دگرسانی و کانی‌سازی در توده نفوذی گرانیتوئیدی کال‌کافی، شمال‌شرق انارک

سید جواد مقدسی[۱و*] طاهره نامدار محمدی[۲] و جمشید احمدیان[۳]

۱- استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران

۳- استادیار، گروه زمین‌شناسی دانشگاه پیام نور، تهران

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۹۱/۲/۱۱

چکیده

ناحیه کال‌کافی در ۷۶ کیلومتری شمال‌شرق انارک (استان اصفهان) و در منطقه ایران مرکزی قرار گرفته است. بر اساس مشاهدات صحرایی، مطالعات پتروگرافی و پراش پرتو ایکس، سه منطقه دگرسانی پتاسیک، فیلیک- آرژیلیک و سیلیسیک در ناحیه مورد مطالعه تشخیص داده شد. پاراژنز کانی‌شناختی دگرسانی پتاسیک شامل ارتوز + بیوتیت + کوارتز ± سریسیت، دگرسانی فیلیک شامل سریسیت + کوارتز + پیریت بهمراه کانی‌های رسی ± کلسیت، و دگرسانی آرژیلیک شامل کائولینیت + دیکیت + سریسیت + کوارتز + هماتیت + لیمونیت + گوتیت می‌باشد. کانی‌سازی در مجموعه کال‌کافی را می‌توان به دو نوع اصلی تقسیم نمود: (۱) کانی‌سازی مس- مولیبدن و (۲) کانی‌سازی پلی‌متالیک طلا، سرب و روی. کانی‌سازی مس- مولیبدن به‌طور عمده بر گرانیت‌ها و کوارتزمونزونیت‌های پورفیری منطبق می‌باشد. رفتار عناصر کمیاب خاکی در سنگ‌های غیردگرسان (کوارتزمونزونیت‌ها) ناحیه مورد مطالعه نشان می‌دهد که عناصر کمیاب خاکی سبک به‌شدت تفریق یافته‌اند، حال آن‌که تفریق عناصر کمیاب خاکی سنگین با شیب آرام‌تری دنبال می‌شود. کاهش مقدار کل عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های دگرسان شده این ناحیه نشان‌دهنده تحرک آنها در محیط دگرسانی گرمابی است. مطالعات حرارت سنجی میان‌بارهای سیال ناحیه مورد مطالعه نشان می‌دهد که شوری سیال کانی‌ساز از ۱/۷۴ تا ۲۱/۱۱ درصد وزنی معادل نمک طعام تغییر می‌نماید. دمای یکنواختی به‌دست آمده از این میان‌بارها نیز گویای وجود حداقل دو نسل میان‌بار سیال یا سیال کانی‌ساز در منطقه است.

واژه‌های کلیدی: دگرسانی، کانی‌سازی، میان‌بار سیال، عناصر کمیاب خاکی، کال‌کافی.

مقدمه

ناحیه کال‌کافی در ۷۶ کیلومتری شمال شرق انارک (استان اصفهان) و در منطقه ایران مرکزی (Stocklin, 1968) واقع گردیده است. تکنواکسپورت (Yakovenko et al., 1981 و Aistov et al., 1984) در مطالعات دقیق‌تر ساختاری این منطقه را جزئی از بلوک انارک- خور می‌داند. ناحیه کال‌کافی در محدوده تقریبی طول‌های جغرافیایی ′۲۰ °۵۴- ′۱۰ °۵۴ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ′۳۰ °۳۳- ′۲۰ °۳۳ شمالی قرار گرفته است.

منطقه کال‌کافی پیش از این توسط Adib (1971)، تکنواکسپورت (Yakovenko et al., 1981 و Aistov et al., 1984)، باباخانی و همکاران (۱۳۷۸) و امینی و سهیلی (۱۳۷۹) مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعات به‌طور عمده بر ارزیابی پتانسیل‌های معدنی منطقه معطوف بوده است. احمدیان (۱۳۸۸) نیز به بررسی پترولوژی و ژئوشیمی توده نفوذی کال‌کافی پرداخته است.

در این مقاله ضمن توصیف مختصر زمین‌شناسی و پتروگرافی مجموعه گرانیتوئید کال‌کافی به بررسی انواع دگرسانی و

* نویسنده مرتبط sjmoghad@pnu.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

کانی‌سازی موجود در منطقه مورد مطالعه پرداخته می‌شود. همچنین با استفاده از نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های مربوط به سنگ‌های میزبان غیردگرسان و دگرسان‌شده، رفتار عناصر کمیاب خاکی در حین دگرسانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ترکیب و دمای سیال کانی‌ساز نیز از طریق مطالعه میان‌بارهای سیال منطقه مورد مطالعه بررسی می‌گردد.

