



زمین‌شناسی، کانی‌سازی، سن‌سنجی U-Pb و ژئوشیمی ایزوتوپ‌های Sr-Nd توده‌های نفوذی شمال شرق کاشمر

علیرضا الماسی¹، محمدحسن کریم‌پور^{1*}، خسرو ابراهیمی نصرآبادی¹، بهنام رحیمی¹، اورس کلوتزلی² و ژوزه فرانسیسکو سانتوز³

(1) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(2) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه وین، اتریش

(3) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آویرو، پرتغال

دریافت: 1393/10/2، پذیرش: 1394/2/19

چکیده

محدوده مطالعاتی در 30 کیلومتری شمال شرق کاشمر قرار دارد. براساس سن‌سنجی زیرکن توده‌های نفوذی نوع I (سن 40 میلیون سال)، در زمان ائوسن و در پاسخ به فشارش ناحیه‌ای، حرکات امتدادلغز چپ‌گرد گسل‌های درونه و تکنار سبب رخداد زون برشی، حوضه pull-apart و شکستگی‌های ریدل شده که شرایط را برای صعود ماگما و محلول گرمابی مهیا کرده است. طی تکامل ساختاری منطقه، چند ضربان ماگمایی کالکوالکالن تا آلکالن پتاسیم بالا تا شوشونیتی نوع I و یک پالس نوع A در منطقه نفوذ کرده است. مقادیر اولیه $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0/705-0/706) و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0/5125-0/5126) برای سری I، منشأ پوسته قاره‌ای با دخالت گوشته (فرورانش) را نشان می‌دهد. ماگمای عامل دسته دایک‌های کوارتزمونزونیتی جدید نوع I، سبب دگرسانی‌ها و کانی‌سازی IOCG در منطقه شده است. دو مرحله چرخش محلول گرمابی اکسیدان آهن‌دار سبب دگرسانی‌های آرژیلیک پیشرفته، سرسیتی، سیلیسی، اکسید آهن، کربناتی، اپیدوتی و کلریتی و کانی‌سازی رگه‌ای سولفید فلزات پایه و رگه‌های IOCG غنی از اسپیکولاریت در منطقه شده است.

واژه‌های کلیدی: زون برشی، ماگماتیسم نوع I و A، سن‌سنجی U-Pb زیرکن، ایزوتوپ‌های Sr-Nd، IOCG، فرورانش.

مقدمه

(Alaminia et al., 2013). شمال لوت تحت تأثیر فرآیندهای تکتونیکی چرخش لوت و فرورانش شرق ایران قرار گرفته است (Tirrul et al., 1983; Camp and Griffis, 1983;) (Tarkian et al., 1983). ماگماتیسم لوت از ژوراسیک به بعد آغاز شده و در ترشیاری (ائوسن) به اوج خود رسیده است (Aghanabati, 1995). در شمال لوت، راست‌گرد بودن گسل تکنار در شمال و چپ‌گرد بودن گسل درونه در جنوب، سبب رخداد سامانه زون برشی ساده بین آنها شده است (Muller and Walter, 1983). پژوهش‌های اخیر بر روی ماگماتیسم و کانی‌سازی‌های پورفیری شمال، شمال شرق و شرق ایران (Malekzadeh shafaroudi and Karimpour, 2011;)

محدوده مطالعاتی در 30 کیلومتری شمال شرق شهرستان کاشمر در استان خراسان رضوی، در بین طولهای جغرافیایی $35^{\circ} 15'$ تا $58^{\circ} 32'$ شرقی و عرضهای جغرافیایی $35^{\circ} 23'$ شمالی قرار دارد. براساس نقشه زمین‌شناسی کلی شمال شرق ایران (شکل 1)، منطقه در مرکز کمربند آتشفشانی - نفوذی خواف - کاشمر - بردسکن شمال بلوک لوت (Karimpour, 2006)، در جنوب زون‌های ساختاری البرز و سبزواری واقع شده است. با توجه به ویژگی‌های ماگماتیسم زون‌های البرز و سبزواری به‌عنوان حوضه‌های پشت کمان نفوتیس معرفی شده‌اند (Asiabanha and Foden, 2012;)

*مسئول مکاتبات: karimpur@um.ac.ir

گرفت. ترکیبات ایزوتوپی با محاسبه خطای میانگین 2σ به‌دست آمد.

5- تجزیه 5 نمونه از توده‌های نفوذی کم دگرسان نوع I منطقه برای ایزوتوپ‌های Rb-Sr و Sm-Nd. ترکیبات ایزوتوپی Sr و Nd برای این نمونه‌ها در آزمایشگاه ایزوتوپی آویرو کشور پرتغال تشخیص داده شد. نمونه‌ها در هاون آگاتی پودر شدند. نمونه‌های پودر شده در محلول HF/HNO_3 در مخزنهای اسید Teflon Parr در دمای 200 درجه سانتی‌گراد به مدت 3 روز حل شدند. پس از تبخیر محلول نهایی، نمونه‌ها در HCl (6 نرمال) حل و خشک شدند. عناصر برای تجزیه با استفاده از تکنیک کروماتوگرافی یون متعارف در دو مرحله خالص شد؛ جدایش Sr و عناصر REE در ستون تبادل یونی با رزین تبادل کاتیونی AG8 50 W Bio-Rad و خالص‌سازی Nd از دیگر لاتانیدها در ستونها با رزین تبادل کاتیون Ln Resin (تکنولوژی‌های ElChrom) صورت گرفت. همه واکنشگرها (معرف‌ها) بی‌بی که در جدایش نمونه‌ها استفاده شد از تقطیر زیر نقطه جوش به‌دست آمده و آب توسط یک دستگاه عنصر Milli-Q (Millipore) حاصل شد. Sr در یک تکرشته Ta با H_3PO_4 ذخیره شد، اما Nd در بخش خارجی رشته Ta با HCl در یک آرایش رشته سه‌گانه ذخیره شد. نسبت‌های ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ با استفاده از یک دستگاه Multi-collector Thermal Ionization Mass Spectrometer (TIMS) VG Sector 54 تشخیص داده شد. داده‌ها به شیوه دینامیک با اندازه‌گیریهای نوک (peak) در 1-2 V برای ^{88}Sr و 0/8-1/5 V برای ^{144}Nd به‌دست آمد. نسبت‌های ایزوتوپی Sr و Nd برای تفکیک جرمی نسبت به $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.1194$ و $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ تصحیح شدند. در طی این مطالعه، استاندارد SRM-987 یک مقدار میانگین $N = 12$; $\text{conf. lim} = 95\%$) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710256(16)$ و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.5121057(61)$ (با استاندارد JNdi-1 $N = 13$; $\text{conf. lim} = 95\%$) داده‌های $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ با استاندارد La Jolla نرمالیزه شدند) را داد. غلظت‌های عنصری سنگها با اضافه کردن Spike های مضاعف در نمونه‌ها با روش طیف‌سنجی جرمی دقیق‌سازی ایزوتوپ (IDMS) تشخیص داده شد. در نهایت ترکیبات ایزوتوپ Rb-Sr و Sm-Nd (با محاسبه خطای میانگین 2σ) به‌دست آمد.

Arjmandzadeh et al., 2011; Karimpour et al., 2012, Salati et al., 2012; Golmohammadi et al., 2013; Karimpour et al., 2013; Abdi and Karimpour, 2012) نشان داده که این ناحیه از کشورمان از زمان ژوراسیک تا الیگومیوسن دستخوش رخدادهای فرورانش و تصادم مختلف و به تبع آن ضربانهای ماگمایی I, A و S ای بوده که کانی‌سازیهایی پلی‌متال مانند ذخایر پورفیری آن با سری I و کانی‌سازهای احتمالی قلع با سری S همراه بوده‌اند. زون شمال بلوک لوت توسط کریم‌پور (Karimpour, 2006) به‌عنوان کمر بند IOCG معرفی شده و تاکنون ذخایر IOCG مهمی چون تنورچه و کوه‌زر (Karimpour, 2006; Mazloomi Bajestani, 2009) در مرکز این کمر بند (مجاورت محدوده مطالعاتی) و اسکارن بزرگ آهن سنگان (Karimpour, 2006; Boomeri, 1998) در آن معرفی شده است (شکل 1). پیش از این سلطانی (Soltani, 2000) گرانت‌های کاشمر را از نوع I معرفی کرده بود. در این مقاله، ما ماگماتیسیم نوع I و A و کانی‌سازی IOCG را در کاشمر معرفی کرده و آن را به فرورانش نئوتتیس در ائوسن نسبت داده و نشان می‌دهیم که ویژگیهای زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی در کاشمر، مشابه با زون‌های موازی پشت کمان سنوزوئیک در شیلی و پرو است.

روش مطالعه

1- ادغام و پردازش تصاویر ماهواره‌ای $\text{Lansat } 7^+$ با IRS (با قدرت تفکیک 5 متر) و استفاده از تصاویر کیفیت بالای google earth برای تشخیص واحدهای سنگی، گسلها و شکستگیهای اصلی و فرعی مهم، برای تهیه نقشه زمین‌شناسی و ساختاری و پردازش تصاویر ماهواره‌ای آستر برای دگرسانی.

2- مطالعه 150 مقطع نازک از توده‌های نفوذی سطحی به‌منظور مطالعات پتروگرافی و دگرسانی.

3- اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی توده‌های نفوذی با دستگاه مدل GMS2 ساخت شرکت سینترکس کانادا (با دقت 5×10^{-1} SI).

4- آماده‌سازی و سن‌سنجی U-Pb در زیرکن بر روی توده هورنبلند بیوتیت کوارتز مونزودیوریت/مونزونیت نوع I با استفاده از روش Laser-Ablation multi collector ICP-MS، در آزمایشگاه سن‌سنجی دانشگاه وین اتریش صورت

1- سنگهای آتشفشانی با ترکیب عمدتاً بازالت - آندزیت - داسیت - توف - آذرآواری که در سرتاسر منطقه خصوصاً در نیمه شمالی گسترش دارند.

2- توده‌ها و استوک‌های متوسط تا کوچک مافیک - حدواسط با ترکیب گابرو، دیوریت، کوارتز مونزودیوریت، مونزونیت.

3- توده‌های اسیدی تا حدواسط از گرانیتوئید (با طیفی از گرانودیوریت، مونزوگرانیت تا آلکالی‌گرانیت) تا سنگهای حدواسط کوارتز مونزونیت - مونزونیت که بر اثر فرسایش واحدهای آتشفشانی در بخشهای جنوبی منطقه، رخنمون وسیع یافته‌اند. آنکلاوهای میکروگرانولار به صورت لخته‌های مافیک و/یا تجمع بلورهای هورنبلند (ترکیب هورنبلند دیوریت) به رنگ سبز در متن سنگ دیده می‌شوند. بیشترین رخنمون مربوط به گرانودیوریت، گرانیت و آلکالی‌گرانیت است.

4- توده آلکالی‌گرانیت و دایک آپلیتی جوانتر از مجموعه 1 و 2 که به طور مشخص با روند شمال شرقی - جنوب غربی در منطقه نفوذ کرده‌است. آلکالی‌گرانیت فاقد آنکلاو است.

5- دسته دایک‌های موازی کوارتز مونزودیوریتی با روند شمال غربی - جنوب شرقی. به استثنای دسته دایک‌ها، همه واحدها متحمل دگرسانی شده‌اند. دسته‌دایک‌ها بیانگر توده ماگمایی مافیک سردشده در عمق می‌باشند که عامل دگرسانی نیز محسوب می‌شوند.

براساس اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی، توده‌های مافیک حساسیت مغناطیسی از 559 تا 4354×10^{-5} (SI) و گرانیتوئیدها از 2 تا 1654×10^{-5} (SI) نشان می‌دهند. مقدار حساسیت مغناطیسی آلکالی‌گرانیت از 3 تا 10^{-5} (SI) \times 225 و دایک آپلیتی بیوتیت آلکالی‌گرانیت 305×10^{-5} (SI) است. دسته دایک‌های کوارتز مونزودیوریتی حساسیت مغناطیسی 1068×10^{-5} (SI) دارند. بر این اساس توده‌های مافیک، گرانیتوئیدها و دسته دایک‌های موازی ویژگی اکسیدان (سری مگنتیتی) دارند. آلکالی‌گرانیت و آپلیت ویژگی احیایی (سری ایلمنیتی) از خود نشان می‌دهند. مطالعات ژئوشیمی توده‌های نفوذی منطقه، ماهیت کالکوالکالان تا آلکالین پتاسیم بالا تا شوشونیتی همگی آنها را معلوم ساخته است (Almasi, 2015).

مطالعات ساختاری بر روی تصاویر ماهواره‌ای و بررسیهای صحرایی نشان می‌دهد، که توده آلکالی‌گرانیت A با دو روند

6- مطالعات مینرالوگرافی و تعیین پارائز کانیایی از رگه‌های سیلیسی کانه‌دار.

7- برداشت، آماده‌سازی 28 نمونه ژئوشیمیایی به روش خرده‌سنگی از رگه‌های سیلیسی کانه‌دار و تجزیه در آزمایشگاه ACME کانادا به روش ICP-MS و ذوب قلیایی. نمونه‌های از رگه‌های کوارتز دارای کانی‌سازی فلزات پایه، اسپیکولاریت، باریت و منگنز برداشت شد. در این روش به تناسب تغییرات کانی‌شناسی فلزی در طول و عرض رگه، به‌طور میانگین دو کیلوگرم نمونه برداشت شد. پس از پودر کردن نمونه، با استفاده از مقسم دویست گرم نمونه جداسازی و ارسال شد.

8- تهیه نقشه‌های رقومی زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی با مقیاس 1:20000.

