



بررسی شکل‌گیری و خاستگاه سیال‌های کانه‌ساز در رگه‌های سیلیسی طلادار نقدوز، استان آذربایجان شرقی، شمال غرب ایران

اعظم سادات میرانوری^{۱*}، علی اصغر کلاگری^۱، کمال سیاه‌چشم^۱، قهرمان سهرابی^۲

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

۲- گروه علوم زمین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(دریافت مقاله: ۹۷/۵/۲، نسخه نهایی: ۹۷/۹/۱۴)

چکیده: منطقه امیدبخش طلای نقدوز به‌عنوان بخشی از پهنه فلززایی ارسباران در حدود ۲۰ کیلومتری شرق شهرستان اهر، استان آذربایجان شرقی واقع است. سنگ میزبان کانی‌سازی سنگ‌هایی با ترکیب آندزیت- تراکی آندزیت و با سن ائوسن پسین هستند. پهنه‌های دگرسانی رخمون یافته در این منطقه به‌طور عمده شامل سیلیسی، آرژیلی و پروپیلیتی هستند. پیریت کانی سولفیدی عمده درونزاد است که به‌مقدار کمتر توسط کالکوپیریت و بورنیت همراهی می‌شود. مهمترین کانی‌های برونزاد در این منطقه اکسی- هیدروکسیدهای آهن (هماتیت، لیمونیت و گوتیت) و مالاکیت هستند که مجموعه کانیایی درونزاد را همراهی می‌کنند. کانه‌زایی طلا در این منطقه در رگه-رگچه‌های کوارتز- سولفیدی رخ داده است. نتایج ریزدماسنجی میانبارهای سیال اولیه دوفازی (L+V) موجود در کانی کوارتز وابسته به کانی‌سازی نشان دهنده تشکیل این نوع کانی‌سازی در دمای حدود ۱۶۰ تا ۳۳۴ درجه سانتی‌گراد از سیالی با شوری پایین (۰/۵۳ تا ۳/۳۹ درصد وزنی معادل نمک طعام) است. حضور برش‌های گرمابی، شبه ریخت کوارتز پس از کلسیت تیغه‌ای و میانبارهای سیال تک‌فاز بخار بیانگر جوشش سیال گرمابی مسئول کانه‌زایی هستند. نتایج بررسی ایزوتوپی گوگرد بر پیریت نشان داد که مقادیر ترکیب ایزوتوپی این عنصر در گستره خاستگاه ماگمایی هستند. همچنین یافته‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن نشان می‌دهند که آب‌های جوی سهم عمده‌ای در تشکیل سیال‌های کانه‌دار در نقدوز داشته‌اند. حضور شواهد ساختی و بافتی به‌همراه اطلاعات ریزدماسنجی میانبارهای سیال (شوری و دمای همگن‌شدگی) نشان می‌دهد که کانی‌سازی طلا در منطقه اکتشافی نقدوز از نوع فراگرمایی است.

واژه‌های کلیدی: میانبارهای سیال؛ ایزوتوپ‌های پایدار؛ طلای فراگرمایی؛ نقدوز؛ اهر؛ آذربایجان شرقی.

مقدمه

ارسباران شناخته می‌شود و به دلیل ویژگی‌های خاص زمین‌شناسی، از نظر کانی‌سازی طلا، مس و مولیبدن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲]. در این پهنه، انواع کانه‌زایی پورفیری مس- مولیبدن مانند سونگون [۳]، کیکال- بارملک [۴]، بالوجه [۵]، اسکارنی مس مانند سونگون‌چای [۶] و فراگرمایی طلا مانند صفی‌خانلو [۷]، استرقان [۸] و غیره، تشکیل شده‌اند. منطقه فلززایی اهر بخشی از پهنه فلززایی ارسباران بوده و از نظر زمین‌شناسی از جنوب و جنوب غرب به

منطقه امیدبخش طلای نقدوز در پهنه فلززایی ارسباران در شرق شهرستان اهر و در نزدیکی روستای نقدوز با مختصات $38^{\circ} 23' 48.6''$ عرض شمالی و $47^{\circ} 20' 50.7''$ طول شرقی واقع است. براساس تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران [۱]، این منطقه در پهنه البرز- آذربایجان و در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ اهر قرار می‌گیرد. منطقه ارسباران در شمال غرب ایران یکی از ایالت‌های فلززایی مس- مولیبدن- طلاست که به‌عنوان پهنه

گسل تبریز - سلطانیه، از شرق به گسل اردبیل - میانه و از سمت شمال شرق به فروافتادگی نزدیک گسل شرقی - غربی مغان محدود است. ادامه این منطقه، از شمال به پهنه فلزایی قفقاز کوچک می‌رسد [۹]. ساختار کلی منطقه فلزایی اهر از رخدادهای آلیپی نتیجه شده است. شدیدترین رخدادهای مربوط به فاز کوهزایی لارامید (اواخر کرتاسه) است. پس از این رخداد، رخداد پیرنه با فعالیت شدید ماگمایی به صورت گدازه و سنگ-های آذرآواری همراه بوده است. در ائوسن پسین و الیگوسن، ناآرامی زمین‌ساختی همراه با نفوذ توده‌های آذرین درونی دیده شده و در میوسن، با خروج گدازه‌های گسترده و نفوذی‌های کوچک همراه بوده است. این ناآرامی زمین‌ساختی تا کواترن نیز ادامه یافته است. این منطقه یکی از غنی‌ترین پهنه‌های فلزایی ایران در ترشیری به حساب می‌آید [۹]. گستره کانه‌زایی یوسفلو- صفی‌خانلو- نقدوز در سال ۱۳۷۸ و در قالب پروژه اکتشاف طلای فراگرمایی و مس پورفیری در پهنه ارسباران شناسایی شد [۱۰]. نقاط کانی‌سازی شده شامل چهار گستره یوسفلو، صفی‌خانلو، دره قزل‌قیه و غرب نقدوز است. در این گستره‌ها، در مجموع ۱۱ رگه طلادار شناسایی گردید و توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور مورد اکتشاف نیمه‌تفصیلی قرار گرفتند. عملیات اکتشافی در این گستره‌ها شامل حفر ترانشه، تهیه نقشه زمین‌شناسی و حفاری به شیوه مغزه‌گیری توسط سازمان زمین‌شناسی انجام گرفت [۱۰]. این پژوهش در گستره روستای نقدوز صورت گرفت و از روش ریزدماسنجی، جهت تعیین ویژگی‌هایی چون دما و شوری سیال کانه‌ساز از بررسی ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد به منظور تعیین خاستگاه گوگرد و ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن به منظور تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی و خاستگاه سیال‌های کانه‌ساز و روند تکاملی آن استفاده شد. با توجه به اینکه پهنه‌های دگرسانی و در پی آن کانی‌سازی‌ها در مناطق مجاور نیز گسترش بسیاری دارند، امید است یافته‌های این پژوهش جهت اکتشاف ذخایر موجود در این مناطق مورد استفاده پژوهشگران قرار گیرند.

روش بررسی

بررسی‌ها در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. در بخش صحرایی، به منظور ارزیابی کلی و بررسی واحدهای سنگی منطقه و روابط آنها و نمونه‌برداری از آنها و رگه‌های سیلیسی از منطقه بازدید شد. پس از بازدیدهای صحرایی، با توجه به نمونه‌برداری‌های انجام شده، ۳۰ مقطع نازک و ۱۰ مقطع نازک صیقلی تهیه گردیدند و در دانشگاه

