

Geology, geochemistry, mineral chemistry, and Pb-Zn mineralization in the Alam-Kandi deposit, Takab-Mahanshan metallogenic Sub-zone

Hafez Marangi¹, Mohammad Reza Hosseinzadeh^{1*}, Kamal Siahcheshm¹, Sajjad Maghfouri²

¹ Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, 5166616471 Tabriz, Iran

² Department of Economic Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*Corresponding author, Tel: +98(41) 33392697, Fax: +98 (41) 33392697, Mobile: (+98) 09143065872

E-mail: Mr.hosseinzadeh1352@gmail.com

Abstract

The Alam-Kandi Pb-Zn deposit is located in the Takab-Mahanshan sub-zone in the Sanandaj-Sirjan zone, NW Iran. Geology, mineralization, alteration, tectonic setting, magmatic affinity, fluid inclusion, and S stable isotope characteristics of this mine were investigated. The Neoproterozoic-Cambrian metamorphic complex in the study area consists of amphibolite, gneiss, and marble. Lead and zinc mineralization hosted within marble and formed as replacement, veinlets, disseminated, breccias, and bands. Galena and sphalerite are important ore minerals. Electron microprobe analysis (EPMA) was used to investigate the distribution of Ag, As, Co, Cu, Fe, Ni, Pb, Sb, and S within galena, sphalerite, chalcopyrite, pyrite, and tetrahedrite ore minerals. From economic point of view, lead, zinc, and silver are the most important elements in these minerals. Among sulfide minerals, galena has the highest amount of silver (Ave. =0.185wt.%). However, with a big difference compared to sulfide minerals, tetrahedrite is the main host of silver (Ave. =10.45 wt.%) in this mine. The host rock alterations include silicification and carbonatization. The original parental magma of the amphibolite was calc alkaline to tholeiitic mid-ocean ridge basalt (MORB) and volcanic arc basalt (VAB), showing that magma was originated from a metasomatized mantle by subduction components in a volcanic arc setting.

Keywords: geochemistry, chemical minerals, Alam-Kandi, Pb-Zn, Takab-Mahanshan.

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

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

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

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

چکیده:

کانسار سرب- روی علم‌کندی در زیرپهنه تکاب- ماهشان و پهنه سهندج- سیرجان، در جنوب غرب استان زنجان و شمال غرب ایران قرار دارد. در این مطالعه، زمین‌شناسی، کانی‌سازی، دگرسانی، شرایط تکتونیکی، پیوند ماگمایی، شیمی سنگ‌ها و کانی‌های این معدن مورد بررسی قرار گرفته است. کمپلکس دگرگونی نئوپروتروزوئیک- کامبرین در منطقه مورد مطالعه شامل آمفیبولیت، گنیس و مرمر است. کانی‌سازی سرب و روی در سنگ میزبان مرمر به صورت جانشینی، رگچه‌ای، پراکنده، برشی و نواری تشکیل شده 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، کالکوپیریت، پیریت و تتراهدریت، از آنالیز الکترون میکروپروب (EPMA) استفاده شده است. مهم‌ترین عناصر اقتصادی در این کانی‌ها سرب، روی و نقره هستند. در میان کانی‌های سولفیدی، گالن دارای بالاترین میزان نقره است (میانگین = $0/185$ درصد وزنی). اما با تفاوت زیاد نسبت به کانی‌های سولفیدی، تتراهدریت میزبان اصلی نقره (میانگین = $10/45$ درصد وزنی) در این معدن است. دگرسانی سنگ میزبان شامل سیلیسی شدن و کربناتی شدن است. براساس بررسی‌های ژئوشیمیایی، ماگمای اولیه آمفیبولیت، بازالت میان‌اقیانوسی (MORB) و قوسی ولکانیکی (VAB) کالک آلکالن تا تولئیتی بوده و نشان می‌دهد که ماگما از گوشته متاسوماتیزه شده با اجزای فرورانشی در یک قوس آتشفشانی سرچشمه گرفته است.

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

مقدمه

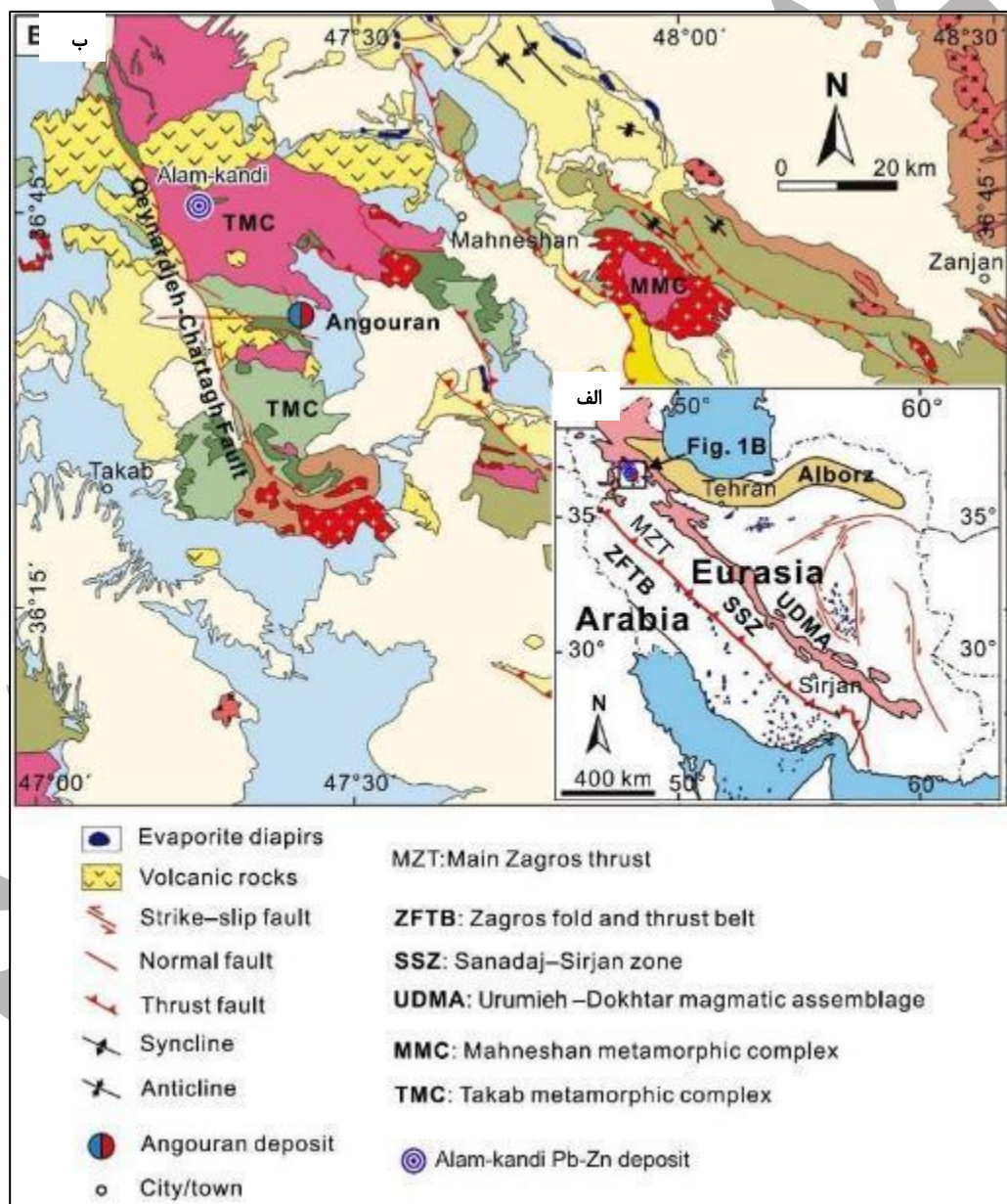
علم‌کندی [۱۰]، سرب - روی - نقره آی‌قلعه‌سی [۱۳-
[۱۱]، طلا- آرسنیک عربشاه [۱۴-۱۵]، سرب -
روی- طلای آرپاجای [۱۶]، مس - طلای آق‌اوتاق [۱۷]،
کانه‌زایی‌های آهن مانند بلقیس، میانج [۱۸]،
گورگور [۱۹]، علم‌کندی [۲۰] و کورکورا [۲۱]، سرب ۳
[۲۲]، کانه‌زایی منگنز حلب [۲۳] و کانسار مس (کبالت)
بایچه‌باغ [۲۴] در این منطقه شناسایی شده‌اند. کانه-
زایی سرب و روی در این منطقه به لحاظ قرارگیری معدن روی
و سرب انگوران به‌عنوان بزرگترین معدن روی و سرب
خاورمیانه (به لحاظ عیار ماده معدنی) و چندین کانسار سرب

کانسار علم‌کندی در زیرپهنه تکاب- ماهشان در پهنه
سهندج- سیرجان، استان زنجان، شمال غرب ایران واقع شده
است. پهنه متالورژی تکاب- ماهشان به عنوان یکی از منحصر
به فردترین پهنه‌های کانه‌زایی به لحاظ تنوع کانه‌زایی‌ها در
ایران مطرح است. همچنین از دیدگاه فلززایی، پهنه‌ی کانه‌دار
دگرگونه تکاب- ماهشان یکی از مناطق فلززایی مهم در ایران
محسوب می‌شود [۲-۱] معادن طلا- آرسنیک زرشوران
[۲-۴]، طلا- آرسنیک آق‌دره [۱]، روی- سرب انگوران [۷-
۵]، کانسارهای روی - سرب حلب [۸-۹]، سرب - روی

و روی دیگر در اطراف آن، از درجه‌ی اهمیت و ارزش بالایی برخوردار است.

کانسار سرب- روی علم‌کندی یکی 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 MVT شده است. اما به نظر می‌رسد که MVT تنها نوع کانی‌سازی در این منطقه نیست و شواهدی از انواع دیگر کانی‌سازی نیز در منطقه وجود

دارد. این مطالعه به بررسی زمین‌شناسی صحرایی، پتروگرافی، کانی‌سازی و زمین‌شیمی در کانسار سرب و روی علم‌کندی می‌پردازد. مطالعه دقیق این نوع کانی‌سازی می‌تواند عوامل کلیدی توزیع زمانی و مکانی را برای اکتشاف کانی‌سازی‌های مشابه در زیرپهنه فلززایی تکاب- ماهنشان معرفی کرده و به عنوان مدلی برای اکتشاف در ناحیه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.



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

دستگاه Cameca SX Five EPMA در دپارتمان تحقیق لیتوسفر، دانشگاه وین انجام شد. شرایط اسپکترومتر 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.

زمین‌شناسی ناحیه‌ای

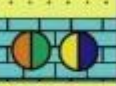
کانسار سرب و روی علم‌کندی در منطقه تکاب، شمال غرب ایران قرار دارد. کمپلکس دگرگونی تکاب در پهنه سنندج-سیرجان واقع شده است [۲۹]. فروانش نئوتتیس در دوره ژوراسیک-ترشیاری موجب شکل‌گیری ماگماتیسم قوسی در پهنه سنندج-سیرجان شد [۳۱،۳۰] و انتظار می‌رود که کانی‌سازی مرتبط با ماگماتیسم در این دوره فعال بوده باشد. تکاب به دلیل داشتن کانسارهای اپی‌ترمال و همچنین انواع مختلفی از کانسارهای فلزات پایه شناخته شده است. محققان متعددی در این منطقه فعالیت کرده‌اند و بسیاری از مقالات در این زمینه منتشر شده است [۳۳،۳۲،۲۸،۲۰]. واحدهای سنگی در نقشه تکاب شامل سنگ‌های دگرگونی، رسوبی، آتشفشانی و نفوذی است که در بازه سنی پرکامبرین تا عهد حاضر قرار دارند [۳۴]. واحدهای دگرگونی تکاب شامل آمفیبولیت، گرانولیت، مرمرها، سنگ‌های کالک سیلیکاته، گنیس‌ها و شیست‌ها هستند. به نظر می‌رسد که دگرپختی ساختاری از پرکامبرین تا به دوره میوسن پایانی به طور پیوسته ادامه داشته است [۳۴].

پس از انجام عملیات 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 استفاده از میکروسکوپ‌های انعکاسی و بازتابی مورد بررسی قرار گرفت. تمامی ویژگی‌های لیتولوژی، پتروگرافی، 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 توسط فلورسانس اشعه ایکس (XRF) و برخی عناصر کمیاب توسط طیف‌سنجی جرمی با پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) در آزمایشگاه زراژما آنالیز شدند.

