



## کانی‌شناسی و ژئوشیمی کانه‌زایی توریم در کانسار آهن چاه‌گز، منطقه بافق، زون ایران مرکزی

سمانه ضیاپور<sup>۱\*</sup>، داریوش اسماعیلی<sup>۱</sup>، خالق خشنودی<sup>۲</sup>، شجاع‌الدین نیرومند<sup>۱</sup>

۱. گروه زمین‌شناسی، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵۶۴۵۵، تهران- ایران

۲. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران- ایران

\*Email: sziapour@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۲/۲۹

### چکیده

کانسار آهن چاه‌گز (آنومالی XIVA) در منطقه معدنی بافق در زون ساختاری ایران مرکزی در استان یزد واقع شده است. مجموعه سنگ‌های ساب ولکانیک و ولکانیک با ترکیب گرانیت تا دیوریت با سن کامبرین آغازین، سنگ میزبان این کانسار را تشکیل داده‌اند. بررسی‌های طیف‌سنجی گامای زمینی، مطالعات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی در این کانسار نشان می‌دهد که کانه‌زایی توریم عمدتاً همراه با دگرسانی‌های سدیمی-کلسیمی و منیزی می‌باشد و در مقایسه فرعی همراه با کانسنگ مگنتیت است. مطالعات کانی‌شناسی به وسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی (SEM و EPMA) نشان می‌دهد که کانی اصلی میزبان توریم در کانسار چاه‌گز، توریت است و کانی‌های تیتانیت، آلانیت و زیرکن نیز در مقادیر فرعی وجود دارند. میانگین عبار توریم و  $\Sigma$ REE در زون کانه‌زایی توریم به ترتیب ۴۵۰ و ۵۹۶ پی‌پی‌ام است. توریت در دگرسانی سدیمی-کلسیمی در همراهی با آلانیت، اکتینولیت، ترمولیت و اوژیت بوده و در دگرسانی منیزی همراه با کانی تالک تشکیل شده است. توریت در کانسنگ آهن همراه با مجموعه کانیایی مگنتیت، کلسیت و آپاتیت تشکیل شده است. الگوهای مشابه توزیع عناصر نادرخاکی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه در سنگ‌های میزبان و زون کانه‌زایی توریم بیان‌گر ارتباط این کانه‌زایی با ماگماتیسم کالک-آلکان کامبرین آغازین در موقعیت کمان قاره‌ای می‌باشد. وجود مگنتیت پاراژنز با توریت و ناهنجاری منفی Eu در نمونه‌های زون کانه‌زایی توریم می‌تواند حاکی از شرایط احیایی سیال عامل کانه‌زایی توریم باشد.

**کلیدواژه‌ها:** کانسار چاه‌گز، منطقه معدنی بافق، کانه‌زایی توریم، دگرسانی سدیمی-کلسیمی، دگرسانی منیزی

## Mineralogy and geochemistry of thorium mineralization in the Chahgaz iron deposit, Bafq district, Central Iran

S. Ziapour<sup>\*1,2</sup>, D. Esmaeily<sup>1</sup>, K. Khoshnoodi<sup>2</sup>, S. Niroomand<sup>1</sup>

1. Department of Geology, Faculty of Science, University of Tehran, P.O.Box: 141556455, Tehran- Iran

2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box:11365-8486, Tehran-Iran

Research Article

Received 17.2.2021, Accepted 19.5.2021

### Abstract

The Chahgaz iron deposit (XIV Anomaly) is located in the Bafq mining district in the Central Iranian geosubstructural zone in Yazd province. The Chahgaz deposit is hosted by Early Cambrian subvolcanic and volcanic rocks that range compositionally from granite to diorite. The field gamma spectrometry, mineralogical and geochemical studies in this deposit indicate that the thorium mineralization is mainly associated with Na-Ca and Mg- alterations, and in minor amount with the magnetite ore. The mineralogical studies by optical and electron microscope (SEM and EPMA) indicate that the main thorium host mineral in the Chahgaz deposit is thorite associated with minor titanite, allanite and zircon. The average contents of Th and  $\Sigma$ REE in the Th-mineralization zone are 450 and 596 ppm, respectively. Thorite is paragenesis with albite, actinolite, tremolite and augite in the Na-Ca alteration zone, and with talc in the Mg- alteration zone. In the Th-bearing iron ore, thorite is paragenesis with magnetite, calcite and apatite mineral assemblage. The similarity in mantle-normalized REE patterns of host rocks and thorium mineralization zone suggests that Th-mineralization is related to Early Cambrian calc-alkaline magmatism in continental-margin arc setting. The occurrence of paragenetic magnetite with thorite and distinct negative Eu anomaly in the thorium mineralization zone can be inferred probably a reduced condition for thorium mineralizing fluids.