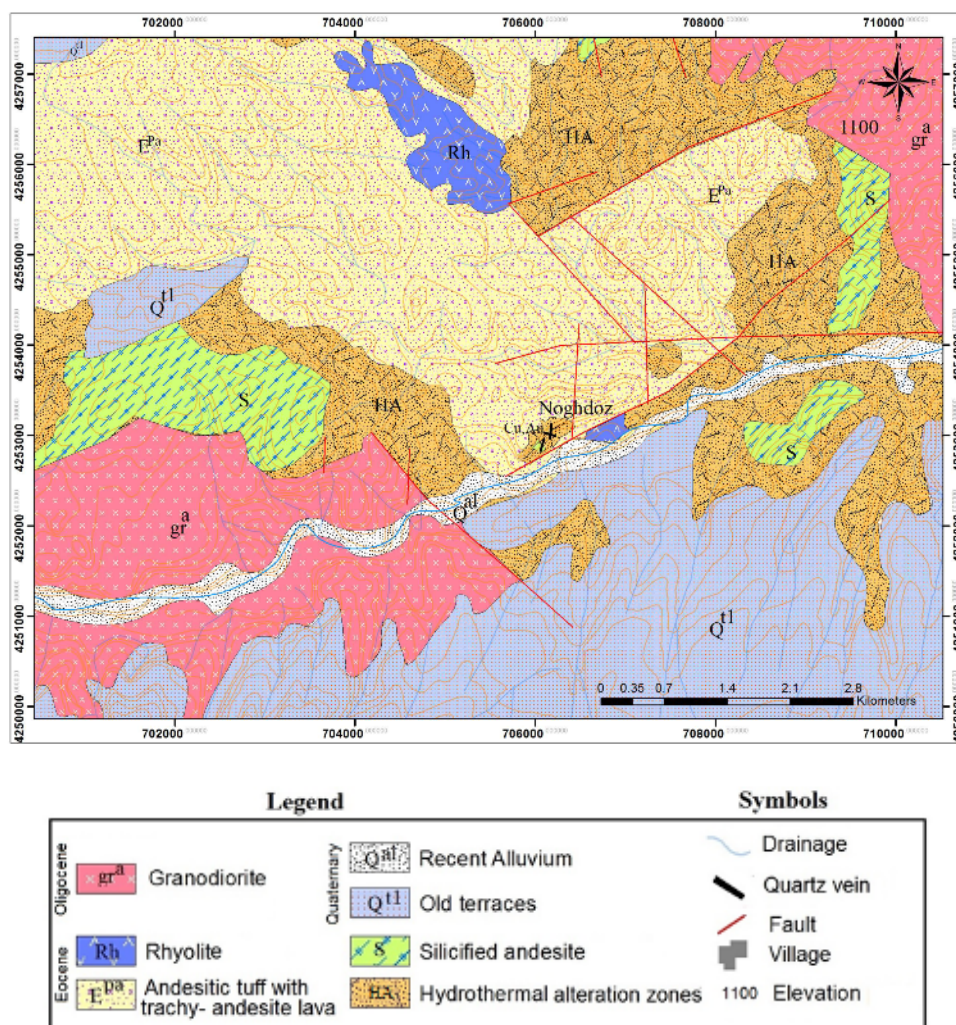
تبریز و دانشگاه سالامانکا (اسپانیا) بررسی شدند. برای تعیین فازهای کانیایی غیرقابل تشخیص در پهنه‌های دگرسانی، بعضی از نمونه‌ها به روش پراش پرتوی ایکس XRD (با دستگاه مدل Philips-Xpert Pro) و برای تعیین مقادیر کمی اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی موجود، نمونه‌ها به روش طیف‌سنجی فلئورسانس پرتوی ایکس، XRF (مدل Philips - Magix pro) طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت شده القایی، - ICP OES (مدل Agilent 730) و طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی، ICP-MS (مدل Agilent 7900) در مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران در کرج و شرکت زرآما بررسی شدند. پس از بررسی جامع زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی و تعیین توالی همبری در منطقه، نمونه‌های کوارتزی که بهترین معرف برای شرایط تشکیل کانی‌سازی هستند، برای بررسی میانبارهای سیال در رگه- رگچه‌های منطقه نقدوز، انتخاب گردیدند (۶ نمونه) و از آنها مقاطع دوبر صیقل (با ضخامت $100\mu\text{m}$) تهیه شد. سپس با انجام بررسی‌های دقیق سنگ-نگاری، تعداد ۴ مقطع برای ریزدماسنجی در مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران انتخاب گردیدند. بررسی‌های ریزدماسنجی در آزمایشگاه کانی‌شناسی به کمک پایه Linkam مدل THMS600 نصب شده بر میکروسکوپ زایس صورت گرفت؛ دامنه حرارتی دستگاه ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد بوده است. کالیبراسیون استیج در مرحله گرمایش با دقت ± 0.6 درجه سانتی‌گراد توسط نیترات سزیم با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد و در مرحله سرمایش با دقت ± 0.2 درجه سانتی‌گراد توسط ماده استاندارد ان- هگزان با نقطه ذوب ۹۴/۳- درجه - سانتی‌گراد انجام شد. برای تعیین خاستگاه گوگرد و شرایط تشکیل کانی‌سازی در منطقه، تعداد ۴ نمونه از پیریت‌های وابسته به کانی‌سازی طلا انتخاب شدند. نمونه‌ها پس از خردایش، جهت زدایش آلودگی‌ها توسط اتانول و آب مقطر شستشو شدند. سپس با استفاده از میکروسکوپ دوچشمی کانی‌های خالص پیریت جدا گردیدند و در آزمایشگاه ایزوتوپ پایدار و گازهای نجیب دانشگاه سالامانکا (اسپانیا) بررسی ایزوتوبی شدند. ترکیب ایزوتوبی نمونه‌های سولفیدی با استفاده از طیف‌سنج مدل SIRA SO₂ به دست آمد. دقت این بررسی حدود ± 0.2 در هزار بوده است. همچنین چهار نمونه کوارتز (از رگه اصلی و همزیست با کانی‌سازی سولفیدی پیریت) به‌منظور تعیین ترکیب ایزوتوبی اکسیژن سیال‌های کانه‌ساز در منطقه و چهار نمونه از پهنه آرژیلی برای هیدروژن آنها انتخاب و پس از

ترکیب آندزیتی هستند. از دیگر واحدهای سنگی منطقه می‌توان به سنگ‌های ریولیتی- ریوداسیتی با سن ائوسن- الیگوسن اشاره کرد. جوانترین واحدهای منطقه نیز رسوب‌های آبرفتی کواترنری با سن پلیو- پلیستوسن هستند. از واحدهای نفوذی منطقه نیز می‌توان به سنگ‌هایی با ترکیب گرانیت تا گرانودیوریت و با سن الیگوسن اشاره کرد که این واحد نفوذی به عنوان منبع گرمایی در منطقه عمل نموده است. در این منطقه، گسل‌ها و شکستگی‌هایی وجود دارند که واحدهای آتشفشانی ائوسن را قطع کرده و محل مناسبی جهت تزریق محلول‌های گرمایی به‌وجود آورده‌اند. عبور سیال‌های گرمایی در راستای شکستگی‌ها و گسل‌ها افزون بر ایجاد دگرسانی گسترده، موجب نهشته‌شدن کانه‌های فلزی در این منطقه شده است. بررسی‌های سنگ‌نگاری بر واحدهای منطقه انجام شد که نتایج آن در ادامه بیان می‌شود.

آماده‌سازی در آزمایشگاه ایزوتوپ‌های پایدار و گازهای نجیب دانشگاه سالامانکا بررسی شدند. ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های هیدروژن با استفاده از طیف‌سنج مدل SIRA SERIES10 و نمونه‌های اکسیژن با استفاده از طیف‌سنج مدل SIRA SERIES II بدست آمدند.

زمین‌شناسی و سنگ‌نگاری

مهمترین واحد سنگی منطقه نقدوز، واحدهای ائوسن پسین است [۱۱] که میزبان کانی‌سازی رگه‌ای بوده و در اثر محلول- های گرمایی دستخوش دگرسانی سیلیسی و آرژیلی شده‌اند. این سنگ‌ها شامل سنگ‌های آذرآواری و گدازه‌های آتشفشانی با ترکیب غالب آندزیتی و تراکی‌آندزیتی هستند که بخش عمده منطقه را پوشش داده‌اند (شکل ۱). سنگ‌های آذرآواری از نوع توف بوده و از نظر ترکیبی حدواسط هستند. گدازه‌های آتشفشانی به‌صورت جریانی روی توف‌ها قرار گرفته‌اند و دارای



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه نقدوز که بر آن افزون بر واحدهای سنگ‌شناسی، پهنه‌های دگرسانی نیز مشخص شده‌اند (برگرفته از مرجع [۱۱] با تغییرات).

واحد آذرآواری و گدازه‌های آتشفشانی (E^{pa}): سنگ‌های آذرآواری از نوع توف بوده (توف بلوری و توف سنگی آندزیتی) و به رنگ سبز روشن هستند. این واحدها بیشتر بافت جریان‌ی نشان می‌دهند و اندازه قطعات سنگی در آنها معمولاً درشت است و ترکیب حدواسط دارند. پلاژیوکلاز از نوع آندزین-الیگوکلاز (۲۰-۱۵٪) مهمترین کانی این سنگ‌هاست و ماکل چندریخت نشان می‌دهد. کوارتز (۱۵-۱۰٪)، فلدسپار قلیایی (کمتر از ۱۰٪) و کانی‌های فرومنیزین (اغلب هورنبلند و بیوتیت) به مقدار کمتر در آنها دیده می‌شوند.