برای بررسی توزیع عناصر کمیاب در کانی‌های سولفیدی و سولفوسالت تتراهدریت، ۴ نمونه به روش SEM-EDS در دانشگاه لرستان مورد آنالیز قرار گرفتند.

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 نهایت ۴ نقطه از تتراهدریت توسط روش میکروپروب الکترونی مورد آنالیز قرار گرفتند. آنالیز نقاط انتخاب شده با استفاده از

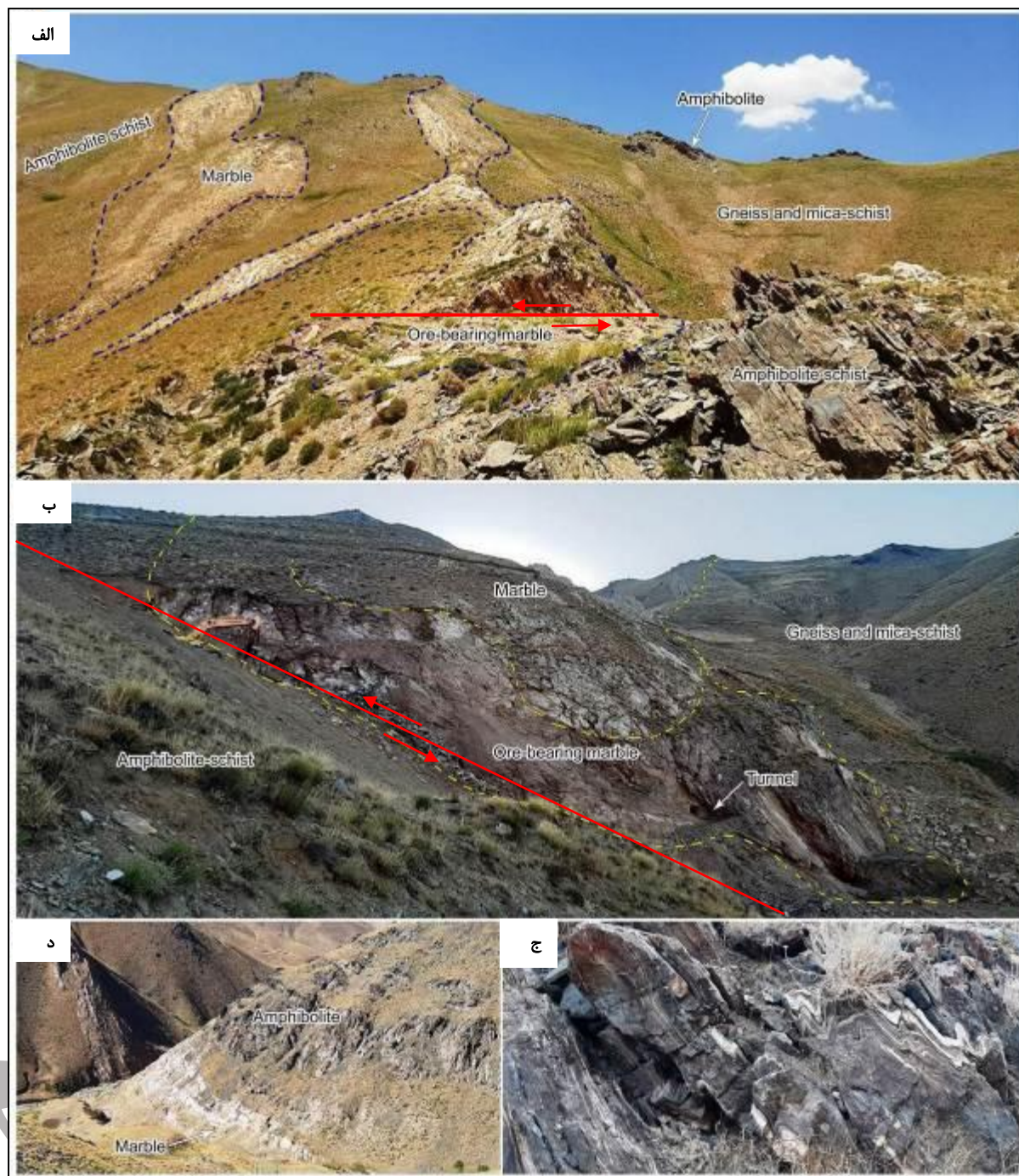
System	Sequence	Lithology	Mineralization
Quaternary		Travertine and unconsolidated conglomerate <i>Angular unconformity</i>	
Miocene		Basalt sill/dyke	Cu-Ag-As, Au-As
		Upper Red Formation (shallow water clastic sediments/tuff or evaporite)	
		Qom Formation limestone and marl	Soulakan-II Agderrah
		Lower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

شکل ۲) ستون چینه‌شناسی منطقه تکاب که سنگ‌های میزبان ذخایر معدنی اقتصادی را نشان می‌دهد (با تغییرات از [۲۵، ۳۸]).

زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه

معدن علم‌کندی در کمپلکس دگرگونی تکاب و زیر مجموعه آمفیبولیت‌های علم‌کندی قرار دارد. زمین‌شناسی علم‌کندی تقریباً به طور کامل از آمفیبولیت‌ها، گنیس‌ها و مرمرهای نئوپروتروزوئیک-کامبرین تشکیل شده است که به سمت شرق امتداد دارند. آمفیبولیت گسترده‌ترین واحد سنگی در منطقه مورد مطالعه است؛ واحدهای گنیس،

میکاشیست و مرمر به صورت میان لایه‌هایی درون آمفیبولیت تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۳). کانی‌سازی عمدتاً در لایه‌های مرمری دگرگون شده در توالی آتشفشانی-رسوبی پرکامبرین-کامبرین تشکیل شده است. زون‌های گسلی و شکستگی‌ها، کنترل اصلی کانی‌سازی را در این منطقه بر عهده دارند. کمپلکس دگرگونی تکاب شامل انواع مختلفی از سنگ‌ها مانند آمفیبولیت، میکاشیست، گنیس و مرمر است (شکل ۳) و در ادامه توضیح داده شده است:



شکل ۳. الف: عکس صحرایی از معدن علم‌کندی (دید به سمت شمال غربی)؛ (ب) موقعیت سنگ مرمر حاوی کانی که در سنگ‌های دگرگون‌شده جای گرفته است (دید به سمت غرب)؛ (ج) عکس برون‌زدگی از آمفیبولیت شیست‌های چین‌خورده در معدن علم‌کندی (د) نمایی از میان لایه مرمر که بین سنگ‌های آمفیبولیت قرار دارد (دید به سمت شمال غربی).

علم‌کندی را به چهار نوع تقسیم کرده‌اند:

الف) آمفیبولیت نرمال، ب) اپیدوت آمفیبولیت، ج) اپیدوت-بیوتیت آمفیبولیت، د) گارنت آمفیبولیت. با این حال،

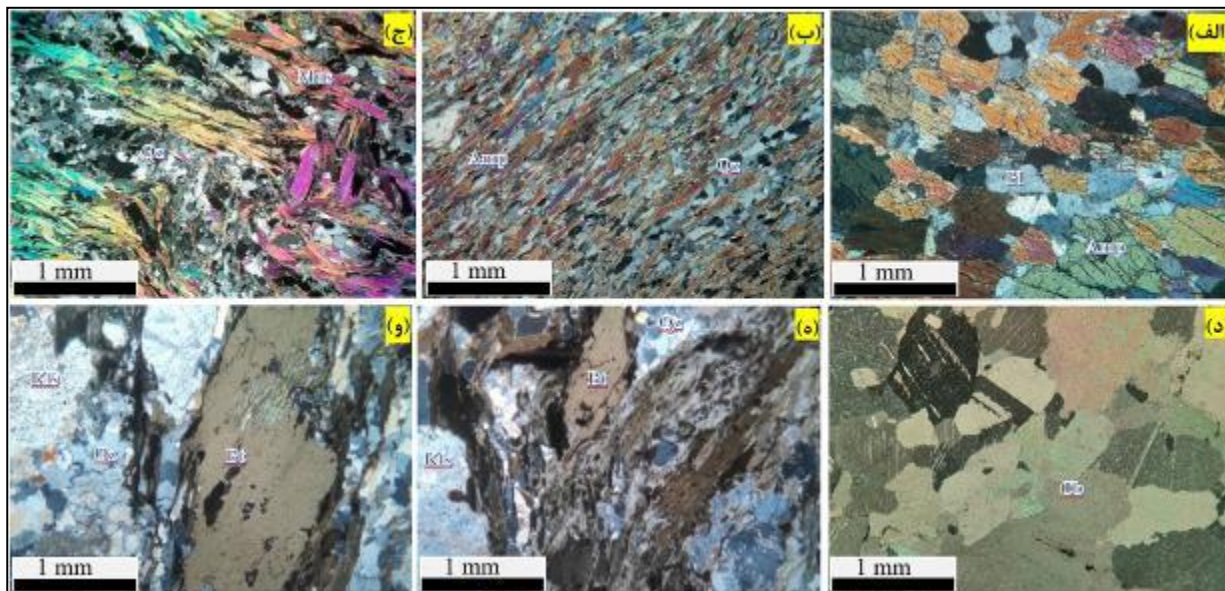
آمفیبولیت: آمفیبولیت عمده‌ترین سنگ دگرگونی در منطقه مورد مطالعه است. بر اساس نوع کانی‌ها، آمفیبولیت را می‌توان به چندین نوع تقسیم کرد. [۳۳]، آمفیبولیت‌های

در اینجا فقط یک نمای کلی از واحد آمفیبولیت ارائه شده است. آمفیبولیت‌ها در رخنمون صحرایی، نمونه دستی و در مقیاس میکروسکوپی برگوارگی نشان می‌دهند و دارای فابریک‌های گرانوبلاستیک و نماتوبلاستیک هستند. کانی‌های اصلی شامل آمفیبول، کوارتز، آلکالی فلدسپار 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 تحت تأثیر فرآیندهای تکتونیکی دچار چین‌خوردگی شده است (شکل ۴-ب). رگچه‌های کوارتز و کوارتز-باریت که حاوی کانی‌سازی سرب-روی هستند، این واحد آمفیبولیت را قطع کرده‌اند. با مطالعه شیمی آمفیبولیت، می‌توان به ماهیت و پیوند ماگماتیسیم سنگ مادر و محیط تکتونیکی تشکیل سنگ آذرین اولیه پی برد.

میکا شیست و گنیس: میکا شیست و گنیس نتیجه تبلور نوارهای روشن و تیره هستند که نشان‌دهنده باندینگ گنیسی است. بافت در بخش‌های روشن گرانوبلاستیک و بافت سنگ در بخش‌های تیره لپیدوبلاستیک است. کانی‌های اصلی در نوارهای روشن این واحد شامل کوارتز و آلکالی فلدسپار با بافت موزائیکی هستند و نوارهای تیره از موسکوویت و در برخی قسمت‌ها 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 تحت تأثیر فشارهای تکتونیکی به صورت میکروسکوپی و ماکروسکوپی چین‌خورده است (شکل ۴-ج). گاهی اوقات

کانی‌های تشکیل‌دهنده گنیس در طی جدایش مکانیکی میلونیتی شده‌اند (شکل ۴-ه، و). در گنیس میلونیتی، فلدسپارها اغلب به صورت بلورهای درشت وجود دارند که به دلیل تبلور مجدد در جهت عمود بر بالاترین تنش، به شکل عدسی تغییر یافته و بافت چشمی ایجاد کرده‌اند.

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؛ چرا که کنترل‌کننده اصلی و میزبان کانی‌سازی سرب و روی است و زون‌های کانه‌دار مرمرها، تحت تأثیر سیالات گرمابی و جوی به اکسید و هیدراکسیدهای آهن آغشته شده است. بافت غالب این واحد سنگی گرانوبلاستیک است. بلورهای خودشکل تا بی‌شکل دولومیت و کلسیت بخش عمده‌ای از این واحد سنگی را اشغال کرده‌اند. بلورهای کلسیت و دولومیت به دلیل تبلور مجدد در طول فرآیند دگرگونی تشکیل شده‌اند. دولومیت به صورت بلورهایی با دوقلویی پلی‌سنتتیک و مشبک دیده می‌شود (شکل ۴-د). کانی‌های تشکیل‌دهنده این واحد گاهی بیشتر در جهت عمود بر فشار حداکثر رشد کرده‌اند، به طوری که آثار کشیدگی و شیستوزیته در سنگ قابل مشاهده است. در برخی قسمت‌ها، به دلیل تأثیر فرآیندهای گرمابی، 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 تحت تأثیر فرآیندهای گرمابی قرار گرفته، به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز آغشته شده است. همچنین، کربنات‌های غنی از آهن، از جمله سیدریت، تشکیل شده‌اند.