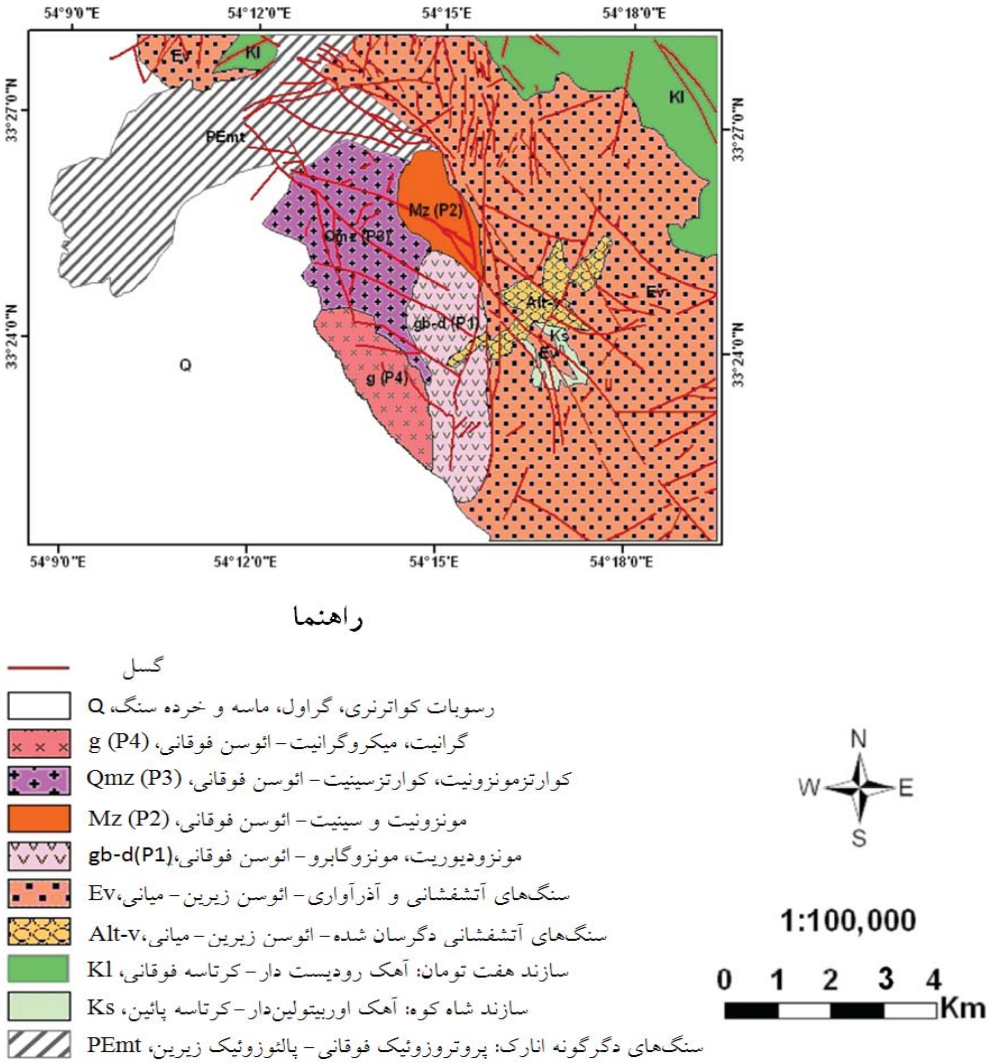
زمین‌شناسی منطقه کال‌کافی

مجموعه نفوذی کال‌کافی شامل یک ساختمان گنبدی شکل بزرگ است که گرانیتوئید کال‌کافی در مرکز آن قرار دارد. جایگیری این مجموعه نفوذی بر اساس شواهد صحرایی و تعیین سن مطلق به روش پتاسیم – آرگون (Yakovenko et al.,1981) در ائوسن فوقانی صورت گرفته است. مجموعه دگرگون شده انارک به سن پروتروزوییک پسین – کامبرین پیشین (باباخانی و همکاران، ۱۳۷۸)، قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه به‌شمار می‌آید و سنگ میزبان گرانیتوئید کال‌کافی نیز محسوب می‌شود. مجموعه نفوذی کال‌کافی متشکل از حداقل ۳ فاز ماگمائی است، که از قدیم به جدید شامل (۱) بخش دیوریت – مونزودیوریت، (۲) بخش مونزونیت –کوارتزمونزونیت و (۳) بخش گرانیت آلکالن پورفیری – کوارتز سینیت پورفیری می‌باشد (شکل ۱). این فازهای ماگمایی از نظر کانی‌شناسی مشابه بوده و کانی‌های اصلی آنها عبارتند از کوارتز، فلدسپار پتاسیم، پلاژیوکلاز، بیوتیت و آمفیبول.

پتروگرافی گرانیتوئید کال‌کافی

جهت شناسایی و مطالعه پتروگرافی واحدهای سنگ‌شناختی موجود در ناحیه مورد مطالعه، ۳۰ مقطع نازک از نمونه‌های برداشت شده از بخش‌های مختلف توده نفوذی کال‌کافی مورد مطالعه میکروسکوپی قرار گرفت و مشخص گردید که این توده نفوذی متشکل از حداقل سه فاز ماگمایی است که در زیر توصیف می‌شوند.

– بخش دیوریت – مونزودیوریت که در حاشیه شرقی و



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه کال‌کافی (احمدیان و همکاران، ۱۳۸۳)

www.SID.ir

جنوب شرقی توده نفوذی کال‌کافی به شکل نوار باریکی برونزد دارد. این سنگ‌ها در نمونه دستی به رنگ خاکستری تیره مشاهده می‌شوند و شامل درشت بلورهای فلدسپار پتاسیم و آمفیبول هستند و کانی‌های اصلی آنها عبارتند از پلاژیوکلازهای متوسط بلور، هورنبلند، کوارتز، فلدسپارهای پتاسیم و بیوتیت. دگرسانی شاخصی در این بخش مشاهده نمی‌شود.

– بخش مونزونیت – کوارتزمونزونیت که قسمت اعظم توده نفوذی کال‌کافی را می‌سازد و به‌دلیل حضور درشت بلورهای ارتوز در نمونه دستی، صورتی رنگ مشاهده می‌شود. این سنگ‌ها شامل ارتوز، پلاژیوکلاز، کوارتز، بیوتیت و هورنبلند هستند. این واحد به سبب دگرسانی اندک، مرتفع‌ترین نقاط گرانیتوئید کال‌کافی را تشکیل می‌دهد.

– بخش گرانیت آلکالن پورفیری – کوارتزسینیت پورفیری در حاشیه غربی گرانیتوئید کال‌کافی که در مجاورت با دشت آبرفتی قرار دارد. این سنگ‌ها بافتی ریز بلور با رنگ روشن دارند و میزبان کانه‌سازی مس – مولیبدن می‌باشند. این واحد از نظر کانی‌شناسی غنی از کوارتز و فلدسپار پتاسیم بوده و مقدار کانی‌های مافیک در آن پائین است. در این بخش انواع دگرسانی به‌صورت پراکنده و نامنظم مشاهده می‌گردد.

بافت غالب در توده‌های نفوذی اسیدی کال‌کافی، بافت هیپ‌ایدیومورفیک گرانولار است. در کانی‌های سازنده سنگ‌ها به‌ویژه در فلدسپارهای پتاسیم می‌توان بافت آنتی‌راپاکیوی (شکل ۲ الف و ب)، پوئی‌کلیتیک (شکل ۲پ) و میکروپرتیت را مشاهده نمود. شکل‌گیری بافت آنتی‌راپاکیوی را می‌توان ناشی از ناپایدار شدن بلورهای اولیه پلاژیوکلاز در اثر هجوم محلول‌های غنی از پتاسیم و تبدیل آنها به فلدسپارهای پتاسیم دانست. این پدیده را می‌توان به فرایند اختلاط ماگمایی در منطقه نسبت داد (Hibbard, 1991). حضور این بافت‌ها بیانگر آن است که بلورهای فلدسپار پتاسیم نسبت به کانی میان‌بار درون آن دارای رشد تأخیری‌اند. بافت‌های ثانویه این سنگ‌ها شامل خاموشی موجی در بلورهای کوارتز و ایجاد خمیدگی در ماکل‌های پلاژیوکلاز است (شکل ۲ت). کانی‌های فرعی این سنگ‌ها عبارتند از آپاتیت، زیرکن (شکل ۲ث)، اسفن (شکل ۲ج)، مگنتیت و هماتیت.

