زمین‌شناسی اقتصادی
جلد ۱۰، شماره ۲ (سال ۱۳۹۷)
صفحات ۴۰۳ تا ۴۲۴

Journal of Economic Geology
Vol. 10, No. 2 (2018–2019)
ISSN 2008-7306

مقایسه سیستم‌های مس پورفیری سونگون و کیقال، شمال‌غرب ایران : با تأکید بر مطالعه سیالات درگیر

طیبه رمضانی[۱]، محمد معانی‌جو[۱*]، سینا اسدی[۲]، دیوید لنتز[۳] و ناصر پیروزنیا[۴]

۱) *گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، کدپستی ۶۵۱۷۴-۳۳۳۹۱، ایران*
۲) *بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران*
۳) *گروه علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه نیوبرونزویک، فردریکتون، NB E3B 5A3، کانادا*
۴) *معدن مس سونگون، اهر، ایران*

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۶، پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۶

چکیده

منطقه فلززایی اهر- ارسباران یکی از مهم‌ترین زون‌های فلززایی ایران در ترشیاری به‌شمار می‌رود. کانه‌زایی در منطقه اغلب وابسته به سنگ‌های ماگمایی ترشیاری است. از این منطقه، دو سیستم مس پورفیری سونگون و کیقال برای بررسی مقایسه‌ای نحوه کانه‌زایی انتخاب شدند. بر روی این دو کانی‌سازی بررسی زمین‌شیمی، سیالات درگیر و کانی‌شناسی انجام‌شد. انواع سیالات درگیر دو معدن مشابه و شامل نوع دو فازی مایع- گاز (L-V)، نوع دو فازی گاز- مایع (V-L)، نوع سه فازی مایع- گاز- جامد (گاهی هماتیت) (L-V-S)، نوع سه فازی مایع- گاز - نمک (L-V-H) و نوع چهار فازی مایع- گاز- نمک- جامد (L-V-H-S) است. نتایج نشان داد که با وجود شباهت سنگ درون‌گیر، سنگ مادر و انواع سیالات درگیر و حتی شوری و دمای همگن‌سازی تقریباً مشابه، در وسعت دگرسانی، ضخامت پوسته و میزان CO_2 سیالات آنها تفاوت‌هایی وجود دارد. به بیان دیگر معدن سونگون به‌علت ضخامت بیشتر لیتوسفر شرایط بهتری در تأمین فلزات و تشکیل کانی‌های سولفیدی داشته است. همچنین حضور CO_2 و تشکیل فرایند نامیژاکی سیال در افزایش pH و ته‌نشینی کانسنگ سونگون مؤثر بوده است و این موجب بارور بودن معدن سونگون و نیمه‌بارور بودن اندیس کیقال شده است.

واژه‌های کلیدی: *مس پورفیری، بارور، هاله زمین‌شیمی، سیالات درگیر، ضخامت لیتوسفر*

مقدمه

کانه‌زایی و تشکیل کانسارها در کمربندهای کوه‌زایی معمولاً با فعالیت‌های گرمابی و دگرسانی‌های مرتبط با آنها همراه است. بیشتر ذخایر مس پورفیری در دنیا منطبق بر کمربندهای کوه‌زایی و کمان‌های آتشفشانی هستند (John et al., 2010; Sillitoe, 2010). این ذخایر با حجم عظیم سنگ‌های دگرسان‌شده شناخته می‌شوند (Sillitoe, 1972). مهم‌ترین کمربند فلززایی در ایران با عنوان کمربند ارومیه- دختر معرفی می‌شود که تعداد زیادی کانسار مس پورفیری در آن وجود دارد و مهم‌ترین آنها کانسار مس پورفیری سرچشمه است (Maanijou and Mostaghimi, 2013). ذخایر مس پورفیری در حال حاضر سه چهارم مس، نیمی از مولیبدن و یک پنجم طلا، رنیوم و مقادیری

*مسئول مکاتبات: mohammad@basu.ac.ir
DOI: 10.22067/econg.v10i2.61340

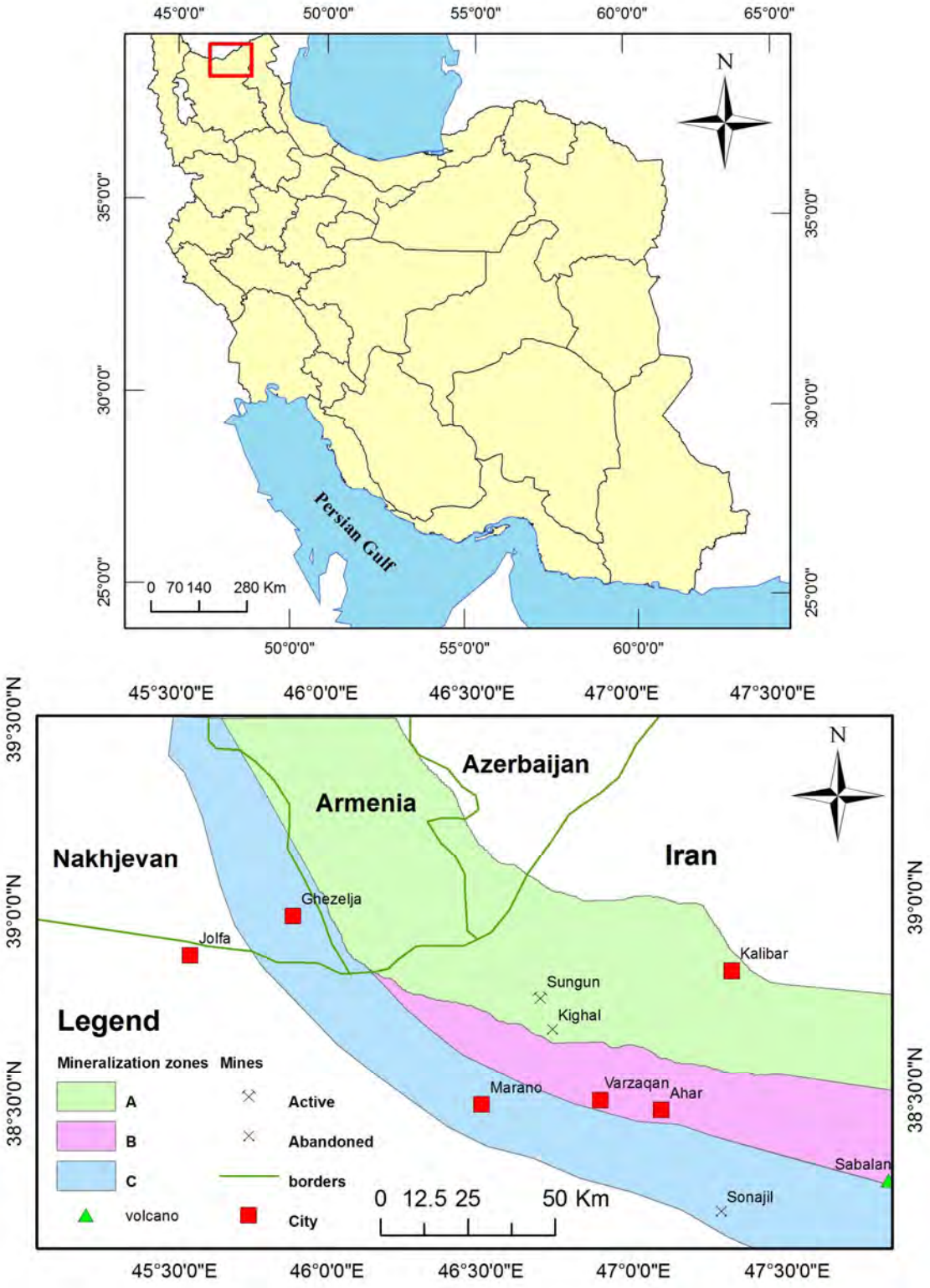
از فلزات دیگر مانند نقره، پالادیم، تلوریم، سلنیم، بیسموت، روی و سرب جهان را تأمین می کنند (Sillitoe, 2010). کمربند آتشفشانی اهر- ارسباران[1] در شمال‌غرب ایران بخشی از زون ماگمایی البرز- آذربایجان است که در طول حاشیه جنوبی اوراسیا گسترش‌یافته است. انواع کانه‌زایی مس پورفیری، اسکارن و ذخایر Cu-Mo- Au در این منطقه وجود دارد که می‌توان آنها را به سه زون A، B و C اصلی تقسیم کرد (شکل ۱). ذخایر مس نوع پورفیری و اسکارن مرتبط با توده‌های اولیگومیوسن اغلب در زون A واقع می‌شوند؛ درحالی‌که زون B، ذخایر مس، طلا و آرسنیک اپی‌ترمال و زون C ذخایر طلا را دربرمی‌گیرد. سیستم‌های مس پورفیری سونگون و کیقال در زون A قرار دارند (جدول ۱). این زون از شمال اهر تا جنوب‌شرق ارمنستان گسترش دارد. کانسارهای این زون از لحاظ زمانی و مکانی به توده‌های کالک‌آلکالن تا آلکالن الیگومیوسن با سنگ میزبان آتشفشانی- رسوبی کرتاسه مرتبط هستند (Jamali et al., 2010). معدن سونگون در شمال ورزقان و اندیس کیقال در ۱۰ کیلومتری جنوب آن قرار دارد (Calagari, 2003; Calagari, 2004). این دو معدن، با وجود شباهت سنگ درون‌گیر، توده نفوذی مادر، سن کانه‌زایی و جایگاه زمین‌ساختی از لحاظ میزان کانه‌زایی متفاوت هستند.

معدن سونگون با عیار ۰/۶۲ درصد مس و ۰/۰۱ درصد مولیبدن کانساری بارور و اندیس کیقال با عیار زیر ۰/۲ درصد مس (NICICO[2], 2006) ذخیره‌ای نیمه‌بارور محسوب می‌شود. این تفاوت‌ها، بررسی بیشتر سیالات کانه‌ساز و روند تکامل آنها در معدن سونگون و اندیس کیقال را برای درک بهتر فرایندهای مؤثر بر کانه‌زایی ضروری می‌سازد. بررسی‌های زیادی بر روی سیالات کانی‌ساز کانسارهای مس پورفیری ایران از جمله سرچشمه انجام‌شده است که به درک بهتر فرایندهای کانه‌زایی و دگرسانی در آنها منجر شده است (Maanijou et al., 2012). هدف اصلی این پژوهش بررسی رفتار زمین شیمیایی عناصر و ویژگی‌های ریزدماسنجی تشکیل کانسنگ برای دستیابی به روند تکامل سیال گرمابی و کانه‌زایی مس در سیستم‌های مس پورفیری سونگون و کیقال است.

زمین‌شناسی ناحیه‌ای کمربند آتشفشانی اهر- ارسباران

پی‌سنگ بلورین کمربند اهر- ارسباران از واحدهای پرکامبرین و پالئوزوئیک تأخیری با منشأ گندوانا تشکیل‌شده است. افیولیت‌های پراکنده‌ای در شمال کمربند اهر- ارسباران (مانند افیولیت شمال لهرود) بازمانده‌های مزوتتیس این پی‌سنگ را تشکیل می‌دهند. سنگ‌های آتشفشانی مافیک تا فلسیک ژوراسیک بالایی- کرتاسه زیرین (آندزیت و داسیت) و پلوتون‌های گابرودیوریت و گرانودیوریت، واحدهای کمان ماگمایی حاشیه اوراسیای قلمروی تتیس هستند (Dilek et al., 2010). در دوره کرتاسه بالایی رسوبات آهکی به‌همراه شیل و مارل به‌طور دگرشیب افیولیت‌ها و سنگ بستر را پوشانده‌اند. ماگماتیسم سنوزوئیک منطقه اهر- ارسباران در ائوسن با فعالیت آتشفشانی شدیدی آغاز شد و سنگ‌های حدواسط تا اسیدی زیادی ایجاد کرد. این فعالیت تا اولیگومیوسن با جای‌گیری پلوتون‌های گرانیتوئیدی ادامه‌یافت و به دگرسانی و کانه‌زایی گسترده‌ای منجر شد. توده‌های نفوذی اولیگومیوسن اغلب پلوتون‌های درشت‌دانه تا متوسط‌دانه گرانودیوریت و مونزونیت و به‌طور محلی پلوتون‌های جوان‌تر دیوریت و گابرو را دربرمی‌گیرد. به‌طور محلی این سنگ‌های نفوذی، سازند قرمز بالایی را قطع کرده‌اند که نشان‌دهنده تأخیری‌بودن نسبت به آنهاست. سنگ‌های تراکی‌آندزیت و بازالتی پلیو کواترنر به‌طور دگرشیب در بخش‌هایی مانند آتشفشان سبلان و اطراف ورزقان در بخش مرکزی AHAVB، واحدهای ماگمایی قدیمی‌تر را پوشانده‌اند. سنگ‌های نفوذی AHAVB، گرانیتوئیدهای نوع I متاآلومینوس تا پرآلومینوس هستند و اغلب آنها از گرانیتوئید، تونالیت، کوارتزمونزونیت و مونزونیت تشکیل شده‌اند (Jamali et al., 2010; Jamali and Mehrabi, 2014).

1. Ahar- Arasbaran Volcanic Belt (AHAVB)
2. National Iranian Copper Industries Company



شکل ۱. توزیع زون‌های کانه‌زایی در شمال‌غرب ایران و جنوب ارمنستان. سه زون کانه‌زایی A، B و C در کمربند آتشفشانی اهر– ارسباران وجود دارد. معدن سونگون و اندیس کیقال در زون A قرار می‌گیرند (Jamali et al., 2010).

