



بررسی‌های زمین‌شیمیایی، زمین‌فیزیکی و مطالعات سیالات در گیر در محدوده اکتشافی ظفرقد (شمال خاور استان اصفهان، ایران)

زهرا اعلمی نیا^{*}، هاشم باقری و مریم صالحی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

دربافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۰۹، پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۱۰

چکیده

منطقه اکتشافی مورد بررسی در بخش میانی کمان آتشفسانی-ماگمایی ارومیه-دختر و در فاصله ۷ کیلومتری با ختر ظفرقد، شمال خاور اصفهان قرار دارد. در این منطقه، مجموعه سنگ‌های آتشفسانی با سن اثوسن بالایی و نفوذی با سن الیگوسن پایینی و جوانتر رخمنون دارند. سنگ‌های آتشفسانی شامل داسیت، ریوداسیت و آندزیت و سنگ‌های نفوذی شامل دیوریت، کوارتزدیوریت و میکرودیوریت هستند. هاله‌های دگرسانی از فیلیک، پاتاسیک، پروپلیتیک، سیلیسی و آرژیلیک تشکیل شده است. بررسی‌های زمین‌شیمیایی انجام شده، حضور عناصر مس و مولیبدن را در ارتباط با توده‌های نفوذی دیوریت نشان می‌دهند. هاله‌های زمین‌شیمیایی عناصر گرانبهای طلا و نقره نیز از الگوی توزیع هاله‌های مس پیروی می‌کنند. عناصر آرسنیک و آنتیموان در فاصله دورتری ناهنجاری نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد ناهنجاری‌های مشاهده شده در منطقه اکتشافی ظفرقد، منطقه‌بندی مشابه با کانسارهای پورفیری و اپی‌ترمال مرتبط با آن دارد. بررسی‌های زمین‌فیزیکی عمق توده دیوریتی را بیشتر در جنوب خاور منطقه نشان داده است. کانی‌سازی اولیه سولفیدی در نزدیک توده‌های دیوریت و کوارتز دیوریت و در سنگ دیواره داسیتی گسترش یافته است. بررسی‌های سیالات در گیر انجام شده بر روی رگه‌های کوارتزی نوع I و II، دو نوع سیال با دو ویژگی متفاوت نشان می‌دهد که با پیش‌بینی الگوهای زمین‌شیمیایی عناصر بررسی شده همخوانی دارد. سیال کانی‌سازی همراه با کمپلکس‌های کلریدی (نوع I) با دمای ۳۲۸ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۳۲ تا ۴۳ درصد، منشأ ماگمایی دارد و سبب کانی‌سازی مس-مولیبدن در منطقه شده است؛ در حالی که سیال نوع II با دمای ۱۲۳ تا ۳۹۱ درجه سانتی‌گراد و شوری ۱/۱۵ تا ۵/۱۶ درصد با رخداد جوشش و اختلاط با آب‌های جوی و سردشدن سبب تشکیل ناهنجاری‌های عناصر گرانبهای شده است. عمدۀ کانی‌سازی سولفیدی با سیال نوع I همراه بوده و در جنوب خاور منطقه در نزدیکی توده دیوریتی تشکیل شده است. در نهایت، با تلفیق نتایج به دست آمده جنوب خاور منطقه جهت بررسی‌های بیشتر اکتشافی و حفاری توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سیالات در گیر، داده‌های زمین‌شیمیایی، ظفرقد، کمان آتشفسانی-ماگمایی ارومیه-دختر

سرچشمۀ ایران و رکودیگ پاکستان (Raziq et al., 2014)

مقدمه

در آن دیده می‌شود. کمان آتشفسانی-ماگمایی ارومیه-دختر، بخشی از این کمربند است. منطقه اکتشافی ظفرقد (در شمال خاور اصفهان) در بخش میانی کمان یادشده واقع است. در سال‌های اخیر، توده گرانیتی منطقه ظفرقد، بررسی شده و با

ایران یکی از بزرگترین نواحی است که بر روی ۱۷۰۰ کیلومتر از کمربند فلززایی مهم تیس قرار گرفته است. این کمربند از خاور اروپا (رومانی، اسلواکی و ترکیه) تا خاور میانه (ایران، پاکستان و افغانستان) ادامه دارد و ذخایر بزرگ مس پورفیری

برای سرد کردن در آزمایشگاه سیالات در گیر گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان انجام شده است.

زمین‌شناسی عمومی

منطقه ظرف‌قند در شمال خاور اصفهان در برگه زمین‌شناسی ۱۰۰۰۰۱: اردستان (Radfar, 1998) قرار می‌گیرد. ناحیه از نظر تقسیم‌بندی زمین‌شناسی ایران و از دیدگاه فلز‌زایی در بخش میانی کمان ارومیه- دختر واقع شده است (شکل ۱-A). بیرون زدگی‌های بسیار محدودی از قدیمی‌ترین سنگ‌ها در میان دو گسل زفره و عباس‌آباد (جنوب‌باختر محدوده بررسی) قرار دارند که شامل توالی‌های آهک، آهک‌دولومیتی و کوارتزیت هستند که به ترتیب سن دونین، پرمین و تریاس دارند (شکل ۱-B). رخنمون‌های نسبتاً وسیعی از سنگ‌های رسوبی کنگلومرا، شیل و ماسه‌سنگ با سن تریاس تا ژوراسیک و بیرون زدگی آهک‌های کرتاسه در باختر گسل زفره دیده می‌شوند (شکل ۱-B). بارزترین واحدهای سنگی شامل گسترهای از سنگ‌های آتشفشاری و آذرآواری به سن ائوسن بالایی به همراه توده‌های نفوذی ائوسن بالایی- الیکوسن پایینی و رخنمون‌های محدودی از دایک‌های جوانتر هستند (شکل ۱-B) که در برخی از قسمت‌ها توسط نهشته‌های مخروطه‌افکه‌ای، تراورتن و آبرفت‌های کواترنری سخت‌نشده قلوه‌دار پوشیده شده است. داسیتی به همراه توف‌های ریوداسیتی، ریولیتی و آندزیت‌ها هستند. توده‌های نفوذی که به‌وضوح واحدهای آتشفشاری و آذرآواری ائوسن را قطع می‌کنند شامل طیف نسبتاً وسیعی از سنگ‌های دیوریت، مونزودیوریت، گرانودیوریت و گرایت هستند (شکل ۱-B). در این ناحیه کانی‌سازی‌های متعددی از مس، طلا، آهن، سرب، روی و منگنز گزارش شده است. از نشانه‌های معدنی منطقه، می‌توان مس زفره (Moinifar et al., 2013; Portashk et al., 2011)، کوه دورجین، کوه برونسی (Roshan and Nasr Esfahani, 2014) و روی شورگستان (Khalaji, 2013) و آهن جنوب‌باختر

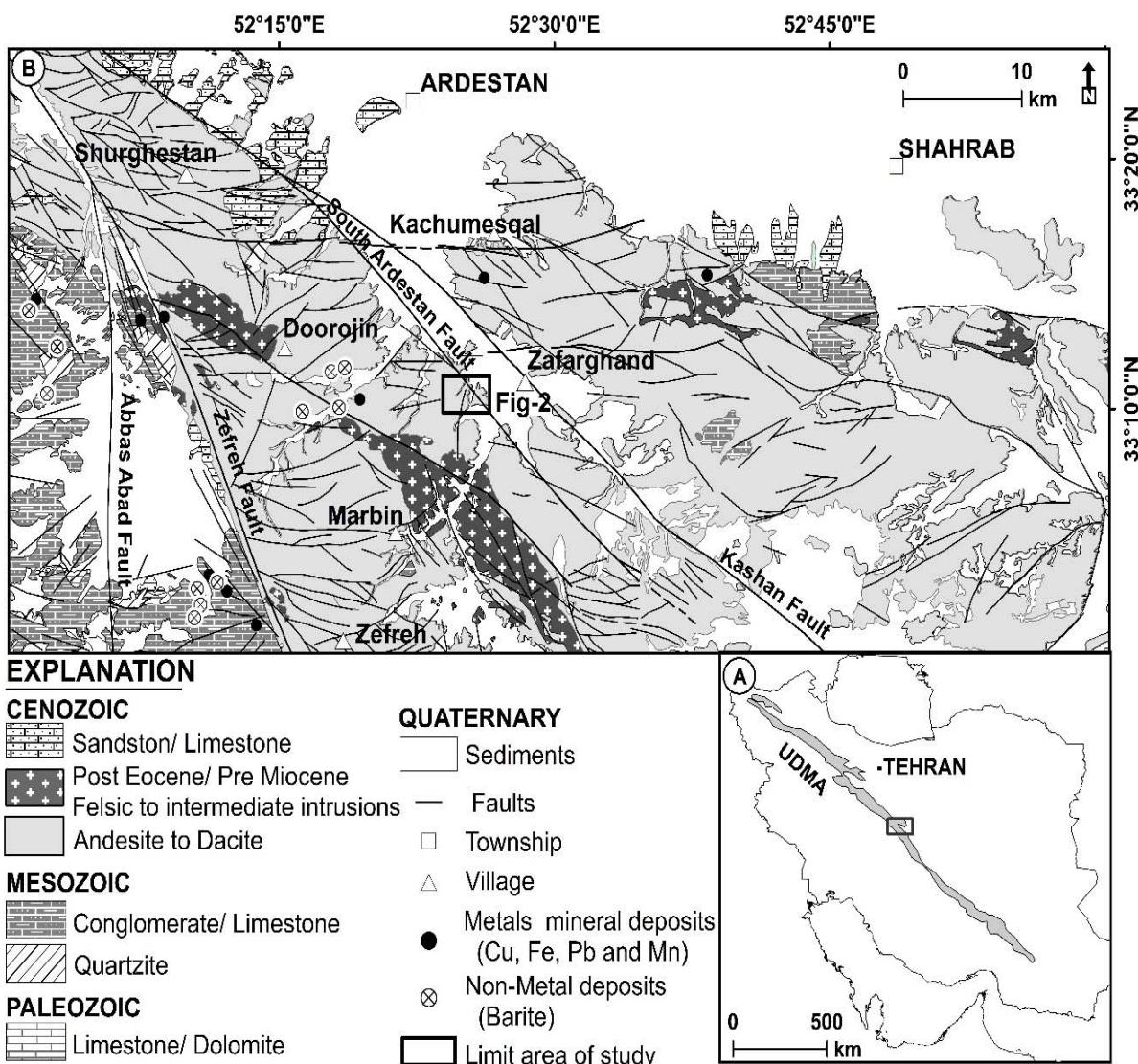
Sadeghian and Ghaffary, 2011). کارهای اکتشافی اولیه در منطقه به‌شکل تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰، برداشت نمونه‌های سنگی و ANJC (2011). هدف از این پژوهش، بررسی کانی‌سازی منطقه اکتشافی ظرف‌قند است که برای این امر از تلفیق بررسی‌های زمین‌شناسی، زمین‌شیمیایی و زمین‌فیزیکی استفاده و سیالات در گیر گلهای مرتبط با کانی‌سازی بررسی شده‌اند تا در رابطه با فعالیت‌های کانی‌سازی و توانایی‌های اقتصادی در بخش میانی کمان ارومیه- دختر شناخت بیشتری به‌دست آید.

