



پتانسیل کانی‌سازی عناصر پرتوزا در ذخایر آهن زون تکتونیکی کاشمر - کرمان

خالق خشنودی (نویسنده مسئول)^۱، سمانه ضیاپور^۲

^۱ هیئت علمی، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران

khosnoodi78@gmail.com

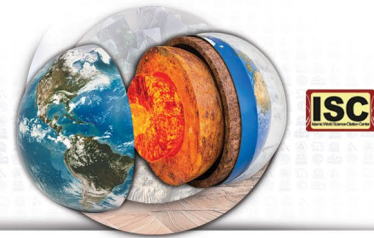
^۲ پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران sa.ziapour@gmail.com

چکیده

زون تکتونیکی کاشمر- کرمان در پهنه زمین‌ساختی ایران مرکزی، یکی از مهمترین کمربندهای متالوژنی آهن در ایران است. واحدهای آتشفشانی- رسوبی کامبرین پیشین (CFSU) در این زون عمدتاً میزبان ذخایر آهن هستند. در این مقاله پتانسیل کانی‌سازی عناصر پرتوزا شامل اورانیوم و توریم، در ذخایر آهن زون کاشمر- کرمان مورد بررسی قرار گرفته است. برخی کانسارهای آهن مورد مطالعه مانند چغارت، سه‌چاهون و چاه‌گز دارای کانی‌سازی توریم به صورت سیلیکات توریم (توریت/ هوتونیت) هستند. مقدار توریم در زون‌های کانی‌سازی بیش از ۱۱۲ پی‌پی‌ام تا گاهی به دو درصد هم میرسد. برخی ذخایر آهن مانند آنومالی ۲ ساغند، جلال آباد زرنند و آریا جنوب دارای کانی‌سازی اورانیوم هستند و کانی اصلی اورانیوم در آنها، اورانینیت است. مقدار اورانیوم در زون‌های کانی‌سازی بین ۶۰ تا ۱۷۵۱ پی‌پی‌ام متغیر است. بطور کلی در زون تکتونیکی کاشمر- کرمان در ارتباط با ماگماتیسم کالک آلکان کامبرین آغازین در مرحله اول کانی‌سازی آهن رخ داده است و سپس با هجوم سیالات پساماگمایی غنی از اورانیم/توریم بر روی بخش‌های از کانسنگ آهن و دگرسانی مرتبط با آن، کانی‌سازی عناصر پرتوزا برنهشته است. در نتیجه، زون تکتونیکی کاشمر- کرمان را می‌توان به عنوان منطقه‌ای مستعد برای تولید عناصر پرتوزا به صورت محصول جانبی از کانسارهای آهن در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی

زون تکتونیکی کاشمر- کرمان، اورانیوم، توریم



۱. مقدمه

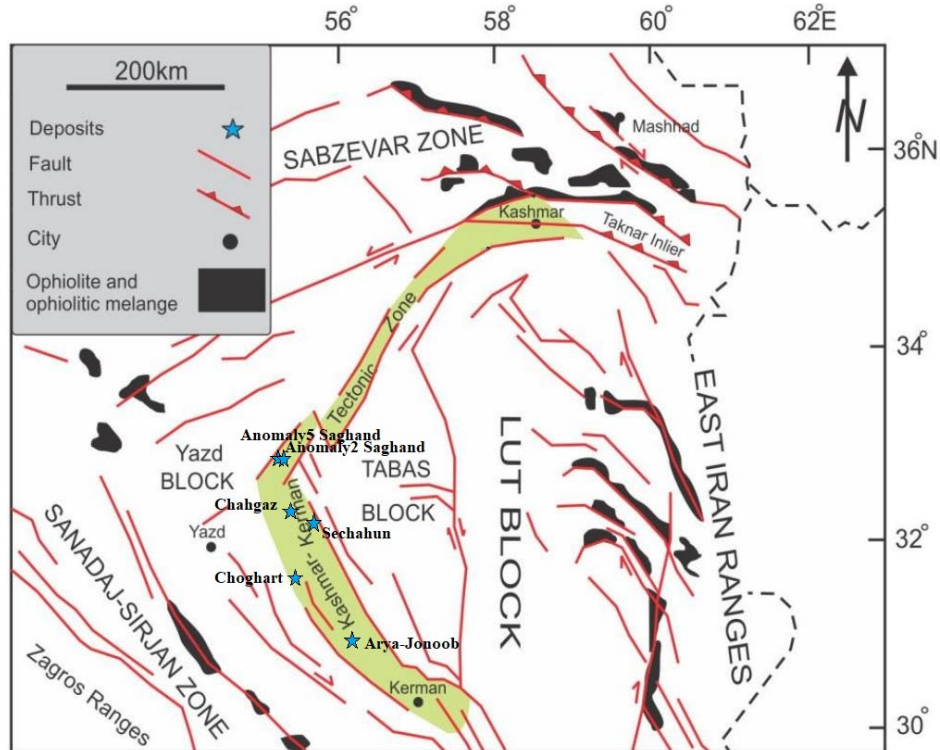
زون تکتونیکی کاشمر- کرمان بخشی از پهنه زمین ساختی ایران مرکزی مابین بلوک‌های یزد و طبس است که برای اولین بار توسط رضائی و تاکر [۱۰] معرفی شد و یکی از مهمترین کمربندهای متالوژنی آهن در ایران است [۱]. این زون به طول حدود ۶۰۰ کیلومتر، عرض ۸۰ کیلومتر از روند ساختارهای گسلی اصلی در ایران مرکزی تبعیت می‌کند. این زون از شهر کاشمر تا کرمان امتداد دارد و میزبان ذخایر متعددی از آهن است که عمدتاً در واحدهای آتشفشانی- رسوبی کامبرین پیشین (CVSU) جای گرفته‌اند [۱-۱۴]. واحدهای آتشفشانی- رسوبی کامبرین پیشین (CVSU) در سرتاسر منطقه پشت بادام- بافق- زرنند قرار دارند [۱۰] و میزبان مهمترین کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت- عناصر نادر خاکی [۱۵-۱۶]، آهن- منگنز و روی- سرب سدکس [۱۷] در منطقه هستند. منطقه پشت بادام- بافق- زرنند در بخش مرکزی و جنوبی زون کاشمر- کرمان دارای بیش از ۳۴ اندیس و کانسار آهن با بیش از ۲ میلیارد تن کانسنگ اکسید آهن است [۱۲، ۱۸، ۲۰]. از جمله مهمترین ذخایر آهن در این زون می‌توان به چادرملو (۴۰۰ میلیون تن با عیار ۵۵٪ آهن)، چغارت (۲۱۶ میلیون تن ذخیره با عیار ۶۰٪ آهن)، جلال آباد (۲۰۰ میلیون تن با عیار ۴۵٪ آهن)، سه‌چاهون (۱۴۰ میلیون تن با عیار ۴۵٪ آهن)، چاه‌گز (۸۳ میلیون تن با عیار ۵۳٪ آهن) و اسفوردی (۱۷ میلیون تن با عیار ۱۷٪ آهن و p_2O_5 ۱۴٪) اشاره نمود [۳-۴، ۱۹]. ذخایر آهن زون کاشمر- کرمان دارای پتانسیل کانی‌سازی عناصر پرتوزا شامل اورانیوم و توریم هستند [۲۱]. کانسارهای آهن زون کاشمر- کرمان توسط پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و برخی از این کانسارها مانند چغارت، ساغند، سه‌چاهون، چاه‌گز و آریاجنوب دارای تمرکز و کانی‌سازی عناصر پرتوزا مانند توریم و اورانیوم هستند [۳، ۱۳-۱۴، ۲۱-۲۳]. تمرکز عناصر پرتوزا در واحدهای دگرسان حاشیه توده‌های آهن صورت گرفته و انطباق معناداری با توزیع سنگ‌های متأثر از متاسوماتیسم قلیایی دارند. فرآیندهای گرمایی چندگانه در کانسارهای آهن زون کاشمر- کرمان معمولاً سبب تمرکز عناصر نادر خاکی و همچنین افزایش غلظت و کانی‌سازی توریم و اورانیوم شده است [۱۴-۱۵]. فرآیندهای متاسوماتیک قلیایی در طیف وسیعی از محیط‌ها و دوره‌های زمین‌شناسی از آرکن تا سنوزوئیک وجود دارند و می‌توانند به صورت مستقل و یا با کانسارهای خاصی مانند ذخایر IOCG و IOA همراه باشند [۲۴]. فرآیندهای متاسوماتیسم قلیایی نقش ژئوشیمیایی مهمی در تمرکز عناصر پرتوزا دارند و در برخی کانسارهای جهان مانند کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت این زون رابطه زایشی با کانی‌سازی توریم و اورانیوم دارند [۱۴، ۲۱-۲۲، ۲۵-۲۶]. این کانسارها در مناطق گسلی و در رابطه با ساختارهای عمیق ناحیه‌ای شکل گرفته‌اند [۲۷]. هدف از این پژوهش، مروری بر کانی‌سازی عناصر پرتوزا در کانسنگ آهن و واحدهای دگرسان حاشیه ذخایر آهن در زون کاشمر- کرمان است.