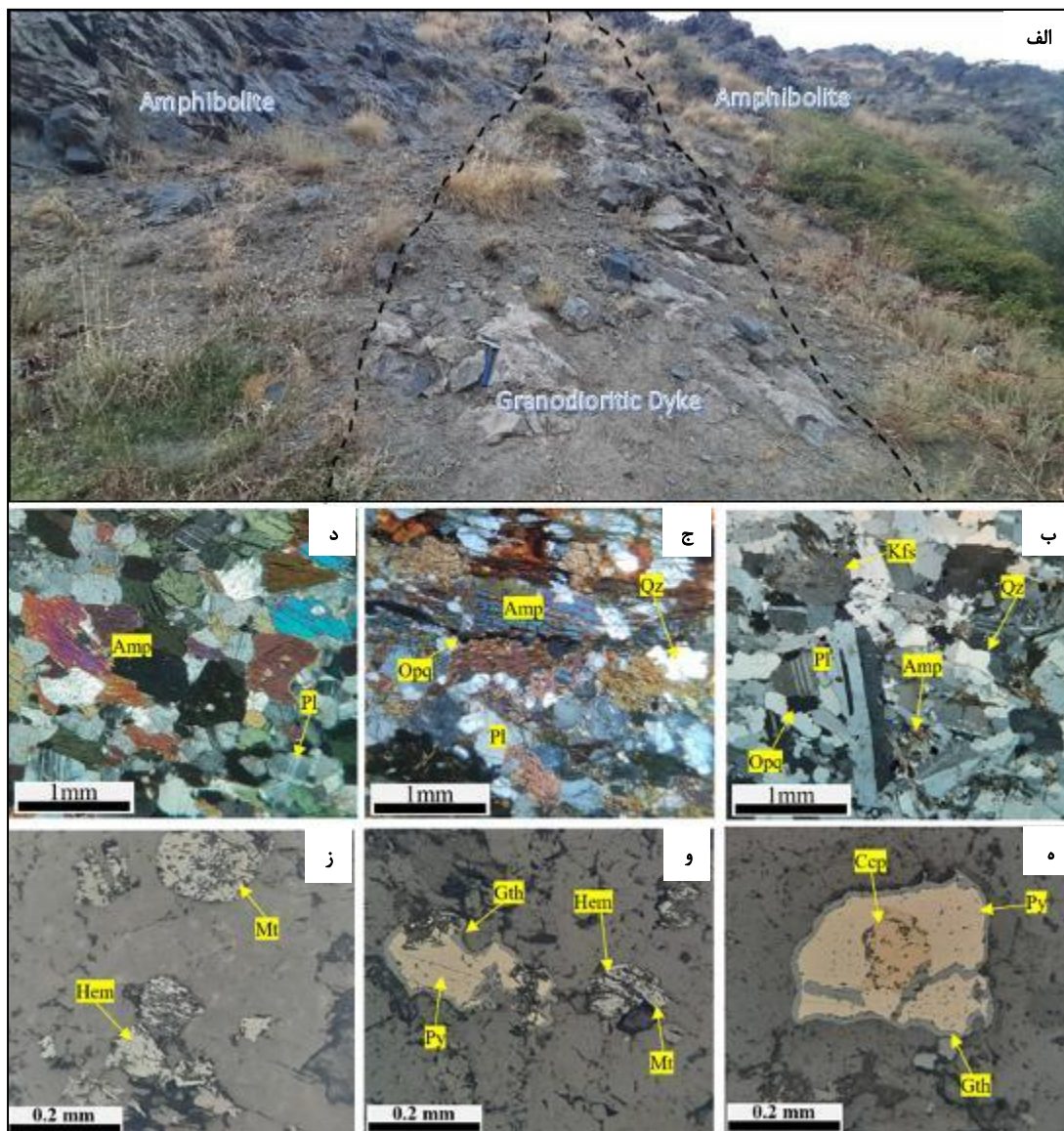


شکل ۴) تصاویر میکروسکوپی واحدهای سنگی دگرگونی از معدن سرب-روی علم‌کندی (نور پلاریزه). الف) بلورهای پلاژیوکلاز (Pl) و کوارتز (Qz) همراه با آمفیبول سوزنی (Amp) در آمفیبولیت گرانوبلاستیک؛ ب) فابریک نماتوبلاستیک در آمفیبولیت؛ ج) تشکیل کانی‌های کدر در جهت شیب‌توزیده همراه با موسکوویت (Mus) با فابریک لپیدوبلاستیک و کوارتز در میکاشیست؛ د) تشکیل کانی‌های کربناتی (Cb) با فابریک گرانوبلاستیک در میان لایه مرمری؛ ه، و) نوار تیره بیوتیت (Bt) و نوار روشن کوارتز-فلدسپار با دگرسانی پتاسیم فلدسپارها (Kfs) به کربنات و سریسیست و ایجاد بافت غربالی در گنیس میلونیتی. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و ایوانس، [۳۶].

سنگ‌شناسی زون کانه‌دار:

زیر پهنه تکاب- ماهنشان عمدتاً از سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای پرکامبرین و پالئوزوئیک (شامل انواع مختلف شیبست‌ها، آمفیبولیت، گنیس و مرمر) تشکیل شده است که به‌طور محلی گرانودیوریت‌های مزوزوئیک (تریاس میانی- پایانی) در این واحدها نفوذ کرده‌اند [۳۷، ۳۸]. این رویداد عمدتاً باعث ایجاد هاله دگرگونی مجاورتی، به‌ویژه در واحدهای مرمری شده که به‌طور محلی با کانی‌سازی آهن (به عنوان مثال، علم‌کندی و قینرجه) و سرب-روی (به‌عنوان مثال، قره‌داش) همراه است. بر اساس مطالعات صحرایی، توده نفوذی گرانودیوریتی در منطقه رخنمون دارد. رخنمون اصلی گرانودیوریت را می‌توان در شرق روستای علم‌کندی مشاهده کرد و کانی‌سازی اسکارن آهن در کنار آن شکل گرفته است.

توده‌ی دیگری در بخش جنوب غربی محدوده سرب و روی علم‌کندی و با فاصله هوایی حدود ۵ کیلومتر در معدن آهن اسکارنی قینرجه (دامنه کوه بلقیس) رخنمون دارد. در محدوده معدن سرب و روی علم‌کندی، آپوفیز گرانودیوریتی به داخل آمفیبولیت نفوذ کرده است (شکل ۵-الف). کانی‌های اصلی در آپوفیز گرانودیوریتی شامل پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، آمفیبول و کوارتز هستند و این کانی‌ها بافت گرانولار ایجاد کرده‌اند (شکل ۵-ب). آمفیبولیت فابریک گرانوبلاستیک و نماتوبلاستیک نشان می‌دهد (شکل ۵-ج، د). کانی‌های معدنی اصلی شامل مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت هستند که با بافت پراکنده در آپوفیز گرانودیوریتی تشکیل شده‌اند (شکل ۵-ه، و، ز).



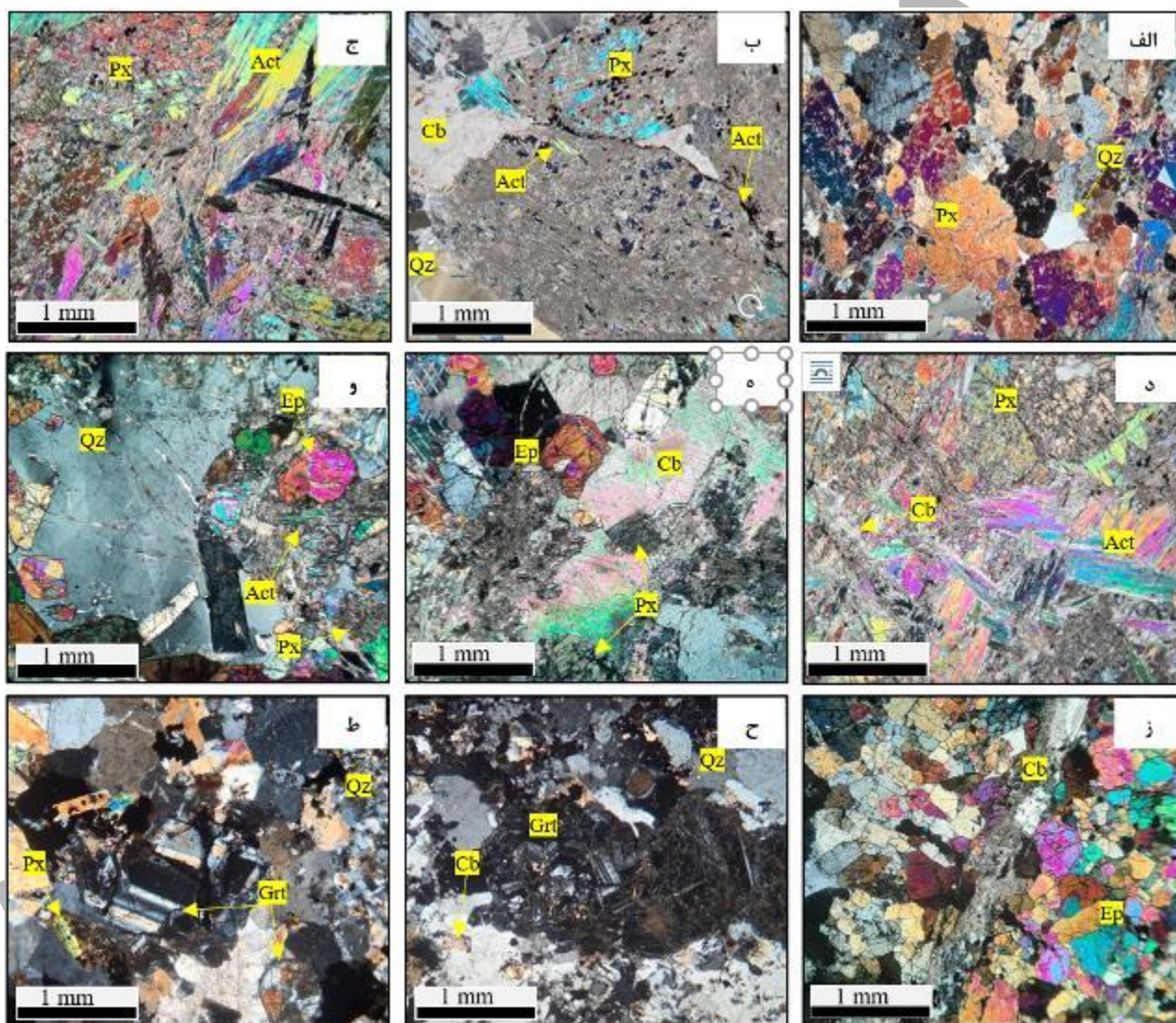
شکل ۵. تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از آپوفیز گرانودیوریتی، الف) موقعیت آپوفیز گرانودیوریتی که به داخل سنگ‌های دگرگونی نفوذ کرده است (دید به سمت غرب؛ ب) پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، آمفیبول، کوارتز و کانی‌های کدر با بافت دانه‌ای در آپوفیز گرانودیوریتی (نور پلاریزه؛ ج) تصویر میکروسکوپی از فابریک نماتوبلاستیک در آمفیبولیت؛ د) فابریک گرانوبلاستیک در آمفیبولیت؛ ه) پیریت دانه پراکنده با ادخال‌های کالکوپیریت در آپوفیز گرانودیوریتی؛ و) مگنتیت و پیریت دانه پراکنده؛ ز) مگنتیت دانه پراکنده.