روش مطالعه

پس از پیمایش‌های صحرایی از محدوده‌ای به ابعاد تقریبی ۲/۵ کیلومتر طول و ۱ کیلومتر عرض، بررسی‌های سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی، بر مبنای مطالعه ۳۷ مقطع نازک و نازک‌صیقلی انجام شد. چندین خط پیمایش هدفمند عمود بر جهت طولی گسل جنوب اردستان با فواصل ۱۰۰ متر و نزدیک آثار کانی‌سازی مس با فواصل ۵۰ متر انتخاب شده و تعداد ۱۸۶ نمونه در امتداد مقاطع اکتشافی از کانی‌سازی و سنگ میزان به روش خرد سنگی برداشت شده است؛ به‌طوری که ۶۲ نمونه از سنگ‌های آتشفشاری و ۱۰۸ نمونه از توده‌های نفوذی تازه و دگرسان شده (ANJC, 2011) و ۱۶ نمونه از رگه‌های سیلیسی- سولفیدی و رگه‌های سیلیسی انتخاب شد. نمونه‌های سنگی شکسته، خرد و سپس از الک ۲۰۰ مش (۷۵ میکرون) عبور داده شدند. تجزیه عناصر به روش ICP-MS در آزمایشگاه Amel استرالیا انجام شده است. برای بررسی‌های سیالات در گیر، تعداد ۵ مقطع دویر صیقل از رگه‌های کوارتز تهیه شده است. اندازه گیری‌های دما‌سنجی میکروسکوپی بر روی ۴۴ عدد سیال در گیر با استفاده از دستگاه سیالات در گیر لینکام مدل THM600 با کنترل کننده حرارتی TMS-92 و سرد کننده نوع LNP که بر روی میکروسکوپ ZIESS نصب شده و با میزان عملیات گرم و سرد کردن بین 600°C - 196°C تا با دقت ۲ درجه سانتی گراد در زمان گرم کردن و $0/2$ درجه سانتی گراد

(Safaei et al., 2008) که عملکرد امتداد لغز راست گرد دارد. گسل جنوب اردستان به عنوان یکی از قطعات گسلی کاشان معرفی شده است که سازوکار امتداد لغز راست گرد دارد (Safaei et al., 2008; Beygi, 2013).

ارdestan را نام برد (شکل ۱). مهمترین گسل‌های موجود در منطقه، گسل‌های جنوب اردستان و کاشان در راستای شمال-باختری-جنوب خاوری هستند (شکل ۱-۱). گسل کاشان مرز کمان ماگمایی ارومیه-دختر با پهنه ایران مرکزی است

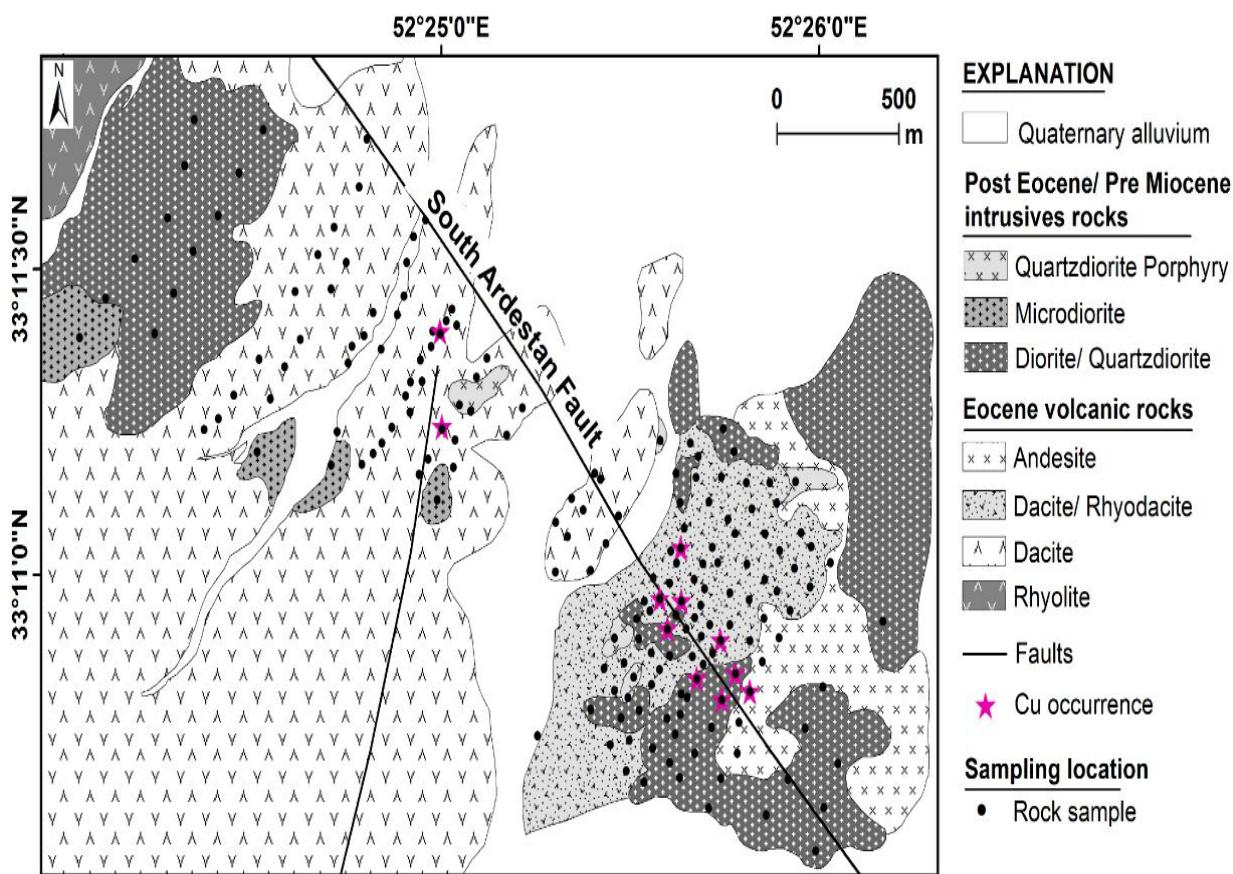


شکل ۱. A: موقعیت عمومی منطقه اکتشافی ظفرقند در بخش مرکزی کمان آتشفشاری-ماگمایی ارومیه-دختر و B: قسمتی از نقشه‌های ساده‌شده زمین‌شناسی اردستان و شهراب با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، پس از تغییراتی از رادفر (Radfar, 1998) و بحروفی (Bahroudi, 2000) موقعیت منطقه اکتشافی مس ظفرقند به همراه پراکندگی کانسارها و نشانه‌های معدنی در نقشه آمده است (برای توضیحات بیشتر واحدها، به متن مراجعه شود).

Fig. 1. A: The general location of Zafarghand district in the central part of Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), and B: The portion of simplified geological maps of Ardestan and Shahrab with 1:100,000-scale.(Modified after Radfar, 1998 and Bahroudi, 2000). Location of Zafarghand copper district and distribution of mineral deposits and indexes are shown on the map (please see text for more explanation of unites).

سنگ‌های آذرین اسیدی تا حدوداً سطح شامل سنگ‌های آتشفسنایی و نفوذی متعلق به دوره زمانی ائوسن بالایی و جوانتر رخمنون دارند که در ادامه به شرح واحدهای سنگی پرداخته شده است.

زمین‌شناسی منطقه
منطقه اکتشافی در باختر ظفرقد و در موقعیت جغرافیایی $33^{\circ}23'55''$ تا $33^{\circ}26'30''$ طول خاوری و $52^{\circ}11'52''$ تا $52^{\circ}23'30''$ عرض شمالی قرار دارد (شکل ۲). بر پایه بررسی‌های صحراوی و سنگ‌نگاری انجام شده در این منطقه،



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده منطقه اکتشافی ظفرقد (با تغییراتی از شرکت الموت نقش جهان (ANJC, 2011). محل کانی‌سازی مس و نمونه‌برداری‌های زمین‌شیمیابی سنگی بر روی نقشه نشان داده شده است.

Fig. 2. Simplified geological map of Zafarghand district (Modified after ANJC, 2011). Location of copper mineralization and rock geochemical samples are shown on the map.

فراوانترین درشت‌بلور است که از نظر اندازه تا چهار میلی‌متر می‌رسد. فلدسپارها (اغلب از جنس سانیدین) نیمه‌شكل‌دار و با گوشه‌های گردشده بوده و اغلب رسی شده‌اند (شکل ۳-С). آمفیبول حدود چهار درصد در سنگ وجود دارد، بیوتیت کمتر از یک درصد به صورت بلورهای کشیده دیده می‌شود. مگنتیت

ریولیت در منتهای گوشه شمال‌باختری با رنگ خاکستری صورتی بروز زد نسبتاً کوچکی در سطح زمین دارد (شکل ۲). بافت این سنگ‌ها پورفیری با خمیره شیشه‌ای جریانی است. درشت‌بلورهای آن شامل کوارتز، فلدسپار آلکالن، آمفیبول و بیوتیت است. کوارتز با حاشیه خلیجی شکل و گاهی گردشده،

کوارتز، آمفیبول و کانی‌های کدر است (شکل ۳-C).

دگرسانی و کانی‌سازی

با توجه به بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی، پنج نوع دگرسانی در ارتباط با فرآیندهای کانسارسازی در منطقه قابل شناسایی است. این دگرسانی‌ها اغلب در نزدیک توده‌های نفوذی و سنگ‌های میزان اطراف گسل جنوب اردستان دیده می‌شود (شکل ۲). در گوشه جنوب خاوری محدوده، دگرسانی پتاسیک با رخنمون بسیار محدود در نزدیکی توده کوارترزدیوریت و دگرسانی فیلیک در نزدیکی توده‌های نفوذی دیوریت و کوارترزدیوریت پورفیری و نیز سنگ‌های آتشفسانی داسیتی و ریوداسیتی قابل مشاهده است. با فاصله گرفتن از فیلیک، دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیک به صورت محدود جایگزین آنها شده است (شکل ۴). دگرسانی پروپلیتیک در سنگ‌های محدوده بیرونی کانسار گسترش دارد (شکل A-۳). کلریت در سطح وسیعی از منطقه جنوب اردستان به چشم می‌خورد.

دگرسانی پتاسیک با رخنمون بسیار محدود و با رگه‌های ثانویه بیوتیت، مگنتیت (شکل ۳-B) و همچنین فلدسپار آلکالن در اطراف پلازیوکلازها مشخص می‌شود (شکل F-۳). دگرسانی فیلیک با مجموعه کانی‌های ثانویه سریسیت، کوارتز، کلریت و پیریت در درزهای شکستگی‌ها گسترش یافته است. در این پهنه کانی پلازیوکلاز به سریسیت تجزیه شده و کانی‌های فرومینزین مانند بیوتیت، پیروکسن و هورنبلند به کلریت تبدیل شده و زمینه سنگ به طور پراکنده سریسیت و سیلیسی شده‌اند. کانی زایی سولفیدی اولیه به مقدار کم، به صورت افshan و استوکورک در این پهنه به چشم می‌خورد. این دگرسانی در سنگ‌های داسیتی و دیوریتی دیده می‌شود. دگرسانی سیلیسی با حضور کوارتز به صورت رگه، رگه‌چهای و یا کمتر به صورت پراکنده در متن سنگ و به صورت جانشینی بر روی کانی‌های اولیه دیده می‌شود. رگه‌ها به دو شکل موازی و استوکورک در منطقه مشخص می‌شوند (شکل G-۳). در برخی مقاطع

