



## بررسی‌های زمین‌شیمیایی، زمین‌فیزیکی و مطالعات سیالات درگیر در محدوده اکتشافی ظفرقند (شمال خاور استان اصفهان، ایران)

زهرا اعلمی‌نیا\*، هاشم باقری و مریم صالحی

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

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

### چکیده

منطقه اکتشافی مورد بررسی در بخش میانی کمان آتشفشانی- ماگمایی ارومیه- دختر و در فاصله ۷ کیلومتری باختر ظفرقند، شمال خاور اصفهان قرار دارد. در این منطقه، مجموعه سنگ‌های آتشفشانی با سن ائوسن بالایی و نفوذی با سن الیگوسن پایینی و جوانتر رخمون دارند. سنگ‌های آتشفشانی شامل داسیت، ریوداسیت و آندزیت و سنگ‌های نفوذی شامل دیوریت، کوارتز دیوریت و میکرودیوریت هستند. هاله‌های دگرسانی از فیلیک، پتاسیک، پروپلیتیک، سیلیسی و آرژیلیک تشکیل شده است. بررسی‌های زمین‌شیمیایی انجام شده، حضور عناصر مس و مولیبدن را در ارتباط با توده‌های نفوذی دیوریتی 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 ظفرقند، منطقه‌بندی مشابه با کانسارهای پورفیری و اپی‌ترمال مرتبط با آن دارند. 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 درگیر 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 کانی‌ساز 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 رخ داد جوشش و اختلاط با آب‌های جوی و سردشدگی سبب تشکیل ناهنجاری‌های عناصر گرانبها شده است. عمده کانی‌سازی سولفیدی با سیال نوع I همراه بوده و در جنوب‌خاور منطقه در نزدیکی توده دیوریتی تشکیل شده است. در نهایت، با تلفیق نتایج به‌دست آمده جنوب‌خاور منطقه جهت بررسی‌های بیشتر اکتشافی و حفاری توصیه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** سیالات درگیر، داده‌های زمین‌شیمیایی، ظفرقند، کمان آتشفشانی- ماگمایی ارومیه- دختر

### مقدمه

سرچشمه ایران و رکودینگ پاکستان (Razique et al., 2014) در آن دیده می‌شود. کمان آتشفشانی- ماگمایی ارومیه- دختر، بخشی از این کمربند است. منطقه اکتشافی ظفرقند (در شمال‌خاور اصفهان) در بخش میانی کمان یادشده واقع است. در سال‌های اخیر، توده گرانیتی منطقه ظفرقند، 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 خاورمیانه (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 ظفرقند در شمال‌خاور اصفهان در بر گه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ 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 ۱-۱). بیرون‌زدگی‌های 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 ۱-۱). رخمون‌های نسبتاً وسیعی از سنگ‌های رسوبی کنگلومرا، شیل و ماسه‌سنگ با سن تریاس تا ژوراسیک و بیرون‌زدگی آهک‌های کرتاسه در باختر گسل زفره دیده می‌شوند (شکل ۱-۱). بارزترین واحدهای سنگی شامل گستره‌ای از سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری به سن ائوسن بالایی به‌همراه توده‌های نفوذی ائوسن بالایی-الگوسن پایینی و رخمون‌های محدودی از دایک‌های جوانتر هستند (شکل ۱-۱) که در برخی از قسمت‌ها توسط نهشته‌های مخروطه‌افکنه‌ای، تراورتن و آبرفت‌های کواترنری سخت‌نشده قله‌دار پوشیده شده است (Radfar, 1998). سنگ‌های آتشفشانی شامل گدازه‌های داسیتی به‌همراه توف‌های ریوداسیتی، ریولیتی و آندزیت‌ها هستند. توده‌های نفوذی که به‌وضوح واحدهای آتشفشانی و آذرآواری ائوسن را قطع می‌کنند شامل طیف نسبتاً وسیعی از سنگ‌های دیوریت، مونزودیوریت، گرانودیوریت و گرانیت هستند (شکل ۱-۱). 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 برونی (Roshan and Nasr Esfahani, 2014)، کچومتقال، سرب و روی شورغستان (Khalaji, 2013) و آهن جنوب‌باختر

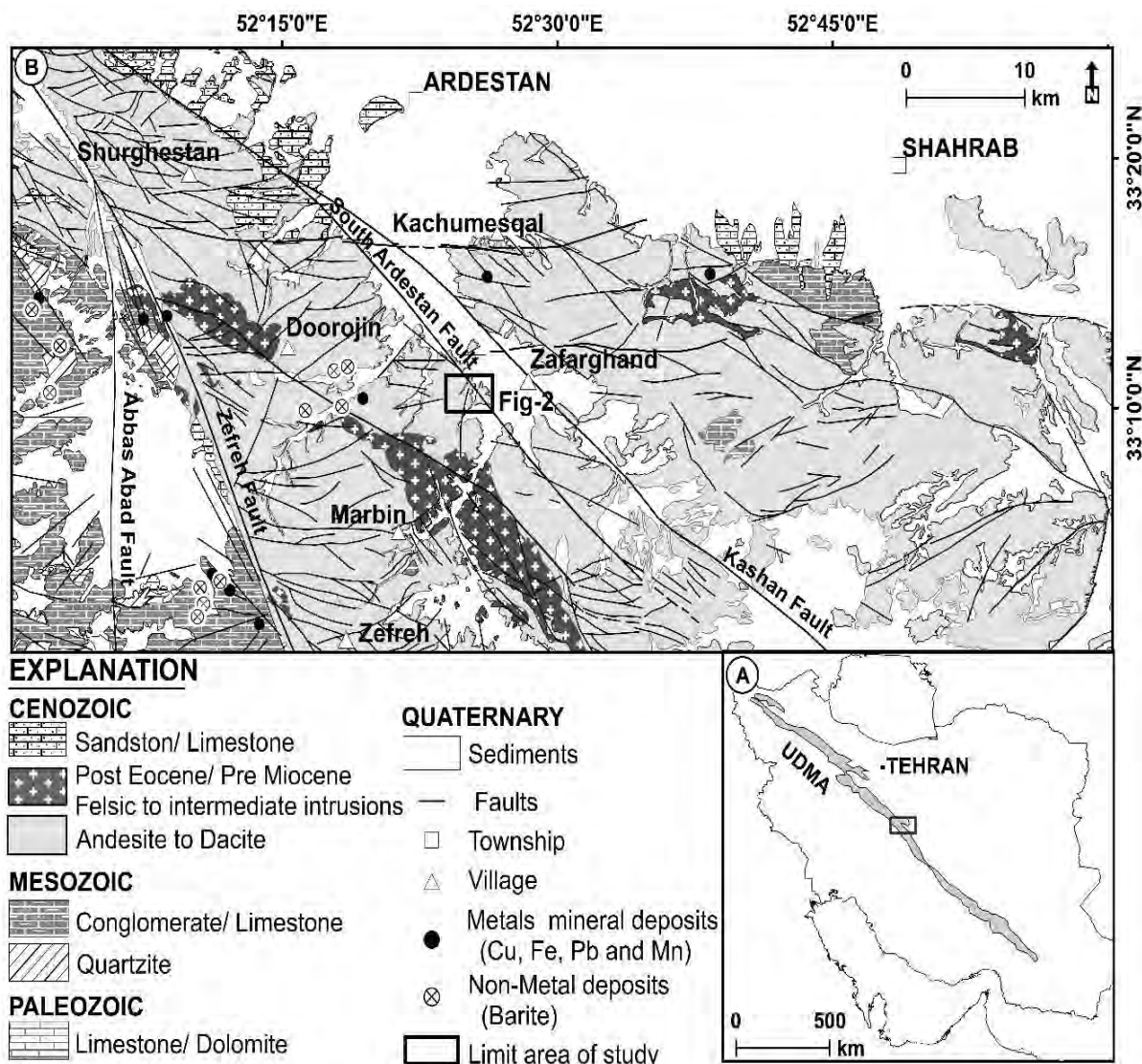
کمان قاره‌ای مرتبط است (Sadeghian and Ghaffary, 2011). کارهای اکتشافی اولیه در منطقه به‌شکل تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰، برداشت نمونه‌های سنگی و برداشت مقاطع زمین‌فیزیکی در منطقه بوده است (ANJC, 2011). هدف از این پژوهش، بررسی کانی‌سازی منطقه اکتشافی ظفرقند است که برای این امر از تلفیق بررسی‌های زمین‌شناسی، زمین‌شیمیایی و زمین‌فیزیکی استفاده و سیالات در گیر رگه‌های 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 صحرائی 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 نازک صیقلی 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 سنگ‌میزبان به روش خرده سنگی برداشت شده است؛ به طوری که ۶۲ نمونه از سنگ‌های آتشفشانی و ۱۰۸ نمونه از توده‌های نفوذی تازه و دگرسان‌شده (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 Amdel استرالیا انجام شده است. برای بررسی‌های سیالات در گیر، تعداد ۵ مقطع دوبر صیقل از رگه‌های کوارتز تهیه شده است. اندازه‌گیری‌های دماسنجی میکروسکپی بر روی ۴۴ عدد سیال در گیر با استفاده از دستگاه سیالات در گیر لینکام مدل THM600 با کنترل‌کننده حرارتی TMS-92 و سردکننده نوع LNP که بر روی میکروسکپ ZIESS نصب شده و با میزان عملیات گرم و سرد کردن بین ۱۹۶°C تا ۶۰۰°C با دقت ۲ درجه سانتی‌گراد در زمان گرم کردن و ۰/۲ درجه سانتی‌گراد

