



مطالعه و بررسی کانی‌سازی توریم در کانسار آهن اکسید - آپاتیت چغارت، ناحیه‌ی معدنی بافق، منطقه‌ی ایران مرکزی

خالق خشنودی*^{۱،۲}، محمد یزدی^۱، محمد قنادی مراغه^۲، مهرداد بهزادی^۱

۱. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران - ایران

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

چکیده: میزان کانسار آهن اکسید-آپاتیت (IOA) چغارت، ریولیت‌های با سن کامبرین آغازین است. بررسی‌های پرتوسنجی و طیف‌سنجی زمینی منطقه‌ی دگرسانی در حاشیه‌ی توده‌ی ماده معدنی منیتیت-آپاتیت چغارت نشان داد که در منطقه‌ی برشی ناهنجاری‌های پرتوزایی گامای مربوط به عنصر توریم وجود دارد. تجزیه‌ی شیمیایی نمونه‌های این منطقه توسط طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده‌ی القایی (ICP-MS) حاکی از کانی‌سازی توریم است. مطالعات کانی‌شناسی به وسیله‌ی میکروسکوپی نور عبوری و انعکاسی، ریزتجزیه‌ی ردیاب الکترونی (EPMA) نشان می‌دهد که کانی‌های اصلی توریم در این منطقه شامل توریت و اسفن هستند. مجموعه‌ی کانی‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی توریم در چغارت شامل آلپیت ± ارتوکلاز + کالک سیلیکات (اکتینولیت - اوژیت - دیوپسید) + کربنات (کلسیت) + منیتیت + پیریت ± کالکوپیریت ± گالن + اسفن + روتیل ± میکروکلین ± آپاتیت (دگرسانی Na-Ca-Fe) تشخیص داده شد. حضور منیتیت، پیریت و کالکوپیریت پاراژنز با توریت و ناهنجاری منفی Eu در نمونه‌های منطقه‌ی کانی‌سازی توریم می‌تواند حاکی از شرایط کاهش سیال عامل کانی‌سازی توریم باشد. الگوهای مشابه توزیع عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت و گوشته، در ریولیت‌های میزبان و منطقه‌ی کانی‌سازی توریم پیشنهاد می‌کند که منشأ توریم، ماگمای ریولیتی کمان-قاره‌ای است.

کلیدواژه‌ها: کانی‌سازی توریم، کانسار آهن اکسید-آپاتیت، چغارت، ناحیه‌ی بافق

Study of Thorium Mineralization in Choghart Iron Oxide-Apatite Deposit, Bafq District, Central Iran

K. Khoshnoodi*^{1,2}, M. Yazdi¹, M. Gannadi-Maragheh², M. Behzadi¹

1. Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 1983963113, Tehran - Iran

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

Abstract: Early Cambrian rhyolite hosts the Choghart iron oxide-apatite (IOA) deposit. The ground radiometric and spectrometric surveys of alteration zone on the margin of the magnetite-apatite ore body show that the radioactive anomaly of thorium occurs in the breccia zone. The chemical analyses of the breccia zone samples by ICP-MS show thorium mineralization. The mineralogical studies by transmitted- and reflected-light microscopy and EPMA indicate that the main thorium minerals in thorium mineralization zone are thorite and sphene. The alteration mineral assemblages related to thorium mineralization of Choghart is consisted of albite ± orthoclase + calc-silicate (actinolite- augite-diopside) + carbonate (calcite) + magnetite + pyrite ± chalcopyrite ± galena + sphene + rutile ± microcline ± apatite (Na-Ca-Fe alteration). The occurrence of paragenetic magnetite, pyrite and chalcopyrite with thorite and negative Eu anomaly in the thorium mineralization zone indicate a reduced condition for thorium mineralizing fluids. The similarity in chondrite- and mantle-normalized REE patterns of host rhyolite and the thorium mineralization zone suggests that thorium is originated from continental-arc rhyolitic magma.

Keywords: Thorium Mineralization, Iron Oxide-Apatite Deposit, Chogart, Bafq District



۱. مقدمه

در مورد کانی‌سازی توریم این کانسار تا پیش از این هیچ‌گونه مطالعه‌ای انجام نشده است، هدف این مقاله مطالعه‌ی ژئوشیمی سنگ میزبان و کان‌سنگ، کانی‌شناسی و تعیین دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی توریم است.

۲. زمین‌شناسی کانسار چغارت

توده‌های معدنی آهن اکسید - آپاتیت و غنی از آپاتیت در ناحیه‌ی بافق معمولاً در سنگ‌های آتشفشانی فلسیک و واحدهای آتشفشانی - رسوبی با ترکیب ریولیتی تا ریوداسیتی کامبرین پیشین^(۴) (CVSU) وجود دارند [۶]. سن توف‌های ریولیتی میزبان کانسارهای IOA ناحیه‌ی بافق، ۵۲۸ میلیون سال و هم‌سن با آپاتیت‌های مرتبط با کانسنگ آهن آن‌ها (با سن ۵۲۷-۵۳۹ میلیون سال) است [۶]. عمرسنجی موناژیت کانسنگ منیتیت - آپاتیت کانسار چغارت با استفاده از Th-U-Pb میانگین سنی ۵۲۹-۵۱۵ میلیون سال را نشان می‌دهد [۱۷].

توده‌ی اصلی معدنی (آهن) در کانسار چغارت به صورت تقریباً عمودی، ناهم‌ساز، دودکش‌مانند و دارای پلاژ ۷۳°NNW است و تا عمق ۶۰۰ متری اکتشاف شده است که در این عمق کانی‌سازی آهن به صورت بین‌انگشتی با سنگ دیواره‌ی درونی متاسوماتیسم شده و قطعه‌قطعه وجود دارد. ضخامت هاله‌ی متاسوماتیتی بسیار متغیر است. بخش‌های آتشفشانی (آلکالی ریولیت درونی و بیرونی) سازند اسفوردی با سن اینفراکامبرین (معادل CVSU) سنگ میزبان ماده‌ی معدنی (آهن) هستند. حفاری‌ها و مشاهده‌های سطحی نشان می‌دهد پی‌سنگ کانسار چغارت از سنگ‌های به شدت دگرگون شده‌ی سری مراد با سن پرکامبرین تشکیل شده است که آن‌ها را واحدهای آتشفشانی - رسوبی اسفوردی (معادل CVSU) با سن کامبرین پیشین می‌پوشاند [۱۸].

هیچ‌گونه رخنمونی از سنگ‌های پرکامبرین و اینفراکامبرین در ناحیه‌ی چغارت مشاهده نمی‌شود. اما قطعه‌های دگرسان شده از دولومیت‌های سازند اسفوردی به صورت زینولیت در شکل‌ها و اندازه‌های مختلف در سنگ درون‌گیر نفوذی با ترکیب حد واسط مشاهده می‌شود. سنگ‌های نفوذی عمدتاً سینیتی هستند اما پیروکسنیت، گابرو و حتی تکه‌های گرانیتی نیز مشاهده شده‌اند.

کانسار منیتیت - آپاتیت (IOA) نوع کایرونای^(۱) چغارت یکی از مهم‌ترین ذخیره‌های آهن ناحیه‌ی بافق و کشور است و در فاصله ۱۲ کیلومتری شمال شرقی شهر بافق و ۱۲۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان یزد قرار دارد. ذخیره‌های آهن اکسید - آپاتیت نوع کایرونا، گاهی اوقات تحت عنوان عضو انتهایی فقیر از مس ذخیره‌های آهن اکسید - مس - طلا (IOCG) طبقه‌بندی می‌شوند [۱]. ذخیره‌های آهن اکسید - آپاتیت و IOCG به واسطه‌ی مقادیر قابل استخراج اکسیدهای آهن (یعنی منیتیت و یا هماتیت) و یا مقادیر متغیری از Au, Cu, عناصر خاکی نادر (REE), U, P, Ag و Co (فوز و مک‌لاند [۲]، چیارادیا و همکاران [۳]، بارتون [۴]) دارای ارزش اقتصادی هستند. ذخیره‌های نوع کایرونا در دوره‌ی زمانی پروتروزوئیک پیشین (از جمله کایرونا، مالبرگت^(۲) و گرانجسبرگ^(۳)) [۱، ۵]، اوایل پالئوزوئیک (ذخیره‌های ناحیه‌ی بافق) [۶]، تا سنوزوئیک (از جمله ال لکو، شیلی) [۷-۹] تشکیل شده است و به طور کلی یک ارتباط با ماگماتیسم کالک آلکالن و دگرسانی (REE) Fe-P (Mg)-K-Ca-Na همزاد در مقیاس منطقه‌ای تا ذخیره‌ای نشان می‌دهد [۵، ۱۰، ۱۱].