دگرسانی در منطقه کال‌کافی

بر اساس مشاهدات صحرایی، مطالعات پتروگرافی و نتایج پراش پرتو ایکس (۱۴ نمونه از بخش‌های دگرسان شده کانسار انتخاب گردید که جهت بررسی دقیق کانی‌شناسی مورد بررسی پراش پرتو ایکس قرار گرفتند) در این ناحیه ۳ نوع دگرسانی شناسایی شد که شامل دگرسانی‌های پتاسیک، فیلیک – آرژیلیک و سیلیسیک می‌باشند. توزیع دگرسانی‌های ذکر شده در این منطقه بسیار نامنظم، پراکنده و محدود است. به‌طور کلی انواع دگرسانی‌ها بیشتر در فاز سوم ماگمایی مجموعه نفوذی کال‌کافی (گرانیت آلکالن پورفیری – کوارتزسینیت پورفیری) توسعه یافته‌اند.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که دگرسانی پتاسیک در این ناحیه به جزء در چند مورد معدود از نمونه‌های برداشت شده قابل مشاهده نمی‌باشد. دلایلی که می‌توانند مؤید وجود این دگرسانی در ناحیه باشند عبارتند از: (۱) رنگ گوشتی ناشی از وجود فلدسپار پتاسیم ثانویه در برخی از نمونه‌های دستی (۲) وجود بافت آنتی‌راپاکیوی ناشی از هجوم محلول‌های غنی از پتاسیم به محیط و ناپایداری پلاژیوکلازها و تبدیل آنها به فلدسپار پتاسیم ثانویه، (۳) حضور بیوتیت‌های ثانویه در مقاطع نازک برخی نمونه‌ها (شکل ۲ چ و ح) و (۴) وجود مگنتیت در امتداد شکستگی‌ها و رگچه‌های موجود در برخی از سنگ‌ها. پاراژنز کانی‌شناختی دگرسانی پتاسیک در این ناحیه شامل ارتوز + بیوتیت ثانویه + کوارتز ± سریسیت می‌باشد.

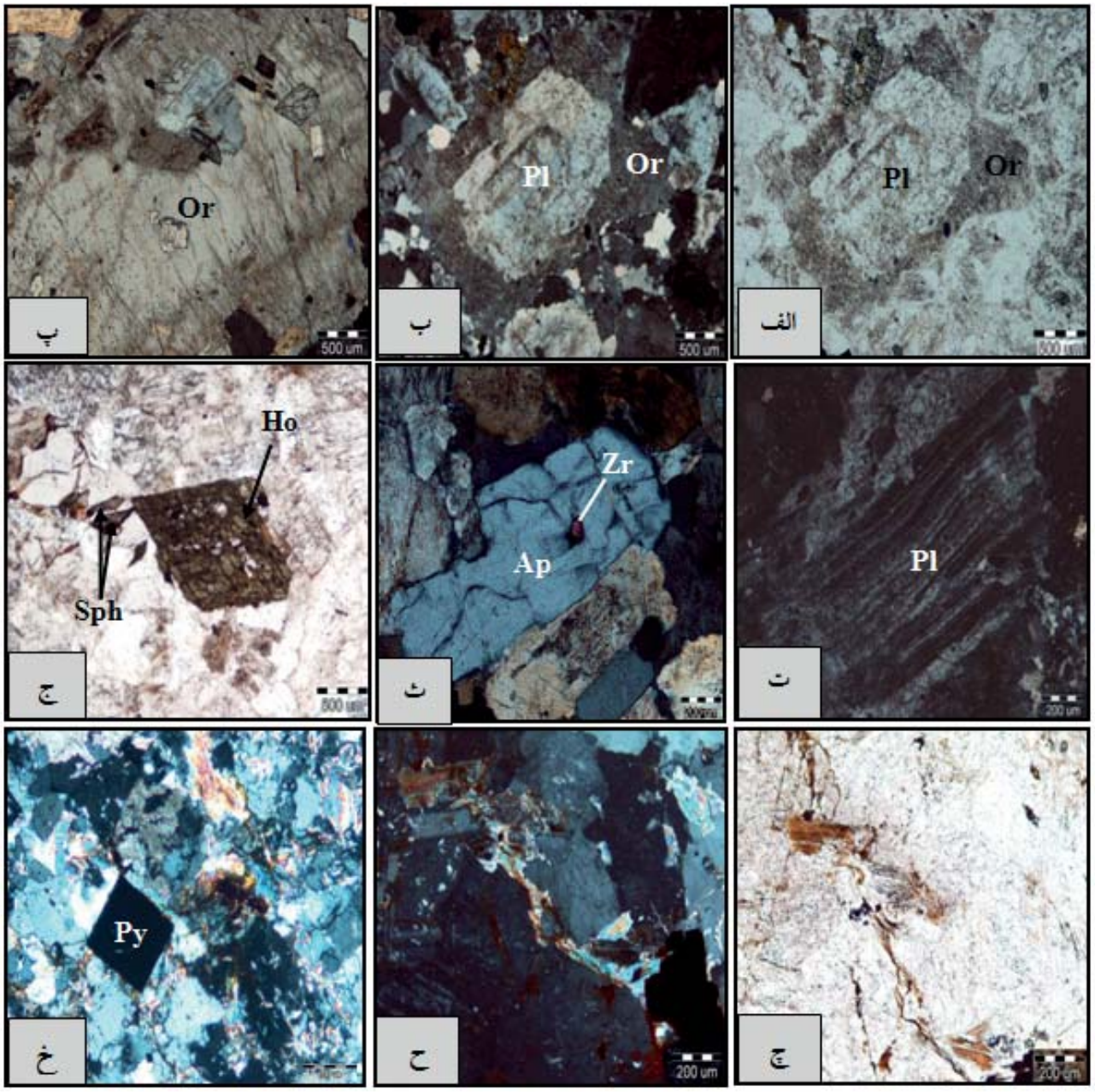
دگرسانی فیلیک در بیشتر نمونه‌ها و واحدهای نفوذی منطقه به‌صورت فراگیر و رگه – رگچه‌ای گسترش یافته است (شکل ۲ خ). پاراژنز کانی‌شناختی این دگرسانی در ناحیه کال‌کافی شامل سریسیت + کوارتز + پیریت + کانی‌های رسی ± کلسیت می‌باشد. دگرسانی فیلیک بیشترین گسترش را در بخش‌های مختلف منطقه دارد و از آنجا که اغلب با آرژیلی شدن همراه است به آن دگرسانی فیلیک – آرژیلیک اطلاق می‌گردد.

دگرسانی آرژیلیک به‌صورت مجزا در منطقه مشاهده نمی‌گردد و اغلب با دگرسانی فیلیک همراه است. در این دگرسانی کانی‌سازی به میزان اندک رخ داده و تنها در برخی از نمونه‌ها می‌توان اکسید و هیدروکسیدهای آهن را مشاهده نمود که رگه–رگچه‌های موجود در سنگ را پر نموده‌اند. مطالعه مقاطع نازک و پراش پرتو ایکس حضور کانی‌هایی مانند کائولینیت، دیکیت، سریسیت، کوارتز، هماتیت، لیمونیت و گوتیت را تأیید می‌نماید که این پاراژنز کانی‌شناختی نشان می‌دهد که دگرسانی آرژیلیک در این ناحیه از نوع حد واسط است. پیریت کانی سولفیدی اصلی است که با دگرسانی رسی یافت می‌شود، هر چند کالکوپیریت و گاهی بورنیت نیز ممکن است با این دگرسانی یافت شوند (Titley and Beane, 1981). این دگرسانی با رنگ روشن در منطقه نمایان شده است.