اردستان را نام برد (شکل ۱-ب). مهمترین گسل‌های موجود در منطقه، گسل‌های جنوب اردستان و کاشان در راستای شمال-باختری- جنوب‌خاوری هستند (شکل ۱-ب). گسل کاشان مرز کمان ماگمایی ارومیه- دختر با پهنه ایران مرکزی است (Safaei et al., 2008; Beygi, 2013).

گسل کاشان معرفی شده است که سازوکار امتداد لغز راست‌گرد دارد (Safaei et al., 2008; Beygi, 2013). گسل جنوب اردستان به‌عنوان یکی از قطعات گسلی کاشان معرفی شده است که سازوکار امتداد لغز راست‌گرد دارد (Safaei et al., 2008; Beygi, 2013).



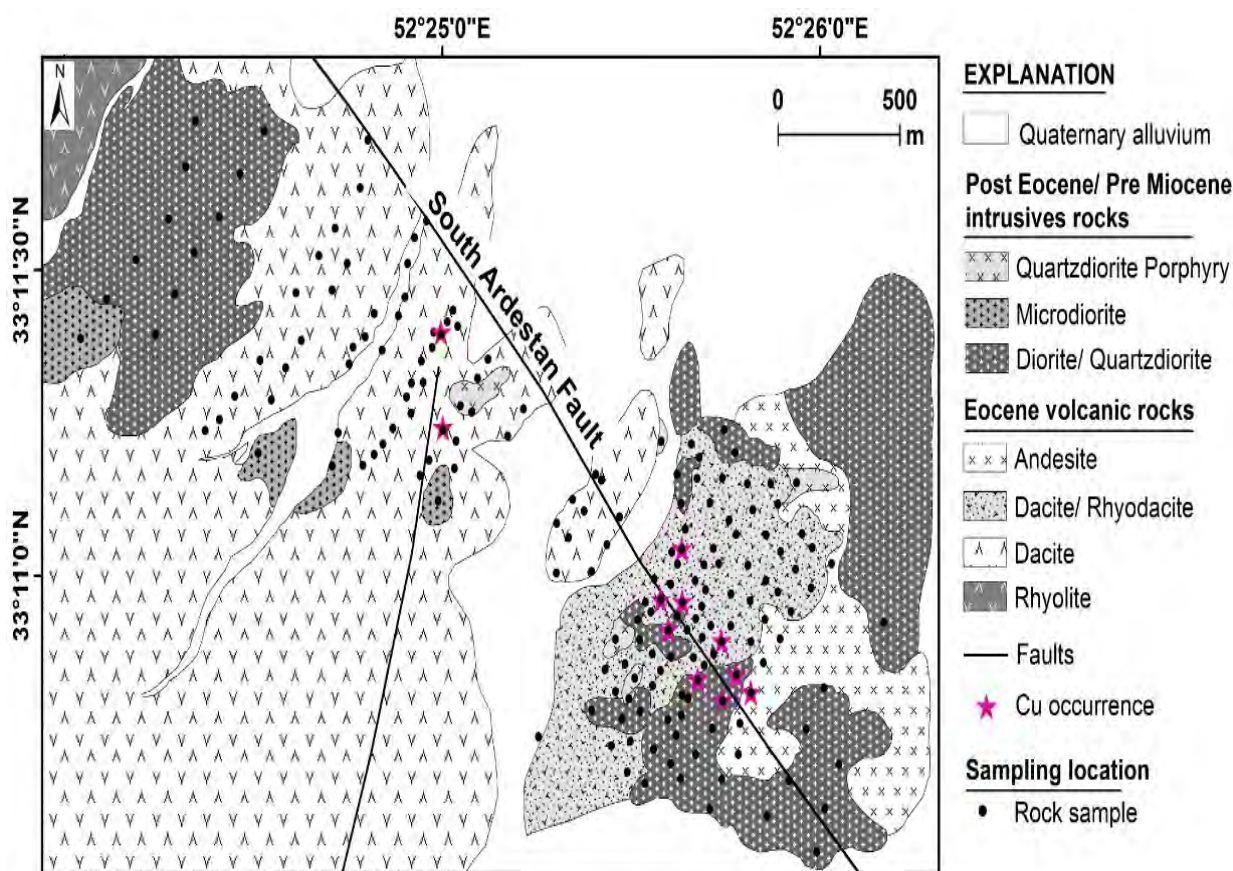
شکل ۱. A: موقعیت عمومی منطقه اکتشافی ظفرقند در بخش مرکزی کمان آتشفشانی- ماگمایی ارومیه- دختر و B: قسمتی از نقشه‌های ساده‌شده زمین‌شناسی اردستان و شهرباب با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، پس از تغییراتی از رادفر (Radfar, 1998) و بحرودی (Bahroudi, 2000) موقعیت منطقه اکتشافی مس ظفرقند به‌همراه پراکندگی کانسارها و نشانه‌های 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 geologic 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 units).