۲. زمین‌شناسی عمومی زون کاشمر- کرمان

صفحه ایران مرکزی یک قطعه از گندوانا است که در کنار دیگر قطعات در طول کوهزایی آلپ-هیمالیا قرار گرفته است [۱]. زون ایران مرکزی از شرق به غرب متشکل از سه بلوک تکتونیکی لوت، طبس و یزد است. بلوک‌های طبس و یزد با مرزهای گسلی و توسط زون تکتونیکی کاشمر- کرمان با ساختاری پیچیده از سنگ‌های برپوسته‌ای بشدت تغییرشکل یافته از یکدیگر جدا شده‌اند. مرزهای این زون توسط سیستم‌های گسلی با روند شمال شرقی و شمال غربی کنترل می‌شود (شکل ۱). قسمت شمالی زون توسط گسل‌های شمال شرقی پشت بادام، کلمرد، ازبک کوه و کاشمر و قسمت جنوبی توسط گسل‌های شمال غربی کوهبنان و زرنند مشخص شده است [۱۰]. در زون کاشمر-کرمان، سنگ‌ها از پی سنگ دگرگونی نئوپروتروزوئیک تا رسوبات کواترنری تنوع دارند. سنگ‌های نئوپروتروزوئیک در سمت غرب گسل کوهبنان غالب هستند، در صورتیکه گسترش واحدهای پالئوزوئیک و مزوزوئیک در شرق گسل است [۲۸]. ترکیبات سنگ‌های آتشفشانی در واحدهای آتشفشانی- رسوبی کامبرین پیشین (CVSU) از فلسیک تا مافیک متغیر بوده و شامل ریولیت، ریوداسیت، آگلومراتیک و گدازه‌های اسپیلیتی و دیاباز است. سنگ‌های رسوبی شامل دولومیت‌ها، آهک‌های دولومیتی و تبخیری‌ها هستند [۱۰، ۲۹]. در ایران مرکزی این سری‌های متوالی را سری‌های ریزو و دسو، سازند اسفوردی یا ساغند در بخش‌های مختلف ناحیه بین پشت بادام و کرمان نامیده‌اند [۲۸]. سن سنجی به روش $U-Pb$ کانی زیرکن در ریوداسیت واحد CVSU ناحیه بافق حداقل سن 528 ± 1 میلیون سال را نشان می‌دهد [۱۰]. در منطقه پشت بادام- بافق- زرنند، توده‌های نفوذی در محدوده ترکیبی از گرانیت-گرانودیوریت تا گابرو-دیوریت به داخل سنگ‌های دگرگونی پراکامبرین پسین و واحد آتشفشانی- رسوبی کامبرین پیشین نفوذ کرده‌اند [۱۰]. سن سنجی به روش $U-Pb$



کانی زیرکن در گرانیتهای زیرگان، دوزخ دره و سفید سن 3 ± 526 میلیون سال را نشان دادهاند [۳۰]. بر اساس مطالعات ژئوشیمیایی سنگهای آذرین و دگرگونی پشت بادام-بافق، زون کاشمر- کرمان یک کمان ماگمایی حاشیه قاره‌ای فعال در کامبرین پیشین معرفی شده است [۱۰]. ارتباط مکانی میان توده‌های معدنی با سنگهای آذرین درونی و بیرونی آلکان در کنسارهای آهن منطقه به وضوح یک ارتباط ژئزی بین ماگماتیسیم قلیایی و تشکیل کانسنگ اکسید آهن را نشان می‌دهد [۱۹].



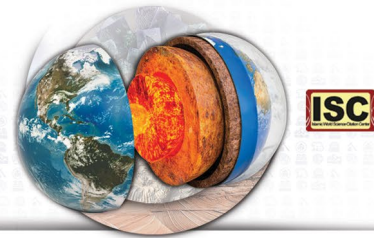
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی کنسارهای آهن دارای کانی‌سازی عناصر پرتوزا در زون تکتونیکی کاشمر- کرمان (اصلاح شده از [۲])

۳. روش تحقیق

کانی‌سازی اورانیوم و توریم در کنسارهای مختلف آهن زون کاشمر- کرمان مورد بررسی قرار گرفت و پس از مشخص شدن کنسارهای مستعد کانی‌سازی عناصر پرتوزا، نمونه برداری انجام شد. این مطالعه بر مشاهدات میدانی و برداشت‌های رادیومتری زمینی در کنسارهای چغارت، چاه‌گز، سه‌چاهون، آنومالی ۵ ساغند و آریاجنوب استوار است. برای شناسایی انواع کانی‌سازی عناصر پرتوزا و دگرسانی‌های وابسته تعداد ۵ نمونه از هر کنسار برداشت شد و مقاطع نازک- صیقلی تهیه شده توسط میکروسکوپ نور عبوری- انعکاسی مدل Olympus CX21 در آزمایشگاه کانی‌شناسی پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انجام شد. مطالعات دقیق‌تر کانی‌شناسی بر روی ۱۰ مقطع نازک- صیقلی توسط میکروسکوپ الکترونی مدل FESEM SIGMA/VP-ZEISS در مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام شد. همچنین از نتایج مطالعات کانی‌شناسی و ژئوشیمی دیمر و همکاران [۲۲] برای کنسار آنومالی ۲ ساغند و کریمی شهرکی [۴] برای کنسار جلال آباد استفاده شده است. محدوده تغییرات اورانیوم و توریم در زون کانی‌سازی ذخایر مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است

جدول ۱. مقادیر حداقل و حداکثر اورانیوم و توریم در زون کانی‌سازی عناصر پرتوزا در کنسارهای مورد مطالعه

ردیف	نام کنسار	اورانیوم (پی‌پی‌ام)		توریم (پی‌پی‌ام)		مرجع
		Max.	Min.	Max.	Min.	
۱	چغارت	-	-	۶۱۴	۲٪	[۵]
۲	چاه‌گز	-	-	۱۱۲	۷۲۶	[۶]