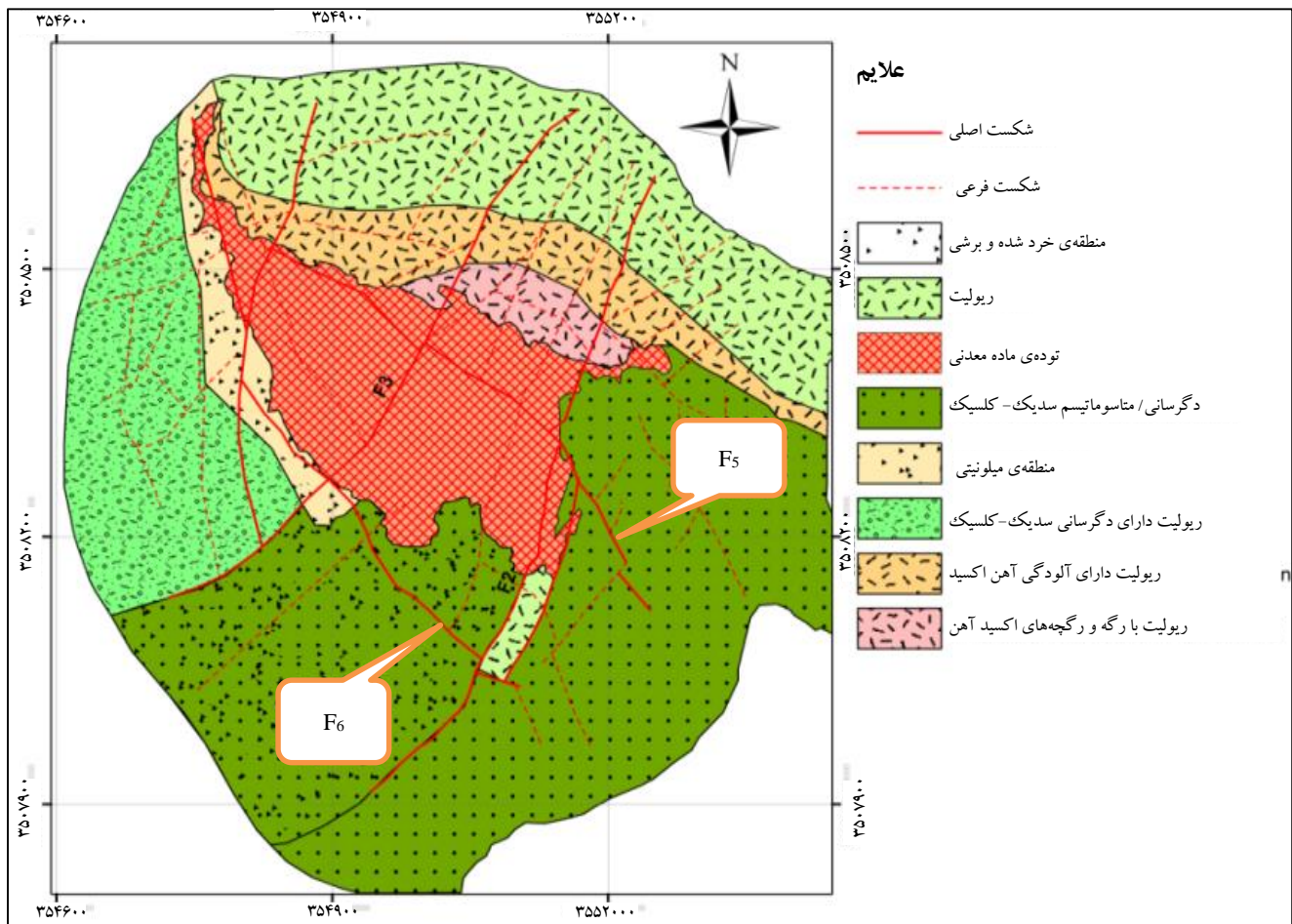
ناحیه‌ی بافق در شرق ایران مرکزی میزبان ذخیره‌های بزرگ آهن اکسید - آپاتیت است که در توف‌های فلسیک دگرگون نشده‌ی کامبرین پیشین ترکیب ریولیتی تا ریوداسیتی و واحدهای آتشفشانی - رسوبی واقع شده است. ارتباط نزدیک زمانی و مکانی ذخیره‌های آهن اکسید - آپاتیت نوع کایرونا و سنگ‌های غنی از آپاتیت با سنگ‌های آتشفشانی فلسیک کامبرین پیشین پیشنهادکننده‌ی این است که کانی‌سازی آهن و ماگماتیسم کامبرین پیشین هم‌زمان بوده‌اند [۱۲-۱۶]. از این گذشته، ذخیره‌ها در منطقه‌های دگرسانی آلکالی منطقه‌ای (پتاسیم - و سدیم فلدسپار) که اشاره به یک رابطه‌ی ژنتیکی بین فرایندهای کانی‌سازی، ماگماتیسم کامبرین پیشین و متاسوماتیسم آلکالی دارد، یافت شده‌اند [۶].

براساس بررسی‌های پرتوسنجی و طیف‌سنجی زمینی توسط طیف‌سنج RS-۲۳۰ در کانسار چغارت مشاهده شده است که منطقه‌ی برشی حاشیه‌ی توده‌ی معدنی آهن دارای ناهنجاری پرتوزایی مربوط به عنصر توریم است. تجزیه‌ی شیمیایی نمونه‌های این منطقه، کانی‌سازی توریم را نشان می‌دهد. با توجه به این که



آپاتیت فراوان‌ترین کانی باطله در چغارت است که یک فلورآپاتیت شفاف و دارای رنگ زرد-سبز می‌باشد. آپاتیت ریزدانه و درشت‌دانه با نسبت‌های مختلفی همراه با منیتیت وجود دارد و مهم‌ترین نوع کانسنگ در چغارت کانسنگ منیتیتی دارای آپاتیت است. از لحاظ ژئری حداقل دو نوع آپاتیت قابل تشخیص‌اند. یک نوع که از لحاظ زمانی هم‌زمان با فاز اصلی آهن اکسید اصلی تشکیل شده و به صورت بلورهای خودشکل اندازه‌های چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر وجود داشته و هم‌رشدی خوبی با منیتیت دارد. نوع دوم به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا بدون شکل در عدسی، دایک و رگچه با اندازه و ضخامت متغیر وجود دارد که کانسنگ آهن-آپاتیت را قطع می‌کند. پیریت و کوارتز به صورت یکنواخت در سرتاسر توده‌ی معدنی به صورت درون‌گیره‌هایی در منیتیت‌های اولیه یا به صورت بلورهای کامل در ماده معدنی و سنگ درون‌گیر وجود دارد [۱۸].

مجموعه‌ی نفوذی به وسیله آلکالی ریولیت احاطه شده است. همه‌ی این سنگ‌ها تنوع شدیدی از لحاظ کانی‌شناسی، بافتی و ترکیب با درجه‌های متغیری از دگرسانی گرمایی نشان می‌دهند. میزان دگرسانی به وسیله‌ی توسعه‌ی گسترده‌ی آلکالی آمفیبول‌ها منعکس می‌شود. توده‌ی ماده‌ی معدنی و سنگ درون‌گیر دگرگون شده به وسیله‌ی تعدادی دایک دیابازی قطع شده است. دشتی که کانسار چغارت و سنگ‌های درون‌گیر آتشفشانی و نفوذی دگرگون شده را دربرمی‌گیرد با ضخامت ۱۵۰ متر، متشکل از سازندهای کواترنری و آبرفت‌های عهد حاضر (ماسه‌های ریزدانه و گراول، بولدرهای منیتیتی، ژپس و تکه‌هایی از سنگ‌های نفوذی) است. در شش کیلومتری غرب کانسار چغارت گسل پشت بادام قرار دارد؛ این گسل، کانسار چغارت را از توالی ضخیم سنگ‌های مزوزوئیک (با ضخامت ۴۰۰ تا ۶۰۰ متر) جدا می‌کند [۱۸]. نقشه‌ی زمین‌شناسی پیت معدن چغارت در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. نقشه‌ی زمین‌شناسی پیت معدن چغارت [۱۹].