## زمین‌شناسی منطقه

منطقه اکتشافی در باختر ظفرقند و در موقعیت جغرافیایی  $52^{\circ}23'55''$  تا  $52^{\circ}26'30''$  طول‌خاوری و  $33^{\circ}11'52''$  تا  $33^{\circ}10'30''$  عرض شمالی قرار دارد (شکل ۲). بر پایه بررسی‌های صحرایی و سنگ‌نگاری انجام‌شده در این منطقه،

سنگ‌های آذرین اسیدی تا حدواسط شامل سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی متعلق به دوره زمانی ائوسن بالایی و جوانتر رخمون دارند که در ادامه به شرح واحدهای سنگی پرداخته شده است.



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

**Fig. 2.** Simplified geologic 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) نیمه‌شکل‌دار و با گوشه‌های گردشده بوده و اغلب رسی شده‌اند (شکل ۳- C). آمفیبول حدود چهار درصد در سنگ وجود دارد، بیوتیت کمتر از یک درصد به صورت بلورهای کشیده دیده می‌شود. مگنتیت

ریولیت در متتالیته گوشه شمال‌باختری با رنگ خاکستری صورتی برونزد 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 ۳-۳C).

### 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 میزبان اطراف گسل جنوب اردستان دیده می‌شود (شکل ۲). در گوشه جنوب‌خاوری محدوده، دگرسانی پتاسیک با رخنمون بسیار محدود در نزدیکی توده کوارتزدیوریت و دگرسانی فیلیک در نزدیکی توده‌های نفوذی دیوریت و کوارتزدیوریت پورفیری و نیز سنگ‌های آتشفشانی 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 ۳-۳A). کلریت در سطح وسیعی از منطقه جنوب اردستان به چشم می‌خورد.

دگرسانی پتاسیک با رخنمون بسیار محدود و با رگه‌های ثانویه بیوتیت، مگنتیت (شکل ۳-۳B) و همچنین فلدسپار آلکالین در اطراف پلاژیوکلازها مشخص می‌شود (شکل ۳-۳F). دگرسانی فیلیک با مجموعه کانی‌های ثانویه سریسیت، کوارتز، کلریت و پیریت در درزه‌ها و شکستگی‌ها گسترش یافته است. در این پهنه کانی پلاژیوکلاز به سریسیت تجزیه شده و کانی‌های فرومنیزین مانند بیوتیت، پیروکسن و هورنبلند به کلریت تبدیل شده و زمینه سنگ به‌طور پراکنده سریسیتی و سیلیسی شده‌اند. کانی‌زایی سولفیدی اولیه به مقدار کم، به صورت افشان 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 جانیشینی بر روی کانی‌های اولیه دیده می‌شود. رگه‌ها به دو شکل موازی و استوک‌ورک در منطقه مشخص می‌شوند (شکل ۳-۳G). در برخی مقاطع

از کانی‌های فرعی در این سنگ است. داسیت و ریوداسیت‌ها محدوده وسیعی از منطقه را با رنگ خاکستری تا سبز در برمی‌گیرند (شکل ۲). این واحد مهمترین سنگ میزبان کانی‌سازی مس در منطقه محسوب می‌شود و بافت پورفیری با خمیره فلسیک دانه‌ریز، بی‌شکل و حفره‌ای دارد. کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز و فلدسپار آلکالین درشت‌بلورهای عمده آنها را تشکیل می‌دهد. کوارتز با اندازه یک تا دو میلی‌متر با حاشیه خلیجی دیده می‌شوند. بلورهای نسبتاً درشت نیمه شکل دار و شکل دار پلاژیوکلاز (احتمالاً آلپیت) 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 جنوب‌خاوری 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 میکروولیتی هستند. وجود منطقه‌بندی و بافت غربالی‌شکل از ویژگی‌های بارز درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز 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 و حدود دو درصد وجود دارند. توده‌های نفوذی دیوریت، کوارتزدیوریت و میکرودیوریت در شمال‌باختری و جنوب‌خاوری منطقه با رنگ خاکستری تیره برونزد دارند. در مقاطع نازک پلاژیوکلاز، بیوتیت و کمتر کوارتز به صورت روزنه‌ای وجود دارد. پلاژیوکلاز به صورت شکل دار و نیمه‌شکل دار همراه با ماکل تکراری است (شکل ۳-۳D). توده‌ی نیمه‌نفوذی کوارتزدیوریت پورفیری در جنوب‌خاوری منطقه، وسعت کوچکی را می‌پوشاند (شکل ۲). در مقطع نازک بافت پورفیری و درشت‌بلورهای آن شامل پلاژیوکلاز، آمفیبول و کوارتز است. زمینه این سنگ شامل بلورهای ریز پلاژیوکلاز،

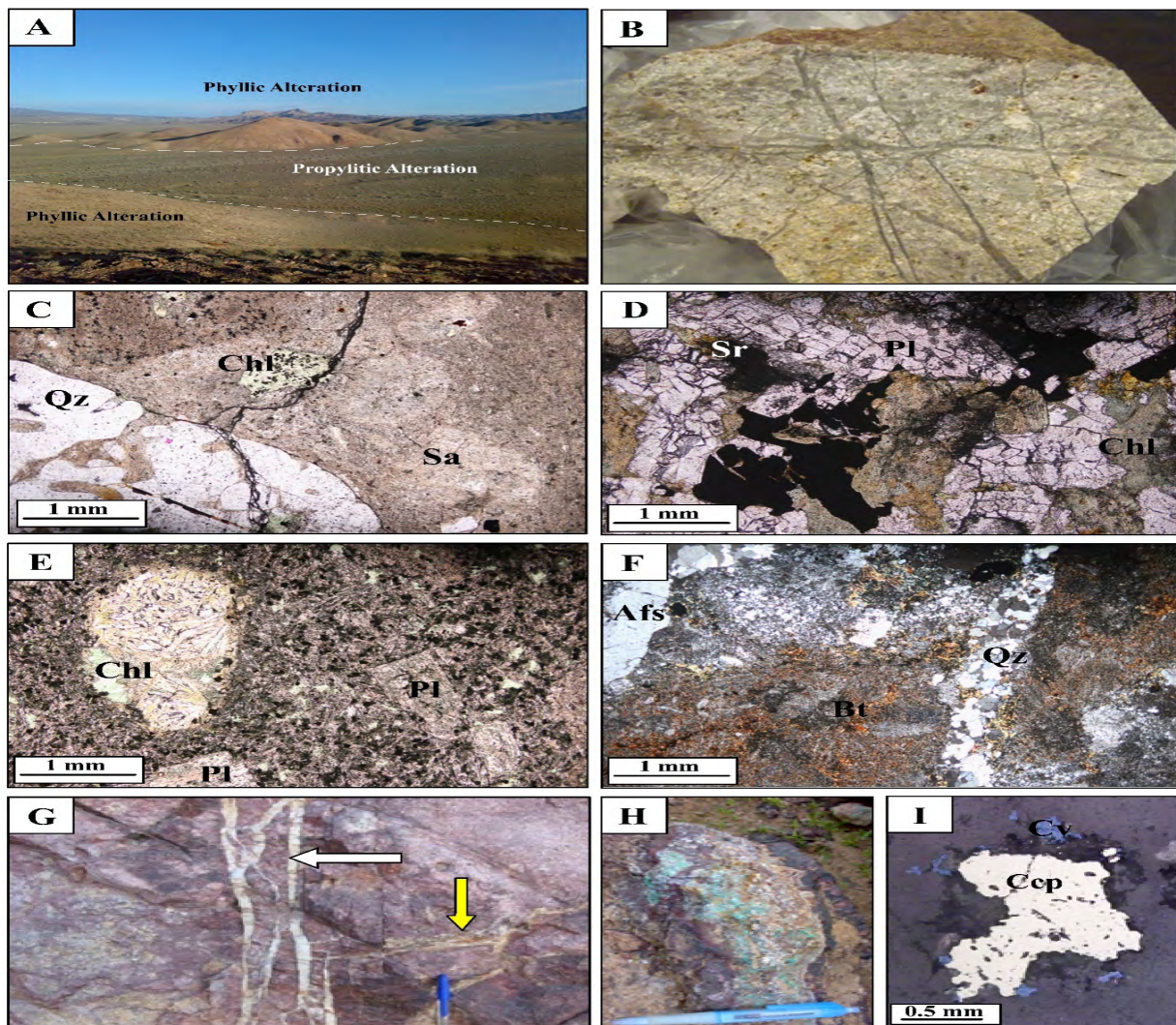
رگه‌چه‌های سیلیسی رگه‌چه‌های بیوتیت ثانویه را قطع کرده‌اند (شکل ۳-F). سولفیدها به‌ندرت در رگه‌چه‌های سیلیسی حضور دارند. پهنه آرژیلیک از توسعه کمی در منطقه برخوردار است. این دگرسانی با حضور کانی‌های رسی مشخص می‌شود. به‌ندرت بافت اولیه سنگ‌ها در این پهنه از بین رفته است و معمولاً به همراه اکسیدهای ثانویه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