Fig. 1. Distribution of mineralization zones in NW Iran. There are three zones, A, B, and C in Ahar- Arasbaran (AHAVB) (Jamali et al., 2010). Sungun and Kighal PCDs lie in zone A.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی مس پورفیری سونگون و کیقال (Jamali and Mehrabi., 2014)

Table 1. Some geologic and mineralization characteristics of the Sungun and Kighal PCDs (Jamali and Mehrabi, 2014)

Name of deposit	Sungun	Kighal
Productivity	Productive	Nonproductive
Tectonic setting	Post-collision, delamination	Post-collision, delamination
Zone	A	A
Location	38^0 41` 53``N $46^0$ 42` 21``E	38^0 37` 34``N 46 $^0$40` 43``E
Magmatism/ Mineralization age (Ma)	20	20
Host/country rocks	Monzodiorite and volcano-sedimentary rocks	Monzodiorite and volcano-sedimentary rocks
Metal associations	Cu–Mo	Cu–Mo
Genetic type	SK[1]-POR[2]	POR
Tonnage and grade	800 Mt 0.76% Cu, 0.015% Mo	~ 0.2 % Cu

1. Skarn
2. Porphyry

زمین شناسی منطقه

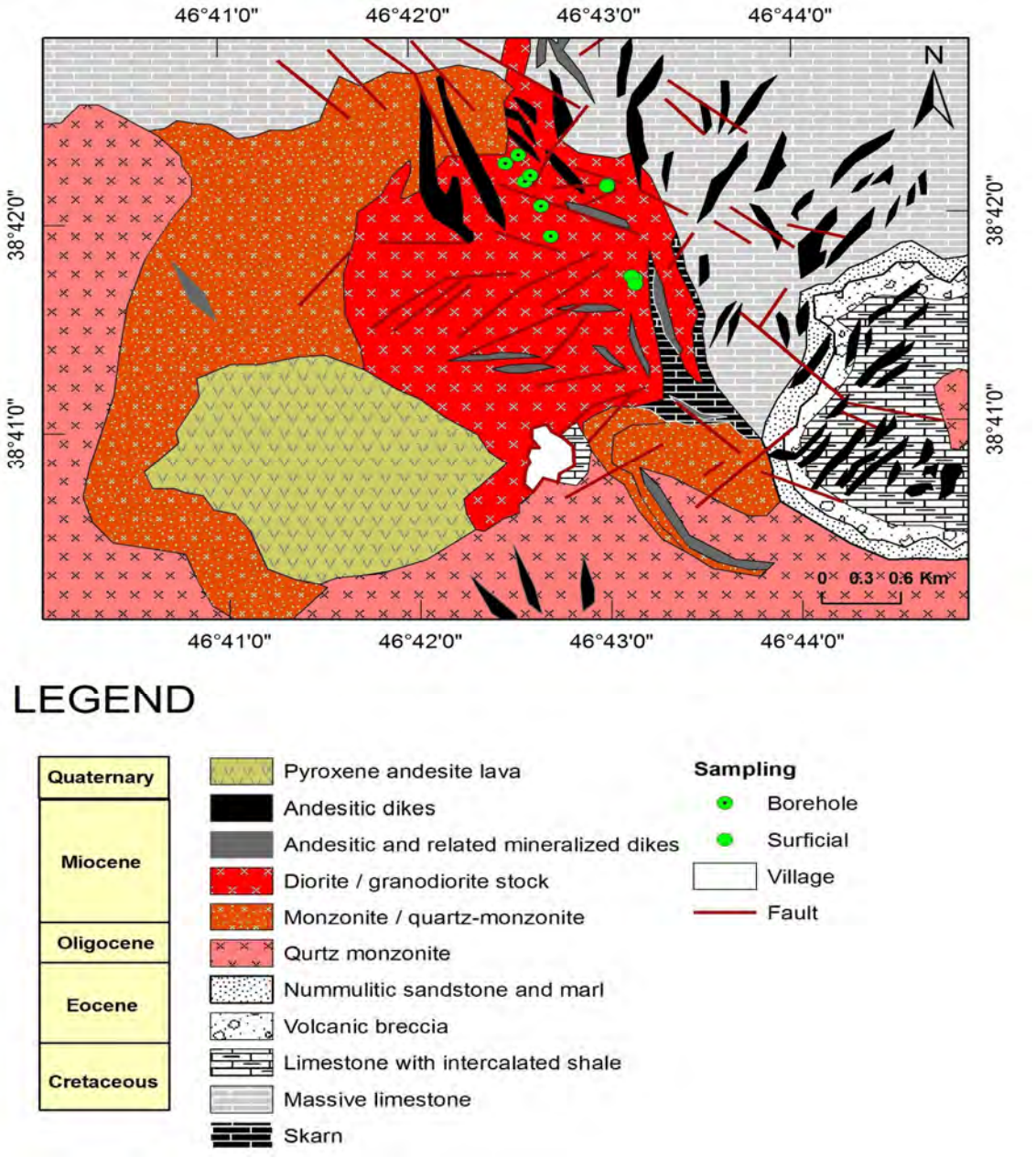
معدن سونگون

معدن مس پورفیری سونگون در شمال‌غرب ایران (استان آذربایجان شرقی) واقع‌شده و دارای دو نوع استوک است: استوک پورفیری نوع اول با ترکیب کوارتزمونزونیت و استوک نوع دوم که میزبان اصلی کانه‌زایی مس در سونگون است (شکل ۲) و ترکیب گرانودیوریت دارد. این دو توده نفوذی توسط دایک‌های مونزونیتی و آندزیتی بخش‌های شمالی و شرقی قطع می‌شوند و به‌طور محلی دارای کانه‌زایی هستند. بافت معمول این سنگ‌ها، پورفیری با زمینه کریپتوکریستالین و در دایک‌ها پورفیری میکرولیتی و میکرولیتی است (Asghari and Hezarkhani, 2010). توده نفوذی دیوریتی– گرانودیوریتی در سنگ آهک کرتاسه (~ ۵۰۰ متر ضخامت) و سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی ترشیاری (~ ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر ضخامت) نفوذکرده است. این سنگ‌های آتشفشانی از توف آندزیتی تا تراکیتی و آگلومرا تشکیل شده‌اند. گدازه‌های آندزیتی تا تراکیتی کوارتزنری به‌طور محلی در شمال و غرب این ذخیره رخنمون دارند. اثرات متاسوماتیسمی در سنگ درون‌گیر دیده می‌شود، به‌ویژه در منطقه شرقی که سنگ آهک به اسکارن‌های گارنت پیروکسن و آمفیبول- بیوتیت تبدیل‌شده و دارای کانی‌های پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت، و گالن همراه با کلسیت، کوارتز و مگنتیت است (Hezarkhani and Williams-Jones, 1998)

اندیس کیقال

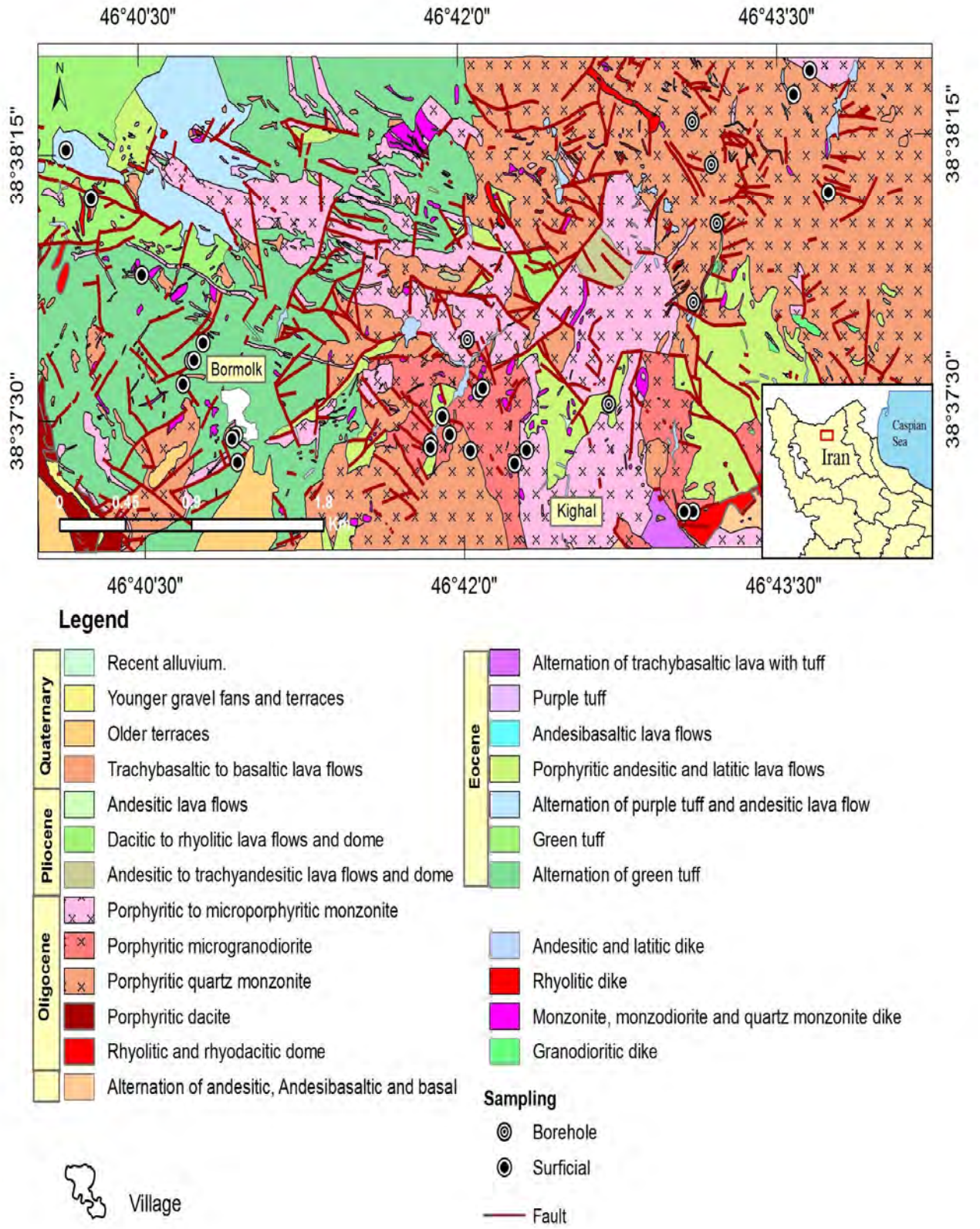
استوک پورفیری کوارتزمونزونیتی کیقال در شمال ورزقان و ۱۰ کیلومتری جنوب معدن سونگون واقع‌شده است (شکل ۳). این استوک طی فعالیت‌های ماگمایی فاز کوه‌زایی پیرنئن در واحدهای قدیمی‌تر آندزیتی و داسیتی نفوذکرده و باعث

گسترش زون‌های دگرسانی گرمابی و کانه‌زایی Cu-Mo شده است. بعد از جای‌گیری این توده، چندین دایک با ترکیب دیوریت تا کوارتز دیوریت، گرانودیوریت، میکرودیوریت و مونزودیوریت همراه با یک توده نفوذی کوچک‌تر گرانودیوریتی به استوک پورفیری نفوذ کرده‌اند. این توده گرانودیوریتی به عقیده بعضی نویسندگان کانه‌زایی و دگرسانی گرمابی ایجاد نکرده است (Simmonds, 2013; Hassanpour, 2010). دگرسانی پتاسیک به‌طور پراکنده رخنمون دارد. متوسط عیار Cu کمتر از ۰/۲ درصد است (NICICO, 2006). اندیس کیقال از لحاظ سنگ‌های درون‌گیر و توده نفوذی مادر با معدن سونگون قابل مقایسه است (Hassanpour, 2010).



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محلی و نقاط نمونه‌برداری معدن سونگون (Mehrpartou 1993)

Fig. 2. Local geological map showing sampling locations of the Sungun PCD (Mehrpartou, 1993)



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی منطقه‌ای و نقاط نمونه‌برداری اندیس کیقال- بورملک (NICICO, 2006)

Fig. 3. Regional geological map shows sampling locations of Kighal-Bormolk PCD (NICICO, 2006)

روش انجام پژوهش

برای بررسی‌های کانی‌شناسی دو معدن مس پورفیری سونگون و کیقال از نمونه‌های مغزه و سطحی، ۱۰۰ مقطع نازک و نازک صیقلی تهیه شد. برای بررسی‌های ریزدماسنجی سیالات درگیر ۱۱ مقطع دوبرصیقل تهیه و برای آنالیز به مرکز فرآوری مواد معدنی ایمیدرو فرستاده شد. داده‌های به‌دست آمده توسط نرم‌افزار Flincor (Brown, 1989) و SPSS 17 مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین برای مقایسه زون‌بندی زمین‌شیمیایی دو معدن ۱۰۰ نمونه با روش ICP-MS آنالیز شد.

نتایج و بحث

هاله‌های زمین‌شیمیایی سیستم‌های مس سونگون و کیقال

مقایسه کانه‌زایی معدن سونگون و اندیس کیقال با استفاده از روش ضریب زون‌بندی زمین‌شیمیایی انجام شد. این روش به تشخیص زون‌بندی هاله‌های زمین‌شیمیایی ذخایر مس پورفیری با استفاده از فرمول زیر کمک می‌کند (Ziaii et al., 2012).