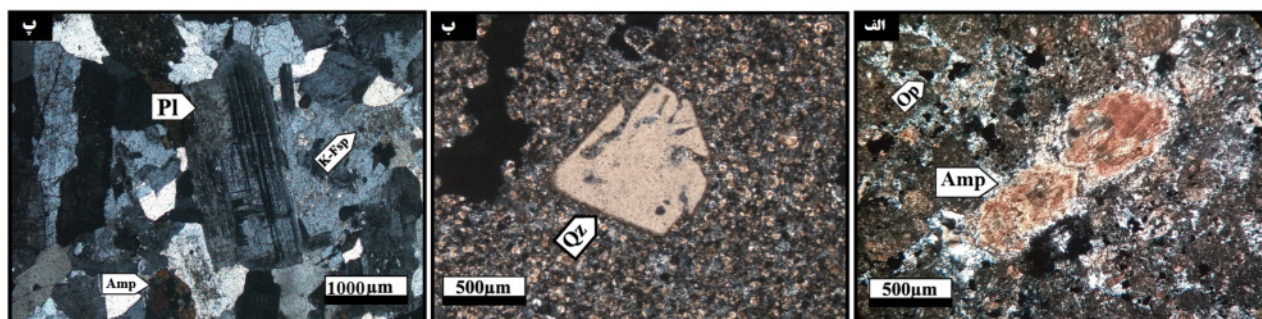
گدازه‌های آتشفشانی از نظر ترکیبی در حد آندزیت و تراکی آندزیت هستند و اغلب دارای بافت پورفیری و گاهی پورفیری ریزسنگی بوده و دارای درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، آمفیبول (شکل ۲ الف) و بیوتیت هستند. پلاژیوکلاز (۴۰-۳۰٪) از نظر ترکیبی در حد آندزین - الیگوکلاز بوده و به صورت درشت‌بلور و یا ریزبلور در زمینه سنگ دیده می‌شود و اغلب از لبه به کانی‌های رسی، سریسیت و کربنات تجزیه شده است. مهمترین کانی‌های فرومنیزین در این سنگ‌ها از نوع آمفیبول و بیوتیت و به مقدار کمتر پیروکسن است. آمفیبول (۲۰-۱۰٪) از نوع هورنبلند است. بیوتیت (کمتر از ۱۰٪) معمولاً به صورت درشت بلورهای پراکنده در متن سنگ دیده می‌شود. کوارتز (۱۲-۱۰٪) نیز معمولاً به صورت رگچه‌ای و گاهی ریزدانه در زمینه سنگ دیده می‌گردد.

سنگ‌های ریولیتی (R^h): این سنگ‌ها دارای درشت بلورهای شکل‌دار و نیمه شکل‌دار کوارتز (۳۰-۲۵٪)، پتاسیم فلدسپار

(۲۰-۱۵٪)، پلاژیوکلاز بیشتر از نوع الیگوکلاز تا آندزین (۱۰-۵٪) و آمفیبول (۱۰-۵٪) هستند و گاهی تشخیص سنگ اولیه به دلیل شدت دگرسانی بسیار دشوار است. بیوتیت و کانی‌های کدر و اسفن نیز به صورت کانی‌های فرعی حضور دارند. وجود رگه- رگچه‌های کوارتز در این سنگ‌ها بسیار معمول است و درشت بلورهای کوارتز معمولاً حالت خوردگی خلیجی دارند (شکل ۲ ب).

واحدهای کواترنری Q^{al} , Q^{tl} : واحدهای کواترنری از نظر سنی وابسته به پلیو- پلیستوسن هستند. واحد Q^{tl} نهشته‌هایی هستند که در دامنه ارتفاعات بصورت پادگان‌های آبرفتی بلند و مخروط افکنه دیده می‌شوند و واحد Q^{al} بصورت ریگ و ماسه‌های دانه‌ریز در بستر رودهای اصلی قابل دیده است.

واحد نفوذی (gr^a): این سنگ‌ها از نظر ترکیب گرانیتی تا گرانودیوریتی بوده و دارای بافت دانه‌ای و درشت بلورهای کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپار قلیایی (شکل ۲ پ)، بیوتیت و هورنبلند هستند. مهمترین کانی‌های فرعی شامل کلریت، آپاتیت، زیرکن، اکسیدهای آهن و کانی‌های کدر هستند. پلاژیوکلاز با فراوانی ۳۵-۳۰٪ از نظر ترکیبی در حد آلبیت تا آندزین بوده و به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و در برخی موارد دارای ماکل چندریخت است که در برخی قسمت‌ها سریسیتی شده است. فلدسپار قلیایی نیز در برخی قسمت‌ها دگرسان شده و به سریسیت و کانی‌های رسی تبدیل شده است. بیوتیت از مهمترین کانی‌های فرومنیزین در این سنگ‌هاست که در برخی قسمت‌ها به کلریت تبدیل شده است.



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی از واحدهای سنگی منطقه: الف) کانی آمفیبول در آندزیت، ب) کوارتز خلیجی در ریولیت، پ) بافت دانه‌ای و کانی‌های پلاژیوکلاز و فلدسپار قلیایی در سنگ‌های نفوذی منطقه Op: کانی‌های کدر، Amp: آمفیبول، Qz: کوارتز، Pl: پلاژیوکلاز، K-Fsp: پتاسیم فلدسپار [۱۲]

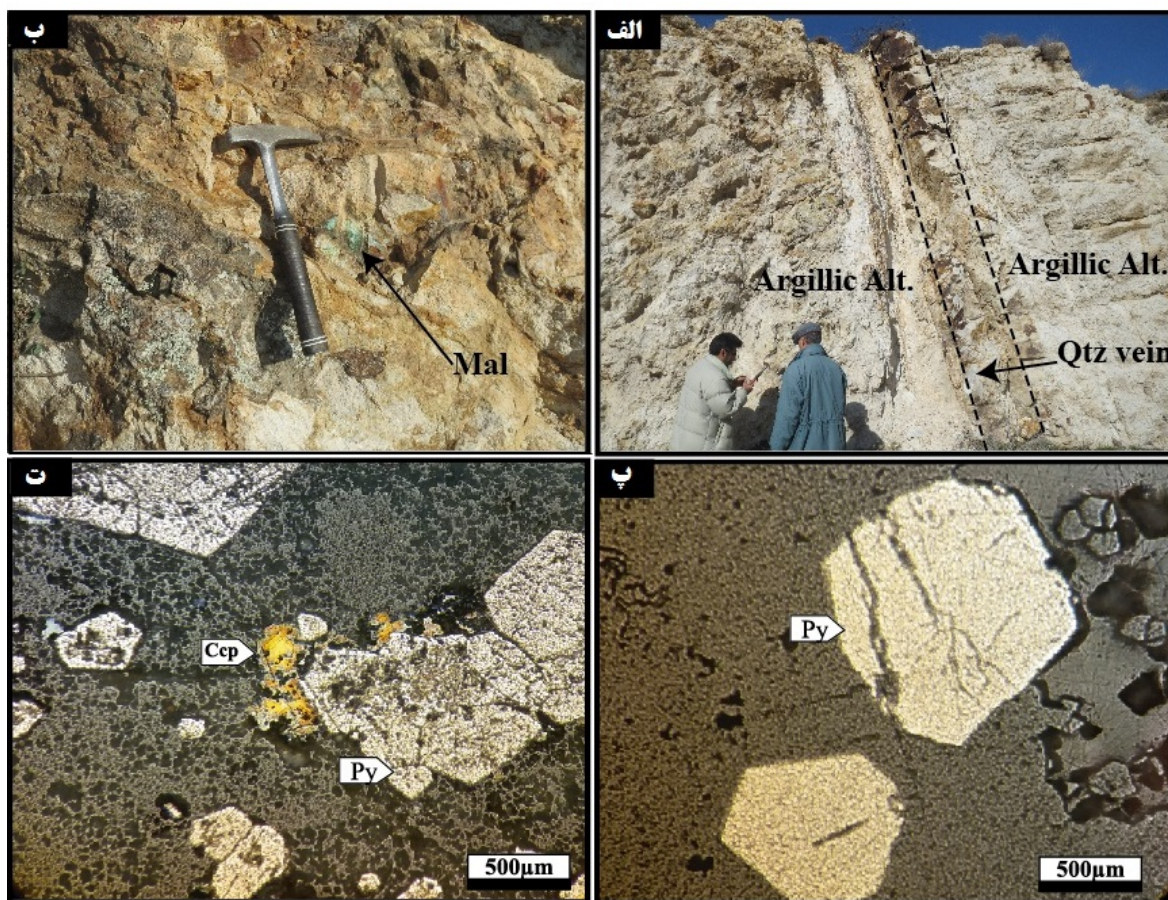
دگرسانی و کانی‌سازی

دگرسانی: رخساره آتشفشانی ائوسن در منطقه نقدوز در اثر فرایندهای گرمایی دستخوش دگرسانی سیلیسی، آرژیلی (شکل ۳ الف) و پروپلیتی شده است. پهنه‌های دگرسانی درون‌زاد بطور عمده در اطراف رگه‌های سیلیسی رخ داده‌اند و از مرکز به سمت لبه رگه به‌قرار زیر هستند:

پهنه سیلیسی: این پهنه از مهمترین پهنه‌های دگرسانی موجود در منطقه است که اغلب به‌تدریج به هاله دگرسانی آرژیلی منتهی می‌شود. رنگ این پهنه از خاکستری تا قهوه‌ای متغیر است. براساس نتایج XRD، مهمترین کانی‌های این پهنه کوارتز و کلسدونی هستند که توسط مقادیر کمی سریسیت همراهی می‌شوند. کوارتز بصورت رگچه‌ای در زمینه سنگ میزبان آندزیتی، پرکننده حفره‌های خالی، جانشینی و یا باز تبلور کوارتزهای اولیه دانه‌ریز تشکیل شده است. کلسدونی بصورت ذرات ریز دیده می‌شود. سریسیت و کانی‌های رسی نیز

به صورت پراکنده و ریز در زمینه سنگ و فضای بین ذرات کوارتز و یا به صورت جانشینی بر کانی‌های اولیه مانند پلاژیوکلاز، فلدسپار و بیوتیت تشکیل شده‌اند.