**Keywords:** Chahgaz deposit, Bafq mining district, Thorium mineralization, Na-Ca alteration, Mg- alteration



## ۱. مقدمه

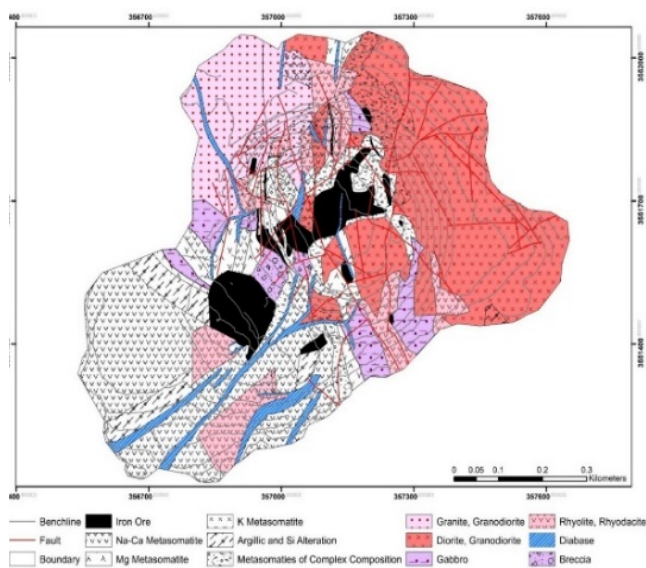
منطقه بافق میزبان کنسارهای متعدد اکسید آهن-آپاتیت در ایران است، محققان بسیاری بر روی این منطقه کار کرده‌اند [۸-۱۳]. سازند تاشک به عنوان پی‌سنگ پرکامبرین منطقه بافق متشکل از شیل، اسلیت، ماسه سنگ کوارتزیتی و فیلیت است که به صورت ناپیوسته توسط توالی آتشفشانی-رسوبی به سن کامبرین آغازین پوشیده شده است. سنگ‌های پرکامبرین و اینفراکامبرین در محدوده چاه‌گز رخمون ندارند. توالی آتشفشانی-رسوبی متشکل از ریولیت تا ریوداسیت، آندزیت، بازالت، توف، شیل، ماسه سنگ، دولومیت، آهک دولومیتی و سنگ‌های تبخیری است [۱۴]. بخش عمده سنگ‌های محدوده کنسار چاه‌گز، سنگ‌های نیمه‌نفوذی با ترکیب گرانیت تا دیوریت و سنگ‌های خروجی با ترکیب ریولیت تا ریوداسیت کالک-آلکانل با پتاسیم بالا به سن کامبرین آغازین هستند که در واقع سنگ‌های میزبان کانه‌زایی آهن را تشکیل می‌دهند. ضخامت هاله دگرسانی در این محدوده بسیار متغیر است. در بخش غربی کنسار، گرانیت‌های موسوم به گرانیت زیرگان رخمون دارند و در بخش‌های شرقی کنسار، گرانودیوریت و دیوریت‌های چاه‌گز رخمون دارند (شکل ۱). توده‌های نفوذی گابرویی کوچکی نیز در محدوده کنسار وجود دارند. تمامی این سنگ‌ها درجه‌های متغیری از دگرسانی گرمایی را متحمل شده‌اند و نوع و شدت دگرسانی به نوع سنگ، عمق و فاصله از توده معدنی وابسته است. دایک‌های دیابازی جوان‌تر تمام سنگ‌های منطقه و کانسنگ آهن را قطع کرده‌اند که در برخی نقاط به اکتینولیت، کلریت و اپیدوت دگرسان شده‌اند [۱۱].

ذخایر اکسید آهن نوع کایرونا (IOA) رده‌ای از ذخایر آهن هستند که در ارتباط با ماگماتیسیم کالک آلکانل و دگرسانی سدیمی-کلسیمی-پتاسیمی در مقیاس منطقه‌ای تا کنساری هستند و در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی در جهان شناسایی شده‌اند [۵-۱]. ذخایر اکسید آهن-آپاتیت نوع کایرونا می‌توانند همراه با مقادیر قابل توجهی عناصر نادر خاکی و توریم باشند [۶، ۷]. منطقه معدنی بافق در پهنه ایران مرکزی میزبان ذخایر بزرگ اکسید آهن-آپاتیت نوع کایرونا (بیش از ۴۰ آنومالی آهن) با بیش از ۲ میلیارد تن ذخیره است که در اوایل پالئوزوئیک تشکیل شده‌اند. این ذخایر عمدتاً در توف‌های فلسیک کامبرین آغازین با ترکیب ریولیتی تا ریوداسیتی و واحدهای آتشفشانی-رسوبی واقع شده‌اند [۴، ۸]. همراهی ذخایر آهن منطقه بافق با سنگ‌های آتشفشانی فلسیک متعلق به واحدهای آتشفشانی-رسوبی کامبرین آغازین و هم‌چنین با زون‌های دگرسانی آلکانل نشان از رابطه ژنتیکی کانه‌زایی آهن، ماگماتیسیم کامبرین آغازین و متاسوماتیسیم آلکانل دارد [۸-۱۰]. کنسار آهن نوع کایرونا چاه‌گز (آنومالی XIVA) با میزان ذخیره تقریبی ۸۳ میلیون تن، یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین ذخایر آهن ناحیه بافق است که در فاصله ۴۳ کیلومتری شمال معدن چغارت در منطقه معدنی بافق واقع شده است [۸]. توالی آتشفشانی-رسوبی با سن کامبرین آغازین میزبان این ذخیره است. کانه‌زایی آهن غالباً در واحدهای گرانیتی، دیوریتی، ریولیتی و ریوداسیتی قرار دارد که متحمل دگرسانی گرمایی شدیدی شده‌اند [۸، ۱۱].

براساس بررسی‌های رادیومتری زمینی توسط طیف‌سنج RS-۲۳۰ در کنسار چاه‌گز مشخص شد که زون‌های دگرسانی حاشیه توده معدنی آهن دارای آنومالی پرتوزایی مربوط به عنصر توریم هستند و در پی آن، تجزیه شیمیایی نمونه‌های برداشت شده از واحدهای مختلف سنگ شناختی این منطقه، کانه‌زایی توریم را نشان داد. با توجه به این که در مورد کانه‌زایی توریم در این کنسار تا پیش از این مطالعه دقیقی انجام نشده است، هدف این مقاله کانی‌شناسی، مطالعه ژئوشیمی زون کانه‌زایی توریم و تعیین دگرسانی مرتبط با کانه‌زایی توریم است.

## ۲. زمین‌شناسی منطقه

کنسار آهن چاه‌گز در منطقه معدنی بافق متشکل از دو توده اصلی معدنی به صورت تقریباً عمودی و دودکش مانند است که تا عمق ۶۹۰ متری اکتشاف شده است [۸، ۱۰]. از آنجایی که



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی کنسار چاه‌گز [۱۱].



