

کانی‌شناسی و ژئوشیمی اورانیوم، توریم و عناصر نادر خاکی در کانسنگ درونزاد مس-مولیبدن کانسار کال کافی، منطقه انارک

خالق خشنودی^{۱*} و سمانه ضیاءپور^۲

۱- استادیار پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

۲- پژوهشگر پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

نویسنده مسئول: khoshnoodi78@gmail.com *

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۱

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

چکیده

کانسار مس-مولیبدن کال کافی از نظر تقسیمات ساختمانی یکی از ذخایر منطقه معدنی انارک در ۷۶ کیلومتری شمال شرق شهر انارک، در بخش میانی ایران مرکزی است. توده گرانیتوئیدی کال کافی توده‌ای بیضی شکل با ابعاد 8×5 کیلومتر و سن ائوسن فوقانی است که درون سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین، آهک کرتاسه و سنگ‌های آتشفشانی ائوسن زیرین-میانی نفوذ کرده است. گرانیته کال کافی دارای ماهیت کالک‌آلکان پتاسیم بالا و موقعیت تکتونیکی کمان آتشفشانی است. کانی اصلی میزبان اورانیوم و توریم شامل اورانینیت توریم‌دار، اورانوتوریت و توریت اورانیوم‌دار است. بلورهای اورانینیت و اورانوتوریت به ترتیب حاوی حداکثر ۱۰ درصد توریم و ۳۰ درصد اورانیوم هستند. کانی‌های اصلی میزبان عناصر نادر خاکی مونازیت، باستانزیت و پارسیت است که محتوای سیریم، لانتانیم و نئودیمیم در آن‌ها به ترتیب از حدود ۱۸ تا ۳۴، ۲۰ تا ۹ و ۱۳ درصد تغییر می‌کند. میانگین مقدار عناصر اورانیوم، توریم و مجموع نادر خاکی در منطقه کانی‌سازی درونزاد کانسار کال کافی به ترتیب ۱۸، ۷ و ۸۹ پی‌پی‌ام است. براساس نتایج به دست آمده از این تحقیق، کانی‌سازی مس، مولیبدن و اورانیوم درونزاد در کانسار کال کافی از نوع ذخایر اورانیوم نوع نفوذی (زیربرده گرانیته-مونزونیت) است.

واژه‌های کلیدی: اورانیوم، کالک‌آلکان پتاسیم بالا، کانسار مس-مولیبدن کال کافی

۱- پیشگفتار

بیش از ۱۵۰ کانسار و اندیس در ناحیه انارک شناسایی شده است که عمدتاً از لحاظ ترکیب کانیایی با یکدیگر متفاوت هستند. محدوده کال کافی از نظر تقسیمات ساختمانی در منطقه معدنی انارک در ۷۶ کیلومتری شمال شرق انارک، در حاشیه جنوبی کویر مرکزی در استان اصفهان واقع شده است (اشتوکلین، ۱۹۶۸). منطقه معدنی انارک در بخش میانی ایران مرکزی و در زیرپهنه دگرگونی انارک-خور واقع شده است و از شمال به گسل درونه، از جنوب غرب به زون افیولیتی ناپین-زوار و از جنوب به فروافتادگی ناپین-انارک محدوده می‌گردد. منطقه کال کافی تاریخچه بسیار پیچیده‌ای دارد و فرآیندهای زمین‌ساختی و چرخه‌های ماگماتیسم، دگرگونی، رسوب‌گذاری و فرسایش سبب تنوع چشم‌اندازها و پدیده‌های زمین‌شناسی شده است (حیدریان و رسا، ۲۰۱۱؛ مقدسی و همکاران، ۲۰۱۲). توان معدنی این منطقه پیش از این توسط ادیب (۱۹۷۲)، یاکوونکو و

همکاران (۱۹۸۱)، خوئی (۱۹۸۳)، باباخانی و همکاران (۱۹۹۹)، امینی و سهیلی (۲۰۰۰) و نظام‌پور (۲۰۰۵) مطالعه شده است. منطقه کال کافی به دلیل وجود کانی‌سازی انواع فلزات از جمله مس، مولیبدن، سرب، روی و طلا از گذشته مورد توجه بوده است. آثار متعددی به صورت حفاریات فراوان در امتداد گسل‌ها و همچنین وجود سرباره کوره‌های ذوب حاکی از قدمت معدنکاری در منطقه است. توده نفوذی کالکافی در بخش غربی خود میزبان یکی از بزرگ‌ترین معادن مس-مولیبدن-طلا ایران است. در منطقه کال کافی سه سیستم گسل با راستای شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و شمال‌شرق-جنوب‌غربی وجود دارد. سیستم شکستگی‌های شرقی-غربی کانی‌سازی مس-مولیبدن پورفیری و سیستم شکستگی‌های شمالی-جنوبی کانی‌سازی رگه‌ای چندفلزی (سرب، روی، تنگستن، مولیبدن و طلا) را کنترل کرده‌اند. کانی‌سازی مس-مولیبدن پورفیری در حاشیه غربی توده نفوذی کال کافی منطبق بر گرانیته و مونزوگرانیته در مجاورت با دشت

آبرفتی است و زون‌های دگرسانی منطقه شامل پتاسیک، فیلیک، آرژیلیک و سیلیسی می‌باشد (یاکوونکو و همکاران، ۱۹۸۱؛ احمدیان و همکاران، ۲۰۰۷، ۲۰۰۹؛ حیدریان و رسا، ۲۰۱۱). این معدن حاوی ۲۴۵ میلیون تن کانسنگ با عیار ۰/۲۶٪ مس و ۰/۰۲۶٪ مولیبدن می‌باشد. همچنین میزان طلای گزارش شده از این بخش ۲۴۹ تن طلای با عیار ۴ پی‌پی‌ام می‌باشد (یاکوونکو و همکاران، ۱۹۸۱). تاکنون در این کانسار، مطالعات دقیق کانی‌شناسی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی با رویکرد شناسایی کانی‌های اورانیوم، توریم و عناصر نادر خاکی انجام نشده است و هدف این مقاله این است که با استفاده از مطالعات پتروگرافی، مینرالوگرافی، میکروسکوپ الکترونی و نتایج آنالیز شیمیایی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی اورانیوم، توریم و عناصر نادر خاکی در منطقه کانی‌سازی درونزاد کانسار کال کافی مورد بررسی قرار گیرد.

۲- زمین‌شناسی منطقه

محدوده کال کافی در محدوده طول‌های جغرافیایی $54^{\circ} 10'$ تا $54^{\circ} 20'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $33^{\circ} 20'$ تا $33^{\circ} 30'$ شمالی و بخشی از ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ کبودان قرار گرفته است (اشتوکلین، ۱۹۶۸). دسترسی به منطقه کال کافی از طریق محور اصفهان- نائین- انارک- چوپانان و در کیلومتر ۴۵ جاده آسفالت‌ه انارک به چوپانان، جاده خاکی معدن متروکه طلای خونی و پس از عبور از مزرعه مشجری و معدن متروکه طلای خونی به طول ۲۵ کیلومتر امکان‌پذیر می‌باشد. ساختمان منطقه کال کافی به شکل گنبدی بزرگ است که فعالیت‌های تکتونوماگمایی آلپین بر روی پی‌سنگ چین‌خورده بایکالین (کمپلکس دگرگونی چاه گربه) رخ داده است. گرانیتوئید کال کافی در مرکز آن واقع شده است. توده گرانیتوئیدی کال کافی توده‌ای بیضی شکل با ابعاد $8 \times 5/5$ کیلومتر است که در درون سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین فوقانی تا پالئوزوئیک زیرین و واحدهای آهکی کرتاسه و آتشفشانی ائوسن زیرین- میانی منطقه تزریق شده است و در حاشیه شمالی و جنوبی منطقه رخنمون دارد (شکل ۱). کمپلکس پلوتونیک کال کافی شامل طیفی از سنگ‌های گرانیت، گرانودیوریت، کوارتز مونزونیت، دیوریت و گابرو- مونزوگابرو به همراه سنگ‌های نیمه‌عمیق (دایک‌های مونودیوریت و لامپروفیر) می‌باشد که شواهد صحرایی حاکی از آن است

که قدیمی‌ترین واحد، بخش گابرو- مونزوگابرو و جوان‌ترین واحد بخش گرانیتی است (یاکوونکو و همکاران، ۱۹۸۱؛ باباخانی و همکاران، ۱۹۹۹؛ احمدیان و همکاران، ۲۰۰۹؛ احمدیان، ۲۰۱۲؛ حیدریان و رسا، ۲۰۱۱). سن این توده با روش سن‌سنجی پتاسیم- آرگون در محدوده ۴۷-۵۶ میلیون سال معادل ائوسن فوقانی محاسبه شده است (یوشین و رومانکو، ۱۹۸۱). تزریق توده گرانیتوئیدی مذکور در سنگ‌های آتشفشانی با سن ائوسن زیرین- میانی سبب دگرگونی مجاورتی ضعیف این سنگ‌ها شده است. سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری مذکور با ترکیب غالب آندزیت- تراکی آندزیت در حاشیه بخش‌های شرقی و شمال شرقی منطقه رخنمون داشته و توسط دایک‌های متعددی با ترکیب مونزونیتی قطع شده‌اند. روند عمومی لایه‌های سنگی به پیروی از نفوذ این توده دارای امتداد شمال شرقی- جنوب‌غربی و شیبی به سمت جنوب‌شرق است. واحدهای آهکی با سن کرتاسه به صورت دگرشیب بر روی واحدهای قدیمی‌تر قرار گرفته‌اند (باباخانی و همکاران، ۱۹۹۹؛ احمدیان و همکاران، ۲۰۰۹؛ احمدیان، ۲۰۱۲؛ حیدریان و رسا، ۲۰۱۱). چهار فاز ماگمایی در مجموعه پلوتونیک کال کافی متشکل از گابرو- دیوریت- مونودیوریت، مونزونیت- سینیت، کوارتز مونزونیت- کوارتز سینیت و گرانیت آلکالن- مونزوگرانیت شناسایی شده است. گرانیت‌ها رخساره‌ای ریزبلور با رنگ روشن دارند که جایگاه زون کانی‌سازی مس- مولیبدن می‌باشد. رسوبات پهنه دشت‌ها و آبرفت‌های رودخانه‌ای کواترنر نیز سطح منطقه را پوشانیده‌اند (احمدیان و همکاران، ۲۰۰۹؛ احمدیان، ۲۰۱۲).