۳. روش انجام پژوهش

در این پژوهش نمونه‌هایی از سنگ‌های آتشفشانی فلسیک، دایک‌های دیابازی و منطقه‌ی کانی‌سازی توریم کانسار چگارت با استفاده از تکنیک‌های طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت‌شده‌ی القایی (ICP-OES) و طیف‌سنجی جرمی (MS) در آزمایشگاه جابربن‌حیان سازمان انرژی اتمی ایران مورد تجزیه‌ی شیمیایی قرار گرفتند. لازم به ذکر است برای درک بهتر و تفسیر درست داده‌های ژئوشیمیایی از داده‌های تجزیه‌ی دیگر پژوهش‌گران در ۳ ناحیه‌ی بافق (چاه میر، کوشک، دوزخ دره، اسفوردی، سه‌چاهون، چاه گز، چادرملو و نارینگان) نیز استفاده شد [۱۶، ۱۷، ۲۰-۲۲]. نتایج تجزیه‌ی شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است. مطالعه‌های اولیه‌ی کانی‌شناسی کان‌سنگ و دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی توریم توسط میکروسکوپ نور عبوری-انعکاسی مدل Olympus CX۲۱ در آزمایشگاه کانی‌شناسی پژوهشکده‌ی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران انجام شد. مطالعه‌های دقیق‌تر کانی‌شناسی توسط سیستم ریزتجزیه‌ی ردیاب الکترونی - طیف‌سنجی طول موج پاشنده^(۵) (EPMA-WDS) مدل Cameca SX-100 در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران به انجام رسید. اندازه‌گیری‌های EPMA-WDS برای عنصر اصلی با استفاده از ولتاژ شتاب‌دهنده‌ی ۱۵ kV، جریان باریکه‌ی ۲۰ nA، قطر باریکه‌ی ۵ میکرون و زمان شمارش ۱۵ ثانیه و در مورد عناصر فرعی و جزئی اصلی با استفاده از ولتاژ شتاب‌دهنده‌ی ۲۵ kV، جریان باریکه‌ی ۲۰ nA، قطر باریکه‌ی ۳ میکرون و زمان شمارش ۳۰ ثانیه انجام شد.

۴. نتایج و بحث

۱.۴ طبقه‌بندی سنگ‌های آتشفشانی فلسیک و دایک‌های دیابازی با توجه به وجود پی‌سنگ قدیمی ایران در ناحیه‌ی بافق، رخداد ماگماتیسیم و کانه‌زایی‌های مختلف در آن، مطالعه‌های زیادی بر روی توالی آتشفشانی و ماگماتیسیم موجود در ناحیه انجام شده است. از این جمله می‌توان به مطالعه‌های بختیار [۲۳]، بروماندی [۲۴]، مهرابی [۲۵]، درویش‌زاده و آل‌طه [۲۶]، دالیران [۱۲]، رمضانی و تاگر [۲۲]، جامی [۱۶]، تراب [۱۷] و دیگر مطالعه‌های انجام شده در منطقه اشاره نمود. در اغلب موارد، عناصر با شدت میدان بالا^(۶) (HFS)، عناصر خاکی نادر، توریم و عناصر واسطه در خلال دگرسانی گرمایی شدید نامتحرک هستند [۲۷، ۲۸]. به علاوه برخی از عناصر اصلی مانند P و Ti به آسانی توسط دگرسانی گرمایی جابه‌جا نمی‌شوند ولی Ca، Na، K، Al و برخی عناصر سنگدوست یون بزرگ^(۷) LILE: Sr، Ba، Rb) به طور قابل توجهی متحرک هستند [۲۹]. Mg نیز ممکن است در حین دگرسانی متحرک باشد [۲۸]. با توجه به این که نمونه‌های سنگ‌های آتشفشانی میزبان چگارت و دایک‌های دیابازی دچار دگرسانی شده‌اند بنابراین از عناصر نامتحرک برای طبقه‌بندی و تفسیرهای پتروژنی سنگ‌های آتشفشانی میزبان و دایک‌های دیابازی استفاده می‌شود.

براساس نمودار $\log(Zr/TiO_2)$ در مقابل $\log(Nb/Y)$ ارائه شده توسط وینچستر و فلویید [۳۰]، سنگ‌های آتشفشانی میزبان بیش‌تر در محدوده‌ی ریولیت + داسیت و ریولیت قرار دارند و دو نمونه از چگارت در محدوده‌ی تراکی آندزیت واقع شده است (شکل ۲ الف). دایک‌های دیابازی در محدوده‌ی بازالت‌های قلیایی قرار می‌گیرند و دو نمونه از چگارت در محدوده‌ی بازالت واقع شده است (شکل ۲ ب). این نمودارها، طبیعت بایمدال سنگ‌های خروجی و پیروکلاستیک CVSU ناحیه‌ی بافق را به خوبی نشان می‌دهد.



خاکی نادر سبک، (La/Sm)_n، به طور میانگین ۱/۰۴ و در خاکی‌های نادر سنگین، (Gd/Yb)_n، به طور میانگین ۱/۵ است، بنابراین میزان تفکیک در خاکی‌های نادر سنگین بیش‌تر از خاکی‌های نادر سبک است.

الگوی خاکی‌های نادر بهنجار شده نسبت به کندریت (شکل ۲) روندهای تفریق LREE/HREE ضعیف و ناهنجاری‌های منفی واضح Eu (۰/۱۶ تا ۰/۶۹) را برای نمونه‌های منطقه‌ی کانه‌زایی توریم نشان می‌دهد هم‌چنین در شکل ۲ مشاهده می‌شود الگوی توزیع عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت در ریولیت‌های چگارت و منطقه‌ی کانه‌زایی توریم تقریباً با هم مشابه هستند. ناهنجاری منفی Eu در الگوهای عناصر خاکی نادر منطقه‌ی کانه‌زایی توریم چگارت می‌تواند از منشأ سیال به ارث برده شده باشد. بدین صورت که سیال‌ها از سنگ‌هایی منشأ گرفته‌اند که در آن‌ها Eu^{+۲} به وسیله‌ی پلاژیوکلاز حذف شده است یا در حال تعادل با آن‌ها بوده‌اند. به علت آن که Eu^{+۲} جانشین Ca^{+۲} در پلاژیوکلاز می‌شود، تبلور پلاژیوکلازهای اولیه در ماگما، Eu^{+۲} را از سیستم حذف خواهد کرد و بنابراین سیالی که بعداً جدا می‌شود، از لحاظ Eu تهی شده خواهد بود. به علاوه اگر یک سیال با سنگ‌های پلاژیوکلازدار در حال تعادل باشد و پلاژیوکلاز را تجزیه نکند، تهی‌شدگی Eu در سیال به ارث برده خواهد شد. ناهنجاری منفی Eu می‌تواند حاکی از شرایط کاهش سیال کانه‌زا و محیط باشد. از آنجایی که در مجموعه‌ی کانیایی منطقه‌ی کانه‌زایی توریم به همراه توریت، کانی‌های منیتیت، پیریت و کالکوپیریت مشاهده شد، ناهنجاری منفی Eu به احتمال زیاد به دلیل شرایط کاهش سیال و محیط نهشت است.

الگوهای عناصر جزئی ناسازگار بهنجار شده نسبت به گوشته‌ی اولیه (شکل ۲ ج)، برای نمونه‌های برداشت شده از منطقه‌ی کانه‌زایی توریم چگارت ناهنجاری منفی واضح در Nb-Ta، Zr-Hf و Ti و ناهنجاری مثبت در Th نشان می‌دهد. هم‌چنین در شکل ۲ ج مشاهده می‌شود الگوی توزیع عناصر جزئی ناسازگار بهنجار شده نسبت به گوشته‌ی اولیه در ریولیت‌های چگارت و منطقه‌ی کانه‌زایی توریم با هم مشابه هستند. این الگوی توزیع و هم‌چنین مشابه بودن الگوی توزیع عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت در ریولیت‌های چگارت و منطقه‌ی کانه‌زایی توریم می‌تواند حاکی از این باشد که منشأ توریم و عناصر خاکی نادر در منطقه‌ی کانه‌زایی توریم، ریولیت یا به عبارتی ماگمای ریولیتی است.