## ۳. روش پژوهش

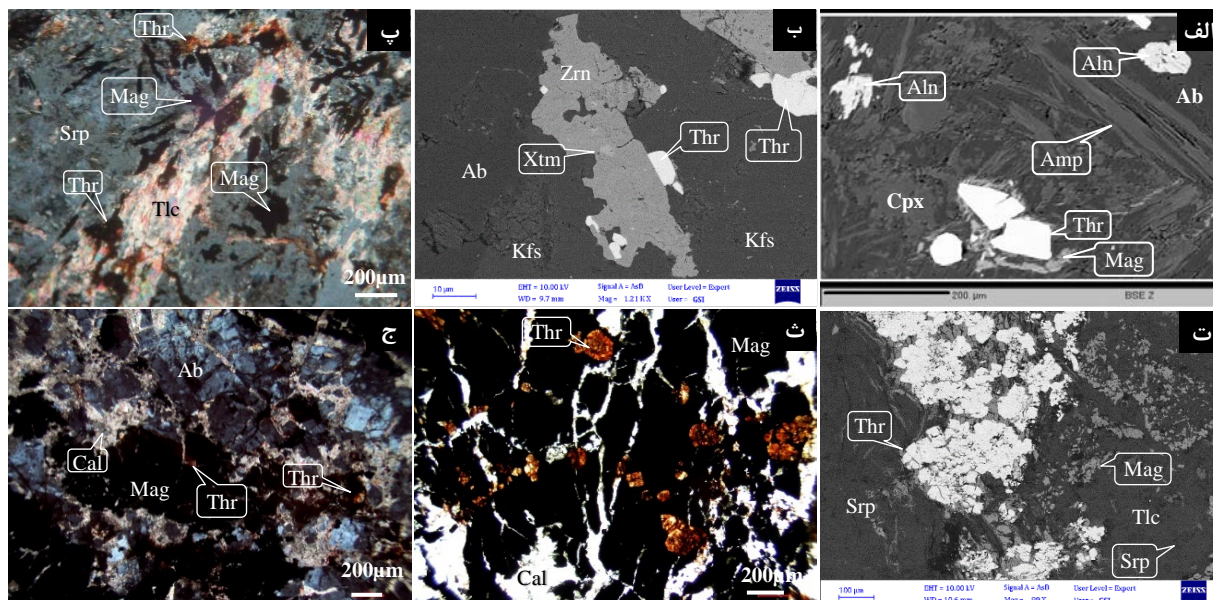
این مطالعه بر مشاهدات میدانی و برداشت‌های رادیومتری زمینی در کانسار آهن چاه‌گز استوار است. برای شناسایی تیپ‌های مختلف کانه‌زایی توریم و سنگ‌های میزبان تعداد ۶۰ نمونه برداشت شد و مقاطع نازک و نازک-صیقلی تهیه شده توسط میکروسکوپ نور عبوری-انعکاسی مدل Olympus CX21 آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشگاه تهران مطالعه شدند. تجزیه کلی نمونه‌های سنگ میزبان و زون‌های کانه‌زایی توریم به روش ICP-OES و ICP-MS در آزمایشگاه زرآما در تهران انجام گرفت (جدول ۱). 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 برای بررسی کانی‌ها در زون‌های دگرسانی، علاوه بر بررسی مقاطع، بر روی ۵ نمونه آنالیز XRD انجام شد. ۴ مقطع نازک-صیقلی از کانه‌زایی توریم به منظور بررسی‌های ریزپردازش الکترونی به مرکز تحقیقات و فراوری مواد معدنی ایران در کرج ارسال شد. در این مرکز ۱۶ نقطه برای تعیین اکسیدهای اصلی و فرعی از کانی آمفیبول و پیروکسن پاراژنز با تورتیت با استفاده از الکترون میکروپروپ مدل Cameca-sx100 با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ KV (برای اکسیدهای اصلی) و ۲۵ KV (برای اکسیدهای فرعی)، جریان ۲۰ nA و زمان شمارش ۱۵ تا ۲۰ ثانیه انجام شده است.

## ۴. بحث و نتایج

## ۴.۱. کانه‌زایی توریم در کانسار چاه‌گز

در کانسار چاه‌گز، کانه‌زایی توریم در حاشیه شمالی توده غربی و حاشیه جنوب شرقی توده شرقی آهن در محدوده گسل‌ها رخ داده است. زون کانه‌زایی توریم بخشی از دگرسانی سدیمی-کلسیمی و دگرسانی منیزیمی مرتبط با کانه‌زایی آهن و هم‌چنین کانسنگ آهن حاشیه‌ای را قطع کرده است و به عبارتی کانه‌زایی توریم پس از کانه‌زایی آهن اتفاق افتاده است. رگه‌ها و رگچه‌های تأخیری کلسیت و کوارتز دگرسانی سدیمی-کلسیمی مرتبط با کانه‌زایی آهن و کانه‌زایی توریم را قطع کرده است.

به طور کلی، فرایندهای پسامگمایی دمای بالا می‌توانند سبب انتقال و تمرکز توریم و عناصر نادر خاکی شوند و به صورت جانیشینی متاسوماتیک سنگ درون‌گیر نهشته می‌شوند [۱۵]. ویژگی‌های شاخص ذخایر گرمایی دمای بالا تشکیل آلبیت، آمفیبول، آلکالی فلدسپار و اژیترین ثانویه است و شاخص ذخایر گرمایی دمای متوسط تا پایین تشکیل آلکالی فلدسپار، کربنات و سیلیس ثانویه می‌باشد [۱۵]. توریم در ذخایر دمای بالا معمولاً همراه با عناصر Ta, Nb و Ti و در ذخایر دمای متوسط همراه با Zn, Pb و Cu یافت می‌شود [۱۵]. مطالعات میکروسکوپی نور عبوری-انعکاسی و الکترونی بر روی نمونه‌های برداشت شده از بخش‌های دارای پرتو زایی در کانسار چاه‌گز، مجموعه کانی‌های آلبیت، آمفیبول (اکتینولیت و ترمولیت)، کلینوپیروکسن (اوژیت) و تالک شناسایی شد (شکل ۲) و کانه‌زایی توریم در کانسار چاه‌گز براساس این مجموعه‌های کانیایی می‌تواند در محدوده ذخایر گرمایی دمای بالا قرار می‌گیرد.



شکل ۲. الف) تصویر BSE دگرسانی سدیمی-کلسیمی مرتبط با کانه‌زایی توریم، ب) تصویر BSE از فلدسپار پتاسیمی شدن مرتبط با کانه‌زایی توریم، پ) کانه‌زایی توریم پاراژنز با مگنتیت هم‌زمان با تالکی شدن سرپانتین‌ها، ت) تصویر BSE از رگچه کانه‌زایی توریم در دگرسانی منیزیمی، ث) تشکیل تورتیت به صورت پاراژنز با مگنتیت، ج) رگچه کلسیتی حاوی تورتیت و آمفیبول (Ab: آلبیت، Aln: آلانیت، Amp: آمفیبول، Cal: کلسیت، Cpx: کلینوپیروکسن، Kfs: فلدسپار پتاسیم، Mag: مگنتیت، Srp: سرپانتین، Thr: تورتیت، Tlc: تالک، Xtm: زون‌تیم، Zrn: زیرکن).



