیز به اکتینولیت، کلسیت و کانی‌های کدر دگرسان شده است. افزایش اکسیژن نقش مهمی در تشکیل اپیدوت دارد [۴۱، ۴۲]. کانه‌های سولفیدی پرکننده‌ی فضاهای بین گارنت و پیروکسن نشان‌دهنده‌ی تشکیل گارنت و پیروکسن پیش از کانه‌های سولفیدی است. حضور کانه‌های سولفیدی ریزبلور در بلورهای پیروکسن و گارنت در همراهی با کانی‌هایی چون اکتینولیت و کلریت بیانگر تشکیل کانه‌های سولفیدی پس از پیروکسن و گارنت است. در پایان، مجموعه کانی‌های آهکی سیلیکاتی بی‌آب و آب‌دار تشکیل شده در مراحل پیشین، با سیال‌های با دمای نسبت پایین‌تر دگرسان شده و به کانی‌های کلسیت، رس، کلریت و کوارتز تبدیل شده‌اند.

توالی همبرزایی

به‌طور کلی، با توجه به نتایج به‌دست آمده از بررسی‌های صحرایی، سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری، انواع کانی-های آهکی سیلیکاتی بی‌آب و آب‌دار، سیلیکاتیا، اکسیدها و هیدروکسیدها، سولفیدها و کربناتیا در کانه‌زایی مرحله اول به صورت چینه گران و جانشینی در سنگ‌های کربناتی تشکیل شده‌اند و در ادامه و در مرحله دوم، کانه‌زایی در معرض سیال‌های با خاستگاه ماگمایی قرار گرفته و اسکارنی شده است. شواهد دگرزه‌ادی در این مرحله از کانه‌زایی مشهود است و در مرحله پایانی، در اثر سیال‌های جوی، کانی‌های برونزاد به وجود آمده‌اند. شواهد مربوط به توالی همبرزایی کانی‌های معدنی در معدن علم‌کندی شامل موارد زیر است؛ در مرحله اول، طی کانه‌زایی چینه گران، کانی‌های اسفالریت، گالن، پیریت و کالکوپیریت به همراه تتراهدریت و باریت به صورت جانشینی در سنگ کربناتی و با بافت دانه‌پراکنده، رگچه‌ای و جانشینی تشکیل شده‌اند. دگرسانی شاخص در این مرحله شامل دولومیتی‌شدن، سیلیسی‌شدن و پیریتی‌شدن است. در مرحله بعد، سیال‌های با خاستگاه ماگمایی، برکانه‌زایی مرحله اول اثر گذاشته‌اند. سایر شواهد عبارتند از میانبرهای پیریت درون کالکوپیریت و گالن و همچنین حضور کالکوپیریت در شکستگی‌های پیریت، رگچه‌های پیریت که اسفالریت را

گالن و پیریت با مرزهای تعادلی، هم‌رشدی تتراهدریت با اسفالریت، کالکوپیریت و گالن، کانی‌های برونزاد چون اسمیت زونیت، همی‌مورفیت، گوتیت، مالاکیت، آزوریت، کالکوسیت و سروزیت که پس از کانه‌های درونزاد تشکیل شده‌اند. در شکل ۱۳، توالی همبرزایی کانی‌های معدن علم‌کندی آورده شده است.

قطع کرده‌اند، گالن که با پیریت دربرگرفته شده است، میانبارهای کالکوپیریت درون گالن و اسفالریت و همچنین تشکیل کالکوپیریت به صورت رگچه‌ای و تشکیل گالن در لبه رگچه‌های کالکوپیریت، میانبارهای گالن و اسفالریت درون کالکوپیریت میانبارهای گالن درون اسفالریت و تشکیل گالن به صورت رگچه‌ای درون اسفالریت، تشکیل همزمان اسفالریت،