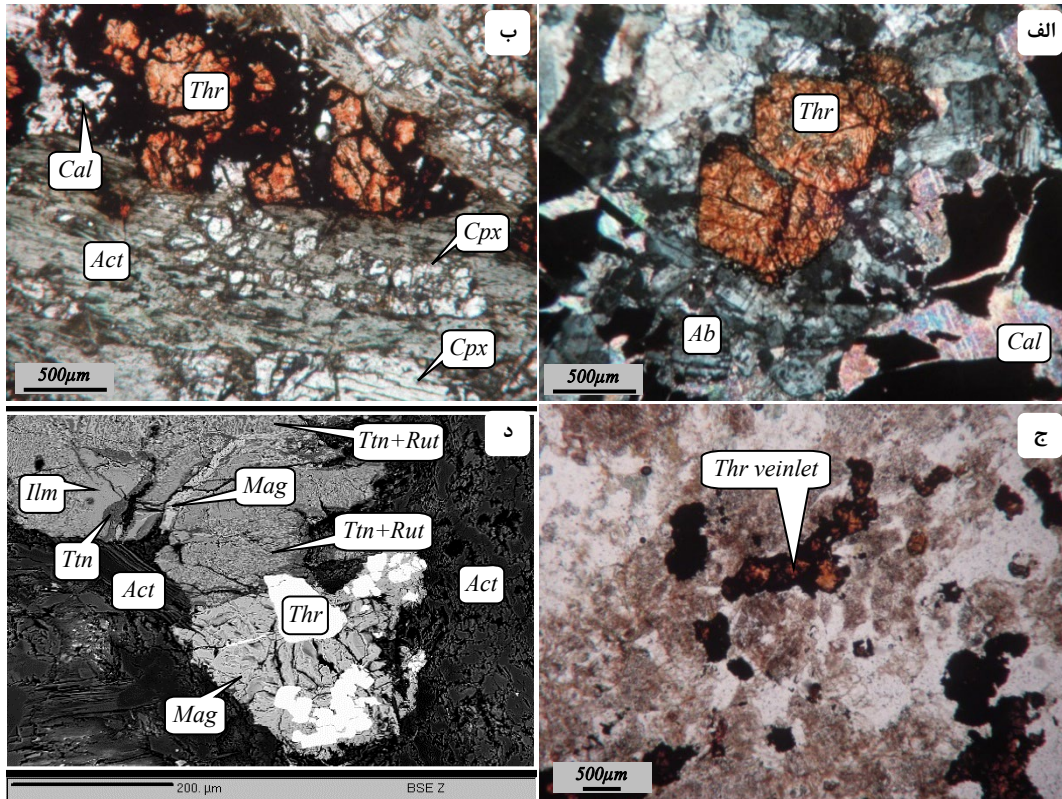
[۷]	۶۲۲۴	۱۶۲	-	-	سه‌چاهون	۳
	-	-	۹۶۰	۶۰	آریاجنوب	۴
[۸]	-	-	۱۷۵۱	۱۰۰	آنومالی ۲ ساغند	۵
[۹]	۲۷۱۶	۲۹	۲۰۱۸	۳۳	آنومالی ۵ ساغند	۶
	-	-	؟	؟	جلال آباد	۷

۴. کانی‌سازی عناصر پرتوزا در کانسارهای آهن زون کاشمر - کرمان

کانی‌سازی اورانیوم و توریم در کانسارهای مختلف آهن زون کاشمر - کرمان مورد بررسی قرار گرفت و کانسارهای چغارت، سه‌چاهون و چاه‌گز با کانی‌سازی توریم، کانسارهای آریاجنوب و آنومالی ۲ ساغند با کانی‌سازی اورانیوم و کانسار آنومالی ۵ ساغند با کانی‌سازی اورانیوم - توریم شناسایی شدند. در این کانسارها، کانی‌سازی اورانیوم و توریم بر کانسنگ اصلی آهن برنهشته شده است که در برخی کانسارها همراه با تمرکز عناصر نادر خاکی است.

۴.۱. کانسار چغارت

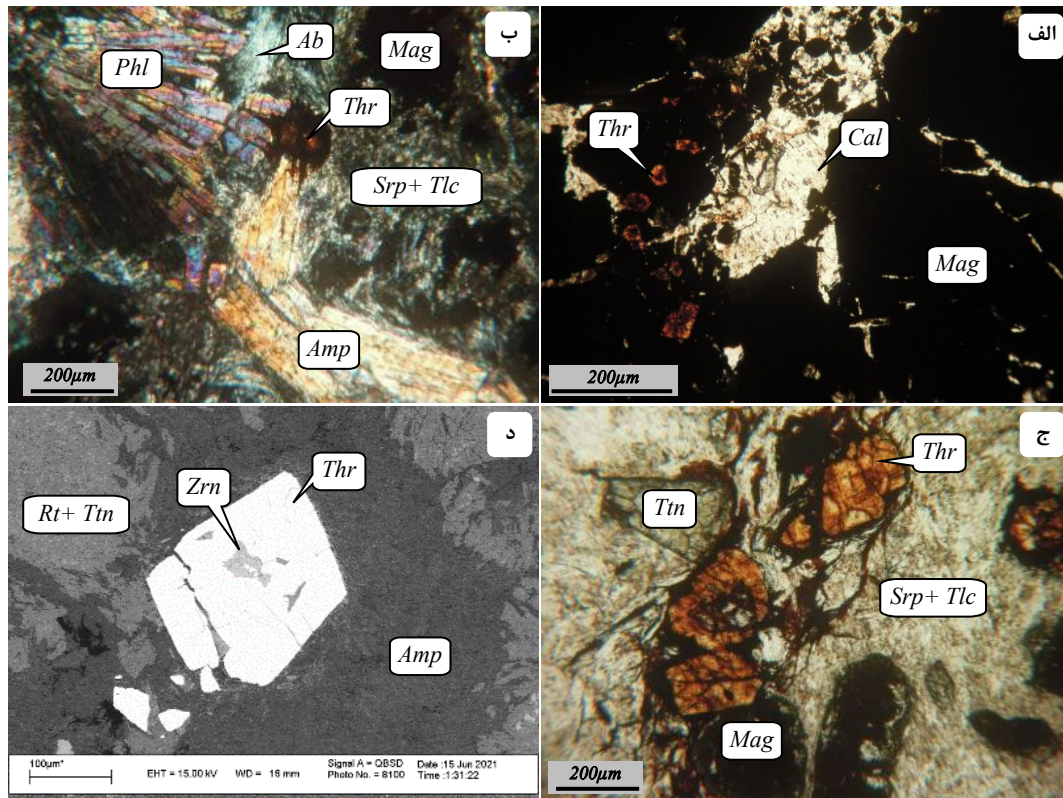
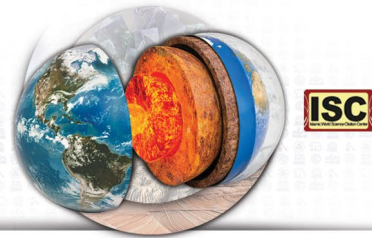
در کانسار چغارت، کانی‌سازی توریم همراه با تمرکز عناصر نادر خاکی در حاشیه جنوب شرقی توده مگنتیت و زون برشی بین گسل‌های منطقه‌ای $F5$ و $F6$ رخ داده است. دگرسانی سدیک - کلسیک، پتاسیک، کربناتی و سولفیدی شدن از دگرسانی‌های مرتبط با کانی‌سازی توریم در این کانسار است (شکل ۲-الف و ب). توریت کانی اصلی توریم در منطقه کانی‌سازی توریم است که به صورت رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و ادخال در کانی‌هایی نظیر کلینوپیروکسن و آل بیت تشکیل شده است (شکل ۲-ج). تیتانیت از دیگر کانی‌های توریم‌دار در این کانسار است که از فراوانی کمی برخوردار است. تیتانیت دارای دو نسل است که نسل اول به صورت بلورهای شکل‌دار مستقیماً از سیالات کانی‌ساز نهشته شده و نسل دوم از دگرسانی ایلمنیت به وجود آمده است (شکل ۲-د). مجموعه کانی‌های همراه با کانی‌سازی توریم شامل آل بیت + اکتینولیت + کلینوپیروکسن (اوژیت - دیوپسید) + کلسیت ± میکروکلین + مگنتیت + پیریت ± کالکوپیریت ± گالن ± روتیل ± آپاتیت است. کانی‌های توریم دارای غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی کمیاب و ایتیریم نیز هستند. براساس خشنودی و همکاران [۲۱، ۳۱]، وجود ناهنجاری منفی یوروپیم و همراهی کانی‌های توریم با کلسیت، مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت حاکی انتقال توریم به صورت کمپلکس‌های کربناته در سیالات کانی‌ساز و نهشت آن در شرایط احیایی است.