جدول ۱. آنالیز نقطه‌ای آمفیبول‌های موجود در مجموعه دگرسانی سدیمی - کلسیمی

Am۷	Am۶	Am۵	Am۴	Am۳	Am۲	Am۱	
							%
۵۶,۳۲	۵۶,۹۵	۵۷,۲۵	۵۴,۵۸	۵۶,۴۱	۵۵,۳۱	۵۵,۵۷	SiO <sub>۲</sub>
۰,۱۵	۰,۱۲	۰,۰۹	۰,۰۵	۰,۱۰	۰,۰۵	۰,۱۱	TiO <sub>۲</sub>
۱,۲۸	۱,۳۳	۰,۷۹	۰,۹۷	۱,۳۷	۰,۸۷	۰,۵۴	Al <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>
۴,۵۱	۴,۷۵	۴,۸۶	۷,۶۲	۵,۰۸	۸,۳۵	۹,۰۳	FeO
۰,۰۲	۰,۰۴	۰,۰۱	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۲	MnO
۲۱,۹۶	۲۱,۴۶	۲۲,۲۹	۱۹,۸۲	۲۱,۹۱	۱۹,۲۲	۱۸,۸۵	MgO
۱۲,۶۶	۱۲,۸۳	۱۲,۷۳	۱۳,۷۶	۱۲,۷۴	۱۲,۸۴	۱۳,۲۰	CaO
۰,۶۱	۰,۶۸	۰,۵۶	۰,۲۸	۰,۵۶	۰,۲۹	۰,۰۵	Na <sub>۲</sub> O
۰,۱۳	۰,۱۳	۰,۱۱	۰,۰۹	۰,۱۱	۰,۰۷	۰,۰۳	K <sub>۲</sub> O
۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۰	Cr <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>
۰,۰۰	۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	NiO
۰,۰۷	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۰	V <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>
۰,۳۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۳۸	۰,۳۴	۰,۴۵	۰,۴۳	CoO
۰,۰۴	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۰	P <sub>۲</sub> O <sub>۵</sub>
۲,۱۸	۲,۱۸	۲,۲۰	۲,۱۲	۲,۱۷	۲,۱۲	۲,۱۲	H <sub>۲</sub> O*
۱۰۰,۱۸	۱۰۰,۶۶	۱۰۱,۳۲	۹۹,۴۲	۹۹,۸۶	۹۹,۴۰	۹۹,۶۷	Total
فرمول بر اساس ۱۶ کاتیون و ۲۳ اکسیژن							
۷,۷۵	۷,۸۲	۷,۷۹	۷,۷۴	۷,۶۵	۷,۸۱	۷,۸۶	Si
۰,۲۱	۰,۱۸	۰,۱۳	۰,۱۶	۰,۲۲	۰,۱۴	۰,۰۹	Al
۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	Ti
۰,۳۴	۰,۱۳	۰,۴۰	۰,۰۸	۰,۵۰	۰,۲۴	۰,۱۶	Fe <sup>۳+</sup>
۴,۵۰	۴,۳۹	۴,۵۲	۴,۱۹	۴,۵۲	۴,۰۵	۳,۹۷	Mg
۰,۱۸	۰,۴۱	۰,۱۵	۰,۸۲	۰,۰۹	۰,۷۴	۰,۹۱	Fe <sup>۲+</sup>
۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	Mn
۱,۸۷	۱,۸۹	۱,۸۶	۲,۰۹	۱,۸۹	۱,۹۴	۲	Ca
۰,۱۶	۰,۱۸	۰,۱۵	۰,۰۸	۰,۱۵	۰,۰۸	۰,۰۱	Na
۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	K
۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	OH*
۱۷,۰۵	۱۷,۰۹	۱۷,۰۲	۱۷,۱۸	۱۷,۰۵۹	۱۷,۰۴	۱۷,۰۲	Sum

#### ۲.۴ کانی‌شناسی زون کانه‌زایی توریم

دگرسانی سدیمی - کلسیمی مرتبط با کانه‌زایی توریم شامل آلبیتی شدن، آمفیبولی شدن و کلینوپروکسینی شدن است (شکل ۲- الف و ب)، اما میزان پیروکسینی شدن به مراتب کم‌تر می‌باشد. آمفیبول یکی از کانی‌های اصلی در مجموعه کانیایی دگرسانی سدیمی - کلسیمی مرتبط با کانه‌زایی توریم در کانسار چاه‌گز می‌باشد که بخش عمده آمفیبول‌ها حاصل دگرسانی سنگ میزبان و بخش کم‌تری مربوط به جانشینی کلینوپروکسین متبلور شده در مراحل اول دگرسانی سدیمی - کلسیمی توسط آمفیبول است. علاوه بر آلبیتی شدن، فلدسپار پتاسیم به مقدار خیلی جزئی نیز تشکیل شده است. شواهد پاراژنتیکی و روابط بافتی مجموعه کانیایی دگرسانی نشان می‌دهد که تشکیل آلبیت باعث کاهش میزان سدیم سیال

رخداد دگرسانی گرمایی به ویژه دگرسانی آلکالن در اطراف کانسارهای اکسید آهن - آپاتیت در منطقه بافق از گسترش زیادی برخوردارند [۱۳]. ارتباط کانه‌زایی عناصر کمیاب و توریم در دگرسانی‌های آلکالن در مناطق مختلفی از دنیا مانند اوکراین و جنوب استرالیا اثبات شده است [۱۶]. آمفیبولی (اکتینولیت و ترمولیت)، آلبیتی و پیروکسینی (اوژیت و دیوپسید) شدن از عمده‌ترین محصولات دگرسانی آلکالن در منطقه بافق هستند [۷، ۱۳]. به طور کلی سه تیپ کانه‌زایی توریم در کانسار چاه‌گز اتفاق افتاده است که به ترتیب مقدار گسترش عبارتست از: (۱) مرتبط با دگرسانی سدیمی - کلسیمی، (۲) مرتبط با دگرسانی منیزیمی، (۳) پاراژنت با مگنتیت و کلسیت.