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

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

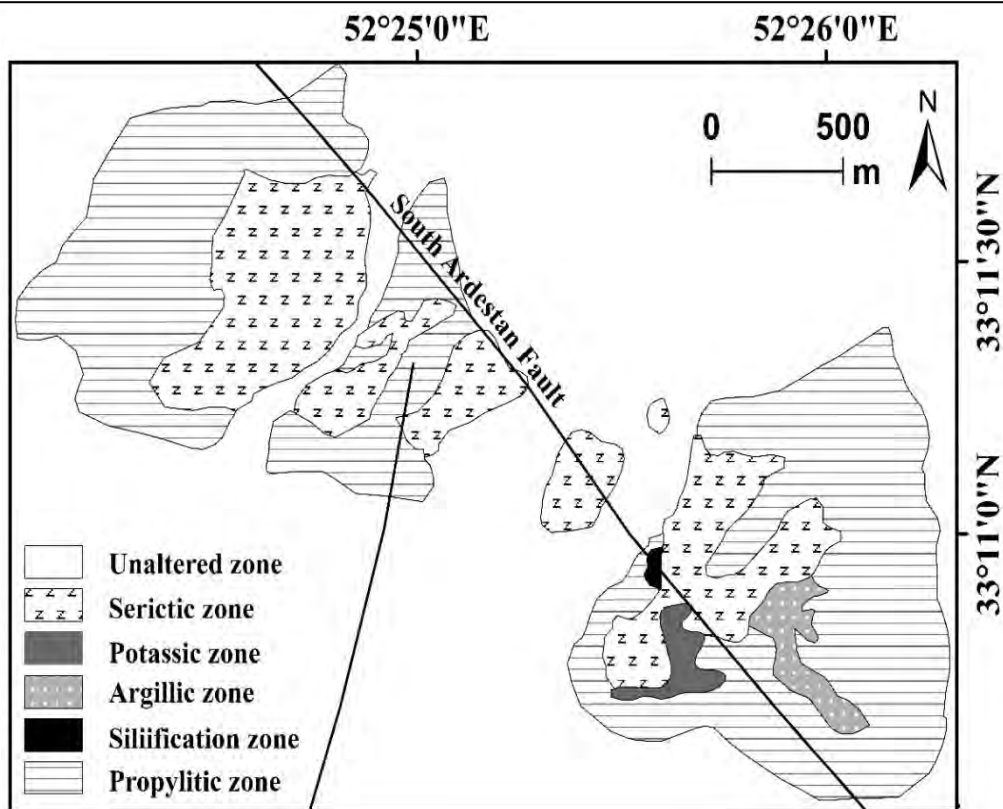
**Table 1.** Generalized paragenetic sequence for the Zafarghand district. Abbreviations I and II are type-1 quartz and type-2 quartz.

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



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی و صحرایی از سنگ‌های منطقه اکتشافی ظفرقند. A: رخنمون دگرسانی‌های فیلیک و پروپلیتیک، B: رگه‌چه‌های کوارتز، بیوتیت و مگنتیت در دگرسانی پتاسیک، C: درشت‌بلورهای گردشده کوارتز و سانیدین در سنگ دیواره ریولیت، رگه‌چه سولفیدی، درشت‌بلورهای کوارتز و بیوتیت کلریتی را قطع کرده است، D: بافت دانه‌ای در دیوریت، کانی‌سازی سولفیدی به‌صورت افشان در متن سنگ دیده می‌شود. پلاژیوکلازها 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 (زردرنگ) را قطع کرده‌اند، H: کانی‌سازی مالاکیت و مگنتیت همراه با اکسیدهای آهن ثانویه دیده می‌شود و I: جان‌شینی کالکوپیریت توسط کولیت (Ser= سریسیت، Pl= پلاژیوکلاز، Chl= کلریت، Qz= کوارتز، Bt= بیوتیت، Afs= آلکالی فلدسپار، Sa= سانیدین، Ccp= کالکوپیریت (Whitney and Evans, 2010)

**Fig. 3.** Field and microscopic photographs of Zafarghand district rocks, A: Outcrop of phyllic 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 ظفرقند

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

#### 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 رگه‌ها 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 و وابستگی 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 2016; Kreuzer, 2010; Chen et al., 2016). برای تخمین پراکندگی عناصر در محدوده، ابتدا مؤلفه‌های آماری دامنه،

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 کنترل‌کننده‌های 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).



جدول ۲. نتایج محاسبات آماری از تجزیه ۱۸۶ نمونه سنگی از منطقه اکتشافی ظفرقند. 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 (S)	X+S	X+2S	X+3S	Clarke (ppm)	CR
	Minimum	Maximum								
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 معیار است.