کربنات‌ها 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 ۶-ج، د) و در زمینه

بر اساس مشاهدات صحرایی و مطالعات میکروسکوپی، شواهد دگرگونی مجاورتی در سنگ‌های میزبان دگرگونی کانی‌سازی شده قابل مشاهده است. غالباً این شواهد در زون‌های گسلی و در حاشیه‌ی رگه‌های سیلیسی کانه‌دار با دمای بالا ظاهر شده‌اند. در اثر نفوذ سیالات برخاسته از توده نفوذی، در زون‌های گسلی، آمفیبولیت‌ها و مرمرها متاسوماتیزه شده‌اند و کانی‌های پیروکسن، اکتینولیت، اپیدوت و مقدار محدودی گارنت با فابریک گرانوبلاستیک تشکیل شده‌اند. کوارتز و

و فضای بین بلورهای پیروکسن، اپیدوت و گارنت، کانی‌های کربناتی تشکیل شده‌اند (شکل ۶-ه). در بخش‌هایی نیز، در زمینه و فضای بین بلورهای اپیدوت و پیروکسن، کانی کوارتز متبلور شده (شکل ۶-و) و همچنین رگچه‌های کربناتی به همراه کوارتز زمینه متشکل از اپیدوت را قطع کرده‌اند. در برخی از رگه‌های سیلیسی کوارتز به همراه گارنت ناهمسانگرد با مقدار کمی پیروکسن و کربنات دیده می‌شود و دارای فابریک

گرانوبلاستیک هستند. در شکستگی‌های گارنت، کربنات‌ها 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 (شکل ۶-ح، ط). کانی‌سازی اصلی در این زون شامل گالن و همی‌مورفیت هستند.

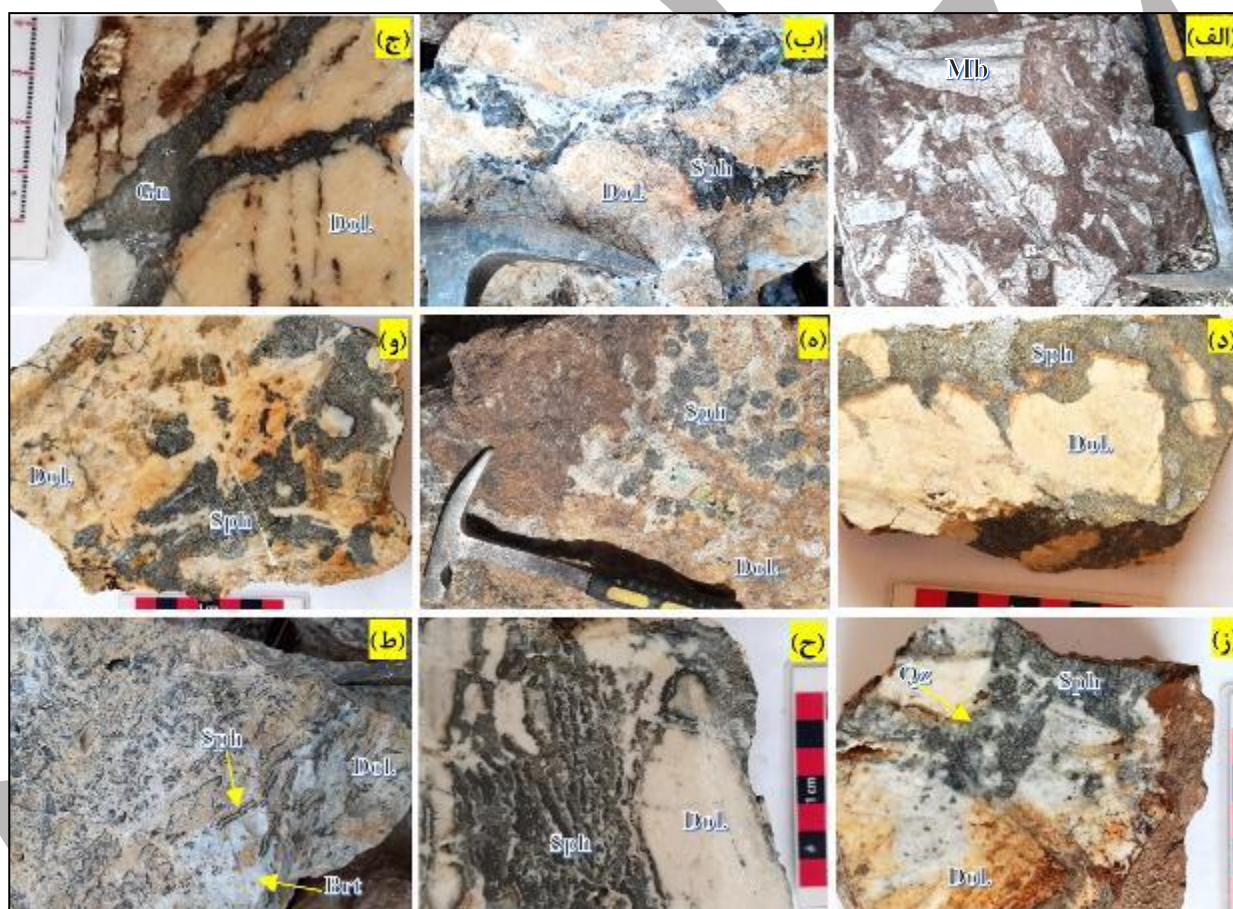


شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های اسکارنی معدن سرب- روی علم‌کندی (نور پلاریزه). الف) بلورهای خودشکل پیروکسن (Px) همراه با کوارتز (Qz) و کربنات گرمابی در پیروکسن هورنفلس؛ ب) بلورهای پیروکسن با بافت گرانوبلاستیک و کانی‌های کدر پراکنده در پیروکسن هورنفلس؛ ج) بلورهای خودشکل پیروکسن درون کربنات پیروکسن- اکتینولیت هورنفلس؛ د) دگرسانی بلورهای پیروکسن به بلورهای سوزنی ترمولیت و اکتینولیت (Act) و کربنات‌ها (Cb) در پیروکسن- اکتینولیت هورنفلس؛ ه) تشکیل اپیدوت (Ep) به همراه پیروکسن در زمینه کربناتی بلورین در اپیدوت- پیروکسن هورنفلس؛ و) تشکیل اپیدوت به همراه کوارتز در اپیدوت هورنفلس؛ ز) تشکیل کوارتز به همراه کربنات با بافت رگچه‌ای در زمینه متشکل از اپیدوت با فابریک گرانوبلاستیک؛ ح، ط) تشکیل بلورهای شکل‌دار گارنت (Grt) به همراه کوارتز، کربنات و پیروکسن؛ نور عبوری XPL.

کانی‌سازی

بر اساس مطالعات پیشین انجام شده توسط قزوینی‌زاده در معدن علم‌کندی [۱۰]، کانی‌سازی از نوع MVT و متشکل از اسفالریت، گالن، پیریت و مقدار کمی کالکوپیریت با دگرسانی شاخص دولومیتی شدن، سیلیسی شدن و پیریتی شدن گزارش شده و کانه‌زایی محدود به سنگ کربناتی معرفی شده است. براساس مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، کانی‌ها شامل اسفالریت، گالن، پیریت و مقدار کمی کالکوپیریت به همراه تتراهدريت هستند. به‌جز کانی‌سازی استراتاباند، نفوذ توده‌های

نفوذی در برخی مناطق از جمله علم‌کندی اغلب باعث ایجاد 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 تشکیل شده است (شکل ۷). 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 قطعات برشی‌شده مرمر دولومیتی طبقه‌بندی کرد (شکل ۷).



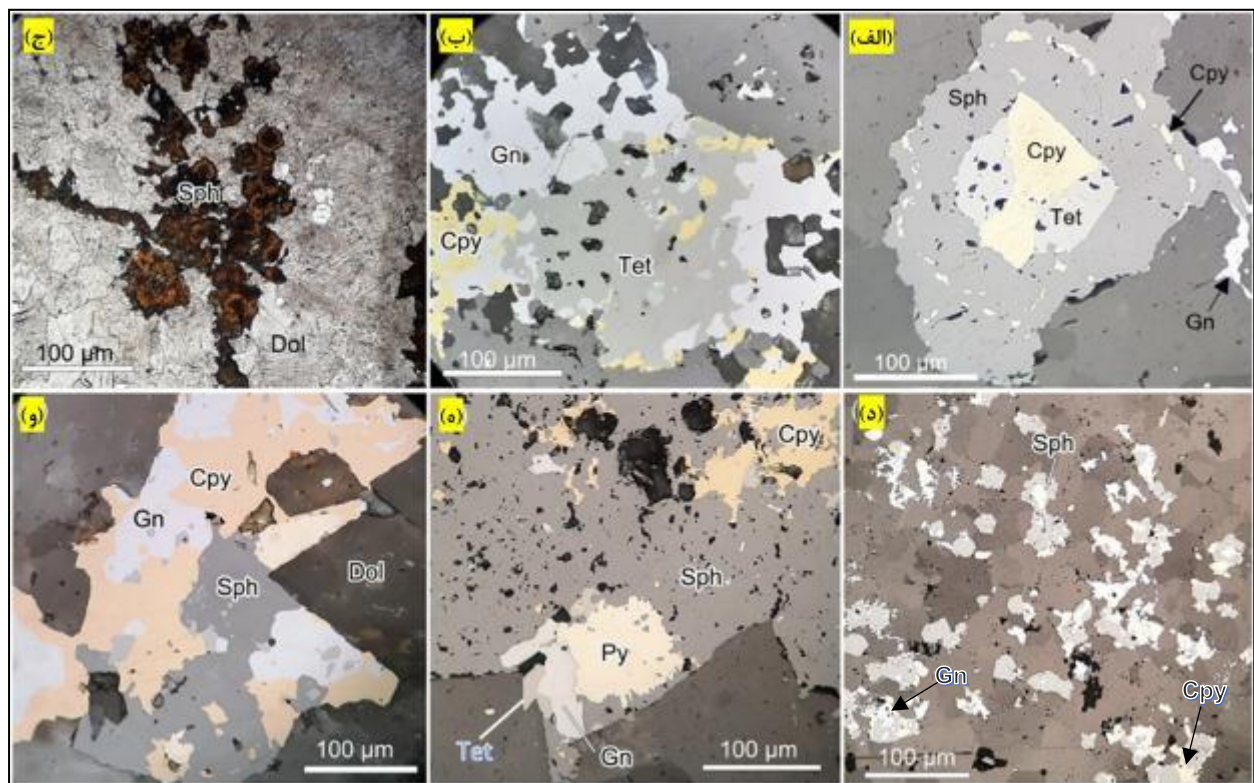
شکل ۷ عکس‌های نمونه دستی از کانی‌سازی اسفالریت (Sph) و گالن (Gn) در سنگ میزبان دولومیت (Dol) مرمری معدن سرب و روی علم‌کندی. الف- بافت برشی در دولومیت مرمری با سیمان کربنات آغشته به هیدراکسید آهن و سیدریتی، ب- تشکیل اسفالریت در شکستگی‌ها و فضای بین قطعات برشی کربناتی، ج- تشکیل گالن در شکستگی‌ها و فضای بین قطعات برشی کربناتی، د- تشکیل اسفالریت به صورت سیمان بین قطعات برشی، ه- تشکیل اسفالریت با بافت دانه پراکنده در زمینه کربناتی، و، ز- تشکیل اسفالریت به همراه رگه‌های سیلیسی در زمینه کربناتی، ح، ط- تشکیل اسفالریت با بافت نواری و کلوفرمی در زمینه کربناتی.

اصلی شامل کلسیت، دولومیت، کوارتز، اپیدوت، پیروکسن، ترمولیت، اکتینولیت، گارنت، کلریت، رس و فلدسپار هستند.