عوامل مهم و مؤثر در ته‌نشینی سیلیس کاهش فشار، دما و pH محلول است. دگرسانی سیلیسی تقریباً از آب‌شویی و فروشست کامل سنگ‌های اولیه، توسط سیالاتی که به‌شدت اسیدی هستند (pH <۲) حاصل می‌گردد (Stoffregen, 1987). سیلیس در اغلب سنگ‌ها و واحدهای نفوذی منطقه به‌صورت رگه– رگچه‌هایی با ضخامت‌های متغیر حضور دارد و گاهی نیز اکسید و هیدروکسیدهای آهن آنها را همراهی می‌نمایند. در این حالت سیلیسی شدن با سایر دگرسانی‌ها همراه است. در برخی موارد نیز محلول‌های سیلیسی توانسته‌اند بخش اعظم و یا تمامی حجم سنگ را تحت تأثیر خود قرار دهند و این امر موجب غلبه و حاکمیت دگرسانی سیلیسی بر سایر دگرسانی‌ها شده است. لازم به‌ذکر می‌باشد که دگرسانی سیلیسی در محدوده گسترده‌ای از تغییرات دما و pH صورت می‌گیرد، در حالی که

Archive of SID

www.SID.ir



شکل۲. الف و ب- نمایی از بلور پلاژیوکلاز (Pl) که درون فلدسپار پتاسیم (Or) بدام افتاده است (بافت آنتی‌راپاکیوی)، الف- نور پلاریزه ساده، ب- نور پلاریزه متقاطع، پ- نمایی از بافت پوئی‌کلیتیک، به فراوانی ادخال‌های سایر کانی‌ها درون درشت بلور ارتوز (Or) توجه شود (نور پلاریزه متقاطع)، ت- درشت بلور پلاژیوکلاز که تحت تأثیر دگرشکلی دچار خمیدگی شده است (نور پلاریزه متقاطع)، ث- نمایی از درشت بلور آپاتیت (Ap) همراه با میان‌باری از کانی زیرکن (Zr)، که درون آن بدام افتاده است (نور پلاریزه متقاطع)، ج- بلور ایدومورف هورنبلند (Hor) در کنار کانی اسفن (Sph)، (نور پلاریزه ساده)، چ و ح- نمایی از بلورهای بیوتیت قهوه‌ای رنگ که در امتداد رگه‌ها و شکستگی‌های موجود در سنگ رشد نموده‌اند، این بلورها تا حدی نیز به سریسیت تبدیل شده‌اند، (چ- نور پلاریزه ساده و ح- نور پلاریزه متقاطع)، خ- نمایی از دگرسانی فیلیک که به‌صورت فراگیر در سطح نمونه قابل مشاهده است (نور پلاریزه متقاطع).

دگرسانی آرژیلیکی در دماهای پایین و محدوده وسیعی از pH انجام می‌پذیرد (Robb, 2005). با این توصیف شاید بتوان چنین بیان نمود که در بخش‌هایی از منطقه کال‌کافی که دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیکی با هم در سنگ مشاهده می‌شوند دمای محلول‌های دگرسان کننده سنگ‌ها احتمالاً پایین (کمتر از ۲۵۰ درجه سانتیگراد) و در محدوده پایداری کانی‌های رسی می باشد.

کانی‌سازی در منطقه کال‌کافی

کانی‌سازی در منطقه کال‌کافی را می‌توان به دو نوع تقسیم نمود: (۱) کانی‌سازی مس – مولیبدن و (۲) کانی‌سازی طلا – پلی‌متالیک (سرب – روی و طلا). کانی‌سازی مس – مولیبدن که در منطقه از اهمیت بیشتری برخوردار است به‌طور عمده بر گرانیت‌ها و کوارتزمونزونیت‌های پورفیری منطبق می‌باشد. این سنگ‌های

www.SID.ir

اسیدی تحت تأثیر نفوذ و عبور سیالات کانی‌ساز دگرسانی ضعیفی را تحمل نموده‌اند (دگرسانی فیلیک و آرژیلیک) و توسط شبکه‌ای فشرده از رگچه‌های نازک سیلیسی در جهات متفاوت قطع شده‌اند. کانی‌سازی مس – مولیبدن در بخش دگرسانی پتاسیک به میزان بسیار اندک وجود دارد و بخش اصلی کانی‌سازی در منطقه دگرسانی فیلیک و فیلیک – آرژیلیک تمرکز یافته است.

مراحل کانی‌سازی در این منطقه به سه شکل هیپوژن، سوپرژن و منطقه اکسیداسیون مشاهده می‌شود. مطالعات مینرالوگرافی و نتایج پراش پرتو ایکس نشان می‌دهد که کانی‌های سولفیدی موجود در بخش هیپوژن شامل پیریت، کالکوپیریت، مولیبدنیت، گالن و اسفالریت همراه با مقادیر ناچیزی بورنیت می‌باشد. بخش سوپرژن در این منطقه به‌جزء در بخش‌های کم‌عمق و به‌صورت پراکنده توسعه چندانی نیافته، که علت آن را احتمالاً می‌توان به شرایط آب و هوایی گرم و خشک و زهکشی زیاد سنگ‌ها در حین بارندگی‌های فصلی در ناحیه مورد مطالعه نسبت داد (باباخانی و همکاران، ۱۳۷۸). کانی سولفیدی شاخص این بخش، کوولیت است.

گوتیت معمولاً اولین کانی دارای آهن فریک است که در طی هوازدگی کانی‌های سولفید آهن در بخش اکسیداسیون تشکیل می‌گردد (Alpers and Brimhall, 1989). در منطقه مورد مطالعه مالاکیت دارای گسترش بیشتری نسبت به آزوریت است و تنها به‌صورت محلی در برخی از نقاط مقدار آزوریت بیشتر از مالاکیت می‌شود. در این منطقه در بخش اکسیداسیون گوتیت، هماتیت، لپیدوکروسیت، آتاکامیت، مالاکیت و آزوریت همراه با سیلیس به‌صورت رگچه‌ای و انتشاری قابل مشاهده می‌باشند، این بخش تا عمق ۵۰– ۷۵ متری ادامه یافته است (باباخانی و همکاران، ۱۳۷۸).