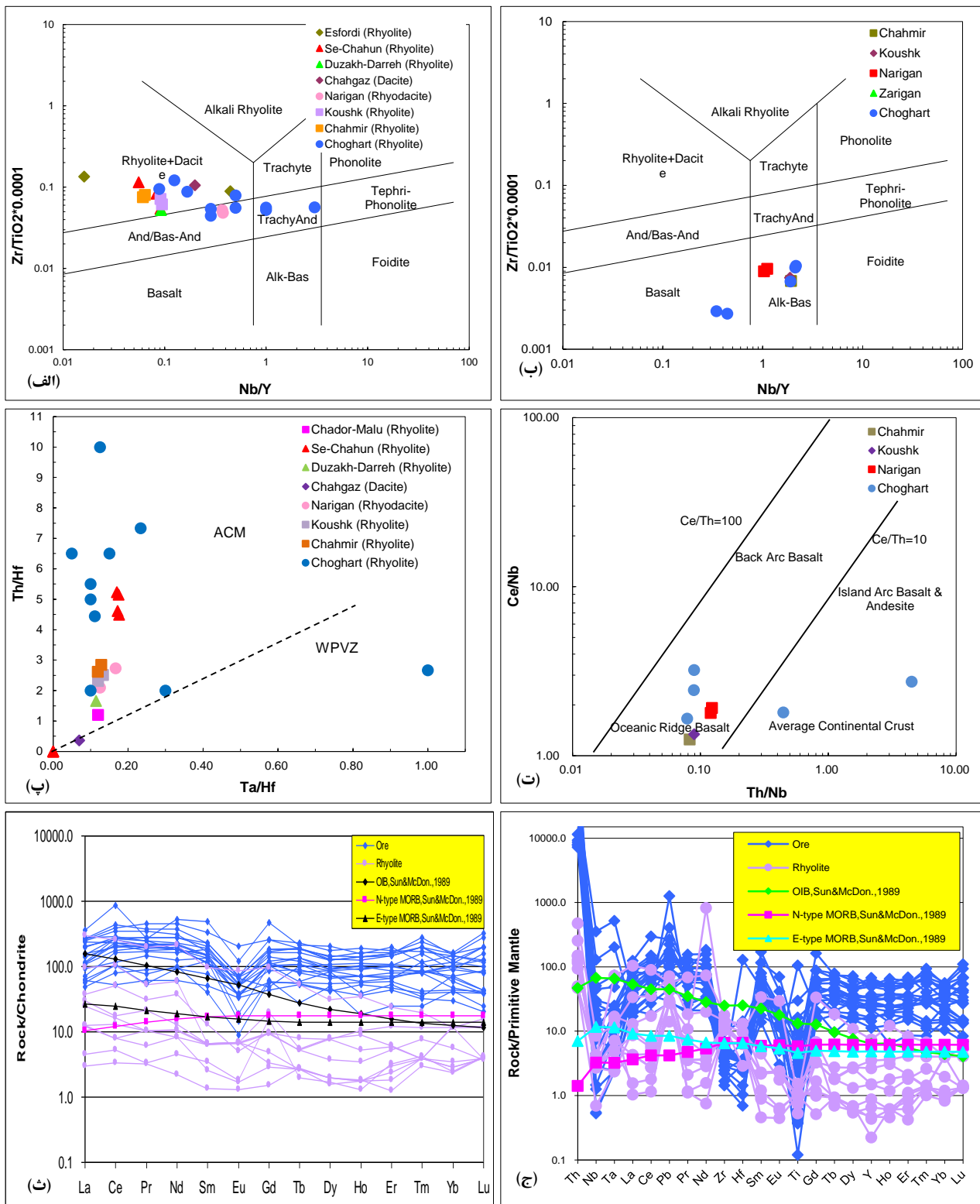
نسبت‌های عناصر با شدت میدان بالا در سنگ‌های آتشفشانی فلسیک تکامل تکتونوماگمایی یک ناحیه را نشان می‌دهد. نسبت‌های Ta/Yb، Th/Yb، Ta/Hf، Th/Hf، Th/Ta در تعیین محیط تکتونیکی پدیده‌ی آتشفشانی کمک می‌کنند و محیط‌های کمان‌های اقیانوسی، حاشیه‌های قاره‌ای فعال و منطقه‌ی آتشفشانی درون صفحه‌ای را از هم تفکیک می‌کند [۳۱]. ریولیت‌های ناحیه‌ی بافق و به ویژه چگارت از لحاظ Th و عناصر خاکی نادر نسبت به Nb، Ta و عناصر خاکی نادر سنگین غنی‌شدگی نشان می‌دهد که این‌ها ویژگی‌های مرتبط با منطقه‌ی فرورانش هستند (شکل ۲ ج) [۳۱]. شکل ۲ پ نشان می‌دهد که ریولیت‌های ناحیه‌ی بافق و به ویژه چگارت در محیط تکتونیکی حاشیه‌ی قاره‌ای تشکیل شده‌اند.

نسبت Ce/Nb در مقابل Th/Nb از سوندرز و تارنی [۳۲] به عنوان یک تفکیک‌کننده‌ی مفید محیط تکتونیکی برای سنگ‌های مافیک است. زیرا این عناصر در حین فرایندهای دگرسانی نامتحرک هستند. براساس این نمودار تفکیک‌کننده‌ی دایک‌های دیابازی ناحیه‌ی بافق در محدوده‌ی بازالت‌های پشت قوسی قرار می‌گیرند، به استثنای دو نمونه از چگارت که دارای غلظت توریم بیش‌تری است (شکل ۲ ت).

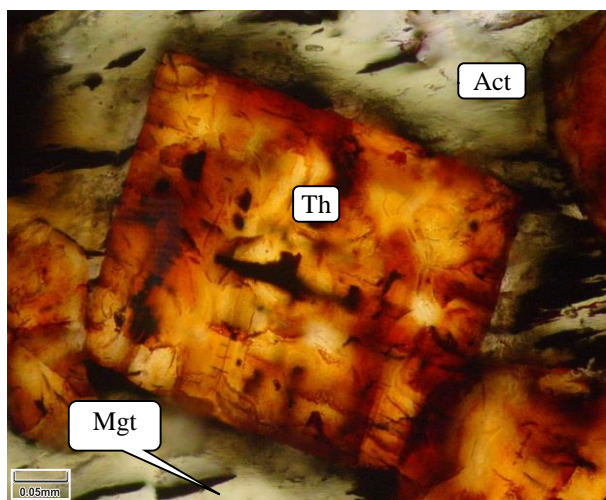
۳.۴. ژئوشیمی منطقه‌ی کانه‌زایی توریم

در سیستم‌های گرمابی، عناصر خاکی نادر برای پی بردن به منبع سیال‌های کانه‌ساز و فرایندهای برهم‌کنش سیال-سنگ استفاده می‌شوند. به علت نقطه‌ی ذوب بالا و پایداری ژئوشیمیایی، عناصر خاکی نادر هنگام دگرگونی به سختی متحرک می‌شوند، بنابراین الگوی خاکی‌های نادر این سنگ‌ها، خصوصیات سنگ اولیه را نشان می‌دهد [۳۳]. هم‌چنین داده‌های خاکی‌های نادر خصوصیات خاکی‌های نادر سیال کانه‌ساز در تعادل با سنگ در هنگام کانی‌سازی را نشان می‌دهد [۳۴].