Ore-Forming Processes			
Minerals	Stratabound carbonate replacement Stage	Metamorphism Stage	Supergene Stage
Sphalerite	Sph	Sph	
Galena	Gn	Gn	
Pyrite			
Chalcopyrite	Cpy	Cpy	
Tetrahedrite	Tet		
Barite			
Covellite	Geot+Sm+Hem		
Chalcocite			
Smithsonite			Sm
Hemimorphite			Hem
Cerussite			
Malachite			Mal
Azurite			Azu
Geothite			Geot
Garnet	Px		
Pyroxene	Grt		
Epidote			
Chlorite			
Quartz			
Sericite			
Termolite	Dol		
Actinolite			
Calcite			
Dolomite	Dol		

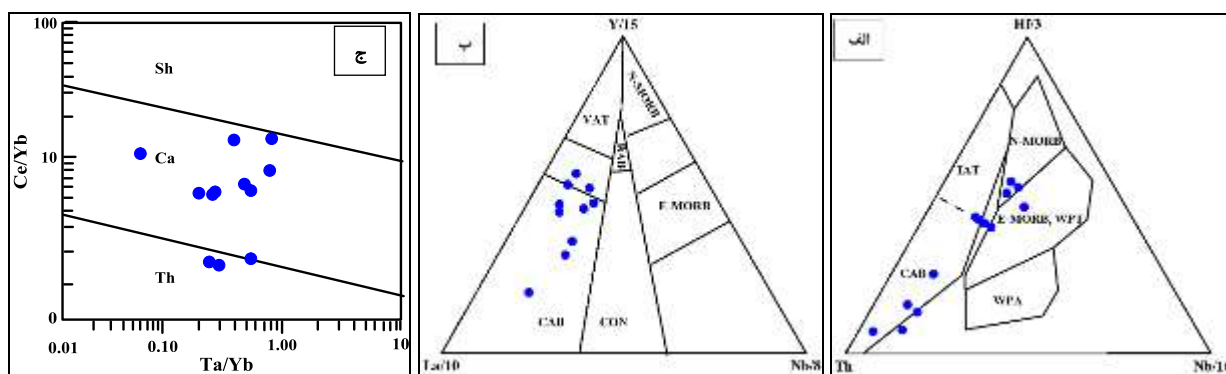
شکل ۱۳ توالی همبرزایی کانی‌های معدن سرب و روی علم‌کندی.

محیط زمین‌ساختی و ماهیت ماگمای والد سنگ‌های دگرگونی

زمین‌شیمی سنگ‌های مافیک دگرگونی، به ویژه آمفیبولیت، برای تعیین محیط زمین‌ساختی سنگ‌های ماگمایی والد استفاده شده است [۳۳، ۴۳، ۴۴]. همه نمونه‌های معدن علم‌کندی دارای میزان مشخصی از دگرسانی و دگرگونی گرمایی هستند که نشان می‌دهد که بیشتر عناصر با شدت میدان کم (LFSE) و عناصر اصلی متحرک بوده‌اند [۴۵-۴۷]. عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) و عناصر خاکی نادر (REE) به جز (Eu) اغلب غیرمتحرک در نظر گرفته می‌شوند، اما در شرایط دگرسانی شدید گرمایی، ممکن است متحرک شوند. در نمونه‌های به شدت دگرسان شده، تحرک Y و عناصر خاکی نادر سبک (LREE) می‌تواند با الگوهای فن شکل REE و نسبت‌های Y/Zr و La/Zr غیرعادی نسبت به نسبت‌های Nb/Zr و Yb/Zr بالاتر تعیین شود. با وجود قابلیت تحرک عناصر در نمونه‌های به شدت دگرسان و دگرگون‌شده، عناصر غیرمتحرک برای تعیین ویژگی‌های اولیه سنگزایی چون وابستگی ماگمایی یا محیط زمین‌ساختی کاربرد دارند. عناصری چون Zr، Ti، La، Yb و Nb به دلیل غیرمتحرک بودن طی دگرسانی گرمایی برای نتیجه‌گیری از ویژگی‌های سنگزایی اولیه در نواحی آتشفشانی دگرسان‌شده استفاده می‌شوند [۴۸، ۴۹]. محیط زمین‌ساختی نمونه‌های آمفیبولیت علم‌کندی با استفاده از نمودارهای مثلی زمین‌ساختی (شکل