شکل ۲. الف) تصویر *XPL* از توریت پاراژنز با آلبيت، ب) تصویر *XPL* از تشکیل توریت همزمان با اکتینولیتی شدن، ج) تصویر *XPL* از بافت رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی توریت، د) تصویر *BSE* از تشکیل تیتانیت و روتیل ثانویه حاصل دگرسانی ایلمنیت، در کانسار چگارت (Ab: آلبيت، Act: اکتینولیت، Cal: کلسیت، Cpx: کلینوپيروکسن، Ilm: ایلمنیت، Mag: مگنتیت، Thr: توریت، Rt: روتیل، Ttn: تیتانیت)

۴.۲. کانسار چاه‌گز

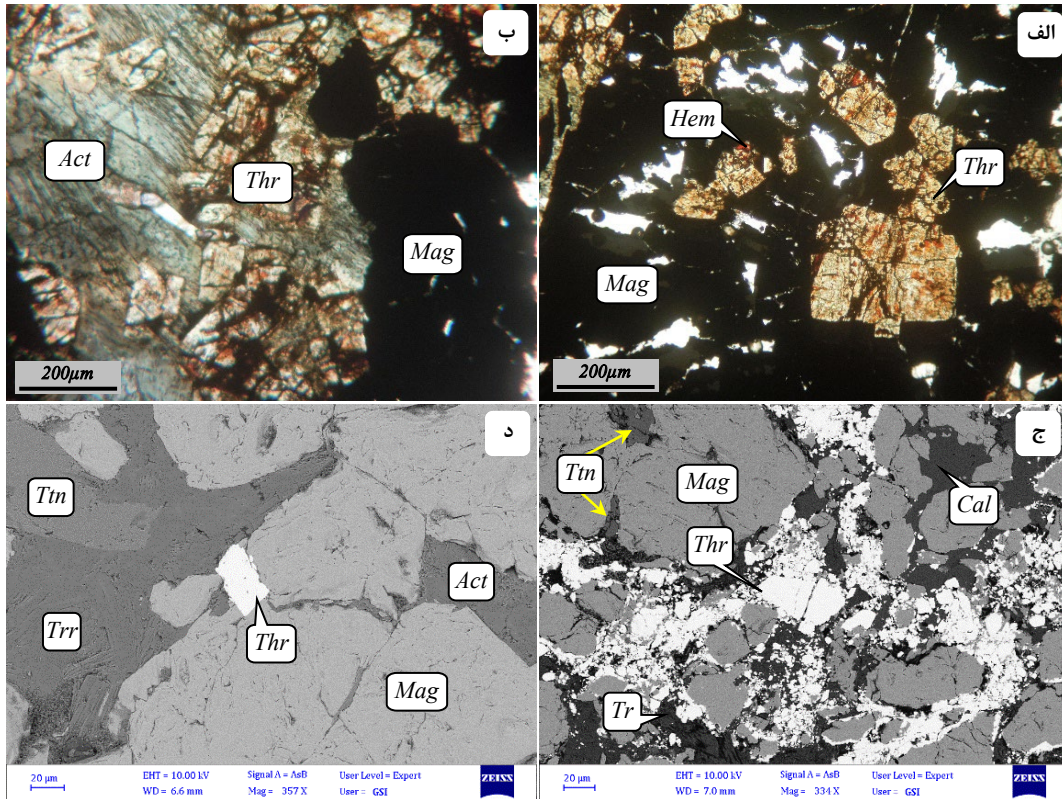
در کانسار چاه‌گز، کانی‌سازی توریم در واحدهای دگرسان حاشیه توده‌های مگنتیت و زون برشی بین دو توده مگنتیت رخ داده است (شکل ۳-الف). کانی‌سازی توریم همزمان با دگرسانی سدیک-کلسیک، منیزیمی و کربناتی عمدتاً به صورت توریت همراه با مقادیر فرعی تیتانیت و مقادیر جزئی زیرکن اتفاق افتاده است (شکل ۳). توریت به صورت بلورهای شکل دار تا بی شکل به صورت رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و ادخال در کانی‌هایی نظیر آمفیبول (اکتینولیت-ترمولیت)، اوژیت و آلبيت وجود دارد. مجموعه کانی‌های همراه با کانی‌سازی توریم شامل اکتینولیت+ترمولیت+آلبيت+اوژیت+کلسیت+تالک+کلریت+مگنتیت+فلوگوپیت±گالن±روتیل±آپاتیت± زیرکن است (شکل ۳). براساس ضیاپور و همکاران [۳]، وجود ناهنجاری منفی یورویم و همراهی کانی‌های توریم با مگنتیت و کلسیت حاکی از وجود کمپلکس‌های کربناته حامل توریم و شرایط احیایی سیال عامل کانی‌سازی توریم در کانسار چاه‌گز است.



شکل ۳. الف) تشکیل توریت همراه با کلسیت در کانسنگ مگنتیت (XPL)، ب) تشکیل توریت پاراژنز با آمفیبول، آلبیت و فلوگوپیت همزمان با تالکی شدن سرپانتین (XPL)، ج) تشکیل توریت و تیتانیت در زمینه سرپانتین و تالک (PPL)، د) تصویر BSE از هم‌رشدی زیرکن و توریت در زمینه آمفیبول، در کانسار چاه‌گز: Ab: آلبیت، Amp: آمفیبول، Cal: کلسیت، Mag: مگنتیت، Phl: فلوگوپیت، Rt: روتیل، Srp: سرپانتین، Thr: توریت، Tlc: تالک، Ttn: تیتانیت، Zrn: زیرکن