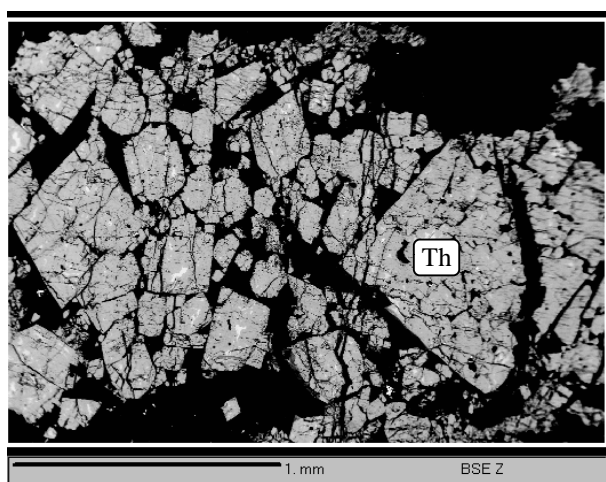
مجموع مقادیر عناصر خاکی نادر نمونه‌های منطقه‌ی کانه‌زایی توریم دامنه‌ی ۱۸۰ تا ۱۲۰۵ ppm را نشان می‌دهد که مقدار عناصر خاکی نادر سبک (LREE) بر مقدار خاکی‌های نادر سنگین (HREE) غلبه دارد. هم‌چنین تفکیک مشخصی بین خاکی‌های نادر سبک و سنگین دیده می‌شود و مقدار (La/Yb)_n از ۰/۷۲ تا ۵/۱۱ متغیر است که نشان‌دهنده‌ی آن است که سیال‌های مسئول کانی‌سازی در خاکی‌های نادر سبک، غنی شده‌اند [۳۵]. درجه‌ی تفکیک خاکی‌های نادر سبک، (La/Sm)_n، از ۰/۳۹ تا ۲/۱۶ متغیر است. درجه‌ی تفکیک بین



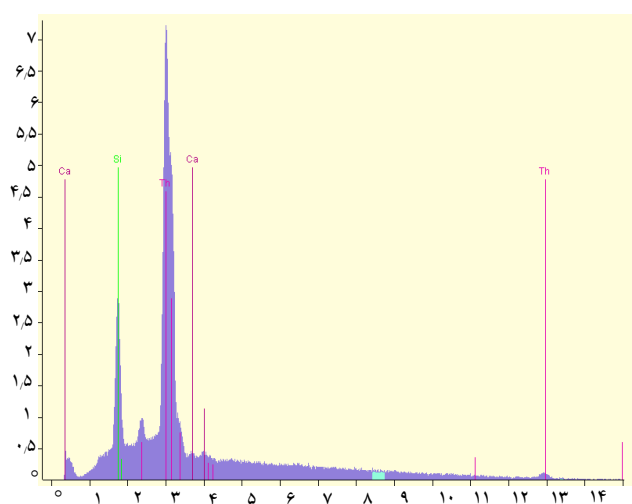
شکل ۲. الف و ب) موقعیت نمونه‌های سنگ‌های آتشفشانی فلسیک و دایک‌های دیابازی در نمودارهای Y/Nb در مقابل Zr/TiO₂ (از وینچستر و فلوید [۳۰])، پ) نمودار تفکیک‌کننده Th/Hf در مقابل Ta/Hf برای ریولیت‌ها (شاندل و گورتون [۳۱])، ت) نمودار تفکیک‌کننده Ce/Nb در مقابل Th/Nb برای دایک‌های دیابازی (سوندرز و تارنی [۳۲])، ث) دیاگرام عنکبوتی عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت برای نمونه‌های منطقه‌ای کان‌زایی توریم و ریولیت چغارت (سان و مک دانو [۳۶])، ج) نمودارهای عنکبوتی عناصر غیر حساس به دگرسانی بهنجار شده نسبت به گوشته‌ی اولیه برای نمونه‌های منطقه‌ای کان‌زایی توریم و ریولیت چغارت (سان و مک دانو [۳۶]).



(الف)



(ب)



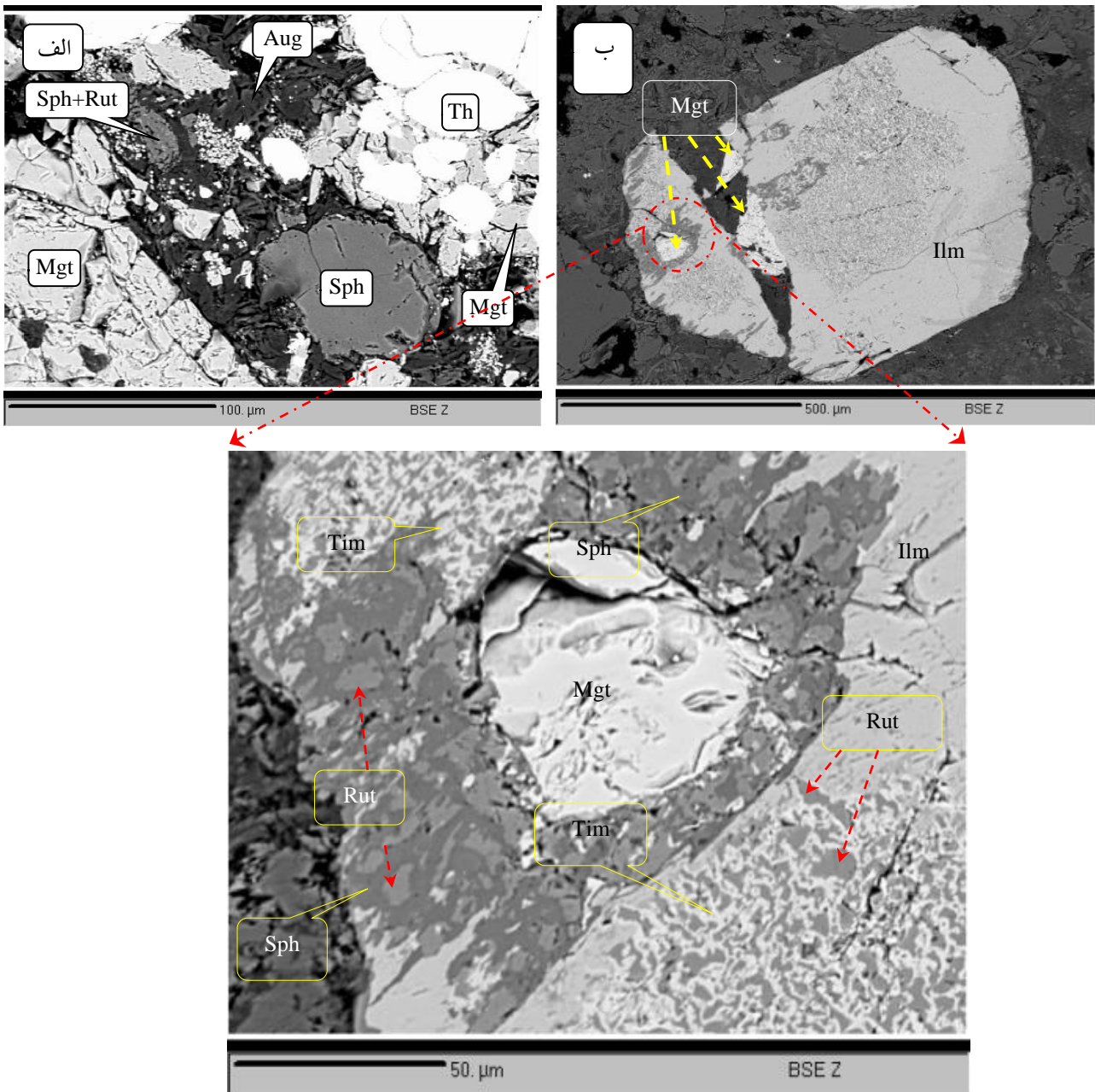
(ج)

شکل ۳. ریزنگارهای توریت: الف) ریزنگار الکترونی عبوری کانی توریت (منشورهای موازی)، ب) ریزنگار الکترون پس‌پراکندگی^(۹) (BSE) کانی توریت و ج) طیف پرتو ایکس پاشنده‌ی انرژی^(۱۰) EDS کانی توریت (Th=توریت، Act=اکتیولیت، Mgt=منیتیت).