پهنه آرژیلی: این پهنه دگرسانی در منطقه گسترش به نسبت زیادی دارد و گاهی پهنه سیلیسی را در بر می‌گیرد. ضخامت این پهنه در اطراف رگه‌ها تا ده‌ها متر نیز می‌رسد. نتایج XRD نشان می‌دهد که مهمترین کانی‌های رسی در این پهنه کائولینیت و ایلیت هستند که توسط مقادیر کمتری از کوارتز، سریسیت، دیاسپور، کلریت و کلسیت همراهی می‌شوند. در برخی نقاط به دلیل وجود اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، این پهنه به رنگ‌های قرمز، زرد و نارنجی درآمده است. در این پهنه، کانی‌های رسی به‌طور کامل و یا بخشی جانشین کانی‌های اولیه مانند پلاژیوکلاز و فلدسپار قلیایی شده‌اند و یا بصورت رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی دیده می‌شوند.



شکل ۳ تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از پهنه‌های دگرسانی و کانی‌سازی در منطقه: (الف) دگرسانی آرژیلی (ب) کانی‌سازی مالاکیت در سطوح شکستگی‌های سنگ، (پ) پیریت‌های شکل‌دار و نیمه شکل‌دار و (ت) هم‌رشدی پیریت و کالکوپیریت. (Mal : مالاکیت، Py : پیریت، Ccp : کالکوپیریت [۱۲])

پهنه پروپلیتی: پهنه پروپلیتی در منطقه با ظاهری سبزرنگ دیده می‌شود و گسترش محدودی دارد. مهمترین کانی‌های این پهنه کلریت، اپیدوت، کلسیت، آلبیت و سربیسیت هستند. در این پهنه، پلاژیوکلاز به کانی‌های رسی، اپیدوت، کلسیت و کانی‌های مافیک به کلریت دگرسان شده‌اند. کانی اصلی در این پهنه کلریت است که از دگرسانی کانی‌های مافیک مانند بیوتیت و هورنبلند تشکیل شده است. سربیسیت نیز در این پهنه دیده می‌شود که از دگرسانی پلاژیوکلاز و بیوتیت ناشی شده است. جدول ۱ نتایج بررسی برخی نمونه‌های این منطقه را نشان می‌دهد.

مجموعه کانیایی پهنه‌های دگرسانی درونزاد و کانی‌های مربوط به دگرسانی برونزاد در این منطقه با گسترش قابل‌ملاحظه‌ای همپوشی دارند. از مهمترین این کانی‌ها می‌توان به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت، لیمونیت، و گوتیت)، **ژیپس**، جاروسیت و کانی‌های رسی اشاره کرد. حضور کانی‌هایی چون ایلیت، کلریت، اپیدوت و کلسیت نشان‌دهنده pH خنثی و حضور کانی‌هایی چون کائولینیت و دیاسپور نشان دهنده pH اسیدی محلول‌های گرمابی در این منطقه است [۱۳].

کانی‌سازی: کانی‌سازی در این منطقه به صورت رگه-رگچه‌ای و در داخل شکستگی‌ها و درزه‌های سنگ‌های میزبان با ترکیب آندزیتی- تراکی‌آندزیتی که دستخوش دگرسانی سیلیسی و آرژیلی شده‌اند، گسترش یافته‌اند. مهمترین کانی‌های کانسنگی در این منطقه شامل کانی‌های درونزاد مانند پیریت، کالکوپیریت، بورنیت و کانی‌های برونزاد چون مالاکیت (شکل ۳ ب) و اکسیدها و هیدروکسیدهای ثانویه آهن (هماتیت، گوتیت، لیمونیت) هستند که در پهنه‌های سیلیسی و آرژیلیک گسترش یافته‌اند. نتایج تجزیه شیمیایی رگه‌های سیلیسی نشان می‌دهد که کانی‌سازی طلا در رگه-رگچه‌های کوارتز - سولفیدی و پهنه‌های سیلیسی رخ داده است. براساس بررسی رگه-

رگچه‌های متقاطع، کانی‌سازی در چهار مرحله رخ داده است. کوارتز مهمترین کانی مرحله نخست است که به رنگ خاکستری و به صورت توده‌ای و رگچه‌ای دیده می‌شود. کانی سولفیدی این مرحله پیریت است که به مقدار کم دیده می‌گردد. در مرحله دوم، کوارتز به رنگ شیری تا خاکستری روشن است؛ در این مرحله، پیریت توسط مقادیر کمتری کالکوپیریت و بورنیت همراهی می‌شود. براساس بررسی‌های کانی‌شناسی، پیریت‌ها در این منطقه به صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار (شکل ۳ پ) و پراکنده در متن رگه‌های کوارتز دیده می‌شوند. در بسیاری قسمت‌ها در سطح برونزدها و شکستگی‌ها، پیریت در حال تبدیل به اکسیدهای آهن است. از دیگر کانی‌های سولفیدی درونزاد در این منطقه می‌توان به کالکوپیریت (شکل ۳ ت) اشاره کرد که از فراوانی کمتری نسبت به پیریت برخوردار است و اغلب در درز و شکستگی‌های پیریت و کمتر بصورت منفرد دیده می‌شود. در برخی قسمت‌ها، کالکوپیریت از **کناره‌ها** توسط بورنیت جانشین شده است. در مرحله سوم کوارتز به صورت بلورهای درشت و شفاف و پرکننده فضای خالی دیده می‌شود. در این مرحله، مقادیر کمی پیریت تشکیل شده است. از مهمترین کانی‌های برونزاد در این منطقه می‌توان به مالاکیت و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن مانند گوتیت، ههماتیت و لیمونیت اشاره کرد که در سطح برونزدها حضور دارند. مالاکیت اغلب بصورت آغشتگی سطوح شکستگی‌های سنگ دربرگیرنده دیده می‌شود (شکل ۳ ب). اکسیدها و هیدروکسیدهای ثانویه آهن (هماتیت، لیمونیت و گوتیت) در سطوح هوازده و بر اثر اکسایش کانی‌های سولفیدی آهن‌دار (به‌ویژه پیریت) و به صورت رگچه‌ای و جانشینی تشکیل شده‌اند. جاروسیت نیز بصورت آغشتگی سطوح سنگ دیده می‌شود. شکل ۴ توالی همبری را در این منطقه نشان می‌دهد.

جدول ۱ نتایج XRD برخی نمونه‌های منطقه نقدوز.

شماره نمونه	پهنه دگرسانی	کانی‌های اصلی	کانی‌های فرعی
N-2	سیلیسی	کوارتز	سربیسیت
N-6	سیلیسی	کوارتز + کلسدون	سربیسیت
N-11	آرژیلی	کائولینیت	کوارتز + ایلیت + سربیسیت
N-22	آرژیلی	کوارتز، ایلیت	کائولینیت + دیاسپور + سربیسیت
N-25	پروپلیتی	کلریت	اپیدوت + کلسیت + سربیسیت + آلبیت

Minerals	Time →			
	Hypogene Mineralization			Supergene Mineralization
	Stage 1	Stage 2	Stage 3	
Quartz	—————	—————	—————	
Pyrite	—————	—————	—————	
Chalcopyrite		—————		
Bornite		—————		
Hematite				—————
Goethite				—————
Limonite				—————
Jarosite				—————
Malachite				—————
Calcedony			—————	

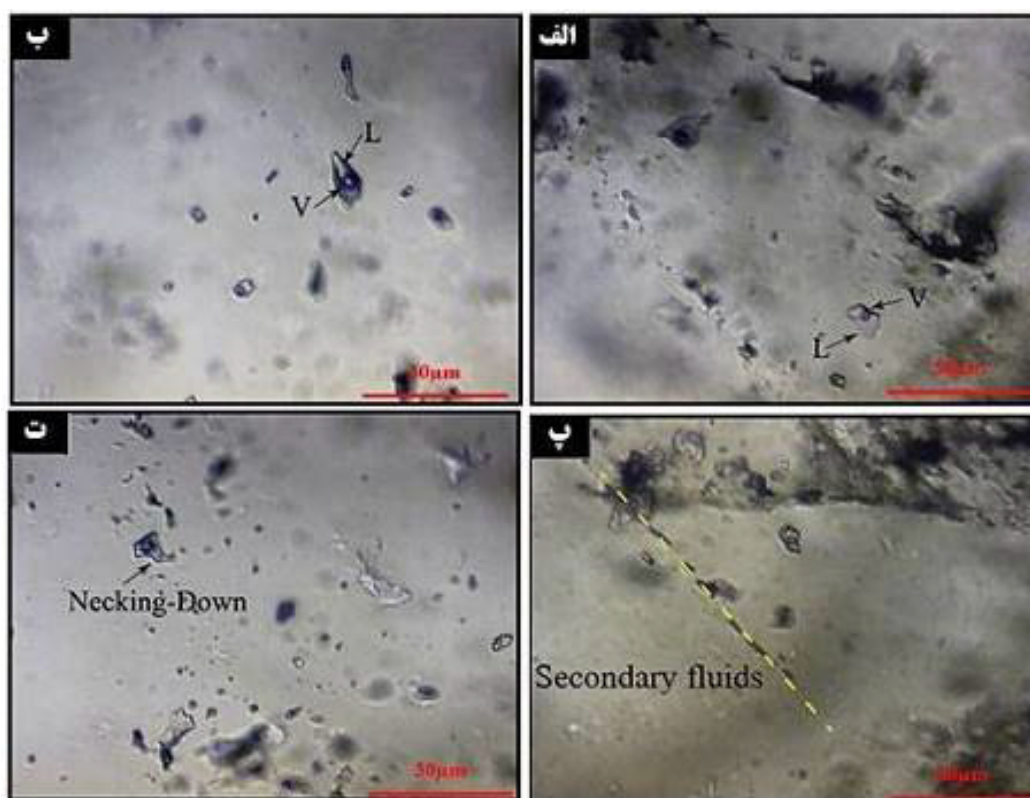
شکل ۴ طرحواره‌ای از توالی همبری کانی‌های سولفیدی، اکسیدی، کربناته و سیلیکاته مربوط به کانه‌زایی درون‌زاد و برون‌زاد در رگه- رگچه‌های طلا دار نقدوز.