کانی‌های ثانویه شامل سریسیت، اسمیت‌زونیت، کوولیت، کالکوسیت، گوتیت، آزوریت و مالاکیت هستند. کانی‌های باطله

اسفالریت فراوان ترین کانه در علم کندی است. اسفالریت معمولاً از حاشیه ها و شکستگی ها توسط کانی های ثانویه از جمله اسمیت زونیت و همی مورفیت جایگزین می شود. در برخی قسمت ها، حاوی اذخال های گالن است. در شکستگی های اسفالریت، پیریت و گالن تشکیل شده اند. در بعضی نمونه ها، اسفالریت و گالن دارای مرز تعادلی با اسفالریت بوده و همزمان تشکیل شده اند. در بخش هایی از کانسنگ، اسفالریت دارای زون بندی است. فراوانی گالن از اسفالریت کمتر است. گالن در حاشیه کالکوپیریت تشکیل شده است. اذخال های کالکوپیریت و پیریت در داخل گالن تشکیل شده اند. این کانی با پیریت، اسفالریت و کالکوپیریت هم رشدی دارد. گالن از حاشیه و رخ ها در حال جانشینی با کانی های ثانویه از جمله سروزیت می باشد. پیریت فراوانی کمتری نسبت به اسفالریت و گالن دارد. گاهی اوقات همزمان با اسفالریت و گالن تشکیل شده است. حداقل سه نسل پیریت قابل تشخیص است. نسل اول پیریت ها قبل از کانه زایی 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 رگچه ای در شکستگی های اسفالریت

تشکیل شده است. پیریت معمولاً از حاشیه و شکستگی ها با گوتیت جانشین شده است. کالکوپیریت به صورت رگچه ای تشکیل شده و فضای خالی بین بلورهای خود شکل کوارتز را پر کرده است. از حاشیه و شکستگی ها، به کانی های ثانویه مانند کالکوسیت، گوتیت، آزوریت و ملاکیت دگرسان شده است. این کانی به صورت اذخال در داخل گالن نیز تشکیل شده است. ابعاد اذخال های 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 گزارش شده در این کانسار است. تتراهدریت، کالکوپیریت و گالن به صورت اذخال در اسفالریت تشکیل شده اند (شکل های ۸، ۹، ۱۰). در معدن علم کندی، شکستگی های ناشی از گسل ها به عنوان مسیر عبور و مجرای سیالات گرمایی حاوی کانی ها عمل کرده اند. بر اساس شواهد موجود، می توان گفت که فعالیت تکتونیکی پس از کانی سازی ادامه داشته است. تکتونیک بر برخی از کانی ها، از جمله گالن و پیریت، تأثیر گذاشته و باعث شکسته شدن و برشی شدن آنها شده است. همچنین باعث دگرشکلی گالن ها شده است.

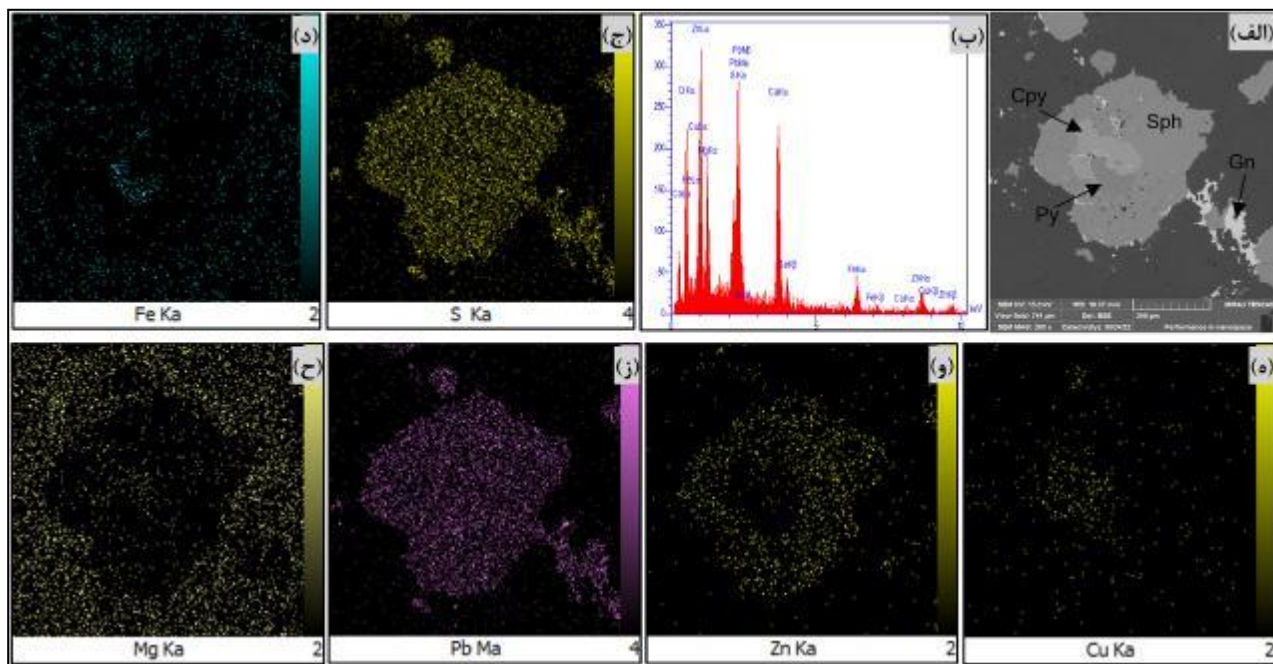


شکل ۸) تصاویر میکروسکوپی با نور بازتابی از کانی‌های سولفیدی در معدن علم‌کندی. الف) ادخال‌های کالکوپیریت (Cpy) و تتراهدریت (Tet) با بافت ساعت شنی در اسفالریت (Sph)؛ ب) تصویر با نور بازتابی از هم‌رشدی کالکوپیریت (Cpy)، گالن (Gn) و تتراهدریت (Tet) در داخل اسفالریت؛ ج) عکس میکروسکوپی با نور عبوری از اسفالریت (Sph) در زمینه دولومیت (Dol) مرمی؛ د) کانه‌های افشان شامل اسفالریت (Sph)، کالکوپیریت (Cpy) و گالن (Gn) در سنگ میزبان دولومیت مرمی؛ ه) عکس میکروسکوپی از اسفالریت (Sph) که کانه‌های تتراهدریت، پیریت، گالن و کالکوپیریت را احاطه است؛ و) عکس میکروسکوپی از کالکوپیریت (Cpy)، پیریت، گالن (Gn) و اسفالریت (Sph) در سنگ میزبان کربناتی معدن علم‌کندی.

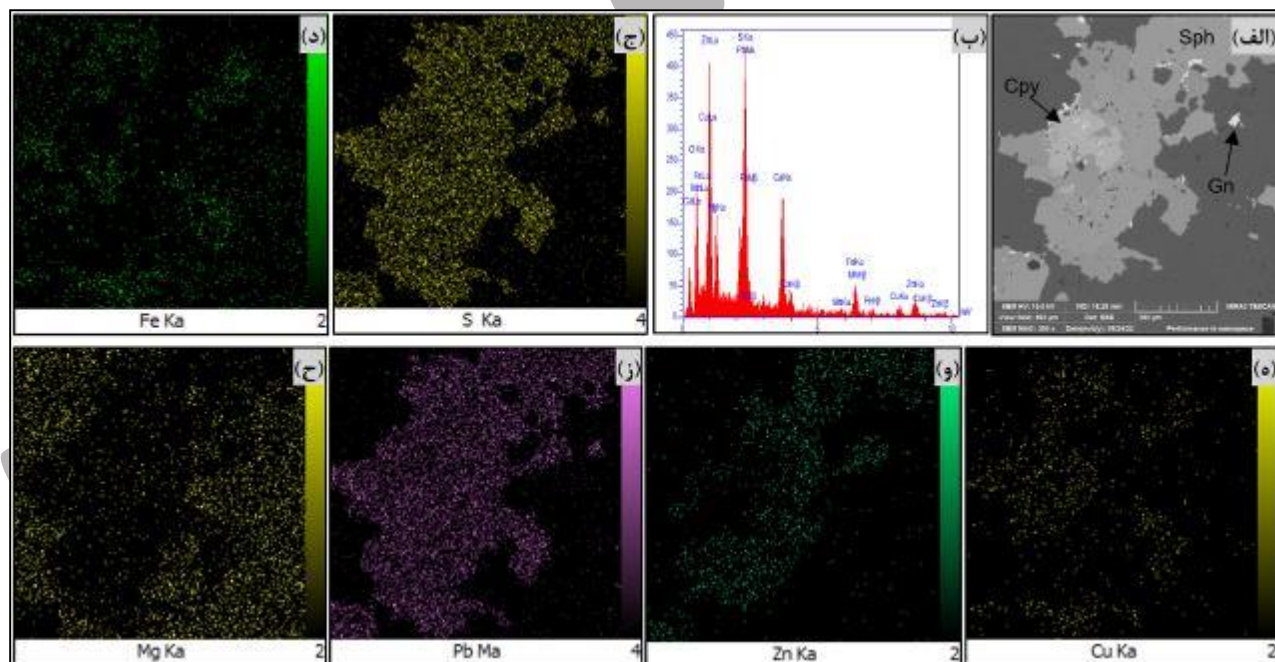
زمین‌شیمی و شیمی کانی‌ها

نتایج مطالعات میکروسکوپی، SEM/BSE و میکروپروب الکترونی نشان داد که کانی‌های تتراهدریت در حاشیه کانی‌های کالکوپیریت و گالن تشکیل شده‌اند و مجموعه کانی‌های کالکوپیریت، گالن و تتراهدریت به صورت ادخال در

اسفالریت حضور دارند (شکل ۸). بنابراین، تتراهدریت با کانی‌های سولفیدی هم‌رشدی دارد. مطالعات نقشه‌برداری عنصری SEM/BSE توزیع عناصر S, Fe, Cu, Zn, Pb و Mg را در کانی‌های اسفالریت، گالن، پیریت و کالکوپیریت نشان می‌دهد (شکل‌های ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲).



شکل ۹ الف- تصویر SEM/BSE که کانی‌های گالن (Gn)، اسفالریت (Sph)، پیریت (Py) و کالکوپیریت (Cpy) را نشان می‌دهد؛ ب- نمودار سمت چپ تحلیل‌های طیف‌سنجی پراش انرژی (EDS) را نشان می‌دهد که ترکیب کانی‌ها را ارائه می‌دهد؛ ج تا ح: نقشه‌برداری عنصری TEM/BSE که توزیع عناصر (ج) گوگرد، (د) آهن، (ه) مس، (و) روی، (ز) سرب و (ح) منیزیم را در کانی‌های گالن، اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت نشان می‌دهد.

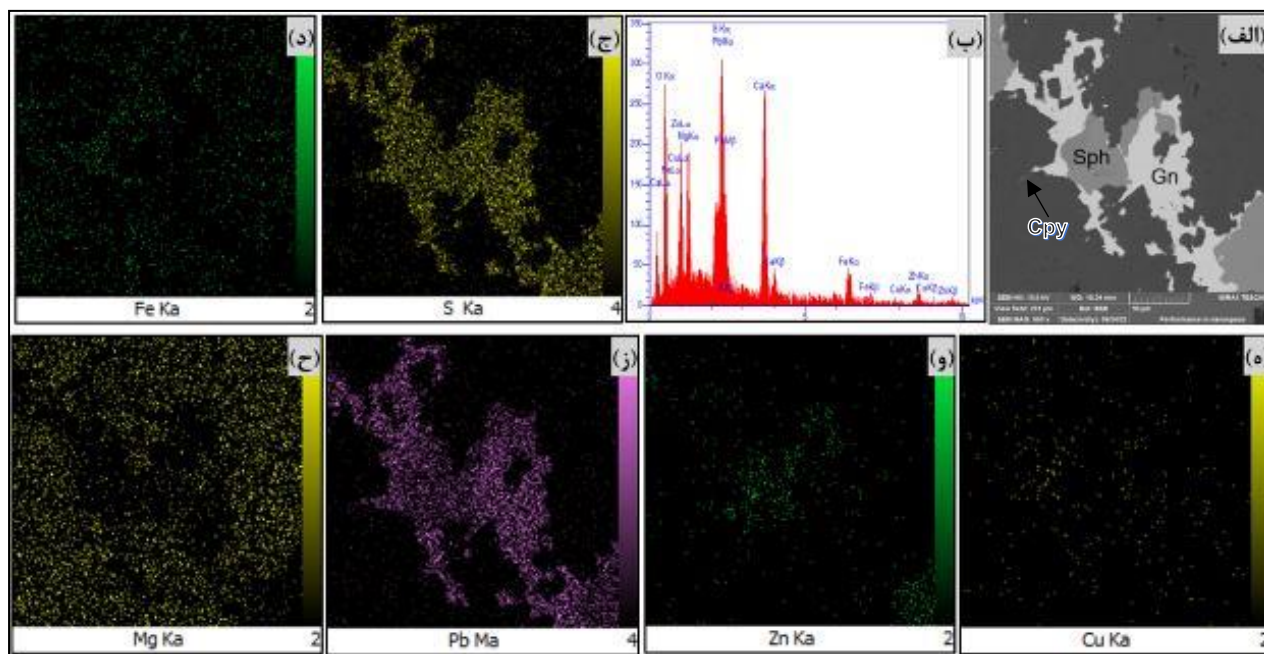


شکل ۱۰ الف- تصویر SEM/BSE که بافت خودشکل گالن (Gn)، اسفالریت (Sph) و کالکوپیریت (Cpy) را نشان می‌دهد؛ ب- نمودار سمت چپ تحلیل‌های طیف‌سنجی پراش انرژی (EDS) را نشان می‌دهد که ترکیب کانی‌ها را ارائه می‌دهد؛ ج تا ح: نقشه‌برداری عنصری TEM/BSE که توزیع عناصر (ج) گوگرد، (د) آهن، (ه) مس، (و) روی، (ز) سرب و (ح) منیزیم را در کانی‌های گالن، اسفالریت و کالکوپیریت نشان می‌دهد.