۴.۴. کانی‌شناسی منطقه‌ی کانی‌سازی توریم کانسار چغارت

کانی‌سازی توریم در حاشیه‌ی جنوب شرقی توده‌ی معدنی آهن بین گسل‌های F_۵ و F_۶ در یک منطقه‌ی برشی واقع شده (شکل ۱) و این منطقه‌ی برشی هم بخشی از دگرسانی / متاسوماتیسم سدیک و سدیک-کلسیک و هم قسمتی از ریولیت میزبان کانی‌سازی آهن را قطع نموده است. مطالعه‌های میکروسکوپی نور عبوری-انعکاسی، ریزتجزیه‌ی ردیاب الکترونی نمونه‌های منطقه‌ی کانی‌سازی توریم نشان می‌دهد که توریت کانی اصلی توریم است (شکل ۳) و به صورت رگچه‌ای، پرکننده‌ی فضای خالی و درون‌گیره در کانی‌های دیگر مانند کلینوپروکسن و آلپیت وجود دارد. لازم به ذکر است کانی توریت به مقدار خیلی کم هم‌زمان با کانی‌سازی آهن در دگرسانی سدیک-کلسیک مرتبط با کانی‌سازی آهن تشکیل شده است؛ این نسل از توریت قبل از کانی‌سازی توریم اتفاق افتاده است. کانی دیگر میزبان توریم، اسفن است که از لحاظ کمیت دارای اهمیت کم‌تری نسبت به توریت است و هم‌چنین به عنوان کانی توریم‌دار^(۸) محسوب می‌شود [۳۷]. اسفن به دو صورت وجود دارد. اسفن‌های اولیه، اسفن‌هایی که به صورت بلورهای مجزا هستند (شکل ۴ الف) و احتمالاً مستقیماً از سیال کانه‌زا نهشته شده‌اند و نوع دیگر اسفن‌ها حاصل از دگرسانی ایلمنیت هستند (شکل ۴ ب). سیال کانه‌زای غنی از کلسیم باعث دگرسانی ایلمنیت شده و با ورود کلسیم و سیلیسیم، ایلمنیت به اسفن و روتیل تبدیل شده و آهن خارج شده‌ی حاصل از دگرسانی ایلمنیت به صورت منیتیت نهشته شده است (شکل ۴ ب) و در برخی قسمت‌ها ایلمنیت به روتیل و تیتانومنییت تبدیل شده است (شکل ۴ ب). نهشت منیتیت حاکی از دمای نسبتاً بالای سیال کانه‌زا است. منیتیت هم به صورت هم‌مرز با کانی‌های دیگر و هم به صورت پرکننده‌ی شکستگی‌های توریت وجود دارد و حاکی از این است که این کانی نسبت به توریت دیرتر تشکیل شده و احتمالاً آهن آن از دگرسانی ایلمنیت تأمین شده است.

فاز اکسیدی در منطقه‌ی کانی‌سازی توریم کانسار چغارت شامل: منیتیت، روتیل، تیتانومنییت، ایلمنیت، و به مقدار خیلی جزیی هماتیت است. برخی از این کانی‌ها مانند تیتانومنییت پیش از تشکیل توریت و با تشکیل دگرسانی سدیک-کلسیک مرتبط با کانی‌سازی آهن تشکیل شده‌اند. منیتیت از کانی‌های اکسیدی است که به وفور در برخی از مقاطع دیده می‌شود.



شکل ۴. ریزنگارهای اسفن، الف) ریزنگار الکترونی پس‌پراکندگی (BSE) کانی اسفن که احتمالاً مستقیماً از سیال نهشته شده است، ب) ریزنگار الکترونی پس‌پراکندگی اسفن حاصل از دگرسانی ایلمنیت. در این ریزنگار در قسمتی ایلمنیت تبدیل به اسفن و روتیل شده و یک بخش دیگر به تیتانو منیتیت و روتیل تبدیل شده و آهن خارج شده از شبکه‌ی ایلمنیت به صورت منیتیت متبلور شده است. (Th= توریت، Tim= تیتانو منیتیت، Aug= اوژیت، Py= پیریت، Ilm= ایلمنیت، Mgt= منیتیت، Sph= اسفن، Rut= روتیل).

دو مرحله‌ی زمانی تشکیل شده است: گالن نسل اول که پاراژنز با کانی‌سازی توریم و همراه با پیریت و کالکوپیریت است و از لحاظ مقدار خیلی کم‌تر از آن‌ها است. گالن نسل دوم در مطالعه‌های ردیاب الکترونی مشاهده شد و پس از کانی‌سازی توریم تشکیل شده و عموماً در فضاهاى ریز خالی و حاشیه‌ی کانی توریت وجود دارد.

منطقه‌ی کانی‌سازی توریم کانسار چگارت دارای پاراژنز کانی‌شناسی سولفیدی بسیار ساده‌ای است، که شامل پیریت، کالکوپیریت و گالن است. پیریت مهم‌ترین کانی سولفیدی منطقه‌ی کانی‌سازی توریم در کانسار چگارت است. کالکوپیریت همراه پیریت در مقاطع دیده می‌شود اما فراوانی بسیار کم‌تری نسبت به پیریت دارد. کالکوپیریت به شکل‌های مختلف و عمدتاً به شکل رگچه‌های بسیار ظریف در مقاطع دیده می‌شود. گالن در

**۵.۴. دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی توریم و توالی پاراژنتیکی**

به طور کلی می‌توان گفت دو نوع دگرسانی عمده در منطقه‌ی کانی‌سازی توریم برشی چگارت مشاهده شد. نوع اول دگرسانی آلپیت \pm ارتوکلاز + کالک سیلیکات (اکتینولیت - اوژیت - دیوپسید) + کربنات (کلسیت) + منیتیت + پیریت \pm کالکوپیریت \pm گالن + اسفن + روتیل \pm میکروکلین \pm آپاتیت (دگرسانی Na-Ca-Fe) تشخیص داده شد. این دگرسانی از لحاظ ترکیب کانی‌شناختی ولی نه از لحاظ میزان گستردگی، قابل مقایسه با دگرسانی Na-Ca مشاهده شده در قلمروهای ذخیره‌های آهن اکسید-مس - طلا در استرالیا (مثلاً در ناحیه‌ی کلانکوری^(۱۱) [۳۸]) و در دیگر نقاط دنیا است. نهشت توریم با این نوع دگرسانی در ارتباط است. نوع دوم رگه و رگچه‌های کربنات (کلسیت) \pm سیلیسی (کوارتز) است که از لحاظ زمانی پس از دگرسانی نوع اول بوده و آن را قطع نموده است.

توالی پاراژنتیکی یک کانسار، ترتیب تشکیل کانی‌ها و تقدم و تأخر زمانی حوادثی را که باعث تشکیل کانسار شده ارایه می‌دهد. یک توالی پاراژنتزی باید شرایطی که فازها براساس آن‌ها پدید آمده یا به تعادل رسیده‌اند، را بیان کند. علاوه بر کانه‌ها، این توالی باید زمان شروع نهشت کانی‌های باطله و زمان نسبی نهشت آن‌ها را نیز مشخص کند. بر اساس مشاهده‌های صحرایی، بررسی نمونه‌های دستی، مطالعه‌های میکروسکوپی نور عبوری - انعکاسی و ریزتجزیه‌ای ردیاب الکترونی - طیف‌سنجی طول موج پاشنده، (EPMA-WDS) توالی پاراژنتیکی کانی‌سازی توریم در جدول ۲ آمده و توصیف کلی آن به شرح ذیل می‌باشد:

- مرحله‌ی قبل از کانی‌سازی توریم: این مرحله شامل کانی‌سازی آهن و دگرسانی سدیک - کلسیک مرتبط با آن است. از آنجایی که کانی‌سازی توریم بر روی کانسنگ آهن تأثیر قابل توجهی نگذاشته و عمدتاً بر روی دگرسانی سدیک - کلسیک مرتبط با کانی‌سازی آهن تأثیر گذاشته است در نتیجه در ترسیم و توصیف پاراژنتیکی کانی‌سازی توریم مرحله‌ی قبل از کانی‌سازی دگرسانی سدیک - کلسیک در

نظر گرفته شده است. کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی دگرسانی سدیک - کلسیک شامل آلپیت (سفید رنگ)، دیوپسید، اکتینولیت، کلسیت، منیتیت، ایلمنیت، تیتانومنیتیت، اسفن، آپاتیت و توریت (به مقدار خیلی کم و به صورت پراکنده) هستند.

- مرحله‌ی کانی‌سازی توریم: این مرحله توأم با برشی شدن دگرسانی سدیک - کلسیک مرتبط با کانی‌سازی آهن و به مقدار خیلی کم ریولیت میزبان چگارت است. کانی اصلی توریم در آن توریت است و عمدتاً به صورت رگچه و پرکننده‌ی فضاهای خالی وجود دارد. البته مقادیری از توریم می‌تواند وارد شبکه‌ی کانی‌هایی مانند اسفن و روتیل شده باشد. در این مرحله همانند دگرسانی سدیک - کلسیک مرتبط با کانی‌سازی آهن در ابتدا آلپیت متبلور شده است ولی آلپیت مرحله‌ی کانی‌سازی توریم گواشی تا قرمز رنگ است. دیگر کانی‌های این مرحله شامل منیتیت، تیتانومنیتیت، پیریت، کالکوپیریت، گالن (به مقدار ناچیز)، اوژیت، دیوپسید، اکتینولیت، کلسیت، میکروکلین، ارتوکلاز، آپاتیت (به مقدار ناچیز) هستند. به دنبال تشکیل آلپیت، اوژیت و اکتینولیت، میزان سدیم و کلسیم سیال کاهش یافته و باعث افزایش نسبت پتاسیم در سیال شده که در نتیجه‌ی آن میکروکلین و ارتوکلاز تشکیل شده است.