رگچه‌ها متبلور شده است (شکل ۲-ج). در اثر نفوذ سیالات حاوی کمپلکس‌های کربناته به شکستگی‌های مگنتیت توده‌ای، توریت در فضاها خالی و شکستگی‌های مگنتیت و آپاتیت تشکیل شده است.

#### ۳.۴ شیمی کانی

به منظور تعیین نوع کانی آمفیبول و پیروکسن پاراژنز با توریت، تجزیه میکروپروپ بر روی مجموعه دگرسانی سدیمی-کلسیمی مرتبط با کانه‌زایی توریم انجام شد. نتایج آنالیز نقطه‌ای آمفیبول و کلینوپیروکسن به همراه محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. فرمول ساختمانی آمفیبول و کلینوپیروکسن به ترتیب بر اساس ۲۳ و ۶ اتم اکسیژن محاسبه شده است. براساس تجزیه‌های نقطه‌ای میکروپروپ و طبقه‌بندی لیک و همکاران [۱۷]، آمفیبول‌های مرتبط با کانه‌زایی توریم در گروه آمفیبول‌های کلسیمی قرار می‌گیرد و ترکیب آن‌ها عمدتاً ترمولیت و اکتینولیت است (شکل ۴-الف). هم‌چنین براساس طبقه‌بندی موریموتو و همکاران [۱۸]، کلینوپیروکسن‌های موجود در دگرسانی سدیمی-کلسیمی مرتبط با کانه‌زایی توریم متعلق به پیروکسن‌های غنی از کلسیم بوده و از نوع اوژیت هستند (شکل ۴-ب).

گرمایی شده و به عبارتی مقدار پتاسیم نسبت به سدیم افزایش یافته و به دنبال آن فلدسپار پتاسیم نهشت شده است (شکل ۲-ب). آمفیبول‌ها در مراحل بعدی کلریتی، فلوگوپیتی و تالکی شده‌اند. در زون کانه‌زایی توریم در دگرسانی سدیمی-کلسیمی عموماً توریت همراه با مگنتیت و تیتانیت و به مقدار کم‌تر آلانیت، زیرکن و زنونیم است (شکل ۲-الف و ب) که توریم می‌تواند وارد شبکه کانی تیتانیت، آلانیت و زیرکن شود.

کانه‌زایی توریم در دگرسانی منیزیمی هم‌زمان با تالکی شدن سرپانتین‌های مرتبط با کانه‌زایی آهن و به صورت پاراژنز با مگنتیت، تیتانیت و روتیل به صورت رگچه‌ای و پرکننده فضاها خالی در زمینه سرپانتین و تالک اتفاق افتاده است (شکل ۲-پ و ت) و در مراحل بعدی، کلریت هم تشکیل شده است. کلسیت و آپاتیت نیز در برخی موارد همراه با توریت، مگنتیت و تالک تشکیل شده است. توالی پاراژنتیکی در کانسار چاه‌گز در شکل ۳ آورده شده است.

رگچه‌های تأخیری کلسیت در حاشیه کانسنگ آهن توده‌ای دارای کانه‌زایی توریم پاراژنز با مگنتیت هستند که بعد از فاز اصلی کانه‌زایی آهن تشکیل شده است (شکل ۲-ث و ج). کلسیت‌های پاراژنز با توریت و مگنتیت اغلب بی‌شکل هستند و مقادیر فرعی آپاتیت، آلانیت، آمفیبول و کوارتز نیز همراه این

Stage Mineral	Fe mineralization	Na-Ca alteration	Mg alteration	K Alteration	Th mineralization	Silicic- sericitic alteration	Carbonatization	Argillic alteration
Magnetite	I	██████████						
	II				██████████			
	III							
Rutile	I	██████████						
	II							
	III							
Apatite	I	-----						
	II							
	III							
Allanite		-----						
Albite	I	██████████						
	II				██████████			
Amphibole	I	██████████	-----					
	II				██████████			
Augite	I	██████████						
	II				-----			
Epidote	I	-----						
	II				-----			
Serpentine			██████████					
Chlorite			██████████					-----
Talc	II				██████████			
K-feldspar				-----	-----			
Thorite					██████████			
Titanite					██████████			
Zircon					-----			
Quartz						██████████		
Phlogopite	I		-----					
	II					-----		
Sericite						██████████		
Calcite							-----	
Montmorillonite							██████████	██████████

شکل ۳. توالی پاراژنتیکی در کانسار چاه‌گز.



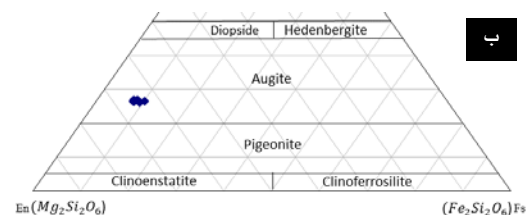
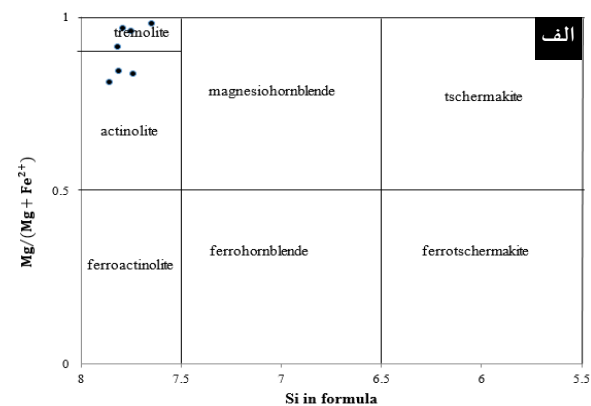
جدول ۲. آنالیز نقطه‌ای کلینوپیروکسن‌ها در مجموعه دگرسانی سدیمی- کلسیمی