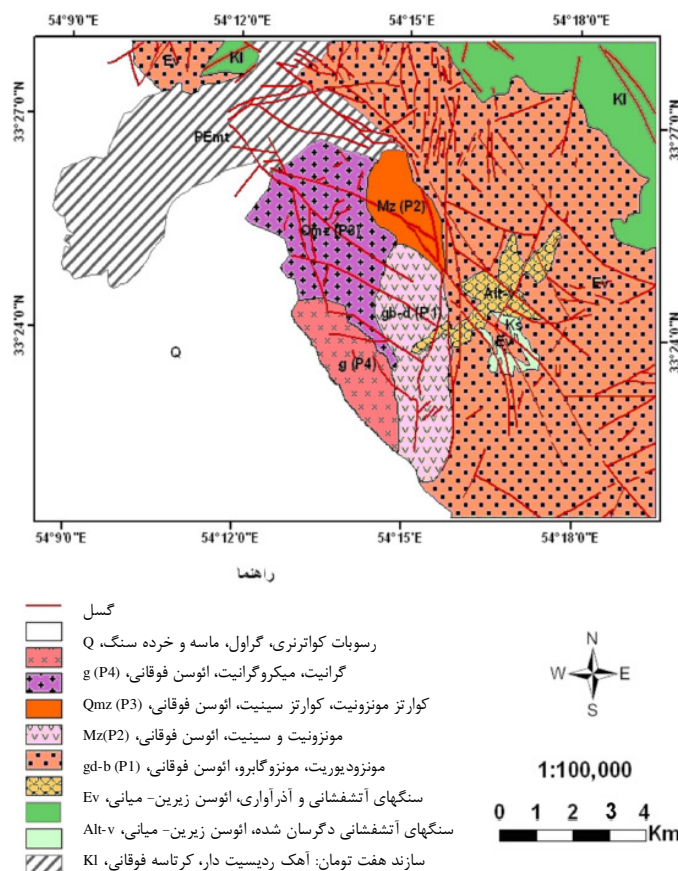
۳- روش تحقیق

پس از بررسی صحرایی، نمونه‌برداری از مغزه‌های حفاری در عمق بیش از ۱۰۰ متر در منطقه درونزاد کانسار انجام شد. پس از بررسی ماکروسکوپی نمونه‌ها، بیش از ۴۰ مقطع نازک و نازک- صیقلی از گرانیت کال کافی و کانسنگ درونزاد مس- مولیبدن پورفیری برای مطالعات سنگ‌شناسی و مینرالوگرافی توسط میکروسکوپ نور عبوری- انعکاسی مدل Olympus CX21 تهیه گردید.

در مرحله بعد، مطالعات دقیق‌تر کانی‌شناسی بر روی ۸ مقطع نازک- صیقلی توسط میکروسکوپ الکترونی مدل FESEM SIGMA/VP-ZEISS در مرکز پژوهش‌های

۷۵ میکرون نمایش شدند به‌طوری که ۸۵٪ حجم نمونه از الک ۲۰۰ مش (۷۵ میکرون) عبور کند. در روش ذوب قلیایی نمونه‌ها با استفاده از لیتیوم متابورات ذوب شدند و محصول ذوب شده با استفاده از اسید نیتریک رقیق حل شده و سپس محلول نهایی با استفاده از دستگاه ICP-OES خوانش شده و مقدار اکسیدهای اصلی مشخص گردید. حد تشخیص اکسیدهای اصلی در این روش، ۰/۰۱ درصد است. برای اندازه‌گیری عناصر فرعی و کمیاب، نمونه‌ها پس از پودر شدن توسط روش ۴ اسید (اسید هیدروفلوئوریک، پرکلریک، نیتریک و هیدروکلریک) به صورت محلول درآمدند و با استفاده از دستگاه ICP-MS مورد خوانش قرار گرفتند. در طی تجزیه نمونه‌ها، نهایت دقت و تنظیم ابزارها به منظور جلوگیری از آلودگی صورت پذیرفته است. همچنین از نتایج تجزیه شیمیایی ۴ نمونه گرانیت کال کافی از احمدیان (۲۰۱۲) نیز به منظور مطالعات ژئوشیمیایی گرانیت استفاده شد (جدول ۲).

کاربرد سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام شد. به منظور مطالعات ژئوشیمیایی و اندازه‌گیری عناصر اصلی، عناصر فرعی و عناصر نادر خاکی، تجزیه کلی تعداد ۵ نمونه کانسنگ به روش ICP-OES و ICP-MS در آزمایشگاه زرآما در تهران انجام گرفت (جدول ۱). عناصر اصلی به روش ذوب قلیایی با دستگاه اسپکترومتري نشری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES)، همچنین عناصر فرعی و کمیاب به کمک طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) تجزیه و اندازه‌گیری شدند. فرایند آماده‌سازی جهت به حداقل رساندن سائز و همگن‌سازی نمونه با تبعیت از پروتکل‌های استاندارد نمونه‌برداری و رعایت اصل پرهیز از آلودگی انجام شد. در مرحله اول، نمونه‌ها با استفاده از آون آزمایشگاهی و تا حرارت ماکزیمم ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و سپس با استفاده از سنگ‌شکن‌های فکی تا ابعاد کمتر از ۴ میلی‌متر خردایش شده و در آسیاب دیسکی استیل با عیار کروم پایین تا سائز



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه کال کافی (احمدیان و همکاران، ۲۰۰۷)
Fig. 1. Simplified geological map of Kal-e Kafi area (Ahmadian et al., 2007)

جدول ۱. نتایج آنالیز عناصر اصلی (wt%) و فرعی (ppm) نمونه‌های کانسنگ به روش ICP-OES&MS

Table 1. Major and minor element analyses of ore samples by ICP-OES & MS

Sample No.		KK-07	KK11	KK13	KK16	KK19
SiO ₂	%	69.08	70.78	69.81	68.3	70.31
Al ₂ O ₃	%	14.51	14.65	14.33	15.77	14.3
CaO	%	1.17	1.51	1.25	1.84	0.77
Fe ₂ O ₃	%	1.4	1.74	1.57	2.09	1.58
K ₂ O	%	6.47	5.46	5.82	4.61	5.92
MgO	%	0.63	0.78	0.92	0.89	1.15
Na ₂ O	%	2.62	3.83	3.66	4.39	3.48
P ₂ O ₅	%	0.07	0.06	0.06	0.07	0.05
SO ₃	%	1.13	0.04	0.73	0.41	0.71
TiO ₂	%	0.24	0.23	0.23	0.23	0.22
LOI	%	2.05	0.76	1.1	1.03	0.75
Ba	ppm	610	677	537	700	603
Cu	ppm	4264	370	2030	1467	5578
Nb	ppm	9.2	9.8	9.1	9.7	10.6
Pb	ppm	161	78	93	58	110
Rb	ppm	187	145	165	156	201
Sr	ppm	594.2	768.6	742.1	956.9	693.3
Ta	ppm	1	0.8	0.8	0.7	1
Th	ppm	19.9	14.8	18.6	13.1	23.2
U	ppm	7.4	5.4	7.8	5.5	7.7
Y	ppm	9.2	8.9	8.3	10.6	7.4
Zr	ppm	29	24	24	22	23
La	ppm	19	19	20	25	15
Ce	ppm	37	38	41	49	33
Pr	ppm	4.4	4.71	4.57	5.8	3.58
Nd	ppm	14.9	16	14.3	19.4	12.1
Sm	ppm	2.8	2.9	2.7	3.4	2.2
Eu	ppm	0.58	0.67	0.55	0.8	0.48
Gd	ppm	2.47	2.57	2.37	2.92	2.03
Tb	ppm	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1
Dy	ppm	2.1	2	2	2.3	1.7
Er	ppm	1.1	1	0.9	1.1	0.8
Tm	ppm	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Yb	ppm	0.94	0.81	0.87	0.93	0.78
Lu	ppm	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1

جدول ۲. نتایج آنالیز عناصر اصلی (wt%) و فرعی (ppm) نمونه‌های گرانیت کال کافی (احمدیان، ۲۰۱۲)

Table 2. Major (%) and minor (ppm) element analyses of the Kal-e Kafi granite (Ahmadian, 2012)

Sample No.		50	162	152	39
SiO ₂	%	67.26	66.98	66.26	66.63
Al ₂ O ₃	%	16	15.9	16.35	16.31
CaO	%	2.61	2.42	3.29	2.2
FeO	%	1.35	1.38	0.72	1.38
Fe ₂ O ₃	%	1.92	1.88	1.48	1.95
K ₂ O	%	4.58	4.87	4.31	4.96
MgO	%	1.02	0.86	1.37	0.89
Na ₂ O	%	5.31	5.21	5.59	5.44
P ₂ O ₅	%	0.13	0.13	0.17	0.13
TiO ₂	%	0.33	0.3	0.36	0.32
Co	ppm	5	5	4	5
Nb	ppm	12.5	12.1	12.8	12.5
Ta	ppm	0.82	0.86	0.87	0.88
Th	ppm	20	10.3	13.3	16.2
Yb	ppm	1.36	1.34	1.41	1.48

۴- نتایج و بحث

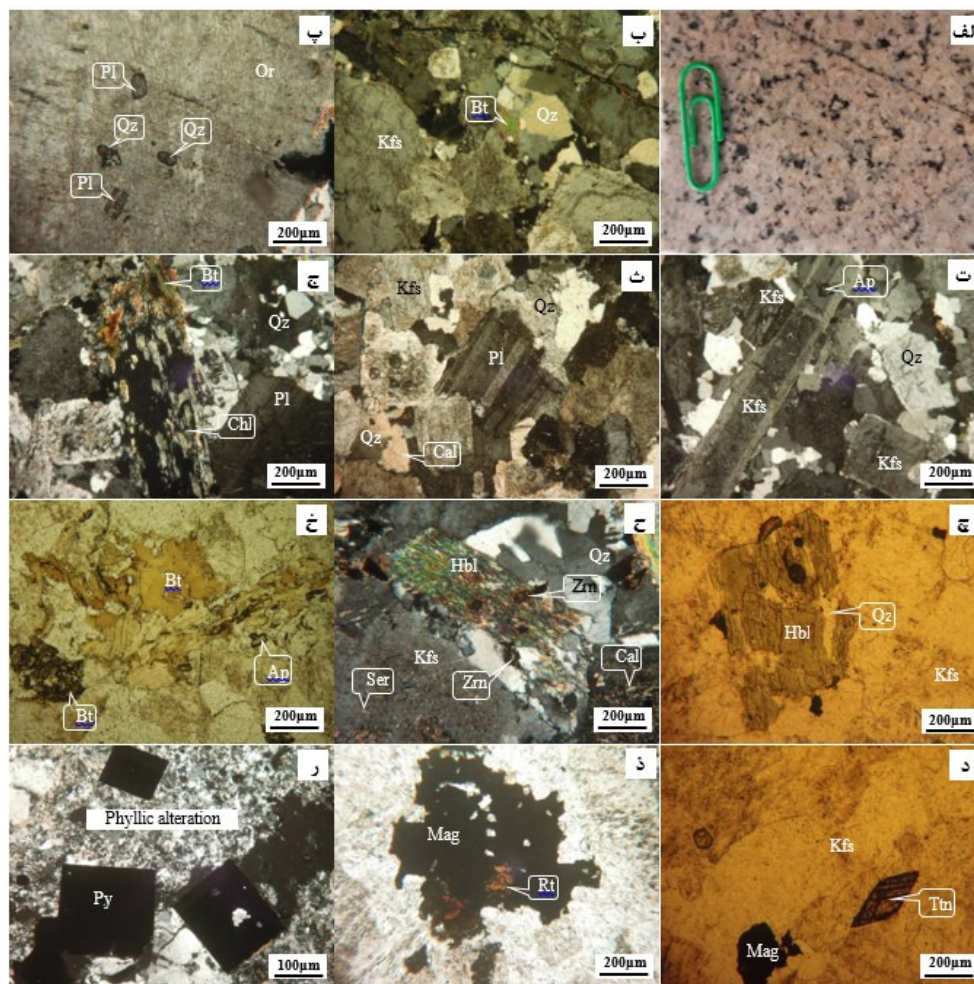
۴-۱- پتروگرافی گرانیت کال کافی

نمونه‌برداری از گرانیتوئید کال کافی از بخش گرانیت حاوی کانی‌سازی مس- مولیبدن انجام شد. کانی‌سازی مس-

مولیبدن پورفیری در حاشیه غربی توده نفوذی کال کافی به صورت توده گرانیتی با رخساره ریزبلور و رنگ روشن اتفاق افتاده است (شکل ۲- الف). این سنگ‌ها از نظر کانی‌شناسی غنی از فلدسپارپتاسیم و کوارتز هستند و

فلدسپارتاسیم و پلاژیوکلاز است. آپاتیت، تیتانیت، زیرکن و مگنتیت در مقادیر ناچیزی در این سنگ‌ها هستند. بلورهای فلدسپارتاسیم (ارتوز) با ماکل کارلسباد از کانی‌های اصلی این سنگ‌هاست که به کانی‌های رسی از جمله کاتولینیت و ایلیت دگرسا شده‌اند و در برخی موارد بافت پرتیت نشان می‌دهند (شکل ۲-پ و ت).