- مرحله‌ی دگرسانی تأخیری: این مرحله عمدتاً شامل رگچه‌های تأخیری کوارتز و کلسیتی است که هر دو مرحله‌ی کانی‌سازی آهن و توریم در چگارت را قطع نموده است. مقادیر خیلی کمی گالن به صورت پرکننده‌ی فضای‌های خالی کانی توریت وجود دارد که احتمالاً در نتیجه‌ی آزاد شدن سرب حاصل از واپاشی توریم است که از شبکه‌ی توریت خارج شده و با گوگرد محیط باعث تشکیل گالن شده است. تالک، سرپانتین و کلریت حاصل دگرسانی دیوپسید و اوژیت هستند.

**جدول ۲.** توالی پاراژنتیکی مربوط به کانی‌سازی توریم در کانسار چغارت

مرحله‌ها		کانی‌ها	قبل از کانه‌سازی	کانی‌سازی توریم	دگرسانی تاخیری
کانه‌ها	مگنتیت	نوع ۱	██████████	██████████	
		نوع ۲		██████████	
	توریت	نوع ۱		██████████	
		نوع ۲		██████████	
	تیتانومگنتیت	نوع ۱	██████████		
		نوع ۲			██████████
	ایلمنیت		██████████		
	پیریت				██████████
	کالکوپیریت				██████████
	گالن	نوع ۱			██████████
		نوع ۲			██████████
	هماتیت				██████████
	اسفن	نوع ۱	██████████		██████████
		نوع ۲			██████████
روتیل				██████████	
کانی‌های دگرسانی	آلیت	نوع ۱	██████████	██████████	
		نوع ۲		██████████	
	دیوپسید	نوع ۱	██████████		██████████
		نوع ۲			██████████
	اوژیت و اژرین				██████████
	اکتینولیت	نوع ۱	██████████		██████████
		نوع ۲			██████████
	کلسیت	نوع ۱	██████████		██████████
		نوع ۲			██████████
		نوع ۳			██████████
	میکروکلین و ارتوکلاز				██████████
	کوارتز				██████████
	آپاتیت	نوع ۱	██████████		██████████
		نوع ۲			██████████
کلریت، تالک و سربانتین				██████████	

۵. نتیجه‌گیری

براساس مشاهده‌های صحرائی، مطالعه‌های میکروسکوپی الکترون عبوری-انعکاسی و ریزردیاب الکترونی مشخص شد که کانی‌سازی توریم پس از تشکیل توده‌ی معدنی آهن اتفاق افتاده است.

کانی اصلی توریم در منطقه‌ی کانی‌سازی توریم در چغارت توریت است و به صورت رگچه‌ای، پرکننده‌ی فضای خالی و درون‌گیره در کانی‌های دیگر مانند کلینوپیروکسن و آلیت وجود دارد. کانی دیگر میزبان توریم، اسفن است که به لحاظ کمیت دارای اهمیت کم‌تری نسبت به توریت است.

ریولیت‌های ناحیه‌ی بافق و هم‌چنین چغارت از لحاظ تشکیل موقعیت تکنونیک‌ی حاشیه‌ی قاره‌ای فعال را نشان می‌دهند و دایک‌های دیابازی ناحیه‌ی بافق و چغارت محیط تکنونیک‌ی پشت قوسی را نشان می‌دهد که بیان‌گر تکامل ناحیه‌ی بافق در ارتباط با فرورانش پوسته‌ی اقیانوسی تئیس اولیه به زیر خردقاره‌ی ایران مرکزی است که در نتیجه‌ی آن سنگ‌های گرانیتوتیدی و ریولیت‌های کمان-قاره‌ای و به دنبال آن دایک‌های دیابازی حوضه‌ی پشت قوسی تشکیل شده است.



پی‌نوشت‌ها

1. Kiruna Type
2. Malmberget
3. Grängesberg
4. Cambrian Volcano-Sedimentary Unit (CVSU)
5. Electron Probe Micro Analyzer- Wavelength- Dispersive Spectroscopy (EPMA-WDS)
6. High Field Strength Elements (HFS)
7. Large- Ion Lithophile Elements (LILE)
8. Thorium Bearing Mineral
9. Back-Scattered Electron (BSE)
10. Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)
11. Cloncurry District, Northwest Queensland, Australia

مجموعه‌ی کانی‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی توریم در چغارت شامل آلپیت \pm ارتوکلاز + کالک سیلیکات (اکتینولیت - اوژیت - دیوپسید) + کربنات (کلسیت) + منیتیت + پیریت \pm کالکوپیریت \pm گالن + اسفن + روتیل \pm میکروکلین \pm آپاتیت (دگرسانی Na-Ca-Fe) تشخیص داده شد. این دگرسانی از لحاظ ترکیب کانی‌شناختی ولی نه از لحاظ میزان گسترش، قابل مقایسه با دگرسانی Na-Ca مشاهده شده در قلمروهای IOCG در استرالیا (مثلاً در ناحیه کلانکوری) و در دیگر نقاط دنیا است.

ناهنجاری‌های منفی واضح Eu (0.16 تا 0.69) برای نمونه‌های منطقه‌ی کانه‌زایی توریم مشاهده شد. ناهنجاری منفی Eu در الگوهای REE منطقه‌ی کانه‌زایی توریم می‌تواند از سیال به ارث رسیده باشد یا این که به دلیل شرایط کاهشی باشد ولی در منطقه‌ی کانی‌سازی توریم چغارت، به دلیل شرایط کاهشی سیال کانه‌زا و محیط است و این موضوع به واسطه‌ی وجود کانی‌های منیتیت، پیریت و کالکوپیریت به صورت پارائز به همراه توریت در منطقه‌ی کانه‌زایی توریم، تأیید می‌شود.

عمر توف‌های ریولیتی میزان کانسارهای IOA ناحیه‌ی بافق، ۵۲۸ میلیون سال است که هم‌سن با آپاتیت‌های مرتبط با کانسنگ آهن آن‌ها (با عمر ۵۲۷-۵۳۹ میلیون سال) [۶] هستند و هم‌چنین عمرسنجی هسته‌ای موناژیت کان‌سنگ منیتیت- آپاتیت کانسار چغارت با استفاده از زنجیره‌های Th-U-Pb میانگین سنی ۵۱۵-۵۲۹ میلیون سال را نشان می‌دهد [۱۷] که حاکی از ارتباط بین ماگماتیسیم فلسیک کمان- قاره‌ای کامبرین پیشین با تشکیل ذخیره‌های IOA ناحیه‌ی بافق و هم‌چنین ارتباط آن با کانی‌سازی منیتیت- آپاتیت و توریم در کانسار چغارت است.

الگوی توزیع عناصر جزئی ناسازگار بهنجار شده نسبت به گوشته‌ی اولیه در ریولیت‌های چغارت و منطقه‌ی کانه‌زایی توریم و هم‌چنین مشابه بودن الگوی توزیع عناصر حاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت در ریولیت‌های چغارت و منطقه‌ی کانه‌زایی توریم می‌تواند حاکی از این باشد که منشأ توریم، ریولیت یا به عبارتی ماگمای ریولیتی کمان- قاره‌ای است.