Cpx۷	Cpx۶	Cpx۵	Cpx۴	Cpx۳	Cpx۲	Cpx۱	
							%
۵۵,۷۷	۵۵,۵۴	۵۵,۶۲	۵۷,۸۲	۵۶,۷۱	۵۶,۰۱	۵۵,۲۸	SiO <sub>۲</sub>
۰,۰۵	۰,۰۸	۰,۱۸	۰,۰۱	۰,۰۶	۰,۱۰	۰,۱۲	TiO <sub>۲</sub>
۰,۷۵	۱,۷۵	۱,۵۷	۰,۴۰	۱,۴۸	۰,۸۸	۱,۴۶	Al <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>
۴,۹۲	۵,۳۳	۴,۸۹	۹,۲۶	۴,۵۹	۵,۶۳	۶,۲۲	FeO
۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۰۰	۰,۰۹	۰,۰۵	۰,۰۱	۰,۰۶	MnO
۲۲,۶۵	۲۱,۸۸	۲۲,۵۴	۱۸,۲۹	۲۲,۲۷	۲۲,۱۳	۲۱,۹۱	MgO
۱۲,۶۱	۱۲,۵۳	۱۲,۸۶	۱۳,۵۲	۱۲,۵۷	۱۲,۴۰	۱۲,۷۴	CaO
۰,۵۷	۰,۶۰	۰,۵۷	۰,۰۸	۰,۵۹	۰,۶۹	۰,۵۷	Na <sub>۲</sub> O
۰,۰۸	۰,۱۳	۰,۰۹	۰,۰۲	۰,۱۶	۰,۱۱	۰,۱۰	K <sub>۲</sub> O
۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۶	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۴	۰,۰۰	Cr <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>
۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۴	۰,۰۰	۰,۰۰	NiO
۰,۰۱	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۰	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۰۳	V <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>
۰,۷۰	۰,۲۱	۰,۰۰	۰,۲۵	۰,۰۰	۰,۱۳	۰,۰۰	CoO
۰,۰۰	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۰	P <sub>۲</sub> O <sub>۵</sub>
۹۸,۱۸	۹۸,۱۷	۹۸,۴۵	۹۹,۴۹	۹۸,۶۰	۹۸,۱۷	۹۸,۴۹	Total
فرمول بر اساس ۴ کاتیون و ۶ اکسیژن							
۲,۰۴	۲,۰۳	۲,۰۲	۲,۱۴	۲,۰۵	۲,۰۴	۲,۰۱	Si
۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	Ti
۰,۰۳	۰,۰۸	۰,۰۷	۰,۰۲	۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۰۶	Al
۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	Fe <sup>۳+</sup>
۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	Cr <sup>۳+</sup>
۰,۱۵	۰,۱۶	۰,۱۵	۰,۲۹	۰,۱۴	۰,۱۷	۰,۱۹	Fe <sup>۲+</sup>
۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	Mn
۱,۲۴	۱,۱۹	۱,۲۲	۱,۰۱	۱,۲۰	۱,۲۰	۱,۱۹	Mg
۰,۴۹	۰,۴۹	۰,۵۰	۰,۵۴	۰,۴۹	۰,۴۸	۰,۵۰	Ca
۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۱	۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۰۴	Na
۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۰	K
۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	Sum

۴.۴ ژئوشیمی زون کانه‌زایی توریم

عیار توریم در زون کانه‌زایی توریم از حدود ۱۱۲ تا ۸۴۵ پی‌پی‌ام با میانگین ۴۵۰ پی‌پی‌ام متغیر است. براین اساس، نمودارهای بهنجار شده عناصر نامتحرک به منظور تعیین ویژگی‌های ژئوشیمیایی زون کانه‌زایی آهن و منشأ سیالات عامل کانه‌زایی ترسیم گردید. نمودار بهنجار شده عناصر کمیاب نامتحرک نسبت به گوشته اولیه [۱۹] برای زون کانه‌زایی توریم مبین غنی‌شدگی این سنگ‌ها از توریم و تهی‌شدگی نسبی از Ti، Nb-Ta و Zr-Hf است که از ویژگی‌های سنگ‌های وابسته به مناطق فرورانش و ماگماهای کمان‌های آتشفشانی می‌باشد (شکل ۵-الف) [۲۰-۲۱].

میزان  $\sum$ REE در حاشیه کانسنگ آهن حاوی کانه‌زایی توریم برابر با ۶۶,۶۵ پی‌پی‌ام می‌باشد و LREEها نسبت به HREEها غنی‌شدگی دارند. میزان  $\sum$ REE نمونه‌های زون کانه‌زایی توریم در دگرسانی سدیمی- کلسیمی و منیزی می‌باشد ترتیب دامنه ۷۰,۵۷ تا ۱۲۴۷,۵ و ۶۶,۹۹ تا ۱۴۹۲,۹۴ پی‌پی‌ام



شکل ۴. الف) طبقه‌بندی آمفیبول‌ها [۱۷]، ب) پیروکسن‌ها [۱۸] بر پایه ترکیب شیمیایی آن‌ها.

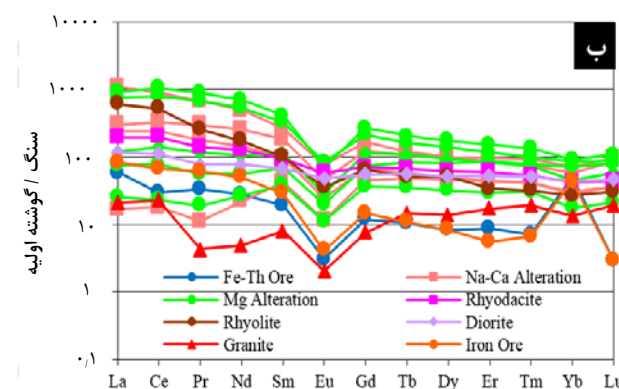
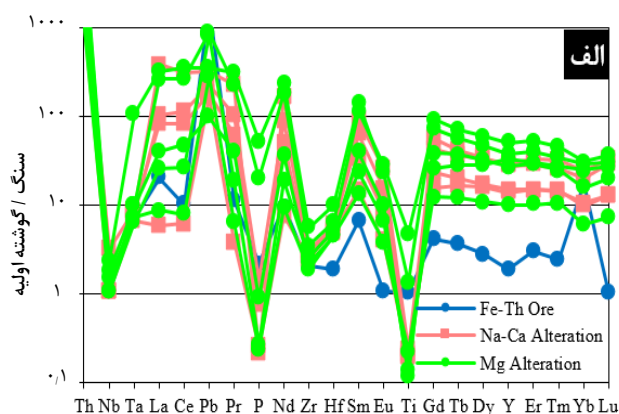