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

فراوانی تک‌عنصری 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 سنگ مؤلفه‌های آماری میانه و میانگین از داده‌های خام مربوط به عناصر Zn و 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 و Ni, Co, Mo, S, Mn, Cu, Au بیش از ۱/۵ برابر مقدار زمینه آنها در منطقه است. بیشترین انحراف معیار در عناصر Zn, Mo, Ni, Co, S, Mn, Cu, Au و Matschullat et فرعی در نمونه‌های سنگی غیر نرمال هستند (al., 2000; Reimann et al., 2005)، توزیع نمودارهای

شمال‌باختر منطقه در رگه سیلیسی و با روند مشابه طلا (شمال‌خاور - جنوب‌باختر) 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 شمال‌باختر 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 مغناطیس‌سنجی در دو شبکه انجام شد. شبکه اول در شمال منطقه بر روی ۱۰ پروفیل و شبکه دوم در جنوب‌باختری بر روی ۱۲ پروفیل با فواصل ۶۰ متر انجام (شکل ۶-A) 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 ۴۶۷۸۶ تا ۴۷۵۹۸ نانوتسلا متغیر است و در امتداد جنوب‌خاور به شمال‌باختر افزایش می‌یابند. حداکثر شدت میدان در شبکه اول ۴۷۵۱۱ نانوتسلا نسبت به ۴۷۱۸۰ نانوتسلا زمین است. توده میکرودیوریتی به صورت استوک‌هایی در منطقه با روند شمال‌باختر-باختر-جنوب‌خاور 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 شمال‌باختر در توده دیوریت دیده می‌شود (مراجعه و مقایسه شکل‌های ۲ و ۵). شواهد صحرایی افزایش غلظت مس را با حضور رگه‌های استوک‌ورک حاوی اکسید آهن ثانویه و مالاکیت، رگه‌های سیلیسی و رگه‌های منگنز در دگرسانی فلیک 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 غنی‌شدگی مس پیروی می‌کند (شکل ۵). بیشترین فراوانی مولیبدن از بخش جنوب‌باختری، در رگه‌های سیلیسی ناحیه دگرسانی فلیک دیده می‌شود.

**پراکندگی طلا و نقره:** میانگین مقادیر طلا در نمونه‌های سنگی ۸/۸۳ میلی‌گرم در تن و تغییرات غلظت آن از ۱ تا ۸۶۵ میلی‌گرم در تن است (جدول ۲). حد آستانه آن ۲۴/۷۶ میلی‌گرم در تن است. مقادیر نقره در منطقه در محیط سنگی از ۰/۲۱ تا ۳/۹۵ گرم در تن متغیر است. ناهنجاری طلا در جنوب‌خاور منطقه روند شمال‌خاور-جنوب‌باختر دارد و در حاشیه سنگ دیواره داسیت، ریوداسیت و توده میکرودیوریت دیده می‌شود. الگوی ناهنجاری روند خطی دارد. رگه‌های متعدد اکسید آهن ثانویه به همراه دگرسانی‌های پروپلیتیک و فلیک 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 ۳۰۰، ۱/۰۲ تا ۲/۱ و ۰/۳۷ تا ۱۳۰/۶ گرم در تن متغیر است. حد زمینه این عناصر به ترتیب ۸/۸، ۱/۱۷ و ۰/۴۷ گرم در زمینه است. مقادیر نسبتاً بالای آنتیموان نمونه‌های سنگی در

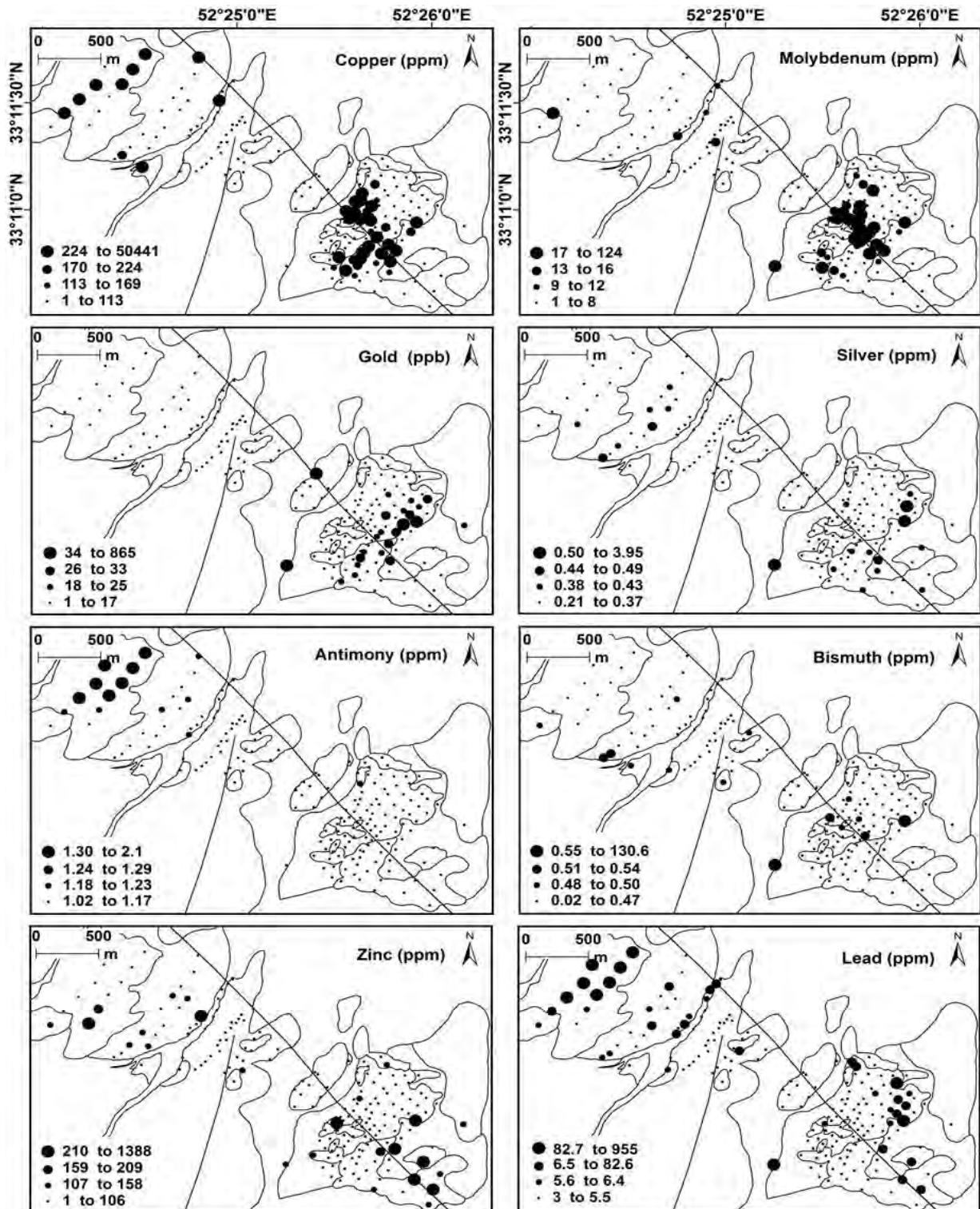
استوک و رگ‌های پهنه‌های پتاسیک و فلیک در منطقه است. شبکه دوم که در جنوب‌خاور قرار دارد، حداکثر شدت میدان در آن به ۴۷۳۶۹ نانوتسلا می‌رسد (شکل ۶-B). گسترش آن با توده دیوریتی و حضور رگه‌های سولفید و مگنتیت انطباق دارد. کاهش شدت میدان مغناطیسی در مرکز شبکه با شست‌وشوی سنگ‌ها بر اثر گسل خوردگی و هوازدگی و حضور رگه‌های متعدد اکسید آهن ثانویه مطابقت می‌کند. در نقشه‌های اصلاح‌شده شدت میدان و انتقال به قطب، ناهنجاری‌های ضعیفی در شبکه دوم (II) دیده می‌شود که با ناهنجاری‌های زمین‌شیمی و دگرسانی فلیک 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 انجام‌شده بر روی میان‌بارها، همه میان‌بارهای اندازه‌گیری‌شده، از نوع اولیه هستند و کمایش کروی و بیضی‌شکل هستند (شکل ۷-A). بیشتر سیالات درگیر، در دمای اتاق از دو فاز و کمتر سه فاز تشکیل شده‌اند (شکل ۷-B). بیشتر سیالات درگیر سه فاز در کوارتزهای نسل I رگه‌های سیلیسی - سولفیدی و پدیده نازک‌شدگی<sup>۱</sup> در کوارتزهای نسل II رگه‌های سیلیسی دیده شدند.