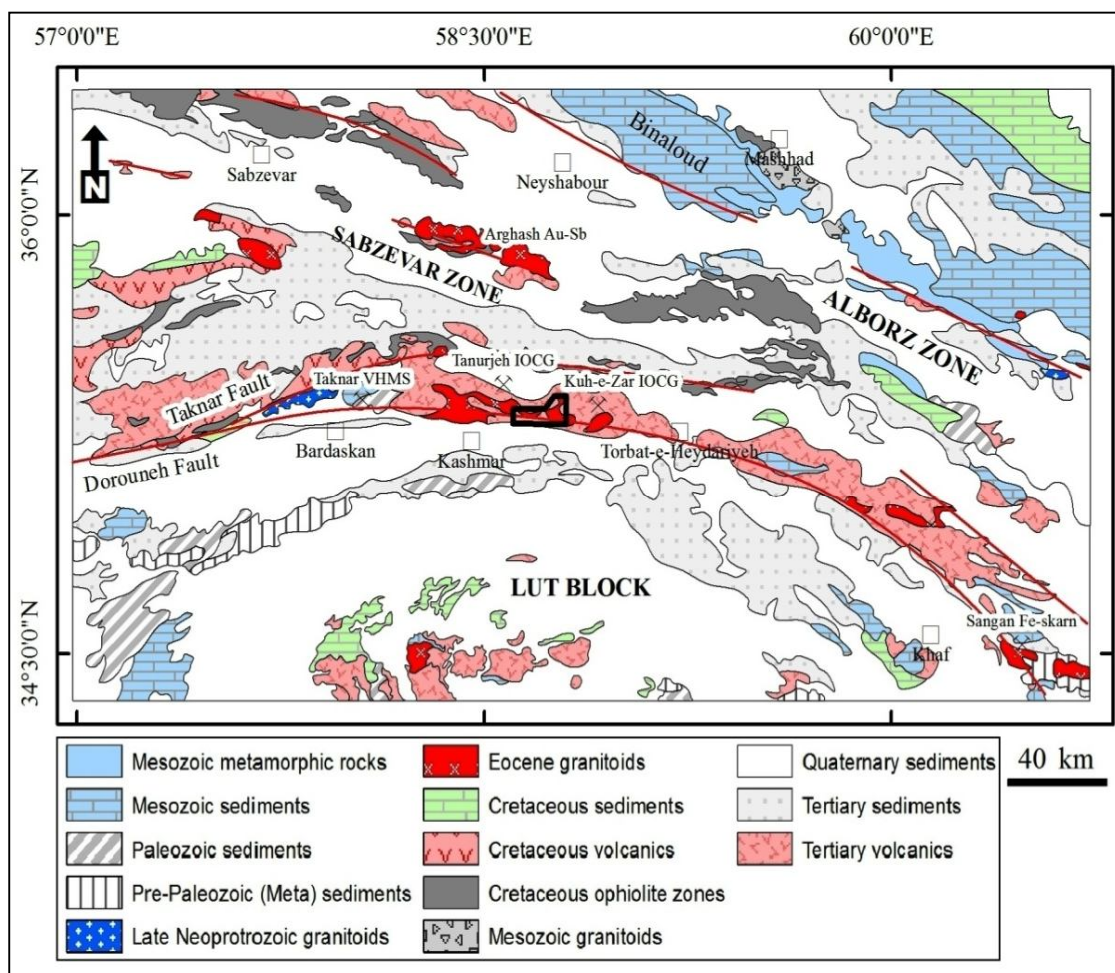
مطالعات ساختاری و زمین‌شناسی

براساس مطالعات ساختاری ناحیه‌ای و منطقه‌ای پیشین (Muller and Walter, 1983; Haji, 2009) و جدید (Almasi, 2015) بر روی این منطقه، نحوه عملکرد دو گسل اصلی درونه و تکنار سبب شده، تا راستای محور σ_1 (تنش میانگین ناحیه‌ای) شمال شرقی - جنوب غربی باشد و زون برشی ایجاد شود (شکل 2). در محیط شکننده، تغییرات تنش با گذر زمان سبب ایجاد و تغییرات درونی در زون‌های برشی می‌شود. با استفاده از مطالعات ساختاری پایه بر روی تصاویر ماهواره‌ای در این مقاله و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی محققان (Price and Cosgrove, 1990; Tchalenko and Braud, 1974)، مشخص شد که طی گذشت زمان و تکامل تکتونیکی ناحیه، ساختار pull-apart و انواع شکستگیهای برشی - کششی نوع ریدل (R, R' و P) در محدوده مطالعاتی توسعه یافته که نشان از بلوغ تکتونیکی منطقه است (شکل‌های 2 و 3). این حالت سبب صعود ماگما و محلولهای گرمایی شده است. در منطقه کاشمر، کنترل حوادث ماگمایی - گرمایی و کانی‌سازی با این ساختارها به خوبی قابل اثبات است.

برپایه مطالعات صحرایی (روابط قطع‌شدگی) و ویژگی نمونه‌های دستی و آزمایشگاهی و نقشه زمین‌شناسی تهیه شده (شکل 4)، می‌توان واحدهای سنگی منطقه کاشمر را از قدیم به جدید به پنج بخش تقسیم کرد:

شکل‌های 2 و 4). با توجه به این‌که شکستگی‌های P بعد از کشش (T) تشکیل می‌شوند، انتظار می‌رود که دسته دایک‌ها، جوانتر از آلکالی‌گرانیت A باشند و آنرا قطع کرده باشند. مطالعات صحرایی و نقشه زمین‌شناسی مؤید این مطلب است.

هم‌جهت مشخص در راستای کشش (T در شکل 2) موازی شکستگی‌های ریدل نوع R با زاویه 45° شمال‌شرقی - جنوب‌غربی و دسته‌دایک‌های موازی در راستای شکستگی برشی نوع P (جهت شمال‌غربی - جنوب‌شرقی) نفوذ کرده‌اند (مقایسه



شکل 1. نقشه کلی زمین‌شناسی شمال شرق ایران (برگرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس‌های مختلف (Sahandi and Hosseini, 1990; Eftekharneshad et al., 1974; Vaezipour et al., 1993; Afsharharb et al., 1987; Naderi Mighan and Torshizian, 1999; Behroozi, 1988)). برخی از مهمترین ذخایر معدنی این قسمت از کشور در نقشه آمده است. محدوده مطالعاتی در شمال شرق کاشمر که با کادر سیاه مشخص شده، در کنتاکت بلا فصل گسل درونه در شمال بلوک لوت و جنوب زون‌های البرز و سبزوار، بین ذخایر IOCG تنورجه و کوه‌زر واقع شده است.

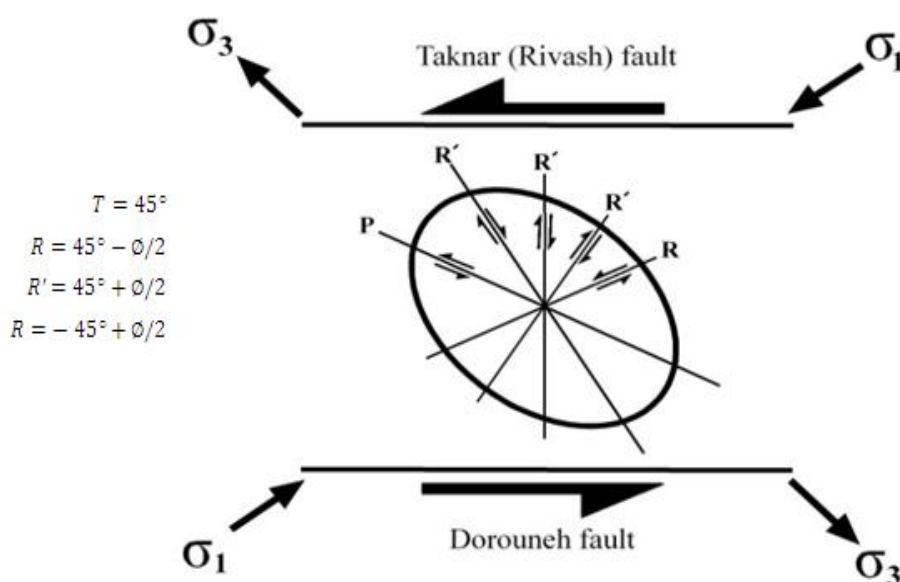
Fig. 1. General geological map of NE Iran (Compiled from geological maps in different scales (Sahandi and Hosseini, 1990; Eftekharneshad et al., 1974; Vaezipour et al., 1993; Afsharharb et al., 1987; Naderi Mighan and Torshizian, 1999; Behroozi, 1988)). Some of the most important ore deposits are shown in the map. The study area shown in northeast of Kashmar city by black frame, at contact of Dorouneh fault in north of Lut block and south of Alborz and Sabzevar zones, is located between Koh e Zar and Tanourjeh IOCG deposits.

با ساختار شکننا، ایجاد ارتباط بین ساختارها و مهاجرت محلول گرمایی ملموس‌تر است. درک این مسائل به انجام مطالعات دگرسانی و کانی‌سازی مؤثرتر، کمک شایانی می‌کند. کانولی و

نحوه مهاجرت محلول گرمایی، دگرسانی و کانی‌سازی در انتقال محلولهای گرمایی کانه‌دار، ساختارهای (گسلها و شکستگیها) یک منطقه نقش اصلی را ایفا می‌کنند. در مناطق

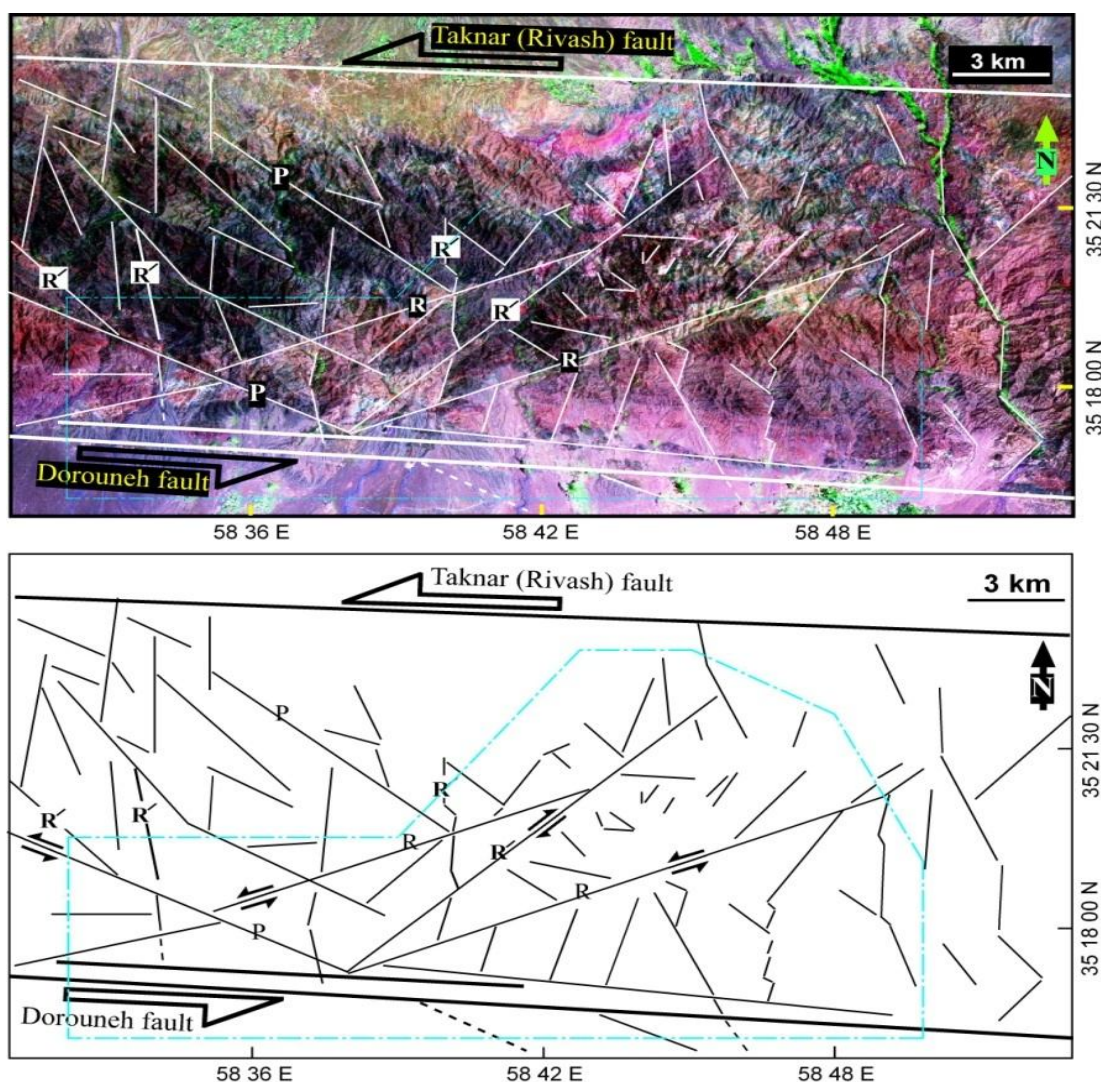
تصاویر آستر و مطالعه مقاطع میکروسکوپی، نقشه دگرسانی منطقه تهیه شد (شکل 7). براساس تقدم و تأخر نسبت به همدیگر، دگرسانی در کاشمر به صورت دو دگرسانی اصلی شامل: دگرسانی اولیه آرژیلیک پیشرفته + سرسیتی + سیلیسی (K-Si) و دگرسانی تأخیری کربناتی - اکسید آهن - سیلیسی - اپیدوتی - کلریتی - سرسیتی - باریت (Ca-Fe-Si) قابل توصیف است. تمرکز دگرسانی اولیه در مجاورت گسل اصلی درونه و تلاقی آن با گسل‌های فرعی (بهاریه، اوچ - پلنگ و سرسفیدال) است (شکل 7). کلاکهای سیلیسی و زون آرژیلیک پیشرفته و متوسط در بهاریه، سرسفیدال و اوچ پلنگ به خوبی گسترش دارند. دگرسانی تأخیری در ارتفاعات کم‌مرد متمرکز است (شکل 7). تورمالین به صورت شعاعی و گاه همراه با کلریت، در برخی از شکستگی‌های درون گرانیتهای نوار جنوبی منطقه دیده می‌شود. مظلومی بجزستانی (Mazloomi Bajestani, 2009) با مطالعه بر روی این تورمالین‌ها در منطقه سرسفیدال آن را از نوع دمورتیریت معرفی کرده است.

کاسگرو (Connolly and Cosgrove, 1999) آزمایش‌های مختلفی برای به دست آوردن مدلی برای پیش‌بینی مهاجرت محلول گرمابی در یک زون برشی انجام دادند. آنها ادعا کرده‌اند که با افزایش تنش فشارشی ناحیه‌ای در زون‌های برشی، بیشترین مهاجرت محلول گرمابی از طریق گسل اصلی و در امتداد آن به صورت جانبی صورت می‌گیرد و بهترین محل برای به تله افتادن محلول، نقاط تلاقی گسل اصلی با گسل‌های فرعی است. با مقایسه و تعمیم نتایج این آزمایش‌ها به ساختارها و شکستگی‌های برشی موجود در محدوده مطالعاتی، نحوه مهاجرت محلول در کاشمر به صورت شکل 5 به دست آمد. براین اساس، محلول گرمابی در امتداد گسل اصلی درونه حرکت کرده و در محل تقاطع آن با شکستگی‌های فرعی نوع ریدل P و R تزریق و به دام افتاده است. این مسأله سبب رخداد شدیدترین دگرسانی و نیز کانی‌سازی رگه‌ای در نقاط تلاقی شده است. مناطق بهاریه، اوچ پلنگ و سرسفیدال در این نقاط تلاقی واقع شده‌اند (شکل 5). پردازش تصاویر ماهواره آستر نیز مؤید این مدل است (شکل 6). با استفاده از



شکل 2. حرکت امتدالغز گسل‌های درونه و تکنار، رخداد برش ساده چپ‌گرد و شکستگی‌های برشی نوع R و P با زاویه کم و موافق با جهت حرکت گسل درونه و شکستگی‌های نوع R' با زاویه زیاد و مخالف با جهت حرکت درونه در محدوده شمال شرق کاشمر. کشش (T) منطبق بر زاویه 45° (تقریباً عمود بر شکستگی‌های نوع R) است.

Fig. 2. Strike-slip movement of Dorouneh and Taknar faults, sinistral simple shear occurrence and low angle and compatible P and R shear fractures with faults movement and high angle and incompatible R' shear fractures in the study area in northeast of Kashmar. Tension (T) lie in 45° angle (near staple to R fractures).