درصد کانی‌های مافیک (هورنبلند و بیوتیت) در آن‌ها بسیار پایین است. بافت اصلی گرانیت کال کافی، هیپ ایدیومورفیک گرانولار است و بافت پوئیکلیتیک و پرتیت نیز از بافت‌های فرعی در این سنگ است (شکل ۲-ب، پ و ت). این سنگ‌ها بافت پورفیری نیز نشان می‌دهند و درشت بلورهای موجود در آن‌ها متشکل از کوارتز،



شکل ۲. الف) نمونه دستی از گرانیت ریزبلور صورتی کال کافی، ب) بافت هیپ ایدیومورفیک گرانولار، XPL، پ) بافت پوئیکلیتیک به صورت فراوانی ادخال‌های پلاژیوکلاز و کوارتز درون درشت بلور ارتوز با بافت پرتیت، XPL، ت) بلورهای فلدسپارتاسیم با ماکل کارلسباد و بلورهای ریز تا درشت کوارتز، سطح بلورهای فلدسپارتاسیم دگرسا شده است، XPL، ث) بلور درشت پلاژیوکلاز با ماکل ظریف پلی سنتتیک که به صورت جزئی تحت تأثیر دگرسازی سربستی قرار گرفته، XPL، ج) دگرسازی فیلیک و کلریتی شدن بیوتیت، XPL، چ) بلور درشت هورنبلند تحت تأثیر دگرسازی سیلیسی، PPL، ح) ادخال‌های زیرکن درون هورنبلند، XPL، خ) تشکیل بیوتیت گرمایی ثانویه در امتداد فضاهای خالی گرانیت، PPL، د) بلور شکل‌دار تیتانیت در زمینه فلدسپارتاسیم، PPL، ذ) درهم‌رشدی مگنتیت و روتیل، XPL، ر) درشت بلورهای شکل‌دار پیریت در زمینه دگرسازی فیلیک، XPL (Ap: آپاتیت، Bt: بیوتیت، Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Hbl: هورنبلند، Kfs: فلدسپارتاسیم، Mag: مگنتیت، Or: ارتوز، Pl: پلاژیوکلاز، Py: پیریت، Qz: کوارتز، Rt: روتیل، Ttn: تیتانیت، Zrn: زیرکن)

Fig. 2. a) Hand specimen's photograph of pink fine-grained Kal-e Kafi granite, b) Hypidiomorphic-granular texture, XPL, c) Poikilitic texture as plagioclase and quartz inclusions within coarse-grained orthoclase, XPL, d) altered K-feldspar showing Carlsbad twinning and fine to coarse quartz, XPL, e) Plagioclase with polysynthetic twinning which altered to sericite, XPL, f) Phillic and chloritic alteration of biotite, XPL, g) Coarse-grained hornblende affected by silicification, PPL, h) Zircon inclusions within hornblende, XPL, i) Secondary hydrothermal biotite at open spaces of granite, PPL, j) euhedral titanite in k-feldspar, PPL, k) intergrowth of magnetite and rutile, XPL, l) euhedral coarse-grained pyrite in phyllic alteration (Ap: apatite, Bt: biotite, Cal: calcite, Chl: chlorite, Hbl: hornblende, Kfs: k-feldspar, Mag: magnetite, Or: orthoclase, Pl: plagioclase, Py: pyrite, Qz: quartz, Rt: rutile, Ttn: titanite, Zrn: zircon).

در برخی موارد، درون درشت بلورهای فلدسپار پتاسیم، ادخال‌هایی از کوارتز و پلاژیوکلاز (بافت پوئیکلیتیک) مشاهده شد که بیانگر رشد تاخیری‌تر فلدسپار پتاسیم نسبت به ادخال‌ها است (شکل ۲- پ). پلاژیوکلازها فراوانی کمتری نسبت به فلدسپارهای پتاسیم دارند و دارای ماکل پلی‌سنتتیک هستند (شکل ۲- ث). بلورهای درشت پلاژیوکلاز تا حدی به سریسیت و کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند. کوارتز به صورت بلورهای ریز تا درشت در نمونه حضور دارد (شکل ۲- ث و ج). گرانیات کال کافی حاوی رگه و رگچه‌های سیلیس، کالکوپیریت و نیز اکسیدهای آهن سوزنی شکل (هماتیت) می‌باشد که نشان می‌دهد سنگ پس از تشکیل تحت تأثیر محلول‌های سیلیسی قرار گرفته است. کانی‌های مافیک موجود در سنگ متشکل از بیوتیت و هورنبلند در مقادیر بسیار کم هستند (شکل ج تا خ) که بیوتیت‌ها در مرحله بعد تحت تأثیر دگرسانی، کلریتی شده‌اند (شکل ۲- ج). بیوتیت‌ها اغلب به رنگ قهوه‌ای تا سبز هستند. آپاتیت، تیتانیت و زیرکن نیز به صورت بلورهای شکل‌دار در مقادیر فرعی در سنگ تشکیل شده‌اند (شکل ۲- ح تا د). کانی‌های اوپک اصلی در این سنگ شامل کالکوپیریت، مولیبدنیت، پیریت و مگنتیت است که در مقادیر فرعی در مقاطع مشاهده شد (شکل ۲- د تا ر). هماتیت، روتیل و گالن نیز در مقادیر ناچیز در نمونه‌ها مشاهده شد (شکل ۲- ذ). حضور تیتانیت، مگنتیت و کوارتز همراه با هورنبلند در این گرانیات‌ها بیانگر فوگاسیته بالای اکسیژن ماگمای مادر است (ونز، ۱۹۸۹). دگرسانی‌های مشاهده شده در نمونه‌های گرانیات کال کافی شامل پتاسیک، فلیک، آرژیلیکی، کلسیتی شدن و کلریتی شدن (تاخیری) است (شکل ۲- ث و ج). کالکوپیریت عمدتاً در بین بلورها و داخل شکستگی و امتداد رخ کانی ارتوز تشکیل شده است. گرانیات کال کافی تحت تأثیر نفوذ و عبور سیالات کانی‌ساز متحمل دگرسانی ضعیف پتاسیک، فلیک و آرژیلیک شده و توسط رگچه‌های نازک سیلیسی در جهات مختلف قطع شده است.

۴-۲- کانی‌سازی منطقه درونزاد

به طور کلی کانی‌سازی مس-مولیبدن پورفیری در سه منطقه درونزاد، برونزاد و اکسیدی روی می‌دهد که کانی‌سازی برونزاد در منطقه کال کافی به جز در بخش‌های کم عمق و به صورت پراکنده به دلیل حاکم بودن شرایط

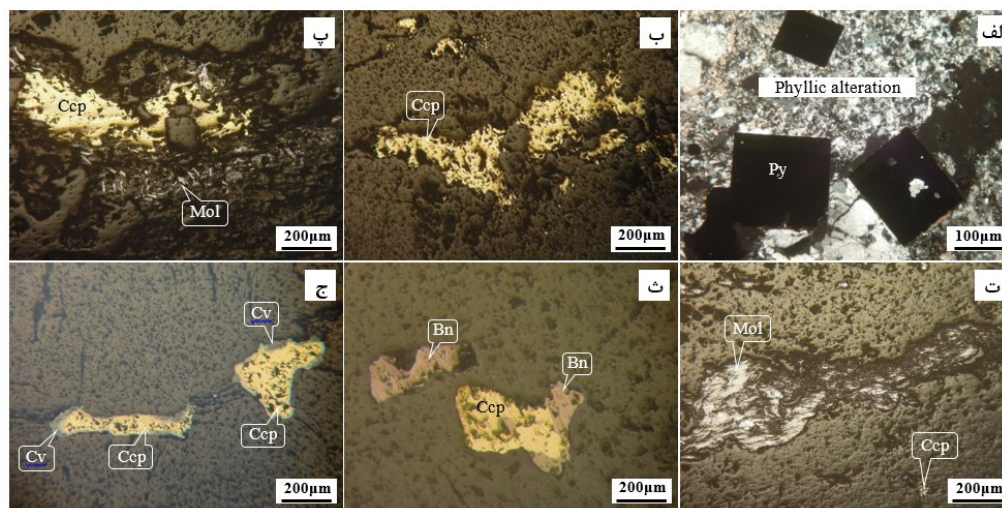
آب و هوایی گرم و خشک و زهکشی زیاد سنگ‌ها گسترش چندانی ندارد (باباخانی و همکاران، ۱۹۹۹). کانی‌سازی مس-مولیبدن درونزاد در گرانیات کال کافی به صورت افشان در متن سنگ و در رگه-رگچه‌های سیلیسی-کربناتی اتفاق افتاده است که کانی‌سازی منطقه درونزاد در اینجا بررسی شده است. کانی‌سازی مس-مولیبدن پورفیری در توده گرانیتی کال کافی در منطقه درونزاد همراه با تمرکز و کانی‌سازی اورانیوم، توریم و عناصر نادر خاکی است (شکل ۳). بیشترین حجم کانی‌سازی سولفیدی مس-مولیبدن درونزاد همراه با دگرسانی‌های پتاسیک (فلدسپارپتاسیم، بیوتیت، فلیک (کوارتز، سریسیت، پیریت) و آرژیلیک رخ داده است. مطالعات مینرالوگرافی و نتایج تجزیه پراش پرتو ایکس نشان می‌دهد که کانی‌های فلزی سولفیدی اولیه موجود در این منطقه شامل پیریت، کالکوپیریت و مولیبدنیت و همچنین کالکوسیت در مقادیر فرعی همراه با مقادیر ناچیزی گالن است (شکل‌های ۴ و ۵). سایر کانی‌های فلزی شامل مگنتیت و روتیل در مقادیر جزئی است. بورنیت، کوپریت و کوولیت نیز از دگرسانی سایر کانی‌های مس در مقادیر ناچیزی حاصل شده‌اند (شکل ۴- ث و ج). دگرسانی پتاسیک با جانشینی آلپیت توسط فلدسپارپتاسیم و تشکیل بیوتیت ثانویه مشخص می‌شود که همزمان با آن، کانی‌سازی مس-مولیبدن اتفاق افتاده است (شکل ۵- ت). درشت بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار پیریت اغلب به صورت پراکنده و منفرد و گاه هم‌رشد با یکدیگر در داخل رگچه‌های سیلیسی-کربناتی وجود دارند (شکل ۴- الف، ۵- الف و ب). گاهی درشت بلورهای پیریت بافت غربالی و جزیره‌ای را نشان می‌دهند که بیانگر خوردگی سطحی و تأثیر شرایط اکسیداسیون در محیط می‌باشد. این کانی اولین کانی سولفیدی تشکیل شده در گرانیات کال کافی است. در برخی موارد، بلورهای درشت پیریت به کالکوپیریت و اکسیدهای آهن دگرسان شده‌اند (شکل ۵- پ). کالکوپیریت مهم‌ترین و فراوان‌ترین سولفید مس در این توده است و به صورت بلورهای بی‌شکل منفرد پراکنده یا به صورت رگه‌ای و گاه به صورت هم‌رشد با پیریت، مولیبدنیت و ایلمنیت همراه با رگچه‌های سیلیسی-کربناته و دگرسانی پتاسیک-فلیک-آرژیلیک وجود دارد (شکل ۴- ب و پ، ۵- الف تا ج). کالکوپیریت همچنین به صورت جانشینی به جای پیریت نیز تشکیل شده است

برخی موارد، کالکوپیریت به صورت هم‌رشد با مگنتیت و یا ادخال مگنتیت درون کالکوپیریت مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تأخر تشکیل فاز کالکوپیریت نسبت به مگنتیت است (شکل ۵-ج).