از کانی‌های فرعی در این سنگ است. داسیت و ریوداسیت‌ها محدوده وسیعی از منطقه را با رنگ خاکستری تا سبز در بر می‌گیرند (شکل ۲). این واحد مهمترین سنگ میزان کانی‌سازی مس در منطقه محسوب می‌شود و بافت پورفیری با خمیره فلزیک دانه‌ریز، بی‌شکل و حفره‌ای دارد. کانی‌های کوارتز، پلازیوکلاز و فلدسپار آلکالن درشت‌بلورهای عمده آنها را تشکیل می‌دهد. کوارتز با اندازه یک تادو میلی‌متر با حاشیه خلیجی دیده می‌شوند. بلورهای نسبتاً درشت نیمه شکل دار و شکل دار پلازیوکلاز (احتمالاً آلتیت) با اندازه بزرگتر از دو میلی‌متر و سانیدین با اندازه یک میلی‌متر وجود دارد. درشت‌بلورهای آمفیبول با کناره‌های سوخته با فراوانی کمتر از یک درصد و بلورهای نسبتاً ریز اکسیدشده بیوتیت در حدود دو درصد در زمینه سنگ پراکنده می‌باشند. آندزیت‌ها در جنوب خاوری و خاور منطقه رخنمون نسبتاً بزرگی دارند (شکل ۲) و به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شوند و به علت فراوانی درشت‌بلورها به شکل حفره‌ای هستند. این سنگ‌ها در مقاطع نازک دارای بافت پورفیری با زمینه میکرولیتی هستند. وجود منطقه‌بندی و بافت غربالی شکل از ویژگی‌های بارز درشت‌بلورهای پلازیوکلاز در این سنگ‌هاست. کوارتز به صورت بلورهای شکل دار دیده می‌شود. بیوتیت به صورت بلورهای ریز شکل دار و چندرنگی شدید کرم قهوه‌ای و پیروکسن‌های شکل دار با مقطع هشت ضلعی به مقدار کم وجود دو درصد وجود دارند. توده‌های نفوذی دیوریت، کوارترزدیوریت و میکرودیوریت در شمال باختری و جنوب خاوری منطقه با رنگ خاکستری تیره بروزنزد دارند. در مقاطع نازک پلازیوکلاز، بیوتیت و کمتر کوارتز به صورت روزن‌های وجود دارد. پلازیوکلاز به صورت شکل دار و نیمه‌شکل دار همراه با ماکل تکراری است (شکل D-۳). توده‌ی نیمه‌نفوذی کوارترزدیوریت پورفیری در جنوب خاوری منطقه، وسعت کوچکی را می‌پوشاند (شکل ۲). در مقطع نازک بافت پورفیری و درشت‌بلورهای آن شامل پلازیوکلاز، آمفیبول و کوارتز است. زمینه این سنگ شامل بلورهای ریز پلازیوکلاز،

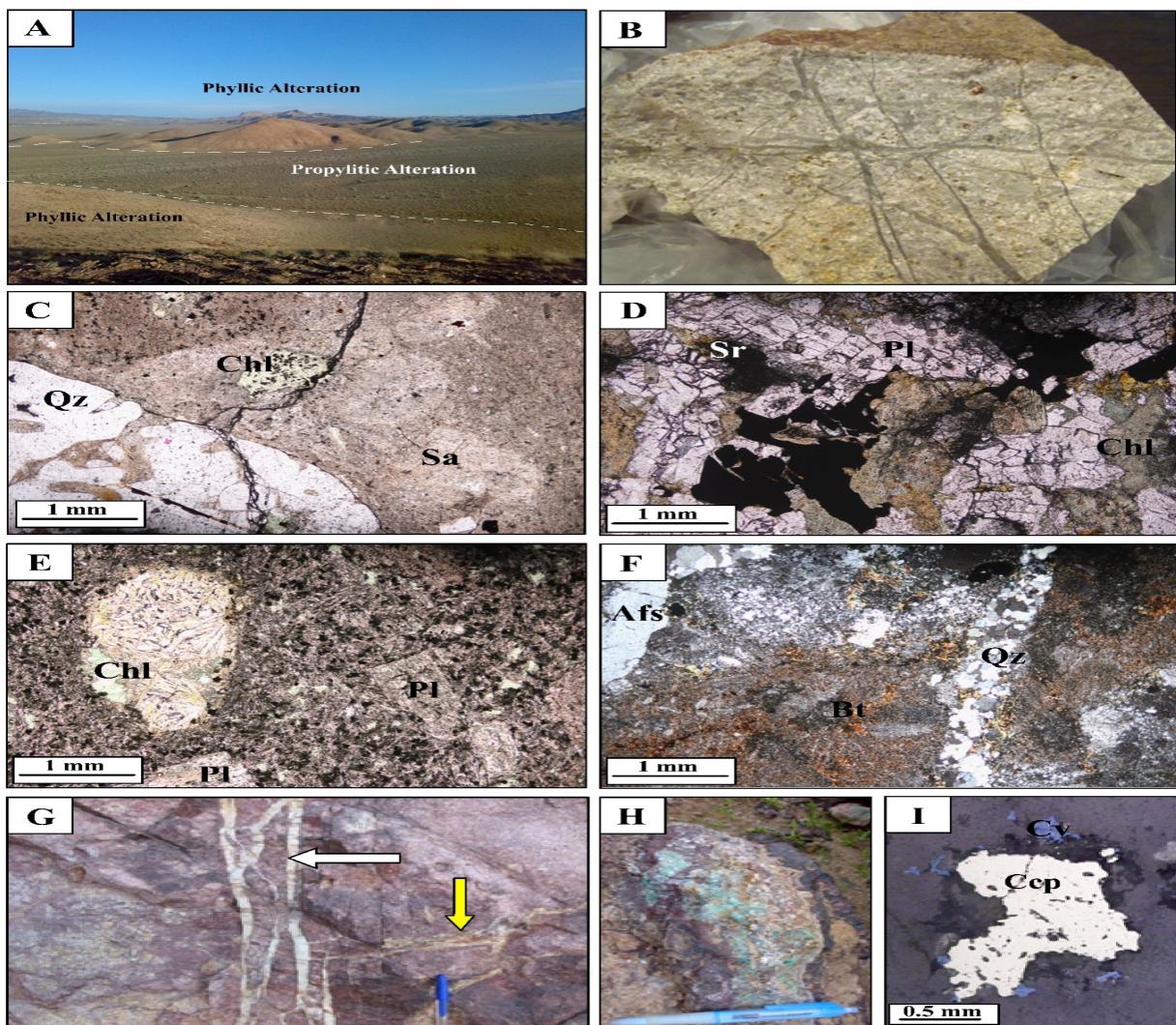
کانی‌سازی در حاشیه توده‌های دیوریت، کوارتز دیوریت و در سنگ دیواره داسیتی گسترش یافته است (شکل ۲). کانی‌زایی به دو شکل اولیه (هاپوزن) و ثانویه (سوپرژن) و به شکل رگه‌ای، رگه‌چه‌ای و افshan در سنگ میزبان حضور دارند (جدول ۱). کانی‌های اولیه شامل پیریت، کالکوپیریت، کمتر گالن و مگنتیت هستند که به صورت مجرا و یا همراه کوارتز در رگه‌چه‌ها دیده می‌شوند و کانی‌های ثانویه به شکل ملاکیت، آزوریت، هماتیت و لیمونیت هستند (شکل H-۳ و I). کوارتز در رگه‌ها به صورت کانی باطله حضور دارد. پنهانه اکسیدی و سوپرژن گستردۀ ترین بخش در محدوده ظفرقند است که با حضور فراوان اکسیدهای آهن ثانویه قابل تشخیص است.

رگه‌چه‌های سیلیسی رگه‌چه‌های بیوتیت ثانویه را قطع کرده‌اند (شکل F-۳). سولفیدها به ندرت در رگه‌چه‌های سیلیسی حضور دارند. پنهانه آرژیلیک از توسعه کمی در منطقه برخوردار است. این دگرسانی با حضور کانی‌های رسی مشخص می‌شود. به ندرت بافت اولیه سنگ‌ها در این پنهانه از بین رفته است و عموماً به همراه اکسیدهای ثانویه آهن (هماتیت و لیمونیت) مشخص می‌شود. دگرسانی پروپلیتیک یکی از گستردۀ ترین دگرسانی‌ها در منطقه است که توسط مجموعه کانی‌های اپیدوت، کلریت، سرسیت و کلسیت شناخته می‌شود. این دگرسانی حاصل تجزیه کانی‌های فرومیزین به کلریت آهن-منیزیم‌دار و کمتر سرسیت است. رگه‌چه‌های کلریتی و اپیدوتی عموماً توسط رگه‌چه‌های سیلیسی و سیلیسی-سولفیدی قطع شده‌اند.

جدول ۱. توالی کلی همیافت برای منطقه اکتشافی ظفرقند. نشانه‌های I و II کوارتز نوع ۱ و ۲ هستند.

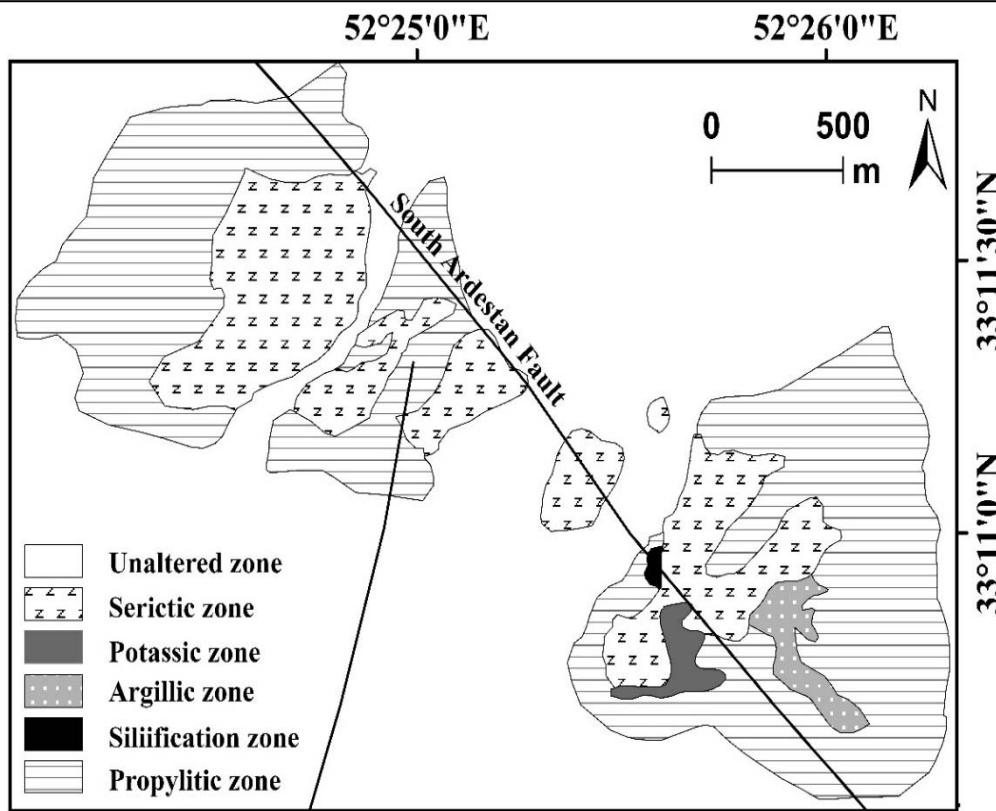
Table 1. Generalized paragenetic sequence for the Zafarghand district. Abbreviations I and II are type-1 quartz and type-2 quartz.