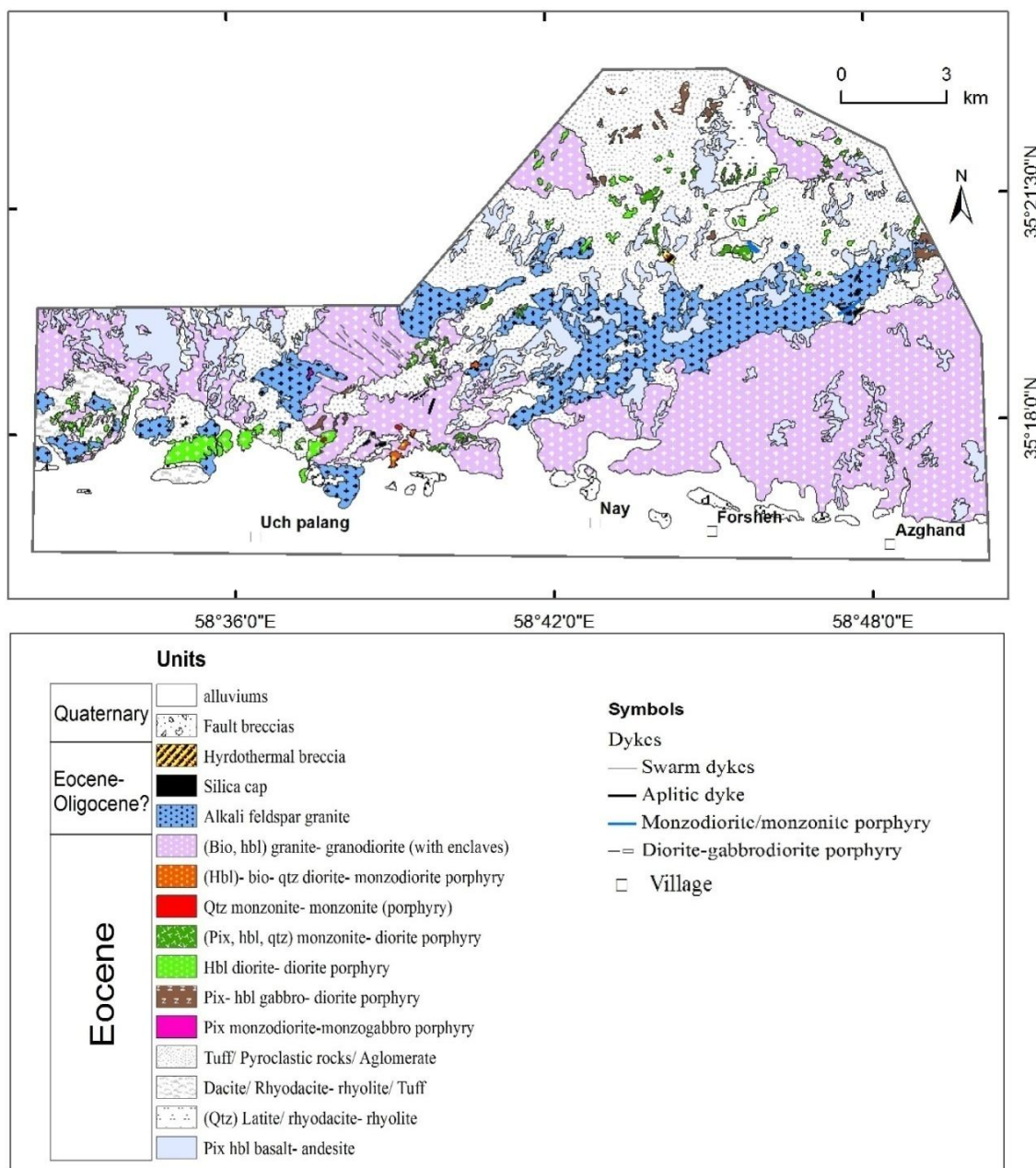


شکل 3. ترسیم گسل‌ها و شکستگی‌های اصلی محدوده شمال‌شرق کاشمر با تلفیق تصاویر ماهواره‌ای Landsat 7+ و IRS و تصاویر با کیفیت بالای Google earth و مطالعات صحرایی. محدوده مطالعاتی با کادر مشخص شده است. (شکستگی‌های P, R و R' مورد انتظار در شکل 2 در این‌جا نشان داده شده‌اند. همچنین بر طبق شکل 2، کشش منطقه‌ای بایستی در جهت عمود بر شکستگی‌های R رخ داده باشد).

Fig. 3. Principal faults and fractures depict in northeast of Kashmar by compilation of Landsat 7+, IRS and high-quality GoogleEarth images and field studies. The study area is shown by frame (prospectable P, R and R' fractures in Fig. 2 are shown in here). Also according to Fig. 2, regional tension must occur in the right angle to R fractures.

صرفاً بر روی شکستگی‌های ریدل نوع R و P در بهاریه و مرتبط با دگرسانی‌های اولیه شکل گرفته‌اند، اما رگه‌های IOCG بر روی گسل‌های منطقه کمرمرد در تمامی جهات رخ داده‌اند و با دگرسانی تأخیری همراهند (مقایسه شکل‌های 7 و 8). رگه‌های سولفید فلزات پایه دارای حداکثر طول 100 و عرض 4-8 متر و رگه‌های IOCG دارای حداکثر طول 85 و عرض بین 30 سانتی‌متر تا دو متر هستند. بعضاً عرض زون برش گرمایی - گسلی به 30 متر می‌رسد.

کانی‌سازی سطحی در منطقه کاشمر دارای شواهد نسبتاً ضعیفی است و عمدتاً به صورت رگه‌های سیلیسی کانه‌دار و به ندرت به صورت برش گرمایی - گسلی و افشان در منطقه رخ داده است (شکل 8). براساس مطالعات میکروسکوپی، نوع و فراوانی کانیه‌های فلزی و پاراژنز کانیهایی فلزی و باطله (شکل 9)، رگه‌ها به دو دسته قابل تقسیم‌اند: رگه‌های سولفید فلزات پایه (کالکوپیریت، پیریت و گالن) و رگه‌های IOCG (اسپیکولاریت ± فلزات پایه ± طلا). رگه‌های سولفید فلزات پایه



شکل 4. نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی شمال‌شرق کاشمر با مقیاس 1:20000. به روند نفوذ آلکالی‌گرانیت که بر اثر کشش منطقه‌ای رخ داده توجه شود (مقایسه با شکل‌های 2 و 3). دسته‌دایک‌های موازی در جهت شکستگی‌های نوع P (مقایسه با شکل‌های 2 و 3) نفوذ کرده‌اند.

Fig. 4. Geological map of the study area in northeast of Kashmar in 1:20,000 scale. Pay attention to Alkali granite intrusion trend which occur due to regional tension (compare to Figs. 2 and 3). Parallel dyke swarms intruded in compatible to P fractures (compare to Figs. 2 and 3).

رگه IOCG به طول تقریبی 7 متر و عرض 15 سانتی‌متر که در تپه‌های شمال‌غرب بهاریه دیده شد، آثاری از این نوع رگه در بهاریه و اوچ پلنگ وجود ندارد (شکل 8). اما در سرسفیدال که در جنوب کمرمرد واقع شده و در تراز ارتفاعی بالاتری نسبت به بهاریه و اوچ پلنگ است، فراوانی رگه‌های IOCG

سنگ میزبان برش داسیت و توده نفوذی کوارتز دیوریتی بوده و قطعات برش از سنگ میزبان و قطعات کوارتز درشت و ریز زاویه‌دار تشکیل شده که با سیمان غالباً سیلیسی و جزئی سیدریت که در آن مقادیر کمی اسپیکیولاریت ± دانه‌های خیلی کم مگنتیت وجود دارد، بهم چسبیده شده‌اند. به‌استثنای یک

از: اسپکیولاریت، گالن، کالکوپیریت، پیریت و اسفالریت (شکلهای 9 و 10 - C, D, E, F و G).

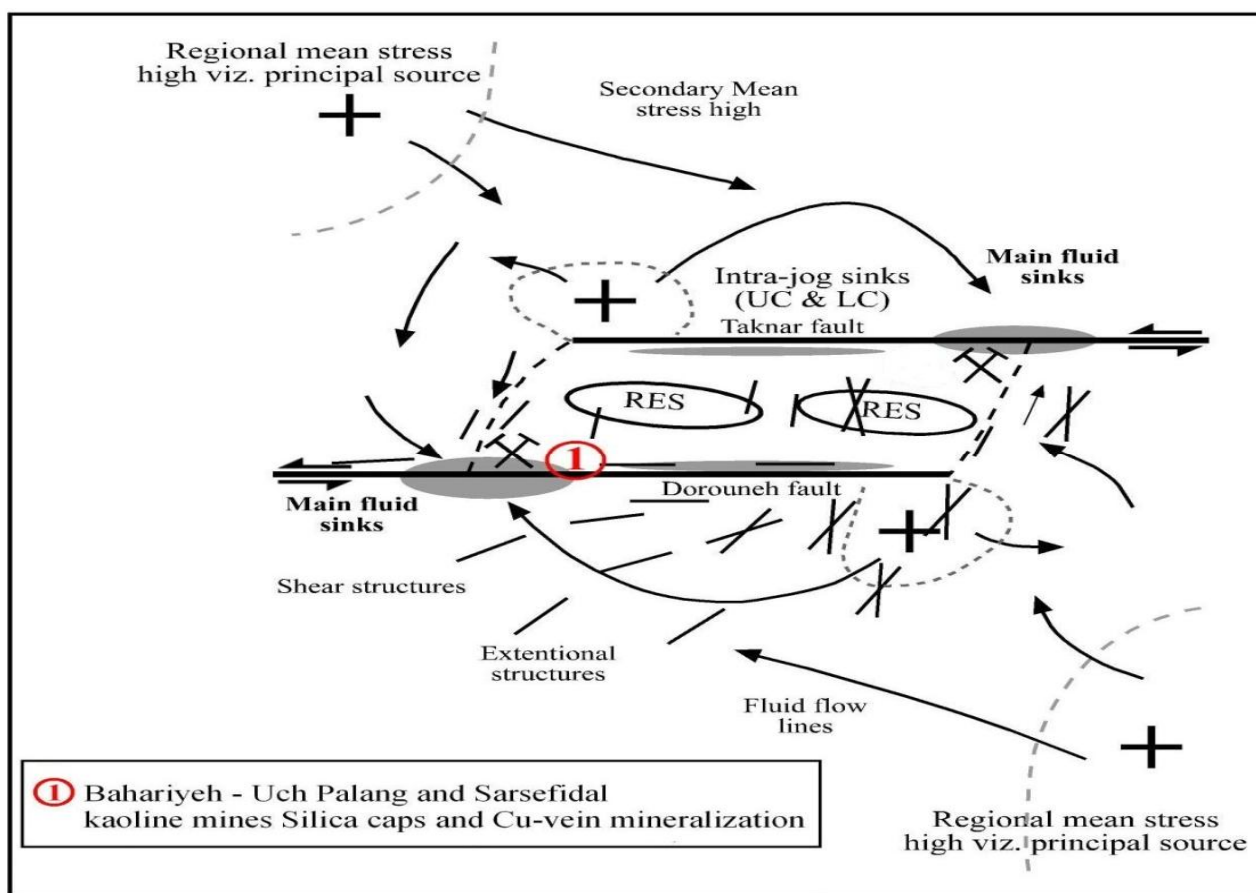
کانیهای حاصل از هوازدگی لیمونیت، هماتیت، مالاکیت و آزوریت و کانیهای باطله به ترتیب شامل کوارتز، باریت، کلریت، کمی سرسیت و کربنات آهن‌دار (سیدریت) و کلسیم (کلسیت) هستند. وجود کانیهای اسپکیولاریت و کالکوپیریت، به ترتیب دلالت بر شرایط فرااکسایش و فقیر از سولفور محلول گرمابی دارد. براساس نوع و فراوانی کانیهای فلزی و باطله، رگه‌های IOCG در منطقه به سه زیرگروه قابل تقسیم‌اند: زیرگروه I (کوارتز - پیریت - کالکوپیریت - گالن ± اسفالریت ± اسپکیولاریت ± مگنتیت ± سایر کانیها) (شکل 10 - C و D)، زیرگروه II (کوارتز - گالن - پیریت ± اسفالریت ± کالکوپیریت ± مگنتیت ± باریت ± سیدریت و سایر کانیها) (شکل 10 - E و F)، زیرگروه III (کوارتز - اسپکیولاریت ± کالکوپیریت ± گالن ± اسفالریت ± مگنتیت ± باریت ± سیدریت) (شکل 10 - G).

کاهش مقادیر پیریت و کالکوپیریت از زیرگروه I و به موازات آن، افزایش مقادیر گالن + باریت در زیرگروه II و اسپکیولاریت + باریت در زیرگروه III و نیز شواهد دیگری چون وجود غلاف گالن در اطراف تک‌دانه‌های پیریت در زیرگروه II (شکل 10 - E) نشان‌دهنده کاهش مقدار سولفور در محلول گرمابی با پیشرفت در سرد شدن آن است. مطالعات دماسنجی سیالات درگیر این رگه‌ها (Almasi, 2015)، مؤید این موضوع است. براساس نتایج تجزیه تعداد 28 نمونه کانی‌سازی از رگه‌ها (جدول 1)، مقادیر مس، سرب و روی در هر دو نوع رگه بی‌هنجاری داشته (در دو سری رگه تا $1 <$ درصد) اما در رگه‌های IOCG قابل توجه‌تر از رگه‌های سولفید فلزات پایه است. مقادیر زیاد (بیش از یک درصد) طلا، مس، سرب و روی غالباً بر رگه‌های گروه I پارائزنی رگه‌های IOCG متمرکز است (جدول 1: نمونه‌های 105-27-24-14-13-11-6-KM). اما مقدار مس و سرب در رگه‌های سولفید فلزات پایه نیز تا < 1 درصد می‌رسد (جدول 1: مقادیر مس در نمونه‌های 5-3-BM منطبق بر زیرگروه I پارائزنی و سرب در نمونه‌های 101-BM و 101-KM منطبق بر زیرگروه پارائزنی II). بی‌هنجاری قابل توجه طلا (بیش از یک تا حداکثر 15 پی‌پی‌ام) فقط در رگه‌های IOCG دیده می‌شود (جدول 1: نمونه‌های 24-11-KM و 27-25 که نمونه 11-KM مربوط به زیرگروه پارائزنی III و مابقی مربوط به زیرگروه I هستند).

بیشتر است، اما خبری از رگه‌های سولفید فلزات پایه نیست (شکل 8). رگه‌های سولفید فلزات پایه در تراز ارتفاعی پایین‌تر از رگه‌های IOCG و در گسل‌های مجاور گسل درونه، کلاهکهای سیلیسی و زون آرژیلیک پیشرفته تشکیل شده‌اند (مقایسه شکلهای 7 و 8). کلاهکهای سیلیسی فاقد حفره‌اند که نشان‌دهنده عدم رخداد جوشش است. با نزدیک شدن محلول گرمابی به سطح زمین و تمایل به خارج شدن گازهای آن، امکان تشکیل کوارتز حفره‌دار به وجود می‌آید (Sillitoe, 2003). نبود کوارتز حفره‌دار نشان می‌دهد که محلول در عمق سرد شده و سطح تراز فعلی منطقه در محل کلاهکهای سیلیسی بیانگر سطح تراز قدیمی نیست و آشکار شدن کلاهکهای سیلیسی در سطح کنونی ناشی از فرسایش بخشهای فوقانی است. بررسی شواهد دیگری مانند مطالعات سیالات درگیر بر روی رگه‌های سیلیسی کانه‌دار منطقه، عدم رخداد جوشش را تأیید می‌کند (Almasi, 2015). نبود رگه‌های IOCG (به‌استثنای یک رگه، شکل 8)، اثبات تشکیل کلاهکهای سیلیسی در عمق و پایین بودن تراز فعلی در بهاریه و اوچ پلنگ نشان می‌دهد که به احتمال قوی، رگه‌های IOCG در بهاریه و اوچ پلنگ بر اثر فرسایش از بین رفته‌اند. براساس مطالعات مینرالوگرافی، فراوانی نوع کانیهای فلزی و روابط پارائزنی آنها با هم و با کانیهای باطله (شکل 9)، رگه‌های سولفید فلزات پایه به دو زیرگروه و رگه‌های IOCG به سه زیرگروه پارائزنی قابل تقسیم‌اند. در رگه‌های سولفید فلزات پایه، کانیهای فلزی عمدتاً کالکوپیریت، پیریت و گالن هستند (شکلهای 9 و 10 - A و B). اکسیدهای ثانویه هماتیت و لیمونیت و کربنات‌های مالاکیت و آزوریت فراوان هستند. زیرگروه I شامل کوارتز - کالکوپیریت ± پیریت ± کلریت ± اسفالریت ± گالن (شکل 10 - A) و زیرگروه II شامل گالن ± کالکوپیریت ± کلریت ± پیریت ± کلسیت (شکل 10 - B) هستند. زیرگروه I در رگه‌های مجاور بهاریه با کانی غالب کالکوپیریت و پیریت و مقادیر بسیار کم گالن و رگه‌های زیرگروه II با فاصله از بهاریه با کانی غالب گالن و مقادیر بسیار کم کالکوپیریت دیده شد. براساس مطالعات دماسنجی سیالات درگیر، با کاهش دما ابتدا زیرگروه I پارائزنی و پس از آن زیرگروه II تشکیل شده است (Almasi, 2015). کانیهای فلزی تشکیل‌دهنده رگه‌های IOCG به ترتیب فراوانی عبارتند