ژئوشیمی عناصر کمیاب خاکی در سنگ‌های میزبان منطقه کال‌کافی

جهت بررسی و مقایسه رفتار عناصر کمیاب خاکی در سنگ‌های دگرسان شده و غیردگرسان، ۸ نمونه از مناطق مختلف دگرسانی در ناحیه مورد مطالعه انتخاب گردید و پس از خردایش و آماده‌سازی در شرکت کان‌پژوه جهت انجام تجزیه شیمیایی به‌روش ICP-MS به آزمایشگاه ALS کانادا ارسال گردید. نمونه‌ها در این آزمایشگاه به‌روش ذوب توسط لیتیم متابورات آماده‌سازی شدند. نتایج تجزیه شیمیایی عناصر کمیاب خاکی سنگ‌های غیردگرسان و دگرسان شده منطقه مورد مطالعه (جدول۱) نسبت به کندریت (Taylor and Mclennan, 1985) به‌هنجار و در شکل ۳ ارائه گردیده است.

الگوی به‌هنجار شده عناصر کمیاب خاکی سنگ‌های غیردگرسان منطقه (شکل۳ الف) نشان می‌دهد که عناصر کمیاب خاکی سبک (LREE) به‌شدت تفریق شده‌اند، در حالی‌که تفریق در عناصر کمیاب خاکی سنگین (HREE) با شیب آرام‌تری دنبال می‌گردد. اسفن و آپاتیت عناصر کمیاب خاکی متوسط (MREE) را بیش از عناصر کمیاب خاکی سبک و عناصر کمیاب خاکی سنگین از مذاب جدا می‌نمایند، فراوانی بالای این کانی‌ها در سنگ‌های

جدول۱. نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه‌های غیردگرسان (احمدیان، ۱۳۸۸) و دگرسان شده (این مطالعه) منطقه کال‌کافی. نمونه‌های غیردگرسان با علامت * مشخص شده‌اند، نمونه‌های ۱ و ۶ دگرسانی پتاسیک، نمونه‌های ۵، ۱۳، ۱۵ و ۱۹ مربوط به دگرسانی فیلیک– آرژیلیک و نمونه‌های ۲۸ و 5a مربوط به دگرسانی سیلیسک می‌باشند.

شماره نمونه	152a*	162*	39*	50*	1	5	6	13	15	19	28	5a
Ce (ppm)	62.7	61.8	67.5	62.5	53.5	26.6	22.8	33.1	10.2	48.3	14	1
Dy	2.52	2.29	2.45	2.25	1.66	1.37	1.57	1.66	0.88	2.32	0.68	0.1
Er	1.39	1.36	1.39	1.3	0.98	0.81	0.97	0.97	0.62	1.46	0.35	0.05
Eu	1.14	1.05	1.14	1.05	0.57	0.58	0.52	0.64	0.32	0.85	0.44	<0.03
Gd	3.34	2.99	3.29	2.95	2.44	1.98	1.89	2.5	1	3.18	1.29	0.09
Ho	0.47	0.44	0.46	0.42	0.31	0.26	0.31	0.31	0.18	0.45	0.12	0.02
La	35.7	35.3	37.6	36.1	23.3	14.4	12	15.8	5	28.7	7.3	1
Lu	0.217	0.212	0.223	0.211	0.16	0.14	0.16	0.16	0.1	0.24	0.05	0.01
Nd	24.5	23.1	24.9	23.1	14.5	11.4	9.4	14.8	4.1	18.3	8.7	0.5
Pr	6.61	6.32	6.88	6.32	4.11	3	2.56	3.91	1.02	5.11	1.97	0.12
Sm	4.42	4.08	4.38	3.97	2.5	2.07	1.78	2.63	0.86	3.15	1.52	0.11
Tb	0.5	0.47	0.5	0.45	0.33	0.26	0.28	0.31	0.16	0.44	0.15	0.02
Tm	0.218	0.215	0.221	0.21	0.14	0.12	0.16	0.15	0.09	0.21	0.04	0.01
Yb	1.41	1.34	1.48	1.36	1.02	0.9	1.09	1.03	0.63	1.58	0.28	0.04

Archive of SID

www.SID.ir

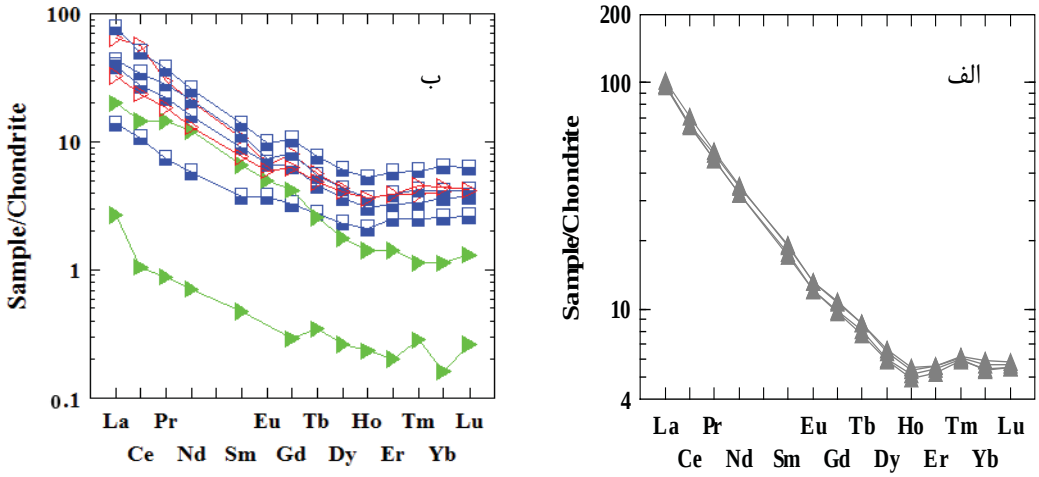
نفوذی منطقه کال‌کافی می‌تواند تهی‌شدگی این عناصر، به ویژه هولمیوم (Ho) را توجیه نماید. همین روند با اندکی تفاوت در میزان فروافتادگی عناصر کمیاب خاکی متوسط در الگوهای عناصر کمیاب خاکی سنگ‌های دگرسان شده منطقه (به‌جز دگرسانی سیلیسی) قابل مشاهده است. حضور آپاتیت و هورنبلند موجب بی‌هنجاری مثبت یوروپیم (Eu) در ماگما می‌شود، حال آن‌که تبلور پلاژیوکلاز و فلدسپار پتاسیم موجب بی‌هنجاری منفی این عنصر در ماگما می‌گردد. در الگوهای عناصر کمیاب خاکی سنگ‌های غیردگرسان منطقه مورد مطالعه بی‌هنجاری Eu بسیار ناچیز است که شاید علت آن را بتوان تبلور همزمان کانی‌های فوق دانست (Rollinson, 1993). الگوهای عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های دگرسان شده ناحیه کال‌کافی (شکل ۳ ب) نشانگر وجود تهی‌شدگی واضح Eu و تهی‌شدگی ناچیز سایر عناصر کمیاب خاکی سبک در این نمونه‌هاست. این امر نشان می‌دهد که عناصر کمیاب خاکی سبک (و تا حدی عناصر کمیاب خاکی متوسط) در محیط دگرسانی گرمابی متحرک شده‌اند. در سنگ‌های غیردگرسان ناحیه کال‌کافی، عناصر کمیاب خاکی سبک نسبت به عناصر کمیاب خاکی سنگین حدود ۲۰ برابر غنی‌شدگی دارند، حال آنکه این نسبت در سنگ‌های دگرسان شده به حدود ۸ برابر تقلیل یافته است، این موضوع می‌تواند نشان دهنده تحرک عناصر کمیاب خاکی (به‌ویژه عناصر کمیاب خاکی سبک) در طول فرایند دگرسانی باشد (Rollinson, 1993).