۱۴) مشخص شده است. در نمودار مثلی Nb/16-Hf/3-Th [۵۰]، برخی از نمونه‌های دگرگونی کانسار علم‌کندی در گستره‌ی بازالت‌های آهکی‌قلیایی کمان آتشفشانی و بازالت پشته‌ی میان اقیانوسی قرار دارند که براین اساس، ممکن است در بالای یک منطقه فرورانش فعال تشکیل شده باشند (شکل ۱۴ الف). در نمودار مثلی La/10-Y/15-Nb/8 [۵۱]، نمونه‌ها در گستره‌ی بازالت آهکی‌قلیایی کمان ماگمایی قرار گرفته‌اند (شکل ۱۴ ب) اسکارن‌ها لزوماً یک محیط زمین‌شناسی ویژه یا یک سنگ مادر مشخص را نشان نمی‌دهند [۴۰].

اغلب نمونه‌های آمفیبولیت معدن علم‌کندی بر اساس نمودار عناصر کمیاب Ta/Yb نسبت به Ce/Yb [۵۲]، از سری ماگمایی آهکی‌قلیایی و تعداد کمی از مناطق تولییتی هستند که نوع سری‌های ماگمایی و وابستگی ماگماهای والد را نشان می‌دهد (شکل ۱۴ پ). به باور پیرس و همکاران [۵۲]، گوشته‌ی بالای یک پهنه فرورانش می‌تواند ماگمایی با ویژگی‌های آهکی‌قلیایی ایجاد کند. تشکیل ماگمای آهکی‌قلیایی در پهنه فرورانش به مقدار آب و درجه‌ی ذوب بخشی بستگی دارد، به طوریکه از ذوب بخشی گوشته بالایی در حضور آب کافی (فشار آب حدود ۳/۱ کیلوبار)، ماگمای آهکی‌قلیایی ایجاد می‌شود؛ در حالیکه در مقادیر کمتر آب یا درجه‌ی پایین ذوب بخشی گوه‌ی گوشته‌ای، ماگمای قلیایی شکل می‌گیرد [۵۳].



شکل ۱۴ الف- نمودار مثلی Nb/16-Hf/3-Th [۵۰]، که براساس آن، نمونه‌های آمفیبولیت معدن علم‌کندی در گستره‌ی بازالت‌های آهکی‌قلیایی کمان آتشفشانی و بازالت پشته‌ی میان اقیانوسی قرار می‌گیرند؛ بر پایه نمودار مثلی La/10-Y/15-Nb/8 [۵۱]، نمونه‌ها در گستره‌ی بازالت آهکی‌قلیایی کمان ماگمایی قرار دارند. پ) جایابی نمونه‌های آمفیبولیت معدن علم‌کندی بر نمودار Ta/Yb نسبت به Ce/Yb [۵۲]، که نشان‌دهنده‌ی آهکی‌قلیایی بودن ماگمای اولیه‌ی اغلب نمونه‌هاست. (N-MORB: بازالت پشته میان اقیانوسی نوع عادی، sh: شوشونیت، Ca: آهکی قلیایی، Th: تولییت، E-MORB: بازالت پشته میان اقیانوسی نوع غنی شده، CAB: بازالت آهکی قلیایی، VAT: تولییت قوس آتشفشانی، BAB: بازالت حوضه پشت قوس، CON: بازالت قاره‌ای، WPA: بازالت قلیایی درون صفحه‌ای، WPT: تولییت درون صفحه‌ای).

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس رده‌بندی‌های مراجع [۵۴، ۵۵] و همچنین ویژگی‌های سنگ میزبان (مرمر)، کانی‌های معدنی (اسفالریت، گالن، پیریت، کالکوپیریت)، کانی‌های باطله (کلسیت، دولومیت، کوارتز، پیروکسن، گارنت، اپیدوت، اکتینولیت، ترمولیت، کلریت و رس)، بافت کانی‌ها (رگه‌ای-رگچه‌ای، پراکنده، جانشینی، برشی) و دگرسانی‌ها (دولومیتی‌شدن، پیریتی‌شدن، کربن‌زدایی، کربناتی‌شدن و سیلیسی‌شدن)، کانسار علم‌کندی یکی از انواع کانی‌سازی‌های روزادی Pb-Zn است.