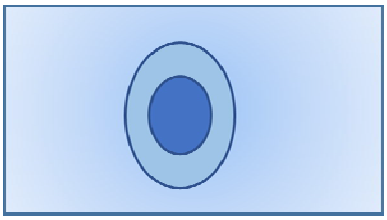
$$v_z = \frac{Zn \times Pb}{Cu \times Mo}$$

در این روش می‌توان زون‌بندی هاله‌های زمین‌شیمیایی را در برشی عمودی با استفاده از شش زون نشان داد (جدول ۲). با وجود تغییر سنگ‌شناسی، این ضریب با افزایش عمق کاهش می‌یابد؛ اما در یک زون مشابه است. مقادیر زیاد این شاخص نشان‌دهنده وجود ذخایر پنهان است؛ درصورتی‌که مقادیر کم آن بر بیرون‌زدگی یا فرسایش ذخیره دلالت دارد.

نتایج نشان داد که در هر دو کانی‌سازی سونگون و کیقال این ضریب با افزایش عمق کاهش می‌یابد (جدول ۳). همچنین به‌علت وجود مس و مولیبدن با عیار بیشتر در مخرج، این ضریب در معدن سونگون کمتر است.

جدول ۲. مدل زون‌بندی زمین‌شیمیایی عمودی (Vz) برای ذخایر مس پورفیری بر اساس ذخایر مس پورفیری استاندارد در قزاقستان، بلغارستان، ارمنستان و ایران (Ziaii et al., 2011)

Table 2. Vertical geochemical zonality of porohyry copper deposit, based on porphyry copper deposits of Armenia, Iran and Kazakhstan (Ziaii et al., 2011)

Zone			Vz
I	Supraore		Vz < 5
II	Upper ore		5 < Vz < 0.5
III	Ore		0.5 <Vz < 0.05
IV	Ore		0.05 < Vz < 0.005
V	Lower Ore		0.005 < Vz < 0.0005
VI	Subore		Vz > 0.0005
Enclosing rocks		Primary halo	Orebody

جدول ۳. مقایسه ضریب زون‌بندی در دو سیستم مس پورفیری سونگون و کیقال

Table 3. Geochemical zonality index of Sungun and Kighal PCDs

	Supraore	Upperore	Ore
Sungun PCD	102 (300-400 m)	100 (1.5 m)	0.15
Kighal PCD	814.6 (410 m)	60 (4.76 m)	0.5

کانی‌شناسی و کانه‌زایی

پیریت به دو صورت در کانسار پورفیری معدن سونگون و اندیس کیقال دیده می‌شود؛ در رگه‌چه‌ها و متن سنگ. پیریت موجود در متن سنگ و در بین رخ‌های بیوتیت (شکل ۴–A و B) در اثر دگرسانی ناقص و کلریتی‌شدن بیوتیت (Li et al., 1998) تشکیل شده‌اند. کانی‌های سولفیدی دیگر هر دو کانی‌سازی مانند کالکوپیریت، برنیت، کالکوسیت اغلب در رگه‌چه‌های کوارتز دیده می‌شوند. این سولفیدها در موقعیت‌های مختلف مرکز یا حاشیه رگه‌چه‌ها (شکل ۷–A و B) تشکیل شده‌اند که این را می‌توان به تغییر شرایط زمین‌ساختی و فشار در حین تشکیل کانسار مرتبط دانست (Penniston-Dorland, 2001).

معدن سونگون

دو کانی فرعی معمول معادن مس پورفیری که در معدن مس سونگون به فراوانی دیده می‌شوند، روتیل (شکل ۴–A) و آپاتیت (شکل ۴–C) است. روتیل فاز اصلی تیتانیم‌دار توده‌های نفوذی مس است که می‌تواند در اثر تخریب کانی‌هایی مانند بیوتیت و اسفن تشکیل شود. این کانی در آغاز مرحله دوتریک شروع به تبلور می‌کند و تبلورش تا مراحل گرمابی و متاسوماتیسمی ادامه دارد (Williams and Cesbron, 1977). کانی‌های با منشأ دوتریک، نتیجه تبلور سیالات ماگمایی باقی‌مانده هستند. این کانی‌ها می‌توانند در حفره‌ها تشکیل شوند (Putnis, 2002). بلورهای روتیل در ذخایر مس پورفیری نسبت کریستالوگرافی c/a پایینی دارند و به‌علت میزان مس حدود ۶۰۰ppm قرمزرنگ هستند (Petruk, 2000). آپاتیت کانی فرعی معمول دیگر معدن سونگون است (شکل ۴–C) که در مراحل ابتدایی سامانه گرمابی شروع به مهاجرت می‌کند و در رگه‌های تأخیری دیده نمی‌شود؛ اما در طول مرحله دوتریکی توده پورفیری شروع به تحرک می‌کنند و مهاجرتشان می‌تواند در رگه‌ها و سنگ دیواره دیده شود. چنان‌که در شکل ۴–C دیده می‌شود، کانی آپاتیت در ذخایر مس پورفیری به شکل لکه لکه هستند (Petruk, 2000).

زون‌های دگرسانی پتاسیک، فیلیک، پروپلیتیک (شکل ۴–D) و آرژیلیک در توده پورفیری سونگون تشخیص‌داده شد (شکل ۵). زون پتاسیک با کانی فلدسپار پتاسیم تشخیص‌داده می‌شود. زون انتقالی در بخش خارجی این زون با بیوتیت کمتر و سریسیتی‌شدن بیشتر شناخته می‌شود (Asghari et al., 2009). دگرسانی فیلیک تقریباً با جایگزینی تمام سیلیکات‌های پیشین زون‌های پتاسیک تشخیص‌داده می‌شود.

بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی پنج نوع رگه‌چه (جدول ۴) در معدن مس پورفیری سونگون شناخته شد که شامل:

A) کوارتز + پیریت + کالکوپیریت + هماتیت ± برنیت ± کالکوسیت ± کوولیت ± هماتیت (شکل ۴–F)

B1) کوارتز + پیریت + کالکوپیریت ± کالکوسیت ± کوولیت (شکل ۴–G)

B2) کوارتز + مولیبدنیت (شکل ۴–E)

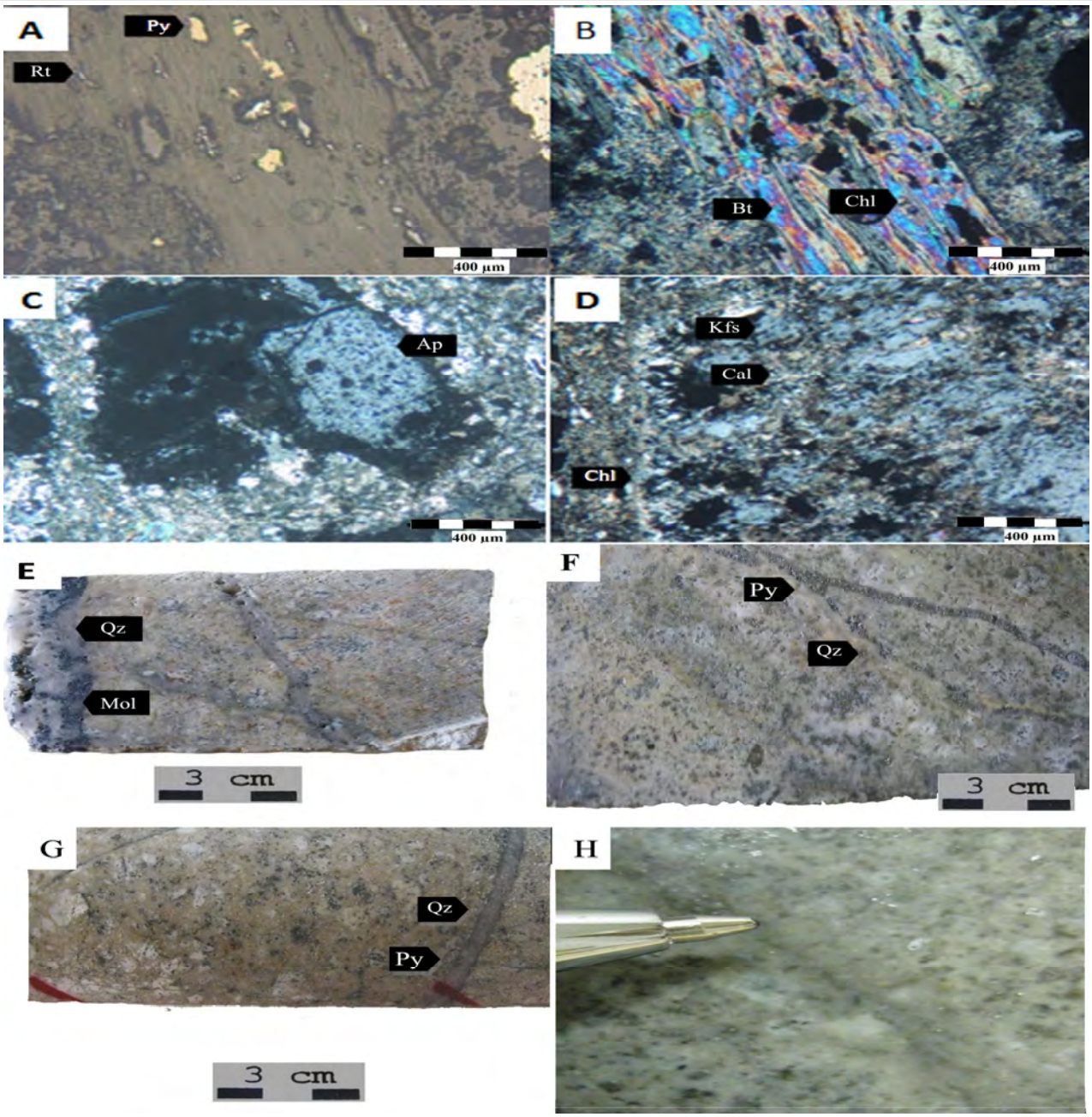
C) کوارتز + پیریت + کالکوپیریت ± کالکوسیت ± کوولیت (شکل ۴–H)

D) کوارتز + پیریت

جدول ۴. انواع رگه‌های دارای کوارتز در معدن سونگون

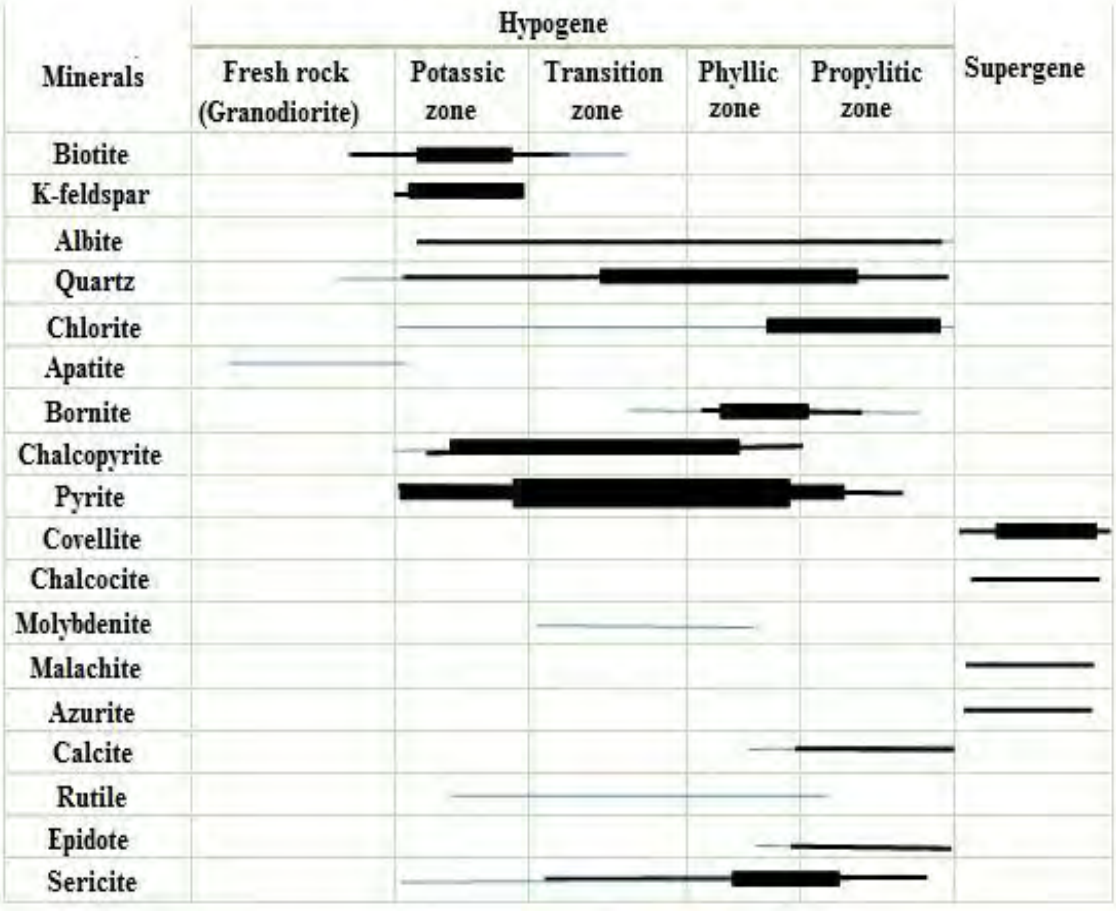
Table 4. Five types of veins and veinlets in the Sungun PCD