Minerals	Mineralization	Weathering
Chlorite	I	II
Biotite	—	
K-feldespar	—	
Quartz	I - - - II	
Pyrite	-----	
Chalcopyrite	—	
Magnetite	-----	
Galena	—	
Clay minerals	—	-----
Chalcocite	—	—
Covellite	—	—
Malachite	—	—
Azurite	—	—
Hematite	—	—
Goethite	—	—



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی و صحرایی از سنگ‌های منطقه اکتشافی ظفرقدن. A: رخمنون دگرسانی‌های فیلیک و پروپلیتیک، B: رگه‌چه‌های کوارتز، بیوتیت و مگنتیت در دگرسانی پتاسیک، C: درشت‌بلورهای کوارتز و سانیدین در سنگ دیواره ریولیت، رگه‌چه سولفیدی، داشت‌بلورهای کوارتز و بیوتیت کلریتی را قطع کرده است، D: بافت دانه‌ای در دیوریت، کانی‌سازی سولفیدی به صورت افسان در متن سنگ دیده می‌شود. پلازیوکلازها سریسیتی و کمتر کلریتی شده‌اند، E: کانی‌های کدر به‌وفور در متن توده نیمه نفوذی دیوریت پراکنده‌اند، F: بیوتیت ثانویه به دو شکل پراکنده و رگه‌چه دیده می‌شود که توسط رگه‌چه سیلیسی قطع شده است، G: رگه‌چه‌های کوارتز شیری، رگه‌چه‌های سیلیسی- سولفید قدیمی اکسید شده (زردنگ) را قطع کرده‌اند، H: کانی‌سازی مالاکیت و مگنتیت همراه با اکسیدهای آهن ثانویه دیده می‌شود و I: جانشینی کالکوپیریت توسط کولیت (Ser= سریسیت، Pl= سلیسیت، Chl= کلریت، Qz= کوارتز، Afs= بیوتیت، Bt= بیوتیت، Sa= سانیدین، Ccp= چالکوپیریت) (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 3. Field and microscopic photographs of Zafarghand district rocks, A: Outcrop of phyllitic and propylitic alterations, B: Magnetite, biotite and quartz veinlets in potassic alteration, C: Rounded phenocrysts of quartz and sanidine in rhyolite wall rock. Sulfide veinlet cut quartz and biotite chloritization phenocrysts, D: Granular texture in diorite, sulfide mineralization were seen in matrix of rock. Plagioclases altered to sericite and minor chlorite, E: Opaque minerals occurred abundant as dissemination in diorite subvolcanic, F: Secondary biotite is seen as dissemination and veinlet. It is cut by silica veinlet, G: Milky quartz veinlets is cut by older sulfide-silica veinlets (yellow color), H: Malachite and Magnetite mineralization is associated with secondary Fe oxides, and I: Chalcopyrite (yellow) replaced by covellite (blue) (Ser= Sericite, Pl= Plagioclase, Chl= Chlorite, Qz= Quartz, Afs= Alkali feldspar, Bt= Biotite, Sa= Sanidine, Ccp= chalcopyrite). (Whitney and Evans, 2010)



شکل ۴. گسترش هاله‌های دگرسانی درون محدوده اکتشافی ظفرقدن

Fig. 4. The extent of alteration haloes within the Zafarghand district

میانه، میانگین (X) و انحراف معیار (S) بر روی مقادیر خام عناصر محاسبه شد که نتایج برخی از عناصر برای نمونه‌های سنگی در جدول ۲ آمده است. سپس نمودارهای لگاریتمی توزیع عناصر رسم شده و پس از نرمال کردن داده‌ها، برای شناخت نحوه پراکندگی عناصر، مقادیر زمینه ($X+S$), حد آستانه ($X+2S$) و غلظت ناهنجاری ($X+3S$) محاسبه شده است. همین‌طور، برای بررسی توزیع عناصر کمیاب و ارتباط آنها با کانی‌سازی، نقشه‌های نمادین زمین‌شیمیایی برای عناصر مس، مولیبدن، طلا، نقره، آنتیموان، سرب، روی و منگنز از محیط سنگ تهیه و پراکنش عناصر و ارتباط آنها با کنترل کننده‌های کانی‌سازی و حرکت سیالات کانی‌ساز بررسی شد. مقادیر عناصر در راهنمای نقشه‌ها، بر اساس محاسبات انجام شده برای زمینه، حد آستانه و ناهنجاری دسته‌بندی شده است (شکل ۴ و جدول ۲).

بررسی‌های زمین‌شیمی

بررسی‌های زمین‌شیمیایی کانسار در مرحله مقدماتی بوده و طراحی شبکه نمونه‌برداری از پهنه‌های دگرسان شده در طول چندین نیم‌رخ (شکل ۲) در امتداد شمال‌خاوری-جنوب‌باختری انجام شده است. نمونه‌ها شامل نمونه‌های برداشت شده از سنگ در عرض رگ‌ها و نواحی دگرسان است که بخشی از سنگ‌های دگرسان شده را هم دربر گرفته است. هدف از برداشت این نمونه‌ها، بررسی وضعیت توزیع و پراکندگی عناصر مختلف در پهنه‌های دگرسانی، کانی‌سازی و بررسی ارتباط ووابستگی آنهاست تا با استفاده از آن تا حدودی بتوان به محیط و فرآیندهای مؤثر در تشکیل کانسار پی برد (Aitchison, 1986; Cheng, 2007; Sun et al., 2009; Porwaland Kreuzer, 2010; Chen et al., 2016). برای تخمین پراکندگی عناصر در محدوده، ابتدا مؤلفه‌های آماری دامنه،

جدول ۲. نتایج محاسبات آماری از تجزیه ۱۸۶ نمونه سنگی از منطقه اکتشافی ظفرقد. مقادیر کلارک از بئوس و گریگوریان (Beus and Grigorian, 1977).

Table 2. The results of statistical parameters of 186 rock samples from Zafarghand district. Clarke value of Beus and Grigorian (1977).

Element	Concentration range		Mean	Median	Std	X+S	X+2S	X+3S	Clarke	CR
	Minimum	Maximum			(S)				(ppm)	
Ag (ppm)	0.21	3.95	0.31	0.31	0.06	0.37	0.43	0.49	0.07	4.4
Au (ppb)	1	865	8.83	5	7.97	16.80	24.76	32.73	2.8	3.1
As (ppm)	6.6	300	8.04	7.8	0.76	8.8	9.57	10.33	2	4.0
Bi (ppm)	0.37	130.6	0.43	0.42	0.04	0.47	0.5	0.54	0.17	2.5
Cd (ppm)	0.28	17.94	0.42	0.32	0.04	0.46	0.49	0.53	0.17	2.4
Co (ppm)	1	62	3.81	3	2.91	6.72	9.64	12.55	9	0.4
Cu (ppm)	1	50441	57.01	30.5	55.8	112.8	168.6	224.4	40	1.4
Fe (%)	0.12	22.46	2.14	1.7	2.29	4.43	6.72	9.01	5.63	0.3
Mn	0.91	1986	286.6	88	382.96	669.6	1052.	1435.	900	0.3
Mo (ppm)	0.83	123.6	3.66	1.17	3.92	7.58	11.5	15.42	1.2	3.0
Ni (ppm)	3	185	3.6	3	0.76	4.36	5.11	5.87	50	0.0
Pb (ppm)	3	955	4.59	4	0.92	5.51	6.43	82.57	12	0.3
S (ppm)	1.16	87417	919.8	494	787.46	1707.	2494.	3282.	400	2.3
Sb (ppm)	1.02	2.1	1.11	1.09	0.06	1.17	1.23	1.29	0.2	5.5
Sn (ppm)	1.7	157	2.33	2.2	0.38	2.71	3.09	3.47	2.3	1.0
Zn (ppm)	1	1388	54.7	38	51.59	106.2	157.8	209.4	83	0.6

توجه: CR مخفف ضریب غنی‌شدگی و Std به معنای انحراف معيار است.

Note: CR abbreviation: Clarke concentration. Std means standard deviation.

فراوانی تک عنصری در منطقه مورد بررسی، به سمت راست تمایل دارند که بیانگر غنی‌شدگی و تمرکز غیر عادی این عناصر در نمونه‌های سنگی در محدوده مورد بررسی است. ضریب غنی‌شدگی عناصر نسبت به مقدار کلارک نشان می‌دهد اغلب عناصر در نمونه‌های سنگی غنی‌شدگی دارند (جدول ۲).

توزیع عناصر در نمونه‌های سنگی
پراکندگی مس: بیشترین فراوانی مس در نمونه‌های سنگی به ۵/۰۴ درصد رسیده و مقادیر آن در محدوده وسیعی از ۱ تا ۵۰۴۴۴ گرم در تن متغیر است (جدول ۲). حد آستانه آن در منطقه مورد بررسی ۱۱۲/۸۲ گرم در تن است (شکل ۵). بیشترین

در نمونه‌های سنگی مؤلفه‌های آماری میانه و میانگین از داده‌های خام مربوط به عناصر Zn, Ni, Co, S, Mn, Mo, Cu, Au اختلاف زیادی نشان می‌دهند که می‌تواند نشان‌دهنده ویژگی غیرعادی بودن و حضور ناهنجاری در آنها باشد (جدول ۲). مقدار حد آستانه عناصر Zn, Ni, Co, Mo, S, Mn, Cu, Au بیش از ۱/۵ برابر مقدار زمینه آنها در منطقه است. بیشترین انحراف معيار در عناصر Zn, Mo, Ni, Co, S, Mn, Cu, Au دیده می‌شود (جدول ۲). با توجه به این که معمولاً توزیع عناصر Matschullat et al., 2000; Reimann et al., 2005 فرعی در نمونه‌های سنگی غیر نرمال هستند ().

شمال‌باخته منطقه در رگه سیلیسی و با روند مشابه طلا (شمال‌خاور-جنوب‌باخته) دیده می‌شود (شکل ۵). پراکندگی سرب و روی: تغییرات غلظت سرب و روی در نمونه‌های سنگی منطقه به ترتیب ۳ تا ۹۵۵ و ۱ تا ۱۳۸۸ گرم در تن است. حد آستانه محلی سرب و روی در منطقه به ترتیب ۶/۴۳ و ۱۵۷/۸۷ گرم در تن است. نقشه‌های پراکندگی سرب و روی در سنگ، دو الگوی توزیع مشابه در جنوب‌خاور و شمال‌باخته را نشان می‌دهند (شکل ۵)، البته باید به رفتار خاص عنصر سرب در محیط‌های هوازده توجه کرد که می‌تواند سبب ایجاد ناهنجاری‌های کاذب در نمونه‌های سطحی شود.

بررسی‌های زمین‌فیزیکی

بررسی‌های زمین‌فیزیکی در منطقه به روش مغناطیسی برداشت شده است (ANJC, 2011). روش مغناطیسی‌سنگی در دو شبکه انجام شد. شبکه اول در شمال منطقه بر روی ۱۰ پروفیل و شبکه دوم در جنوب‌باخته بر روی ۱۲ پروفیل با فواصل ۶۰ متر انجام (شکل A-۶) و در مجموع شدت کل میدان مغناطیسی در ۹۶۲ ایستگاه برداشت شد. فاصله ایستگاه‌ها ۳۰ متر در نظر گرفته شد و پس از تصحیحات روزانه و انجام پردازش‌ها، نقشه‌های مختلف تهیه شدند که شامل نقشه‌های شدت کل میدان مغناطیسی، انتقال به قطب، مشتق اول قائم و ادامه به سمت بالا (فراسو) تا ۲۰، ۴۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ متری است. در این پژوهش، پس از مقایسه دقیق نقشه‌ها با نقشه زمین‌شناسی و شواهد صحرایی چند ناهنجاری معرفی شده است. مقادیر شدت مغناطیسی در منطقه مورد بررسی از ۴۷۵۹۸ تا ۴۷۷۸۶ نانوتولا متغیر است و در امتداد جنوب‌خاور به شمال‌باخته افزایش می‌یابند. حداکثر شدت میدان در شبکه اول ۴۷۵۱۱ نانوتولا نسبت به ۴۷۱۸۰ نانوتولا زمینه است. توده میکرودیوریتی به صورت استوک‌هایی در منطقه با روند شمال‌باخته-جنوب‌خاور خاور در سنگ‌های آذرین محدوده نفوذ کرده و سبب ناهنجاری‌های متعدد مغناطیسی شده است. این توده با توجه به نقشه‌های مشتق اول و ادامه فراسو حداکثر تا عمق ۱۹۰ متر امتداد دارد. ناهنجاری مرکز شبکه مربوط به

مقدار مس در نقشه نمادین مس، در جنوب‌خاور در مرز میان دیوریت با سنگ‌های اسیدی داسیت، ریوداسیت و در شمال‌باخته در توده دیوریت دیده می‌شود (مراجعه و مقایسه شکل‌های ۲ و ۵). شواهد صحرایی افزایش غلظت مس را باحضور رگه‌های استوک‌ورک حاوی اکسید آهن ثانویه و مالاکیت، رگه‌چه‌های سیلیسی و رگه‌چه‌های منگنز در دگرسانی فیلیک نشان می‌دهد.