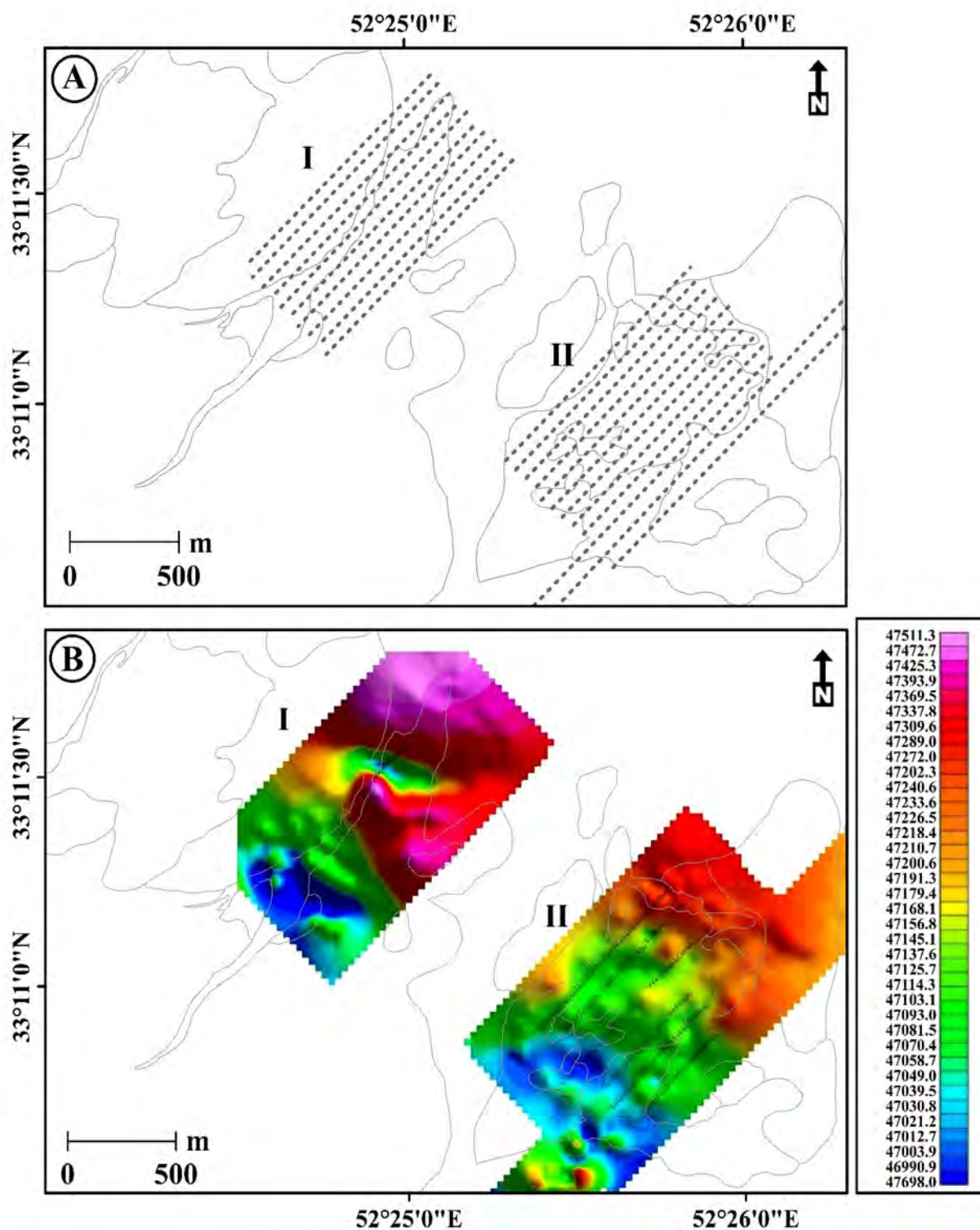
همه میان‌بارهای اولیه، پس از همگن شدن به فاز مایع تبدیل شده‌اند. برای تعیین شوری بعد از منجمد کردن و گرم کردن آنها، نقطه ذوب نهایی یخ (T<sub>LM</sub>) از حدود ۰/۷- تا ۳۹- درجه سانتی‌گراد دیده شده است (جدول ۳) که مقدار شوری معادل آن (با معادله بودنار (Bodnar, 1993)) از ۱/۱۵ تا ۴۳ درصد

تغییر می‌کند (جدول ۴). برای تعیین دمای همگن شدن، طبق گلدشتاین و رینولدز (Goldstein and Reynolds, 1994) نمونه‌ها تا سقف ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم شدند. همه سیالات مورد بررسی طی گرم کردن به فاز مایع همگن شدند. دمای همگن شدن سیالات درگیر در محدوده ۱۳۳ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد، که اغلب در محدوده ۳۲۵ تا ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارند (جدول ۴). شکل حضور سیالات، دو نوع متفاوت سیالات درگیر از نظر دما، شوری و چگالی را مشخص می‌کند (شکل‌های ۸-A، B و 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<sub>FM</sub>) بیشتر از نوع NaCl به همراه مقادیر کمتری از CaCl<sub>2</sub> و MgCl<sub>2</sub> نظر گرفته می‌شود (Borisenko, 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<sub>2</sub> هم حضور دارد (Borisenko, 1977). تغییرات سیال نوع II از سیال نوع I، با کاهش شوری و چگالی همراه بوده است (شکل‌های ۸ و ۹-A) و کمپلکس‌های کلریدی (شکل ۱۰-A) در تشکیل آنها نقش داشته‌اند. در رگه‌های سیلیسی نسل II، بر اساس شواهد پتروگرافی مانند همبود سیالات غنی از گاز با سیالات سه فاز و دو فاز غنی از مایع (شکل ۷)، پدیده نازک‌شدگی در سیالات (Bodnar et al., 1985) و نیز روند تغییرات شوری نسبت به دمای همگن شدن در نمودارهای دمای همگن شدن در مقابل شوری (شکل ۹-B)، بیانگر رخداد جوشش و آمیخته شدن با سیالات با شوری کم (آب‌های جوی) همراه با اندکی سرد شدن است. بر اساس نمودار شکل ۱۰-B، منشأ رگه‌های سیلیسی - سولفیدی (سیال نوع I) آب ماگمایی و مرتبط با سیستم‌های پورفیری و منشأ سیالات درگیر موجود در رگه‌های سیلیسی (سیال نوع II) اختلاط با آب جوی پیشنهاد می‌شود.