Veinlet type		Minerals	Dominant alteration
A		Quartz + pyrite + chalcopyrite ± bornit ± chalcocite ± covelite ± hematite	Potassic
B	B1	Quartz + pyrite + chalcopyrite± chalcocite ± covelite	Potassic
	B2	Quartz + molybdenite	Transition
C		Quartz + pyrite + chalcopyrite ± chalcocite ± covelite	Phyllic
D		Quartz + pyrite	Propylitic



شکل ۴. A و B: تشکیل پیریت و روتیل در رخ‌های بیوتیت در اثر کلریتی‌شدن بیوتیت، C: آپاتیت در گرانودیوریت معدن سونگون، D: کلریتی و کلسیتی‌شدن فلدسپار پتاسیم در زون پروپلیتیک، E: رگه کوارتز- مولیبدنیت (نوع B2)، F: رگه نوع کوارتز- پیریت (نوع A) در زون پتاسیک، G: رگه کوارتز سولفیدی در زون پتاسیک (B1) و H: زون فیلیک (C) با هاله کوارتز- سریسیتی معدن سونگون. Py: پیریت، Ru: روتیل، Chl: کلریت، Bio: بیوتیت، Ap: آپاتیت، Cal: کلسیت، Kfs: فلدسپار پتاسیم، Qz: کوارتز، Mol: مولیبدنیت. علایم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 4. A and B: Photomicrograph of pyrite and rutile formation in biotite cleavages due to incomplete chloritization of biotite, C: Photomicrograph of apatite in Sungun granodiorite, D: Photomicrograph of chloritization and calcitization of K-feldspar in propylitic zone, E: molybdenite and quartz vein (type B2), F: Quartz- pyrite veinlet (type A), potassic zone. G: quartz and sulfide in B1 veinlet, potassic zone, and H: quartz-sericite halo around sulfide veinlet in phyllic zone (type C), Sungun PCD. Py: Pyrite, Ru: rutile, Chl: chlorite, Bio: biotite, Ap: apatite, Cal: calcite, Kfs: K-feldspar, Qz: quartz, Mol: molybdenite. Abbreviations from Whitney and Evans (2010)



شکل ۵. توالی هم‌یافتی کانه‌زایی پراکنده و رگه‌ای معدن سونگون

Fig. 5. Paragenetic sequence of vein and disseminated mineralization at the Sungun PCD

حضور رگه بدون سولفیدهای دارای مولیبدنیت (B2) بیانگر نهشته‌شدن مولیبدنیت در دمای حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و در زون انتقالی نشان‌دهنده حضور جوشش و شسته‌شدن سولفیدهای قبلی توسط سیال در حال جوشش است (Asghari et al., 2009).

اندیس کیقال

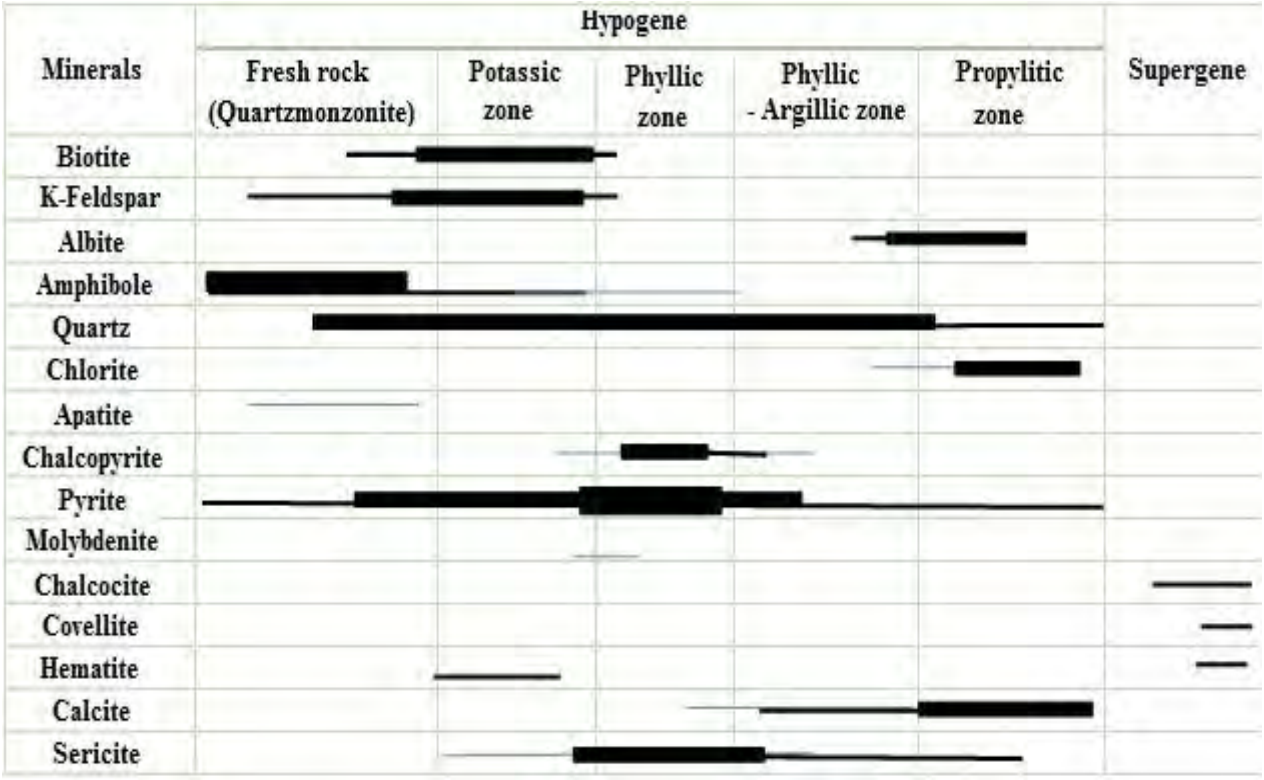
اندیس کیقال چهار زون دگرسانی پتاسیک، فیلیک، پروپلیتیک و آرژیلیک را شامل می‌شود (شکل ۶). دگرسانی پتاسیک توسط فلدسپار پتاسیم و بیوتیت، دگرسانی فیلیک توسط سریسیتی‌شدن (شکل ۷–D) و دگرسانی پروپلیتیک با کلریتی و کلسیتی‌شدن تعیین می‌شود. کانی‌های فرعی دگرسانی پروپلیتیک عبارتند از آلبیت، سریسیت و پیریت. همچنین زون سوپرژن جوان و توسعه‌نیافته اندیس کیقال با کم‌بودن کالکوسیت (شکل۷–C) و جانشینی کوولیت در حاشیه کالکوپیریت تشخیص‌داده می شود (Simmonds, 2013).

تنوع رگه‌چه‌ها و سولفیدها در اندیس کیقال کمتر است و در کل سه نوع رگه‌چه کوارتزدار در سیستم مس پورفیری کیقال (جدول ۵) تشخیص‌داده شد که شامل:

A) کوارتز + پیریت ± کالکوپیریت ± برنیت ± کالکوسیت ± کوولیت ± هماتیت (شکل ۷- A، B و E)

B) کوارتز + پیریت ± کالکوپیریت ± کالکوسیت ± کوولیت ± هماتیت (شکل ۷ –F)

C) کوارتز + پیریت ± کالکوپیریت ± کالکوسیت ± کوولیت



شکل ۶. توالی هم‌یافتی کانه‌زایی پراکنده و رگه‌ای سیستم مس پورفیری کیقال

Fig. 6. Paragenetic sequence of vein and disseminated mineralization at the Kighal PCD

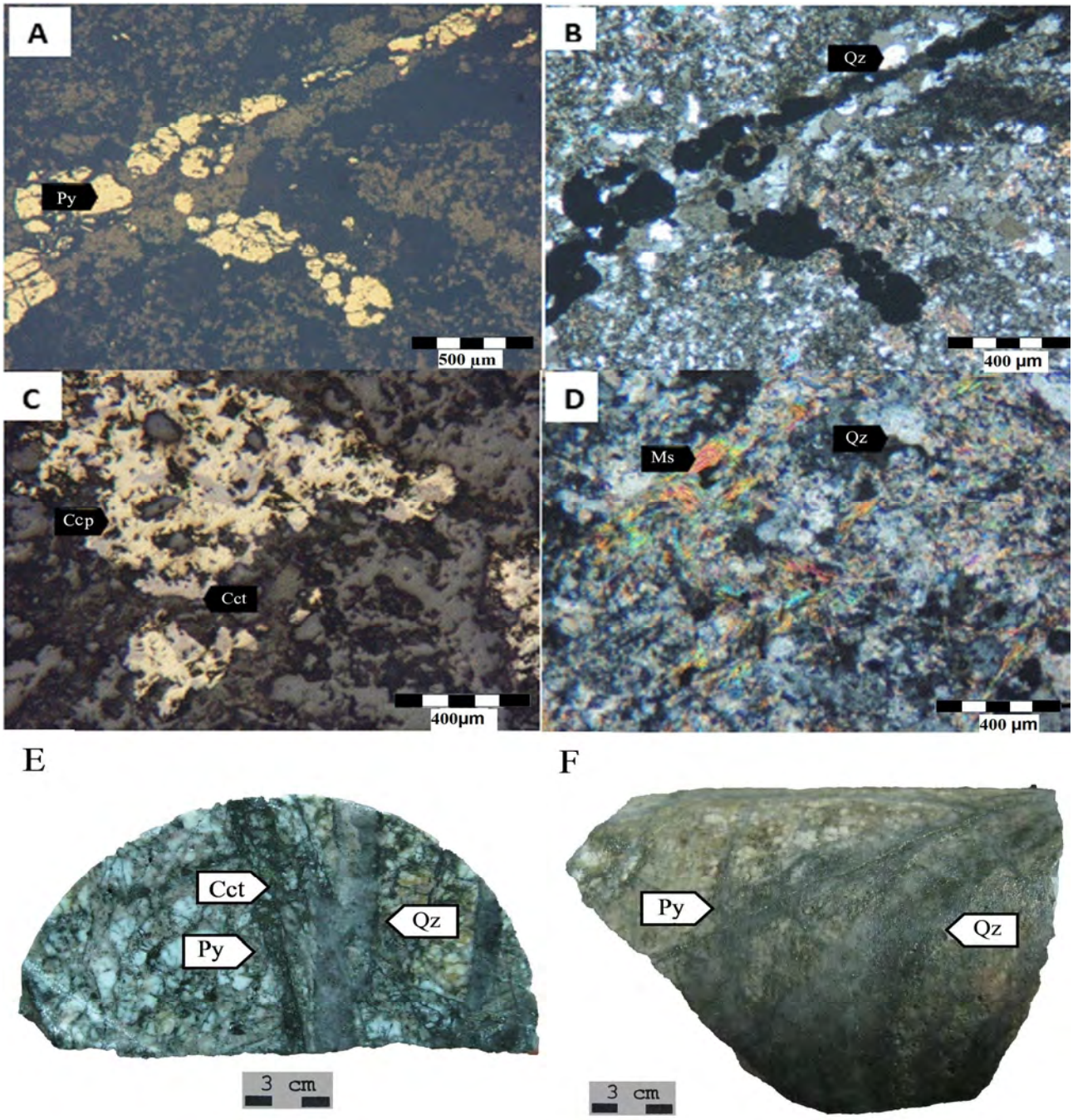
جدول ۵. انواع رگه‌های دارای کوارتز سیستم مس پورفیری کیقال و کانی‌شناسی آنها

Table 5. Vein and veinlet types and their associated mineralogy at the Kighal PCD

Veinlet type	Minerals	Dominant alteration
A	Quartz + Pyrite + Chalcopyrite ± Bornit ± Chalcocite ± Covelite ± Hematite	Potassic
B	Quartz + Pyrite + Chalcopyrite ±± Chalcocite ± Covelite ± Hematite	Phyllic
C	Quartz + Pyrite ± Chalcopyrite	Propylitic

مطالعات سیالات درگیر

تعداد ۱۱ مقطع دوبرصیقل از نمونه‌های مغزه سیستم‌های مس پورفیری سونگون و کیقال (به‌ترتیب ۷ و ۴ نمونه از مغزه) در دانشگاه خوارزمی تهیه شد. میان‌بارهای سیال در ۲۰۵ نقطه کانی کوارتز رگه‌چه‌های کوارتزی (اغلب نوع A و B) بررسی‌شده، مطالعه شد. اندازه‌گیری مؤلفه‌های دمایی سیالات اولیه کوارتزهای موجود در رگه‌چه‌های این معادن در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران به کمک Stage: THMS600 گرم‌کننده و منجمدکننده با مدل Linkam که بر روی میکروسکوپ ZEISS نصب است، انجام شد. بررسی سیالات درگیر با محدودیت دمایی ۱۹۶- تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و دقت ۰/۶ °C± در ۴۱۴ °C (دمای ذوب نیترات سزیم) و ۲ °C± در ۹۴/۳ °C (دمای ذوب n- هگزان) انجام شد.