- [1] A. Dehghani, Geological Prospecting of Choghart Deposit, Report of Iran Central Iron Ore Company (in Persian), (2011).
- [2] B. Mehrabi, Mineralogy and Genesis of Koushk Pb-Zn Deposit (Bafq) M.Sc. Thesis, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran (in Persian with English Abstract) (1991).
- [3] A. Darvishzadeh, B. Ale-Taha, Late Precambrian Magmatism and Tectono-Magmatism in Centra, (1996).
- [4] P.J. Williams, P.J. Pollard, Australian Proterozoic Iron Oxide-Cu-Au Deposits: an Overview with New Metallogenic and Exploration Data from the Cloncurry District, Northwest Queensland, Exploration Mineral Geology, **10** (2001) 191–213.
- [5] M.P. Foose, J.M. McLelland, Proterozoic Low-Ti Iron-Oxide Deposits in New York and New Jersey; Relation to Fe Oxide (Cu-U-Au-Rare Earth Element) Deposits and Tectonic Implications. Geology, **23** (1995) 665–668.
- [6] M. Chiaradia, D. Banks, R. Cliff, R. Marschik, A. De Haller, Origin of Fluids in Iron Oxide-Copper-Gold Deposits: Constraints from $\delta^{37}\text{Cl}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and Cl/Br, Mineralium Deposita, **41** (2006) 565-573.
- [7] M.D. Barton, Iron Oxide (-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) Systems. In: Holland, H., Turekian, K. (editors). Treatise of Geochemistry, **13** (2014) 515-536.
- [8] R. Frietsch, J.A. Perdahl, Rare Earth Elements in Apatite and Magnetite in Kiruna-type Iron Ores and Some Other Iron Ore Types. Ore Geology Reviews. **9** (1995) 489–510.
- [9] H.G. Stosch, R.L. Romer, F. Daliran, D. Rhede, Uranium-Lead Ages of Apatite from Iron Oxide Ores of the Bafq District. East-Central Iran. Mineralium Deposita. **46** (2011) 9-21.
- [10] F. Henríquez, H.R. Naslund, J.O. Nyström, W. Vivallo, R. Aguirre, F.M. Dobbs, H. Lledó, New Field Evidence Bearing on the Origin of the El Laco Magnetite Deposit, Northern Chile. A Discussion. Economic Geology, **98** (2003) 1497–1500.
- [11] A.L. Rhodes, N. Oreskes, S. Sheets, Geology and Rare Earth Element Geochemistry of Magnetite Deposits at El Laco, Chile. In: Skinner, B.J. (editor). Geology and Ore Deposits of the Central Andes. Society of Economic Geology, Special Publication, **7** (1999) 299–332.
- [12] R.G. Skirrow, R. Sillitoe, D. Burrows, New Field Evidence Bearing on the Origin of the El Laco Magnetite Deposit, Northern Chile. Economic Geology. **97** (2002) 1101–1109.
- [13] L. Corriveau, P. Williams, H. Mumin, Alteration Vectors to IOCG Mineralization from Uncharted Terranes to Deposits. In: Corriveau, L., Mumin, H. (editors). Exploring for Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Canada and Global analogues. Geological Association of Canada, Short Course Notes, **20** (2010) 87–106.
- [14] P.J. Williams, Classifying IOCG Deposits. In: Exploring for Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Canada and Global Analogues. Geological Association of Canada, Short Course Notes, **20** (2010) 11–19.
- [15] F. Daliran, The Magnetite- Apatite Deposit of Mishdovan, East Central Iran. An Alkali Rhyolite Hosted, 'Kiruna Type' Occurrence in the Infracambrian Bafq Metallotect (Mineralogic, Petrographic and Geochemical Study of the Ores and the Host Rocks). PhD Thesis, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, (1990) 248.
- [16] F. Daliran, H.G. Stosch, P. Williams, 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. (editors). Smart Science for Exploration and Mining: Proceedings of the 10th Biennial SGA Meeting, Townsville, Australia, 17th–20th August (2009).
- [17] F. Daliran, H.G. Stosch, P. Williams, H. Jamli, M.B. Dorri, Early Cambrian Iron Oxide-Apatite-REE (U) Deposits of the Bafq District, East-Central Iran. In: Corriveau, L., Mumin, H. (editors). Exploring for Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Canada and Global analogues. Geological Association of Canada, Short Course Notes, **20** (2010) 143–155.



- [18] H. Förster, A. Jafarzadeh, The Bafq Mining District in Central Iran: a Highly Mineralized Infracambrian Volcanic Field. *Economic Geology*. **89** (1994) 1697–1721.
- [19] M. Jami, Geology, Geochemistry and Evolution of the Esfordi Phosphate- Iron Deposit, Bafq Area, Central Iran. PhD Thesis, The University of New South Wales, Australia, (2005) 220.
- [20] F. Torab, Geochemistry and Metallogeny of Magnetite- apatite Deposits of the Bafq Mining District, Central Iran. PhD Thesis, Clausthal University of Technology: the Faculty of Energy and Economic Sciences (2008).
- [21] F. Moore, S. Modabberi, Origin of Choghart Iron Oxide Deposit, Bafq Mining District, Central Iran: New Isotopic and Geochemical Evidence. *Journal of sciences Islamic Republic of Iran*, **14(3)** (2003) 259-270.
- [22] Z. Mirzaei Beni, M.H. Emami, S.J. Sheikhzakariaee, A. Nasr Esfahani, Petrography of Plutonic Rocks in the Late Cambrian (Rizu Series), Se-chahun Iron Oxide Deposite, Bafq Mining District, Central Iran. *Biodiversity and Environmental Sciences (JBES)*. **5(4)** (2014) 610-616.
- [23] A. Rajabi, C. Canet, E. Rastad, P. Alfonso, Basin Evolution and Stratigraphic Correlation of Sedimentary-Exhalative Zn–Pb Deposits of the Early Cambrian Zarigan-Chahmir Basin, Central Iran. *Ore Geology Reviews*. **64** (2015) 328–353.
- [24] J. Ramezani, R.D. Tucker, The Saghand Region, Central Iran: U-Pb Geochronology, Petrogenesis and Implications for Gondwana Tectonics. *American Journal of Science*. **303** (2003) 622-665.
- [25] I. Bachtiar, Petrographische und Lagerstätttenkundliche Untersuchungen des Narigan- Granits und Seines Geologischen Rahmens bei Bafq (Zentraliran). PhD Thesis. Aachen, Germany, (1973) 118.
- [26] H. Borumandi, Petrograpische and Lagerstätten Kundliche Unter Suchungen der Esfordi-formation Zwischen Mishdovan und Kushk bei Yazd/zentral Iran. PhD Thesis, University of Achen, Germany, (1973) 174.
- [27] C.J. Hawkesworth, S.P. Turner, F. McDermott, D.W. Peate, P. Van Calsteren, U-Th Isotopes in Arc Magmas: Implications for Element Transfer from Subducted Crust. *Science*. **276** (1997) 551-555.
- [28] J.X. Zhou, Geochemistry and Petrogenesis of Igneous Rocks Containing Amphibole and Mica: A Case Study of Plate Collision Involving Scotland and Himalayas. *Science Press, New York and Beijing*, (1999) 41-72.
- [29] R.E. Smith, S.E. Smith, Comments on the Use of Ti, Zr, Y, Sr, K, P and Na in Classification of Basaltic Magmas. *Earth and Planetary Science Letters*. **32** (1976) 114-120.
- [30] J.A. Winchester, P.A. Floyd, Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geology*. **20** (1977) 325–343.
- [31] E.S. Schandl, M.P. Gorton, Application of High Field Strength Elements to Discriminate Tectonic Settings in VMS Environments. *Economic Geology*. **97** (2002) 629-642.
- [32] A.D. Saunders, J. Tarney, Back-Arc Basins. In: Floyd, P.A. (editor). *Oceanic Basalts*. Blackie, Glasgow, (1991) 219-263.
- [33] V. Daux, J.L. Crovisier, C. Hemond, J.C. Petit, Geochemical Evolution of Basaltic Rocks Subjected to Weathering: Fate of the Major Elements, Rare Earth Elements, and Thorium. *Geochimica Cosmochimica Acta*. **58** (1994) 4941-4954.
- [34] C. Liu, J. Liu, J. Wang, L. Yang, J. Wu, L. Jia, Geochemical Characteristics of Rare Earth Elements and Their Implications for the Huachanggou Gold Deposit in Shaanxi Province, China. *Journal of Rare Earths*. **31** (2013) 215- 226.
- [35] T.S. Giritharan, V. Rajamani, REE Geochemistry of Ore Zones in the Archean Auriferous Schist Belts of the Eastern Dharwar Craton, south India. *Earth System Science*. **110(2)** (2001) 143-159.



- [36] S.S. Sun, W.F. McDonough, Chemical and Isotopic Systematic of Oceanic Basalt: Implication for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (editors). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publication. **42** (1989) 313-345.
- [37] J.W. Frondel, M. Fleischer, A Glossary of Uranium- and Thorium-bearing Minerals. U. S. Atomic Energy Commission. U.S. Geological Survey Bulletin 1009-F, (1950).
- [38] P.J. Williams, M.D. Barton, L. Fontbote, Iron-Oxide-Copper-Gold Deposits: Geology, Space-Time Distribution, and Possible Modes of Origin. *Economic Geology*. 100th Anniversary Volume, (2005) 371-406.