الگوی توزیع عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه [۱۹] در سنگ‌های میزبان کانسار چاه‌گز (گرانیت، دیوریت، ریولیت و ریوداسیت) با کانسنگ آهن و زون کانه‌زایی توریم تقریباً مشابه هستند و همگی ناهنجاری منفی واضح Eu، روندهای تفریق LREE/HREE مشخص را نشان می‌دهند و می‌توان نتیجه گرفت که الگوی مشابه در آن‌ها از منشأ یکسان ناشی شده است. ناهنجاری منفی Eu از سیالات عامل کانه‌زایی به ارث برده شده است، بدین‌صورت که سیالات از سنگ‌هایی منشأ گرفته‌اند که در آن‌ها  $Eu^{+2}$  توسط تبلور پلاژیوکلاز حذف شده است یا در حال تعادل با آن‌ها بوده‌اند و در نتیجه سیال از Eu تهی شده است [۲۲-۲۳]. ناهنجاری منفی Eu می‌تواند حاکی از شرایط احیایی سیال کانه‌زا و محیط نیز باشد و با توجه به وجود مگنتیت پاراژن با توریت در زون کانه‌زایی توریم، ناهنجاری منفی Eu به احتمال زیاد به دلیل شرایط احیایی سیال و محیط نهشت می‌باشد.

### ۵. نتیجه‌گیری

براساس بررسی‌های صحرایی و مطالعات کانی‌شناسی در کانسار چاه‌گز، سه تیپ کانه‌زایی توریم در این کانسار شناسایی شده است و همچنین مشخص شد که رخداد کانه‌زایی توریم پس از کانه‌زایی آهن عمدتاً در دگرسانی‌های سدیمی-کلسیمی و منیزیمی و به صورت فرعی در کانسنگ آهن حاشیه توده معدنی اصلی آهن اتفاق افتاده است. کانه‌زایی توریم در کانسار چاه‌گز حاصل دگرسانی گرمایی بوده و خارج از محدوده کانسنگ آهن گسترش قابل توجهی دارد. کانی اصلی توریم در زون کانه‌زایی توریم، توریت همراه با مقادیر کم‌تر تیتانیت است که به صورت رگچه‌ای و پرکننده فضاهای خالی و همچنین انکلوزیون تشکیل شده است. در بخش‌های حاشیه‌ای کانسنگ آهن، توریت به صورت پاراژن با کلسیت+مگنتیت+آپاتیت±آلبیت±آمفیبول±کوارتز وجود دارد. مجموعه کانی‌های مرتبط با کانه‌زایی توریم در دگرسانی سدیمی-کلسیمی شامل ترمولیت+اکتینولیت+آلبیت+اوژیت+توریت±ارتوکلاز±مگنتیت±تیتانیت±زیرکن±آلانیٹ±زنوتیم می‌باشد. مجموعه کانیایی در دگرسانی منیزیمی مرتبط با کانه‌زایی توریم متشکل از تالک+توریت+مگنتیت+تیتانیت±روتیل±کلسیت±آپاتیت است. الگوهای ژئوشیمیایی توزیع عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه مشابه در نمونه‌های سنگ‌های نفوذی و خروجی میزبان با نمونه‌های زون کانه‌زایی توریم بیان‌گر ارتباط کانه‌زایی توریم با ماگماتیسم کمان-قاره‌ای طی کامبرین آغازین می‌باشد. مجموعه کانیایی زون کانه‌زایی توریم در کانسار چاه‌گز منطبق بر کانه‌زایی‌های دمای بالا است. عناصر Ta, Nb, Ti در الگوی پراکندگی عناصر کانسنگ توریم چاه‌گز تهی‌شدگی نشان

را نشان می‌دهد که میزان LREE نسبت به HREE غنی‌شدگی دارد. همچنین تفکیک مشخصی بین LREE و HREE در زون کانه‌زایی توریم مشاهده می‌شود و میزان  $(La/Yb)_n$  از ۰/۶ تا ۱۹/۴ برای دگرسانی سدیمی-کلسیمی و ۱/۰۶ تا ۱۰/۲۵ برای دگرسانی منیزیمی متغیر می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که سیالات عامل کانه‌زایی توریم از LREE غنی شده‌اند. میزان  $(La/Yb)_n$ ، درجه تفکیک LREE و HREE در کانسنگ آهن دارای کانه‌زایی توریم برابر با ۱/۱۵، ۳/۰۷ و ۰/۲۳ است. درجه تفکیک LREE،  $(La/Sm)_n$ ، از ۰/۳۹ تا ۴/۲۲ در دگرسانی سدیمی-کلسیمی و ۰/۶۶ تا ۲/۳۳ در دگرسانی منیزیمی متغیر است. درجه تفکیک HREE،  $(Gd/Yb)_n$ ، از ۱/۶۲ تا ۲/۹۰ در دگرسانی سدیمی-کلسیمی و ۱/۰۴ تا ۲/۹۷ در دگرسانی منیزیمی متغیر است. درجه تفکیک بین LREEها به طور میانگین ۱/۷۹ و در HREEها به طور میانگین ۲/۱۶ می‌باشد، بنابراین میزان تفکیک در HREE بیش‌تر از LREE می‌باشد. الگوی پراکندگی عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (شکل ۵-ب)، روندهای تفریق LREE/HREE مشخص و ناهنجاری‌های منفی واضح Eu (۰/۲۱ تا ۰/۳۶ با مقدار میانگین ۰/۲۹) را نشان می‌دهد.



شکل ۵. الف) الگوی پراکندگی عناصر جزئی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه [۱۹] در زون کانه‌زایی توریم، ب) مقایسه الگوی پراکندگی عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه [۱۹] در زون کانه‌زایی توریم با سنگ‌های میزبان کانسار چاه‌گز.