کانسار علم‌کندی به عنوان یکی از مهم‌ترین کانسارهای سرب-روی در زیرپهنه تکاب-ماهنشان، با ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانی‌سازی خود، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. بررسی‌های میکروسکوپی، زمین‌شیمیایی و شیمی کانی‌ها در این پژوهش نشان می‌دهد که این کانسار به صورت چینه‌گران تشکیل شده و در معرض فرآیندهای متعدد دگرگونی، از جمله دگرگونی مجاورتی و دگرسانی قرار گرفته است.

محیط زمین‌ساختی و پیوند ماگمایی

کانسار علم‌کندی در زیرپهنه تکاب-ماهنشان قرار دارد که به دلیل ویژگی‌های زمین‌ساختی پیچیده و تنوع سنگ‌شناسی، محیطی بسیار مناسب برای شکل‌گیری کانسارهای معدنی است. بر اساس تحلیل‌های زمین‌شیمیایی، ترکیب و ماهیت ماگمای این منطقه، بازالت‌های آهکی‌قلیایی و بازالت‌های جزایر میان‌اقیانوسی است. این محیط‌ها که به طور معمول در نواحی قوسی آتشفشانی و مناطق فرورانشی شکل می‌گیرند، نشان می‌دهند که ماگمای والد در این کانسار در معرض فرایندهای فرورانشی و تعامل با پوسته قاره‌ای غنی از سیلیس قرار گرفته است.

تجزیه و تحلیل داده‌های زمین‌ساختی به ویژه نمودارهای مثلثی $\text{Hf}/3\text{-Th-Nb}/16$ و $\text{La}/10\text{-Nb}/8\text{-Y}/15$ ، نشان می‌دهند که بخش عمده‌ای از کانسار علم‌کندی در محیطی شکل گرفته که در آن، فعالیت‌های زمین‌ساختی ناشی از فرورانش منجر به شرایط مناسب برای تمرکز عناصر فلزی و تشکیل کانی‌های معدنی شده است.

دگرسانی و فرآیندهای اسکارن‌سازی

دگرسانی‌های مختلف رخ داده در کانسار علم‌کندی نقش کلیدی در تشکیل کانی‌های اقتصادی داشته‌اند. کربنات‌زدایی که در نتیجه انحلال کلسیت در مرمرها توسط سیال‌های گرمابی رخ داده منجر به فضاهای خالی و افزایش نفوذپذیری سنگ‌های میزبان شده است. این فرآیند با تشکیل اسکارن‌های بی‌آب و آبدار همراه بوده است که از پیروکسن، اپیدوت، گارنت و سایر کانی‌های آهکی‌سیلیکاتی تشکیل شده‌اند.

دگرسانی‌های سیلیسی و کربناتی نیز نقش مهمی در تغییر ترکیب سنگ‌های میزبان و تمرکز عناصر فلزی داشته‌اند. این دگرسانی‌ها منجر به تشکیل کانی‌های سولفیدی چون اسفالریت، گالن، پیریت و کالکوپیریت شده‌اند که در مراحل مختلف دگرگونی و در اثر سیال‌های گرمابی شکل گرفته‌اند.

کانی‌سازی و همبرزایی کانی‌ها

کانسار علم‌کندی به عنوان یک کانسار روزادی، دارای مجموعه‌ای غنی از کانی‌های معدنی است. کانی‌های اصلی شامل اسفالریت، گالن، پیریت و کالکوپیریت هستند که در فضاهای باز ایجاد شده توسط فرآیندهای کربن‌زدایی و در مراحل مختلف دگرگونی و اسکارنی تشکیل شده‌اند. توالی همبرزایی این کانی‌ها نشان می‌دهد که کانی‌های سولفیدی چون پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت به ترتیب در مراحل مختلف شکل گرفته‌اند.