۴.۳. کانسار سه‌چاهون

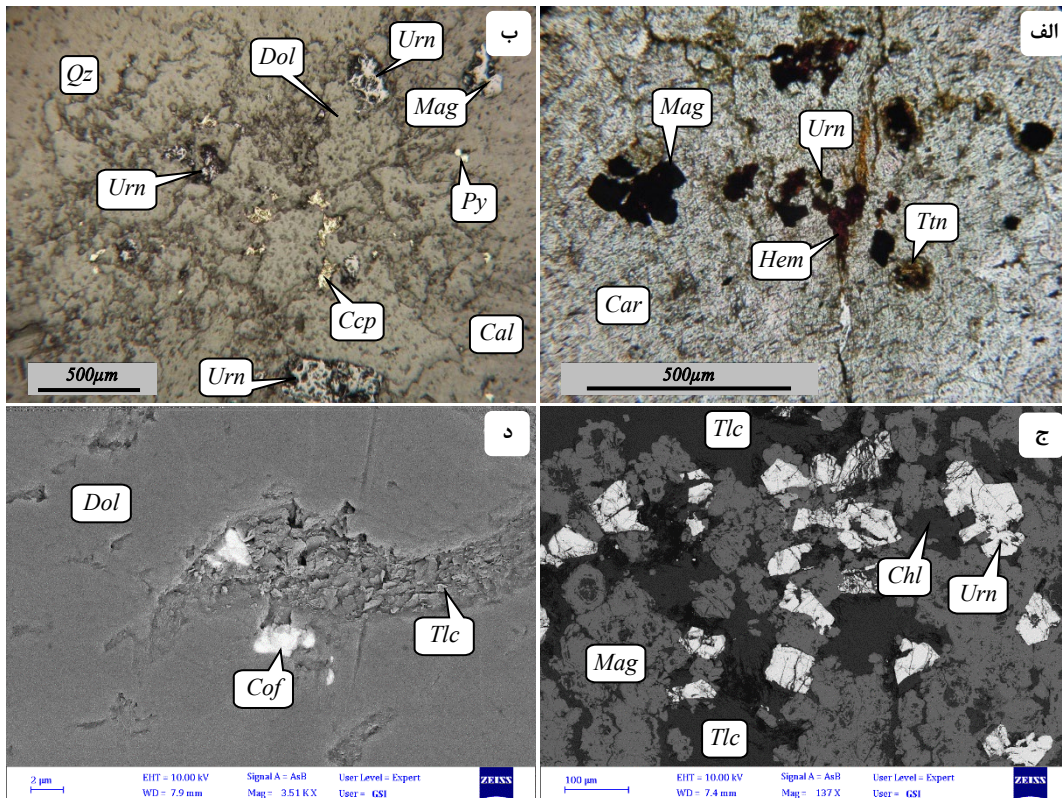
کانی‌سازی توریم به طور محلی در کانسنگ آهن و برش‌های گرمایی حاشیه توده آهن در هردو آنومالی X و XI کانسار سه‌چاهون رخ داده است (شکل ۴). دگرسانی سدیک-کلسیک، کربناتی، کلریتی، سیلیسی و سولفیدی شدن از مهمترین دگرسانی‌های مرتبط با کانی‌سازی توریم در این کانسار است. کانی اصلی توریم در زون کانی‌سازی توریم سه‌چاهون، کانی سیلیکات توریم (توریت و کمتر هوتونیت) به صورت بلورهای نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار است. توریت به صورت رگچه‌ای، برشی و پرکننده فضای خالی تشکیل شده است (شکل ۴). مجموعه کانی‌های همراه با کانی‌سازی توریم شامل آلبیت+ آمفیبول (اکتینولیت- ترمولیت)+ کلینوپیروکسن (وژیت- دیوپسید)+ کلسیت+ مگنتیت+ کوارتز+ آپاتیت+ تیتانیت± فلدسپارپتاسیم± کلریت± سرپانتین± اپیدوت± هماتیت± پیریت± کالکوپیریت است. کلسیت فراوانترین کانی پاراژنز با توریت است که معمولاً به صورت بی‌شکل همراه با توریت یافت می‌شود و همچنین به صورت رگه‌ها و رگچه‌ها نیز در واحدهای دگرسان دیده می‌شود. براساس میرزابابایی و همکاران [۲۳] دگرسانی حاشیه توده مگنتیت منجر به انتقال توریم در سیالات ماگمایی به صورت کمپلکس‌های کربناته و نهشت هوتونیت و توریت در این واحدها شده است. همراهی پیریت و مگنتیت با توریت حاکی از شرایط احیایی حاکم بر محیط در زمان شکل‌گیری بخش برشی و همچنین کانی‌سازی توریم در کانسار است.



شکل ۴. الف) تشکیل توریت و هماتیت در فضاهای خالی کانسنگ آهن (XPL)، ب و ج) تصاویر PPL و BSE از برنهشته شدن توریت بر کانسنگ مگنتیت- اکتینولیت، د) تصویر BSE از هم‌رشدی توریت با مگنتیت گرمایی، در کانسار سه‌چاهون (Act: اکتینولیت، Cal: کلسیت، Hem: هماتیت، Mag: مگنتیت، Ttn: تیتانیت، Thr: توریت، Tr: ترمولیت)

۴.۴. کانسار آریاجنوب

در کانسار آریاجنوب، کانی‌سازی اورانیوم بر روی کانسنگ آهن و واحدهای دگرسان همزمان با کربناتی- سیلیسی شدن برنهشته شده است. دگرسانی‌های اصلی همراه با کانی‌سازی اورانیوم، کربناتی- سیلیسی و هماتیته شدن و به طور محدودتر کلریتی و تالکی شدن است (شکل ۵). کانی اصلی اورانیوم در کانسار آریاجنوب، اورانینیت همراه با مقادیر کمتر کافینیت است که عمدتاً همراه با کانی‌های کربناته نظیر کلسیت و دولومیت به صورت رگچه‌ای و پرکننده حفرات و شکستگی‌های مگنتیت اولیه تشکیل شده است (شکل ۵- ج و د). مجموعه کانی‌های همراه با کانی‌سازی اورانیوم شامل کلسیت + دولومیت ± آنکریت + تالک + هماتیت + کلریت + کوارتز ± فلوگوپیت + مگنتیت + پیریت ± کالکوپیریت ± تورمالین ± تیتانیت ± فلوریت ± آلانیت است. مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت پارازنز با کانی‌سازی اورانیوم نسبت به نسل اولیه آنها که در مرحله کانی‌سازی آهن تشکیل شده‌اند، دارای ابعاد ریزتر و فاقد شکستگی و خردشدگی هستند. اورانینیت به صورت بلورهای ریز تا متوسط شکل دار تا نیمه شکلدار اغلب در زمینه کربناتی- سیلیسی حضور دارد (شکل ۵- الف و ب). کانی‌های اورانینیت دارای غنی شدگی ایتریم هستند. کربناتی شدن همراه کانی‌سازی اورانیوم نشان می‌دهد که احتمالاً کمپلکس‌های اصلی انتقال دهنده اورانیوم در کانسار آریاجنوب به صورت کمپلکس‌های کربنات اورانیوم بوده است.