8. H. Förster, A. Jafarzadeh, *The Bafq Mining District in Central Iran: a Highly Mineralized Infracambrian Volcanic Field*, *Econ. Geol.*, **89**, 1697 (1994).
9. M. Jami, *The University of New South Wales*, *Ph.D Thesis*, (2005).
10. F. Daliran, H.G. Stosch, P. Williams, *In: Proceedings of the 10th Biennial SGA Meeting, Edited by Williams et al.*, (Townsville, Australia), 623-625 (2009).
11. S. Ziapour, et al., *Mineralogy, Geochemistry, and Genesis of the Chahgaz (XIVA Anomaly) Kiruna-Type Iron Oxide-Apatite (IOA) Deposit, Bafq District, Central Iran*, *Ore Geol. Rev.*, 128 (2021).
12. F. Moore, S. Modabberi, *Origin of Choghart Iron Oxide Deposit, Bafq Mining District, Central Iran: New Isotopic and Geochemical Evidence*, *J. Sci.* **14(3)**, 259 (2003).
13. F. Torab, *Clausthal University of Technology*, *Ph.D Thesis*, (2008).
14. J. Ramezani, R.D. Tucker, *The Saghand Region, Central Iran: U-Pb Geochronology, Petrogenesis and Implications for Gondwana Tectonics*, *Am. J. Sci.*, **303**, 622 (2003).
15. N.A. Titayeva, *Nuclear geochemistry*, 1st Ed. (CRC Press/ Taylor & Francis, London, 1994).
16. A. Kontonikas-Charos, C.L. Ciobanu, N.J. Cook, *Albitization and Redistribution of REE and Y in IOCG Systems: Insights from Moonta-Wallaroo, Yorke Peninsula, South Australia*, *J. Lithos.* **208-209**, 178 (2014).
17. B.E. Leake, et al., *Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names*, *Am. Mineral.*, **82**, 1019 (1997).
18. N. Morimoto, et al., *Nomenclature of Pyroxenes*, *Mineral. Mag.*, **14**, 198 (1988).
19. S.S. Sun, W.F. McDonough, *In: Magmatism in the Ocean Basins*, Edited by A.D. Saunders, and M.J. Norry (Geological Society of London, Special Publication), 313-345 (1989).
20. E. Aldanmaz, et al., *Petrogenetic Evolution of Late Cenozoic, Post-collision Volcanism in Western Anatolia, Turkey*, *J. Volcanology and Geothermal Research.* **102**, 67 (2000).
21. A.W. Hofmann, *Chemical Differentiation of the Earth: The Relationship Between Mantle, Continental Crust, and Oceanic Crust*. *J. Earth and Planetary Science Letters.* **90**, 297 (1988).
22. P. Henderson, *Raer earth element geochemistry*, 1st Ed. (Elsevier Science, 1984).
23. H.R. Rollinson, *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation and Interpretation*, 1st Ed. (Longman, London, 1993).

می‌دهند و از آنجایی که کانه‌زایی توریم در این منطقه در ارتباط با ماگماتیسم کالک-آلکانل زون فرورانش حاشیه قاره‌ای است و سنگ‌های تشکیل شده در این مناطق دارای تهی‌شدگی Ta و Nb، Ti هستند، در نتیجه کانه‌زایی توریم در منطقه چاه گز که در ارتباط با این نوع ماگماتیسم است، تهی‌شدگی عناصر مذکور را نشان می‌دهد. ناهنجاری منفی واضح Eu (۰٫۲۱ تا ۰٫۳۶) در الگوهای عناصر جزئی ناسازگار بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه در نمونه‌های زون کانه‌زایی توریم و هم چنین وجود مگنتیت پاراژنز با توریت بیان‌گر وجود شرایط احيایی برای سیال کانه‌زا و محیط تشکیل است.

### تشکر و قدردانی

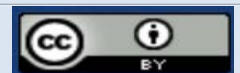
نگارندگان از حمایت‌های مادی و معنوی شرکت تهیه و تولید مواد معدنی و مجتمع معادن سنگ آهن فلات مرکزی ایران در به ثمر رسیدن پژوهش حاضر تقدیر و تشکر می‌نمایند. هم‌چنین از زحمات جناب آقای مهندس اسلامی و آقای مهندس میرایی در هماهنگی برای نمونه‌برداری سپاسگزاری می‌شود.

### مراجع

1. R. Frietsch, J.A. Perdahl, *Rare Earth Elements in Apatite and Magnetite in Kirunatype Iron Ores and Some Other Iron Ore Types*, *Ore Geol. Rev.*, **9**, 489 (1995).
2. M.W. Hitzman, *In: Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective, Edited by T.M. Porter* (PGC Publishing Adelaide Australia), 9-25 (2000).
3. P.J. Williams, P.J. Pollard, *Australian Proterozoic Iron Oxide-Cu-Au Deposits: Overview with New Metallogenic and Exploration Data from the Cloncurry District, Northwest Queensland*, *Explor. Min. Geol.*, **10**, 191 (2001).
4. H.G. Stosch, et al., *Uranium-Lead Ages of Apatite from Iron Oxide Ores of the Bafq District, East-Central Iran*, *Miner. Depos.*, **46**, 9 (2011).
5. L. Corriveau, P. Williams, H. Mumin, *In: Exploring for Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Canada and Global Analogues, Edited by L. Corriveau, and H. Mumin*, (Geological Association of Canada, Short Course Notes), 87-106 (2010).
6. M.D. Barton, *In: Treatise of Geochemistry, Edited by H. Holland, and K. Turekian* (Elsevier, London), 515-536 (2014).
7. K. Khoshnoodi, et al., *Alkali Metasomatism and Th-REE-Mineralization in the Choghart Deposit, Bafq District, Central Iran*, *Geol. Croat.*, **70**, 53 (2017).

#### COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

سمانه ضیاپور، داریوش اسماعیلی، خالق خشنودی، شجاع‌الدین نیرومند (۱۴۰۱)، کانی‌شناسی و ژئوشیمی کانه‌زایی توریم در کانسار آهن چاه‌گز، منطقه بافق، زون ایران مرکزی، ۸۰-۸۷

DOR: 20.1001.1.17351871.1401.43.2.9.4

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1386.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1386.html)