شکل ۷. A و B: وجود پیریت در رگه کوارتزی (نوع A)، C: کالکوسیت و کالکوپیریت در رگه‌چه‌های کوارتزی (رگه B)، D: دگرسانی سریسیتی و تشکیل مسکویت در دگرسانی فیلیک، E: نمونه دستی از رگه‌چه نوع A دارای کوارتز، پیریت و کالکوسیت و کوارتز و F: رگه‌چه نوع B دارای پیریت و کوارتز، اندیس کیقال. (Py: پیریت، Cct: کالکوسیت،:Ccp: کالکوپیریت، Ms: مسکویت، Qz: کوارتز). مخفف کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 7. A and B: Photomicrographs of pyrite in quartz veinlet (type A), C: Photomicrographs of chalcocite and chalcopyrite in quartz veinlets (type B), D: Photomicrographs of sericitization and muscovite formation in phyllic alteration, E: Hand specimen photograph of quartz, pyrite, and chalcocite veinlet (type A), and F: Photograph of handsample of type B veinlet containing pyrite and quartz, Kighal PCD. Py: pyrite, Cct: chalcocite, Ccp: chalcopyrite, Ms: muscovite, Qz: quartz). Abbreviations from Whitney and Evans (Whitney and Evans 2010).

معدن سونگون

بعد از بررسی ۱۱۷ سیال درگیر معدن سونگون، اندازه سیالات درگیر ۵ تا ۱۸ میکرومتر به‌دست آمد (شکل ۹–A). از نظر ریخت‌شناسی انواع سیالات درگیر معدن سونگون و اندیس کیقال مشابه و عبارتند از:

۱) نوع دو فازی مایع- گاز (L-V) (شکل ۸–A)

۲) نوع دو فازی گاز- مایع (V-L) (شکل ۸–D)

۳) نوع سه فازی مایع- گاز- جامد (گاهی هماتیت) (L-V-S) (شکل ۸– B)

۴) نوع سه فازی مایع- گاز - نمک (L-V-H)

۵) نوع چهار فازی مایع- گاز- نمک- جامد (L-V-H-S) (شکل ۸ –B، C و D)

دامنه تغییرات ذوب یخ صفر تا ۶- مشاهده شد. دمای اولین نقطه ذوب یخ (T_e) ۲۰- تا ۴۱- است. نمودار دمای همگن محدوده ۱۵۰ تا بیش از ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد را با بیشترین فراوانی ۲۵۰ تا ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد دربرمی‌گیرد (شکل ۹–B). دمای حاضر می‌تواند بیانگر کمترین دمای تشکیل کانی‌ها باشد؛ زیرا هیچ تصحیح فشاری روی آنها انجام‌نشده است. کمترین میزان شوری بالاتر از ۰/۲ درصد وزنی دیده شد. بیشترین میزان شوری در سیال نوع چهار دیده شد و سیالات نوع هالیت‌دار (نوع چهار و پنج) بیشترین میزان شوری را نشان دادند (شکل ۹–C). دمای ذوب یخ و نمک در معدن سونگون (شکل ۹–D و E) و اندیس کیقال (شکل ۱۰–D و E) تقریباً مشابه هستند؛ اما تعداد سیالات نوع LVHS که Tm بیشتر از Th دارند (LVHS1) در اندیس کیقال (شکل ۱۱–B) بیشتر از سونگون (شکل ۱۱–A) است. این ممکن است ناشی از عمق و در نتیجه فشار بیشتر کانه‌زایی اندیس کیقال نسبت به سونگون باشد (Rusk et al., 2008).

در چند نمونه معدن سونگون هیدروهالیت دیده شد. در یک مورد اولین نقطه ذوب یخ معادل ۴۵- درجه، دمای ذوب هیدروهالیت ۲۶- درجه و دمای آخرین نقطه ذوب یخ ۱۱- درجه سانتی‌گراد بود. بر این اساس wt.% NaCl برابر ۷/۵۳ درصد وزنی نمک طعام و wt.% $CaCl_2$ برابر ۷/۴ درصد وزنی $CaCl_2$ و مجموع $NaCl+CaCl_2$ برابر ۱۴/۹۳درصد وزنی $NaCl+CaCl_2$ است. در مورد دیگر میان‌بار CO_2 در سامانه H_2O-CO_2 دیده شد که فقط دمای $TmCO_2$ ثبت شد و دمای $ThCO_2$ به‌علت نشت میان‌بار قابل مشاهده نبود و اندازه‌گیری نشد.

دمای $TmCO_2$ در این میان‌بار ۵۸/۴- درجه سانتی‌گراد بود. در نمونه دیگر نیز در دو مورد فاز CO_2 در سامانه H_2O-CO_2 مشاهده شد (VCO_2 در حدود ۸۵ درصد حجم میان‌بار را اشغال کرده است) که فقط دمای $TmCO_2$ ثبت شد و دمای $ThCO_2$ به‌دلیل نشت میان‌بار قابل مشاهده نبود و اندازه گیری نشد. دمای $TmCO_2$ در این دو میان‌بار ۵۸/۶- و ۵۸/۵- درجه سانتی‌گراد بود.

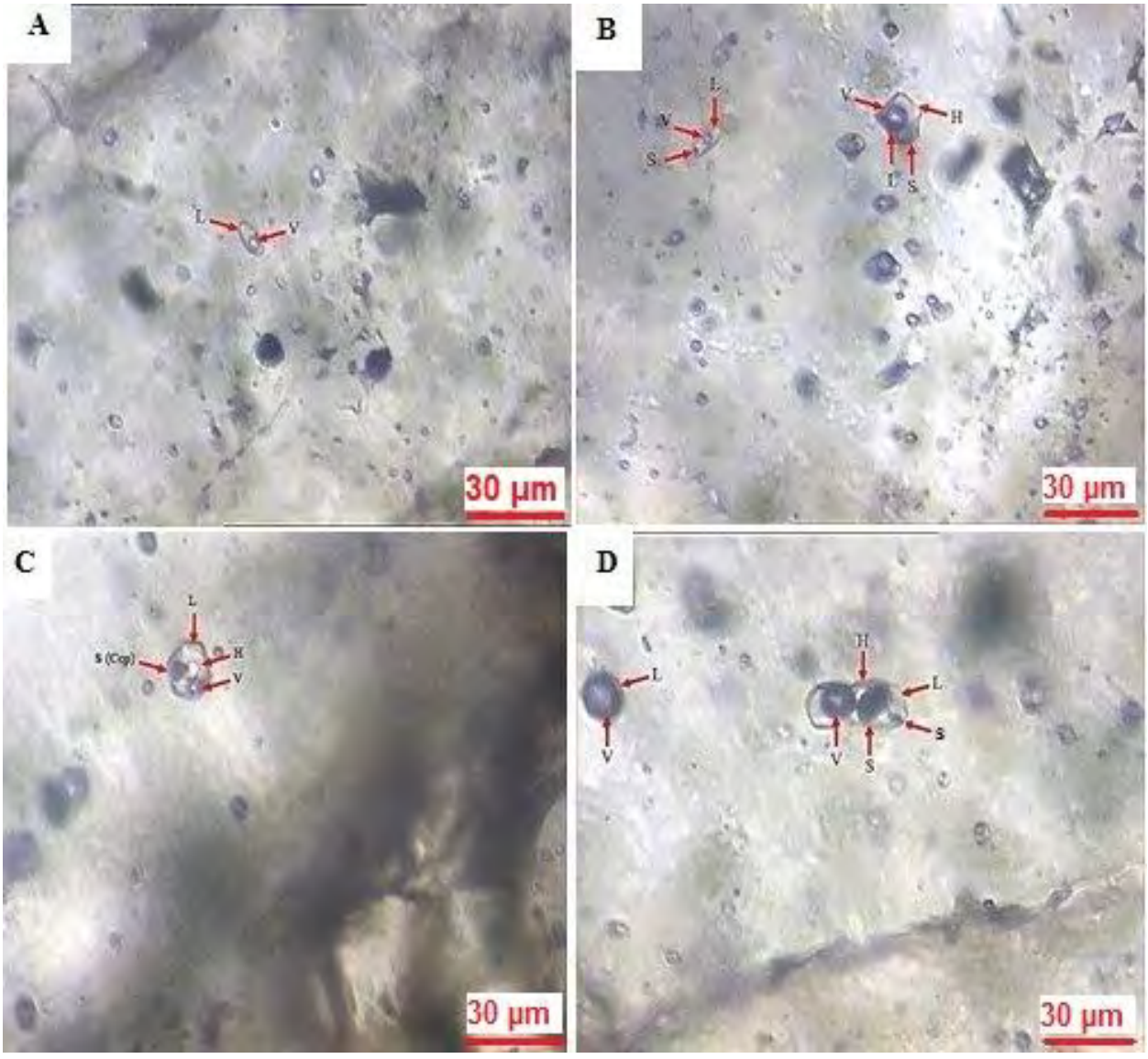
اندیس کیقال

بررسی ۸۸ نقطه از ۵ نمونه مقطع دوبرصیقل اندیس کیقال، اندازه سیالات درگیر این معدن را ۵ تا ۲۰ میکرومتر (شکل ۱۰–A) نشان داد. انواع سیالات درگیر این معدن مشابه انواع سیالات درگیر سونگون است. دمای اولین نقطه ذوب یخ (T_e) ۲۱- تا ۳۰- است. دامنه تغییرات ذوب یخ ۰/۳- تا ۹- درجه سانتی‌گراد دیده شد (شکل ۱۰–E). نمودار دمای همگن محدوده ۱۴۵ تا بیش از ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد با بیشترین فراوانی ۲۰۰ تا ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد را در برمی‌گیرد (شکل ۱۰–B).

دمای حاضر می‌تواند بیانگر کمترین دمای تشکیل کانی‌ها باشد؛ زیرا هیچ تصحیح فشاری روی آنها انجام‌نشده است. بیشترین میزان شوری بالاتر از ۶۵ درصد وزنی در سیال نوع چهار دیده شد و سیالات نوع هالیت‌دار (نوع سه و چهار) بیشترین میزان شوری را نشان دادند (شکل ۱۰–C). کمترین میزان شوری ۰/۲ درصد وزنی است.

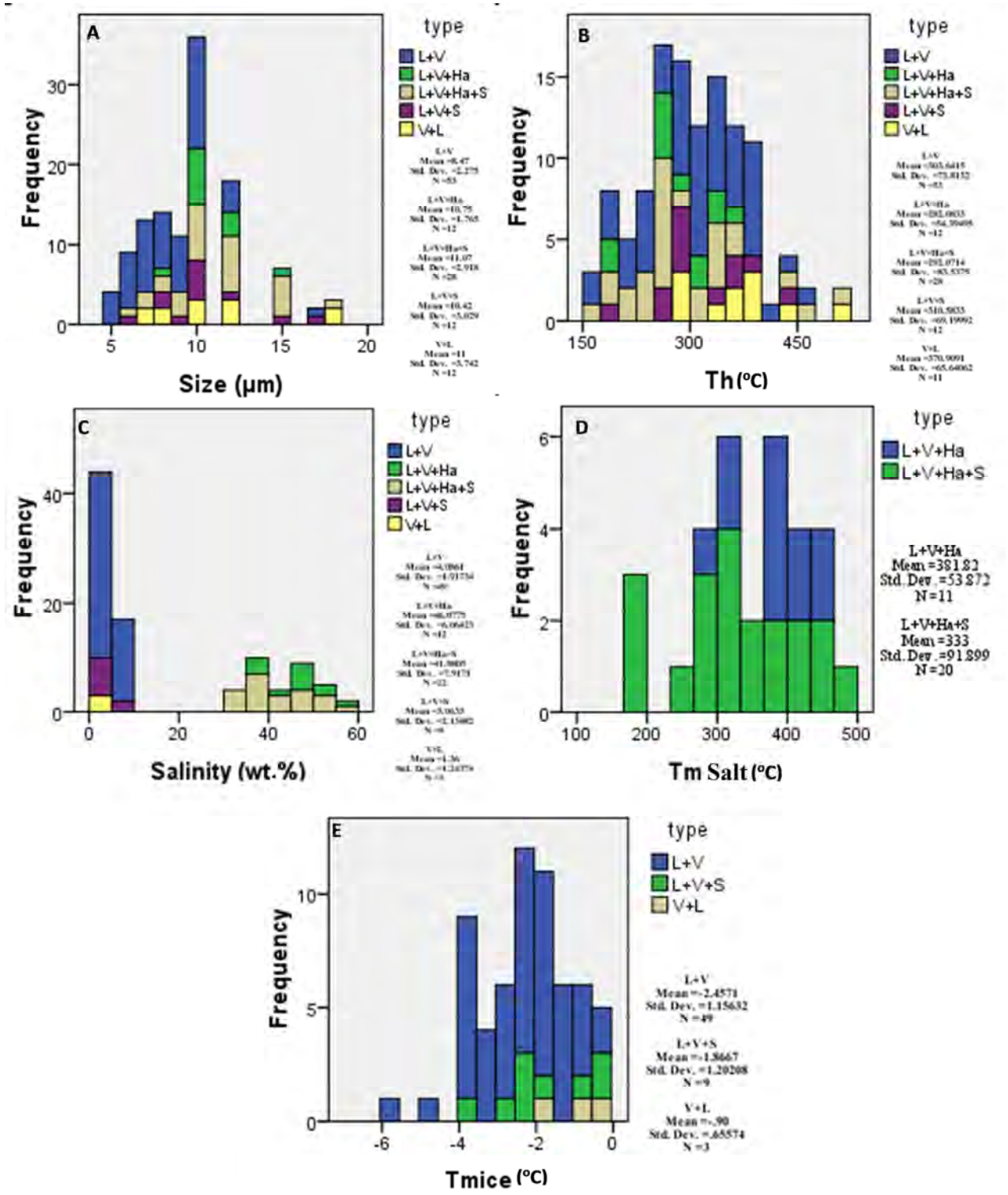
ردر و ریبی (Roedder and Ribbe, 1984) میادین سامانه‌های مزوترمال را با استفاده از داده‌های بسیاری تهیه کردند. مقایسه نمودارهای شوری در برابر دمای همگن‌سازی در دو سیستم مس پورفیری سونگون و کیقال (شکل ۱۱–A و B)

الگوی تقریباً مشابهی نشان می‌دهد. در هر دو نمودار تنوع شوری در بازه معینی از دمای همگن‌سازی دیده می‌شود؛ اما در نمودار معدن سونگون سیالات بیشتری در محدوده اسکارن واقع شده‌اند. رده‌های اصلی کانسارها بخشی از فضای Th- شوری را اشغال می‌کند که بیانگر مشخصات سیالات تشکیل‌دهنده آنهاست و اغلب در محدوده منحنی غنی‌شدگی هالیت و منحنی بحرانی محلول‌های NaCl جای می‌گیرند (Wilkinson, 2001).