(شکل ۵-پ) و خود توسط بورنیت، کالکوسیت و کوولیت جایگزین شده است (شکل ۴-ث و ج، ۵-ث تا ج). با توجه به درشت و شکل‌دار بودن بلورهای پیریت و تشکیل کالکوپیریت از دگرسانی پیریت می‌توان نتیجه گرفت که تشکیل پیریت پیش از کالکوپیریت اتفاق افتاده است. در

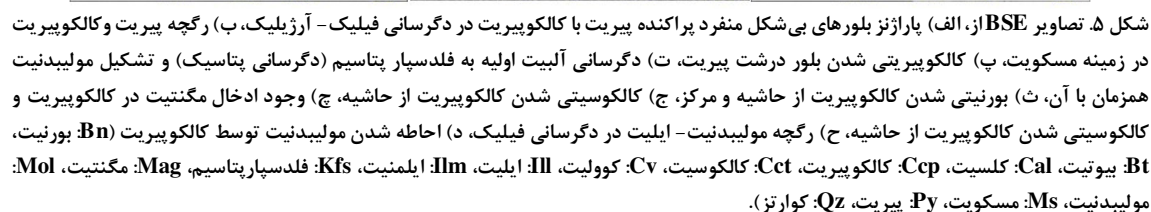
مراحل کانی‌سازی	کانی سازی درون‌زاد	غنی سازی برون‌زاد
کانی		
کالکوپیریت		
پیریت		
مولیبدنیت		
کالکوسیت		
بورنیت		
کوولیت		
کوپریت		
مگنتیت		
ایلمنیت		
مالین		
روتیل		
اوراتینیت توریم‌دار		
اوراتوتوریت		
توریت اوراتوم‌دار		
باستانازیت		
پاریسیت		
موتازیت		
زیرکن		
کوارتز		
کلسیت		
فلدسپار پتاسیم		
سریسیت		
اپلیت		

شکل ۳. توالی پاراژنی کانی‌سازی مس-مولیبدن و اورانیوم، توریم و عناصر نادر خاکی در منطقه درون‌زاد کانسار کال کافی
Fig. 3. Paragenetic sequence for the hypogene Cu-Mo and U-Th-REE mineralization in the Kal-e Kafi deposit



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک- صیقلی کانسار کال کافی از، الف) درشت بلورهای شکل‌دار پیریت در زمینه دگرسانی فیلیک، XPL، ب) رگچه کالکوپیریت در گرانیت، پ) رگچه کلسیتی و سیلیسی حاوی کالکوپیریت و مولیبدنیت، ت) رگچه مولیبدنیت قطع کننده گرانیت، ث) بورنیتی شدن کالکوپیریت، ج) کوولیتی شدن کالکوپیریت (Bn: بورنیت، Ccp: کالکوپیریت، Cv: کوولیت، Mol: مولیبدنیت، Py: پیریت).

Fig. 4. Photomicrographs of Kal-e Kafi thin-polished sections showing, a) Euhedral coarse-grained pyrite in phyllic alteration, XPL, b) Chalcopyrite veinlet in granite, c) Quartz-calcite veinlet containing chalcopyrite and molybdenite, d) molybdenite veinlet cutting granite, e) Replacement of chalcopyrite by bornite, f) alteration of chalcopyrite to covellite (Bn: bornite, Ccp: chalcopyrite, Cv: covellite, Mol: molybdenite, Py: pyrite).

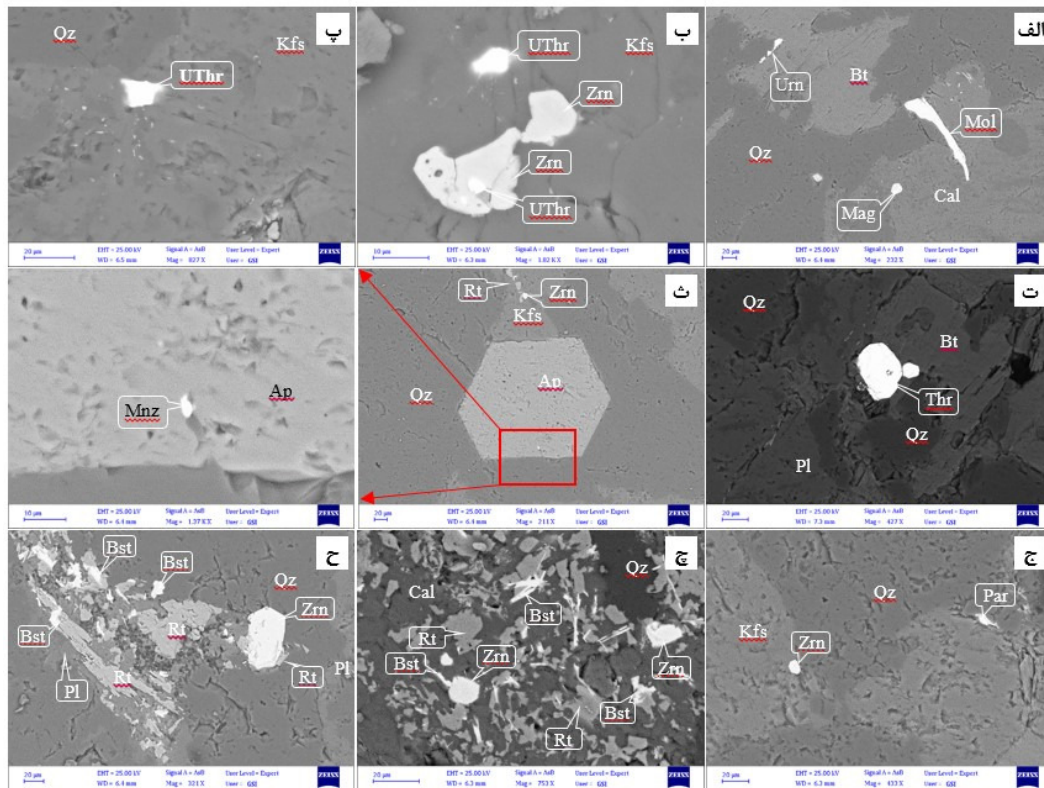


مولیدنیت است و احتمالاً در بیشتر مواقع در ارتباط و همزمان با تبلور گرانیات و قبل از شروع سولفیدزایی است. مگنتیت در بسیاری از موارد ماریتی شده است. مگنتیت به مقدار ناچیزی در داخل رگچه‌های سیلیسی-کربناته حضور دارد. کانی اصلی میزبان اورانیوم و توریم در کانسار کال کافی، اورانینیت توریم‌دار، اورانوتوریت و توریت اورانیوم‌دار است (شکل ۶-الف تا ت). اورانینیت به صورت نیمه شکل‌دار و پراثرن با مولیدنیت و مگنتیت و به صورت ادخال در کانی‌های اصلی تشکیل دهنده گرانیات کال کافی وجود دارد (شکل ۶-الف). بلورهای اورانینیت حاوی حداکثر ۱۰ درصد توریم هستند. اورانوتوریت و توریت اورانیوم‌دار به صورت ادخال نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار در

مولیبدنیت عمدتاً به صورت بلورهای کشیده پراکنده و منفرد یا رگه‌ای و گاه به صورت هم‌رشد با کالکوپیریت تشکیل شده است (شکل ۴- پ و ت، ۵- ح و خ). در برخی از موارد کالکوپیریت کانی مولیبدنیت را احاطه نموده و در طول شکستگی‌های درون آن نفوذ نموده است، که این می‌تواند بیانگر تشکیل مولیبدنیت قبل از ایجاد بلورهای کالکوپیریت باشد. گاهی نیز مشاهده می‌شود که بلورهای کالکوپیریت توسط رشته‌های مولیبدنیت قطع شده‌اند و این حاکی از رشد تأخیری مولیبدنیت نسبت به دانه‌های کالکوپیریت است (شکل ۵- خ).

به صورت ادخال ریز شکل‌دار در کانی آپاتیت تشکیل شده است (شکل ۶-ث). پارسیت نیز به صورت ادخال در زمینه کانی فلدسپارتاسیم و کوارتز مشاهده شد (شکل ۶-ج). باستانزیت عمدتاً به صورت بلورهای کشیده و گاه نیمه شکل‌دار در فضاهای خالی و حفرات حاصل از دگرسانی کانی‌های اولیه گرانیات (دگرسانی پتاسیک، سیلیسی و کلسیتی) همراه با روتیل، زیرکن، مگنتیت و ایلمنیت تشکیل شده است (شکل ۶-چ و ح). براساس نتایج آنالیز ایدکس میکروسکوپ الکترونی، باستانزیت و پارسیت حاوی سریم (۳۳/۵-۱۷/۷ درصد)، لانتانیم (۵/۱۹-۳/۹ درصد) و نئودیمیم (۵/۱۲-۸/۹ درصد) هستند (جدول ۳).

زمینه فلدسپارتاسیم، بیوتیت و پلاژیوکلاز سیلیسی شده تشکیل شده است (شکل ۶-ب تا ت). فلدسپارتاسیم حاوی ادخال‌هایی از کالکوپیریت، زیرکن، توریت، مگنتیت و ایلمنیت است (شکل ۶-ت). کانی اورانوتوریت تا ۳۰ درصد دارای اورانیوم است (جدول ۳). آنالیز ایدکس میکروسکوپ الکترونی برخی بلورهای زیرکن در کانسار کال کافی مقدار ۱۲-۹ درصد نئودیمیم را نشان داد. این کانی عمدتاً به صورت ادخال شکل‌دار و گاهی نیمه شکل‌دار در بیوتیت، فلدسپارتاسیم و پلاژیوکلاز تشکیل شده است (شکل ۶-ت). از کانی‌های عناصر نادر خاکی در منطقه درونزاد کانسار کال کافی می‌توان به مونازیت، باستانزیت و پارسیت اشاره نمود (شکل ۶-ت تا ح). مونازیت به ندرت



شکل ۶. تصاویر BSE از، الف) تشکیل اورانینیت و مولیبدنیت همزمان با سیلیسی و کلسیتی شدن، ب) ادخال اورانوتوریت و زیرکن در زمینه فلدسپارتاسیم سیلیسی شده، پ) ادخال اورانوتوریت در زمینه فلدسپارتاسیم، ت) ادخال توریت اورانیوم‌دار در بیوتیت و پلاژیوکلاز سیلیسی شده، ث) ادخال مونازیت در بلور درشت شکل‌دار آپاتیت، ج) ادخال زیرکن و پارسیت در فلدسپارتاسیم و کوارتز، چ) درهم‌رشدی باستانزیت، زیرکن و روتیل در دگرسانی سیلیسی و کلسیتی، ح) درهم‌رشدی باستانزیت، روتیل و زیرکن در فضاهای خالی حاصل از دگرسانی سیلیسی پلاژیوکلاز (Ap: آپاتیت، Bst: باستانزیت، Bt: بیوتیت، Cal: کلسیت، Kfs: فلدسپارتاسیم، Mag: مگنتیت، Mnz: مونازیت، Mol: مولیبدنیت، Par: پارسیت، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز، Rt: روتیل، Thr: توریت، Urn: اورانینیت، Uthr: اورانوتوریت، Zrn: زیرکن).