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.

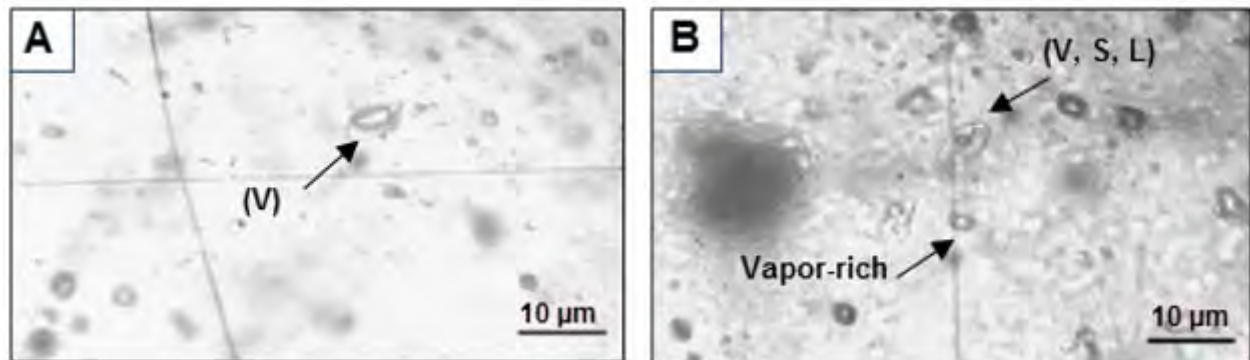
**Fig. 5.** Maps showing distributions of Cu, Mo, Au, Ag, Sb, Bi, Pb and Zn concentration values for rock geochemical data collected from Zafarghand district (see legend of Fig. 2 for lithological boundaries). Threshold values are calculated using  $X+2S$  of Table. 2.



شکل ۶. A: پنجره برداشت های زمین فیزیکی بر روی نقشه زمین شناسی محدوده اکتشافی ظفرقند، موقعیت پروفیل های مغناطیس سنجی 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



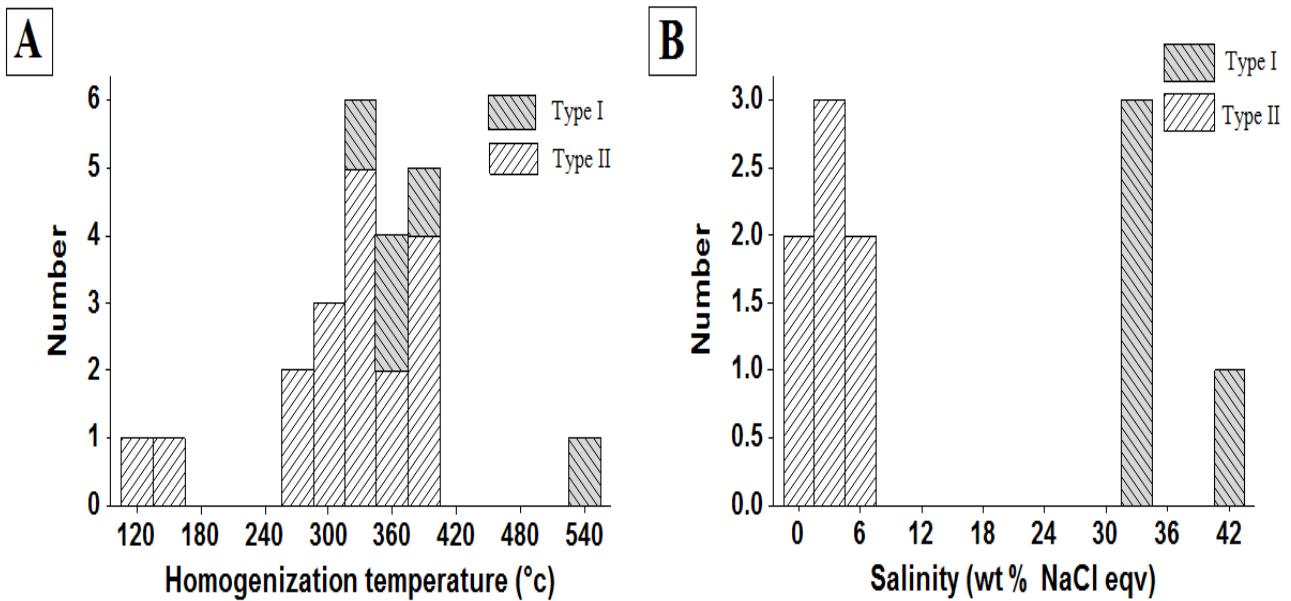
شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی از سیالات درگیر کوارتز در منطقه اکتشافی ظفرقند، A: سیال درگیر اولیه دوفازی (گاز-مایع) و B: سیال درگیر اولیه سه فازی و دو فازی (V = بخار، S = جامد، L = مایع)

**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 ظفرقند، همه سیالات بررسی شده، از نوع اولیه هستند. مخفف‌ها، N: تعداد میان‌بار،  $T_{LM}$ : دمای نقطه ذوب نهایی یخ،  $T_H$ : دمای همگن‌شدن و  $T_{FM}$ : دمای نقطه اولین تکه یخ هستند.

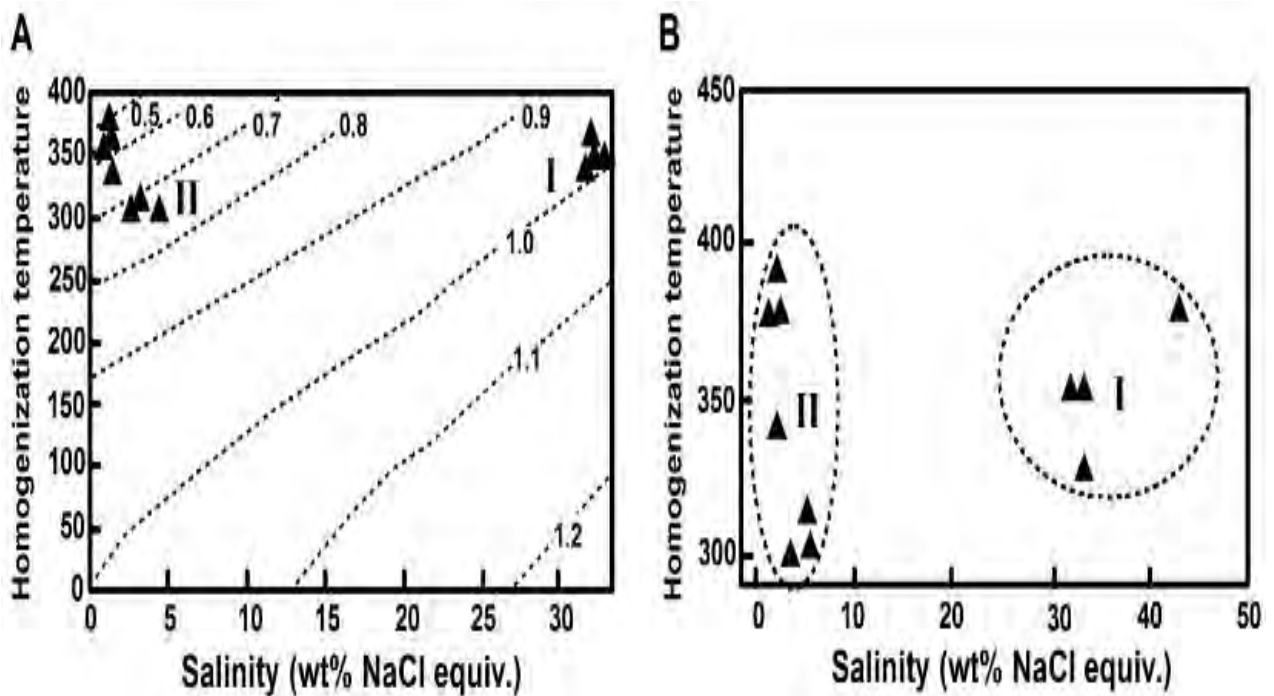
**Table 3.** Microthermometry data of primary fluid inclusions from the quartz in Zafarghand district. All fluids are primary. Abbreviations are N: Number of fluid inclusions,  $T_{LM}$ : Temperature of Last ice Melting point,  $T_H$ : homogenization temperature,  $T_{FM}$ : First ice Temperature of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