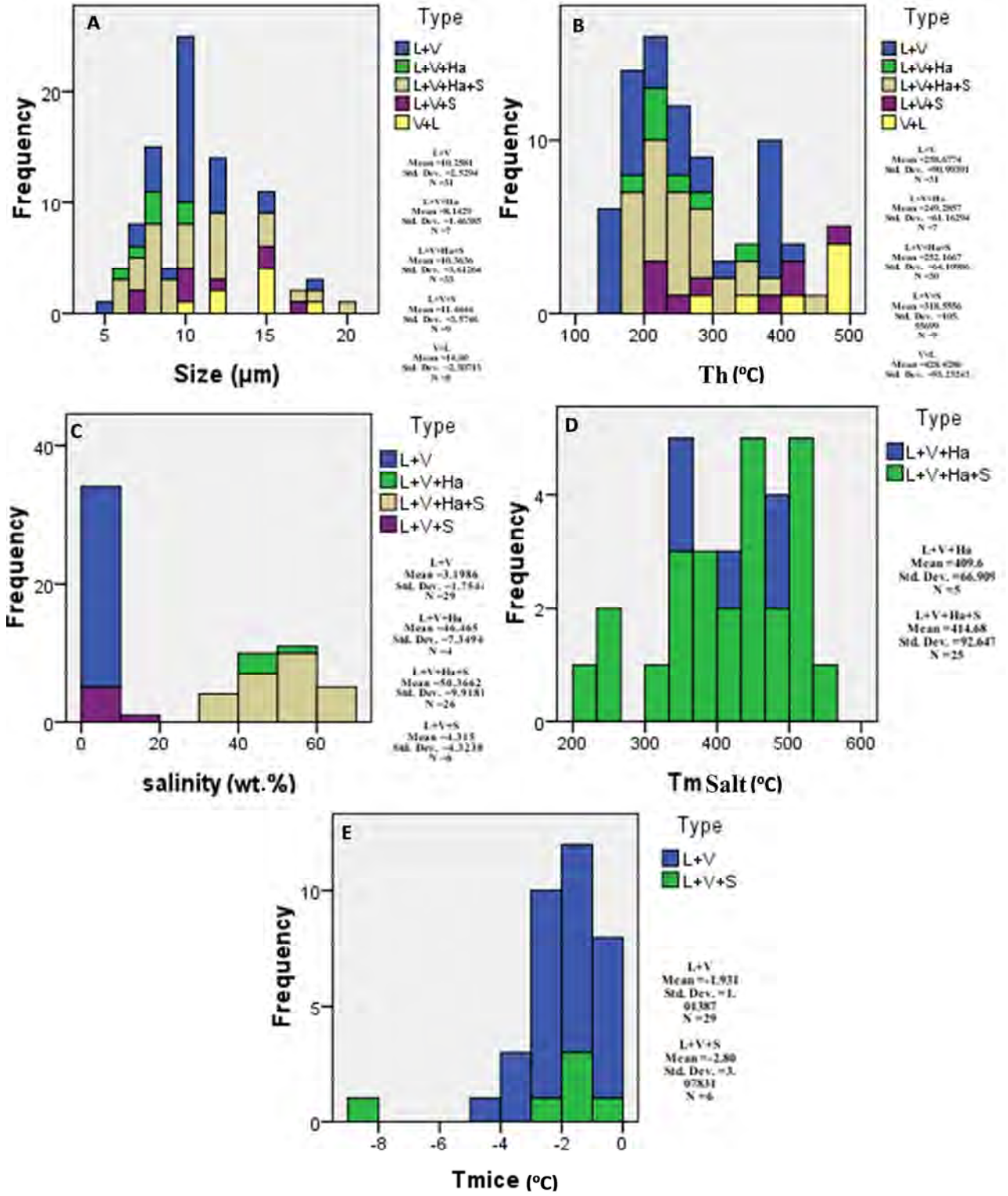
شکل ۸. تصاویر نور عبوری سیالات مختلف سیستم‌های مس پورفیری (A و B) و کیقال (C و D). A و B: بعضی از انواع سیالات معدن سونگون انواع LV (A) و LVS و LVHS (B)، C و D: دو سیال درگیر از نوع LVHS اندیس کیقال، بخار (V)، مایع (L)، هالیت (H)، جامد (S). کالکوپیریت (Ccp)

Fig. 8. Transmitted light photomicrographs of different fluid inclusions of the Sungun (A and B) and Kighal (C and D) PCDs, A and B: Some types of fluid inclusions in the Sungun PCD including LV, LVS, VL, and LVHS, C and D: Two LVHS types of fluid inclusion in the Kighal PCD. Vapor (V), liquid (L), halite (H), Solid (S), and chalcopyrite (Ccp).



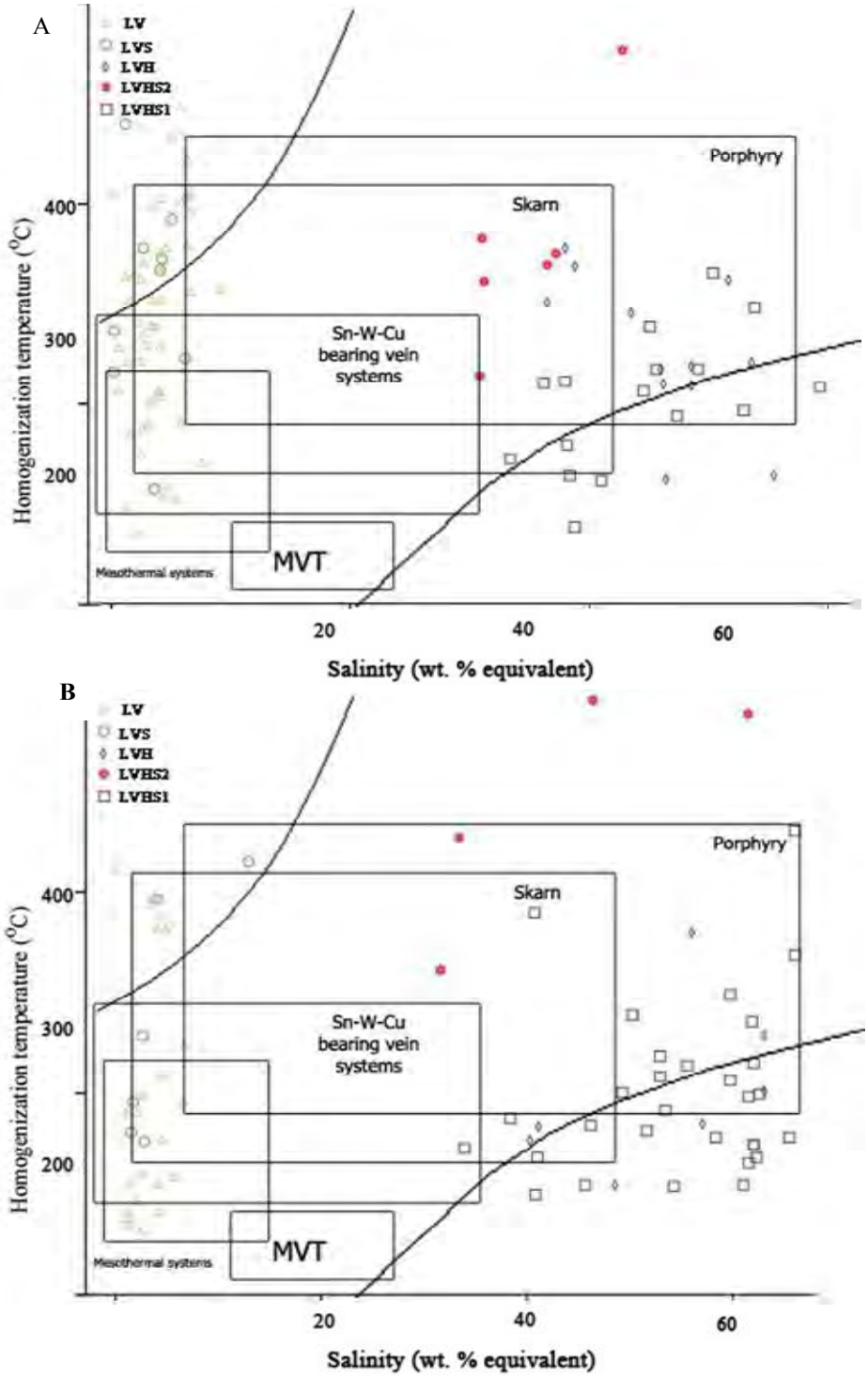
شکل ۹. نمودار فراوانی مؤلفه‌های ریزدماسنجی سیالات درگیر موجود در رگه‌های کوارتزی معدن سونگون. هیستوگرام A: اندازه، B: دمای همگن‌سازی، C: شوری، D: دمای ذوب نمک و E: دمای ذوب یخ

Fig. 9. Histogram of size, salinity, homogenization temperature, initial and final melting for quartz veinlets of the Sungun PCD. Histograms of A: size, B: homogenization temperature, C: salinity, D: salt melting temperature, and E: ice melting temperature



شکل ۱۰. نمودار فراوانی مؤلفه‌های ریزدماسنجی سیالات درگیر موجود در رگه‌های کوارتزی سیستم مس پورفیری کیقال. هیستوگرام A: اندازه، B: دمای همگن‌سازی، C: شوری، D: دمای ذوب نمک و E: دمای ذوب یخ

Fig. 9. Histogram of size, salinity, homogenization temperature, initial and final melting for quartz veinlets of the Sungun PCD. Histograms of A: size, B: homogenization temperature, C: salinity, D: salt melting temperature, and E: ice melting temperatur



شکل ۱۱. نمودار شوری در برابر دمای همگن‌سازی سیستم‌های مس پورفیری A: سونگون و B: کیقال. تعدادی از سیالات درگیر سونگون در محدوده اسکارن پلات شده است. میادین سامانه‌های مزوترمال با داده‌های ردر و ریبی (Roedder and Ribbe, 1984) و گراپنر و همکاران (Graupner et al., 2001) به‌دست آمده است.

Fig. 11. Salinity versus homogenization temperature diagram displays similarity of the A: Sungun, and B: Kighal PCDs. Some fluid inclusions of the Sungun PCD lie in the skarn field. Mesothermal fields were obtained by Roedder and Ribbe (1984) and Graupner et al. (2001).

بحث و بررسی

بررسی‌های قبلی نشان داد که شباهت های بسیاری در سیستم‌های مس پورفیری سونگون و کیقال از لحاظ سنگ میزبان[1] و توده مادر[2] (Hassanpour et al., 2014) وجود دارد. همچنین تفاوت بسیار کمی در سیالات درگیر هر دو معدن دیده می‌شود. وجود کانی نوزاد کالکوپیریت در سیال درگیر اندیس کیقال دیده شد (شکل ۸–C) که نشان‌دهنده وجود سیالات حامل مس است (Barnes, 1997). همچنین حضور هم‌زمان سیال دوفازی غنی از بخار، سیال دوفازی غنی از مایع با شوری متوسط و سیال چندفازی هالیت‌دار با شوری بالا با دمای همگن‌سازی مشابه (شکل ۱۰–B) در هر دو ذخیره نشان‌دهنده فرایند جوشش است (Calagari, 2004; Simmonds, 2013). در هر دو معدن سیالات غنی از فاز بخار حاوی کانی‌های نوزاد اوپک دیده نشد که بیانگر آن است که به‌طور مستقیم از مذاب در حال تبلور تشکیل نشده‌اند (Wilkinson, 2001).

ناچیز بودن سیالات CO_2دار در نمونه‌های اندیس کیقال نشان‌دهنده رخداد نامیژاکی سیال در عمق کم است. در این شرایط میزان CO_2 ماگما در جایگاه عمیق‌تر بالاست و انحلال‌پذیری آن در ماگمای فلسیک با کاهش دما و یا فشار کاهش می‌یابد. بنابراین ماگمای در حال نفوذ در ابتدا و در عمق بیشتر غنی از CO_2 با شوری پایین بوده و پس از آن سیال با شوری بالا در عمق نسبتاً کم ایجاد می‌شود (Rusk et al., 2008).