Fig. 6. BSE images, a) Formation of uraninite and molybdenite paragenesis with silicic and calcitic alterations, b) Urano-thorite and zircon inclusions within silicified K-feldspar, c) Urano-thorite inclusion in K-feldspar, d) Uranium-bearing thorite inclusion in biotite and silicified plagioclase, e) Monazite inclusion in euhedral coarse-grained apatite, f) Zircon and parasite inclusions in K-feldspar and quartz, g) Intergrowth of bastnasite, zircon and rutile in silicic and calcitic alterations, h) Intergrowth of bastnasite, rutile and zircon in open spaces during silicification of plagioclase (Ap: apatite, Bst: Bastnasite, Bt: biotite, Cal: calcite, Kfs: k-feldspar, Mag: magnetite, Mnz: monazite, Mol: molybdenite, Par: parasite, Pl: plagioclase, Qz: quartz, Rt: rutile, Thr: thorite, Urn: uraninite, Uthr: urano-thorite, Zrn: zircon).

جدول ۳. آنالیز EDS برخی کانی‌های میزبان اورانیوم، توریم و یا عناصر نادر خاکی (برحسب درصد)

Table 3. EDS analyses of some U, Th and REE host minerals (%)

Total	F	O	C	Nd	Ce	La	Ca	
100	1.8	15.7	6.1	9.7	28.3	19.5	18.9	پاریسیت
100	4.1	24.5	8.2	-	30.2	17.8	15.2	
100	5.9	27.6	8.4	-	27.5	14.1	16.5	
98.2	5.9	21.6	6.4	8.9	24.8	14.7	15.9	
100	9.1	26.4	8.1	12.5	17.5	9.3	17.1	
90	11.6	33.3	8.7	-	25.8	10.6	-	باستانازیت
100.3	7.7	24.2	7.4	12.5	33.5	15	-	
100	9.5	25.9	6.8	11.2	33.5	13.1	-	
100	4.7	28.5	8.7	12.4	26.6	19.1	-	
			Total	O	Si	U	Th	
			100	14.7	7.1	16.7	61.5	اورانوتوریت
			100	12.6	7.1	15.1	65.2	
			100	14.5	8.1	15.1	62.3	
			100	14.7	7.1	16.8	61.4	
			100	13.7	10.2	29.7	46.4	
			100	20.1	9.6	3.4	66.9	توریت
			100	16.8	10.3	2.8	70.1	
			100	18.7	8.7	6.4	66.2	
			100	13.7	-	77.2	9.1	اورانینیت
			100	14.6	-	75.6	9.8	

۴-۳- ژئوشیمی

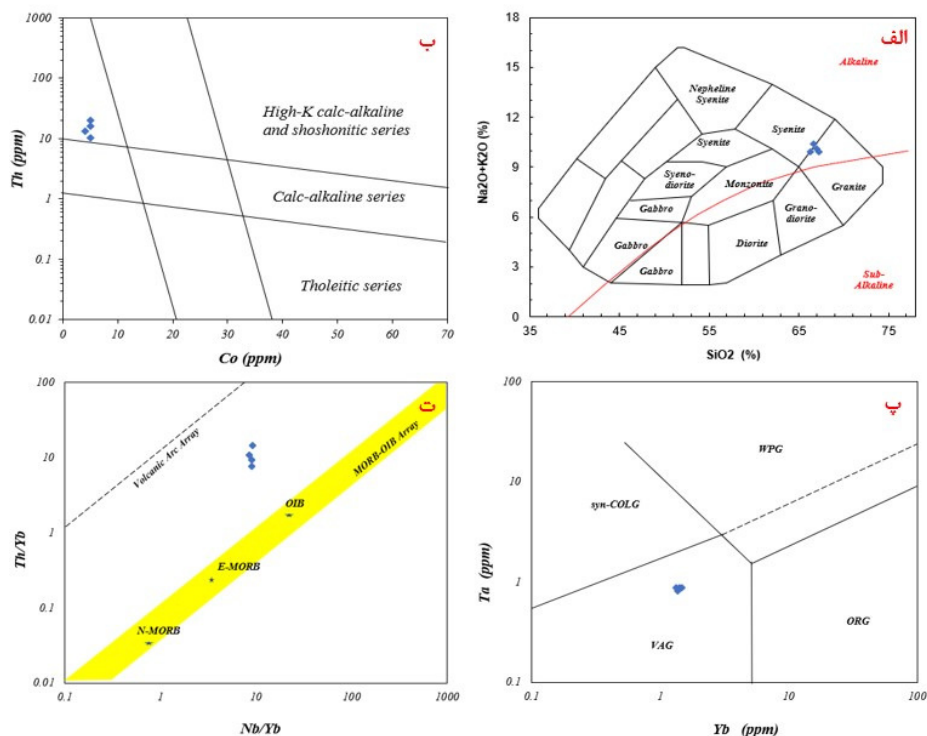
جهت بررسی خصوصیات ژئوشیمیایی، نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی تعداد ۴ نمونه از گرانیات کال کافی از احمدیان (۲۰۱۲) استخراج و در جدول ۲ آورده شده است. براساس شکل ۷، نمونه‌ها در محدوده گرانیات تصویر شده‌اند. براساس نمودار ایروین و باراگار (۱۹۷۱)، گرانیات کال کافی در محدوده ساب‌آلکالن به سمت آلکالن قرار گرفته‌اند (شکل ۷- الف). در نمودار Co در برابر Th (هاستیه و همکاران، ۲۰۰۷)، گرانیات‌ها در محدوده ماگماهای سری کالک‌آلکالن با محتوای بالای پتاسیم یا شوشونیتی قرار می‌گیرند (شکل ۷- ب). ماگمای شوشونیتی به دلیل درجات مختلف ذوب بخشی مناطق غنی شده در منابع گوشته‌ای دورگه (یانگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ کاستا و همکاران، ۲۰۲۰) و یا عوامل مختلف متاسوماتیت در منابع گوشته‌ای غنی شده (زامبونی و همکاران، ۲۰۱۶)، اغلب همراه با ماگمای کالک‌آلکالن پتاسیم بالا است. همچنین، فرآیندهای تفریق ماگما می‌تواند سبب گذار از ماگماهای کالک‌آلکالن به شوشونیتی شود (فنگ و ژو، ۲۰۱۹). از نظر کانی‌شناسی، مجموعه کانی‌های مافیک در سری‌های تولیتی شامل کلینوپروکسن ± اولیوین ± آمفیبول ± بیوتیت است و در

مقابل سری‌های کالک‌آلکالن با مقدار پتاسیم بالا عمدتاً حاوی کانی‌های آبدار آمفیبول و بیوتیت هستند (ایم و همکاران، ۲۰۲۱). با توجه به وجود آمفیبول و بیوتیت در گرانیات کال کافی و عدم وجود کلینوپروکسن می‌توان نتیجه گرفت که گرانیات کال کافی دارای ماهیت کالک‌آلکالن پتاسیم بالا است. جهت تعیین محیط تکتونیکی گرانیات کال کافی از نمودارهای ارائه شده توسط پیرس و همکاران (۱۹۸۴) و پیرس (۲۰۰۸) استفاده شده است. براساس نمودار Yb در برابر Ta، گرانیات‌های مورد مطالعه از نوع گرانیات کمرندهای آتشفشانی پهنه فرورانش هستند (شکل ۷- پ). براساس نمودار Th/Yb در برابر Nb/Yb، گرانیات‌های کال کافی در موقعیت تکتونیکی کمان آتشفشانی قرار می‌گیرند (شکل ۷- ت). در نتیجه می‌توان بیان کرد که تشکیل این توده در ارتباط با کمان ماگمایی ارومیه- دختر بوده است.

جهت بررسی خصوصیات ژئوشیمیایی منطقه کانی‌سازی درونزاد، تعداد ۵ نمونه از گرانیات حاوی کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه انتخاب و آنالیز شد (جدول ۱). مقادیر عناصر نادر خاکی و عناصر نامتحرک در نمونه‌های کانسنگ مورد مطالعه نسبت به کندریت (سان و مک‌دونگ، ۱۹۸۹) بهنجار شد و در شکل ۸ ارائه گردیده است. الگوی بهنجار شده عناصر نادر خاکی نشان می‌دهد که عناصر نادر خاکی

سبک نسبت به سنگین را نشان می‌دهد. عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین ۱۹-۱۴ برابر غنی‌شدگی دارند. مقادیر REE در نمونه‌های مورد مطالعه از ۷۲/۱ تا ۱۱۱/۴ پی‌پی‌ام تغییر می‌کند.

سبک (LREE) به شدت تفریق یافته‌اند، در حالی که عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) با شیب آرامی تفریق پیدا کرده‌اند. همچنین الگوی بهنجار شده عناصر نادر خاکی، ناهنجاری ضعیفی از Eu و غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی

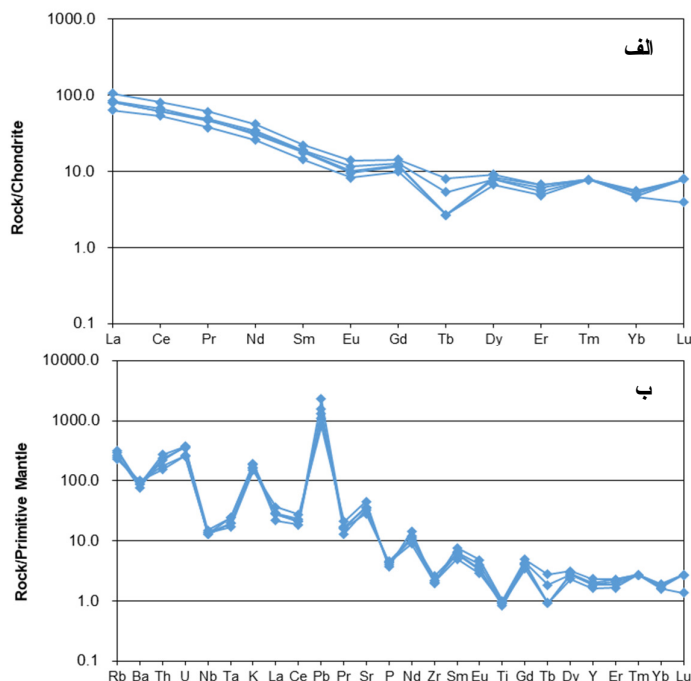


شکل ۷. الف) نمودار نام‌گذاری نمونه‌ها و تفکیک سنگ‌های آذرین آلکالن از ساب‌آلکالن، نمونه‌ها در محدوده گرانیات قرار گرفته‌اند، ب) نمودار تعیین سری ماگمایی، همه نمونه‌ها در محدوده آلکالن قرار گرفته‌اند، پ و ت) نمودارهای تعیین موقعیت تکتونیکی، همه نمونه‌ها در موقعیت کمان آتشفشانی واقع شده‌اند.