در سنگ‌های سیلیسی شده، عناصر کمیاب خاکی تهی‌شدگی بیشتری نسبت به سایر دگرسانی‌ها نشان می‌دهند. در واقع نمونه‌های مربوط به دگرسانی نوع سیلیسی از محتوای پایین‌تری از عناصر کمیاب خاکی برخوردار می‌باشند که این موضوع را می‌توان به تحرک شدید این عناصر در محیط دگرسانی سیلیسی نسبت داد. Parsapoor et al. (2008) به نقل از Michard (1989) و Wood (1990) و Lottermoser (1992) بیان می‌دارند که فراوانی و توزیع ناچیز عناصر کمیاب خاکی در محیط دگرسانی سیلیسی را می‌توان به اسیدیته بالا و حضور قابل توجه یون‌های سولفات، کلرید و فلورید در سیالات گرمابی مربوط دانست. این محققین همچنین معتقدند که غلظت بالای یون کلرید در سیال گرمابی می‌تواند عامل کمپلکسی خوبی برای انتقال عنصر Eu باشد که می‌توان آن را یکی از دلایل وجود بی‌هنجاری منفی این عنصر در نمونه‌های دگرسان شده دانست.

مطالعه میان‌بارهای سیال

جهت مطالعه میان‌بارهای سیال از رگه‌های کوارتز موجود در منطقه دگرسانی فیلیک - آرژیلیک که در بخش کانی‌سازی مس - مولیبدن (به‌ویژه نمونه‌های برداشت شده از مغزه‌های حاصل از حفاری گمانه‌ها) واقع گردیده‌اند، ۶ مقطع دوبر صیقلی تهیه شد. مطالعه میان‌بارهای سیال در آزمایشگاه ژئوترمومتری دانشگاه پیام‌نور مرکز تهران انجام شد. جهت مطالعه پتروگرافی و حرارت‌سنجی میان‌بارها، از میکروسکوپ پلاریزان زایس و صفحه گرمایش - سرمایش نوع لینکام مدل THMSG-600 و کنترل کننده حرارتی TMS94 و سرد کننده نوع LNP استفاده گردید.

بر اساس مطالعات پتروگرافی اندازه میان‌بارهای سیال بین ۳/۵ میکرون (بیشتر میان‌بارهای سیال ثانویه) تا بیش از ۴۰ میکرون (برخی از میان‌بارهای اولیه) متغیر است. این میان‌بارها به اشکال مختلف (شکل منفی بلور کوارتز، کروی، بیضی، کشیده و نامنظم) دیده می‌شوند. فراوان‌ترین میان‌بارهای قابل مشاهده در نمونه‌ها، میان‌بارهای دو فازی (مایع + گاز) هستند که اغلب دارای درجه



شکل۳. الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی واحدهای سنگی منطقه کال‌کافی، الف- سنگ‌های غیردگرسان (نمونه‌ها از احمدیان، ۱۳۸۸) و ب- سنگ‌های دگرسان شده (این مطالعه)، مثلث توخالی دگرسانی پتاسیک، مربع توخالی دگرسانی فیلیک و مثلث توپر دگرسانی سیلیسی، نمونه‌ها نسبت به فراوانی عناصر کمیاب خاکی در کندریت (Taylor and Mclennan,1985) بهنجار شده‌اند.

www.SID.ir

پرشدگی ۸۰ تا ۵۵ درصد می‌باشند. میان‌بارهای سیال غنی از فاز گاز (گاز + مایع) و میان‌بارهای سیال حاوی فاز جامد نیز با فراوانی کمتر نسبت به میان‌بارهای نوع اول قابل مشاهده می‌باشند. کانی‌های نوزاد موجود در میان‌بارهای حاوی فاز جامد شامل بلورهای مکعبی شکل هالیت و سیلویت و کانی تیره نامشخص (احتمالاً هماتیت) می‌باشند. برخی از این میان‌بارها تنها دارای یک فاز جامد و یا بیش از یک فاز جامد هستند.

به عقیده Roedder (1984) همزیستی میان‌بارهای سیال دو فازی غنی از مایع و تک فازی (غنی از گاز) و یا وجود نسبت‌های مختلف مایع به بخار در یک سیستم می‌تواند از نشانه‌های انجام پدیده جوشش باشد. در مطالعه میان‌بارهای سیال محدوده کال‌کافی نیز چنین پدیده‌ای مشاهده گردید. وقوع پدیده جوشش می‌تواند شاهد خوبی برای تغییرات فشار در برخی از کانسارها (به‌ویژه کانسارهای پورفیری) باشد که این تغییرات فشار ناشی از تکرار شکستگی و ترمیم موقت و دوباره آن‌هاست (Roedder, 1971; Nash, 1976).

حرارت سنجی

مطالعات حرارت‌سنجی که به منظور شناخت درجه حرارت یکنواختی میان‌بارها و تعیین ترکیب شیمیایی به‌ویژه شوری سیال گرمابی صورت می‌گیرد شامل دو مرحله سرمایش و گرمایش است. با توجه به این‌که در مرحله گرمایش میان‌بارهای سیال مورد مطالعه ممکن است شکفته گردند و محتویات درون آن‌ها از دست برود، بنابراین لازم است قبل از عمل گرمایش، آزمایش سرمایش صورت گیرد. نتایج حاصل از مطالعه پتروگرافی و حرارت‌سنجی ۸۰ نمونه از میان‌بارهای سیال منطقه کال‌کافی در جدول ۲ ارائه شده است. در زیر نتایج حاصل از مطالعات سرمایش و گرمایش مورد بحث قرار می‌گیرد.