بررسی میانبارهای سیال

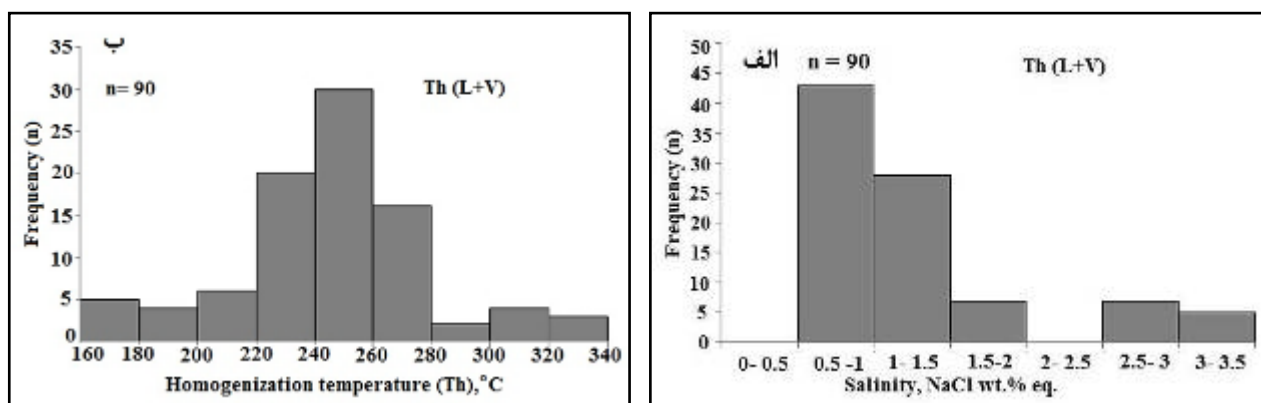
[۱۵].

نتایج سرمایش و گرمایش: ابتدا عملیات سرمایش و سپس گرمایش بر میانبارهای سیال دوفازی اولیه (۹۰ نمونه) انجام شد. فرایند سرمایش برای تعیین میزان شوری و نوع مواد محلول و فرایند گرمایش جهت بدست آوردن دمای همگن‌شدگی در میانبارهای سیال انجام گرفت. با توجه به اینکه نخستین نقطه ذوب یخ (Te) حدود ۲۱- درجه سانتی‌گراد بود، می‌توان گفت که نمک محلول در این میانبارهای سیال بیشتر NaCl است [۱۶]. در همه میانبارهای سیال مورد بررسی، همگن‌شدگی با ناپدید شدن فاز بخار همراه بوده است ($L + V \rightarrow L$) و در هیچ نمونه‌ای همگن‌شدگی به فاز بخار دیده نشد. مقادیر نقطه ذوب آخرین بلور یخ (T_{mice}) در گستره ۰/۳- تا ۲- درجه سانتی‌گراد بوده که در نتیجه مقدار شوری بدست آمده با توجه به داده‌های مرجع [۱۷] در گستره ۰/۵۳ تا ۳/۳۹ درصد وزنی معادل نمک طعام است که نشان‌دهنده شوری پایین میانبارهای سیال است. یافته‌های این بررسی نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی شوری در گستره ۰/۵ تا ۱ درصد معادل وزنی نمک طعام است (شکل ۶ الف). یافته‌های برآمده از فرایند گرمایش نشان می‌دهد که دمای همگن‌شدگی در میانبارهای سیال مورد بررسی در گستره ۱۶۰ تا ۳۳۴ درجه سانتی‌گراد و بیشترین فراوانی در گستره ۲۶۰-۲۴۰ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۶ ب). جدول ۲ نتایج ریزدماسنجی را در منطقه نقدوز نشان می‌دهد.

سنگ‌نگاری: مطالعه میانبارهای سیال در رگه- رگچه‌های کوارتز- سولفیدی منطقه نقدوز بر روی بلورهای کوارتز صورت گرفت. انواع میانبارهای سیال اولیه (شکل‌های ۵ الف و ب) و ثانویه (شکل ۵ پ) در این نمونه‌ها تشخیص داده شدند و هیچ میانبار سیال ثانویه کاذبی دیده نشد. از نظر شکل ظاهری، این میانبارهای سیال به صورت مدور بی‌شکل، کشیده و باریک و دارای شکل چند وجهی نامنظم هستند که از میان آنها، نوع مدور بی‌شکل بیشترین فراوانی را داشته‌اند. گاهی میانبارهای سیال شکل‌های باریک‌شدگی^۱ نیز نشان می‌دهند (شکل ۵ ت). از نظر ابعاد، میانبارهای سیال مورد بررسی بیشتر ابعادی حدود ۵ تا ۲۲ میکرون داشته‌اند. میانبارهای سیال با اندازه‌های ۱۰-۵ میکرون معمولاً بیشترین فراوانی را در این منطقه دارند. براساس مقدار فازی و با توجه به تقسیم‌بندی مرجع [۱۴]، دو نوع میانبار سیال در این منطقه دیده شده است: ۱- دوفازی مایع- بخار (شکل‌های ۵ الف و ب) و ۲- تک‌فاز بخار. میانبارهای سیال دوفازی مایع- بخار ($L+V$) بیشترین فراوانی را دارند و فاز مایع ۷۰ تا ۸۰ درصد حجم آنها را تشکیل می‌دهد ($L>V$). میانبارهای سیال تک‌فاز بخار از فراوانی کمتری برخوردارند. عدم وجود CO_2 مایع (به عنوان یک فاز نامیواک) در سیال‌های درگیر این منطقه نشان می‌دهد که مقدار CO_2 سیال‌های گرمایی احتمالاً کمتر از ۳/۷٪ بوده است



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی از انواع میانبارهای سیال در بلور کوارتز: الف و ب) شکل‌های کروی تا نامنظم میانبارهای سیال دوفازی (L+V)، پ: میانبارهای سیال ثانویه و ت) باریک‌شدگی در میانبارهای سیال.



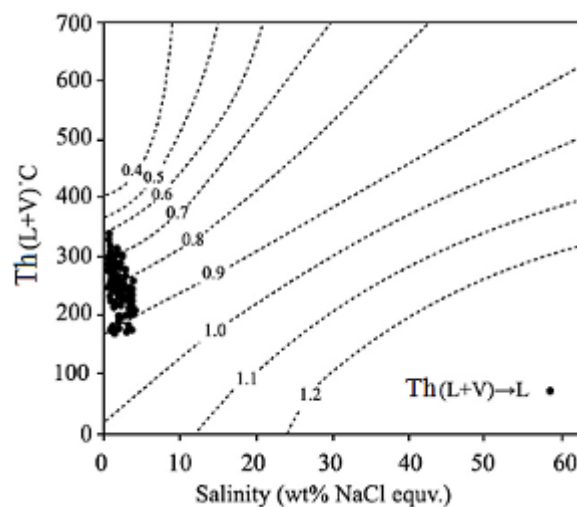
شکل ۶ الف: هیستوگرام شوری میانبارهای سیال در منطقه نقدوز ب) هیستوگرام دمای همگن شدن (L+V → L) میانبارهای سیال در رگه-رگچه‌های طلادار نقدوز