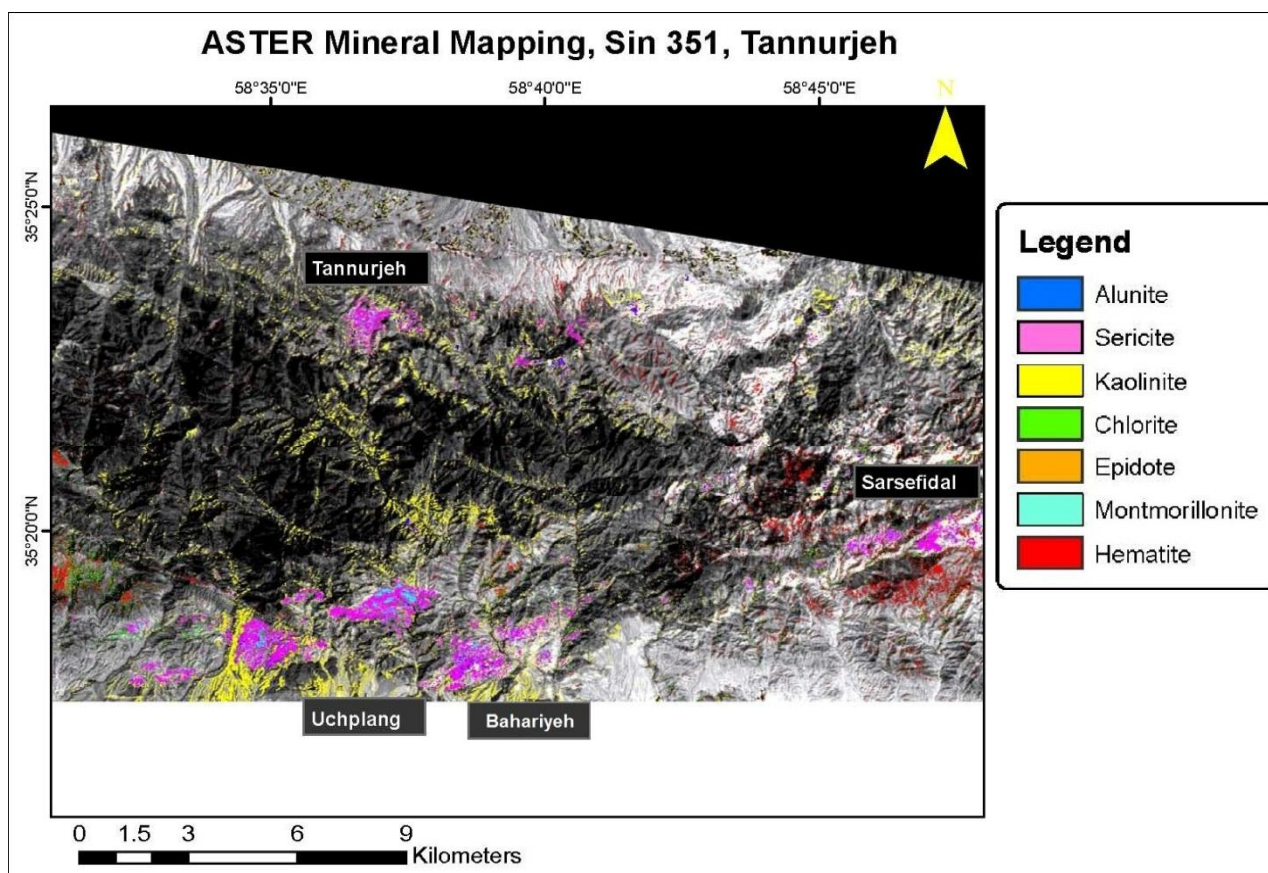
این مسئله وابستگی طلا به پاراژنز اسپیکولاریت + سولفیدهای مس، سرب و روی را نشان می‌دهد. در کانسار طلای کوه‌زر که یک ذخیره طلای نوع IOCG معرفی شده است و در مجاورت منطقه (در شرق کمرمرد) واقع شده است، طلا از نظر پاراژنزی با اسپیکولاریت و کالکوپیریت همراه است (Mazloomi, 2009). مقدار منگنز تقریباً در همه در رگه‌ها خصوصاً در رگه‌های IOCG و مقدار باریم در رگه‌های IOCG بالاست. مقدار زیاد منگنز در هر دو سری از رگه‌ها، شرایط اکسیداسیون بالای محلول گرمابی را نشان می‌دهد

(Brookins, 1988). علاوه بر منگنز، مقادیر نسبتاً زیاد باریم (به‌صورت باریت دانه‌درشت تیغه‌ای در رگه‌ها) و آهن اسپیکولاریت نیز در رگه‌های IOCG، به‌وضوح بر شرایط اکسیدان‌تر محلول در ایجاد این رگه‌ها دلالت دارد. نتایج تجزیه در محیط GIS به نقشه‌های ژئوشیمی رگه‌ها (پراکندگی عناصر در رگه‌های منطقه) تبدیل شد (شکل‌های 11، 12، 13 و 14).



شکل 5. نمودار خلاصه نشان‌دهنده جریان محلول درون و اطراف یک زون برشی با تنش فشارشی ناحیه‌ای (Connolly and Cosgrove, 1999) و ارجاع آن به رخداد دگرسانی و کانی‌سازی در شمال‌شرق کاشمر. در این مدل، مناطق اصلی برای کانی‌سازی در فضای بین دو دیواره برش (بین گسل‌های درونه و تکنار (محدوده RES)) پیش‌بینی شده است. مکانهای احتمالی برای کانی‌سازی نیز منطبق بر مناطق با بالاترین جریان محلول (Main fluid sink) است. مناطق بهاریه، اوچ پلنگ و سرسفیدال در محل تقاطع گسل درونه با گسل‌های فرعی، مناطق با بیشترین جریان محلول (main fluid sink) و شدیدترین دگرسانی قرار دارند.

Fig. 5. Summary diagram illustrating the fluid flow within and around a shear zone with regional compression (Connolly and Cosgrove, 1999) and referring it to alteration and mineralization occurrence in northeast of Kashmar. In this model, principal areas for mineralization are predicted in the space between two shear walls (between Dorounch and Taknar faults (RES area)). Probable areas for mineralization also correlate with highest fluid flow (Main fluid sink). Bahariyeh, Uchpalang and Sarsesfidal areas are located in crosscutting points between Dorounch fault with minor faults, areas with highest fluid flow (Main fluid sink) and most intensive alteration.

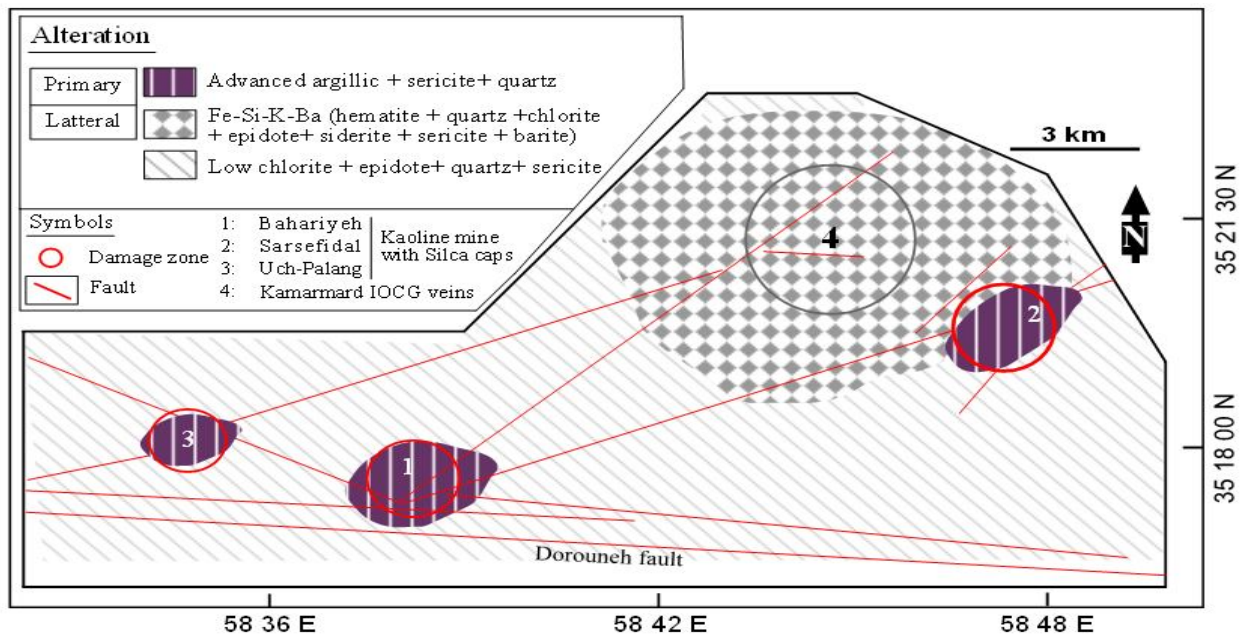


شکل 6. تصویر پردازش شده ماهواره Aster منطقه شمال شرق کاشمر. مناطق بهاریه- اوج پلنگ و سرسفیدال دارای بیشترین شدت دگرسانی اند محل دگرسانیها با مناطق پیش بینی شده در شکل 7 همخوانی کامل دارد.

Fig. 6. Processed Aster image of northeast of Kashmar area. Bahaiyeh, Uchpalang and Sarsefidal areas have highest intense alteration. The positions of alterations are fully correlated with predicted areas in Fig. 7.

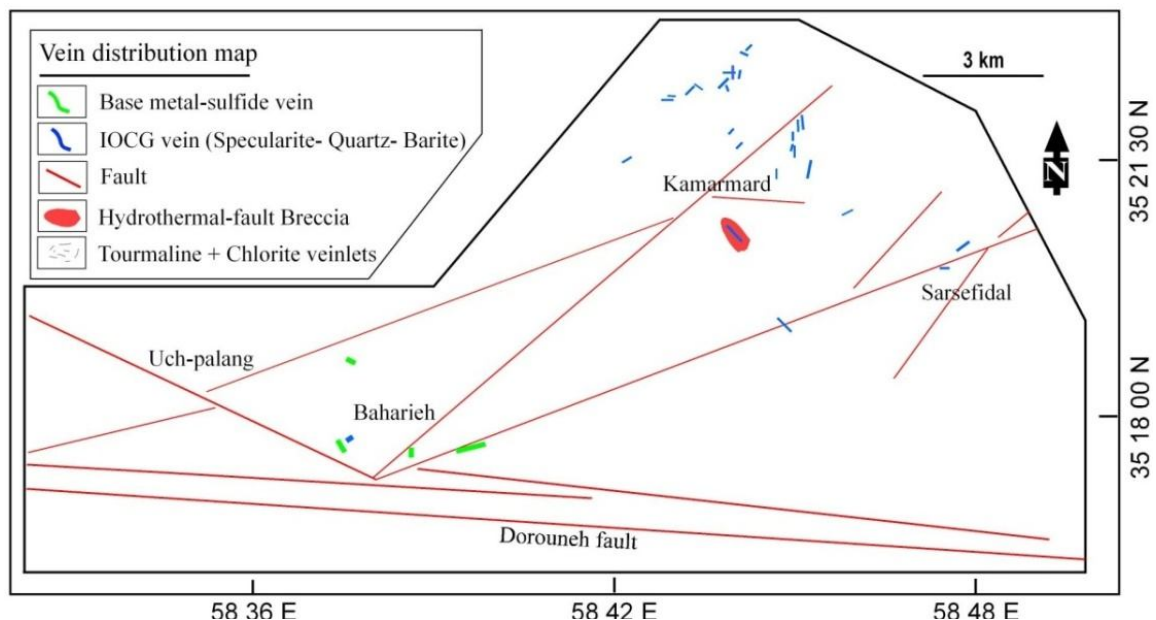
تجزیه نمونه کل سنگ و با توجه به سن 40 میلیون سال آمده است. میانگین نسبت ایزوتوپ اولیه $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ برای توده‌های اکسیدان به ترتیب بین 0/705 تا 0/707 و 0/5125 تا 0/5126 است. با توجه به این که سری احیایی سنی جوانتر از 40 میلیون سال دارد، نسبت ایزوتوپ اولیه $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ این سری بیشتر از این مقدار خواهد بود. مقدار ϵNdI توده‌های اکسیدان در بازه محدود منفی تا مثبت (1/65- تا 1/33) به دست آمد. براساس نمودار نسبت‌های اولیه $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ در مقابل $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Zindler and Hart, 1986) (شکل 16)، مقادیر به دست آمده برای سری اکسیدان قدیمی‌تر از سری احیایی، منشأ فرورانش با آرایش پوسته قاره‌ای را نشان می‌دهند.

سن سنجی **U-Pb** زیرکن و ایزوتوپ‌های **Rb-Sr** و **Sm-Nd** پس از مطالعات دقیق پتروگرافی و پترولوژیکی، از توده‌های نفوذی اکسیدان (سری I)، نمونه بیوتیت هورنبلند کوارتز مونزودیوریت/مونزونیت پورفیری (به عنوان نماینده‌ای از توده-های حدواسط- اسیدی سری اکسیدان) برای سن سنجی انتخاب شد. نتایج محاسبه و تعیین سن ایزوتوپی در جدول 2 و شکل 15 نشان داده شده است. بر پایه 10 نقطه اندازه‌گیری روی دانه‌های زیرکن، سن توده بیوتیت هورنبلند کوارتز مونزودیوریت/مونزونیت پورفیری برابر با 40 میلیون سال محاسبه شد (جدول 2 و شکل 15). با توجه به روابط صحرائی، توده احیایی (سری A) سنی جوانتر از 40 میلیون سال دارد. در جدول‌های 3 و 4 مقدار ایزوتوپ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ اولیه 5 نمونه از توده‌های نفوذی I که از نظر روابط صحرائی قدیمی‌تر از سری A در منطقه هستند، با



شکل 7. نقشه دگرسانی 1:20000 شمال شرق کاشمر. محلول گرمابی در محل تقاطع گسل‌های فرعی با گسل اصلی درونه سبب دگرسانی K-Si (آرژیلیک پیشرفته + سرسیت + کوآرتز) در مناطق بهاریه، اوچ پلنگ و سرفیدال و دگرسانی‌های Fe-Ba-Si-K (اکسیدهای آهن و تیتان - کوآرتز - کلریت - باریت ± سرسیت ± اپیدوت) و Ca-Fe-Ti-Si (کلسیک (کلریت - اپیدوت - کلسیت) - اکسیدهای آهن و تیتان + تیتانیت - کوآرتز) در کمرمرد شده است.

Fig. 7. Alteration map of Kashmar in 1:20,000 scale. In intersections of secondary faults with principal Dorouneh faults, hydrothermal fluid causes K-Si (advanced argillic + sericite + quartz) in Bahariyeh, Uchpalang and Sarsefidal and Fe-Ba-Si-K (Fe-Ti oxides-quartz-chlorite-barite±sericite±epidote) and Ca-Fe-Ti-Si (calcic (chlorite-epidote-calcite)-Fe-Ti oxides-titanite-quartz) alterations in Kamarmard area.