پراکندگی مولیبدن: میانگین غلظت مولیبدن در نمونه‌های سنگ ۳/۶۶ گرم در تن و مقادیر آن در نمونه‌های سنگ از ۰/۸۳ تا ۱۲۳/۶ گرم در تن تغییر می‌کند. حد آستانه آن در محیط سنگ ۱۱/۵۰ گرم در تن است (جدول ۲). در نقشه پراکندگی مولیبدن در بخش جنوب‌خاوری محدوده، مقادیر بالای مولیبدن از الگو و روند غنی شدگی مس پیروی می‌کند (شکل ۵). بیشترین فراوانی مولیبدن از بخش جنوب‌باخته، در رگه‌چه‌های سیلیسی ناحیه دگرسانی فیلیک دیده می‌شود.

پراکندگی طلا و نقره: میانگین مقادیر طلا در نمونه‌های سنگی ۸/۸۳ میلی گرم در تن و تغییرات غلظت آن از ۱ تا ۸۶۵ میلی گرم در تن است (جدول ۲). حد آستانه آن ۲۴/۷۶ میلی گرم در تن است. مقادیر نقره در منطقه در محیط سنگ از ۰/۲۱ تا ۳/۹۵ گرم در تن متغیر است. ناهنجاری طلا در جنوب‌خاور منطقه روند شمال‌خاور-جنوب‌باخته دارد و در حاشیه سنگ دیواره داسیت، ریوداسیت و توده میکرودیوریت دیده می‌شود. الگوی ناهنجاری روند خطی دارد. رگه‌چه‌های متعدد اکسید آهن ثانویه به همراه دگرسانی‌های پروپلیتیک و فیلیک در این ناحیه حضور دارند. فراوانی زیاد عنصر نقره در نمونه‌های سنگ، در حاشیه هاله زمین‌شیمی طلا دیده می‌شود، البته نقره در منطقه، کمی پراکنش و بی‌نظمی نشان می‌دهد (شکل ۵).

پراکندگی آرسنیک، آنتیموان و بیسموت: مقادیر عناصر ردیاب آرسنیک، آنتیموان و بیسموت به ترتیب در سنگ بین ۶/۶ تا ۱/۰۲، ۳۰۰ تا ۲/۱ و ۰/۳۷ تا ۱۳۰/۶ گرم در تن متغیر است. حد زمینه این عناصر به ترتیب ۸/۸ و ۰/۴۷ گرم در زمینه است. مقادیر نسبتاً بالای آنتیموان نمونه‌های سنگی در

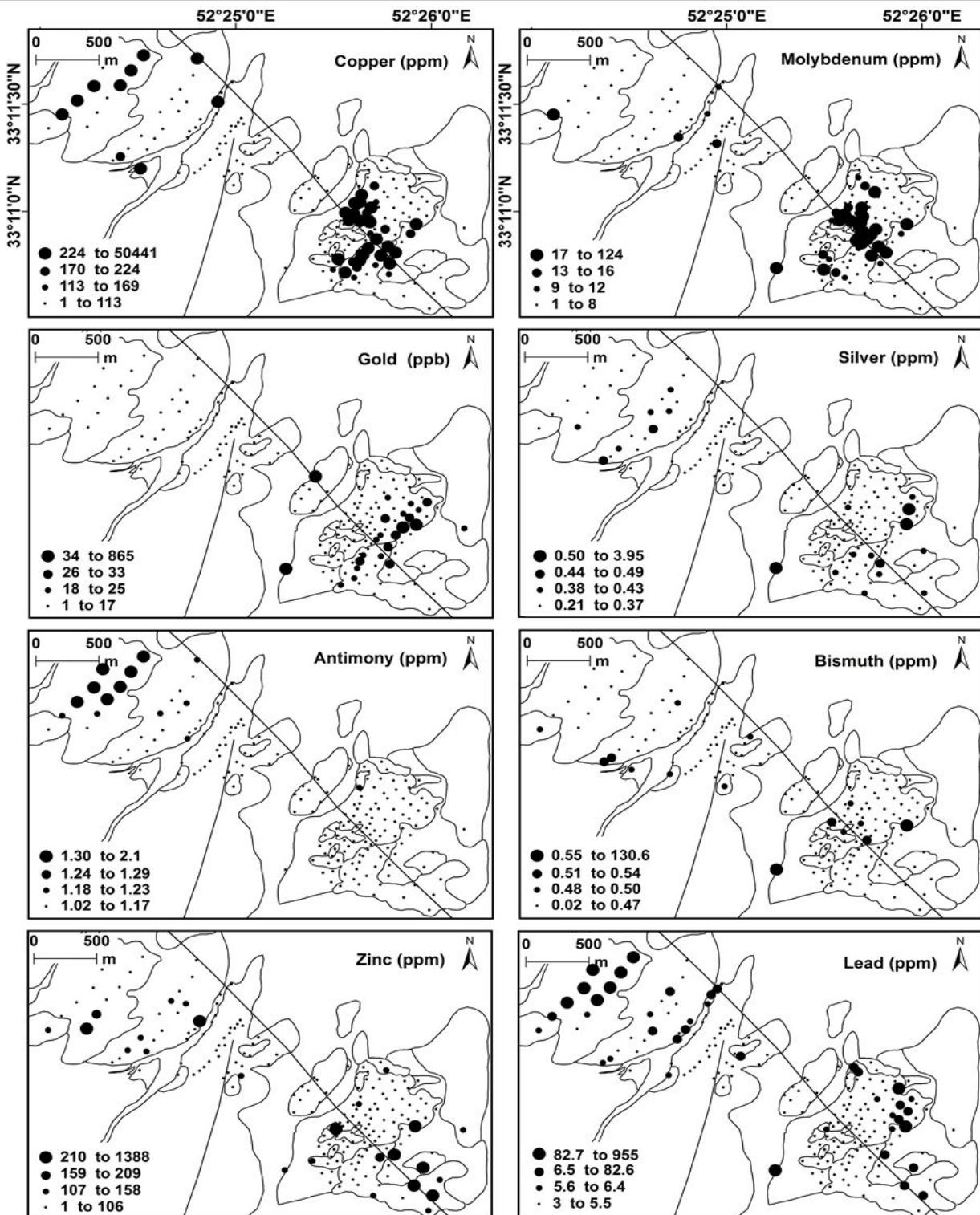
تغییر می‌کند (جدول ۴). برای تعیین دمای همگن‌شدن، طبق گلدشتاین و رینولدز (Goldstein and Reynolds, 1994) نمونه‌ها تا سقف ۵۵۰ درجه سانتی گراد گرم شدند. همه سیالات مورد بررسی طی گرم کردن به فاز مایع همگن شدند. دمای همگن‌شدن سیالات درگیر در محدوده ۱۳۳ تا ۵۵۰ درجه سانتی گراد به دست آمد، که اغلب در محدوده ۳۲۵ تا ۳۸۰ درجه سانتی گراد قرار دارند (جدول ۴). شکل حضور سیالات، دو نوع متفاوت سیالات درگیر از نظر دما، شوری و چگالی را مشخص می‌کند (شکل‌های A-۸ و B-۹). سیالات درگیر با شوری بیش از ۳۰ درصد و چگالی ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب مربوط به کوارتز نسل I موجود در رگه‌های سیلیسی-سولفیدی هستند، ترکیب سیال آنها بر اساس نقطه اوتکتیک (T_{FM}) بیشتر از نوع NaCl به همراه مقادیر کمتری از CaCl_2 و MgCl_2 در نظر گرفته می‌شود (Borisenco, 1977); در حالی که، سیالات درگیر با شوری کمتر از ۱۰ درصد و چگالی کمتر از ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب مربوط به کوارتز نسل II در رگه‌های سیلیسی هستند و در ترکیب علاوه بر NaCl ، CaCl_2 هم حضور دارد (Borisenco, 1977). تغییرات سیال نوع II از سیال نوع I، با کاهش شوری و چگالی همراه بوده است (شکل‌های A-۹ و B-۱۰) و کمپلکس‌های کلریدی (شکل A-۱۰) در تشکیل آنها نقش داشته‌اند. در رگه‌های سیلیسی نسل III، بر اساس شواهد پتروگرافی مانند همبود سیالات غنی از گاز با سیالات سه فازی و دو فازی غنی از مایع (شکل ۷)، پدیده نازک‌شدگی در سیالات (Bodnar et al., 1985) و نیز روند تغییرات شوری نسبت به دمای همگن‌شدن در نمودارهای دمای همگن‌شدن در مقابل شوری (شکل B-۹)، یانگر رخداد جوشش و آمیخته شدن با سیالات با شوری کم (آب‌های جوی) همراه با اندکی سردشدن است. بر اساس نمودار شکل ۱۰، منشأ رگه‌های سیلیسی-سولفیدی (سیال نوع I) آب ماقمایی و مرتبط با سیستم‌های پورفیری و منشأ سیالات درگیر موجود در رگه‌های سیلیسی (سیال نوع II) اختلاط با آب جوی پیشنهاد می‌شود.

استوکورک‌های پهنه‌های پتاسیک و فیلیک در منطقه است. شبکه دوم که در جنوب خاور قرار دارد، حداکثر شدت میدان در آن به ۴۷۳۶۹ نانوتسلا می‌رسد (شکل ۶-B). گسترش آن با توده دیوریتی و حضور رگه‌های سولفید و مگنتیت انطباق دارد. کاهش شدت میدان مغناطیسی در مرکز شبکه با شست و شوی سنگ‌ها بر اثر گسل خوردگی و هوازدگی و حضور رگه‌های متعدد اکسید آهن ثانویه مطابقت می‌کند. در نقشه‌های اصلاح شده شدت میدان و انتقال به قطب، ناهنجاری‌های ضعیفی در شبکه دوم (II) دیده می‌شود که با ناهنجاری‌های زمین‌شیمی و دگرسانی فیلیک مطابقت دارد.