تشکیل کانی‌های سولفیدی در مراحل مختلف و با تغییرهای دمایی نشان‌دهنده پیچیدگی فرایندهای کانی‌سازی در این کانسار است. این کانی‌ها در فضاهای باز و شکستگی‌ها پر شده‌اند و در پی آن‌ها کانی‌های ثانویه‌ای چون همی‌مورفیت، اسمیت‌زونیت، سروزیت، گوتیت، مالاکیت، آزوریت، کالکوسیت و سربیسیت شکل گرفته‌اند که به عنوان فراورده‌های برونزاد جایگزین کانی‌های درونزاد شده‌اند.

برداشت

کانسار علم‌کندی با اینکه در ظاهر، شواهد یک کانسار چینه‌گران نوع MVT را نشان می‌دهد، اما بر پایه بررسی‌های دقیق کانی‌شناسی، نخست به صورت یک کانسار نوع MVT تشکیل شده و در ادامه در معرض فعالیت فعالیت ماگمایی جوان قرار

- [5] Gilg H. A., Boni M., Balassone G., Allen C. R., Banks D., Moore F., "Marble-hosted sulphide ores in the Angouran Zn-(Pb-Ag) deposit, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex", *Mineralium Deposita*, 41 (2006) 1-16.
- [6] Boni M., Gilg H.A., Balassone G., Schneider J., Allen C.R., Moore F., "Hypogene Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran", *Mineralium Deposita*, 42 (2007) 799-820.
- [7] Marangi H., Azimzadeh A.M., Nabatian Gh., Kouhestani H., Mohammadi Niaei R., "Application of mineralogy and geochemistry of trace elements in determining the phases of carrying strategic elements in Angouran Zn-Pb deposit, SW Zanjan", *Advanced applied geology*, 7 (3) (2017) 65-113.
- [8] Karami F., Kouhestani H., Mokhtari M.A.A., Azimzadeh A.M., "The Halab deposit, SW Zanjan: Volcanogenic massive sulfide Zn-Pb (Ag) mineralization, Takab-Takht-e-Soleyman-Angouran metallogenic district", *Journal of Economic Geology* 13(1) (2021) 165-192.
- [9] Karbasi A., "final report of Halab zinc-lead exploration. Organization of Industry", *Mining and Trade of Zanjan Province* (2014).
- [10] Ghazvinizadeh A.M., "Genesis of Alamkandi Pb-Zn deposit, Zanjan Province. MSc. thesis, University of Kharazmi", Tehran (In Persian with English abstract) (2005).
- [11] Shirkhani M., "Mineralogy, geochemistry and genesis of Ay Qalasi Lead and Zinc deposit, south east of Takab", M.Sc. thesis, Tarbiat Modares University (2008) 143 p.
- [12] Mohammadi Niaei R., Daliran F., Nezafati N., Ghorbani M., Sheikh Zakariaei J., Kouhestani H., "The Ay Qalasi deposit: An epithermal Pb-Zn (Ag) mineralization in the Urumieh-Dokhtar Volcanic Belt of northwestern Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*", Abhandlungen Band 192 Heft 3 (2015) p. 263 - 274.
- [13] Mohammadi Niaei R., Nezafati N., Ghorbani M., Sheikh Zakariaei Daliran F., "Mineralogy and chemical variations of sulfosalts of epithermal deposit of Ay-Qalasi (southeast of Takab, northwest of Iran)", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 30 (2)
- [14] Heidari S.M., Daliran F., Paquette J.L., Gasquet D., "Geology, timing, and genesis of the high sulfidation Au (-Cu) deposit of Touzlar, NW Iran", *Ore Geology Reviews* 65, 460-486.
- [15] Najafzadeh M., Ebrahimi M., Mokhtari M.A.A., Kouhestani H., "Arabshah Mineral