Fig. 7. a) Discrimination and classification diagrams for the igneous rocks, the samples plot on granite field, b) Magma series classification diagrams, the Kal-e Kafi granite put in alkaline series, c,d) Tectonic discrimination diagram, the samples plot in volcanic arc setting.

عمدتاً اورانیوم، اورانوتوریانیت و اورانوتوریت در سنگ‌های با منشأ ماگمای نفوذی یا آتاکسی تشکیل شده‌اند. این نوع ذخیره دارای پنج زیر رده آلکسیت، کوارتز مونزونیت (مس پورفیری)، کربناتیت، سینیت پرآلکالن و پگماتیت‌ها است (جدول ۴). این کانسارها به غیر از زیررده پگماتیت‌ها معمولاً عیار بسیار پایینی (۲۰-۴۰ پی‌پی‌ام اورانیوم) دارند ولی می‌توانند حجم ذخیره نسبتاً بالایی داشته باشند (دالکمپ، ۱۹۹۳، ۲۰۰۹). ذخایر نوع کوارتز مونزونیت حاوی کانی‌سازی اورانیوم با عیارهای بسیار پایین در کمپلکس‌های گرانیته به شدت تفریق یافته تا کوارتز مونزونیتی میزبان کانی‌سازی مس پورفیری به صورت کانی‌های اورانیوم پراکنده می‌باشند (دالکمپ، ۱۹۹۳، ۲۰۰۹).

الگوی بهنجار شده عناصر نام‌تحرک در شکل ۸-ب مشابه با الگوهای مربوط با مناطق فروانش به صورت دندان‌های و زیگزاگی شکل می‌باشد. وجود ناهنجاری منفی Nb، Ta، P، و Ti، آنومالی مثبت Sr و غنی‌شدگی زیاد Th از ویژگی‌های ماگماهای مرتبط با فروانش است (پیرس و کان، ۱۹۷۳؛ ویلسون، ۱۹۸۹). براساس شکل ۸، عناصر اورانیوم، توریم و نادر خاکی در کانی‌سازی درونزاد کال کافی به شدت غنی شده‌اند. مقادیر مس و مولیبدن در نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب در محدوده ۳۷۰ تا ۵۵۷۸ و ۱۰/۱ تا ۱۱۹۳/۱ پی‌پی‌ام با میانگین ۲۷۴۰ و ۲۹۶ پی‌پی‌ام تغییر می‌کند. براساس طبقه‌بندی دالکمپ (۱۹۹۳، ۲۰۰۹) و آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (۲۰۱۸)، یکی از انواع ذخایر اورانیوم، ذخایر نفوذی هستند که کانی‌های اورانیوم اولیه



شکل ۸. نمودارهای عنکبوتی عناصر، الف) ناسازگار و ب) نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت نمونه‌های کانسنگ

Fig. 8. Chondrite normalized a) incompatible elements and b) REE patterns of the ore samples

جدول ۴. خصوصیات زیررده‌های ذخایر اورانیوم نفوذی (دالکمپ، ۱۹۹۳، ۲۰۰۹؛ سازمان بین‌المللی انرژی اتمی، ۲۰۱۸) و مقایسه کانسار کال کافی با زیررده گرانیت- مونزونیت (مس پورفیری)

Table 4. The characteristics of various sub-types of intrusive uranium deposits (Dahlkamp, 1993, 2009; IAEA, 2018) and comparison of the Kal-e Kafi deposit with granite- monzonite subtype (Cu porphyry)

ویژگی‌ها	ذخایر اورانیوم نفوذی					کانسار کال کافی
	آلاسکیت	کربناتیت	سینیت پرآلکالین	پگماتیت	گرانیت- مونزونیت (مس پورفیری)	
توع توده نفوذی و ارتباط آن با کانی‌سازی	همزمان با نفوذ (گرانیتی شدن)	همزمان با نفوذ (ارتوماگمایی)	همزمان با نفوذ (ارتوماگمایی)	همزمان با نفوذ (ماگما، تفریق یافته)	همزمان با نفوذ (گرانیتی شدن)	همزمان با نفوذ گرانیتوئید کال کافی
محیط تکتونیکی تشکیل توده نفوذی مرتبط با کانی‌سازی	همزمان تا پس از کوه‌زایی در داخل کمربندهای متحرک درون کراتونی	همزمان تا پس از کوه‌زایی در داخل کمربندهای متحرک درون کراتونی	همزمان تا پس از کوه‌زایی در داخل کمربندهای متحرک درون کراتونی	همزمان تا پس از کوه‌زایی در داخل کمربندهای متحرک درون کراتونی	همزمان تا پس از کوه‌زایی در داخل کمربندهای متحرک درون کراتونی	مرتبط با کمان‌های آتشفشانی و همزمان تا پس از کوه‌زایی
نوع سنگ میزبان	سنگ میزبان: آلاسکیت متوسط تا بسیار درشت‌دانه حاصل از ذوب برجا	سنگ میزبان: کمپلکس کربناتیتی تفریق یافته همراه با کانی‌سازی عناصر نادر خاکی	سنگ میزبان: توده نفوذی آلکالین	سنگ میزبان: پگماتیت به صورت استوک‌های ماگمایی اسیدی	سنگ میزبان: گرانیت به شدت تفریق یافته یا مونزونیت همراه با کانی‌سازی مس پورفیری	سنگ میزبان: گرانیت حاوی کانی‌سازی مس-مولیبدن پورفیری
نحوه کانی‌سازی	کانی‌سازی اورانیوم بصورت پراکنده و منظم	کانی‌سازی اورانیوم بصورت پراکنده و منظم	کانی‌سازی اورانیوم بصورت پراکنده و منظم	کانی‌سازی اورانیوم به صورت عدسی و نامنظم	کانی‌سازی اورانیوم بصورت پراکنده و منظم	اورانینیت، اورانوتوریت و توریت اورانیوم‌دار به صورت پراکنده
عیار	ذخیره با تناژ بالا و عیار بسیار پایین اورانیوم	عیار بسیار پایین اورانیوم	عیار بسیار پایین اورانیوم	عیار متغیر اورانیوم و اغلب پایین	عیار بسیار پایین اورانیوم	عیار ۵ تا ۷ بی‌بی‌ام اورانیوم (منطقه کانی‌سازی درون‌زاد)
نمونه‌ای از ذخیره	راسینگ (تامییا)	یالابورا (آفریقای جنوبی)	ایلی‌ماساک (گرینلند)	بانکرافت (کانادا)	بینگهام (آمریکا)	

محتوای توریم در نمونه‌های مورد مطالعه از ۱۳/۱ تا ۲۳/۲ پی‌پی‌ام در نوسان است. همبستگی اورانیوم و توریم با مس (۰/۷۵، ۰/۱۹) و مولیبدن (۰/۵۸ و ۰/۲) مثبت است که بیانگر کانی‌سازی اورانیوم و توریم همراه با کانی‌سازی مس و مولیبدن در منطقه درونزاد است. کانی‌سازی اورانیوم در کانسار کال کافی منطبق با خصوصیات زیررده گرانیت-مونزونیت (مس پورفیری) در ذخایر اورانیوم نفوذی می‌باشد (جدول ۴).

۵- نتیجه‌گیری

براساس مطالعات میکروسکوپی و ژئوشیمی سنگ میزبان کانی‌سازی درونزاد مس-مولیبدن، ترکیب سنگ‌شناختی این بخش از توده گرانیتوئیدی کال کافی گرانیت بوده و مشخصات یک ماگمای کالک‌آلکالین با محتوای بالای پتاسیم را دارد. براساس نمودارهای ژئوشیمیایی، این گرانیت‌ها در محیط تکتونوماگمایی مرتبط با فرورانش (کمان‌های آتشفشانی) شکل گرفته‌اند. نظر به اینکه طبق نظر دالکمپ (۱۹۹۳، ۲۰۰۹)، ذخایر مس-مولیبدن پورفیری در محیط‌های تشکیل همزمان تا پس از کوه‌زایی مستعد غنی‌شدگی اورانیوم هستند، گرانیت کال کافی حاوی کانی‌سازی اورانیوم نیز در موقعیت تکتونیکی همزمان تا پس از کوه‌زایی تشکیل شده است. وجود گسترده کانی‌های سولفیدی اولیه مانند کالکوپریت، پیریت، مولیبدنیت و کالکوسیت در سنگ‌های مورد مطالعه و فراوانی بسیار کم بورنیت، کوپریت و کوولیت که به صورت ثانویه و در اثر جانمایی کالکوپریت تشکیل شده‌اند، بیانگر شرایط درونزاد و نقش گرانیت کال کافی در کانی‌سازی مس-مولیبدن است. در این کانسار علاوه بر کانی‌سازی مس و مولیبدن، کانی‌های اورانیوم، توریم و عناصر نادر خاکی نیز در منطقه درونزاد مشاهده می‌شود. کانی اصلی میزبان اورانیوم و توریم اورانینیت توریم‌دار، اورانوتوریت و توریت اورانیوم‌دار است که به صورت پراکنده در کانی‌سازی درونزاد گرانیت کال کافی تشکیل شده است. بلورهای اورانینیت و اورانوتوریت به ترتیب حاوی حداکثر ۱۰ درصد توریم و ۳۰ درصد اورانیوم هستند. کانی‌های اصلی میزبان عناصر نادر خاکی مونازیت، باستنازیت و پاریسیت است که محتوای سریم، لانتانیم و نئودیمیم در آن‌ها به ترتیب از ۱۷/۷ تا ۳۳/۵، ۹/۳ تا ۱۹/۵ و ۸/۹ تا ۱۲/۵ درصد تغییر می‌کند. میانگین مقدار عناصر مس، مولیبدن، اورانیوم،

رفتار ناسازگار اورانیوم در ماگماهای سیلکاته منجر به تمرکز اورانیوم در مذاب‌های فلسیک شده است و همچنین سبب شده است که گرانیت‌ها و ریولیت‌ها به عنوان منابع اولیه اورانیوم در تشکیل ذخایر اورانیوم شناخته شوند. با این وجود، ذخایر اورانیومی که مستقیماً از فرآیندهای ماگمایی نشأت گرفته باشند، بسیار نادر هستند (کونی، ۲۰۱۴). غنی‌شدگی اورانیوم در سیستم‌های پورفیری مرتبط با سنگ‌های آذرین کالک‌آلکالین غیر معمول است و در مقابل، اورانیوم در ذخایر پورفیری مرتبط با توده‌های نفوذی آلکالین غنی‌شدگی نشان می‌دهد (رایس و همکاران، ۱۹۸۵؛ ریچاردز و مومین، ۲۰۱۳). اورانیوم در سنگ‌های ماگمایی محدوده کانسار Vathi دارای غلظت متوسط تا بالا (۱۴ تا ۱۰۶ پی‌پی‌ام) است که در بخش‌های سطحی و برشی مقدار آن تا حداکثر ۳۲۸ پی‌پی‌ام می‌رسد. تمرکز بالای اورانیوم در این منطقه در ارتباط با مراحل نهایی تبلور ماگمای آلکالین در حین حرکت در امتداد گسل‌های عمیق منطقه‌ای است (استرجیو و همکاران، ۲۰۲۱). اورانیوم به صورت محصول جانبی بین سال‌های ۱۹۷۸ تا ۱۹۸۹ در کانسار مس پورفیری بینگهام در ایالت یوتا آمریکا استحصال شد و عیار اورانیوم در کانسنگ مس-مولیبدن ۲۰ تا ۵۰ پی‌پی‌ام گزارش شده بود (دالکمپ، ۲۰۰۹، ۲۰۱۰). براساس یوستن و بالانتین (۲۰۱۰)، مقدار اورانیوم در بخش‌های عمیق و منطقه درونزاد در این کانسار بین ۵ تا ۷ پی‌پی‌ام بود. در این ذخیره هیچگونه کانی مستقل اورانیوم مشاهده نشده است و گمان بر این است که اورانینیت یا اورانوتورینیت با ابعاد میکرونی وجود داشته باشند (دالکمپ، ۲۰۱۰، جان و تیلور، ۲۰۱۶). همچنین اورانیوم به صورت محصول جانبی از ذخیره مس پورفیری توئین بوتز در ایالت آریزونا آمریکا بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۵ استحصال می‌شد (دالکمپ، ۲۰۰۹، ۲۰۱۰).