جدول ۲ نتایج ریزدماسنجی میانبارهای سیال در رگه-رگچه‌های کوارتز در منطقه نقدوز

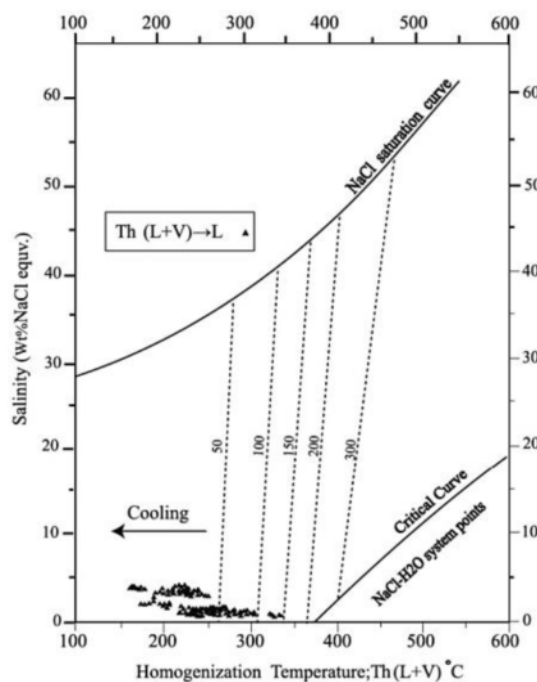
شماره نمونه	تعداد نقطه #	اندازه (μm)	کانی	نوع	T _{mice} (°C)	Wt% NaCl eq	Th (°C)	چگالی (g/cm ³)
N18	۲۵	۶-۱۷	کوارتز	L+V	(-۰.۴) - (-۰.۶)	۰.۷۱ - ۲.۷۴	۱۷۰ - ۲۸۰	۰.۷ - ۰.۹
N19	۲۱	۵-۱۷	کوارتز	L+V	(-۰.۴) - (-۰.۶)	۰.۷۱ - ۳.۳۹	۱۶۰ - ۲۸۵	۰.۷ - ۰.۹
N20	۲۴	۶-۲۲	کوارتز	L+V	(-۰.۳) - (-۰.۷)	۰.۵۳ - ۱.۲۳	۱۷۵ - ۳۳۴	۰.۶ - ۰.۹
N21	۲۰	۵-۲۲	کوارتز	L+V	(-۰.۳) - (-۰.۴)	۰.۵۳ - ۰.۷۱	۲۶۰ - ۳۳۴	۰.۶ - ۰.۸

بیشترین فراوانی دما در گستره ۲۴۰-۲۶۰ درجه سانتی‌گراد است، می‌توان گفت که فشار متوسط سیال هنگام به‌تله افتادن حدود ۵۰ بار بوده است (شکل ۸). همه میانبارهای مورد بررسی در این نمودار در زیر منحنی اشباع هالیت قرار گرفته‌اند. همچنین عمق به‌دام افتادن میانبارها در این منطقه حدود ۲۰۰ تا ۱۵۰۰ متر است که می‌توان گفت که عمق متوسط به‌دام افتادن میانبارها حدود ۵۰۰ متر است.

چگالی و فشار سیال: با رسم یافته‌های دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال (Th) و شوری، چگالی میانبارهای سیال محاسبه شد که در گستره $0.6-0.9 \text{ g/cm}^3$ تغییر می‌کند (شکل ۷). بررسی‌ها نشان می‌دهد که چگالی بیشتر نمونه‌ها در گستره $0.7-0.8 \text{ g/cm}^3$ است (جدول ۲). با توجه به دمای همگن‌شدگی (۳۳۴-۱۶۰ درجه سانتی‌گراد) و میزان شوری (۳۳۹-۵۳ درصد وزنی معادل نمک طعام)، فشار سیال هنگام به‌تله افتادن بین ۲۰ تا ۱۵۰ بار بوده است. با توجه به اینکه



شکل ۷ نمودار دمای همگن‌شدن-شوری جهت تعیین چگالی سیال g/cm^3 در سیستم $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ [۱۸]، چگالی محاسبه شده در بازه g/cm^3 ۰.۶-۰.۹ است.



شکل ۸ نمودار دمای همگن‌شدگی و شوری برای تعیین فشار بخار [۱۹] که نشان می‌دهد که احتمالاً فرایند سرد شدن از عوامل موثر در ته‌نشست فلزات در ناحیه نقدوز بوده است.

بررسی ایزوتوپ پایدار در منطقه نقدوز

آرژیلی از هاله دگرسانی مجاور انتخاب شدند. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ نمونه‌های کوارتز نسبت به SMOW در حدود $+۵/۴$ تا $+۷$ در هزار است. با توجه به دمای بدست آمده از بررسی میانبارهای سیال در نمونه‌های کوارتز، مقدار ترکیب ایزوتوپی اکسیژن سیال کانه‌دار در گستره -۲ تا -۳ در هزار بدست آمدند. مقادیر δD بدست آمده در نمونه‌های آرژیلی حدود $-۹۳/۵$ تا $-۱۱۱/۲$ در هزار هستند. جدول ۴ نتایج بررسی ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن را در منطقه نقدوز نشان می‌دهد.

بحث و بررسی

چگونگی حمل و ته‌نشینی فلزات: دو کمپلکس مهم برای حمل و نقل فلزات در محلول‌های گرمایی کمپلکس سولفیدی (H_2S , HS^-) و کمپلکس کلریدی (Cl^-) هستند. طلا معمولاً در سیستم‌های با دمای بالای 400°C به صورت AuCl_2^- حمل می‌شود [۲۳] و کاهش دما نخستین سازوکار ته‌نشینی طلاست. در دماهای پایین‌تر، طلا به صورت $\text{Au}(\text{HS})_2$ حمل می‌شود، بنابراین با کاهش گریزندگی گوگرد، کمپلکس Au-S شکسته و باعث ته‌نشینی طلا می‌شود [۲۴، ۲۵]. برپایه دما و شوری بدست آمده در این منطقه و با توجه به شکل ۹ [۲۶]، می‌توان نتیجه گرفت که احتمالاً کمپلکس‌های سولفیدی نقش اصلی را در حمل فلزات به‌ویژه طلا در سیال بر عهده داشته‌اند، گرچه کمپلکس کلریدی نیز ممکن است سهمی در نقل و انتقال فلزات داشته باشد. ته‌نشست عناصر محلول در محلول‌های گرمایی به دلیل تغییرات دما، فشار، جوشش و واکنش بین سنگ دیواره و محلول‌ها و تغییرات شیمیایی در نتیجه مخلوط‌شدگی محلول‌ها ایجاد می‌شود. یکی از عوامل مهم در ته‌نشینی کمپلکس‌های سولفیدی، جوشش است. از شواهد مهم رخداد جوشش همزمانی میانبارهای سیال غنی از مایع و میانبارهای سیال غنی از فاز گاز و دیگر شواهد بافتی و ساختی است [۲۷] که در نمونه‌های مورد بررسی دیده شده‌اند.

بررسی ایزوتوپی گوگرد: چنان که بیان شد، بررسی ایزوتوپی گوگرد بر روی کانی پیریت به عنوان مهمترین و فراوان‌ترین کانی سولفیدی منطقه صورت گرفت. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ (بر حسب در هزار) اندازه‌گیری شده در کانی پیریت و مقادیر محاسبه شده برای گوگرد سیال کانه‌دار در جدول ۳ آورده شده‌اند. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ سولفیدها (پیریت) در این رگه- رگچه‌ها در گستره $-۰/۵$ تا $-۲/۱$ در هزار متغیر است. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ سیال از دمای میانگین میانبارهای سیال وابسته به پیریت (250°C) درجه سانتی‌گراد) و با استفاده از رابطه پیشنهاد شده در مرجع [۲۰] محاسبه گردیدند. نخست مقدار Δ با توجه به دما از رابطه $1000 \ln \alpha = D (10^6)/T^2 + E (10^3)/T + F$ سپس مقدار گوگرد سیال کانه‌دار با توجه به فرمول $\delta^{34}\text{S}_{\text{py}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} = \Delta$ محاسبه گردید. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ سیال کانه‌دار در گستره $-۲/۰$ تا $-۳/۶$ در هزار در تغییر است. مقادیر ایزوتوپی بدست آمده نشان می‌دهد که گوگرد سیال‌های کانه‌ساز دارای خاستگاه ماگمایی است (سولفیدها در سنگ‌های آذرین از نظر ایزوتوپی مشابه متئوریت‌ها هستند که مقدار متوسط $\delta^{34}\text{S}$ در آنها تقریباً صفر است، در حالی که آب دریا و سولفیدهای رسوبی غنی از ایزوتوپ‌های سنگین بوده و مقدار $\delta^{34}\text{S}$ با توجه به سن زمین‌شناسی آنها بین 10 تا 30 در هزار است [۲۱]).

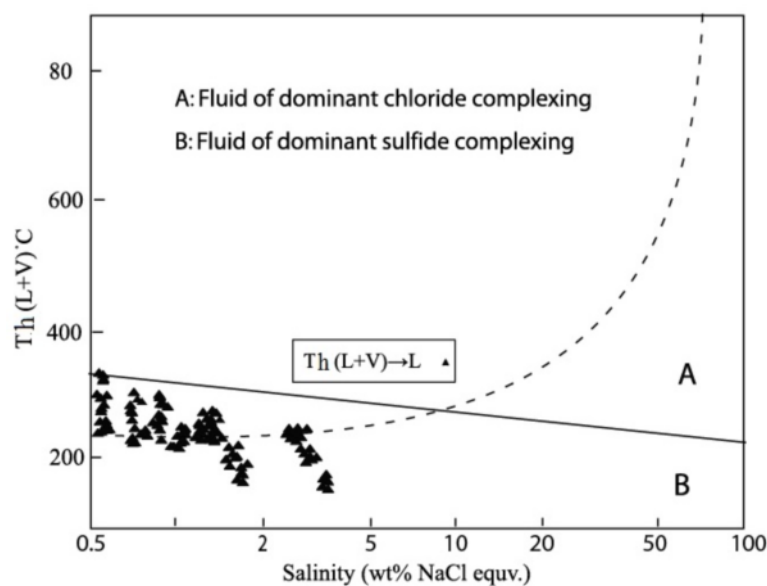
بررسی ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن: به‌منظور تعیین ترکیب ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن سیال‌های کانه‌ساز در منطقه، چهار نمونه کوارتز برای بررسی اکسیژن و چهار نمونه از پهنه آرژیلی جهت بررسی هیدروژن انتخاب و آماده‌سازی شدند. نمونه‌های کوارتز انتخاب شده همزیست با کانی‌سازی سولفیدی پیریت بوده و بنابراین برای بررسی ایزوتوپی اکسیژن مناسب هستند. کوارتزهای مورد بررسی از رگه اصلی و نمونه‌های

جدول ۳ مقادیر ایزوتوپی گوگرد در منطقه نقدوز (مقدار $1000 \ln \alpha$ برگرفته از مرجع [۲۲] است).