روش سرمایش

بررسی میان‌بارهای سیال محدوده کال‌کافی نشان می‌دهد که اولین دمای ذوب یخ (TFM) این نمونه‌ها در بازه دمایی ۸۲- تا ۱۹- درجه سانتی‌گراد قرار دارد که اشاره به ترکیب کاتیون‌های ایجاد کننده شوری دارد و غلظت‌های مهمی از آهن، منیزیم و کلسیم و یا امکان حضور کاتیون‌های دیگری را علاوه بر سدیم و پتاسیم در این میان‌بارها نشان می‌دهد (Sterner et al.,1988).

دمای ذوب آخرین تکه یخ ۴۰ نمونه از میان‌بارهای سیال منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش سرمایش اندازه‌گیری شد و مشخص گردید که دمای ذوب نهایی یخ (TM) این میان‌بارها در محدوده دمایی بین ۱ °C- تا ۱۸/۲- قرار دارد. محاسبه شوری با استفاده از روش (Bodnar and Vityk, 1994) نشان می‌دهد که شوری سیال کانی‌ساز بین ۱/۷۴ تا ۲۱/۱۱ درصد وزنی معادل نمک طعام در تغییر می‌باشد. شکل ۴ الف نمودار فراوانی شوری سیال کانی‌ساز در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

روش گرمایش

نتایج به‌دست آمده از آزمایش گرمایش روی ۸۰ میان‌بار سیال رگه‌های کوارتز نشان می‌دهد که دمای یکنواختی میان‌بارها بین دمای ۲۰۰°C تا ۵۰۰ متغیر می‌باشد. بیشترین فراوانی دمای یکنواختی میان‌بارهای سیال در دو بازه دمایی ۳۵۰°C-۳۲۵ و ۵۰۰°C-۴۵۰ مشاهده می‌شود (شکل ۴ ب) که حاکی از وجود حداقل دو نسل میان‌بار سیال در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

نتیجه‌گیری

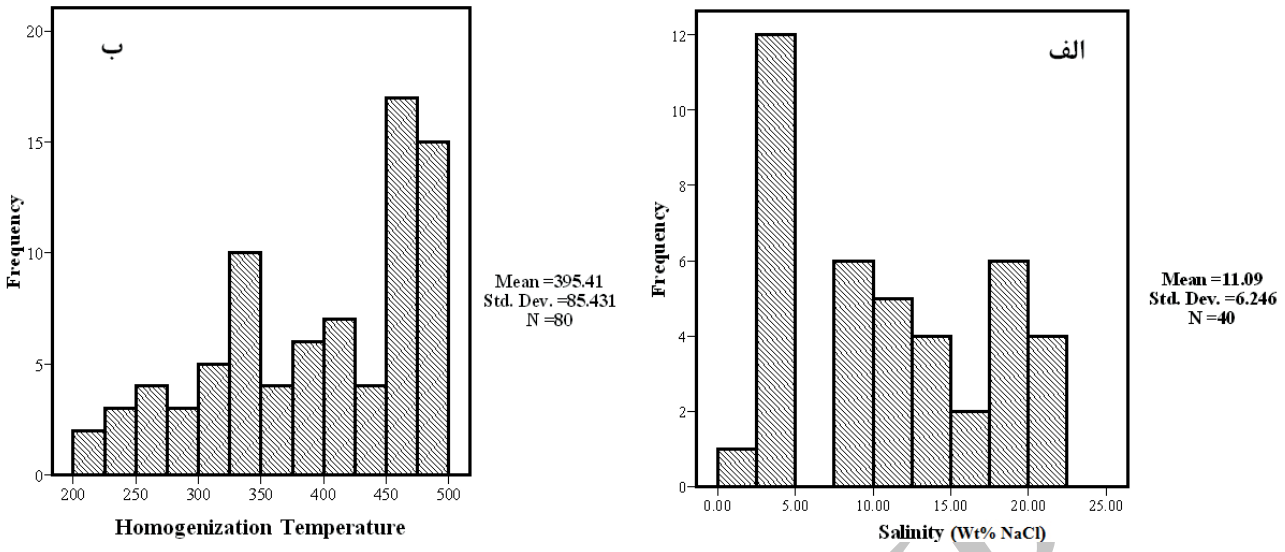
با توجه به مطالعات صحرایی، میکروسکوپی و پراش پرتو ایکس مشخص گردید که در منطقه کال‌کافی سه نوع دگرسانی قابل مشاهده است: دگرسانی پتاسیک، فیلیک - آرژیلیک و

جدول۲. نتایج حاصل از مطالعه پتروگرافی و حرارت سنجی میان بارهای سیال ناحیه کال‌کافی

نمونه	فازهای میان بار سیال	اندازه (میکرون)	میانگین	محدوده دمای یکنواختی (°C)	میانگین	محدوده دمای ذوب آخرین قطعه یخ(°C)	میانگین	محدوده شوری	میانگین
K.N.5	LV	۱۲- ۳/۵	۶/۱	۱۸۰-۲۸۰ (۱۰)	۲۴۳/۴	۱- تا ۳- (۱۰)	-۲/۱۵	۴/۹۶ تا ۱/۷۴	۳/۶۱
K.N.19-1	LV, LVH	۶-۲۰	۱۲/۶۶	۳۶۵-۵۰۰ (۱۷)	۴۵۴/۰۸	۶- تا ۱۸/۲- (۱۷)	-۱۳/۴۴	۲۱/۱۱ تا ۹/۲۱	۱۵/۹۱
K.N.19-2	LV, VL	۳/۵-۱۷/۵	۱۱/۳	۳۲۹-۵۰۰ (۱۵)	۴۲۸/۸۵	*	*	*	*
BH.24-1	LV, LVH	۷/۵-۱۵	۱۰/۰۷	۳۰۵-۴۸۱ (۱۳)	۴۰۵/۴۸	۲/۵- تا ۱۰/۶۰- (۱۳)	-۶/۲۲	۱۴/۵۷ تا ۴/۱۸	۱۰/۳۱
BH.24-2	LV	۵-۱۵	۸/۱۶	۲۶۹-۴۶۳ (۱۲)	۳۵۲	*	*	*	*
BH.27	LV, LVH	۵-۱۷/۵	۱۰/۳۸	۳۲۵-۵۰۰ (۱۳)	۴۲۹/۳۸	*	*	*	*

Archive of SID

www.SID.ir



شکل۴. الف- نمودار فراوانی شوری سیال کانه‌ساز در منطقه کال‌کافی، ب- نمودار فراوانی دمای یکنواختی میان‌بارهای سیال در منطقه کال‌کافی.

سیلیسیک. پاراژنز کانی‌شناختی دگرسانی پتاسیک شامل ارتوز + بیوتیت + کوارتز ± سریسیت، پاراژنز کانی‌شناختی دگرسانی فیلیک شامل سریسیت + کوارتز + پیریت بهمراه کانی‌های رسی ± کلسیت، و پاراژنز کانی‌شناختی دگرسانی آرژیلیک (دگرسانی آرژیلیک حدواسط) شامل کائولینیت + دیکیت + سریسیت + کوارتز + هماتیت + لیمونیت + گوتیت می‌باشد.