بررسی سیالات درگیر

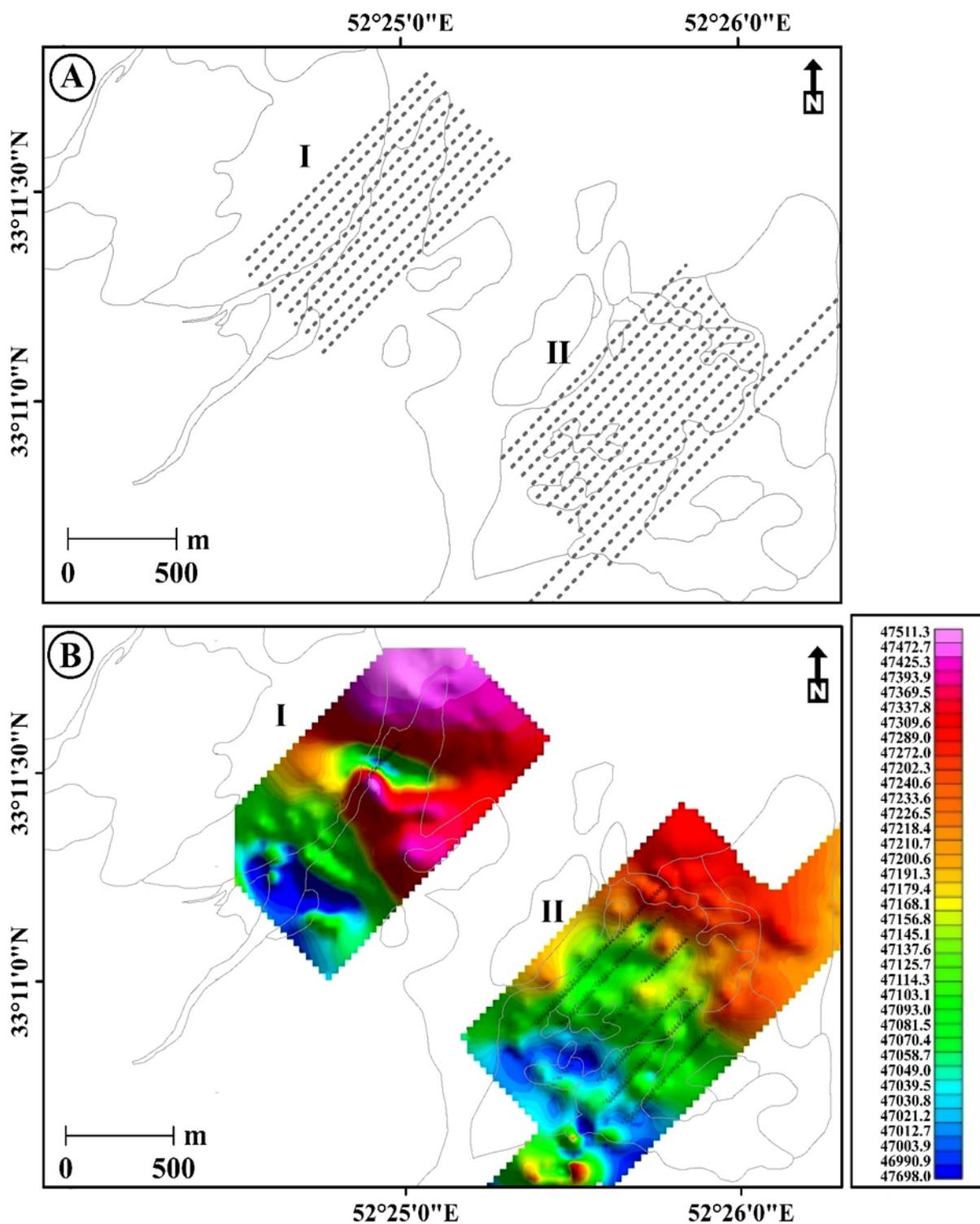
برای بررسی ماهیت فیزیکی و شیمیایی سیال کانه‌ساز و شناخت تغییرات شیمی و حرارتی کانسار (Wilkinson, 2001) بررسی‌های سیالات درگیر بر روی کوارتزهای نسل I در رگه‌های سیلیسی-سولفیدی و کوارتزهای نسل II موجود در رگه‌های سیلیسی انجام شده است (جدول‌های ۱ و ۳). برای انجام این بررسی‌ها مقاطع دوبر صیقل با ضخامت ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرومتر تهیه شد. اندازه سیالات در این نمونه‌ها از کمتر از ۵ میکرومتر تا ۲۰ میکرومتر متغیر است. بر اساس بررسی‌های پتروگرافی انجام شده بر روی میان‌بارها، همه میان‌بارهای اندازه‌گیری شده، از نوع اولیه هستند و کمایش کروی و بیضوی شکل هستند (شکل A-۷). بیشتر سیالات درگیر، در دمای اتفاق از دو فازی و کمتر سه فازی تشکیل شده‌اند (شکل ۷-B). بیشتر سیالات درگیر سه فازی در کوارتزهای نسل I رگه‌های سیلیسی-سولفیدی و پدیده نازک‌شدگی در کوارتزهای نسل II رگه‌های سیلیسی دیده شدند.

همه میان‌بارهای اولیه، پس از همگن‌شدن به فاز مایع تبدیل شده‌اند. برای تعیین شوری بعد از منجمد کردن و گرم کردن آنها، نقطه ذوب نهایی یخ (T_{LM}) از حدود -۰/۷ تا -۳۹ درجه سانتی گراد دیده شده است (جدول ۳) که مقدار شوری معادل آن (با معادله بودنار (Bodnar, 1993) از ۱/۱۵ تا ۴۳ درصد



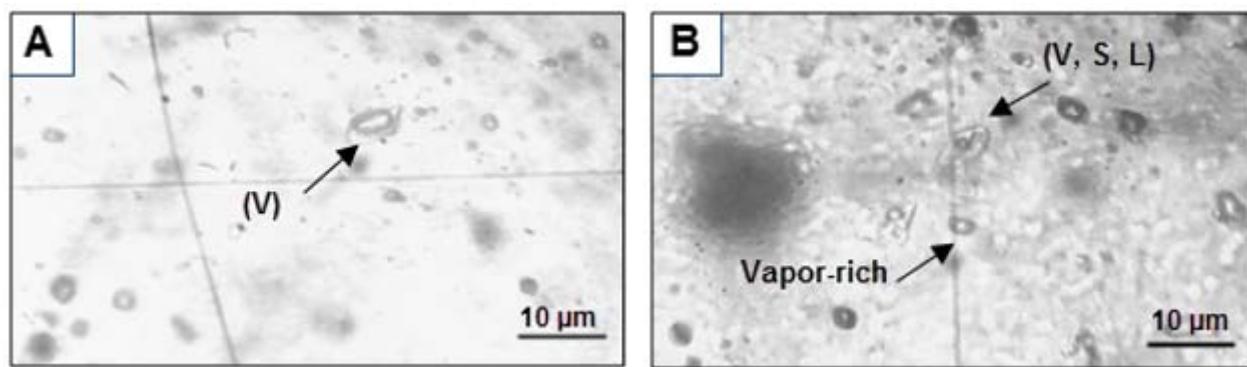
شکل ۵. نقشه‌های پراکندگی مقادیر عناصر برای داده‌های زمین‌شیمیایی سنگ در منطقه اکتشافی ظفرقند (برای مرزهای زمین‌شناسی راهنمای شکل ۲ را ببینید). مقادیر حد آستانه به کمک $X+2S$ از جدول ۲ محاسبه شده است.

Fig. 5. Maps showing distributions of Cu, Mo, Au, Ag, Sb, Bi, Pb and Zn concentration values for rock geochemical data collected from Zafarghand district (see legend of Fig. 2 for lithological boundaries). Threshold values are calculated using $X+2S$ of Table 2.



شکل ۶. A: پنجه برداشت‌های زمین‌فیزیکی بر روی نقشه زمین‌شناسی محدوده اکتشافی ظفرقند، موقعیت پروفیل‌های مغناطیس‌سنگی در دو شبکه I و II مشخص شده است و B: نقشه شدت کل میدان مغناطیسی در محدوده مورد بررسی برای دو محدوده I و II

Fig. 6. A: Geophysical investigation window on geologic map in Zafarghand district. The location of magnetometer profiles in two networks I and II is exhibited on the figure, and B: Total magnetic intensity of study area for two network I and II



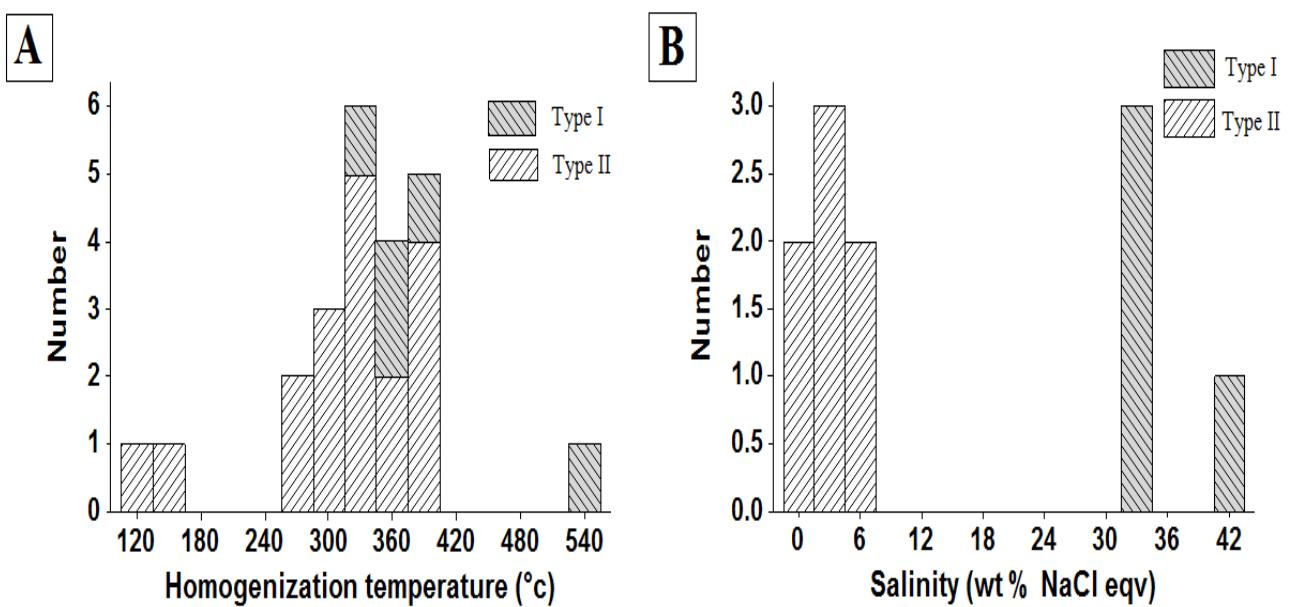
شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی از سیالات درگیر کوارتز در منطقه اکتشافی ظفرقد، A: سیال درگیر اولیه دوفازی (گاز- مایع) و B: سیال درگیر اولیه سه فازی و دو فازی (V= بخار، S= جامد، L= مایع)

Fig. 7. Photomicrographs of the fluid inclusions in the Zafarghand district in quartz. A: Primary two phase fluid inclusion (V+L), B: Primary three phase (V+L+S) and two phase (V rich) fluid inclusions. (V= Vapor, S= Solid, L= Liquid)

جدول ۳. اطلاعات میکروترمومتری از سیالات درگیر نوع I و II از کانی کوارتز در محدوده مس ظفرقد، همه سیالات بررسی شده، از نوع اولیه هستند. مخففها، N: تعداد میان‌بار، T_{LM} : دمای نقطه ذوب نهابی بخ، T_H : دمای همگن‌شدن و T_{FM} : دمای نقطه اولین تکه بخ هستند.