الگوی تقریباً مشابهی در نمودار شوری– دمای همگن‌سازی هر دو معدن دیده شد. ویلکینسون (Wilkinson, 2001) این الگو را به جوشش سیالات و همچنین به نوسانات فشار در اثر تکرار رخداد شکستگی‌های هیدرولیکی نسبت‌داده است. نقاط با شوری بیش از ۲۰ درصد وزنی معادل نمک طعام سیالات نوع چهار و پنج (شکل ۹ –C و ۱۰–C) را در هر دو معدن دربرمی‌گیرد و بیشتر در محدوده پورفیری قرار می‌گیرند. انواع دیگر در محدوده کمتر از شوری ۲۰ درصد وزنی معادل نمک طعام قرار می‌گیرند و آنها را می‌توان محصول فرایند سرمایش و کاهش چگالی به‌شمار آورد. به‌عبارتی دیگر بخار دما بالا با شوری پایین ممکن است کم کم از شورابه جدا و به سیالات غنی از بخار یا مایع تکامل یابد (Heinrich et al., 1999; Heinrich, 2005). بعد از جدایش ابتدایی از ماگما، بخار دما بالا و شوری پایین به سیالات غنی از بخار دما پایین و سیالات آبگین غنی از مایع با شوری پایین تکامل می‌یابد؛ در حالی‌که سیالات دما بالا و شوری بالا (شورابه) به‌وسیله جوشش و سردشدن به سیالات چندفازی هالیت‌دار تکامل می‌یابند (Zhang et al., 2014). همچنین به‌علت اسکارن- پورفیری بودن معدن سونگون در شکل ۱۱–A سیالات بیشتری در محدوده اسکارن قرار می‌گیرند.

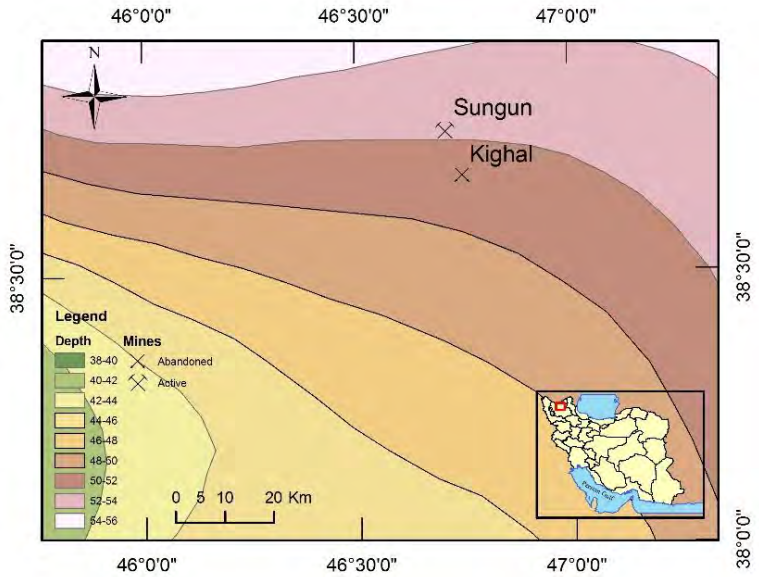
بررسی‌های کانی‌شناسی هر دو کانی‌سازی تفاوت‌هایی را از لحاظ تنوع و گستردگی کمتر سولفیدها و رگه‌چه‌ها در اندیس کیقال آشکار می‌کند. با توجه به اینکه همبستگی ویژه قوی بین شدت رگه‌چه کوارتز و میزان فلز در بیشتر ذخایر مس پورفیری وجود دارد (Sillitoe, 2000)، تنوع و گستردگی بیشتر رگه‌چه‌ها در معدن سونگون، نشان‌دهنده فلززایی بیشتر آن است. حسن‌پور (Hassanpour, 2010) نیمه‌بارور بودن سامانه پورفیری کیقال را به تشکیل آن در موقعیت ابتدای فرورانش و کم‌بودن ضخامت توده مافیک آمفیبولیتی در بخش زیرین پوسته پایینی و در نتیجه غنی‌نشدن آن و همچنین رخداد فرسایش نسبت‌داده است. اگرچه سن کانه‌زایی مشابه هر دو معدن این فرضیه را ضعیف می‌کند. سیمونز و همکاران (Simmonds et al., 2013) بعد از تشخیص اختلاف فشار به فرایند بالاآمدگی و فرسایش اشاره کرده‌اند.

با توجه به اینکه ضخامت پوسته یکی از عوامل مؤثر در تشکیل ذخایر پورفیری است (Groves and Bierlein, 2007)، بررسی عمق موهوروویچ یکی دیگر از راه‌های بررسی بارور یا نابارور بودن یک معدن پورفیری است. این مطالعه در کمربند مس کرمان اثبات و دلیلی بر بارور بودن توده‌های پورفیری در

1. host rocks
2. Parent intrusion

آن منطقه عنوان شده است (Shafiei et al., 2009; Shafiei, 2010; Asadi et al., 2013, 2014; Richards, 2015).

بر اساس ریچاردز (Richards, 2015)، بعد از برخورد زون سنندج– سیرجان با اوراسیا در اواخر مزوزوئیک، خزر جنوبی با پوسته اقیانوسی تشکیل‌شده است. برخورد صفحه عربستان به ایران و بسته‌شدن نئوتتیس احتمالاً در ائوسن شروع‌شده و در اولیگوسن یا اوایل میوسن پایان‌یافته است. بعد از بسته‌شدن نئوتتیس، حرکت صفحه عربستان به‌سمت شمال‌شرق ادامه داشته و موجب تغییر ضخامت پوسته شده است. این تغییر ضخامت به‌خصوص در شمال‌غرب ایران که پوسته قاره‌ای با پوسته اقیانوسی خزر جنوبی برخورد کرده است دیده می‌شود. تقی‌زاده فرهمند و همکاران (Taghizadeh-Farahmand et al., 2010) با استفاده از داده‌های لرزه‌شناختی و محاسبه نسبت سرعت امواج P و S به بررسی ساختار لیتوسفر پرداختند و عمق موهوروویچ را در شمال‌غرب کشور به‌دست آوردند. این نویسندگان ضخیم‌شدگی مشاهده‌شده به‌سمت شمال‌شرق را به برخورد صفحه ایران مرکزی با خزر جنوبی نسبت دادند. مقایسه عمق موهوروویچ در هر دو معدن با استفاده از نتایج ضخامت پوسته حاصل، نشان داد که ضخامت پوسته قاره‌ای در سونگون ۲ کیلومتر بیشتر از کیقال بوده است (شکل ۱۲). همچنین، جمالی و همکاران (Jamali et al., 2010) و جمالی و مهرابی (Jamali and Mehrabi, 2014) سیستم‌های مس پورفیری سونگون و کیقال را از ذخایر ناشی از لایه‌لایه شدن و پس از برخوردی (جدول ۱) تشکیل‌شده در زمان میوسن (۲۰ Ma) معرفی کردند. در نتیجه اختلاف ضخامت موجود در زمان تشکیل این ذخایر وجودداشته است و احتمالاً با ادامه حرکت به سمت شمال صفحه عربستان تشدیدیافته است. بنابراین، ضخامت بیشتر پوسته در محدوده معدن سونگون می‌تواند از عوامل دیگر بارور بودن معدن سونگون باشد؛ زیرا افزایش ضخامت پوسته پایینی باعث افزایش میزان آب، فلز، گوگرد در ماگمای آداکیتی می‌شود (Groves and Bierlein, 2007). به‌عبارتی دیگر، کانسار مس پورفیری سونگون شرایط بهتری از لحاظ تأمین فلزات مورد نیاز در تشکیل یک معدن مس پورفیری بارور داشته است، اگرچه عواملی مانند بالاآمدگی و فرسایش هم می‌توانند بر نابارووری سیستم مس پورفیری کیقال تأثیر گذاشته باشند.



شکل ۱۲. عمق موهوروویچ در شمال‌غرب ایران (Taghizadeh-Farahmand et al., 2010)، عمق حدود ۵۲ تا ۵۴ کیلومتر را برای معدن سونگون و عمق حدود ۵۰ تا ۵۲ کیلومتر را برای سیستم مس پورفیری کیقال نشان می‌دهد.

Fig. 12. Moho depth map of NW Iran (see Taghizadeh-Farahmand et al., 2010). Sungun PCD lies in the zone of 52- 54 km and Kighal PCD in the zone of 50- 52 km.

همچنین افت CO_2 طی فرایند جوشش به‌عنوان عاملی مؤثر در افزایش pH و ته‌نشینی سولفیدهای فلزی شناخته‌شده است (Kouzmanov and Pokrovski, 2012). این گاز فرار اثری مهم در سامانه‌های پورفیری دارد و باعث حذف فلزات از سیال گرمابی کانسنگ‌ساز می‌شود (Candela, 1997). حضور ناچیز CO_2 در رگه‌های کانسنگ‌ساز اندیس کیقال می‌تواند دلیلی مهم بر نیمه‌بارور بودن این اندیس باشد.

نتیجه‌گیری

مقایسه دو کانی‌سازی بارور و نیمه‌بارور مس پورفیری سونگون و کیقال به‌ترتیب نشان‌داد که هر دو معدن از لحاظ سنگ درون‌گیر و مادر، نوع سیالات درگیر و حتی میزان شوری و دمای همگن‌سازی شباهت نسبی دارند؛ اما تفاوت‌هایی از لحاظ وسعت دگرسانی، میزان CO_2 سیالات درگیر و ویژگی‌های کانی‌شناختی دارند. محققان دیگر، عواملی مانند بالاآمدگی و فرسایش را به‌عنوان دلایل نیمه‌بارور بودن اندیس کیقال بیان کرده‌اند؛ اما تفاوت‌هایی مانند ضخامت بیشتر پوسته در معدن سونگون و غلظت کمتر CO_2 در سیالات کانسنگ‌ساز اندیس کیقال نیز قابل توجه است. به‌بیان دیگر، در معدن سونگون در نتیجه عمق بیشتر موهوروویچ و ضخامت بیشتر پوسته، فلزات کانسنگ‌ساز برای کانه‌زایی یک معدن بارور حضور داشته‌اند. همچنین فرار CO_2 طی فرایند نامیژاکی سیال و افزایش میزان pH و شوری سیال کانسنگ‌ساز شرایط را برای تشکیل ذخیره‌ای اقتصادی در سونگون نسبت به کیقال افزایش‌داده است و در نهایت باعث کانه‌زایی سولفیدی با گسترش کانی‌های مس-مولیبدن‌دار در این منطقه شده است. در نتیجه در این مقاله دو عامل تأمین‌کننده فلزات کانه‌زا و عامل ته‌نشست سولفیدهای فلزی در کنار نقش فرسایش به‌عنوان موارد مؤثر در ناباروری اندیس کیقال نام‌برده شده است.

قدردانی

از همکاری و راهنمایی‌های مؤثر آقای مهندس گلچین و مهندس علیپور و مهندسان شرکت مهندسین مشاور زرناب اکتشاف سپاسگزاری می‌شود. همچنین از خانم مهندس آقاجانی کارشناس محترم شرکت ایمیدرو برای مساعدت‌های بی‌دریغشان تشکر و قدردانی می‌نماییم.

References

Asadi, S., Moore, F. and Zarasvandi, A., 2014. Discriminating productive and barren porphyry copper deposits in the southeastern part of the central Iranian volcano-plutonic belt, Kerman region, Iran: a review. Earth-Science Reviews, 138(1): 25–46.

Asadi, S., Moore, F., Zarasvandi, A. and Khosrojerdi, M., 2013. First report on the occurrence of CO_2-bearing fluid inclusions in the Meiduk porphyry copper deposit, Iran: implications for mineralisation processes in a continental collision setting. Geologos, 19(4): 301–320.

Asghari, O. and Hezarkhani, A., 2010. Investigations of alteration zones based on fluid inclusion microthermometry at Sungun porphyry copper deposit NW Iran. Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 140 (2):19–34.

Asghari, O., Hezarkhani, A. and Soltani, F., 2009. The comparison of alteration zones in the Sungun porphyry copper deposit, Iran (based on fluid inclusion studies). Acta Geologica Polonica, 59(1): 93–109.

Barnes, H.L., 1997. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. John Wiley and Sons, Canada, 975 pp.

Brown, P.E., 1989. FLINCOR; a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data. American Mineralogist, 74(11): 1390–1393.

Calagari, A.A., 2003. Stable isotope (S, O, H and C) studies of the phyllic and potassic–phyllic alteration zones of the porphyry copper deposit at Sungun, East Azarbaidjan, Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 21(7): 767–780.

Calagari, A.A., 2004. Fluid inclusion studies in

quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East-Azarbaidjan, Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 23(2): 179–189.

Candela, P.A., 1997. A review of shallow, ore-related granites: textures, volatiles, and ore metals. Journal of Petrology, 38(12): 1619–1633.

Dilek, Y., Imamverdiyev, N. and Altunkaynak, S., 2010. Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: Collision-induced mantle dynamics and its magmatic fingerprin. International Geology Review, 52(4-6):536–557.

Graupner, T., Kempe, U., Spooner, E.T., Bray, C.J., Kremenetsky, A.A. and Irmer, G., 2001. Microthermometric, laser Raman spectroscopic, and volatile-ion chromatographic analysis of hydrothermal fluids in the Paleozoic Muruntau Au-bearing quartz vein ore field, Uzbekistan. Economic Geology, 96(1): 1–23.