شماره نمونه	کانی	$\delta^{34}\text{S Py} (\text{‰})$	T ($^\circ\text{C}$)	$[21]1000 \ln \alpha$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} (\text{‰})$
N-15	پیریت	-۲/۱	۲۵۰	۱/۵	-۳/۶
N-27	پیریت	-۰/۵	۲۵۰	۱/۵	-۲/۰
N-29	پیریت	-۱/۵	۲۵۰	۱/۵	-۳/۰
N-45	پیریت	-۱/۱	۲۵۰	۱/۵	-۲/۶

جدول ۴ مقادیر ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن در منطقه نقدوز.

کانی	$\delta D(\text{‰})$	کانی	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	T (°C)	1000 ln α	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ محاسبه شده
کانی رسی	-۱۰۹٫۸	کوارتز	+۶٫۹	۲۵۰	۸٫۹	-۲
کانی رسی	-۱۰۱٫۲	کوارتز	+۶٫۵	۲۵۲	۸٫۸	-۲٫۳
کانی رسی	-۹۳٫۵	کوارتز	+۷٫۰	۲۴۵	۹٫۱	-۲٫۱
کانی رسی	-۱۱۱٫۲	کوارتز	+۵٫۴	۲۶۰	۸٫۴	-۳٫۰



شکل ۹ نمودار دمای همگن‌شدگی- شوری برای تعیین همبافت‌های حمل‌کننده عناصر فلزی [۲۶].

تشکیل کانسارهای فراگرمایی دارند، گرچه در برخی کانسارها سیال‌های دیگر (ماگمایی، آب دریا و آب سازندی) یا آب‌های جوی از چند منبع نیز نقش مهمی دارند [۳۰]. برای بررسی خاستگاه سیال در منطقه نقدوز از دو روش استفاده شد. مهمترین روش استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن است. بررسی یافته‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن با استفاده از نمودار مرجع [۳۱] نشان می‌دهد که نمونه‌های ایزوتوپی مورد بررسی در گستره آب‌های جوی قرار می‌گیرند (شکل ۱۱). از دیگر روش‌ها استفاده از شکل ۱۲ (برگرفته از مرجع [۳۲]) است که براساس آن و با توجه به دمای همگن‌شدگی و شوری میانبارهای سیال می‌توان خاستگاه آن را تعیین کرد. بر این اساس، سیال‌های کانه‌ساز موثر در کانی‌سازی در گستره آب‌های جوی قرار می‌گیرند (شکل ۱۲) که با توجه به شوری پایین سیال‌های کانه‌ساز در این منطقه، منطقی به نظر می‌رسد. گوگرد نیز چنان که پیشتر بیان شد،

همچنین حضور آدولاریا و کلسیت تیغه‌ای جانشین شده توسط کوارتز شبه ریخت می‌تواند دلیلی بر جوشش باشد [۲۸، ۲۹] (آدولاریا در این منطقه دیده نشد). در واقع، وجود برش گرمایی (شکل ۱۰ الف) همراه با کلسیت تیغه‌ای (شکل ۱۰ ب)، معمولاً جانشین شده با کوارتز شبه ریخت، و بافت‌های گل کلمی^۲ (شکل ۱۰ پ) و قشرگون^۳ (پوسته‌ای) به همراه یافته‌های ریزدماسنجی می‌تواند شواهدی قوی برای جوشش در منطقه نقدوز باشد. بنابراین به نظر می‌رسد که جوشش از عوامل اصلی تهنشینی فلزات در این منطقه بوده باشد. همچنین با توجه به شکل ۸، به نظر می‌رسد که احتمالاً فرایند سرد شدن یکی دیگر از عوامل موثر در تهنشست فلزات بوده است.

خاستگاه سیال: بررسی ایزوتوپ‌های پایدار در سیستم‌های گرمایی نشان می‌دهد که آب‌های جوی سهم عمده‌ای در

2- colloform

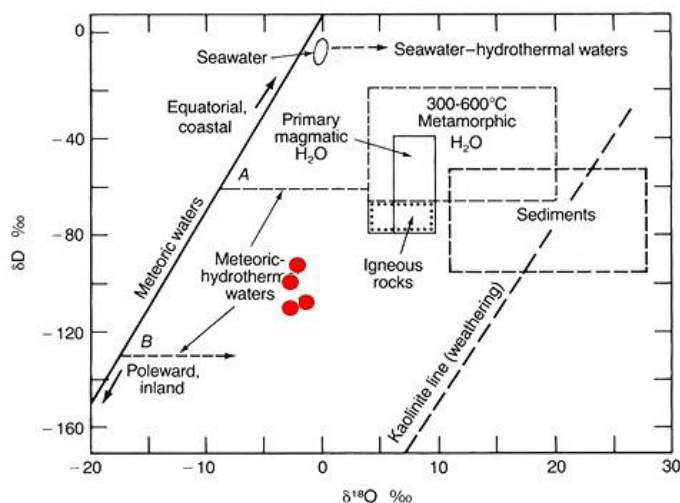
3- crustiform

بررسی میانبرهای سیال در نمونه (شوری، و دمای همگن-شدگی) و رسم آنها در نمودار شوری نسبت به دمای همگن شدگی (شکل ۱۳) نشان می‌دهد که سیال‌های مسؤول تشکیل رگه-رگه‌های سیلیسی در منطقه نقدوز از نوع فراگرمایی بوده‌اند (شکل ۱۳).

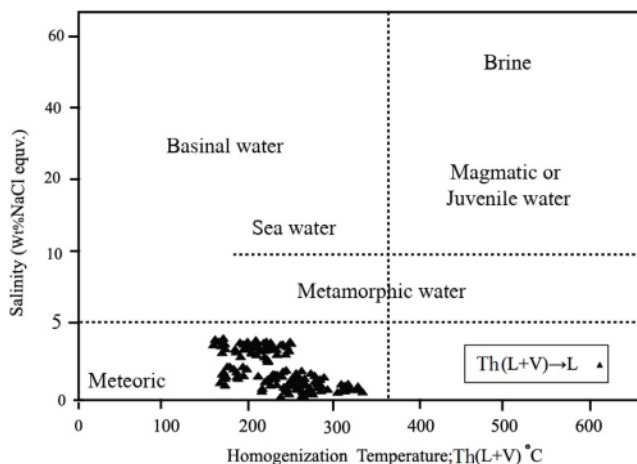
دارای خاستگاه ماگمایی است که احتمال دارد مستقیماً برآمده از سیال‌های آبگین ماگمایی بوده و یا از شستشو و انحلال سولفیدهای موجود در سنگ‌های آذرین ناشی شده باشد [۲۲] که با توجه به عدم وجود شواهد کافی در مورد خاستگاه مستقیم، احتمال دوم قویتر به نظر می‌رسد. نتایج بدست‌آمده از



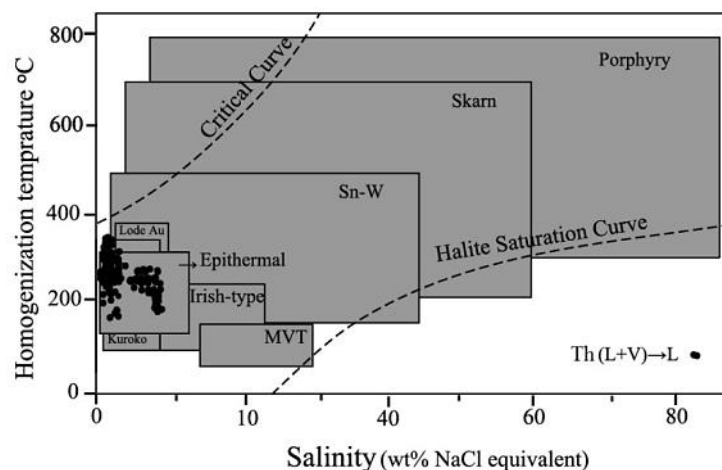
شکل ۱۰ برخی شواهد نشان دهنده جوشش سیال در منطقه: الف) برش گرمایی، ب) کلسیت تیغه‌ای و پ) کوارتز با بافت گل کلمی.



شکل ۱۱ نمودار مقایسه دامنه تغییرات ایزوتوپ‌های اکسیژن و هیدروژن برای آب‌های با خاستگاه مختلف [۳۱] و نمودار δD نسبت به $\delta^{18}O$ سیال‌های کانی‌ساز در منطقه نقدوز (●).