Sample	N	$T_{LM}(^{\circ}C)$	$T_H(^{\circ}C)$	Type of inclusion	$T_{FM}(^{\circ}C)$	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



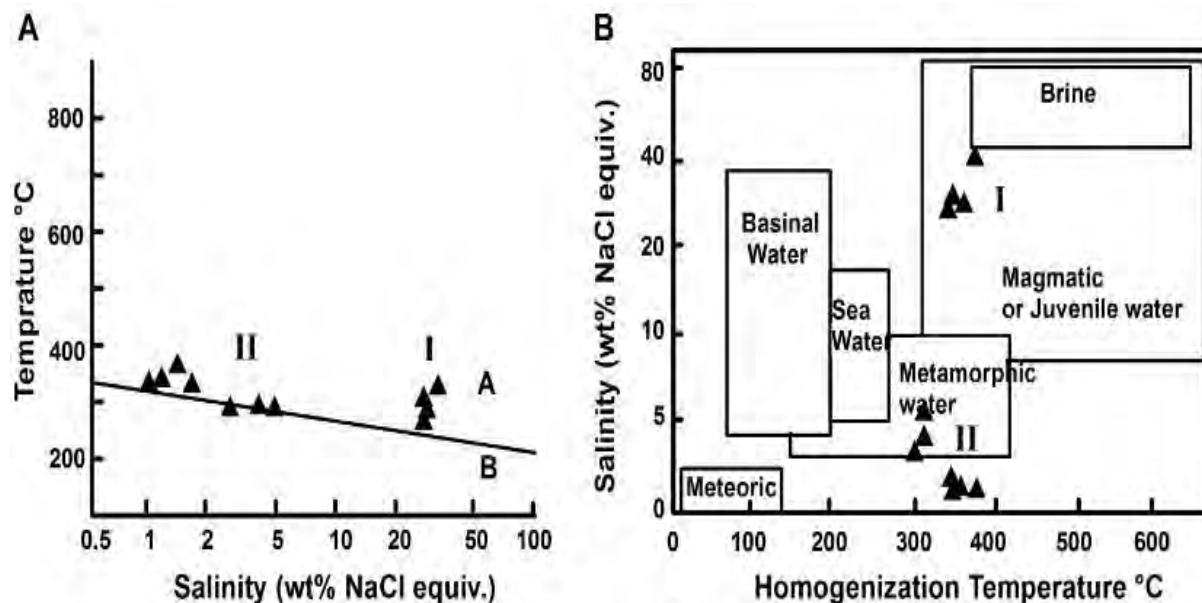
شکل ۸. A: نمودار فراوانی دمای همگن شدن و B: شوری سیالات درگیر در محدوده اکتشافی ظفرقند

Fig. 8. A: Histograms of homogenization temperature and B: salinity of 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 trends for two type fluids (B) in Zafarghand district fluids (Wilkinson, 2001)



شکل ۱۰. نمودار دمای همگن‌شدن 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 ظفرقند (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 origin in the hydrothermal fluids at Zafarghand district (Kesler, 2005)

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

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

Stage	$T_{Fm}(^{\circ}C)$		$T_{m\ ice}(^{\circ}C)$		$T_H(^{\circ}C)$		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

### نتیجه‌گیری

ظفرقند، 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 جنوب‌خاور منطقه و در نزدیکی هاله‌های مس و مولیبدن هستند و از الگوی

منطقه ظفرقند از دگرسانی‌های پروپلیتیک، پتاسیک، فیلیک و آرژلیک و کمتر سیلیسی تشکیل شده است. بررسی‌های سطحی زمین‌شیمی، تمرکزهای عناصر مس و مولیبدن را در توده‌های دیوریت و آتشفشانی‌های داسیتی نشان می‌دهد. گسترش آنها بیشتر در جنوب‌خاور 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). در منطقه



می‌شود که به‌نظر می‌رسد گسل در تمرکز کانی‌سازی نقش داشته است و به‌عبارتی گسل به‌عنوان یک راهرو برای گسترش هاله ماده معدنی در سطح نقش داشته است. اطلاعات سیالات درگیر نیز با اطلاعات زمین‌شناسی، زمین‌شیمی و زمین‌فیزیک منطبق است. چنان‌که اشاره شد بررسی سیالات درگیر 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 سردشدگی ضعیفی همراه بوده است. سیال نوع I از یک سیال ماگمایی 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.

### قدردانی

نویسندگان، به‌خاطر 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 شمال‌باختر و جنوب‌خاور منطقه دارد. جنس و نوع رگه‌چه‌ها، تنوع و الگوی آلتراسیون به قرار گرفتن منطقه مورد بررسی در افق‌های بالاتر کانی‌سازی اشاره می‌کند. الگوی عنصر سرب و کمتر روی (به‌دلیل فرآیندهای هوازدگی)، نیز منطقه‌بندی را تا حدودی نشان می‌دهند. به‌طور کلی افزایش شدت ناهنجاری‌ها در جنوب‌خاور دیده شده است. کانی‌سازی مس در پهنه پتاسیک، فلیک 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 کانساری در عمق اشاره کند که سبب آشکار شدن عناصر سازنده کانسار پنهان در سطح زمین است. بررسی‌های زمین‌فیزیک گسترش عمقی توده نفوذی دیوریتی را در جنوب‌خاور منطقه تأیید می‌کنند که به‌نظر می‌رسد سنگ مولد کانی‌سازی باشد. از طرفی ناهنجاری زمین‌شیمی ضعیفتری از عناصر نیز در شمال‌باختر 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<sub>2</sub>O-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. 1<sup>st</sup> 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. 16<sup>th</sup> 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. 2<sup>nd</sup> National Conference on Applied Petrology, Islamic Azad University Isfahan (Khorasgan), 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  $\mu\text{m}$  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 phyllic, 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

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  $T_h$  (between 328° and 550°C) and late stage inclusions with a low  $T_h$  (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 micro thermometric studies are in good agreement with the known deposits. Geochemical anomalies are associated with phyllic 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 aporphyry-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 H<sub>2</sub>O-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.