Groves, D.I. and Bierlein, F.P., 2007. Geodynamic settings of mineral deposit systems. Journal of the Geological Society, 164(1):19–30.

Hassanpour, S., 2010. Metallogeney and mineralization of Cu-Au in Arasbaran Zone, NW of Iran. Ph.D. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 320 pp.

Hassanpour, S., Alirezaei, S., Selby, D. and Sergeev, S., 2014. SHRIMP zircon U–Pb and biotite and hornblende Ar–Ar geochronology of Sungun, Haftcheshmeh, Kighal, and Niaz porphyry Cu–Mo systems: evidence for an early Miocene porphyry-style mineralization in northwest Iran. International Journal of Earth Sciences, 104(1): 1–15.

Heinrich, C., Günther, D., Audétat, A. and Ulrich, T., Frischknecht, R., 1999. Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by microanalysis of fluid inclusions. Geology, 27(8): 755–758.

Heinrich, C.A., 2005. The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: a thermodynamic study. Mineralium Deposita, 39(8): 864–889

Hezarkhani, A. and Williams-Jones, A.E., 1998. Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran; evidence from fluid inclusions and stable isotopes. Economic Geology, 93(5): 651–670.

Jamali, H., Dilek, Y., Daliran, F., Yaghubpur, A. and Mehrabi, B., 2010. Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar–Arasbaran volcanic belt, northern Iran. International Geology Review, 52(4–6): 608–630.

Jamali, H. and Mehrabi, B., 2014. Relationships between arc maturity and Cu-Mo-Au porphyry and related epithermal mineralization at the Cenozoic Arasbaran Magmatic Belt. Ore Geology Reviews, 65(2): 487–501.

John, D., Ayuso, R., Barton, M., Blakely, R., Bodnar, R., Dilles, J., Gray, F., Graybeal, F., Mars, J. and McPhee, D., 2010. Porphyry copper deposit model, chap. B of Mineral deposit models for resource assessment, US Geological Survey Scientific Investigations Report, 169 pp.

Kouzmanov and K., Pokrovski, G.S., 2012. Hydrothermal controls on metal distribution in porphyry Cu (-Mo-Au) system, In: J.W. Hedenquist, M. Harris and F. Camus (Editors), Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World. The Society of Economic Geologists, Geneva, Switzerland, pp. 573–618.

Li, G., Peacor, D.R. and Essene, E.J., 1998. The formation of sulfides during alteration of biotite to chlorite-corrensite. Clays and Clay Minerals, 46(6): 649–657

Maanijou, M. and Mostaghimi, M., 2013. The mass balance calculation of hydrothermal alteration in Sarcheshmeh porphyry copper deposit. Journal of Economic Geology, 5(2): 175–199.

Maanijou, M., Mostaghimi, M., Riseh, M.A. and Gerow, A.A.S., 2012. Systematic sulfur stable isotope and fluid inclusion studies on veinlet groups in the Sarcheshmeh porphyry copper deposit, based on new data. Journal of Economic Geology, 4(2): 217–239. (in Persian)

Mehrpartou, M., 1993. Contributions to the geology, geochemistry, ore genesis and fluid inclusion investigations on Sungun Cu-Mo porphyry deposit (North-West of Iran). Unpublished Ph.D. thesis, Hamburg University, Hamburg, Germany, 245 pp.

NICICO (National Iranian Copper Industries Company), 2006. Geological report and map on Kighal area in Scale 1: 5000. NICICO, Tehran, Report RC-02/5363301-P/OC/1385/00/0-1221, 350 pp.

Penniston-Dorland, S.C., 2001. Illumination of vein quartz textures in a porphyry copper ore deposit using scanned cathodoluminescence: Grasberg Igneous Complex, Irian Jaya, Indonesia. American Mineralogist, 86(5–6): 652–666.

Petruk, W., 2000. Applied mineralogy in the mining industry. Elsevier, Ontario, 268 pp.

Putnis, A., 2002. Mineral replacement reactions: from macroscopic observations to microscopic mechanisms. Mineralogical Magazine, 66(5): 689–708.

Richards, J.P., 2015, Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: From subduction to collision. Ore Geology Reviews, 70(30): 323–345

Roedder, E. and Ribbe, P., 1984. Fluid inclusions. Mineralogical Society of America, Washington, DC, 468 pp.

Rusk, B.G., Reed, M.H. and Dilles, J.H., 2008. Fluid inclusion evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, Montana. Economic Geology, 103(2): 307–334.

Sillitoe, R.H., 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. Economic geology, 67(2): 184–197.

Sillitoe, RH. 2000. Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), Reviews in Economic Geology. The Society of Economic Geologists, London, pp. 315–345.

Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. Economic Geology, 105(1): 3–41.

Simmonds, V., 2013. Geochemistry and petrogenesis of an adakitic quartz-monzonitic porphyry stock and related cross-cutting dike suites, Kighal, northwest Iran. International Geology Review, 55(9): 1126–1144.

Simmonds, V., Calagari, A.A. and Kyser, K., 2013. Fluid inclusion and stable isotope studies of the Kighal porphyry Cu–Mo prospect, East-Azarbaidjan, NW Iran. Arabian Journal of Geosciences, Fluid inclusion and stable isotope studies of the Kighal porphyry Cu–Mo prospect, East-Azarbaidjan, NW Iran. Arabian Journal of Geosciences, 8(1): 1–17.

Shafiei, B., 2010. Lead isotope signatures of the igneous rocks and porphyry copper deposits from the Kerman Cenozoic magmatic arc (SE Iran), and their magmatic-metallogenetic implications. Ore Geology Reviews, 38(1): 27–36.

Shafiei, B., Haschke, M. and Shahabpour, J., 2009. Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. Mineralium Deposita, 44(6): 265–283.

Taghizadeh-Farahmand, F., Sodoudi, F., Afsari, N. and Ghassemi, M.R., 2010. Lithospheric structure of NW Iran from P and S receiver functions. Journal of Seismology, 14(4): 823–836.

Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American mineralogist, 95(1): 185–187.

Wilkinson, J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. Lithos, 55(1): 229–272.

Williams, S.A. and Cesbron, F.P., 1977. Rutile and apatite: useful prospecting guides for porphyry copper deposits. Mineralogical Magazine, 41(318): 288–292.

Zhang, H.D., Zhang, H.F., Santosh, M. and Li, S.R., 2014. Fluid inclusions from the Jinchang Cu–Au deposit, Heilongjiang Province, NE China: Genetic style and magmatic-hydrothermal evolution. Journal of Asian Earth Sciences, 82(12): 103–114.

Ziaii, M., Ardejani, F.D., Ziaei and M., Soleymani, A.A., 2012. Neuro-fuzzy modeling based genetic algorithms for identification of geochemical anomalies in mining geochemistry. Applied Geochemistry, 27(3): 663–676.

Ziaii, M., Carranza, E.J.M. and Ziaei, M., 2011. Application of geochemical zonality coefficients in mineral prospectivity mapping. Computers and Geosciences, 37(12): 1935–1945.

Journal of Economic Geology
Vol. 10, No. 2 (2018-2019)
ISSN 2008-7306

زمین‌شناسی اقتصادی
جلد ۱۰، شماره ۲ (سال ۱۳۹۷)
صفحات ۳۷ و ۳۸

Comparison of mineralization of the Sungun and Kighal porphyry copper deposits, NW Iran: with an emphasis on fluid inclusion studies

Tayebeh Ramezani[1], Mohammad Maanijou[1*], Sina Asadi[2], David Lentz[3] and Naser Pirouznia[4]

1) Department of Geology, Faculty of Basic Sceince, Bu-Ali Sina University, Hamedan,65174-33391, Iran
2) Department of Earth Sciences, Faculty of Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran
3) Department of Earth Sciences, University of New Brunswick, 2 Bailey Drive, Fredericton, NB E3B 5A3, Canada
4) Sungun Copper Mine Complex, Ahar, Iran

Submitted: Dec. 56, 2016
Accepted: Aug. 28, 2017

Keywords: *Copper porphyry, productive, geochemical halo, Fluid inclusion, Lithospheric thickness*

Introduction

Nowadays, more than half of the word's copper production is obtained from porphyry copper deposits, large (greater than 100 Mt), low- to moderate-grade, disseminated, stockwork-veinlet, carrying at least trace elements, such as molybdenum, gold, and silver (Sillitoe, 1972). Porphyry Cu systems are related to granitoid porphyry intrusions and adjacent wall rocks and most of them form at convergent plate margins (John et al., 2010). The deposits are often localized within calc-alkaline porphyry magmatic systems in subduction zone settings. Some PCDs have been formed in post-subduction settings. Ahar-Arasbaran metallogenic zone is one of the most productive metallogenic zones in Iran. Mineralization in the area is mainly associated with Tertiary magmatic events. In order to perform a comparative study of mineralization, Sungun and Kighal porphyry copper deposits (PCDs) were selected. The Sungun copper deposit is located in the north Varzaqan and the Kighal copper deposit lies 10 km to the south of the Sungun PCD (Calagari, 2003; Calagari, 2004).

As recent studies show there are some similarities between the Sungun and Kighal deposits in terms of the parent intrusions, the host rocks, age and geological setting. However, the grade of copper in the Sungun PCD is 0.62 % Cu and in the Kighal PCD is 0.2 % Cu. Therefore, what are the key factors that have made the Kighal PCD sub-economic?

Material and methods

Geochemical, fluid inclusion, and mineralogical studies were done on collected samples of the two porphyry copper deposits. In order to mineralogically study the Sungun and Kighal PCDs, 100 thin and polished thin sections were prepared. Eleven doubly polished sections of different quartz veins of the two PCD borehole samples were prepared for fluid inclusion studies. The measurements of 205 fluid inclusions were conducted at the Iranian Mineral Processing Research Center (IMPRC) by ZEISS microscope and Linkam TMH600, at temperature limits of -196 to +600 °C. The precision was ±0.6 °C at 414 °C (melting point of Cesium nitrate), and ±2°C at -94.3 (melting point of n-Hexane). SPSS 17 and Flincor computer programs (Brown, 1989) were used for data analysis.

Discussion and Results

In addition to some similarities of parent intrusions and host rocks (Hassanpour, 2010), there are similar fluid inclusion types and even nearly identical salinity and homogenization temperatures in these deposits (Simmonds, 2013). However, some differences in geochemical and mineralogical features, such as different low

*Corresponding authors Email: mohammad@basu.ac.ir
DOI: 10.22067/econg.v10i2.61340

zonality index, less sulfide minerals and CO_2 contents of the Kighal PCD, are notable. Some researchers have pointed out erosion (Hassanpour, 2010) and uplifting (Simmonds, 2013) as the main reasons for the sub-economic nature of the Kighal (non-productivity), comparison of Moho depth in the two deposits shows a greater crustal thickness in the Sungun PCD area (Fig. 10). The thickness of the lower crust is thought to be critical for governing arc mineralization potential, because it leads to an increase of the amount of water, metal, sulfur in adakitic magma forming arc-related bodies that is known to affect the origin of more productive (economic) porphyry copper deposits. Also low-CO_2 fluid inclusions of the Kighal can have originated from a CO_2-rich fluid immiscibility at depth (Simmonds, 2013). Lack of CO_2 can inhibit (delays) bulk volatile saturation and in turn boiling, which influences the efficiency of metal removal from melt as well (Candela, 1997). CO_2 contents of mineralizing fluids is important in increasing of pH during boiling event and ore deposition. The non-productivity of the Kighal PCD may have resulted from all these factors.

Acknowledgement

This work was supported by Bu-Ali Sina University and Iranian Mines and Mining Industries Development and Renovation Organization (IMIDRO). The authors would like to thank of the Sungun and Ahar copper companies. Special thanks to all the staff for their kind help. Thanks to the reviewers for their suggestions.

References

Brown, P.E., 1989. FLINCOR; a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data. American Mineralogist, 74(11): 1390–1393.

Calagari, A.A., 2003. Stable isotope (S, O, H and C) studies of the phyllic and potassic–phyllic alteration zones of the porphyry copper deposit at Sungun, East Azarbaidjan, Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 21(7): 767–780.

Calagari, A.A., 2004. Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East-Azarbaidjan, Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 23(2): 179–189.

Candela, P.A., 1997. A review of shallow, ore-related granites: textures, volatiles, and ore metals. Journal of Petrology, 38(12): 1619–1633.

Hassanpour, S., 2010. Metallogeney and mineralization of Cu-Au in Arasbaran Zone, NW of Iran. Ph.D. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 320 pp.

John, D., Ayuso, R., Barton, M., Blakely, R., Bodnar, R., Dilles, J., Gray, F., Graybeal, F., Mars, J. and McPhee, D., 2010. Porphyry copper deposit model, chap. B of Mineral deposit models for resource assessment, US Geological Survey Scientific Investigations Report, 169 pp.

Sillitoe, R.H., 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. Economic geology, 67(2): 184–197.

Simmonds, V., Calagari, A.A. and Kyser, K., 2013. Fluid inclusion and stable isotope studies of the Kighal porphyry Cu–Mo prospect, East-Azarbaidjan, NW Iran. Arabian Journal of Geosciences, Fluid inclusion and stable isotope studies of the Kighal porphyry Cu–Mo prospect, East-Azarbaidjan, NW Iran. Arabian Journal of Geosciences, 8(1): 1–17.