شکل ۱۲ نمودار دمای همگن شدگی نسبت به شوری در سیال‌های با خاستگاه مختلف [۳۲].



شکل ۱۳ نمودار دمای همگن‌شدگی نسبت به شوری میانبارهای سیال در کانسارهای مختلف [۱۸] که بر آن یافته‌های ریزدماسنجی منطقه نقدوز با دایره‌های توپر در گستره فراگرمایی نشان داده شده است.

برداشت

ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن نیز بیانگر خاستگاه جوی سیال-های کانه‌ساز است. نتایج این پژوهش براساس شواهد کانی‌شناسی، بافتی، میانبارهای سیال (دمای همگن‌شدگی و شوری) نشان از کانی‌سازی فراگرمایی در منطقه نقدوز دارد.

قدردانی

نگارندگان از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه تبریز برخوردار بوده‌اند، لذا شایسته است سپاس و قدردانی خود را ابراز دارند. همچنین بخشی از این مقاله با حمایت مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران انجام شده است. از آقای دکتر فردوسی در دانشگاه تبریز و از پروفسور Clemente Recio Hernandez و دکتر Antonio Alvarez در آزمایشگاه ایزوتوپ پایدار و گازهای نجیب دانشگاه سالامانکا (اسپانیا) نیز سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

- [1] Nabavi M.H., "An introduction to geology of Iran", Geological Survey of Iran (1355) 109 p.
- [2] Jamali H., Dilek Y., Daliran F., Yaghubpur A., Mehrabi B., "Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar- Arasbaran volcanic belt, Northern Iran", International Geology Review 52 (2010) 608-630.
- [3] Calagari A.A., Patrick A., Polia D., "The study of the veins and veinlets in Sungun porphyry copper deposit, East Azarbaijan", Geosciences Scientific Quarterly Journal 40 (1380) 71-79.
- [4] Simmons V., "The study of geology, geochemistry and genesis of porphyry copper deposit in Kighal and Barmalek, north of Varzeghan", Doctoral dissertation, University of Tabriz (1389) 200 p.

کانه‌زایی در منطقه نقدوز به‌صورت رگه-رگچه‌ای در شکستگی‌ها و پهنه‌های گسلی و به میزبانی سنگ‌هایی با ترکیب حدواسط و با سن ائوسن پسین صورت گرفته است. دگرسانی در منطقه نقدوز شامل دو مرحله درونزاد و برونزاد است. بررسی کانی‌شناسی پهنه‌های دگرسانی نشان می‌دهد که کوارتز، کائولینیت، سریسیت، ایلیت، کلریت و دیاسپور مهمترین کانی‌های دگرسانی درونزاد و هماتیت، لیمونیت، گوتیت، ژیبس و جاروسیت مهمترین کانی‌های دگرسانی برونزاد در این منطقه هستند. کانی‌سازی در رگه-رگچه‌های منطقه نقدوز نیز در دو مرحله درونزاد و برونزاد رخ داده است که پیریت، کالکوپیریت و بورنیت مهمترین کانی‌های درونزاد و مالاکیت و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن مهمترین کانی‌های برونزاد در این منطقه هستند. بررسی‌های سنگ‌نگاری و ریزدماسنجی بر میانبارهای سیال موجود در بلورهای کوارتز بعنوان کانی همراه با کانه‌زایی سولفیدی و طلا نشان‌دهنده مقدار شوری پایین و دمای همگن‌شدگی پایین تا متوسط سیال‌های کانه‌ساز است. مقادیر دمای همگن‌شدگی و میزان شوری نشان می‌دهد که احتمالاً کمپلکس مهم در نقل و انتقال فلزات در این منطقه کمپلکس سولفیدی بوده است. بررسی‌های بافتی و میانبارهای سیال در این منطقه نشان داد که جوشش و سرد شدن از مهمترین عوامل موثر در ته‌نشینی فلزات به‌ویژه طلا در منطقه نقدوز بوده است. بررسی ایزوتوپی گوگرد نیز نشان‌دهنده خاستگاه ماگمایی گوگرد در سیال‌های کانه‌ساز است و به‌نظر می‌رسد که برآمده از شستشوی سولفیدهای موجود در سنگ‌های آذرین در این منطقه باشد. بررسی

- Applications*", B. De Vivo and M. L. Frezzotti, eds., Virginia Tech, Blacksburg, (1994)117-130.
- [18] Wilkinson J. J., "*Fluid inclusion in hydrothermal ore deposits*", Lithos 55 (2001) 229-272.
- [19] Ahmad S.N., Rose A.W., "*Fluid inclusions in porphyry and skarn ores at Santa Rita, New Mexico*", Economic Geology 75 (1980) 229-250.
- [20] Li Y., Liu J., "*Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides*", Geochimica et Cosmochimica Acta 70 (2006)1789-1795.
- [21] Hoefs J., "*Stable isotope geochemistry*" Springer Verlag, Berlin,(2004) 244 p.
- [22] Ohmoto H., Rye R.O., "*Isotopes of sulphur and carbon. In: Barnes, H.L. (Ed.), Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*", Wiley-Interscience, New York (1979) 509-567.
- [23] Gammons C.H., Williams-Jones A.E., "*Chemical mobility of gold in the porphyry-epithermal environment*", Economic Geology 92 (1997) 45-59.
- [24] Cooke D.R., Simmons S.F., "*Characteristics and genesis of epithermal gold deposits*", Reviews in Economic Geology 13 (2000) 221-244.
- [25] Robb L., "*Introduction to Ore-forming Processes*" , Blackwell Publishing, Malden (2005) 373 p.
- [26] Pirajno F., "*Hydrothermal processes and mineral system*", Springer Science, New York (2009) 1273 p.
- [27] White N.C., Hedenquist J.W., "*Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration*", SEG Newsletter 27 (1995) 1-13.
- [28] Simmons S.F., Brown P.R.L., "*Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands-Ohaaki geothermal system: implications for understanding low-sulfidation epithermal environments*", Economic Geology 95 (2000) 971-999.
- [29]] Moncada D., Bodnar R.J., "*Gangue mineral textures and fluid inclusion characteristics of the Santa Margarita Vein in the Guanajuato Mining District, Mexico*", central European Journal of geoscience, 4 (2012) 300-309.
- [30] Xiong Yongliang., Zhai Yushen., "*Oxygen Isotope Studies of Epithermal Systems A Review*", Chinese Journal of Geochemistry 11(1992) 329-343.
- [31] Barnes H. L., "*Geochemistry of hydrothermal ore deposits*", John Wiley& Sones (1979) 798p.
- [32] Kesler S.E., "*Ore-Forming Fluids*", Elements 1(2005) 13-18
- [5] Hosseinzade M.R., Moayed M., Maghfuri S., Alipour S., Haj Alilou B., "*Geology, alteration, mineralogy and fluid inclusion studies in Balouje ; an example of copper-molybdenum porphyry deposit in the Arasbaran magmatic zone*", Geosciences Scientific Quarterly Journal 95 (1394) 297- 308.
- [6] Calagari A.A., Hosseinzadeh G., "*The mineralogy of copper- bearing skarn to the east of the Sungun-Chay river, East- Azarbaijan, Iran*", Journal of Asian Earth Sciences 28 (2006) 423- 438.
- [7] Ghadimzade H., "*Economic geology and exploration of gold in Safi Khanlu, south east of Ahar (Arasbaran zone)*", Master's thesis, Institute of Earth Sciences (1378) 200 p.
- [8] Ferdowsi R., Calagari A.A., Hosseinzadeh M.R., Siahcheshm K., "*Petrography, geochemistry and chemistry of porphyry minerals in Starghan, Kharvana, East Azarbaijan*", Iranian journal of crystallography and mineralogy 4 (1394) 774-759.
- [9] Ghorbani M., "*An introduction to economic geology of Iran*", Geological survey& mineral exploration of Iran (2002) 659 p.
- [10] Mahammadi B., "*Physical Progress Report on exploration in Safi Khanloo- Noghduz area*", Geological Survey of Iran (1385) 11p.
- [11] Mahdavi M.A., Amini Fazl A., "*Geological map 1: 100000 Ahar*", Geological Survey of Iran (1988).
- [12] Whitney D.L., Evans B.W., "*Abbreviations for names of rock-forming minerals*", American Mineralogist, 95 (2010) 85-187.
- [13] Reyes A.G., "*Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration, mineralogy to their assessment*", Journal of Volcanology and Geothermal Research 43(1990) 279-309.
- [14] Shepherd T.J., Ranbin A.H., Alderton D.H.M., "*A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*", Blackie, Glasgow (1985) 239 pp.
- [15] Hedenquist J.W., Henley R.W., "*The importance of CO₂ on freezing point measurements of fluid inclusions : evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition*", Economic Geology 80 (1985)1379-1406.
- [16] Borisenko A.S., "*Study of the salt composition of solutions in gas-liquid inclusions in minerals by the cryometric method*", Soviet Geol.&Geophys.18(1977)11-19.
- [17] Bodnar R. J., Vityk .M.O., "*Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions in Minerals, Methods and*