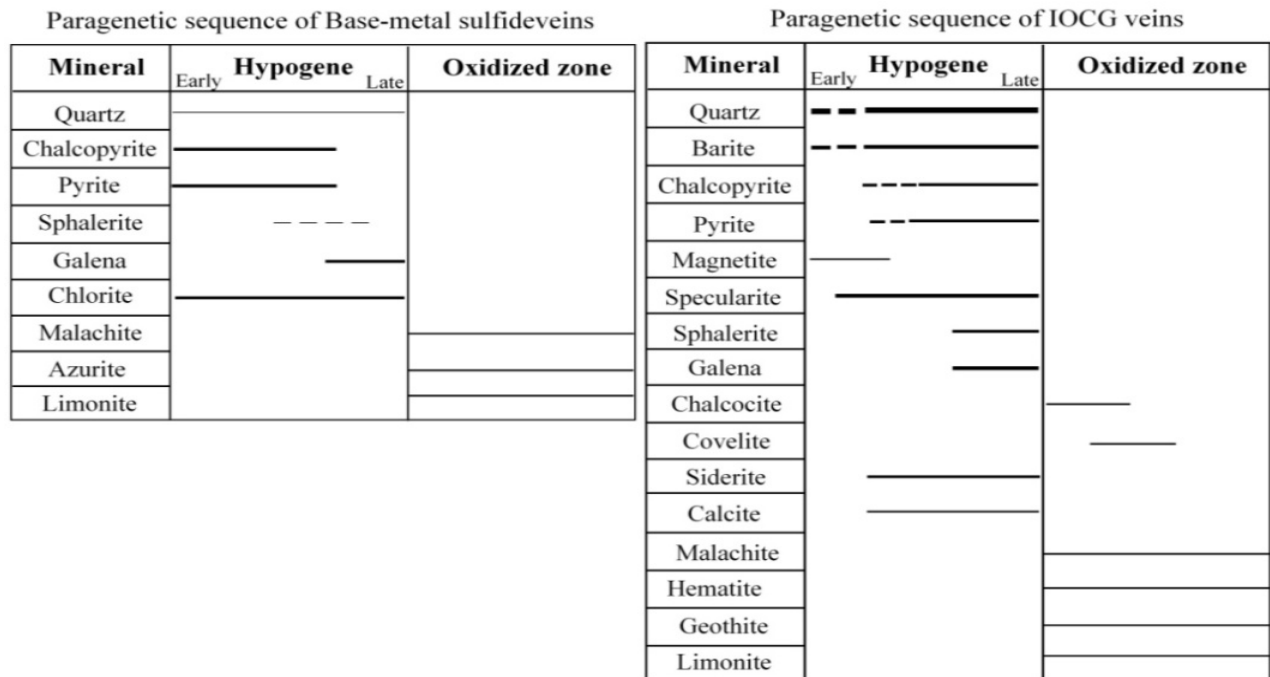
شکل 8. نقشه پراکندگی رگه‌های کانه‌دار (رگه‌های فلزات پایه و رگه‌های IOCG) در شمال شرق کاشمر. رگه‌های فلزات پایه در بهاریه و نزدیک به گسل درونه ولی رگه‌های IOCG غالباً در کمرمرد متمرکزند.

Fig. 8. Distribution map of ore-bearing veins (base metal-sulfide veins and IOCG veins) in northeast of Kashmar. Base metal-sulfide veins are concentrated in Bahariyeh and near to Dorouneh fault, while IOCG veins in Kamarmard area.

جدول 1. نتایج تجزیه نمونه‌های رگه‌های سولفید فلزات پایه و IOCG در منطقه شمال شرق کاشمر. نمونه‌های مربوط به رگه‌های سولفید فلزات پایه با علامت (*) مشخص شده است.

Table 1. Analysis results of base metal-sulfide veins and IOCG veins in northeast of Kashmar. Samples of base metal-sulfide veins are shown with (*) symbol.

Sample	Cu (ppm)	Au (ppb)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Ag (ppm)	W (ppm)	As (ppm)	Fe (%)	Mn (ppm)	Ba (ppm)
KM1	479	24	48	37	0.2	۲۰	26	7	1087	75
KM3	52	55	32	57	1.2	1	27	5	303	269
KM4	614	178	122	25	2.7	1	103	8	387	475
KM6	6304	33	964	130	9.2	1	84	15	142	141
KM7	51	6	172	201	0.3	0	2	6	4639	1055
KM10	110	16	324	164	2	18	73	8	1255	1483
KM11	6265	1295	24	575	4	2	139	3	805	491
KM12	87	5	6169	95	7.4	7	6	1	645	437
KM13	1781	11	>10000	>10000	49.6	2	183	1	212	58
KM14	334	5	>10000	152	5.7	0	8	1	409	196
KM16	420	6	22	88	0.2	1	3	1	376	2283
KM17	1176	18	54	63	0.3	1	10	1	248	1236
KM18	955	5	877	183	5.1	5	7	3	547	2283
KM19	190	10	25	15	0.2	0	3	0	55	1020
KM20	227	3	70	32	0.2	2	8	1	320	2586
KM21	152	3	237	48	0.4	1	3	2	451	2748
KM22	414	28	5226	104	3.4	1	3	1	3551	115
KM23	868	6	207	127	6.9	1	19	1	3177	2726
KM24	339	2614	4413	>10000	5.1	0	21	5	6137	76
KM25	1389	14963	>10000	>10000	22.2	<0.1	36	6	7366	44
KM27	264	6748	1578	2147	4.7	0	18	3	3418	61
KM105	>10000	64	487	1193	3.6	11	50	16	1415	111
BM6	4676	4	19	72	0	2	3	4	1247	66
BM3*	>10000	116	106	347	0.6	2	8	7	2630	133
BM5*	>10000	27	80	302	0.9	0	172	3	847	163
BM101*	593	69	6605	328	56.1	0	22	5	69	119
KM101*	1676	7	1472	384	1.5	1	15	1	6134	41
KM102*	143	7	79	90	1.1	17	25	5	7645	306



شکل 9. توالی پاراژنزی برای کانیهای فلزی و غیر فلزی رگه‌های سیلیسی کانه‌دار (رگه‌های سولفید فلزات پایه و رگه‌های IOCG) در شمال شرق کاشمر.

Fig. 9. Paragenetic sequence for ore and gangues of ore-bearing silicified veins (base metal-sulfide veins and IOCG veins) in northeast of Kashmar.

جدول 2. نتایج تجزیه سن‌سنجی نمونه کوآرتز مونزونیت توده‌های نفوذی نوع I شمال شرق کاشمر.

Table 2. Dating analysis results of quartz monzonite of I-type intrusive rocks in northeast of Kashmar

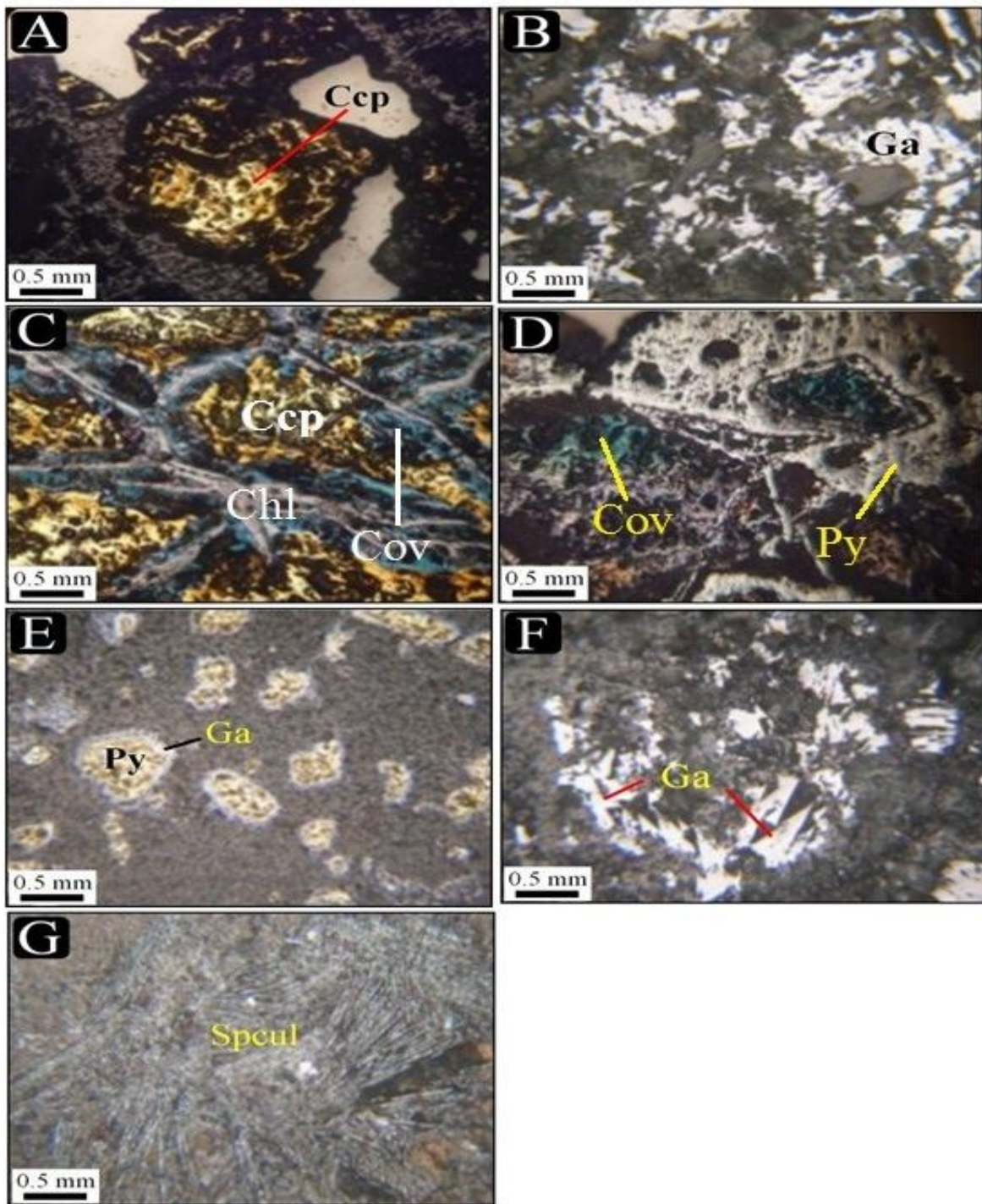
Sample	U(ppm)	Th(ppm)	U/Th	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±(%)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±(%)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±(%)	Age
1	5.70	6.64	0.86	0.0485	7.3	0.0450	2.9	0.0067	2.9	43.2
2	1.70	1.30	1.31	0.0548	30.7	0.0557	6.7	0.0074	6.7	47.4
3	4.78	5.96	0.80	0.2071	11.3	0.2361	3.8	0.0083	3.7	53.0
4	4.88	2.59	1.88	0.0481	2.7	0.0419	2.4	0.0063	2.3	40.6
5	2.04	1.05	1.94	0.0485	3.0	0.0423	3.8	0.0063	3.8	40.6
6	1.52	1.12	1.36	0.0499	3.6	0.0434	4.8	0.0063	4.7	40.5
7	3.24	3.53	0.92	0.0485	5.0	0.0421	8.2	0.0063	8.2	40.4
8	1.56	9.10	0.17	0.0482	2.6	0.0417	1.3	0.0063	1.2	40.3
9	2.00	1.25	1.60	0.0479	12.0	0.0413	3.0	0.0063	2.9	40.2
10	1.63	1.23	1.33	0.0491	2.2	0.0423	1.3	0.0063	1.2	40.2

جدول 3. داده‌های ایزوتوپی مربوط به ایزوتوپ‌های Rb-Sr سنگهای نفوذی نوع I شمال شرق کاشمر

Table 3. Isotopic data related to Rb-Sr isotopes for I-type intrusive rocks in northeast of Kashmar

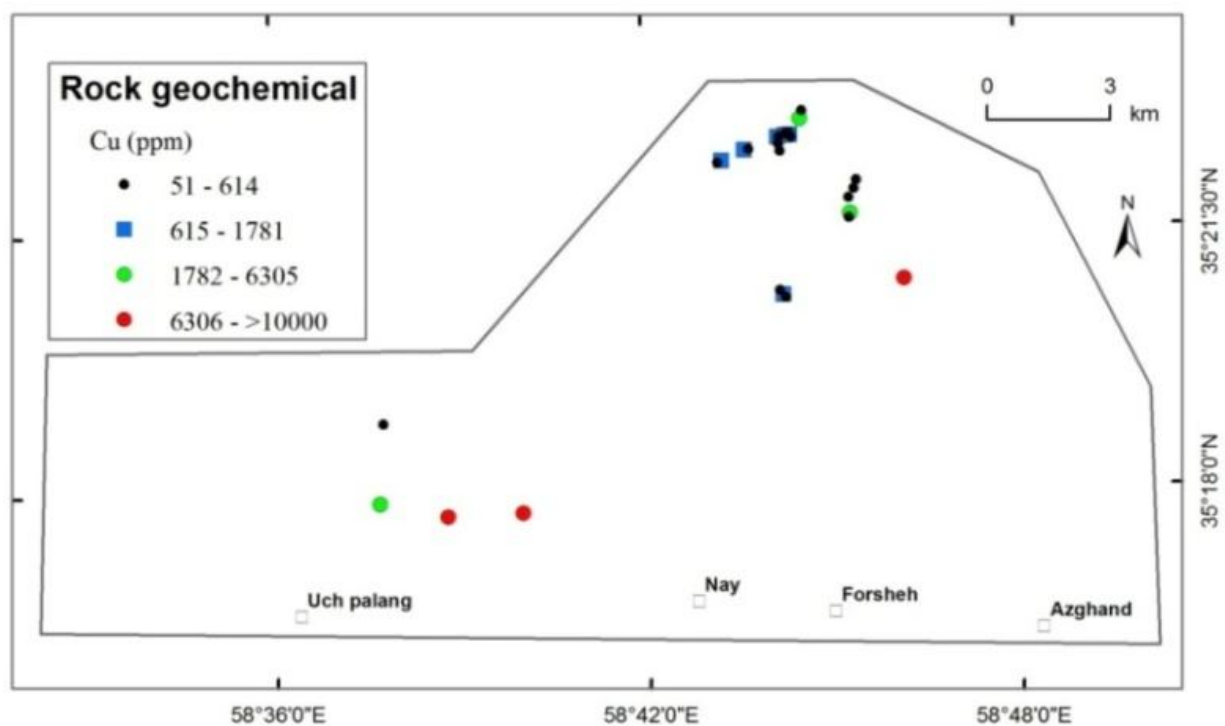
Sample	Age (Ma)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr uncertainty	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr measured	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr initial
BP-25	40	16.8	58.2	0.835	0.000007	0.706388	0.705914
BP-103	40	64.9	359	0.523	0.000010	0.705890	0.705593
SP-20	40	74.4	379	0.568	0.000007	0.705824	0.705501
SP-7	40	72.7	340	0.619	0.000014	0.706113	0.705761
BP-11	40	94.6	393	0.696	0.000007	0.705741	0.705346

⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710264 ± 15 (conf. lim 95%, N=13). The initial ratio of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr calculated using ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr and (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_m and age 40 Ma (age based on zircon)