چهار نوع گرانیت یا ریولیت شامل پرآلکالین، کالک‌آلکالین متآلومین با محتوای بالای پتاسیم یا شوشونیتی، پرآلومین نوع I و پگماتیت‌های آناتکسی می‌توانند حاوی مقادیر قابل توجهی اورانیوم به عنوان منبع تأمین این عنصر برای تشکیل ذخایر اورانیوم باشند (کونی، ۲۰۱۴). نمونه‌های گرانیت کال کافی به دلیل ماهیت کالک‌آلکان با محتوای بالای پتاسیم نیز غنی‌شدگی اورانیوم را نشان می‌دهند (شکل ۸-ب). مقدار اورانیوم در نمونه‌های مورد مطالعه از ۵/۴ تا ۷/۸ پی‌پی‌ام با میانگین ۷ پی‌پی‌ام متغیر است.

- Districts, Utah. Society of Economic Geologists, Guidebook Series, 41: 35-49. doi:10.5382/GB.41.004.
- Babakhani, A., Radfar, J., and Majidi, J (1999) Remote sensing studies in Kuh-e Khuni- Kuh-e Kal-e Kafi. National Iranian Copper Industries Company, 36p (in persian).
- Casetta, F., Ickert, R. B., Mark, D. F., Giacomoni, P. P., Bonadiman, C., Ntaflos, T., Zanetti, A., and Coltorti, M (2020) The Variscan subduction inheritance in the southern Alps sub-continental lithospheric mantle: clues from the Middle Triassic shoshonitic magmatism of the dolomites (NE Italy), *Lithos*, 17: 380-381. doi:10.1016/j.lithos.2020.105856.
- Cuney, M (2014) Felsic magmatism and uranium deposits. *Bulletin of Society geology of France*, 185 (2): 75-92. doi:10.2113/gssgfbull.185.2.75.
- Dahlkamp, F. J (1993) *Uranium Ore Deposits*, Springer, Berlin, 460p.
- Dahlkamp, F. J (2009) *Uranium Deposits of the World: Asia*, Springer, Berlin, 508p.
- Dahlkamp, F. J (2010) *Uranium Deposits of the World: USA and Latin America*, Springer, Berlin, 535p.
- Feng, W., and Zhu, Y (2019) Petrogenesis and tectonic implications of the Late Carboniferous calc-alkaline and shoshonitic magmatic rocks in the Awulale Mountain, Western Tianshan. *Gondwana Research*, 76: 44-61. doi:10.1016/j.gr.2019.05.009.
- Hastie, A. R., Kerr, A. C., Pearce, J. A., and Mitchell, S. F (2007) Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48: 2341-2357. doi:10.1093/petrology/egm062.
- Heidarian, N., and Rasa, I (2011) Evolution of geochemistry and economic potential of ore veins in Kal-e Kafi- Khoni area, with regard to Au. *Journal of Geotechnical Geology*, 7: 17-28 (in persian).
- IAEA (2018) *Geological Classification of Uranium Deposits and Description of Selected Examples*, IAEA-TECDOC-1842, IAEA, Vienna, 430p.
- Im, S., Park, J. W., Kim, J., Choi, S. G., and Lee, M. J (2021) Petrogenesis of coeval shoshonitic and high-k calc-alkaline igneous suites in the Eopyeong granitoids, Taebaeksan Basin, South Korea: lithospheric thinning-related Early Cretaceous magmatism in the Korean Peninsula. *Lithos*, 392-393: 106-127. doi:10.1016/j.lithos.2021.106127.
- Irvine, T. N., and Baragar, W. R. A (1971) A guide to the chemical classification of common rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523-548. doi:10.1139/e71-055.
- John, D. A., and Taylor, R. D (2016) By-products of porphyry copper and molybdenum deposits, In: Verplanck, P. L., and Hitzman, M. W., توریم و نادر خاکی در منطقه کانی‌سازی درونزاد کانسار کال کافی به ترتیب ۲۷۴۰، ۲۹۶، ۶/۸، ۱۷/۹ و ۸۹/۴ پی‌پی‌ام است. کانی‌سازی مس، مولیبدن و اورانیوم در کانسار کال کافی همزمان با نفوذ گرانیتوئید کال کافی در محیط کمان‌های آتشفشانی و همزمان تا پس از کوهزایی به صورت کانی‌های اورانینیت، اورانوتوریت و توریت اورانیوم‌دار و پراکنده با دامنه عیاری ۵ تا ۷ پی‌پی‌ام تشکیل شده است که با ویژگی‌های ذخایر اورانیوم نوع نفوذی (زیررده گرانیت- مونزونیت) انطباق دارد و در آن زیر رده قرار می‌گیرد.
- ۶- تشکر و قدردانی**
- این پژوهش با حمایت‌های مادی و معنوی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انجام شده است و از مسئولین و کارشناسان محترم مربوطه سپاسگزاری می‌شود.
- References**
- Adib, D (1972) Mineralogische untersuchungen in der oxydations-zone der lagerstätte Tschah-Khuni, Anarak, Zentral Iran. PhD dissertation, University Heidelberg, Heidelberg, Germany, 194p.
- Ahmadian, J (2012) *Geochemistry, Mineral Chemistry and Petrology of Kal-e Kafi Ore-bearing intrusive bodies, E Anarak*, PhD dissertation, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (in persian).
- Ahmadian, J., Emami, M. H., Ghorbani, M. R., and Murata, M (2007) Mineralogical-geochemical characteristics of potassic granitoid in regard with other granitoid in Kal-e Kafi complex (NE. Anarak). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 16(63): 154-163 (in persian). doi:10.22071/gsj.2008.58534.
- Ahmadian, J., Michael, H., McDonald, I., Regelous, M., Ghorbani, M. R., and Murata, M (2009) High magmatic flux during Alpine- Himalayan collision: constraints from the Kal-e-Kafi complex, Central Iran. *Bulletin of the Geological Society of America*, 121(5-6): 857-868. doi:10.1130/B26279.1.
- Amini, B., and Soheili, M (2000) Geological studies and exploration of Au, Cu and other metals in Kal-e Kafi- Khuni area. *The Geological Survey and Mineral Exploration of Iran*, 115p (in persian).
- Austen, G., and Ballantyne, G (2010) Geology and geochemistry of deep molybdenum mineralization at the Bingham Canyon mine, Utah, USA, In: Krahulec, K., and Schroeder, K., (eds.), *Tops and Bottoms of Porphyry Copper Deposits: The Bingham and Southwest Tintic*

- of the Geological Society of London, Special Publication, 42: 313-345.
- Wilson, M (1989) *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*, Springer, Berlin, 466p.
- Wones, D. R (1989) Significance of the assemblage titanite+magnetite+quartz in granitic rocks. *American Mineralogist*, 74 (7-8): 744-749. doi:10.1016/0003-004X/89/0708-0744\$02.00.
- Yakovenko, V., Chinakov, I., Kokorin, Y., and Krivyakin, B (1981) Detailed geological prospecting in Anarak area (Kal-e Kafi- Khoni locality). Report 13 of Technoexport, Moscow, 53p.
- Yang, W. B., Niu, H.C., Shan, Q., Luo, Y., Sun, W.D., Li, C.Y., Li, N.B., and Yu, X.Y (2012) Late Paleozoic calc-alkaline to shoshonitic magmatism and its geodynamic implications, Yuximolegai area, Western Tianshan, Xinjiang. *Gondwana Research*, 22: 325-340. doi:10.1016/j.gr.2011.10.008.
- Yushin, A., and Romanko, E (1981) Isotope-geochemical characteristics of mineral deposits of Anarak area (Central Iran). Report of V/O Technoexport, 16, Moscow, 78p.
- Zamboni, D., Gazel, E., Ryan, J. G., Cannatelli, C., Lucchi, F., Atlas, Z. D., Trela, J., Mazza, S. E., and Vivo, B. D (2016) Contrasting sediment melt and fluid signatures for magma components in the Aeolian Arc: implications for numerical modeling of subduction systems. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 17(6): 2034-2053. doi:10.1002/2016GC006301.
- (eds.), *Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits. Reviews in Economic Geology*, 18: 137-164. doi:10.5382/Rev.18.07.
- Khoei, N (1983) Introduction on metallogeny of Anarak area. The Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, 42p (in persian).
- Moghaddasi, J., Namdar Mohammadi, T., and Ahmadian, J (2012) Alteration and mineralization in Kal-e Kafi granitoid, NE of Anarak. *Iranian Journal of Geology*, 6(21): 15-23 (in persian).
- Nezampour, H (2005) *Geochemical, remote sensing and petrology studies for determination genesis of ore occurrences in Khuni area, Na'in, Central Iran*, MSc dissertation, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 240p (in persian).
- Pearce, J. A., and Cann, J. R (1973) Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290-300. doi:10.1016/0012-821X(73)90129-5.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., and Tindle, A. G (1984) Trace element discrimination diagrams for tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petroleum*, 25: 956-983. doi:10.1093/petrology/25.4.956.
- Pearce, J. A (2008) Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for archean oceanic crust. *Lithos*, 100: 14-48. doi:10.1016/j.lithos.2007.06.016.
- Rice, C. M., Harmon, R. S., and Shepherd, T. J (1985) Central City, Colorado; the upper part of an alkaline porphyry molybdenum system. *Economic Geology*, 80: 1769-1796. doi:10.2113/gsecongeo.80.7.1769.
- Richards, J. P., and Mumin, A. H (2013) Magmatic-hydrothermal processes within an evolving earth: iron oxide- copper- gold and porphyry Cu±Mo±Au deposits. *Geology*, 41(7): 767-770. doi:10.1130/G34275.1.
- Stergiou, C. L., Melfos, V., Voudouris, P., Spry, P. G., Papadopoulou, L., Chatzipetros, A., Giouri, K., Mavrogonatos, C., and Filippidis, A (2021) The geology, geochemistry, and origin of the porphyry Cu-Au-(Mo) system at Vathi, Serbo-Macedonian Massif, Greece. *Applied Sciences*, 11(2): 479-507. doi:10.3390/app11020479.
- Stocklin, J (1968) Structural history and tectonic of Iran: a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52(7): 1229-1258. doi: 10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D.
- Sun, S. S., and McDonough, W. F (1989) Chemical and isotopic systematic of oceanic basalt: implication for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., and Norry, M.J (eds) *Magmatism in the Ocean Basins*. Journal