شکل ۵. الف) پاراژنز اورانینیت با مگنتیت، تیتانیت و هماتیت در زمینه کربناته (PPL)، ب) تصویر میکروسکوپی از پاراژنز اورانینیت با بلورهای ریز مگنتیت، کالکوپیریت و پیریت در رگه کربناتی - سیلیسی، ج) تصویر BSE از برنهشته شدن اورانینیت بر کانسنگ آهن همزمان با برشی شدن کانسنگ آهن، د) تصویر BSE از کافینیت در زمینه دولومیت (Cal): کلسیت، (Car): کربنات، (Ccp): کالکوپیریت، (Chl): کلریت، (Cof): کافینیت، (Dol): دولومیت، (Hem): هماتیت، (Mag): مگنتیت، (Py): پیریت، (Qz): کوارتز، (Tlc): تالک، (Ttn): تیتانیت، (Urn): اورانینیت

۴.۵. کانسار جلال آباد

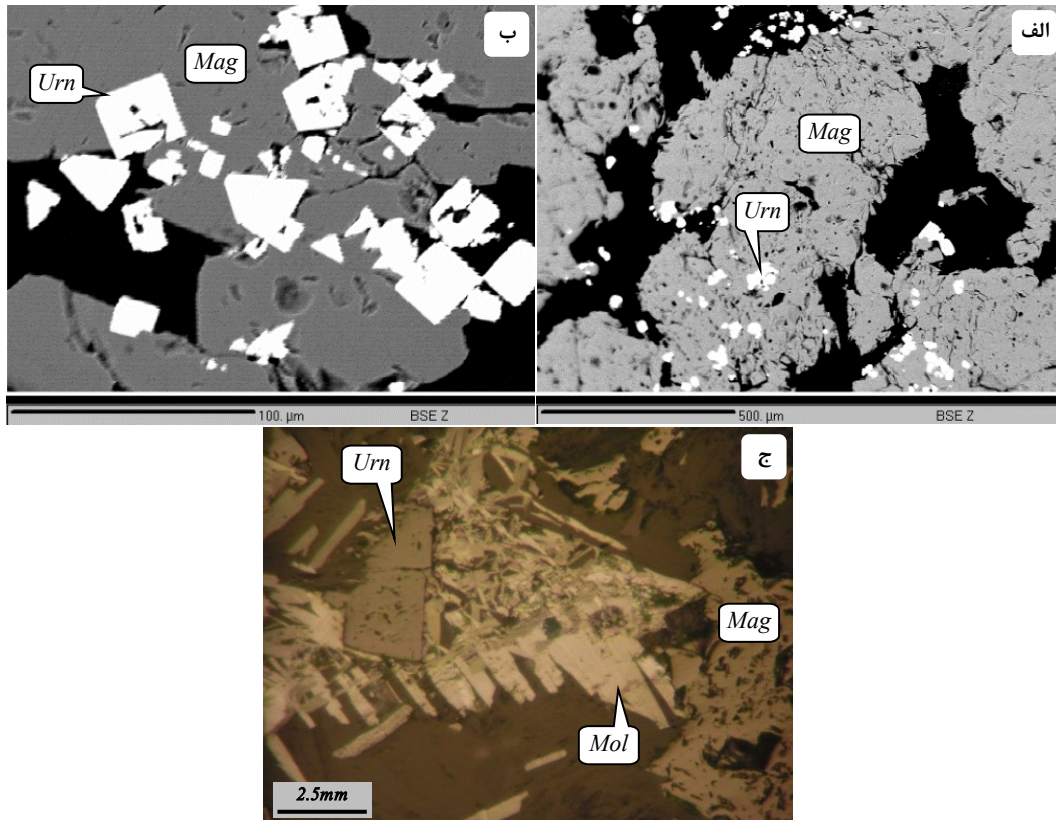
براساس مطالعات کریمی شهرکی [۴]، در کانسار جلال آباد نیز کانی سازی اورانیوم بر کانسنگ آهن برنهشته شده است. در این کانسار، کانی سازی اورانیوم به صورت کانی اورانینیت در مقادیر خیلی کم همراه با سولفیدهای مس (کالکوپیریت، و طلا رخ داده است. اورانینیت به صورت ادخالهایی ریز در حفرات و شکستگی های موجود در مگنتیت و کالکوپیریت و همراه با کانی هایی مانند اکتینولیت و آپاتیت مشاهده شده است [۴].

۴.۵. کانسار آنومالی ۲ ساغند

در آنومالی ۲ ساغند، کانی سازی اورانیوم بر کانسنگ آهن برنهشته شده است و در واحدهای متاسوماتیتی حاشیه رخ داده است. در کانسار آنومالی ۲ ساغند نیز همانند کانسار آریا جنوب، کانی سازی اورانیوم بر روی کانی سازی آهن برنهشته شده است و هماتیتی و تالکی شدن مرتبط با کانی سازی اورانیوم نیز در آن مشاهده می شود. دگرسانی منیزیمی و هماتیتی به صورت مجموعه های تالک + سرپانتین + کلریت + مگنتیت + هماتیت و تالک + مگنتیت + مولیدنیت + پیریت + هماتیت به همراه کربنات (کلسیت و فرودولومیت) مهمترین دگرسانی های مرتبط با کانی سازی اورانیوم در این کانسار هستند. کانی های اصلی میزبان اورانیوم در آنومالی ۲ ساغند شامل اورانینیت و کلوئیت همراه با مقادیر فرعی برانریت و میزبان تورینیت در مقادیر فرعی است که به صورت رگچه ای، پرکننده فضای خالی و ادخال در مگنتیت مشاهده می شود (شکل ۶). اورانینیت به صورت بلورهای کوبیک، هگزاگونال و تری گونال با ترکیب متغیر از اورانینیت خالص تا کلوئیت و در برخی موارد با منطقه بندی ترکیبی و برانریت به صورت بلورهای درشت منفرد در رگچه های کلسیتی حضور دارند (شکل ۶-الف و ب).



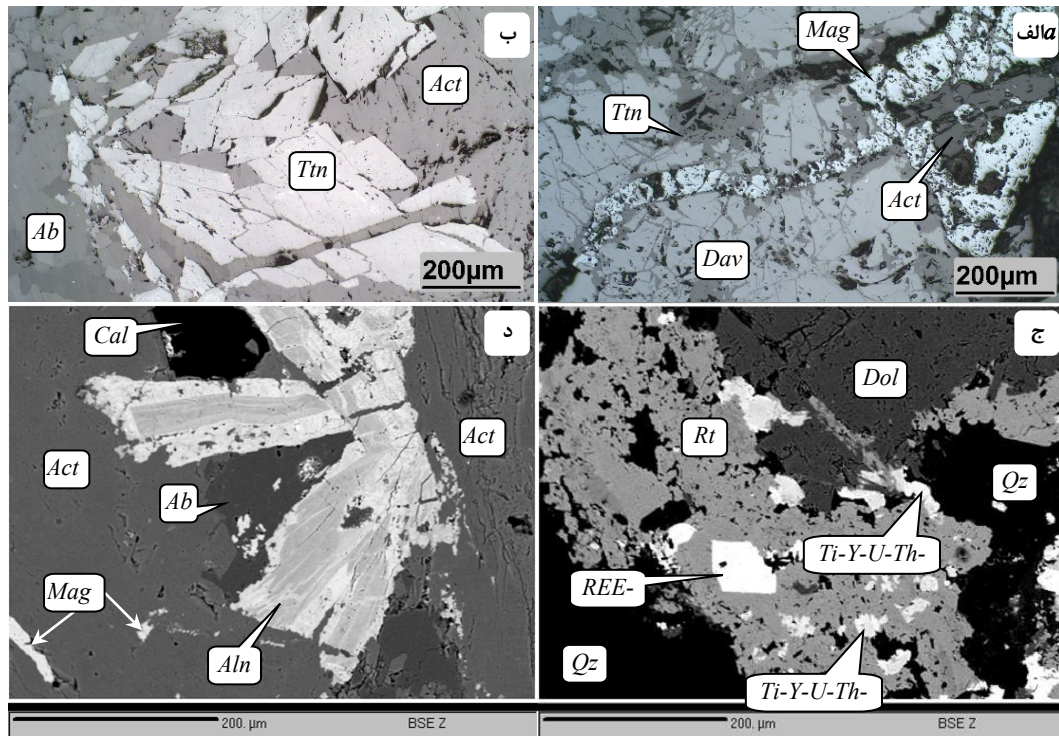
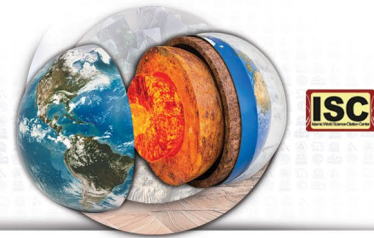
همچنین اورانینیت، برانریت و مولیبدنیت به صورت دانه‌های ریز شکل‌دار پراکنده در فضاهای خالی بلورهای مگنتیت وجود دارند (شکل ۶-الف). اورانینیت و کلوییت در این کانسار عمدتاً غنی شدگی از عناصر نادر خاکی و ایتیریم نشان می‌دهند [۸].