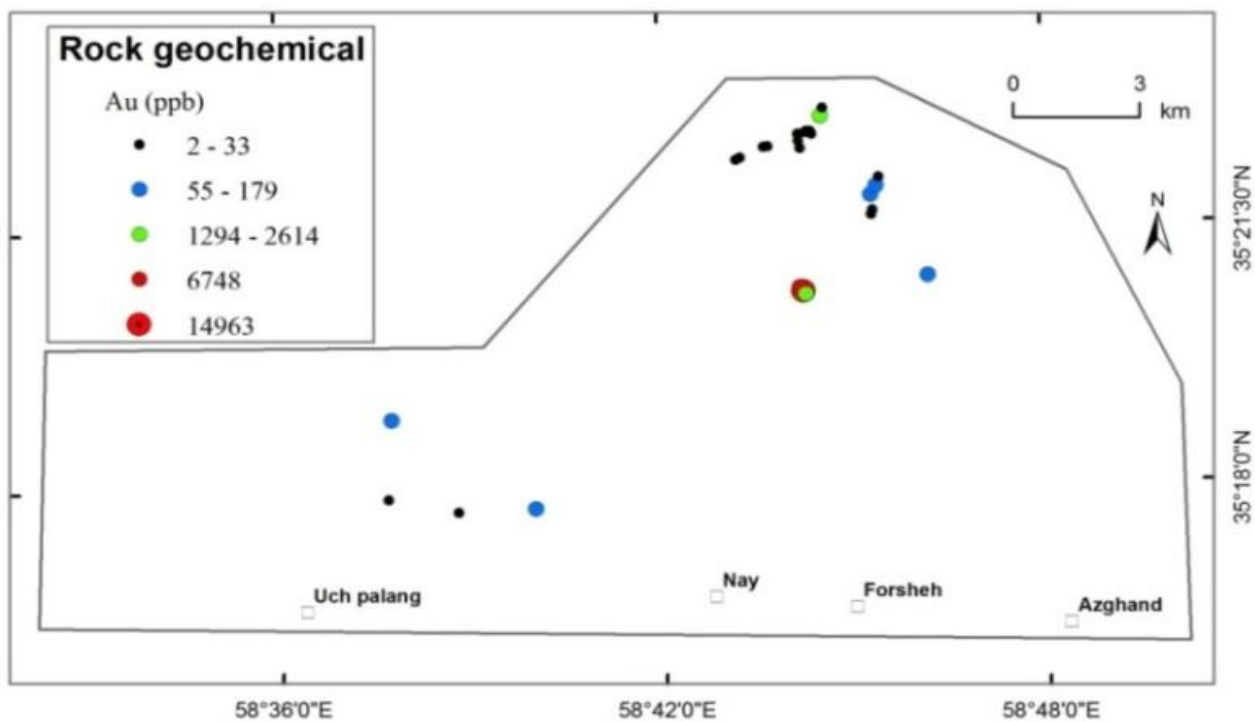
شکل 10. تصاویر مقاطع نازک صیقلی نمونه‌های رگه‌های سولفید فلزات پایه و رگه‌های IOCG در شمال‌شرق کاشمر A و B: کالکوپیریت و گالن به ترتیب مربوط به زیرگروه‌های پارازنزی I و II رگه‌های سولفید فلزات پایه؛ شکل C, D, E, F و G: مربوط به رگه‌های IOCG: C و D: کالکوپیریت - کالکوسیت - کوولیت در زیرگروه I؛ E و F: گالن - پیریت و گالن در زیرگروه II؛ G: اسپکیولاریت در زیرگروه III. (کالکوپیریت: Ccp، کالکوسیت: Chl، کوولیت: Cov، گالن: Ga، پیریت: Py، اسپکیولاریت: Spcul).

Fig. 10. Polished-section images of base metal-sulfide veins and IOCG vein samples in northeast of Kashmar: A, B: Chalcopyrite and galena related to I and II paragenetic subgroup of base metal-sulfide veins, respectively; C to G are related to IOCG veins: C, D: Chalcopyrite-chalcocite-covellite in I subgroup; E, F: Galena-pyrite and galena in II subgroup; G: Specularite in III subgroup. (Chalcopyrite: Ccp, Chalcocite: Chl, Covellite: Cov, Galena: Ga, Pyrite: Py, Specularite: Spcul).



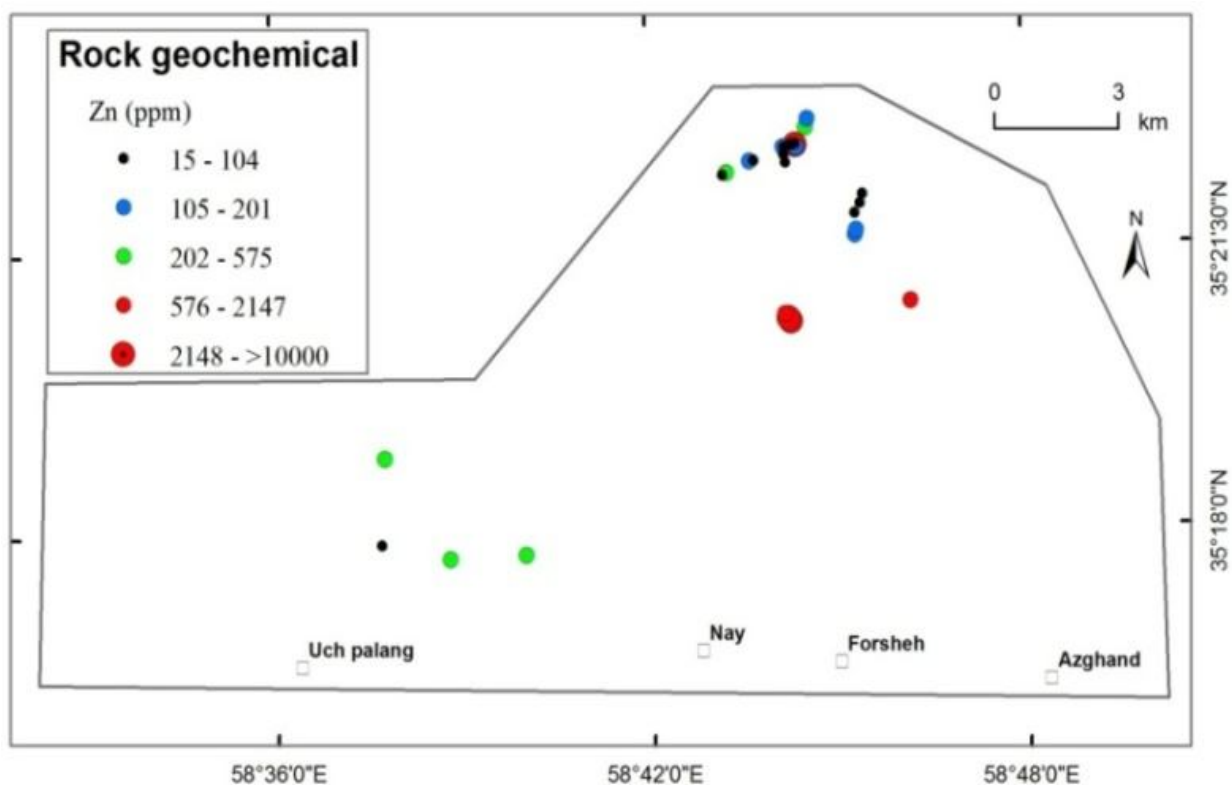
شکل ۱۱. نقشه ژئوشیمی مس رگه‌های سیلیسی کانه‌دار در شمال شرق کاشمر

Fig. 11. Copper geochemical map of ore-bearing silicified veins in northeast of Kashmar



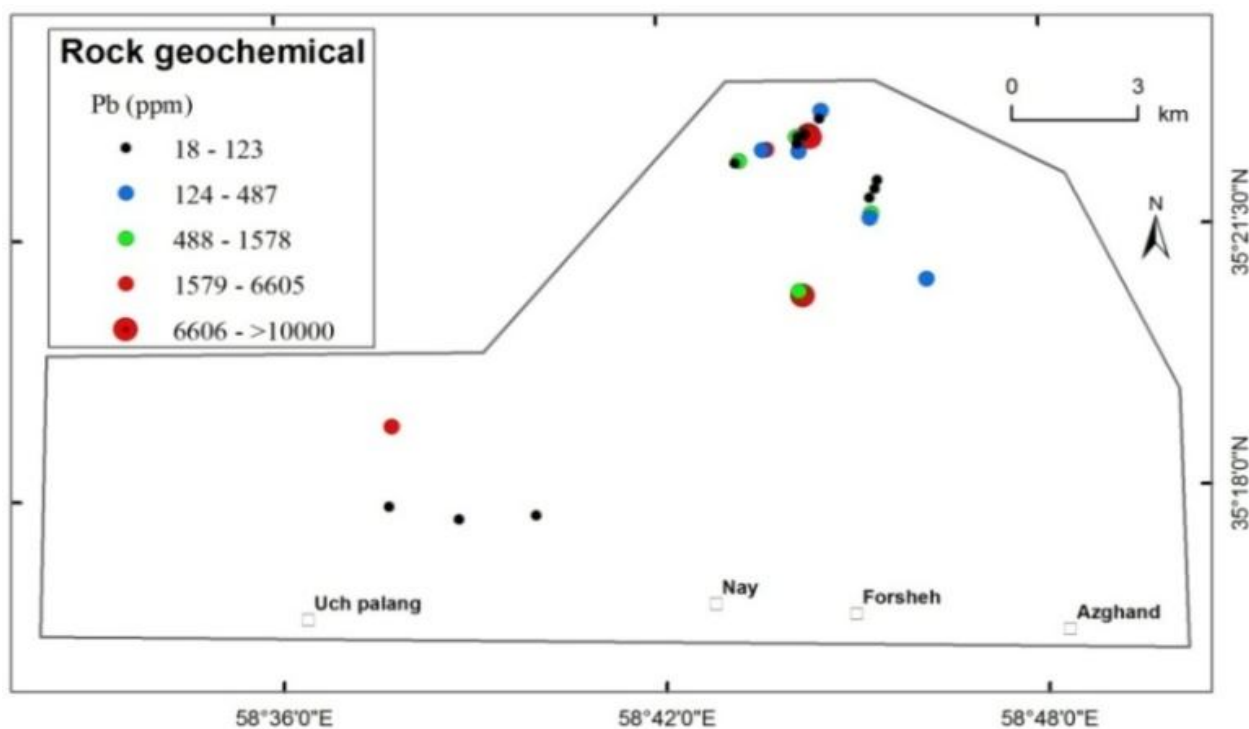
شکل ۱۲. نقشه ژئوشیمی طلا در رگه‌های سیلیسی کانه‌دار در شمال شرق کاشمر

Fig. 12. Gold geochemical map of ore-bearing silicified veins in northeast of Kashmar



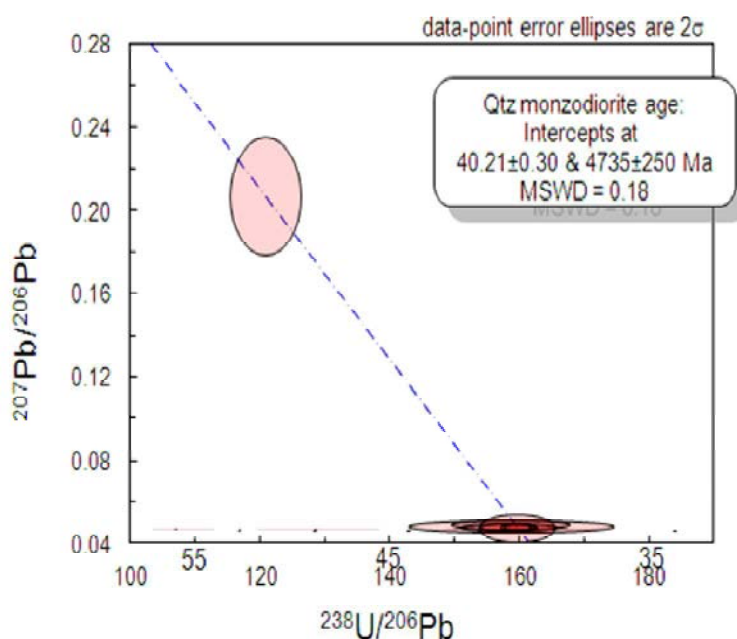
شکل 13. نقشه ژئوشیمی روی رگه‌های سیلیسی کانه‌دار در شمال شرق کاشمر

Fig. 13. Zinc geochemical map of ore-bearing silicified veins in northeast of Kashmar



شکل 14. نقشه ژئوشیمی سرب رگه‌های سیلیسی کانه‌دار در شمال شرق کاشمر

Fig. 14. Lead geochemical map of ore-bearing silicified veins in northeast of Kashmar



شکل 15. نمودار میانگین سن تعیین شده از اطلاعات ایزوتوپی U-Pb برای نمونه کوارتز مونزودیوریت نوع I شمال شرقی کاشمر

Fig. 15. Plot of determined mean date of U-Pb isotopic data for I-type quartz monzonite sample in northeast of Kashmar

جدول 4. داده‌های ایزوتوپی مربوط به ایزوتوپ‌های Sm-Nd سنگهای نوع I کاشمر

Table 4. Isotopic data related to Sm-Nd isotopes for I-type intrusive rocks in northeast of Kashmar

Sample	Age (Ma)	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ measured	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ initial	$^{145}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	ϵNdi
BP-25	40	4.70	22.4	0.127	0.512688	0.512655	0.348400	1.33
BP-103	40	5.87	28.9	0.123	0.512654	0.512622	0.348402	0.69
SP-20	40	5.70	29.8	0.116	0.512667	0.512637	0.348102	0.98
SP-7	40	4.54	22.5	0.122	0.512534	0.512502	0.348408	-1.65
BP-11	40	5.43	27.9	0.118	0.512606	0.512575	0.348102	-0.22

$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.5121015 \pm 74$ (conf. lim 95%, N=12). The initial ratio of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ calculated using $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ and ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_m and an age of 40 Ma (age based on zircon) ϵNdi , initial ϵNdi value

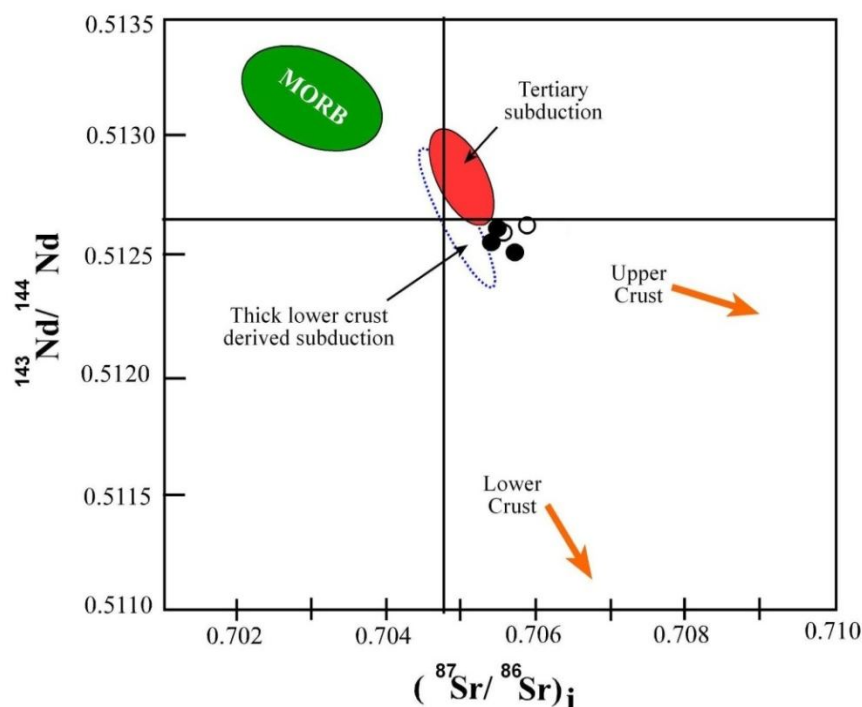
بحث و نتیجه‌گیری

A). همگی از نوع اکسیدان هستند. دسته دایک‌های موازی جوانترین بوده و ماگمای مولد آنها، عامل دگرسانی و کانی‌سازی در منطقه نیز هست. براساس سن‌سنجی U-Pb زیرکن مربوط به توده کوارتز مونزودیوریتی، به نمایندگی از سری ماگمایی اکسیدان (نوع I) جوانتر از سری احیایی کاشمر، سن 40 میلیون سال (اوسن میانی) به دست آمد. براساس اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های Sr-Nd، میانگین نسبت ایزوتوپ اولیه $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ برای توده‌های اکسیدان به ترتیب بین 0/705 تا 0/707 و 0/5125 تا 0/5126 و مقدار ϵNdi توده‌های اکسیدان در بازه محدود منفی تا مثبت (1/65 - تا 1/33) به دست آمد. این مقادیر،

براساس مطالعات ساختاری ناحیه‌ای پیشین و منطقه‌ای این تحقیق، فشار ناحیه‌ای سبب حرکات امتدادلغز چپ‌گرد گسل‌های درونه و تکنار و رخداد زون برشی، ایجاد حوضه Pull-apart و شکستگی‌های نوع ریدل در منطقه کاشمر شده است. رویدادهای فوق سبب نفوذ ماگما و چرخش محلول گرمایی عامل دگرسانی و کانی‌سازی در منطقه شده‌اند. براساس مطالعات زمین‌شناسی، ژئوشیمی و اندازه‌گیری حساسیت مغناطیسی توده‌های نفوذی، چند ضربان ماگماتیسیم کالکوالکان تا آلکان پتاسیم بالا تا شوشونیتی در منطقه رخ داده که به جز یک مورد (توده آلکالی‌گرانیست نوع

اکسیدان منطقه کاشمر نشان می‌دهند.