گرفته و اسکارنی شده است، هر چند شواهد یک کانسار اسکارنی شاخص از جمله‌اند و اسکارن و آگرواسکارن را نمی‌توان در آن پیدا کرد، اما وجود کانی‌های پیروکسن و اپیدوت به همراه گارنت، تأییدی بر عملکرد توده‌های نفوذی و ایجاد هاله‌های اسکارنوئیدی در این کانسار هستند. همچنین پهنه‌های کانه‌دار دارای ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانی‌سازی پیچیده‌ای بوده که نتیجه تعامل‌های متنوع بین محیط زمین‌ساختی، فرآیندهای دگرگونی و آثار سیال‌های گرمایی هستند. این پژوهش با معرفی فرآیندهای کانی‌سازی در این منطقه، می‌تواند به عنوان یک الگوی اکتشافی برای شناسایی و بهره‌برداری از کانسارهای مشابه در زیرپهنه تکاب- ماهنشان و مناطق مشابه استفاده شود.

قدردانی

نگارندگان از حمایت و پشتیبانی دانشگاه تبریز و همچنین مساعدت‌های آقای دکتر رامین محمدی نیایی، مدیر معدنی شرکت کالسیمین، به دلیل ایجاد بستر انجام این پژوهش، انتقال نظرها و مشاوره علمی و حمایت معنوی، همچنین فراهم نمودن وسیله نقلیه و محل اسکان طی بازدید صحرایی، بسیار تشکر و قدردانی را دارند. همچنین از شرکت زرجویان فلات قاره برای تأمین مالی انجام پژوهش و در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاهی میکروسکوپی، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

- [1] Daliran F., "The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran, hydrothermal alteration and mineralization", *Mineralium Deposita*, 43 (2008) 383-404.
- [2] Daliran F., Hofstra A.H., Walther J., Stüben D., "Aghdarreh and Zarshuran SRHDG deposits, Takab region, NW Iran", *GSA Annual Meeting, Abstract with Programs* (2002) P.8-63.
- [3] Mehrabi B., Yardley B. W. D., Cam J. R., "Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran", *Mineralium Deposita*, 34 (1999) 673-696.
- [4] Asadi H.H., Voncken J.H.L., Kühnel R.A., Hale M., "Petrography, mineralogy, and geochemistry of the Zarshuran Carlin-like gold deposit, northwest Iran". *Mineralium Deposita*, 5 (2000) 656-671.