شکل ۶. تصاویر *BSE* از، الف) ادخال‌های اورانینیت درون مگنتیت، ب) درهم‌رشدی مگنتیت و بلورهای کوپیک و تری‌گونال اورانینیت، ج) تصویر میکروسکوپی از پارازنز مولیبدنیت و اورانینیت با مگنتیت، در آنومالی ۲ ساغند (*Mag*: مگنتیت، *Mol*: مولیبدنیت، *Urn*: اورانینیت)

۴.۶. کانسار آنومالی ۵ ساغند

کانی‌سازی عناصر پرتوزا در آنومالی ۵ ساغند به صورت کانی‌سازی عناصر نادر خاکی - اورانیوم - توریم است که در مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرسان دیوریت تا کوارتز دیوریت و در مجاورت گرانیته دوزخ دره رخ داده است. متاسوماتیسم قلیایی و کانی‌سازی توسط گسل‌های منطقه‌ای کنترل شده است. متاسوماتیسم قلیایی شامل آلبیتی، اکتینولیتی و فلوگوپیتی شدن از مهمترین دگرسانی‌های مرتبط با کانی‌سازی در این کانسار است. ایلمنیت، دیویدایت، برانریت، روتیل و تیتانیت کانی‌های اصلی این کانسار به همراه مقادیر کم آلانیت هستند که در دگرسانی‌های سدی - کلسیک نهشته شده‌اند (شکل ۷). دیویدایت فراوان ترین کانی میزبان اورانیوم، ایتیریم و عناصر نادر خاکی در آنومالی ۵ ساغند است (شکل ۷-الف). در این کانسار، توریت کانی میزبان توریم است که به صورت ادخال در بلورهای اکتینولیت در دگرسانی سدی - کلسیک تشکیل شده است. بلورهای بی‌شکل اکسید *Ti-Y-U-Th* و اکسید-*REE* به صورت هم‌رشد با آلانیت، روتیل و دولومیت در رگچه‌های کربناتی داخل شکستگی‌های آپلیت‌ها و گرانیته‌ها متبلور شده‌اند (شکل ۷-ج). بسیاری از بلورهای آلانیت منطقه‌بندی ترکیبی با تغییر محتوای عناصر نادر خاکی نشان می‌دهند که در تصاویر *BSE* به صورت تغییر رنگ کاملاً مشخص است (شکل ۷-د). تیتانیت در دو نسل متبلور شده است که نسل اول به صورت بلورهای شکل‌دار اولیه به طور مستقیم از سیال نهشته شده و نسل دیگر به صورت بلورهای بی‌شکل از دگرسانی ایلمنیت و دیویدایت به وجود آمده است (شکل ۷-ب) [۲۲].



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی از، الف) رگچه مگنتیت قطع کننده دیویدایت، و ب) نهشت مستقیم بلورهای خودشکل تیتانیت از سیال، ج) پارائنز کانی‌های $REE-O$ ، $Ti-Y-U-Th-O$ ، روتیل و دولومیت در آپلیت‌های دگرسان شده، د) منطقه‌بندی ترکیبی واضح آلانیت، در آنومالی ۵ ساغند [۲۲] (Ab : آلانیت، Act : اکتینولیت، Aln : آلانیت، Dav : دیویدایت، Dol : دولومیت، Cal : کلسیت، Mag : مگنتیت، Zr : کوارتز، Rt : روتیل، Ttn : تیتانیت)

۵. نتیجه گیری

زون تکتونیکی کاشمر-کرمان، یکی از مهمترین زونهای متالوژنی آهن در ایران است که تشکیل کنسارهای آهن در منطقه پشت بادام-باقق-زرند در بخش مرکزی و جنوب این زون در ارتباط با ماگماتیسم کالک آلکال کامبرین زیرین در محیط تکتونیکی کمان قاره‌ای است. در برخی از این کنسارها، تمرکز عناصر پرتوزا شامل اورانیوم و توریم به دلیل عملکرد سیالات تاخیری ماگمایی و گرمایی همزمان با پدیده متاسوماتیسم وجود دارد. تمرکز عناصر پرتوزا به صورت کانی‌سازی توریم (از جمله چغارت، چاه‌گز و سه‌چاهون)، اورانیوم (آریاجنوب و آنومالی ۲ ساغند) و اورانیوم-عناصر نادر خاکی-توریم (آنومالی ۵ ساغند) بوقوع پیوسته است. در این کنسارها، کانی‌سازی آهن در مرحله اول اتفاق افتاده است و کانی‌سازی عناصر پرتوزا در مرحله تأخیری بر روی توده آهن و واحدهای دگرسان مرتبط برنهشته شده است. به طور کلی، دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی توریم مشابه با کانی‌سازی آهن، دگرسانی قلیایی عمدتاً سدیک-کلسیک با کانی‌های شاخص آلانیت، آمفیبول (اکتینولیت-ترمولیت) و کلینوپیروکسن (اوژیت-دیوپسید) است. کانی اصلی میزبان توریم در این کنسارها سیلیکات توریم (توریت و هوتونیت) به همراه مقادیر فرعی تیتانیت است و کانی اصلی میزبان اورانیوم شامل اورانینیت به همراه مقادیر فرعی کافینیت، دیویدایت و کلونیت و مقادیر جزئی آلانیت است. محتوای توریم و اورانیوم در زون‌های کانی‌سازی به ترتیب از ۱۱۲ پی‌پی‌ام تا ۲ درصد و ۶۰ تا ۱۷۵۱ پی‌پی‌ام تغییر می‌کند. وجود پارائنز کانیایی کرنات‌ها با کانی‌های اورانیوم و توریم حاکی از این است که اورانیوم و توریم عمدتاً توسط کمپلکس‌های کرنات‌ها در سیالات قلیایی پساماگمایی حمل شده‌اند. همچنین وجود مقادیر کمتر کانی‌های سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) با کانی‌های اورانیوم نشان می‌دهد که کمپلکس‌های سولفات‌ها دارای نقش فرعی در انتقال اورانیوم بوده‌اند. در نتیجه زون تکتونیکی کاشمر-کرمان را می‌توان به عنوان منطقه‌ای مستعد برای تولید عناصر پرتوزا به صورت محصول جانبی از کنسارهای آهن در نظر گرفت.