منشأ فرورانش با آرایش پوسته قاره‌ای را برای توده‌های



شکل 16. موقعیت سنگهای نفوذی نوع I شمال شرق کاشمر در نمودار $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ در برابر $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$. محیط MORB، فرورانش و پوسته قاره‌ای (Zindler and Hart, 1986). سنگها در محدوده‌ای بین قلمرو فرورانش ترشیری و پوسته قاره‌ای قرار می‌گیرند.

Fig 16. Position of I-type intrusive rocks in northeast of Kashmar in $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram. MORB, subduction and continental crust (Zindler and Hart, 1986). The rocks locate between Tertiary subduction and continental crust (near to subduction).

شکننده - نرم انتقالی - فشارشی تا انتقالی - کششی در زمان نفوذ گرانیتوئید و کانی سازی عمل کرده‌اند (Dallmeyer et al., 1996; Mclean and Betts, 2003). کمربند آتشفشانی - نفوذی شمال لوت بین زون Back arc سبزواری و کمان آتشفشانی - نفوذی نوع آندی ارومیه - دختر قرار دارد. براساس نظریات اخیر، فرورانش مورب صفحه اقیانوسی نئوتتیس در کرتاسه و سنوزوئیک عامل تشکیل زون Back arc البرز (Asiabanha and Foden, 2012) و سبزواری (Alaminia et al., 2013) معرفی شده است. ما نیز این رخداد را عامل تشکیل زون برشی درون - تکنار و تشکیل حوضه pull-apart در منطقه کاشمر معرفی می‌کنیم. در ائوسن، کاهش فشار و ذوب پوسته اقیانوسی فرورانده شده نئوتتیس در زیر این حوضه و حرارت ناشی از صعود ماگما سبب ذوب بخشی گوشته لیتوسفری، صعود ماگمای اکسیدان با آغستگی پوسته قاره‌ای و ماگماتیسیم کالکوالکان تا آلکان پتاسیم بالا تا شوشونیتی در کاشمر شد. پر شدن و تخلیه

فرورانش مورب صفحه اقیانوسی آرام به زیر صفحه قاره‌ای در امریکای جنوبی، سبب تشکیل سامانه برشی مورب در پشت کمان ماگمایی قاره‌ای آن شده است (Sillitoe, 2003). با ادامه فرورانش، تداوم و پیشرفت در حرکات برشی سبب تشکیل حوضه‌های pull-apart شده که ذوب صفحه فرورانده در زیر این حوضه‌ها سبب تشکیل و صعود ماگما از میان پوسته قاره‌ای (آغستگی) و نهایتاً ماگماتیسیم با ماهیت کالکوالکان تا آلکان پتاسیم بالا تا شوشونیتی شده که همراه با مهمترین انواع ذخایر مس - طلای نوع IOCG، آهن اسکارنی و ... در دنیا است (Sillitoe, 2003). از مهمترین ذخایر مهم این کمربند می‌توان به کاندلاریا¹، مانتورده² و رائل کاندستابل³ اشاره کرد. در این جا وابستگی زمانی نزدیکی بین ذخایر مس - طلا و ماگماتیسیم I و A وجود دارد (Sillitoe, 2003). ایالت‌های فلززایی که میزبان این ذخایر اصلی اند، ویژگی‌های مشترکی دارند. یک وابستگی با سامانه‌های گسل اصلی بوده که به‌عنوان سامانه‌های برشی

از نظر دگرسانی و کانی‌سازی، بخش‌های عمیق ایالت‌های ICGC اصلی در دنیا با دگرسانی‌های سدیک - کلسیک و پتاسیک (کتینولیت و بیوتیت گرمایی) و کانی‌سازی مگنتیت ± طلا مشخص شده‌اند (Sillitoe, 2003; Dallmeyer et al., 1996; Mclean and Betts, 2003; Orrego et al., 2000). گسترش عمودی ذخایر ICGC حتی در بخش فوقانی بلافصل ذخایر مرکب بزرگی مانند Candelaria، از ریشه‌هاشان کمتر شناخته شده است (Sillitoe, 2003). آقایان ری و دیک (Ray and Dick, 2002) استنباط کردند که یک بلوک با عرض 1/5 کیلومتر، که در زیر گسل خورده و از توف سیلیسی شده توده‌ای حاوی پیریت، سرسیت و کمی دمورتیریت (کانی تورمالین) تشکیل شده، کم عمق‌ترین رخساره‌های دگرسانی اندیس ICGC به نام پروداکتورا¹ در منطقه کاندلاریا را نشان می‌دهند. این پیشنهاد با رخداد گسترده زون‌های وسیع دگرسانی تخریب پیریتی فلدسپار که به‌طور محلی توالیهای آتشفشانی را در سرتاسر کمربند ساحلی کوردیلرا² شیلی و پرو تحت تأثیر قرار داده است، سازگار است. در این‌جا دگرسانی سیلیسی همراه با سرسیتی و/یا آرژیلیک پیشرفته نیز عموماً به ثبت رسیده است. ویژگیهای دگرسانی و کانی‌سازی در محدوده مطالعاتی هیچ‌گونه شباهتی با دگرسانی و کانی‌سازی شاخص مناطق عمیق ندارد اما در مجاورت محدود مطالعاتی، کانسار تنورجه با کانی‌سازی مگنتیت طلادار و در سطح توپوگرافی پایین‌تر از منطقه مطالعاتی، دارای ویژگیهای بخشهای عمیق ذخایر ICGC است. در تنورجه کوارتزهای طلا به‌صورت رگه‌ای، رگه‌چه‌ای و پراکنده در توده مگنتیتی با سنگ میزبان گرانیته وجود دارند (Karimpour, 2006) و دگرسانی مناطق عمیق ذخایر ICGC (دگرسانی پتاسیک (بیوتیت گرمایی) و نیز دگرسانی آرژیلیک پیشرفته، سیلیسی سرسیتی را شاهد هستیم اما هیچ خبری از رگه‌های ICGC غنی از اسپیکولاریت مشابه با کمرمرد نیست. دگرسانی در مناطق بهاریه، اوچ پلنگ کمرمرد نیست. دگرسانی مشابه با اندیس ICGC پروداکتورا در کاندلاریا است. سنگ میزبان (گرانیتوئیدها)، دگرسانی و تراز ارتفاعی در مناطق بهاریه، اوچ پلنگ شباهتهای زیادی با کانسار مگنتیت طلادار تنورجه (Karimpour, 2006) در شمال غرب منطقه دارد ولی از نظر تراز ارتفاعی اندکی بالاتر (تقریباً بین 100 تا 150 متر) از تنورجه است.

متناب مخزن ماگمایی در زیر حوضه pull-apart، سبب ضربانهای ماگمایی اکسیدان و کشش پوسته‌ای محلی سبب کاهش ناگهانی فشار در پوسته، ذوب آن و نفوذ ماگمای احیایی شد. نفوذ مجدد یک ماگمای مافیک جدید با رخمون سطحی دسته‌دایک‌های موازی، عامل دگرسانی و کانی‌سازی در منطقه کاشمر شد.

براساس مطالعات ساختاری، دگرسانی (پردازش تصاویر ماهواره Aster، مقاطع میکروسکوپی و صحرایی) و کانی‌سازی (ژئوشیمی رگه‌های سیلیسی کانه‌دار) صورت گرفته در این پژوهش، دگرسانی و کانی‌سازی در منطقه کاشمر به دو دسته تقسیم می‌شود: دگرسانی اولیه (شامل آرژیلیک پیشرفته + سرسیتی + سیلیسی) و دگرسانی تأخیری (کربناتی - اکسید آهن - سیلیسی - اپیدوتی - کلریتی - سرسیتی - باریت) که اولی با کانی‌سازی رگه‌ای سولفید فلزات پایه (کالکوپیریت + پیریت + گالن ± کوارتز ± کلریت) و دومی با کانی‌سازی ICGC (اسپیکولاریت + کالکوپیریت + پیریت ± گالن ± اسفالریت ± باریت ± سیدریت و دیگر کانی‌ها) همراه است. از ویژگیهای بارز دگرسانی اولیه می‌توان به رخداد وسیع کلاهکهای سیلیسی و زون‌های آرژیلیک پیشرفته در محل تجمع محلول گرمایی (نقاط تلاقی گسل درونه با گسلهای فرعی) اشاره کرد که با کانی‌سازی رگه‌ای سولفید فلزات پایه در ارتباط است. مناطق بهاریه، اوچ پلنگ و سرسفیدال بر این نقاط منطبقند. در بخشهای نزدیک به گسل درونه بعضاً شکستگیهای موجود در توده‌های نفوذی با تورمالین (دمورتیریت) ± کلریت پر شده است. دگرسانی تأخیری همراه با رویداد وسیع رگه‌های ICGC و یک مورد برش گرمایی - گسلی در کمرمرد رخ داده است. سنگ میزبان برش داسیت و توده نفوذی کوارتز دیوریتی بوده و قطعات برش از سنگ میزبان و قطعات کوارتز درشت و ریز زاویه‌دار تشکیل شده که با سیمان غالباً سیلیسی و جزئی سیدریت که در آن مقادیر کمی اسپیکولاریت ± دانه‌های خیلی کم مگنتیت وجود دارد، به هم چسبیده شده‌اند. داده‌های ژئوشیمیایی رگه‌ها نشان‌دهنده بی‌هنجاری عناصر مس، سرب، روی در هر دو سری رگه (< 1 درصد) و بی‌هنجاری طلا فقط در رگه‌های ICGC (تا حداکثر 15 پی‌پی‌ام)، مقادیر بالای منگنز در هر دو سری و باریت در رگه‌های ICGC است، که به‌همراه کانی اسپیکولاریت گویای شرایط فوق اکسیدان برای رگه‌های ICGC است.

تنورچه مواجه شویم. شواهد صحرایی و میکروسکوپی نیز نشان‌دهنده جوانتر بودن رگه‌های IOCG نسبت به مجموعه دگرسانی و کانی‌سازی رگه‌های سولفید فلزات پایه در بهاریه - اوچ پلنگ است (قطع شدن دگرسانی‌های آرژیلیک پیشرفته و سیلیسی - سرسیتی بهاریه - اوچ پلنگ با رگه‌چه‌های کوارتز غنی اسپیکولاریت و رگه‌چه‌های تأخیری حاوی کوارتز - کلریت - کربنات شبیه آنچه در کمرمرد دیده شده است). لذا باید گفت که کانی‌سازی IOCG کمرمرد جوانتر از مجموعه دگرسانی - کانی‌سازی بهاریه، اوچ پلنگ است، لکن فرسایش سبب از بین رفتن رگه‌های IOCG در مناطق بهاریه، اوچ پلنگ و سرسفیدال شده است. در نهایت با توجه به پاراژنز کانیایی و خصوصاً نتایج تجزیه رگه‌ها (غنی‌شدگی نسبی عناصر فلزی پایه در هر دو سری رگه، نبود غنی‌شدگی طلا در رگه‌های سولفید فلزات پایه در مناطق بهاریه - اوچ پلنگ و برعکس غنی‌شدگی طلا در رگه‌های IOCG کمرمرد و نیز مقادیر بالای منگنز در هر دو سری رگه و غنی‌شدگی بیشتر منگنز و نیز باریم در رگه‌های IOCG نسبت به رگه‌های سولفید فلزات پایه)، باید گفت که در مناطق بهاریه - اوچ پلنگ مشابه با تنورچه، احتمالاً محلول آهن‌دار اکسیدان (مگنتیت)، بخشی از طلا را در عمق همراه با مگنتیت به‌جا گذاشته است. طی یک چرخش مجدد محلول گرمایی آهن‌دار فوق اکسیدان جدید بخشی از طلا و عناصری مانند آهن، باریم و منگنز مجدداً حمل شده و در رگه‌های IOCG منطقه به‌صورت طلای همراه با اسپیکولاریت + باریت + منگنز و دیگر کانیها) غنی شده است. رگه‌های IOCG مناطق بهاریه - اوچ پلنگ بر اثر فرسایش از بین رفته‌اند.

با توجه به همه شواهد ناحیه‌ای و شواهد موجود در محدوده مطالعاتی (سیستم زون برشی در پشت کمان ماگمایی قاره‌ای مرتبط با فرورانش مورب، رخداد ماگماتیسیم شاخص کالکوالکالن تا آلکالن پتاسیم بالا تا شوشونیتی نوع I و A، وجود دگرسانی‌های شاخص بخشهای فوقانی ذخایر IOCG و کانی‌سازی رگه‌های IOCG)، مدل کانی‌سازی در منطقه شمال - شرق کاشمر طلا - مس نوع IOCG معرفی می‌شود.

سرسفیدال از نظر سطح فرسایش کنونی در سطح ترازوی بین کمرمرد و بهاریه - اوچ پلنگ قرار دارد و هر دوی سنگهای آتشفشانی و گرانیتوئیدها سنگ میزبان کانی‌سازی هستند. از طرفی رگه‌های IOCG از نظر فراوانی در کمرمرد بیشترین تعداد، در سرسفیدال کمتر و در بهاریه - اوچ پلنگ، به‌استثنای یک رگه، اصلاً وجود ندارد. منطقه کمرمرد در تراز ارتفاعی بالاتری نسبت به مناطق بهاریه، اوچ پلنگ سرسفیدال قرار دارد. کانی‌سازی، سنگ میزبان (سنگهای آتشفشانی) و دگرسانی و تراز ارتفاعی منطقه کمرمرد کاملاً مشابه با کانسار طلای غنی از اسپیکولاریت کوه‌زر (Mazloomi Bajestani, 2009) است که در شرق کمرمرد قرار دارد. بر طبق این شواهد، ما کمرمرد را معادل سطح تراز قدیمی منطقه فرض کرده و سطح کنونی در بهاریه - اوچ پلنگ را حاصل فرسایش می‌دانیم. مطالعه سیالات درگیر در مگنتیت طلا‌دار تنورچه نشان دهنده دماها (200 تا بیش از 500 درجه سانتی‌گراد) و شوری‌های (تا 45 درصد وزنی NaCl) نسبتاً بالا تا بالایی است (Ajayebi, 2009). مطالعات دماسنجی سیالات درگیر رگه‌های سیلیسی کانه‌دار در کوه‌زر (Mazloomi Bajestani, 2009) و دماسنجی و شوری در کمرمرد، سرسفیدال، بهاریه و اوچ پلنگ (Almasi, 2015) نشان می‌دهد که سیالات در کوه‌زر دماهای 230 تا 460 درجه سانتی‌گراد و در کمرمرد، سرسفیدال، بهاریه و اوچ پلنگ دماهای 240 تا 340 درجه سانتی‌گراد و شوری‌های 14 تا 17/6 (درصد وزنی NaCl) دارند. لذا ما معتقدیم که سطح حاضر دگرسانی و کانی‌سازی در مناطق بهاریه، اوچ پلنگ مشابه با تنورچه اما کمی بالاتر از آن و کمرمرد مشابه با کوه‌زر است و به ترتیب مربوط به بخشهای متوسط - نیمه عمیق و سطحی‌ترین بخش یک سیستم IOCG هستند. سرسفیدال شواهد گذر تدریجی بین این دو را دارد، زیرا هم دگرسانی‌های مشابه با بهاریه - اوچ پلنگ و هم رگه‌های IOCG مشابه با کمرمرد را دارد. شواهد دیگری چون نبود کوارتز حفره‌دار در کلاکهای سیلیسی مناطق بهاریه، سرسفیدال و اوچ پلنگ، این ادعا را تقویت می‌کند. لذا انتظار داریم با افزایش عمق در مناطق بهاریه، اوچ پلنگ و سرسفیدال با توده‌های مگنتیت طلا‌دار مشابه با