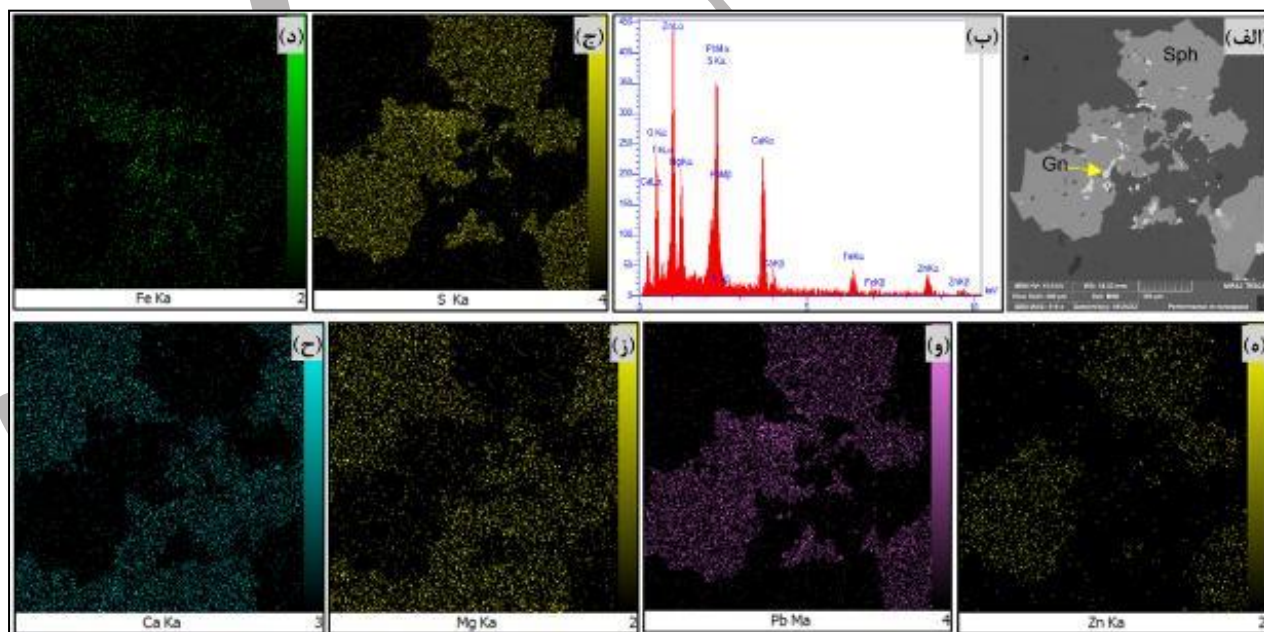
شوند. بسیاری از این عناصر می‌توانند به عنوان محصولات جانبی استخراج شوند. برای درک توزیع عناصر نادر/کمیاب در

بسیاری از عناصر نادر و کمیاب می‌توانند با غلظت‌های مختلف وارد شبکه بلوری کانی‌های سولفیدی و سولفوسالتی

کانی‌های سولفیدی و تتراهدریت، به‌ویژه نقره، از روش میکروپروب الکترونی استفاده شد.



شکل ۱۱) الف- تصویر SEM/BSE که کانی‌های گالن (Gn)، اسفالریت (Sph) و کالکوپریت (Cpy) را نشان می‌دهد؛ ب- نمودار سمت چپ تحلیل‌های طیف‌سنجی پراش انرژی (EDS) را نشان می‌دهد که ترکیب کانی‌ها را ارائه می‌دهد؛ ج تا ح: نقشه‌برداری عنصری TEM/BSE که توزیع عناصر (ج) گوگرد، (د) آهن، (ه) مس، (و) روی، (ز) سرب و (ح) منیزیم را در کانی‌های گالن، اسفالریت و کالکوپریت نشان می‌دهد.



شکل ۱۲) الف- تصویر SEM/BSE که بافت نیمه‌شکل گالن (Gn) و اسفالریت (Sph) را نشان می‌دهد؛ ب- نمودار سمت چپ تحلیل‌های طیف‌سنجی پراش انرژی (EDS) را نشان می‌دهد که ترکیب کانی‌ها را ارائه می‌دهد؛ ج تا ح: نقشه‌برداری عنصری TEM/BSE که توزیع عناصر (ج) گوگرد، (د) آهن، (ه) روی، (و) سرب، (ز) منیزیم و (ح) کلسیم را در کانی‌های گالن و اسفالریت نشان می‌دهد.

پیریت و تتراهدریت به صورت حداقل، حداکثر و میانگین در جدول ۱ ارائه شده است. غلظت نقره در گالن به ۰/۲۹ درصد

داده‌های آنالیز میکروپروب الکترونی برای عناصر کمیاب در سولفیدهای فلزات پایه (گالن، اسفالریت، کالکوپریت و

وزنی می‌رسد که بالاترین مقدار در مقایسه با سایر عناصر اندازه‌گیری شده است. مقدار مس در اکثر نقاط آنالیزی داخل 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 مانند Zn, Sb, As, Fe, 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. 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 بزرگ در مقادیر عناصر به ویژه (Fe) در اسفالریت می‌تواند به دلیل حضور نسل‌های مختلف اسفالریت از جمله اسفالریت دما پایین

به همراه اسفالریت دما بالا باشد که با استفاده از مطالعات سیالات درگیر تأیید خواهد شد. کالکوپریت میزبان Pb و Zn به ترتیب تا ۰/۰۶ و ۰/۰۵ درصد وزنی است. نقره در کالکوپریت فراوانی ناچیزی دارد. پیریت و تتراهدریت نسبت به سایر کانی‌ها از نظر Co غنی‌تر هستند، اما مقدار کبالت در این دو کانی نیز بسیار کم است. غلظت نیکل در پیریت ۰/۰۶ درصد وزنی است. نتایج آنالیز تتراهدریت نشان می‌دهد که این کانی‌ها غنی از نقره و روی هستند. غلظت نقره در تتراهدریت بین ۹/۹ تا ۱۰/۸ درصد وزنی متغیر است. میانگین مقادیر آنتیموان حدود ۲۸/۳ درصد وزنی است. حداکثر مقدار As حدود ۰/۲ درصد وزنی است.

جدول ۱ غلظت عناصر کمیاب در کانی‌های سولفیدی (گالن، اسفالریت و کالکوپریت) و سولفوسالت (تتراهدریت) که با استفاده از 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	0.063	ND	ND	ND	ND	ND	85.208	13.298	ND	ND
Max	0.296	0.008	0.014	0.041	0.148	0.011	86.3411	13.668	0.106	0.032
Ave	0.185	0.003	0.006	0.014	0.031	0.005	85.787	13.495	0.042	0.019
b. Sphalerite										
Min	ND	ND	0.002	0.006	0.075	ND	ND	32.454	ND	63.7293
Max	0.401	0.079	0.017	1.129	0.685	0.011	0.219	33.007	1.183	66.273
Ave	0.144	0.026	0.008	0.303	0.349	0.005	0.104	32.766	0.403	65.576
c. Chalcopyrite										
Min	ND	ND	ND	34.195	30.093	ND	ND	34.631	ND	0.018
Max	0.027	0.017	0.004	34.526	30.647	0.004	0.061	35.127	0.001	0.051
Ave	0.018	0.016	0.002	34.327	30.281	0.003	0.035	34.837	0.000	0.036
d. Pyrite										
	0.0051	0.0084	0.0262	0.0136	47.219	0.064	ND	53.6918	0.0007	0.0363
e. Tetrahedrite										
Min	9.913	0.146	0.011	29.275	0.769	ND	ND	23.491	28.038	6.055
Max	10.770	0.192	0.033	29.439	0.951	0.001	0.147	23.651	28.291	6.257
Ave	10.446	0.165	0.023	29.347	0.887	0	0.049	23.289	28.143	6.172

دگرسانی

دگرسانی سنگ میزبان معدن علم‌کندی عمدتاً شامل کربنات-زدایی، اسکارنی (مانند پیروکسن، اپیدوت، گارنت، ترمولیت و اکتینولیت)، دگرسانی پیریتی، سیلیسی، کربناتی و اکسید آهنی است. کربنات‌زدایی به دلیل انحلال کلسیت در مرمورها توسط سیالات گرمایی 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 مشاهدات صحرایی و میکروسکوپی، سیلیسی‌شدن و کانی‌های اسکارنی در این معدن رخ داده است. اسکارن‌های بی‌آب عمدتاً شامل پیروکسن و مقدار 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 کربناته نتیجه دگرسانی گارنت و پیروکسن به کلسیت و همچنین ته‌نشست کربنات‌های انحلال یافته در داخل سیالات گرمابی است. کانی‌های کلسیت در فضای بین اپیدوت و همچنین به صورت رگچه‌ها مشاهده می‌شوند. دگرسانی سیلیسی به صورت رگچه‌های سیلیسی-سولفیدی حضور دارد. رگه و رگچه‌های کربناته و سیلیسی سنگ میزبان مرمری و اسکارن را قطع کرده 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 است. جدا شدن فاز سیال از توده نفوذی و مهاجرت این سیال به سمت سنگ‌های میزبان، باعث تحرک و جابجایی عناصر بین دو گرادیان شیمیایی و دمایی مختلف و در نهایت وقوع واکنش‌های مناسب می‌شود. در این مرحله، واکنش‌های کربنات‌زدایی رخ داده و حجم فضاهای خالی سنگ میزبان افزایش می‌یابد. این واکنش‌ها همراه با شکستگی‌های تکتونیکی، مسیرهای عبوری برای سیالات فراهم می‌کنند تا به داخل سنگ میزبان نفوذ کنند. سیالات ماگمایی با دمای حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد باعث تشکیل اسکارن بی‌آب می‌شوند [۴۰]. در معدن علم‌کندی، کربنات‌زدایی واحد مرمر و تحرک عناصر و ورود Fe ، SiO_2 و Mg به داخل فضاهای خالی آن، موجب ایجاد کانی‌های کالک‌سیلیکاته بی‌آب گارنت و پیروکسن در مرمر و تشکیل اسکارنوئید شده است. با ورود سیالات گرمابی دما پایین‌تر و جذب آب و کربن و نیز ایجاد سولفیدها در ریز شکستگی‌های کانی‌های کالک‌سیلیکاته بی‌آب تشکیل شده در اسکارنوئید، بخشی از آنها توسط کانی‌های کالک-سیلیکاته آبدار (اپیدوت و اکتینولیت)، سولفیدها (همانند 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 [۴۲، ۴۱]. کانه‌های سولفیدی پراکنده‌ی فضاهای