Mineralogy and Geochemistry of Uranium, Thorium and Rare Earth Elements in Kal-e Kafi Hypogene Copper- Molybdenum Ore Deposit, Anarak District

Kh. Khoshnoodi^{*1} and S. Ziapour²

1- Assist. Prof., Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, Tehran, Iran

2- Researcher, Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, Tehran, Iran

* khoshnoodi78@gmail.com

Received: 2024.3.10 Accepted: 2024.5.21

Abstract

Kal-e -Kafi copper-molybdenum deposit is one of the ore fields of Anarak metallogenic district, which is located 76 km northeast of Anarak city, in the middle part of Central Iran. Kal-e -Kafi granitoid with upper Eocene age is an oval mass with dimensions of 5.5 x 8 km that penetrated into Precambrian metamorphic rocks, Cretaceous limestone and lower-middle Eocene volcanic rocks. Kal-e -Kafi granite has high-K calc-alkaline affinity and is formed in the tectonic setting of volcanic arc. The main minerals of uranium and thorium include thorium-bearing uraninite, urano-thorite and uranium-bearing thorite. Uraninite and urano-thorite crystals contain up to 10% of thorium and 30% of uranium, respectively. The main minerals of rare elements include monazite, bastnasite, and parisite, in which the amount of cerium, lanthanum and neodymium varies from 18 to 34, 9 to 20, and 9 to 13 percent, respectively. The average amount of uranium, thorium and total rare earth elements in the hypogene zone of Kal-e -Kafi deposit is 7, 18 and 89 ppm, respectively. On the basis of the results of this investigation, hypogene copper, molybdenum and uranium mineralization support intrusive-type uranium deposit (granite-monzonite sub-type) for Kal-e Kafi ore deposit.

Keywords: Uranium, High-K calc-alkaline, Kal-e -Kafi copper-molybdenum deposit

Introduction

Anarak district with more than 150 occurrences and mineral deposits have wide various types of mineral assemblages. The Kal-e Kafi area is approximately 76 km northeast of Anarak in the south margin of Central Desert, Isfahan province. The Anarak metallogenic district is located in middle part of the Central Iranian zone and the metamorphic Anarak-Khur subzone, and bounded from the north to the Great Kavir–Doruneh fault, from the southwest to Nain-Zavar ophiolitic zone and from the south to the Nain- Anarak graben. The mineral potential of the Anarak district has already been studied by Adib (1972), Yakovenko et al. (1981), Khoei (1983), Babakhani et al. (1999), Amini and Soheil (2000) and Nezampour (2005).

The important aspect of the Kal-e-Kafi intrusive complex is that it hosts various mineralization types, such as Cu, Mo, Pb, Zn, and Au. The Kal-e-Kafi mining area is located at 54°10'–54°20'N and 33°20'–33°30'E. The western part of Kal-e Kafi intrusion resulted from the Alpine tectono-magmatic activities,

hosts one of the largest Cu-Mo-Au deposit in Iran. In Kal- e Kafi region, there are three major systems of faults with N-S, E-W, and NE-SW trends. The Cu-Mo porphyry mineralization is controlled by the E-W fault system controls, and polymetallic (Pb, Zn, W, Mo and Au) veins are present in N-S faults. The alteration zones are represented by potassic, phyllic, argillic, and silicic. Cu-Mo porphyry mineralization corresponds mainly to the western margin of the Kal-e Kafi intrusion represented by granite and quartz monzonite. The Kal-e Kafi mine contains 245 Mt ores at 0.26% Cu and 0.026% Mo, and reported content of Au is about 249 tones at 4 ppm Au. The aim of this paper is to discuss the petrography, mineralography and SEM studies and geochemistry analysis of U, Th and REEs in the Kal-e Kafi Hypogene Copper-Molybdenum Ore Deposit.

Materials & Methods

After field investigation, sampling of drilling cores was done at a depth of more than 100 meters in the hypogene ore deposit. After the

macroscopic examination of the samples, more than 40 thin and thin-polished sections were prepared from the Kal-e Kafi granite and hypogene Cu-Mo porphyry ore for petrology and mineralogy studies by Olympus CX21 transmission-reflection light microscope. Then, the detailed study of mineral assemblages was performed on 8 selected samples by field mission scanning electron microscopy (FESEM) at the Center for Applied Research of the Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Karaj. The concentrations of major, trace and rare earth elements for 5 ore samples were determined by inductively coupled plasma (ICP) optical emission spectroscopy (OES) and mass spectrometry (MS) at Zarazma laboratory in Tehran, Iran (Table 1). In addition, the results obtained from chemical analyses (4 granite samples) of previous study by Ahmadian (2012) were also used for the geochemical studies.

Results and Discussion

Porphyry Cu-Mo mineralization has occurred in the western margin of the Kal-e Kafi intrusion. This Leucocratic granite is fine-grained containing mainly quartz and K-feldspar accompanied with minor mafic minerals (biotite and hornblende). The accessory minerals include apatite, titanite and zircon magnetite, as well as opaque minerals (magnetite, chalcopyrite, molybdenite and pyrite). The Kal-e Kafi Granitoid rocks are cut by chalcopyrite- and hematite-bearing quartz veins and veinlets. The presence of titanite, magnetite and quartz accompanied by hornblende indicate high oxygen-fugacity of the parental magma. All samples experience multistage hydrothermal alteration including potassic, phyllic, argillic, silicic, carbonate and chlorite as the most common alteration minerals. In a total alkali versus silica diagram (Fig. 6a), the granitoid samples from Ahmadian (2012) show granite composition with sub-alkaline to alkaline affinity. In the Co versus Th plot (Fig. 6b), granite samples lie within the calc-alkaline high-K/ Shoshonitic field. The mafic mineral assemblages of the shoshonitic series include clinopyroxene± olivine± amphibole± biotite, whereas those of the high-K calc-alkaline series consist of hydrous assemblages of amphibole+ biotite. Considering the presence of amphibole and biotite and the absence of clinopyroxene in the Kal-e Kafi granite, it can be concluded that the

Kal-e Kafi granite has a high-K calc-alkaline affinity. On the basis of Yb versus Ta and Th/Yb versus Nb/Yb diagrams (Fig. 6c-d), the studied granite has formed in the volcanic arc of a subduction zone related to Urumieh-Dokhtar magmatic arc.

In the Kal-e Kafi, hypogene Cu-Mo mineralization mainly occurs as disseminated and lesser as quartz- carbonate vein-veinlets within the host granite. The hypogene Kal-e Kafi ore has exhibits enriched concentrations of uranium, thorium and rare earth elements. The mineralization is commonly associated with potassic, phyllic and argillic alterations. The ore is mainly composed of sulfide and minor oxides. Main sulfide ore minerals are primary pyrite, chalcopyrite, molybdenite and chalcocite and minor secondary bornite, cuprite and covellite (Fig. 3 and 4). Magnetite, hematite and rutile are rarely accompanied the sulfides. Chalcopyrite and pyrite are characterized by coarse to fine-grained disseminated crystals and are closely associated with quartz- carbonate veinlets. In some cases, chalcopyrite directly replaces pyrite. Chalcopyrite is replaced by bornite, chalcocite and covellite. Molybdenite mainly occurs as individual disseminated in ores or veinlets and sometimes as intergrowth with chalcopyrite. Uranium occurs as thorium-bearing uraninite, urano-thorite and uranium-bearing thorite minerals. Uraninite with up to 10% thorium is associated with molybdenite and magnetite, and also occurs as inclusion within main minerals of the Kal-e Kafi granite. Urano-thorite and uranium-bearing thorite occur as subhedral to euhedral inclusion within K-feldspar, biotite and plagioclase. Urano-thorite contains up to 30% thorium. Zircon mainly occurs as euhedral to subhedral inclusion in biotite, K-feldspar and plagioclase and contains 9-12% Nd. The main minerals of REE in the hypogene Kal-e Kafi ores are monazite, bastnasite and parisite. Monazite and parisite mainly occur as fine-grained inclusion within apatite, k-feldspar and quartz. Bastnasite and parisite contain 17.7-33.5% Ce, 9.3-19.5% La and 8.9-12.5% Nd.

The strongly incompatible behavior of uranium in silicate magmas results in its concentration in the most felsic magmatism and uranium deposits. The incompatible behavior of uranium in silicate magmas leads to its enrichment in the felsic melts. Uranium enrichment is rather an uncommon characteristic of porphyry

systems associated with calc-alkaline igneous rocks and in contrast, U enrichment occurs in porphyry deposits related to alkaline intrusions. Four types of granites/rhyolites including peralkaline, high-K metaluminous calc-alkaline, L-type peraluminous and anatectic pegmatoids, can be significantly enriched in U to represent a significant source for the genesis of U deposits. The Kal-e Kafi granite due to its high-K calc-alkaline affinity shows uranium concentration (Fig. 7b). Uranium and Th concentrations vary from 5.4 to 7.8 and 13.1 to 23.2 ppm. Positive correlations U and Th with Cu and Mo indicate that the U and Th mineralization is associated with hypogene Cu-Mo mineralization. According to Dahlkamp (1993, 2009) and IAEA (2018) Uranium mineralization in the Kal-e Kafi deposit is a uranium intrusive- type deposits (granite-monzonite sub-type). In this type, primary U minerals such as uraninite, uranothorianite and uranothorite occur within intrusive or anatectic rocks.

Conclusions

On the basis of microscopic and geochemical studies of the host rock of the hypogene Cu-Mo mineralization, the Kal-e Kafi granites have high-K calc-alkaline affinity. Based on geochemical diagrams, they are formed in the tectonic setting of volcanic arc. The high abundance of primary sulfides such as

chalcopyrite, pyrite, molybdenite and chalcocite in studied rocks, as well as trace amount of secondary bornite, cuprite and covellite formed by the replacement of chalcopyrite, indicate the hypogene environment and the role of the Kal-e Kafi granite for Cu-Mo mineralization. In this deposit, uranium, thorium and REE mineralization is also occurred. The main minerals of uranium and thorium include thorium-bearing uraninite, urano-thorite and uranium-bearing thorite which are disseminated in the hypogene mineralization zone. Uraninite and urano-thorite crystals contain up to 10% of thorium and 30% of uranium, respectively. The main minerals of rare elements include monazite, bastnasite, and parisite, in which the amounts of cerium, lanthanum and neodymium vary from 17.7 to 33.5, 9.3 to 19.5, and 8.9 to 12.5 percent, respectively. The average amount of Cu, Mo, U, Th and REEs in the hypogene zone of the Kal-e -Kafi deposit is 2740, 296, 6.8, 17.9 and 89.4 ppm, respectively. The Cu, Mo and U mineralization in the Kal-e Kafi deposit is simultaneously formed with the emplacement of the Kal-e Kafi granitoid in the volcanic arc, in the form of disseminated uraninite, urano-thorite and uranium-bearing thorite minerals with the grade of 5-7 ppm. This deposit has the characteristics of uranium intrusive- type deposits (granite-monzonite sub-type).