- [25] Alavi M., "Tectonics of Zagros Orogenic Belt of Iran, New Data and Interpretation", Tectonophysics, 229 (1994) 211-238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2).
- [26] Agard Ph., Omrani J., Jolivet L., Whitechurch H., Vrielynck B., Spakman W., Monié P., Meyer B., Wortel M., "Zagros orogeny: A subduction-dominated process", Geological Magazine 148 (2011) (5-6). DOI: 10.1017/S001675681100046X.
- [27] Rajabi A., Rastad E., Canet C., "Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn-Pb deposits of Iran: Geotectonic setting and data integration for future mineral exploration", International Geology Review, 54(14) (2012) 1649-1672. DOI: 10.1080/00206814.2012.659110.
- [28] Zhuang L., Song Y., Liu Y., Fard M., Hou Z., "Major and trace elements and sulfur isotopes in two stages of sphalerite from the world-class Angouran Zn-Pb deposit, Iran: Implications for mineralization conditions and type", Ore Geology Reviews, 109 (2019) 184-200.
- [29] Mohajjel M., "Structure and tectonic evolution of Palaeozoic-Mesozoic rocks, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. Ph.D. Thesis, University of Wollongong", Wollongong, Australia (unpublished) (1997) 226 p.
- [30] Aghazadeh M., Castro A., Rashidnejhad Omran N., Emami M.H., Moinvaziri H., Badrzadeh Z., "The gabbro (shoshonitic)-monzonite-granodiorite association of Khankandi pluton, Alborz Mountains, NW Iran", Journal of Asian Earth Science., 38 (2010) 199-219.
- [31] Hassanzadeh J., Wernicke B.P., "The Neotethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran is an archetype for passive margin-arc transitions", Tectonics, 35 (2016) 586-621.
- [32] Baghban S., Hosseinzadeh M.R., Moayyed M., Mokhtari M.A.A., Gregory D., Mahmoudi Nia H., "Chemical composition and evolution of the garnets in the Astamal Fe-LREE distal skarn deposit, Qara Dagħ-Sabalan metallogenic belt, Lesser Caucasus, NW Iran", Ore Geology Reviews, 78, 166-175.
- [33] Hajialioghli R., Moazzen M., Oberhänsli R., Ahmadzadeh S., Ahangari M., "Back-arc Magmatism in the Cadomian Basin of NW Iran: Ortho-Amphibolites from the Alam-Kandi Area", Geotectonics., 57 (2023) 200-212.
- [34] Alavi M., Amidi M., "Geological map of the Takab Quadrangle, West Azerbaijan Province, Scale 1: 250000. Iran Geological Survey and Mineral Explorations .
- Occurrence: Carlin-Type Epithermal Gold-Arsenic-Antimony Mineralization in Takab-Angouran Metallogenic Zone, Takht Soleiman, West Azerbaijan", Advanced Applied Geology, 25 (2015) 61-76.
- [16] Talebi L., Mokhtari M.A.A., Ebrahimi M., Kouhestani H., "Arpachai Mineral Occurrence, North of Takab: Epithermal Mineralization of Base Metals in the Takab-Angouran-Takht Solaiman Metallogenic Zone", Earth Sciences Quarterly . GSJ_Volume 26_Issue 104_Pages 281-296.
- [17] Rahmati N., "Petrology and geochemistry of volcanic rocks in the Agh Otag area (N Takab) with considering Au-Cu mineralization", M.Sc. thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran (in Persian) (2015).
- [18] Pour Mohammad F., Kohestani H., Azimzadeh A.M., Nabatian Gh., Mokhtari M.A.A., "Mianaj iron occurrence, southwest of Zanjan: Metamorphosed and deformed volcano-sedimentary type of mineralization in Sanandaj-Sirjan zone", Earth Sciences Quarterly. GSJ_Volume 28 (2018) Issue 111_Pages 161-174.
- [19] Mohammadi Z., Ebrahimi M., Kouhestani H., "Goorgoor Iron Occurrence, Northeast of Takab: Metamorphosed Volcano-Sedimentary Mineralization in Sanandaj-Sirjan zone", Advanced Applied Geology, 13 (2013) 20-32.
- [20] Nouri F., Mokhtari M.A.A., Izadyar J., Kouhestani H., "Geological and mineralogical characteristics of Alamkandi Fe deposit, west of Zanjan. The 35th symposium on geosciences", Geological Survey of Iran (In Persian with English abstract) (2017).
- [21] Maanijou M., Salemi R., "Mineralogy, chemistry of magnetite and genesis of Korkora-1 iron deposit, east of Takab, NW Iran", Journal of Economic Geology, 6 (2014) 355-374 (in Persian with English abstract).
- [22] Maanijou m., Khodaei L., "Mineralogy and electron microprobe study in Sarab-3 iron deposit, southwest of Shahrak mining area (east of Takab)". Economic Geology, 10(1) (2017) 267-293.
- [23] Nadari A., Nabatian Gh., Honarmand M., Kouhestani H., "Geology and genesis of Halab Mn deposit, SW Zanjan", Earth Science Quarterly. GEOSCIENCES, Vol. 29 (2019) No. 115.
- [24] Lotfi M., Karimi M., "Mineralization and formation of vein-type deposits (nickel-cobalt-arsenic-bismuth and basic elements) in Bayche-Bagh (Northwestern Zanjan - Iran)", Journal of Earth Sciences, 53 (2013) 81-95.