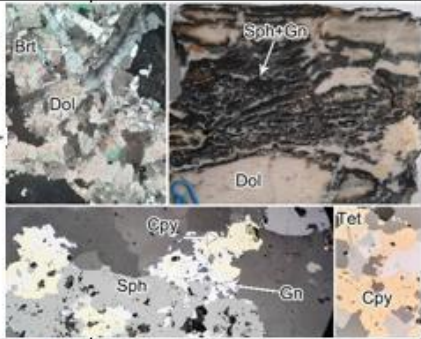
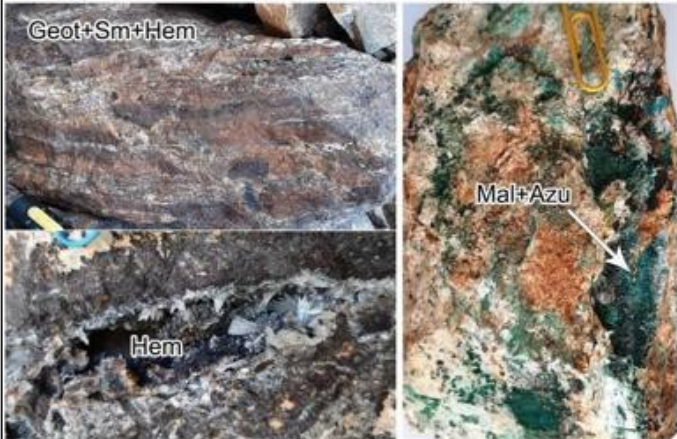
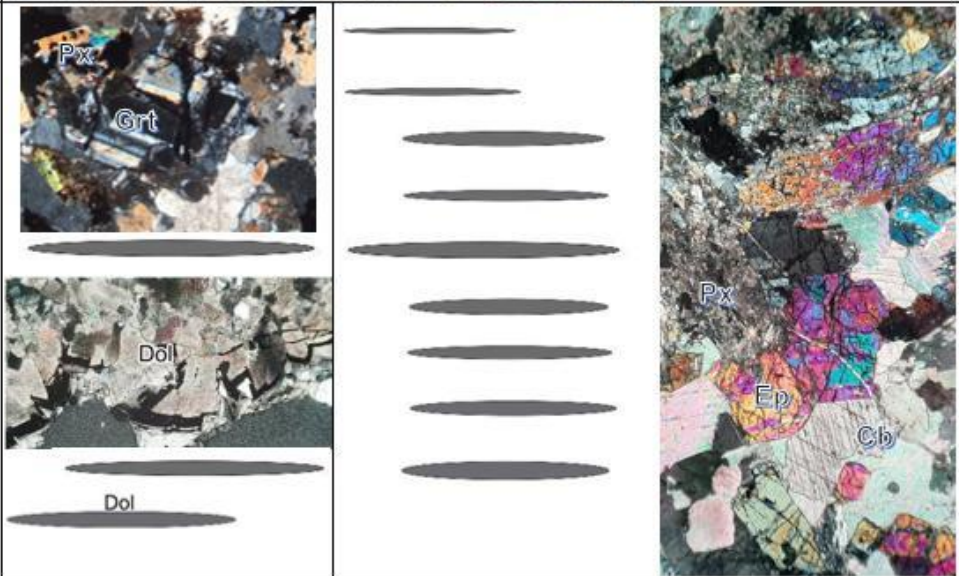
بین گارنت و پیروکسن نشان‌دهنده‌ی تشکیل گارنت و پیروکسن قبل از کانه‌های سولفیدی می‌باشد. حضور کانه‌های سولفیدی ریزبلور در داخل بلورهای پیروکسن و گارنت در همراهی با کانی‌هایی مانند اکتینولیت و کلریت بیانگر تشکیل کانه‌های سولفیدی بعد از پیروکسن و گارنت می‌باشد. در نهایت، مجموعه کانی‌های کالک‌سیلیکاته بی‌آب و آبدار تشکیل‌شده در مراحل قبلی، توسط سیالات با دمای نسبتاً پایین‌تر دگرسان شده و به کانی‌های کلسیت، رس، کلریت و کوارتز تبدیل شده‌اند.

توالی پاراژنزی

به‌طور کلی، با توجه به نتایج به‌دست آمده از بررسی‌های صحرایی، سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری، انواع کانی‌های کالک‌سیلیکاته بی‌آب و آبدار، سیلیکات‌ها، اکسیدها و هیدروکسیدها، سولفیدها و کربنات‌ها در کانه‌زایی مرحله اول به صورت استراتاباند و جانشینی در سنگ‌های کربناتی تشکیل شده و در ادامه و مرحله‌ی دوم، کانه‌زایی تحت تأثیر سیالات با منشأ ماگمایی قرار گرفته و اسکارنی شده است. شواهد متاسوماتیزم در این مرحله از کانه‌زایی مشهود است و در مرحله‌ی نهایی، تحت تأثیر سیالات جوی، کانی‌های برونزاد به وجود آمده‌اند. شواهد مربوط به توالی پاراژنتیکی کانی‌های معدنی در معدن علم‌کندی شامل موارد زیر است: در مرحله‌ی اول طی کانه‌زایی استراتاباند، کانی‌های اسفالریت، گالن، پیریت و کالکوپیریت به همراه تتراهدریت و باریت به صورت جانشینی در سنگ کربناته و با بافت دانه‌پراکنده، رگچه‌ای و جانشینی تشکیل شده است. دگرسانی شاخص در این مرحله شامل دولومیتی‌شدن، سیلیسی‌شدن و پیریتی‌شدن است. در مرحله‌ی بعد، سیالات با منشأ ماگمایی، کانه‌زایی مرحله‌ی اول را تحت تأثیر قرار داده است. اذخال‌های پیریت درون کالکوپیریت و گالن و همچنین حضور کالکوپیریت در شکستگی‌های پیریت؛ رگچه‌های پیریت که اسفالریت را قطع کرده‌اند؛ گالن توسط پیریت احاطه شده است؛ اذخال‌های کالکوپیریت درون گالن و اسفالریت و همچنین تشکیل کالکوپیریت به صورت رگچه‌ای و تشکیل گالن در حاشیه

اسمیت زونیت، همی مورفیت، گوتیت، مالاکیت، آزوریت، کالکوسیت و سروزیت بعد از کانه‌های هیپوژن تشکیل شده‌اند. در شکل ۱۳، توالی پاراژنتیکی کانی‌های معدن علم‌کندی ترسیم شده است.

رگچه‌های کالکوپیریت؛ اذخال‌های گالن و اسفالریت درون کالکوپیریت؛ اذخال‌های گالن درون اسفالریت و تشکیل گالن به صورت رگچه‌ای درون اسفالریت؛ تشکیل همزمان اسفالریت، گالن و پیریت با مرزهای تعادلی؛ تتراهدریت با اسفالریت، کالکوپیریت و گالن هم‌رشدی دارد؛ کانی‌های سوپرژن مانند

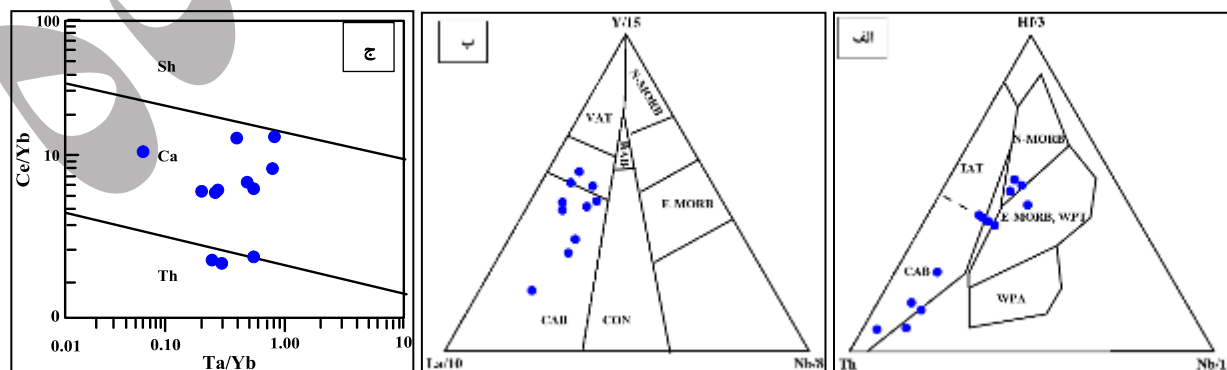
Ore-Forming Processes			
Minerals	Stratabound carbonate replacement Stage	Metamorphism Stage	Supergene Stage
Sphalerite	Sph	Sph	
Galena	Gn	Gn	
Pyrite			
Chalcopyrite	Cpy	Cpy	
Tetrahedrite	Tet		
Barite			
Covellite	Geot+Sm+Hem		
Chalcocite			Sm
Smithsonite			Hem
Hemimorphite			
Cerussite			Mal
Malachite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

شده است. در نمودار مثلثی Nb/16-Hf/3-Th [۵۰]، برخی از نمونه‌های دگرگونی کانسار علم‌کندی در محدوده‌ی بازالت‌های کالک‌آلکان کمان آتشفشانی و بازالت پشته‌ی میان اقیانوسی قرار گرفته‌اند که نشان می‌دهد ممکن است در بالای یک منطقه فروورانش فعال تشکیل شده باشند (شکل ۱۴-الف). در نمودار مثلثی La/10-Y/15-Nb/8 [۵۱]، نمونه‌ها در محدوده‌ی بازالت کالک‌آلکان کمان ماگمایی قرار گرفته‌اند (شکل ۱۴-ب) اسکارن‌ها لزوماً یک محیط زمین‌شناسی خاص یا یک پروتولیت خاص را نشان نمی‌دهند [۴۰].

اغلب نمونه‌های آمفیبولیت معدن علم‌کندی بر اساس نمودار عناصر کمیاب Ta/Yb در مقابل Ce/Yb [۵۲]، سری ماگمایی کالک‌آلکان و تعداد کمی در مناطق تولیتی قرار دارند که نوع سری‌های ماگمایی و وابستگی ماگماهای والد را نشان می‌دهد (شکل ۱۴-ج). به باور پیرس و همکاران [۵۲]، گوشته‌ی بالای یک زون فروورانش می‌تواند ماگمایی با ویژگی‌های کالک‌آلکان ایجاد کند. تشکیل ماگمای کالک‌آلکان در زون فروورانش به میزان 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 کالک‌آلکان ایجاد می‌شود؛ در حالیکه در مقادیر کمتر آب یا درجه‌ی پایین ذوب بخشی گوه‌ی گوشته‌ای، ماگمای آلکان تشکیل می‌شود [۵۳].

محیط تکتونیکی و ماهیت ماگمای والد سنگ‌های دگرگونی

ژئوشیمی سنگ‌های مافیک دگرگونی، به ویژه آمفیبولیت، برای تعیین محیط تکتونیکی سنگ‌های ماگمایی والد مورد استفاده قرار گرفته است [۳۳، ۴۳، ۴۴]. تمام نمونه‌های معدن علم‌کندی نشان‌دهنده میزان مشخصی از دگرسانی و دگرگونی گرمایی هستند که نشان می‌دهد بیشتر عناصر با شدت میدان کم (LFSE) و عناصر اصلی متحرک بوده‌اند [۴۵-۴۷]. عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) و عناصر نادر خاکی (REE) به جز Eu) اغلب به عنوان غیرمتحرک در نظر گرفته می‌شوند، اما در شرایط دگرسانی شدید گرمایی ممکن است متحرک شوند. در نمونه‌های به شدت دگرسان شده، تحرک Y و LREE می‌تواند با الگوهای فن شکل REE و نسبت‌های Y/Zr و La/Zr غیرعادی نسبت به نسبت‌های Nb/Zr و Yb/Zr قوی‌تر تعیین شود. با وجود قابلیت تحرک عناصر در نمونه‌های به شدت دگرسان و دگرگون شده، عناصر غیرمتحرک برای تعیین ویژگی‌های اولیه پتروژنتیکی مانند وابستگی ماگمایی یا محیط تکتونیکی کاربرد دارند. عناصری مانند Zr، Ti، La، Yb و Nb به دلیل غیرمتحرک بودنشان در طی دگرسانی گرمایی برای نتیجه‌گیری از ویژگی‌های پتروژنتیکی اولیه در نواحی آتشفشانی دگرسان شده استفاده می‌شوند [۴۸، ۴۹]. محیط تکتونیکی نمونه‌های آمفیبولیت علم‌کندی با استفاده از نمودارهای مثلثی تکتونیکی (شکل ۱۴) مشخص



شکل ۱۴) الف- نمودار مثلثی Nb/16-Hf/3-Th [۵۰]، نمونه‌های آمفیبولیت معدن علم‌کندی در محدوده‌ی بازالت‌های کالک‌آلکان کمان آتشفشانی و بازالت پشته‌ی میان اقیانوسی قرار می‌گیرند؛ ب) در نمودار مثلثی La/10-Y/15-Nb/8 [۵۱]، نمونه‌ها در محدوده‌ی بازالت کالک‌آلکان کمان ماگمایی قرار گرفته‌اند. ج) پلات نمونه‌های آمفیبولیت معدن علم‌کندی بر روی نمودار Ta/Yb در برابر Ce/Yb [۵۲]، که نشان‌دهنده‌ی کالک‌آلکان بودن ماگمای اولیه‌ی اغلب نمونه‌ها است. N-MORB: N-type mid-ocean ridge. Sh: Shoshonite; Ca: Calc alkaline; Th: Tholeiite.