References

- Abdi, M. and Karimpour, M.H., 2012. Geology, alteration, mineralization, petrogenesis, dating, geochemistry and Airborne geophysic of Kooch-shah area, southtwest of Birjand. *Journal of Economic Geology*, 1(4): 77-107. (in Persian)
- Afsharharb, A., Aghanabati, A. and Majdi, B., 1987. Geological map of Mashhad, scale 1:250000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Aghanabati, A., 1995. Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Iran, 606 pp.
- Ajayebi, K.S., 2009. Nature of fluid inclusions at Calcalkaline in Tanourjeh Cu-Au mineralization (North of Kashmar). *Journal of Geology of Iran*, 2(8): 55-69 pp. (in Persian)
- Alaminia, Z., Karimpour, M.H., Homam, S.M. and Finger, F., 2013. The magmatic record in the Arghash region (northeast Iran) and tectonic implications. *International Journal of Earth Sciences*, 102(3): 873-887.
- Almasi, A., 2015. Mineralizaion, Petrogenesis and geochemical-geophysical exploration in Uch Palang- Sarsefidal area (Northeast of Kashmar). Ph.D. Thesis, University of Ferdowsi, Mashhad, Iran. (unpublished)
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J.M. and Homam, S.M., 2011. Two-sided asymmetric subduction; implications for tectonomagmatic and metallogenic evolution of the Lut Block, eastern Iran. *Journal of Economic Geology*, 1(3): 1-14.
- Asiabanha, A. and Foden, J., 2012. Post-collisional transition from an extensional volcano-sedimentary basin to a continental arc in the Alborz Ranges, N-Iran. *Lithos*, 148: 98-111.
- Behroozi A., 1988. Geological map of Feyzabad , scale 1:100000, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Boomeri, M., 1998. Petrography and Geochemistry of the Sangan Iron Skarn Deposit and Related Igneous Rocks, Northeastern Iran. Ph.D. thesis, Akita University, Akita, Japan, 226 pp.
- Brookins, D.G., 1988. Eh-Ph diagrams for geochemistry. Springer-Verlag, University of Michigan, New York, 176 pp.
- Camp, V. and Griffis, R., 1983. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithous*, 15: 221-239.
- Connolly, P. and Cosgrove, j., 1999. Prediction of static and dynamic fluid pathways within and around dilational jogs. Imperial College of Science, London, 255 pp.
- Dallmeyer, R.D., Brown, M., Grocott, J., Taylor, G.K. and Treloar, P.J., 1996. Mesozoic magmatic and tectonic events within the Andean plate boundary zone, 26^o-27^o 30', north Chile: constraints from ⁴⁰Ar/³⁹Ar mineral ages. *Journal of Geology*, 104(1): 19-40.
- Eftekharneshad, J., Aghanabati, A. and Hamzehpour, A., 1974. Geological map of Sabzevar, scale 1:250000, Geological Survey of Iran.
- Golmohammadi, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh shafaroudi, A. and Mazaheri, S.A., 2013. petrology and U-Pb Zircon dating in intrusive bodies in A, southern C and Dardvey area, Khaf Sangan iron ore body. *Journal of Economic Geology*, 2(5): 155-174. (in Persian)
- Haji, E., 2009. Structural and Fractal analysis of fractures systems of Taknar of central iran by use of remote sensing and field study data. M.Sc. Thesis, Damghan University, Damghan, Iran, 145 pp.
- Karimpour, M.H., 2006. Cu-Au mineralizaion accompany with magnetite- spcullarite (IOCG) and examples in Iran. 9th Iranian geology society conference, University of Tarbiat Moallem, Tehran, Iran.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh shafaroudi, A., Farmer, L. and Stern, Ch., 2012. Granitoids petrogenesis, U-Pb Zircon dating, Sr-Nd isotope geochemistry and important Tertiary mineralization occurrence in Lut block, east of Iran. *Journal of Economic Geology*, 1(4): 1-27. (in Persian)
- Karimpour, M.H., Malekzadeh shafaroudi, A., Moradi, M., Farmer, L. and Stern, Ch., 2013. Geology, Mineralization, Rb-Sr and Sm-Nd isotope geochemistry, U-Pb dating of intrusive bodies related to Cretaceous mineralization of Kalateh- ahani area, southwest of Gonabad. *Journal of Economic Geolog*, 2(5): 267-290. (in Persian)
- Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M.H., 2011. U-Pb Zircon dating in Maher abad porphyry area: evidence on period of middle Eocene metallogenic porphyry ore bodies in east of Iran. *Journal of Economic Geology*, 1(3): 41-60. (in Persian)

- Mazloomi Bajestani, A., 2009. Mineralization, Geochemistry and Au-W mineralization in Koh e Zar of Torbat e Heydarieh area. Ph.D. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 291 pp.
- McLean, M.A. and Betts, P.G., 2003. Geophysical constraints of shear zones and geometry of the Hiltaba Suite granites in the western Gawler craton, Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 3(50): 525–541.
- Muller, R. and Walter, R., 1983. Geology of the Precambrian-Paleozoic Taknar Inlier northwest of Kashmar, Khorasan Province northeast Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 50, 252 pp.
- Naderi Mighan, N. and Torshizian, H., 1999. Geological map of Kadkan, scale 1:100000. Geological Survey of Iran (1999).
- Orrego, M., Robles, W., Sanhueza, A., Zamora R. and Infanta, J., 2000. Mantos Blancos y Mantoverde: depósitos del tipo Fe-Cu-Au? Una comparación con implicancias en la exploración. *Actas 9th Congress Geology Chileno*, 6(2): 145–149.
- Price, N.J. and Cosgrove, J.W., 1990. Analysis of geological structures. Cambridge University Press, Cambridge, 502 pp.
- Ray, G.E. and Dick, L.A., 2002. The Productora prospect in north-central Chile: An example of an intrusion-related Candelaria type Fe-Cu-Au hydrothermal system. *Porter GeoConsultancy Publishing, Adelaide*, 2:131–151.
- Sahandi, M.R. and Hoseini, M., 1990. Geological map of Sabzevar, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Salati, E., Karimpour, M.H., Malekzadeh shafaroudi A., Heydarian Shahri M.R., Farmer L. and Stern Ch., 2012. U-Pb Zircon dating, Sr-Nd isotope geochemistry and oxidized granitoides petrogenesis of Keybar kooch area (southwest of Khaf). *Journal of Economic Geology*, 2(4): 285-301. (in Persian)
- Sillitoe, R.M., 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7): 787–812.
- Soltani, A., 2000. Geochemistry and geochronology of I-type granitoid rocks in the northeastern Central Iran Plate. Ph.D. Thesis, University of Wollongong, Wollongong, Australia, 300 pp.
- Tarkian, M., Lotfi, M. and Baumann, A., 1983. Tectonic, magmatism and the formation of mineral deposits in central Lut, East of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 57, 70 pp.
- Tchalenko, J.S. and Braud, J., 1974. Seismicity and structure of the Zagros (Iran): The main recent fault between 33° and 35°. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 227, London, 1262 pp.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J. and Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society American Bulletin*, 94(1): 134-150.
- Vaezipour, M.J., Alavi tehrani, M.J. and Behroozi, A., 1993. Geological map of Torbat e Heydaryeh, scale 1:250000. Geological Survey of Iran.
- Zindler, A. and Hart, S.R., 1986. Chemical geodynamics. *Anniversary Review Earth Planetary Sciences*, 9(14): 493- 571.

Geology, mineralization, U-Pb dating and Sr-Nd isotope geochemistry of intrusive bodies in northeast of Kashmar

Alireza Almasi¹, Mohammad Hassan Karimpour^{1*}, Khosrow Ebrahimi Nasrabadi¹, Behnam Rahimi¹, Urs Klötzli² and Jose Francisco Santos³

1) Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2) Department of Geology, Vienna University, Austria
3) Department of Geology, Aveiro University, Portugal

Submitted: Dec. 23, 2014

Accepted: May 9, 2015

Keywords: Shear zone, I/A type magmatism, U-Pb Zircon Dating, Sr-Nd isotopes, IOCG, Subduction

Introduction

The study area is located in central part of the Khaf-Kashmar-Bardaskan belt which is volcano-plutonic belt at the north of the Dorouneh fault in the north of Lut block. The north of the Lut block is affected by tectonic rotation and subduction processes which occur in the east of Iran (Tirrul et al., 1983). The magmatism of Lut block begins in Jurassic and continues in Tertiary (Aghanabati, 1995). Karimpour (Karimpour, 2006) pointed out the Khaf-Kashmar-Bardaskan belt has significant potential for IOCG type mineralization such as Kuh-e-Zar, Tannurjeh, and Sangan (Karimpour, 2006; Mazloumi, 2009). The data gathered on the I-type intrusive rocks include their field geology, petrography, U-Pb zircon dating and Sr-Nd isotope and also alteration and mineralization in the study area.

Materials and methods

- Preparation of 150 thin sections of rock samples for study of petrography and alteration of the intrusive rocks.
- Magnetic susceptibility measuring of intrusive rocks.
- U-Pb dating in zircon of I-type intrusive rocks by Laser-Ablation Multi Collector ICP-MS method.
- Sr-Nd analysis on 5 samples of I-type intrusive rocks by Multi-Collector Thermal Ionization Mass Spectrometer (TIMS) VG Sector 54 instrument.
- Mineralography and paragenetic studies of ore-bearing quartz veins and geochemical analysis for 28 samples.
- Production of the geology, alteration and mineralization maps by scale: 1:20000 in GIS.

Results

Oblique subduction in southern America initiated an arc-parallel fault and shear zones in the back of

continental magmatic arc (Sillitoe, 2003). Because of this event, pull-apart basins were formed and high-K to shoshonitic calc-alkaline I- and A-type magmatism occur (Sillitoe, 2003). Most important deposits accompany with this magmatism are Au-Cu deposits types and Fe-Skarns (Sillitoe, 2003). We have similar scenario to Neotethys subduction. Khaf-Kashmar-Bardaskan volcano-plutonic belt is located between Neotethys suture and Alborz-Sabzevar Back-arc (Asiabanha and Foden, 2012). We suggest Khaf-Kashmar-Bardaskan volcano-plutonic belt forms at the arc-parallel fault and shear zones in the back of continental magmatic arc. In the basis of all evidences (Shear zone system, high-K to shoshonitic calc-alkaline I- and A-type magmatism, typical alterations related to upper zones of IOCG deposits and IOCG mineralization), we suggest IOCG (Au-Cu) mineralization in Kashmar.

Discussion

On the basis of former regional (Muller and Walter, 1983) and local structural studies (this research), regional compression causes sinistral strike-slip movements of Dorouneh and Taknar faults, shear zone, pull-apart and Riedel fractures (P, R and R' types) in the study area. These events cause magma intrusion and circulation of hydrothermal fluids. On the basis of geology, geochemistry and magnetic susceptibility measuring of intrusive rocks, several high K to shoshonitic calc-alkaline to alkaline I-type and one A-type intrusive rocks are intruded in Kashmar area. Swarm dykes are the youngest and the agent for alteration and mineralization. U-Pb dating related to quartz monzonite body (preventative sample for I-type intrusive rocks which are older than A-type series) show 40 Ma (Middle Eocene) for this rock group in Kashmar.

*Corresponding authors Email: karimpur@um.ac.ir

The mean of initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ are 0.705-0.707 and 0.5135-0.5126 for I-type series, respectively. $\epsilon_{\text{Nd}(i)}$ amounts for I-type series are in negative to positive limit ranges (-1.65 to 1.33). These amounts show subduction source with contamination to continental crust.

Two type alteration and mineralization occur in Kashmar: 1) primary alterations (advanced argillic+ sericite+ silicification) which are synchronous with sulfide base-metal veins (chalcopyrite+ pyrite± galena± quartz± chloride) and 2) Lateral alterations (carbonatization+ Fe-oxides+ silicification+ epidotization+ chloride+ sericite+ barite) which are synchronous with IOCG veins (specularite+ chalcopyrite+ pyrite± galena± sphalerite± barite± siderite ± etc.). Primary centralized and sulfide base-metal veins in crosscutting points between Dorouneh fault and minor faults. Bahariyeh, Uchpalang and Sarsefidal areas are located in these crosscutting points. Tourmaline (demortierite) ±chloride fill the fractures in the intrusive rocks of southern part of area next to the Dorouneh fault occasionally. Lateral alteration synchronous with IOCG veins occur in Kamarmard area. Geochemical data of all veins show Cu, Pb, Zn anomalies (>1%) in two type veins, Au anomalies (to about 15 ppm) only in IOCG veins, Mn anomalies in two type veins and Ba anomalies in IOCG veins.

Alteration and mineralization in the world-class IOCG deposits identified by sodic-calcic and potassic (hydrothermal actinolite and biotite) and magnetite± gold in deep parts (Sillitoe, 2003) and advanced argillic+ pyrite+ sericite+ tourmaline (demortierite) in shallow parts (Ray and Dick, 2002). Generally, alteration in the study area is similar to shallow parts of world-class IOCG deposits. Tanourjeh is a IOCG deposit next to the northwest of the study area. In Tanourjeh, the gold-bearing magnetite is synchronous to potassic alteration (hydrothermal biotite) and other alterations are advanced argillic, silicification and sericite. These characteristics are similar to deep parts of world-class IOCG deposits. Bahariyeh, Uchpalang and Sarsefidal have similarities to alterations in Tanourjeh. Considering Tanourjeh lie in the lower level rather to Bahariyeh, Uchpalang and Sarsefidal, we believe they erosion surface in Tanourjeh is lower. Kamarmard lies in the highest erosion surface in the study area. Alterations and Mineralization as similar to Kuh e Zar IOCG deposit (specularite+chalcopyrite+gold) which is next to the

Kamarmard area in Northeast of study area. In Bahariyeh-Uchpalang areas we can see only one IOCG vein but in Sarsefidal area exist several IOCG vein. Because of current surface in Bahariyeh-Uchpalang areas is lower than Sarsefidal current surface in Sarsefidal is lower than Kamarmard, we believe that IOCG vein in Bahariyeh-Uchpalang area have been eroded. We Believe to two circulation of oxidized Fe-bearing hydrothermal fluid in Kashmar. During the first circulation, Potassic alteration and gold-bearing magnetite bodies in depth and primary alterations with sulfide base-metal veins was formed. At the second circulation, lateral alterations and IOCG veins was formed at the near of paleo-surface.

References

- Aghanabati, A., 1995. Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Iran, 606 pp.
- Asiabanha, A. and Foden, J., 2012. Post-collisional transition from an extensional volcano-sedimentary basin to a continental arc in the Alborz Ranges, N-Iran. *Lithos*, 148: 98-111.
- Karimpour, M.H., 2006. Cu-Au mineralization accompany with magnetite-specularite (IOCG) and examples in Iran. 9th Geological Society of Iran Conference, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran.
- Mazloomi Bajestani, A., 2009. Mineralization, Geochemistry and Au-W mineralization in Koh e Zar of Torbat e Heydarieh area. Ph.D. Thesis, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran, 291 pp.
- Muller, R. and Walter, R., 1983. Geology of the Precambrian-Paleozoic Taknar inlier, northwest of Kashmar, Khorasan province, northeast Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 50, 252 pp.
- Ray, G.E. and Dick, L.A., 2002. The Productora prospect in north-central Chile: An example of an intrusion-related Candelaria type Fe-Cu-Au hydrothermal system. Porter GeoConsultancy Publishing, Adelaide, 2:131-151.
- Sillitoe, R.M., 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7): 787-812.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J. and Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 94(1): 134-150.