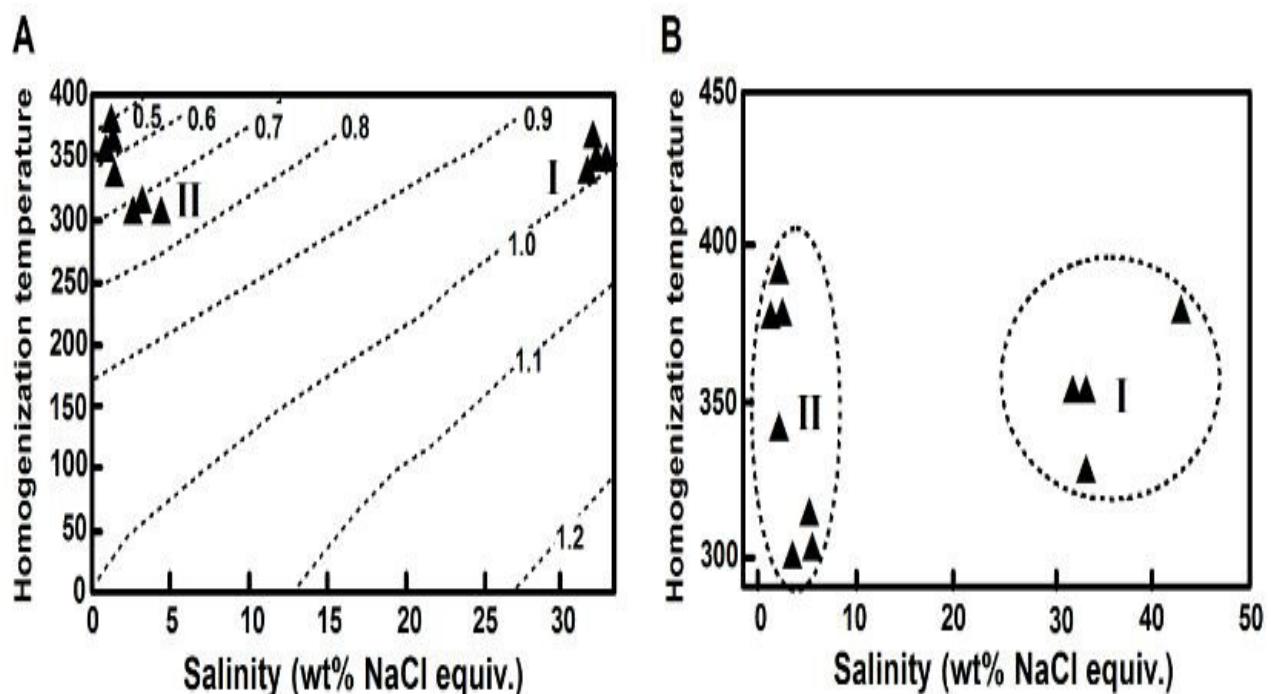
Table 3. Microthermometry data of primary fluid inclusions from the quartz in Zafarghand district. All fluids are primary. Abbreviations are N: Number of fluid inclusions, T_{LM} : Temperature of Last ice Melting point, T_H : homogenization temperature, T_{FM} : First ice Temperature of First ice Melting point.

Sample	N	T_{LM} (°C)	T_H (°C)	Type of inclusion	T_{FM} (°C)	Salinity (wt % NaCl eqv)
10	2		133	L+V		
10	3		142	L+V		
10	2		340	L+V		
10	2		325	L+V		
10	3		337	L+V		
10	1		373	L+V		
10	1		391	L+V		
10	3	-1.2	342	L+V		1.97
10	3	-1.1	390	L+V		1.81
10	1		368	L+V		
10	3		550	L+V+S		
10	3	-0.8	379	L+V		1.32
10	1	-0.7	378	L+V		1.15
11	2	-3	313	L+V	-32	4.85
11	3	-3.2	301	L+V	-31.5	5.16
11	2	-2.1	300	L+V	-31	3.43
11	1		273	L+V		
11	1		263	L+V		
11	1		323	L+V		
9	3		352	L+V+S	-65	32
9	1		379	L+V+S		43
9	2		328	L+V+S		33
9	3		353	L+V+S		33



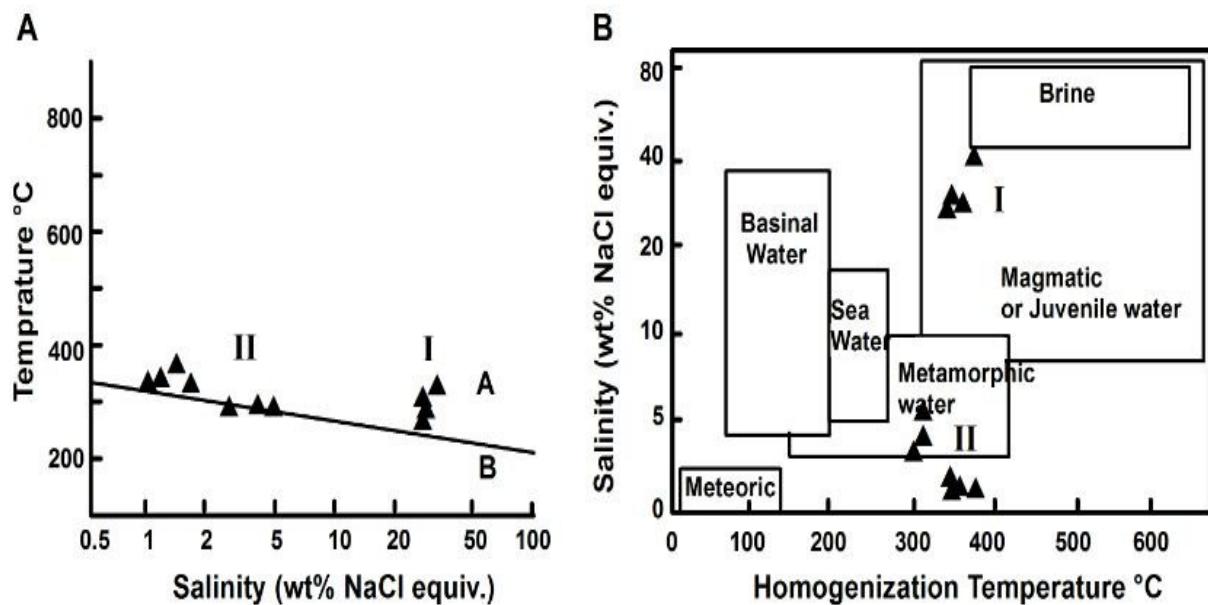
شکل ۸. A: نمودار فراوانی دمای همگن شدن و B: شوری سیالات درگیر در محدوده اکتشافی ظفرقند

Fig. 8. A:Histograms of homogenization temperature and B:salinityof fluid inclusions from the Zafarghand district



شکل ۹. نمودار دمای همگن شدن در مقابل شوری، نشان‌دهنده A: چگالی سیالات درگیر و B: روندها برای دو نوع سیال در محدوده اکتشافی ظفرقند (Wilkinson, 2001)

Fig. 9. Homogenization temperature (Th) versus salinity diagram showing densities of fluids (A)and two trend for two type fluids (B) in Zafarghand district fluids (Wilkinson, 2001)



شکل ۱۰. نمودار دمای همگن شدن در برابر شوری، مقایسه A: دامنه پایداری کمپلکس کلریدی (ناحیه A) در مقابل سولفیدی (ناحیه B)، (Large et al., 1988) و B: تعیین منشأ سیال کانه‌ساز در منطقه اکتشافی ظفرقدن (Kesler, 2005)

Fig. 10. Homogenization temperature (T_h) versus salinity plot illustrating A: Stability of chloride complex (A field) versus sulfide complex (B field) (Large et al., 1988), B: detection of originin the hydrothermal fluids at Zafarghand district (Kesler, 2005)

جدول ۴. خلاصه‌ای از ویژگی‌های سیالات نوع I و II از کانی کوارتز منطقه اکتشافی ظفرقدن

Table 4. Summary of the fluid characteristics of quartz mineral from the Zafarghand district, with indication of the type of mineralization

Stage	T_{Fm} (°C)		T_m ice (°C)		T_h (°C)		Salinity (%)	Mineralization
	N	Rang	N	Rang	N	Rang		
I	1	-65	-	-----	5	328_550	32_43	Porphyry
II	3	-32 to -31	7	-0.7_-3.2	18	123_391	1.15_5.16	Epithermal

ظرف قدن، منطقه‌بندی فلزات کانه‌ساز علاوه بر جهت حرکت سیال کانه‌ساز، مهاجرت دوباره محلول‌ها را هم نشان می‌دهند که از میان شکستگی‌ها و نواحی دگرسان انجام شده است، به طوری که ناهنجاری‌های مس، مولیبدن و طلا تطابق خوبی با حضور رگه‌های سیلیسی-سولفیدی و کانی‌های ثانویه مس دارند. نتایج حاصل از بررسی‌های کانی‌سازی، بیشترین فراوانی عنصر مس را مرتبط با حضور کالکوپیریت و مالاکیت در روی سطح نشان می‌دهد. هاله‌های فلزات گرانبهای طلا و نقره در جنوب خاور منطقه و در نزدیکی هاله‌های مس و مولیبدن هستند و از الگوی

نتیجه‌گیری

منطقه ظرف قدن از دگرسانی‌های پروپلیتیک، پتاسیک، فیلیک و آرژیلیک و کمرت سیلیسی تشکیل شده است. بررسی‌های سطحی زمین‌شیمی، تمرکزهای عناصر مس و مولیبدن را در تووده‌های دیوریت و آتسفسانی‌های داسیتی نشان می‌دهد. گسترش آنها بیشتر در جنوب خاور منطقه بوده است و با سنگ‌های دارای دگرسانی فیلیک همراه هستند. منطقه‌بندی محوری هاله‌های اولیه زمین‌شیمی، معمولاً در جهت حرکت محلول‌های کانه‌دار گسترش می‌یابند (Chen and Zhao, 1998).

می‌شود که به نظر می‌رسد گسل در تمرکز کانی‌سازی نقش داشته است و به عبارتی گسل به عنوان یک راهرو برای گسترش هاله ماده معدنی در سطح نقش داشته است. اطلاعات سیالات در گیر نیز با اطلاعات زمین‌شناسی، زمین‌شیمی و زمین‌فیزیک منطبق است. چنان‌که اشاره شد بررسی سیالات در گیر حضور دو نوع سیال را تأیید می‌کند؛ چنان‌که، کاهش دما و شوری سبب کاهش چگالی سیال کانه‌ساز شده است و تغییرات سیال همراه با کمپلکس‌های کلریدی از نوع I، به سیال نوع II با رخداد جوشش، اختلاط با آب‌های جوی و سردشدن ضعیفی همراه بوده است. سیال نوع I از یک سیال ماقمایی سازنده پورفیری منشأ گرفته و سیال نوع II از سیال گرمابی تشکیل شده است (شکل ۹ و جدول ۴). در پایان، با تلفیق داده‌های حاصل این پژوهش، جنوب‌خاور منطقه برای ادامه بررسی‌های زیرسطحی و نیز حفاری تا عمق حداقل ۱۰۰ متر پیشنهاد می‌شود.

قدرتانی

نویسنده‌گان، به خاطر پشتیبانی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان برای انجام این پژوهش، همچنین از آقای توکلی مدیریت شرکت معدنی الموت نصف جهان به خاطر همکاری در انجام بازدید از منطقه، صمیمانه سپاس‌گزاری می‌کنند.