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس طبقه‌بندی‌های [۵۵،۵۴] 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، جانیشینی، برشی) و دگرسانی‌ها (دولومیتی‌شدن، پیریتی‌شدن، کربن‌زدایی، کربناتی‌شدن و سیلیسی‌شدن)، کانسار علم‌کندی یکی از انواع کانی‌سازی‌های اپی‌ژنتیک Pb-Zn است. کانسار علم‌کندی به عنوان یکی از مهم‌ترین کانسارهای سرب-روی در زیرپهنه تکاب- مهنشان، با ویژگی‌های خاص زمین‌شناسی و کانی‌سازی خود، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. بررسی‌های میکروسکوپی، ژئوشیمیایی و شیمی کانی‌ها در این تحقیق نشان می‌دهد که این کانسار به صورت استراتاباند تشکیل شده و تحت تأثیر فرایندهای متعدد دگرگونی، از جمله دگرگونی مجاورتی و دگرسانی قرار گرفته است.

۱- محیط تکتونیکی و پیوند ماگمایی

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

تجزیه و تحلیل داده‌های تکتونیکی به ویژه نمودارهای مثلی $\text{La}/10\text{-Nb}/8\text{-Y}/15$ و $\text{Hf}/3\text{-Th-Nb}/16$ ، نشان‌دهنده این است که بخش عمده‌ای از کانسار علم‌کندی در محیطی شکل گرفته که در آن، فعالیت‌های تکتونیکی ناشی از فرورانش

باعث ایجاد شرایط مناسب برای تمرکز عناصر فلزی و تشکیل کانی‌های معدنی شده است.

۲- دگرسانی و فرایندهای اسکارن‌سازی

دگرسانی‌های مختلفی در کانسار علم‌کندی رخ داده که نقش کلیدی در تشکیل کانی‌های اقتصادی ایفا کرده‌اند. کربنات زدایی که در نتیجه انحلال کلسیت در مرمرها توسط سیالات گرمابی رخ داده، باعث ایجاد فضاهای خالی و افزایش نفوذپذیری سنگ‌های میزبان شده است. این فرآیند با تشکیل اسکارن‌های بی‌آب و آبدار همراه بوده که از پیروکسن، اپیدوت، گارنت و سایر کانی‌های کالک‌سیلیکاته تشکیل شده‌اند.

دگرسانی‌های سیلیسی و کربناته نیز نقش مهمی در تغییر ترکیب سنگ‌های میزبان و تمرکز عناصر فلزی ایفا کرده‌اند. این دگرسانی‌ها منجر به تشکیل کانی‌های سولفیدی مانند اسفالریت، گالن، پیریت و کالکوپیریت شده‌اند که در مراحل مختلف دگرگونی و تحت تأثیر سیالات گرمابی شکل گرفته‌اند.

۳- کانی‌سازی و پارائز کانی‌ها

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

تشکیل کانی‌های سولفیدی در مراحل مختلف و با تغییرات دمایی، نشان‌دهنده پیچیدگی فرایندهای کانی‌سازی در این کانسار است. این کانی‌ها در فضاهای باز و شکستگی‌ها پر شده‌اند و به دنبال آن‌ها کانی‌های ثانویه‌ای مانند همی‌مورفیت، اسمیت‌زونیت، سروزیت، گوتیت، ملاکیت، آزوریت، کالکوسیت و سربسیت شکل گرفته‌اند که به عنوان محصولات سوپرژن جایگزین کانی‌های هیپوژن شده‌اند.

نتیجه‌گیری کلی

منطقه، می‌تواند به عنوان یک الگوی اکتشافی برای شناسایی و بهره‌برداری از کانسارهای مشابه در زیرپهنه تکاب- ماهشان و مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

قدردانی

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

مراجع:

- [1] Daliran, F., 2008. The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran, hydrothermal alteration and mineralization. *Mineralium Deposita*, 43, 383-404.
- [2] Daliran, F., Hofstra, A.H., Walther, J. and Stüben, D., 2002. Aghdarreh and Zarshuran SRHDG deposits, Takab region, NW Iran, GSA Annual Meeting, Abstract with Programs, P.8-63.
- [3] Mehrabi, B., Yardley, B. W. D. and Cam, J. R., 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran. *Mineralium Deposita*, 34: 673-696.
- [4] Asadi, H.H., Voncken, J.H.L., Kühnel, R.A., Hale, M., 2000. Petrography, mineralogy, and geochemistry of the Zarshuran Carlin-like gold deposit, northwest Iran. *Mineralium Deposita*, 5, 656-671.
- [5] Gilg, H. A., Boni, M., Balassone, G., Allen, C. R., Banks, D. and Moore, F., 2006. 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, 1-16.
- [6] Boni, M., Gilg, H.A., Balassone, G., Schneider, J., Allen, C.R., Moore, F., 2007. Hypogene Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran. *Mineralium Deposita*, 42, 799-820.
- [7] Marangi, H., Azimzadeh, A.M., Nabatian, Gh., Kouhestani, H., Mohammadi Niaei, R., 2017. 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), 65-113.
- [8] Karami, F., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Azimzadeh, A.M., 2021. 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), 165-192.
- [9] Karbasi, A., 2014, final report of Halab zinc-lead exploration. Organization of Industry, Mining and Trade of Zanjan Province.
- [10] Ghazvinizadeh, A.M., 2005. Genesis of Alamkandi Pb-Zn deposit, Zanjan Province. MSc. thesis, University of Kharazmi, Tehran (In Persian with English abstract).
- [11] Shirkhani, M., 2008. Mineralogy, geochemistry and genesis of Ay Qalasi Lead and Zinc deposit, south east of Takab. M.Sc. thesis, Tarbiat Modares University, 143 p.
- [12] Mohammadi Niaei, R., Daliran, F., Nezafati, N., Ghorbani, M., Sheikh Zakariaei, J.,

Kouhestani, H., 2015. 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., Sheikhzakariaei, Daliran, F., 2022. 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., 2015. 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., 2015. Arabshah Mineral Occurrence: Carlin-Type Epithermal Gold-Arsenic-Antimony Mineralization in Takab-Angouran Metallogenic Zone, Takht Soleiman, West Azerbaijan, *Advanced Applied Geology*, 25, 61-76.

[16] Talebi, L., Mokhtari, M.A.A., Ebrahimi, M., Kouhestani, H., 2016. 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., 2015. 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).

[18] Pour Mohammad, F., Kohestani, H., Azimzadeh, A.M., Nabatian, Gh., Mokhtari, M.A.A., 2018., Mianaj iron occurrence, southwest of Zanjan: Metamorphosed and deformed volcano-sedimentary type of mineralization in Sanandaj- Sirjan zone. *Earth Sciences Quarterly. GSJ_Volume 28_Issue 111_Pages 161-174*.

[19] Mohammadi, Z., Ebrahimi, M., Kouhestani, H., 2013. Goorgoor Iron Occurrence, Northeast of Takab: Metamorphosed Volcano-Sedimentary Mineralization in Sanandaj- Sirjan zone. *Advanced Applied Geology*, 13, 20-32.

[20] Nouri, F., Mokhtari, M.A.A., Izadyar, J., Kouhestani, H., 2017. 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).

[21] Maanijou, M., Salemi, R., 2014. Mineralogy, chemistry of magnetite and genesis of Korkora-1 iron deposit, east of Takab, NW Iran. *Journal of Economic Geology*, 6, 355–374 (in Persian with English abstract).

[22] Maanijou, m., Khodaei, L., 2017. Mineralogy and electron microprobe study in Sarab-3 iron deposit, southwest of Shahrak mining area (east of Takab). *Economic Geology*, 10(1), 267-293.

[23] Nadari, A., Nabatian, Gh., Honarmand, M., Kouhestani, H., 2019. Geology and genesis of Halab Mn deposit, SW Zanjan, *Earth Science Quarterly. GEOSCIENCES*, Vol. 29, No. 115.

[24] Lotfi, M., Karimi, M., 2013. 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, 81-95.

[25] Alavi, M., (1994) Tectonics of Zagros Orogenic Belt of Iran, New Data and Interpretation. *Tectonophysics*, 229, 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., 2011. Zagros orogeny: A subduction-dominated process. *Geological Magazine* 148 (5-6). DOI: 10.1017/S001675681100046X.

[27] Rajabi, A., Rastad, E., Canet, C., 2012. Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn-Pb deposits of Iran: Geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. *International Geology Review*, 54(14), 1649-1672. DOI: 10.1080/00206814.2012.659110.

[28] Zhuang, L., Song, Y., Liu, Y., Fard, M., Hou, Z., 2019. 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, 184-200.

- [29] Mohajjel, M., 1997. Structure and tectonic evolution of Palaeozoic–Mesozoic rocks, Sanandaj–Sirjan Zone, western Iran. Ph.D. Thesis, University of Wollongong, Wollongong, Australia (unpublished), 226 p.
- [30] Aghazadeh, M., Castro, A., Rashidnejhad Omran, N., Emami, M.H., Moinvaziri, H., Badrzadeh, Z., 2010. The gabbro (shoshonitic)-monzonite-granodiorite association of Khankandi pluton, Alborz Mountains, NW Iran. *Journal of Asian Earth Science*, 38, 199–219.
- [31] Hassanzadeh, J., Wernicke, B.P., 2016. The Neotethyan Sanandaj–Sirjan zone of Iran is an archetype for passive margin-arc transitions. *Tectonics*, 35, 586–621.
- [32] Baghban, S., Hosseinzadeh, M.R., Moayyed, M., Mokhtari, M.A.A., Gregory, D., Mahmoudi Nia, H., 2016. 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., 2023. Back-arc Magmatism in the Cadomian Basin of NW Iran: Ortho-Amphibolites from the Alam-Kandi Area. *Geotectonics*, 57, 200–212.
- [34] Alavi, M., Amidi, M., 1976. Geological map of the Takab Quadrangle, West Azerbaijan Province, Scale 1: 250000. Iran Geological Survey and Mineral Explorations.
- [35] Daliran, F., Pride, K., Walther, W., Berner, Z.A., Bakker, R.J., 2013. The Angouran Zn (Pb) deposit, NW Iran: evidence for a two-stage, hypogene zinc sulfide–zinc carbonate mineralization. *Ore Geology Reviews*, 53, 373–402.
- [36] Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, Volume 95, pages 185–187.
- [37] Babakhani, A.R., Ghalamghash, J., 1996. Geological map of Takht-e-Soleyman, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- [38] Fonoudi, M., Hariri, A., 1999. Geological map of Takab, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- [39] Berger, B.R., Bagby, W.C., 1991. The geology and origin of Carlin-type gold deposits, in: Foster, R.P. (ed.), *Gold metallogeny and exploration*, pp. 210–248.
- [40] Meinert, L.D., 1992. Skarns and skarn deposits, *Geoscience Canada*, 19(4), 145–162.
- [41] Berman, R.G., Brown, T.H., Greenwood, H.J., 1985. An internally consistent thermodynamic database for minerals in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$. Atomic Energy of Canada Technical Report, TR-337, 62 p.
- [42] Perkins, E.H., Brown, T.H., Berman, R.G., 1986. PTX-SYSTEM: Three programs for calculation of pressure-temperature-composition phase diagrams. *Comput Geoscience* 12, 749–755.
- [43] Advay, M., Moazzen, M., Hajialioghli, R., 2016. Geochemical features of amphibolites from the Qarehaghaj area, East Azerbaijan, NW Iran; implications for paleotectonic setting. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 281(1), 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., 2019. 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 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data. *Lithos*, 332–333, 340–354.
- [45] Spitz, G., Darling, R., 1978. Major and minor element lithogeochemical anomalies surrounding the Louvem copper deposit, Vald’Or, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15, 1161–1169.
- [46] Saeki, Y., Date, J., 1980. Computer application to the alteration data of the footwall dacite lava at the Ezuri Kuroko deposits, Akito Prefecture. *Mining Geology*, 30, 241–250.
- [47] Jenner, G.A., 1996. 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, 51–77.

- [48] MacLean, W.H., Kranidiotis, P., 1987. Immobile elements as monitors of mass transfer in hydrothermal alteration: Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec, *Economic Geology*, 82, 951–62.
- [49] MacLean, W.H., Barrett, T.J., 1993. Lithogeochemical techniques using immobile elements: *Journal of Geochemical Exploration*, 48, 109–33.
- [50] Wood, D.A., 1980. 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, 11-30.
- [51] Cabanis, B., Lecolle, M., 1989. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil 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, 2023–2029.
- [52] Pearce, J.A., 1983. 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, pp. 230-249.
- [53] Bonin, B., 1990. 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. p. 379.
- [55] Dill, H.G., 2010. The chessboard classification scheme of mineral deposits: mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews*, 100 (1–4), 1–20.