وجود تهی‌شدگی واضح Eu و تهی‌شدگی ناچیز سایر عناصر کمیاب خاکی سبک در نمونه‌های دگرسان شده این ناحیه مبین آن است که عناصر کمیاب خاکی و تا حدی عناصر کمیاب خاکی متوسط در محیط دگرسانی گرمابی متحرک شده‌اند. در سنگ‌های سیلیسی شده ناحیه عناصر کمیاب خاکی تهی‌شدگی بیشتری نسبت به سایر دگرسانی‌ها نشان می‌دهند که این موضوع را می‌توان به علت تحرک شدید عناصر کمیاب خاکی در محیط دگرسانی دانست.

میان‌بارهای سیال این ناحیه اغلب از نوع میان‌بارهای دو فازی مایع+ گاز هستند. دمای ذوب آخرین قطعه یخ نمونه‌های مطالعه شده بین ۱°C- تا ۱۸/۲- است که معادل شوری حدود ۱/۷۴ تا ۲۱/۱۱ درصد وزنی معادل نمک طعام می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از مطالعه میان‌بارهای سیال منطقه به‌نظر می‌رسد که احتمالاً کانی‌سازی کال‌کافی شبیه به دیگر انواع سیستم‌های پورفیری ایران مانند سرچشمه و سونگون باشد که حوادثی همچون شکستگی و ترمیم دوباره، همراه با ایجاد چندین نسل میان‌بار سیال (که می‌تواند نشان‌دهنده تکامل سیال هیدروترمال، مطابق با دگرسانی و کانی‌سازی باشد) را تحمل نموده است.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت و پشتیبانی دانشگاه پیام نور و امتیاز اعطا شده به شماره ۵/۴۰۹۶ مورخ ۱۳۸۸/۱۰/۰۳ انجام شده است. لذا لازم است از تمامی افرادی که به نحوی در تصویب و اجرای آن نقش داشته‌اند تشکر گردد.

منابع

- احمدیان، ج.، ۱۳۸۸. پترولوژی و ژئوشیمی توده نفوذی کال‌کافی (شرق انارک) با نگرشی بر دگرسانی و کانی‌سازی مس (مولیبدن- طلا) مرتبط با آن، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

- احمدیان، ج.، امامی، ه.، قربانی، م.ر. و لطفی، م.، ۱۳۸۳. معرفی گرانیتوئیدهای پتاسیک در مجموعه ولکانو- پلوتونیک کال‌کافی (شمال خاوری انارک) و نحوه تشکیل آنها، بیست و سومین گردهمایی علوم زمین، خلاصه مقالات.

- امینی، ب. و سهیلی، م.، ۱۳۷۹. مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافات طلا، مس و سایر عناصر فلزی در نواحی کال‌کافی - خونی، طرح اکتشاف سراسری ذخایر معدنی.

- باباخانی، ع.، رادفر، ج. و مجیدی، ج.، ۱۳۷۸. مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافات طلا، مس و سایر عناصر فلزی در نواحی کال‌کافی - خونی، طرح اکتشاف سراسری ذخایر معدنی.

- Adib, D., 1971. Mineralogische untersuchungen in der oxydations-zone der lagerstatte Tschah-Khuni, Anarak, Central Iran, Inaugural-Dissertation, Heidelberg–Tehran, 194.

- Aistov, L., Melnikov, B., Krivyakin, B. and Morozov, L., 1984. Geology of the Khur area (central Iran), Explanatory text of the Khur Quadrangle map 1:250,000, V/O Technoexport Report TE/No.20 Geological Survey of Iran, 131.

- Alpers, C.N. and Brimhall, G.H., 1989. Paleohydrologic evolution and geochemical dynamics of cumulative supergene metal enrichment at La Escondida, Atacama Desert, northern Chile. Economic Geology, 84, 229–255.

- Bodnar, R.J. and Vityk, M.O., 1994. Interpretation of

Archive of SID
www.SID.ir

microthemometric data for H2O–NaCl fluid inclusions. In: DeVivo, B., Frezzotti, M.L. (Eds.), Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 117–130.

- Hibbard, M.J., 1991. Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid systems. In: Didier, J.,Barbarin, B., 1991, Enclaves and Granite Petrology. Developments in Petrology, 13, 431–444.

- Lottermoser, B.G., 1992. Rare earth element and hydrothermal ore formation processes. Ore Geology Review, 7, 25–41.

- Michard, A., 1989. Rare earth element systematics in hydrothermal fluid, Geochimica et Cosmochimica Acta, 53, 745–750.

- Nash, J.T., 1976. Fluid inclusion petrology—data from porphyry copper deposits and applications to exploration. United States Geological Survey, Professional Paper 907D, 16.

- Parsapoor, M., Khalili, M.A. and Mackizadeh, 2008. The behavior of trace and rare earth elements (REE) during hydrothermal alteration in the Rangan aera (Central Iran). Journal of Asian Earth Sciences, 1-12.

- Robb, L.J., 2005. Introduction to Ore-forming Processes. Blackwell Publishing, 373.

- Roedder, E., 1984. Fluid Inclusion. Review in Mineralogy, 12. Mineralogical Society, American Restern, Virginia.

- Roedder, E., 1971. Fluid inclusion studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana, and Climax, Colorado. Economic Geology, 66, 120–98.

- Rollinson, R.R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Scientific and Technical, 352.

- Shepherd,T., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M, 1985. A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies, Blackie,USA Chapman and Hall New York, 239.

- Sterner, S.M., Hall, D.L. and Bodnar, R.J.,1988 . Synthetic fluid inclusions. V. Solubility of the system NaCl–KCl–H_2O under vapor-saturated conditions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52, 989–1005.

- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonic of Iran, A review, American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 52, 1229–1258.

- Stoffregen, R., 1987. Genesis of acid-sulphate alteration and Au-Cu-Ag mineralization at Summitville, Colorado. Economic Geology, 82, 1575–1591.

- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution, Black well, Oxford.

- Titley, S.R. and Beane, R.E., 1981. Porphyry copper deposits, Economic Geology 75th Anniversary volume, 214- 269.

- Wood, S.A., 1990. The aqueous geochemistry of the rare earth elements and yttrium: theoretical prediction in hydrothermal solutions to 350 °C at saturation of water vapor pressure. Chemical Geology 88, 99–125.

- Yakovenko, V., Chinakov, I., Kokorin, Yu. and Krivyakin, B., 1981. Report on detailed geological prospecting in Anarak Area (Kal-eKafi-Khoni Locality). V/O <Technoexport >, Report 13, Moscow, 293.

Archive of SID

www.SID.ir