۶. منابع

- [1] منصور علوی نائینی، ۱۳۷۲. چینه شناسی پالئوزوئیک ایران: طرح تدوین کتاب زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.
- [2] حسین حاجی میرزاجان، آزاده ملکزاده شفارودی، سید مسعود همام، محمدرضا حیدریان شهری، ۱۳۹۶. ژئوشیمی و خاستگاه کانسنگ مگنتیت-اسپیکولاریت آپاتیت دار کانسار آهن ده زمان، شمال شرقی زون تکتونیکی کاشمر- کرمان، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۲۶، ۱-۱۵.
- [3] سمانه ضیاپور، داریوش اسماعیلی، خالق خشنودی، شجاع الدین نیرومند، ۱۴۰۱. کانی‌شناسی و ژئوشیمی کانی‌سازی توریم در کانسار آهن چاه‌گز، منطقه بافق، زون ایران مرکزی، مجله علوم و فنون هسته‌ای، ۱۰۰، ۸۰-۸۷.
- [4] بهروز کریمی شهرکی، ۱۳۹۳. فرآیندهای گرمایی و کانه‌زایی اکسید آهن-مس-طلا در کانسار جلال آباد زرنده، رساله دکتری، دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم زمین، ۲۶۷ص.
- [5] خالق خشنودی، ۱۳۹۵. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژئز کانه‌زایی عناصر پرتوزا با تاکید بر عنصر توریم در کانسار چغارت، یزد، رساله دکتری، دانشگاه بهشتی، دانشکده علوم زمین، ۲۴۰ص.
- [6] سمانه ضیاپور، ۱۴۰۰. پترولوژی و ژئوشیمی آهن و عناصر کمیاب در کانسار آهن-وانادیم چاه‌گز (ایران مرکزی)، رساله دکتری، دانشگاه تهران، دانشکده علوم زمین، ۱۹۸ص.
- [7] خالق خشنودی، سمانه ضیاپور، ۱۴۰۲. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژئز کانه‌زایی آهن و توریم در کانسار سه‌چاهون، منطقه بافق، زون ایران مرکزی، گزارش داخلی: پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۱۰۵ص.
- [8] احمد کریمی، ۱۳۷۲. خلاصه‌ای از زمین‌شناسی و اکتشاف تفصیلی در ناحیه ساغند، گزارش داخلی ۳۳۷: معاونت مواد اولیه و سوخت سازمان انرژی اتمی ایران، ۱۲۲ص.
- [9] صالح دیمر، ۱۳۹۷. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژئز عناصر U, REE, Th و Ti در آنومالی پنج ساغند، رساله دکتری، دانشگاه بهشتی، دانشکده علوم زمین، ۲۹۷ص.
- [5] Ramezani, J., Tucker, R.D., 2003. The saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics, *American Journal of Science*, 303, 622-665.
- [6] Forster, H., Jafarzadeh, A., 1994. The Bafq mining district in central Iran: a highly mineralized Infracambrian volcanic field, *Economic Geology*, 89, 1697-1721
- [7] Bonyadi, Z., Davidson, G.J., Mehrabi, B., Meffre, S., Ghazban, F., 2011. Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se-Chahun iron oxide-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights from paragenesis and geochemistry, *Chemical Geology*, 281, 253-269.
- [8] Mokhtari, M.A., 2015. Posht-e-Badam metallogenic block (central Iran): a suitable zone for REE mineralization, *Central European Geology*, 58, 199-216.
- [9] Khoshnoodi, K., Yazdi, M., Ghannadi-Maragheh, M., Ziapour, S., Deymar, S., Behzadi, M., 2022a. Formation and evolution of Th-REE mineralizing fluids at the kiruna-type Choghart iron oxide-apatite deposit, central Iran: insights from fluid inclusions and H-C-O isotopes, *Geological Journal*, 57, 2144-2159.
- [10] Daliran, F., 2002. Kiruna-type iron oxide-apatite ores and apatites of the Bafq district, Iran, with an emphasis on the REE geochemistry of their apatites, In: Porter T.M., editor. *Hydrothermal iron oxide copper gold and related deposits, Adelaide, Australia: A Global Perspective* PGC Publishing, 303-320.
- [11] Daliran, F., Stosch, H.G., Williams, P., 2009. A review of the Early Cambrian magmatic and metasomatic events and their bearing on the genesis of the Fe oxide-REE-apatite deposits (IOA) of the Bafq District, Iran, In: Williams et al. (eds.) *Smart science for exploration and mining, proceedings of the 10th Biennial SGA Meeting, Townsville, Australia*, 623-625.



- [12] Rajabi, A., Canet, C., Rastad, E., Alfonso, P., 2015. Basin evolution and stratigraphic correlation of sedimentary-exhalative Zn-Pb deposits of the early Cambrian zarigan-chahmir basin, central Iran, *Ore Geology Reviews* 64, 328-353.
- [13] NISCO, 1980. Result of search and valuation works at magnetic anomalies of the Bafq iron ore region during 1976-1979, Unpub. Rep., National Iran Steel Corporation.
- [14] Torab, F.M., Lehmann, B., 2007. Magnetite-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: apatite geochemistry and monazite geochronology, *Mineral Magazine*, 71, 347-363.
- [15] Stosch, H.G., Romer, R.I., Daliran, F., Rhede, D., 2011. Uranium-lead ages of apatite from iron oxide ores of the Bafq district, east-central Iran, *Mineralium Deposita*, 46, 9-21.
- [16] Khoshnoodi, K., Ziapour, S., Yazdi, M., Cuney, M., 2022b. Mineralogy of various types of Th-U-REE mineralisation in the iron oxide – apatite deposits of the Bafq district, Central Iran, *Applied Earth Science*, 33, 187-201.
- [17] Deymar, S., Yazdi, M., Rezvanianzadeh, M.R., Behzadi, M., 2018. Alkali metasomatism as a process for Ti-REE-Y-U-Th mineralization in the Saghand anomaly 5, central Iran: insights from geochemical, mineralogical, and stable isotope data, *Ore Geology Reviews*, 93, 308-336.
- [18] Mirzababaei, G., Yazdi, M., Behzadi, M., Rezvanianzadeh, M., 2021. REE-Th mineralization in the Se-chahun magnetite-apatite ore deposit, central Iran: interplay of magmatic and metasomatic processes, *Ore Geology Reviews*, 139, 104426.
- [19] Johnson, C.A., Harlow, G.E., 1999. Guatemala jadeitites and albitites were formed by deuterium-rich serpentinizing fluids deep within a subduction-channel, *Geology*, 27, 629-632.
- [20] Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal processes and mineral systems*, Springer, Berlin, 1243 p.
- [21] Cuney, M., Emetz, A., Mercadier, J., Mykchaylov, V., Shunko, V., Yuslenko, A., 2012. Uranium deposits associated with Na-metasomatism from central Ukraine: a review of some of the major deposits and genetic constraints, *Ore Geology Reviews*, 44, 82-106.
- [22] Zhao, F., 2005. Alkali-metasomatism and uranium mineralization, In: Mao, J., Bierlein, F.P. (Eds.), *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [23] Huckriede, R., Kursten, M., 1962. Zur geologie des Gebetes Zwischen Kerman and Saghand (Iran), *Geologisches Jahrbuch*, 51, 197-201.
- [24] Haghypour, A., Pelissier, G., 1977. Geology of the Saghand Sector, In: Haghypour, A., Valeh, N., Pelissier, G., Davoudzadeh, M. (Eds.), *Explanatory Text of the Ardakan Quadrangle Map*, Geological Survey of Iran, 10-68.
- [25] Ramezani, J., 1997. Regional geology, geochronology and geochemistry of the igneous and metamorphic rock suites of the Saghand Area, central Iran, Ph.D. Thesis, Washington University, Washington, 416 p.
- [26] Khoshnoodi, K., Behzadi, M., Gannadi-Maragheh, M., Yazdi, M., 2017. Alkali metasomatism and Th-REE mineralization in the Choghart deposit, Bafq district, Central Iran, *Geologia Croatica*, 70, 53-69.