- [46] Saeki Y., Date J., "Computer application to the alteration data of the footwall dacite lava at the Ezuri Kuroko deposits", Akito Prefecture. Mining Geology, 30 (1980) 241–250.
- [47] Jenner G.A., "Trace element geochemistry of igneous rocks: Geochemical nomenclature and analytical geochemistry. in: Wyman, D.A., ed., Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulfide Exploration. Geological Association of Canada", Short Course Notes, 12 (1996) 51–77.
- [48] MacLean W.H., Kranidiotis P., "Immobile elements as monitors of mass transfer in hydrothermal alteration: Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec", Economic Geology, 82 (1987) 951–62.
- [49] MacLean W.H., Barrett T.J., "Lithogeochemical techniques using immobile elements", Journal of Geochemical Exploration, 48 (1993) 109–33.
- [50] Wood D.A., "The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province", Earth and Planetary Science Letters, 50 (1980) 11–30.
- [51] Cabanis B., Lecolle M., "Le diagramme La₁₀-Y₁₅-Nb₈: un outfil pour la discrimination de series volcaniques et lamise en evidence des processus demélange et/ou de contamination crustale", Compte Rendus de l'Académie des Sciences (Ser. II) 309 (1989) 2023–2029.
- [52] Pearce J.A., "Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth, C.J., Norry, M.J. (eds)", Continental Basalts and Mantle Xenoliths. Nantwich UK Shiva (1983) pp. 230–249.
- [53] Bonin B., "From orogenic to anorogenic settings: Evolution of granitoid suites after a major orogenesis", Geological Journal, 25(3-4), 261–270
- [54] Cox, D.P., Singer, D.A., 1986. Mineral deposit models. US Geological Survey Bulletin 1693 (1990) p. 379.
- [55] Dill H.G., "The chessboard classification scheme of mineral deposits: mineralogy and geology from aluminum to zirconium", Earth-Science Reviews, 100 (1–4) (2010) 1–20.
- [35] Daliran F., Pride K., Walther W., Berner Z.A., Bakker R.J., "The Angouran Zn (Pb) deposit, NW Iran: evidence for a two-stage, hypogene zinc sulfide–zinc carbonate mineralization", Ore Geology Reviews, 53 (2013) 373–402.
- [36] Whitney D.L., Evans B.W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist", Volume 95 (2010) pages 185–187.
- [37] Babakhani A.R., Ghalamghash J., "Geological map of Takht-e-Soleyman, scale 1:100000", Geological Survey of Iran.
- [38] Fonoudi M., Hariri A., "Geological map of Takab, scale 1:100,000", Geological Survey of Iran (1999).
- [39] Berger B.R., Bagby W.C., "The geology and origin of Carlin-type gold deposits, in: Foster, R.P. (ed.)", Gold metallogeny and exploration (1991) pp. 210–248.
- [40] Meinert L.D., "Skarns and skarn deposits", Geoscience Canada, 19(4) (1992) 145–162.
- [41] Berman R.G., Brown T.H., Greenwood H.J., "An internally consistent thermodynamic database for minerals in the system Na₂O-K₂O-CaO-MgO-FeO-SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃-TiO₂-H₂O-CO₂", Atomic Energy of Canada Technical Report, TR-337, 62 p.
- [42] Perkins E.H., Brown T.H., Berman R.G., "PTX-SYSTEM: Three programs for calculation of pressure-temperature-composition phase diagrams", Comput Geoscience 12 (1986) 749–755.
- [43] Advay M., Moazzen M., Hajialioghli R., "Geochemical features of amphibolites from the Qarehaghaj area, East Azerbaijan, NW Iran; implications for paleotectonic setting", Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, 281(1) (2016) 35–49.
- [44] Sorokin A.A., Ovchinnikov R.O., Xu W., Kovach V.P., Yang H., Kotov A.B., Ponomarchuk V.A., Travin A.V., Plotkina Y.V., "Ages and nature of the protolith of the Tulovchikha metamorphic complex in the Bureya Massif, Central Asian Orogenic Belt", Russia: Evidence from U–Th–Pb, Lu–Hf, Sm–Nd, and ⁴⁰Ar/³⁹Ar data. Lithos, 332–333 (2019) 340–354.
- [45] Spitz G., Darling R., "Major and minor element lithogeochemical anomalies surrounding the Louvem copper deposit, Vald'Or, Quebec", Canadian Journal of Earth Sciences, 15 (1978) 1161–1169.