توزیع هاله‌های مس پیروی می‌کنند. حضور برخی مقادیر نیمه اقتصادی طلا و نقره می‌تواند به کانی‌سازی ضعیف آنها در منطقه اشاره داشته باشد. عناصر بالای کانساری آنتیموان و آرسنیک در فاصله دورتری نسبت به طلا و نقره تشکیل شده‌اند و یک منطقه‌بندی را نشان می‌دهند. کمترین مقادیر شاخص سطح فرسایشی ($Pb \times Zn / Cu \times Mo$)، در مرکز محدوده قرار دارند که اشاره به بیشترین مقدار فرسایش نسبت به شمال‌باخته و جنوب‌خاور منطقه دارد. جنس و نوع رگه‌ها، تنوع و الگوی آتراسیون به قرار گرفتن منطقه مورد بررسی در افق‌های بالاتر کانی‌سازی اشاره می‌کند. الگوی عنصر سرب و کمتر روی (بدلیل فرآیندهای هوازدگی)، نیز منطقه‌بندی را تا حدودی نشان می‌دهند. به‌طور کلی افزایش شدت ناهنجاری‌ها در جنوب‌خاور دیده شده است. کانی‌سازی مس در پهنه پتاسیک، فیلیک و کمتر سیلیسی دیده می‌شود. میزان اصلی کانی‌سازی، سنگ‌های داسیت و دیوریت هستند. به‌طور کلی ناهنجاری‌های هم‌یافت چندعنصری در سطح و توزیع الگوی مشابه آنها در جنوب‌خاور منطقه، می‌تواند به حضور توده کانسار پنهان در اشاره کند که سبب آشکارشدن عناصر سازنده کانسار پنهان در سطح زمین است. بررسی‌های زمین‌فیزیک گسترش عمقی توده نفوذی دیوریتی را در جنوب‌خاور منطقه تأیید می‌کنند که به نظر می‌رسد سنگ مولد کانی‌سازی نیز باشد. از طرفی ناهنجاری زمین‌شیمی ضعیفتری از عناصر نیز در شمال‌باخته منطقه دیده

References

- Aitchison, J., 1986. The Statistical Analysis of Compositional Data. Chapman and Hall, London, 416 pp.
- ANJC (Alamut Naghsh-e-Jahan Company), 2011. Initial exploration report of Zafarghand copper index, Isfahan, Iran, 270 pp. (in Persian)
- Bahroudi, A., 2000. Geological map of Shahrab, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Beus, A.A. and Grigorian, S.V., 1977. Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposits. Published by Applied Publishing Ltd, Wilmette, Illinois, 287 pp.

Beygi, S., 2013. Geometric analysis of faults in the central part of the Urumieh-Dokhtar magmatic arc and the relationship between mineralization and structural elements, northeast of Isfahan. M.Sc. Thesis, Isfahan University, Isfahan, Iran, 135 pp. (in Persian with English abstract)

Bodnar, R.J., 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of $H_2O-NaCl$ solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683–684.

Bodnar, R.J., Reynolds, T.J. and Kuehn, C.A., 1985. Fluid inclusion systematics in epithermal

- systems. *Reviews in Economic Geology*, 2: 73–97.
- Borisenko, A.S., 1977. Study of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals by the cryometric method. *Soviet Geology and Geophysics*, 18(8): 16–28.
- Chen, J., Chen, R., Mao, Z., Yang, H., Zhang, Ch. and Han, R., 2016. Regional mineral resources assessment based on rasterized geochemical. *Ore Geology Reviews*, 74: 15–25.
- Chen, Y.Q. and Zhao, P.D., 1998. Zonation in primary halos and geochemical prospecting pattern for the Guilaizhuang gold deposit, Eastern China. *Nonrenewable Resources*, 7(1): 37–44.
- Cheng, Q., 2007. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews*, 32(1-2): 314–324.
- Goldstein, R.H. and Reynolds, T.J., 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals: SEPM Short Course 31. Society for sedimentary geology, United states of America, 213 pp.
- Kesler, S.E., 2005. Ore-forming fluids. *Elements*, 1(1): 13–18.
- Khalaji, Z., 2013. Study of exploration geochemistry and genesis in Shoureghestan ore occurrence (South of Ardestan). M.Sc. Thesis, Isfahan University, Isfahan, Iran, 114 pp. (in Persian with English abstract)
- Matschullat, J., Ottenstein, R. and Reimann, C., 2000. Geochemical background – can we calculate it? *Environmental Geochemistry*, 39 (9): 990–1000.
- Moinifar, S., Tabatabai, S.H. and Asadi Harouni, H., 2011. Litho geochemistry studies of Zefreh copper porphyry index. 1st National Conference on copper, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. (in Persian with English abstract)
- Portashk, A., Tabatabaei, H. and Khalili, M., 2013. Detection of the alteration zones by using ASTER satellite data in Zefreh copper index. 16th Conference of the Geological Society of Iran, Shiraz University, Shiraz, Iran. (in Persian with English abstract)
- Porwal, A.K. and Kreuzer, O.P., 2010. Mineral prospectivity analysis and quantitative resource estimation. *Ore Geology Reviews*, 38(3): 121–127.
- Radfar, J., 1998. Geological map of Ardestan, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Razique, A., Tosdal, R. and Creaser, R.A., 2014. Temporal evolution of the western porphyry Cu-Au systems at Reko Diq, Balochistan, western Pakistan. *Economic Geology*, 109(7): 2003–2021.
- Reimann, C., Filzmoser, P. and Garrett, R.G., 2005. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*, 346(1-3): 1–16.
- Roshan, S.H. and Nasr Isfahani, A., 2014. Petrology studies of copper- bearing altered and esite lava in Borouni district. 2nd National Conference on Applied Petrology, Islamic Azad University Isfahan (Khorasan), Isfahan, Iran. (in Persian with English abstract)
- Sadeghian, M. and Ghaffary, M., 2011. The petrogenesis of Zafarghand granitoid pluton (SE of Ardestan). *Petrology*, 2(6): 47–70. (in Persian with English abstract)
- Safaei, H., Taheri, A. and Vaziri Moghadam, H., 2008. Structural analysis and evolution of the Kashan fault (Qom–Zefreh Fault), Central Iran. *Journal of Applied Sciences*, 8(8): 1426–1434. (in Persian with English abstract)
- Sun, X., Deng, J., Gong, Q., Wang, Q., Yang, L. and Zhao, Z., 2009. Kohonen neural network and factor analysis based approach to geochemical data pattern recognition. *Journal of Geochemical Exploration*, 103(1): 6–16.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(2): 185–187.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1-4): 229–272.
- Zuo, R., Cheng, Q., Agterberg, F.P. Xia, Q., 2009. Application of singularity mapping technique to identification local anomalies using stream sediment geochemical data, a case study from Gangdese, Tibet, Western China. *Journal of Geochemical Exploration*, 101(3): 225–235.



Geochemical and geophysical investigations, and fluid inclusion studies in the exploration area of Zafarghand (Northeast Isfahan, Iran)

Zahra Alaminia*, Hashem Bagheri and Maryam Salehi

Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Submitted: May 29, 2016

Accepted: Jan. 29, 2017

KeyWords: *fluid inclusions, geochemical data, Zafarghand, Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc*

Introduction

Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA) is a good prospective area for Cu, Cu-Mo and Cu-Au deposits (Fig. 1A and B). The Zafarghand district is located in the central part of the UDMA and the northeastern Isfahan. The present study concerns geological observations, alteration investigations, geochemical data and fluid inclusion studies. The purpose of the research is to identify geochemical anomalies and source of metals in this area. Geochemical anomalies for mineralizing elements and element associations were identified by using statistical analysis methods. Additionally, these results together suggest a site for exploration drilling in this study area.

Materials and methods

We collected 186 samples (rock) along multi-cross sections oriented perpendicular to the strike of the South -Ardestan fault (Fig. 2). Trace element concentrations were determined by the ICP-MS technique in Amdel laboratory (Australia). Thin sections and doubly polished sections (100–200 µm thick) from quartz veins were prepared from samples collected from the Zafarghand district in the University of Isfahan. Heating and freezing experiments on fluid inclusions were performed as defined (by Goldstein and Reynolds (1994) on a Linkam THM600 stage.

Results

Igneous rocks in the Zafarghand area are dominated by the Eocene and post Eocene acidic-intermediate rocks that include dacite, rhyodacite and andesite associated with diorite, quartz diorite and microdiorite intrusions. The present investigations indicate that all rocks of the Zafarghand district exhibit a variety of alterations. Hydrothermal alterations include phyllitic, potassic, silicification, and argillic with widespread propylitic. The mineralization consists of malachite, azurite, hematite, and goethite, rare amounts of magnetite, pyrite, and chalcopyrite. Numerical traditional statistical analysis techniques have been applied to interpret the geochemical data of the study area. These methods are aimed at producing maps resulting from the detecting of anomaly or threshold values from the background (Aitchison, 1986; Sun et al., 2009). Anomalies of Cu, Mo, Au, Ag, Pb, Zn and Sb were determined by Mean + 2 standard deviation (Cheng, 2007; Zuo et al., 2009; Chen et al., 2016). Geochemical maps for these elements in rocks and soils (Fig. 4) show significant contrasts in haloes concentrations within the diorite and dacite rocks in the southeast of the study area. The addition of concentrations in rocks is suggested indicating that a district-scale geochemical present is confined to either base metals or precious metals. The obtained fluid inclusion results are compiled in Table 3. Primary

*Corresponding authors Email: z.alaminia@sci.ui.ac.ir

DOI: 10.22067/econg.v9i2.56334

fluid inclusions in quartz mostly consist of two-phases and rarely three phases. Homogenization temperatures (T_h) in quartz samples represent wide variations from 123° to 550°C. They were classified according to the mode of homogenization into two immiscible types (Fig. 8): These are early inclusions stage with a high Th (between 328° and 550°C) and late stage inclusions with a low Th (between 123° and 390°C). The salinity measured using the equation of Bodnar (1993) for fluid inclusions varies from 1.15 to 43 eqv.wt% NaCl. It was divided into two groups including high salinity (32 to 43 eqv.wt% NaCl) and low salinity (1.15 to 5.16 eqv.wt% NaCl).

Discussion

The predictive results obtained by field observations, geochemical and microthermometric studies are in good agreement with the known deposits. Geochemical anomalies are associated with phyllitic and rare silicified altered rocks. The host rocks of anomalies are mainly dacite and diorite, respectively with an Eocene and younger age. District-scale geochemical patterns of several elements (Cu, Mo, Au, Pb, Ag, As, and Sb) in the surface coincide with the southeastern area and can be used to explore for epithermal and/or porphyry-type deposits. Anomalies of Cu and Mo are suitable for targeting Cu-Mo mineralization. Weak anomalies associated with Au concentration should also be combined with other exploration methods to identify mineralization in the Zafarghand district. Quartz veins are classified as V1 and V2 (Fig. 3G). Based on the properties of quartz hydrothermal fluids in the Zafarghand district, they are interpreted to have evolved in two-types of fluid fields (Fig. 7):

- Stage 1 fluid inclusion: This inclusion included 32 to 43 wt percent NaCl eqv (high salinity) and homogenizing between 328° and 550°C. Primary quartz in stage 1 veins (V1) is poor inclusion and associated with sulfide minerals. It can be represented by fluids trapped during apophyry-system episode.

- Stage 2 fluid inclusion. This inclusion typically contains <5 wt percent NaCl eqv (low salinity) and homogenizing between 123° and 391°C. Quartz in stage 2 veins (V2) is characterized by milky color and inclusion rich. Low temperature, low salinity fluid inclusions demonstrate the last hydrothermal event. A possible origin for vapor-liquid inclusions in quartz veins (V2) could be explained by mixing of magma-related fluids with ground water.

References

- Aitchison, J., 1986. The Statistical Analysis of Compositional Data. Chapman and Hall, London, 416 pp.
- Bodnar, R.J., 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683–684.
- Chen, J., Chen, R., Mao, Z., Yang, H., Zhang, Ch. and Han, R., 2016. Regional mineral resources assessment based on rasterized geochemical. *Ore Geology Reviews*, 74: 15–25.
- Cheng, Q., 2007. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews*, 32(1-2): 314–324.
- Goldstein, R.H. and Reynolds, T.J., 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals: SEPM Short Course 31. Society for sedimentary geology, United states of America, 213 pp.
- Sun, X., Deng, J., Gong, Q., Wang, Q., Yang, L. and Zhao, Z., 2009. Kohonen neural network and factor analysis based approach to geochemical data pattern recognition. *Journal of Geochemical Exploration*, 103(1): 6–16.
- Zuo, R., Cheng, Q., Agterberg, F.P. Xia, Q., 2009. Application of singularity mapping technique to identification local anomalies using stream sediment geochemical data, a case study from Gangdese, Tibet, Western China. *Journal of Geochemical Exploration*, 101(3): 225–235.